

CÉLIA HANAKO KANO

**Modelagem e análise das cadeias de suprimentos globais e resilientes
baseadas em rede de Petri**

São Paulo
2015

CÉLIA HANAKO KANO

**Modelagem e análise das cadeias de suprimentos globais e resilientes
baseadas em rede de Petri**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciência

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo

2015

CÉLIA HANAKO KANO

**Modelagem e análise das cadeias de suprimentos globais e resilientes
baseadas em rede de Petri**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciência

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo

2015

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 12 de Agosto de 2015

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Kano, Célia Hanako

Modelagem e análise das cadeias de suprimentos globais e resilientes baseadas em Rede de Petri / C.H. Kano. -- São Paulo, 2015.

107 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Cadeia de suprimentos (Modelagem; Análise) 2.Redes de Petri I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Dedico este trabalho à minha mãe Sonia,
meu pai Celso e meu irmão Henrique.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a orientação do professor Paulo Eigi Miyagi, que me orientou desde a graduação, na iniciação científica e no trabalho de formatura, e que me acompanhou nesse novo desafio. Seu empenho na formação de engenheiros e sua postura sempre ética são motivos de grande admiração e respeito.

Em seguida, agradeço o suporte incondicional da minha família, que esteve do meu lado em todos os desafios pessoais, profissionais e acadêmicos que abracei. Contar com o grande coração da minha mãe, a inteligência do meu pai e a amizade do meu irmão foram fundamentais para concluir esse projeto. Agradeço também os meus avós, Massaiti, Hanako, Satiko, Motoko e Sussumu e aos meus tios, Elba e Takashi.

Agradeço também aos amigos da graduação, ao Laboratório de Sistemas de Automação e à empresa EloGroup pelo apoio. Em especial aos queridos amigos, Viviane, Caterina, Fabiola, Marta, Marina, Lucas, Ito, Mari, Natasha, Mari, Huber, Raiane e Adriana, que me apoiaram nos momentos difíceis com palavras de apoio e permitiram que essa jornada fosse trilhada sempre com mais alegria.

Por fim, um agradecimento à Escola Politécnica da USP, em especial ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, que institucionalmente viabilizaram este trabalho.

RESUMO

Em um cenário de aumento de competitividade, crescente expectativa por inovações do produto e necessidade de atender diferentes perfis de consumidores, o conceito de gerenciamento de cadeias de suprimentos globais (GSCM) surge como uma estratégia para coordenar mais eficazmente as atividades dispersas geograficamente dos sistemas produtivos. Na adoção do GSCM, as organizações devem lidar com rupturas que impactam no gerenciamento das suas atividades, tais como a interrupção de vias de transporte, pane no fornecimento de energia, desastres naturais e até ataques terroristas. Nesse contexto, o trabalho introduz um procedimento sistematizado para modelagem das cadeias de suprimentos visto como um sistema a eventos discretos e sua análise por simulação das atividades do GSCM baseada em técnicas formais como a rede de Petri (PN) e o *Production Flow Schema* (PFS). Um exemplo é também apresentado para ilustrar e comprovar as vantagens do método proposto na análise do GSCM.

Palavras-Chave: Sistema produtivo disperso. Rede de Petri. Cadeia de Suprimentos Global. Sistema a eventos discretos. Ruptura de cadeia de suprimentos. Plano de continuidade de negócios. Resiliência de cadeia de suprimentos.

ABSTRACT

In a context of increasing competition, rising of expectations for product innovations and need to satisfy different consumer needs, the concept of global supply chain management (GSCM) emerges as a strategy to more efficiently coordinate the geographically dispersed activities of production systems. Adopting GSCM, organizations have to deal with external disruptions that impact management activities, such as transport interruption, power supply failure, natural disasters and terrorist attacks. In this way, a systematized procedure for modeling supply chains as a discrete event system and simulation analysis of GSCM activities based on formal techniques, such as Petri net (PN) and Production Flow Schema (PFS) is introduced. An example is also presented to illustrate and confirm the advantages of the proposed method for GSCM analysis.

Keywords: Dispersed production system. Petri Net. Global supply chain management. Discrete event system. Supply chain disruption. Business Continuity Plan. Supply Chain resilience.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Estrutura de uma cadeia de suprimentos global.	8
Figura 2	– Díades na cadeia de suprimentos global.	16
Figura 3	– O perfil da ruptura (SHEFFI; RICE, 2005)	18
Figura 4	– Danos econômicos anuais por desastres naturais (CRED, 2013).	19
Figura 5	– Exemplo de classificação dos eventos de ruptura de uma empresa (SHEFFI; RICE, 2005)	21
Figura 6	– Exemplo de modelo proposto por SIMCHI-LEVI, SCHMIDT e WEI (2014)	22
Figura 7	– Classificação sugerida para as práticas resilientes.	23
Figura 8	– Cadeia de suprimentos no site da Stonyfield e informações do produtor de Açaí (exemplo)	25
Figura 9	– Classificações de sistema (baseado em CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008)	29
Figura 10	– Notação gráfica na PN.	33
Figura 11	– Exemplo de um processo químico (PETRI; REISIG, 2008).	33
Figura 12	– Notação gráfica do PFS.	36
Figura 13	– Exemplo de PFS (HASEGAWA; TAKAHASHI; MIYAGI, 1988).	36
Figura 14	– Abordagem <i>top-down</i> do PFS e tradução PFS/PN.	37
Figura 15	– Nível 1 do modelo SCOR (SCOR, 2012).	39
Figura 16	– PFS do SP do tipo “manufatura”.	41
Figura 17	– PFS do SP do tipo “transporte”.	42
Figura 18	– PFS do SP do tipo “suprimento”.	42
Figura 19	– PFS do SP do tipo “serviço”.	42
Figura 20	– PN do fluxo de material do <i>building block</i> do tipo “Source”.	43
Figura 21	– PN do fluxo de material e de informação do <i>building block</i> do tipo “Source”.	44
Figura 22	– PN final do <i>building block</i> do tipo “Source”.	45
Figura 23	– PN final do <i>building block</i> do tipo “Make”.	45
Figura 24	– PN final do <i>building block</i> do tipo “Deliver”.	46
Figura 25	– Etapas do procedimento proposto.	49

Figura 26	– Produção de veículos do Japão extraído de JAMA (2013). . . .	54
Figura 27	– Exportação de veículos do Japão extraído de JAMA (2013). . .	55
Figura 28	– Exportação de veículos do Japão extraído de JAMA (2013). . .	57
Figura 29	– Modelo conceitual em PFS - Nível 0.	61
Figura 30	– Modelo conceitual em PFS - Nível 1.	61
Figura 31	– Modelo conceitual em PFS - Nível 2.	61
Figura 32	– Modelo funcional em PN.	63
Figura 33	– Modelo funcional em PN do SP3.	64
Figura 34	– Critérios para a simulação definidos no HPSim.	65
Figura 35	– Desempenho do GSCM, no cenário 1.	67
Figura 36	– Desempenho do GSCM, no cenário 2.	67
Figura 37	– Evolução do estoque de produtos finais na concessionária SP4, no cenário 0.	69
Figura 38	– Evolução do estoque de produtos finais na concessionária SP4, no cenário 1.	69
Figura 39	– Evolução do estoque de produtos finais na concessionária SP4, no cenário 2.	70
Figura 40	– Evolução do estoque de matérias primas no fornecedor SP2, no cenário 1.	70
Figura 41	– Evolução do estoque de matérias primas no fornecedor SP2, no cenário 2.	71
Figura 42	– Processo simples de modelagem (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).	88
Figura 43	– Classificações de sistema (baseado em CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).	88
Figura 44	– Exemplo de um A) Sistema com estados contínuos e B) Sistema com estados discretos (SED), com a indicação dos eventos (e1, e2, e3, ...) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).	90
Figura 45	– Estrutura de detalhamento do SCOR 11.0 (SCOR, 2012).	92
Figura 46	– Modelo funcional em PN do cenário 0	93
Figura 47	– Modelo funcional em PN do cenário 1	97
Figura 48	– Modelo funcional em PN do cenário 2	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Principais causas de rupturas (baseado em Business Continuity Institute, 2014).	17
Tabela 2	- Definições de resiliência por diferentes autores.	20
Tabela 3	- Práticas resilientes indicadas na literatura.	23
Tabela 4	- Síntese dos trabalhos relevantes que abordam as cadeias de suprimentos como SED e que analisaram a ocorrência de rupturas nas operações das cadeias de suprimentos.	30
Tabela 5	- Síntese dos trabalhos relevantes que abordam as cadeias de suprimentos como SED e o uso da PN como técnica de modelagem do GSCM.	34
Tabela 6	- Interpretações para as transições e lugares (MURATA, 1989).	38
Tabela 7	- Exemplos de interpretações específicas da PN para o GSCM.	38
Tabela 8	- Descrição dos processos de negócios básicos do Nível 1 do SCOR (SCOR, 2012)	40
Tabela 9	- Modelagem proposta para cada tipo de SP.	41
Tabela 10	- Características funcionais, físicas e premissas de cada SP.	58
Tabela 11	- Premissas de cada SP.	58
Tabela 12	- Descrição das díades.	58
Tabela 13	- Descrição dos cenários.	59
Tabela 14	- Métricas de desempenho.	60
Tabela 15	- Descrição do modelo conceitual em PFS no nível 2.	61
Tabela 16	- Métrica de desempenho 2 – Pedidos atendidos.	68
Tabela 17	- Condições iniciais da PN para os cenários.	105

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

SED	Sistemas a Eventos Discretos
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
GSCM	<i>Global Supply Chain Management</i>
PCN	Plano de Continuidade de Negócios
PN	<i>Petri net</i>
PFS	<i>Production Flow Schema</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
SP	Sistema Produtivo
COBEM	Congresso Internacional de Engenharia Mecânica
CBA	Congresso Brasileiro de Automática
SCOR	<i>Supply-Chain Operations Reference Model</i>
AMR	<i>Advanced Manufacturing Research</i>
SCC	<i>Supply-Chain Council</i>
APICS	<i>Association for Operations Management</i>
PIB	Produto Interno Bruto
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
EEW	<i>Earthquake Early Warning</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>P</i>	Rede de Petri
<i>E</i>	Conjunto de elementos passivos (lugares) da rede de Petri
<i>T</i>	Conjunto de elementos ativos (transições) da rede de Petri
<i>F</i>	Conjunto de relacionamentos entre os elementos passivos e os elementos ativos (arcos orientados) da rede de Petri
<i>W</i>	Vetor que define os <u>pesos</u> de cada arco da rede de Petri
<i>M</i>	Vetor de <u>marcação</u> que representa os estados discretos do sistema modelado em rede de Petri
Δt	Período de tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.	7
1.1	OBJETIVO.	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.	13
2	CADEIAS DE SUPRIMENTOS GLOBAIS.	15
2.1	RUPTURAS.	16
2.2	RESILIÊNCIA.	20
2.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO.	27
3	FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA MODELAGEM DAS CADEIAS DE SUPRIMENTOS.	28
3.1	SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS.	29
3.2	REDE DE PETRI.	32
3.3	MÉTODO PFS/PN.	35
3.4	INTERPRETAÇÕES DO PFS E DA PN APLICADA PARA O GSCM.	37
3.4.1	Descrição do sistema produtivo (SP) baseada no modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference)	39
3.4.2	Tipos de SPs.	41
3.4.3	Modelagem dos building blocks dos tipos “Source”, “Make” e “Deliver”	43
3.4.4	Comentários sobre a modelagem hierárquica e modularizada.	46
3.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO.	47
4	PROCEDIMENTO PARA MODELAGEM E ANÁLISE DO GSCM. .	49
4.1	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO.	50
4.2	SÍNTESE DO CAPÍTULO.	51
5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO.	52
5.1	TERREMOTO E A CADEIA DE SUPRIMENTOS AUTOMOTIVA. .	52
5.2	RUPTURA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS GLOBAL DA TOYOTA.	55
5.3	APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MODELAGEM E ANÁLISE.	57

5.3.1	Etapa 1: Definição do escopo da cadeia de suprimentos e de cada SP.	57
5.3.2	Etapa 2: Definição dos SPs impactados pelo evento de ruptura. . .	59
5.3.3	Etapa 3: Tradução de um modelo conceitual para um modelo funcional.	60
5.3.4	Etapa 4: Verificação do modelo	65
5.3.5	Etapa 5: Coleta de dados e avaliação do desempenho do GSCM. .	65
6	CONCLUSÃO.	72
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	75
	ANEXO A – Classificações de sistemas.	88
	ANEXO B – SCOR.	92
	ANEXO C – Detalhes do exemplo de aplicação do procedimento. .	93

1 INTRODUÇÃO

Segundo o relatório *Future State 2030* (KPMG, 2014a) divulgado em 2014, o comércio entre países, que em 2011 representava 63% do PIB do mundo, continuará crescendo a uma taxa de 5% ao ano até 2030. Somente a Ásia deverá quase dobrar sua participação: de 21% em 2004 para 39% em 2030 (ANDERSON; STRUTT, 2012). Nesse cenário, as cadeias de suprimentos globais são a espinha dorsal da economia global, abastecendo o comércio, consumidores e garantindo o crescimento econômico dos países (WORLD ECONOMIC FORUM, 2013a).

Antes da globalização, a grande maioria das empresas atuavam de forma isolada. Com a globalização, grandes mudanças no mercado afetaram o modo como as empresas e as regiões operam, e nos anos 80, elas passaram a ser mais especializadas e procurar por fornecedores que os atendessem com menor custo e com qualidade (LUMMUS; VOKURKA, 1999). Além de buscar fornecedores, passaram a vender globalmente para outras empresas que também operam de forma similar, resultando em uma movimentação de materiais que ultrapassou as fronteiras geográficas (MENTZER; STANK; MYERS, 2007). Por fim, as empresas buscaram se instalar em locais de baixo custo operacional para assegurar maior vantagem competitiva (VAKHARIA; YENIPAZARLI, 2009),

Além das mudanças nas configurações físicas das empresas, a globalização foi acompanhada e também derivada de melhorias nas comunicações e nas tecnologias de informação, pois o fluxo de informação passou a ser fundamental para decisões sobre três fatores-chaves da cadeia de suprimentos global: estoques, transportes e localização geográfica (CHOPRA; MEINDL, 2003). Dessa forma, à medida que as cadeias de suprimentos tornaram-se globais e complexas, a capacidade de acompanhar os pedidos e ter uma boa visibilidade das operações tornaram-se mais importantes e para fornecer uma visão integrada das informações de todas as funções da empresa e entre as empresas têm sido desenvolvidos como os sistemas ERP (do inglês *Enterprise Resource Planning*) cujos principais fornecedores atualmente são a SAP¹ e a Oracle².

¹ www.sap.com

² www.oracle.com

Em 1982, para fazer referência a esse novo contexto, o inglês Keith Oliver, então consultor da empresa Booz-Allen, cunhou o termo “*supply chain management*” (SCM) em entrevista para o jornal *Financial Times* (ELLRAM, COOPER, 2014). Mais tarde, Houlihan (1985) definiu o SCM como a coordenação do fluxo de materiais desde o fornecedor, passando pela manufatura e os canais de distribuição até o cliente. Em uma definição mais ampla, Cooper e Lambert (1997) complementaram a definição do SCM: (1) adicionando o gerenciamento do fluxo de informação junto ao fluxo de materiais; e (2) expandindo a atuação desde o fornecedor original até o cliente final da cadeia. Por fim, Mentzer et al. (2001) incluiu o gerenciamento do fluxo financeiro.

Dessa forma, baseado nas definições anteriores e considerando os impactos da globalização a partir da década de 90, o presente trabalho define que o *global supply chain management* (GSCM) é a estratégia de coordenação dos fluxos de material, de informações e financeiro, desde o fornecedor original até o cliente final, para a produção e entrega da quantidade certa de itens, no local certo, no tempo certo, minimizando os custos globais e maximizando os níveis de serviço. A estrutura de uma cadeia de suprimentos global é apresentada na Figura 1.

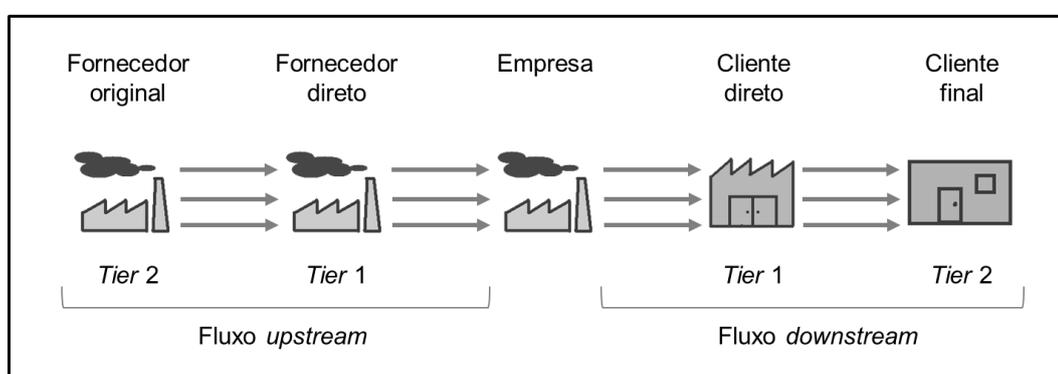


Figura 1 - Estrutura de uma cadeia de suprimentos global.

Nesse sentido, ao passo que a globalização traz benefícios para os países e a operação das empresas, essa tendência necessita especial atenção para um risco de contágio internacional em caso de crises econômicas e financeiras (VOCÊ SA, 2015). Somado a isso, a partir do século 21, a literatura indica que além da globalização, outros fatores têm impactado a operação das cadeias de suprimentos (CHOPRA; MEINDL, 2003; SHEFFI, 2001; MURINO; ROMANO; SANTILLO, 2011; BADURDEEN *et al.*, 2010; VAKHARIA; YENIPAZARLI, 2009; SIMCHI-LEVI;

KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2010; SCRLC, 2013; DELOITTE, 2014; EY, 2014; PWC, 2014; KPMG, 2014b), como:

- Crescimento das cadeias com o aumento das empresas envolvidas;
- Clientes cada vez mais exigentes quanto aos prazos, custos e desempenho do produto;
- Aumento na variedade e personalização dos produtos;
- Redução do ciclo de vida dos produtos;
- Maior volatilidade e imprevisibilidade do mercado;
- Extensivo uso da terceirização;
- Dependência das informações nas tecnologias;
- Mudança rápida das tecnologias;
- Restrições impostas pelas práticas sustentáveis ambientais;
- Busca por cadeias enxutas, que resultam na redução dos estoques;
- Expansão do e-commerce e as redes sociais;
- Vulnerabilidade ao terrorismo internacional; e
- Vulnerabilidade aos *cyber attacks*;

Para Christopher e Lee (2004), a associação destes fatores com a falta de visibilidade dos processos de ponta-a-ponta resulta em maior vulnerabilidade da operação das cadeias de suprimentos. Nessa linha, a recente pesquisa do Business Continuity Institute (2014) realizada em 2014, com empresas de 71 diferentes países, apontou que 73,5% dos respondentes ainda não possuem visibilidade completa de suas cadeias de suprimentos. E como consequência da falta de visibilidade dos seus processos citam-se três casos: (1) em 1996, a empresa norte-americana Nike foi denunciada pela revista Life devido ao uso de mão-de-obra infantil em fabricantes de artigos esportivos no Paquistão (ISTOÉ DINHEIRO, 2014); (2) em 2011, a grife espanhola Zara, que foi responsabilizada por trabalho escravo em oficinas de costura subcontratadas em São Paulo (EXAME, 2014); e mais recentemente, (3) em 2013, quando auditorias identificaram DNA de cavalo em hambúrgueres e outros alimentos congelados nos supermercados do Reino Unido, fato que alertou para a falta de rastreabilidade da cadeia de suprimentos bovina que envolvia fazendeiros, fornecedores e supermercados localizados na França,

Alemanha, Suécia, Bélgica, Holanda e outros países europeus (THE GUARDIAN, 2013; SARPONG, 2014).

Em 2013, confirmando o cenário de vulnerabilidade, o MIT divulgou o resultado da pesquisa *Supply Chain and Risk Management* com 209 empresas de atuação global (SIMCHI-LEVI; KYRATZOGLOU; VASSILIADIS, 2013). Em um ano, mais de 60% das empresas tiveram uma ruptura em sua cadeia de suprimentos e foram impactados ao menos em 3% nos resultados financeiros. Aqui, o conceito “ruptura” deve ser entendido como a remoção permanente ou temporária de uma relação fornecedor-cliente, de modo que a estrutura da cadeia pós-ruptura é diferente da estrutura da cadeia pré-ruptura (GREENING; RUTHERFORD, 2011). Apesar disso, a pesquisa realizada em 2013 demonstrou que apenas 40% das empresas apresentaram processos maduros, ou seja, eram flexíveis, compartilhavam informações na cadeia e adotavam medidas de redução de risco (SIMCHI-LEVI; KYRATZOGLOU; VASSILIADIS, 2013). Nesse sentido, apesar das recomendações de incluir práticas resilientes, algumas empresas continuam ignorando a adoção delas por acreditar na baixa probabilidade de uma ruptura ocorrer (CHOPRA; SODHI, 2004), tornando a sua cadeia de suprimentos cada vez mais expostas às rupturas e aos efeitos globais indiretos (SHEFFI; RICE, 2005).

Complementando a pesquisa do MIT, em 2014, a empresa *PricewaterhouseCoopers* indicou que a complexidade da cadeia está baseada também em outra tendência: a busca por eficiência por meio de processos “enxutos”. Nesse contexto, visando reduzir custos, as empresas tendem a limitar a sua produção e a quantidade de plantas, ao passo que a resiliência exige redundâncias, como a diversidade de fornecedores para um componente crítico e a habilidade de aumentar capacidade na produção (PWC, 2014). Mais a frente, este trabalho irá discutir com mais detalhes o conceito de “resiliência”, definido como a habilidade da empresa retornar ao seu estado original depois de uma ruptura (WORLD ECONOMIC FORUM, 2013a).

Na mesma linha da *PricewaterhouseCoopers*, as demais empresas do *Big Four*³ também têm feito referências ao tema, confirmando a preocupação com as rupturas das cadeias de suprimentos globais.

³ Grupo formado pelas quatro maiores empresas de consultoria e auditoria internacional: PricewaterhouseCoopers, Deloitte Touche Tohmatsu, KPMG e EY.

Na sua pesquisa anual *Top of Mind Survey 2014*, a KPMG destacou que, dos 469 executivos que atuam em bens de consumo, 47% consideraram que as cadeias de suprimentos se tornaram a prioridade nos investimentos sendo a visibilidade e a transparência fatores-chaves (KPMG, 2014b). Nesse sentido, a visibilidade e a transparência ponta-a-ponta das cadeias de suprimentos são demandadas não somente pelos clientes, que querem saber quem são os fornecedores, de onde são e quais matérias-primas utilizam, mas também pelas empresas, que buscam uma maior integração e resiliência nas suas operações (KPMG, 2014b). Complementando essa pesquisa, a revista *Forbes* questionou 460 executivos da indústria⁴ e observou que 45% deles afirmam que a restrição se encontra nos sistemas de informação inadequados para o gerenciamento global, e que uma nova tecnologia deve ser criada para a comunicação das empresas no caso de demandas críticas, restrições de capacidade e ruptura ao longo das cadeias de suprimentos (KPMG, 2014c).

Por fim, complementando o quadro das *Big Four*, as consultorias Ernst & Young e a Deloitte alertam para três novos temas que aumentam a vulnerabilidade das cadeias de suprimentos: (1) a expansão do *e-commerce* e as redes sociais, (2) a escassez dos recursos naturais e (3) os *cyber attacks*. No primeiro tema, as cadeias de suprimentos devem ficar atentas à expansão do *e-commerce*, que gerou o aumento das rotas até os clientes e, que somado a crescente popularização das redes sociais (como o *Facebook*), aumenta o nível de complexidade e vulnerabilidade das cadeias de suprimentos às rupturas (EY, 2014). No segundo tema, a escassez e o aumento dos custos dos recursos naturais pressionam as cadeias de suprimentos globais na busca por fontes alternativas para mitigar as rupturas de sua operação (EY, 2014). E por fim, no terceiro tema, devido ao aumento da automação e conectividade no chão de fábrica, *hackers*, *cyber-criminosos*, empresas e países competidores podem tentar acesso aos sistemas privados para obter informações confidenciais e podem, assim, provocar a perda ou manipulação de informações que geram vantagem competitiva, perda financeira ou danos na imagem da empresa (DELOITTE, 2014).

Reforçando o MIT e as *Big Four*, em uma pesquisa recente, o *World Economic Forum* (2013b) classificou as fontes para a ocorrência dessas rupturas em

⁴ A pesquisa foi realizada com representantes de 06 setores da indústria: aeroespacial a defesa, automotiva, conglomerados, bens de consumo, engenharia e industrial e metais.

05 tipos: ambientais (desastres naturais), econômicas (crises financeiras, choques do petróleo, índice de desemprego), geopolíticas (conflitos, ataques terroristas, guerras, crimes organizados), sociais (desigualdade social, epidemias, crises alimentares) e tecnológicas (ataques virtuais, perda de informações, rupturas na infraestrutura). Como exemplo, em 2001, um ataque terrorista ao *World Trade Center* fez com que o governo americano fechasse as fronteiras e gerasse mudanças regulatórias significativas, afetando sensivelmente o transporte aéreo. Consequentemente a *Ford Motor Company* teve que inativar repentinamente suas linhas de produção nos Estados Unidos devido à falta de abastecimento de componentes enviadas pelo Canadá e o México (SHEFFI; RICE, 2005; VAKHARIA; YENIPAZARLI, 2009). Mais recentemente, em 2011, a Toyota suspendeu a produção em plantas instaladas em diversos outros países por semanas após um terremoto e tsunami atingir o nordeste do Japão e afetar três fábricas da montadora.

Retomando o problema de gerenciamento da cadeia de suprimentos, em 2014, o *Council of Supply Chain Management Professionals* atraiu indústrias, pesquisadores e governos para uma conferência sob o tema “*Effective Strategies for Managing Supply Chain Risk: Assuring the Viability of Your Supply Chain*” (LAGOUDIS, 2014; LUND, 2014). Nela, as empresas Intel, Hewlett-Packard e Procter & Gamble relembrou o terremoto, tsunami e a crise nuclear ocorrido no Japão em 2011 e confirmaram a necessidade de criação de um Plano de Continuidade de Negócios⁵ (PCN) (DAVIES; CHAI, 2014; HUNTER, 2014; HEWLETT-PACKARD, 2014), um plano que torne as cadeias de suprimentos mais resilientes, ou seja, reforcem a habilidade intrínseca da cadeia de suprimentos de se manter ou recuperar um estado dinâmico estável, que permite que ela continue sua operação após um percalço e/ou na presença de um contínuo estresse (HOLLNAGEL, 2007 apud WEICK; SUTCLIFFE, 2007).

Nesse sentido, o GSCM, originalmente criado para coordenar mais eficazmente as atividades da cadeia de suprimentos global, com o objetivo de produzir e entregar a quantidade certa de itens, no local certo, no tempo certo, minimizando os custos globais da cadeia de suprimentos (TUNCEL; ALPAN, 2010; COHEN; MALLIK, 1997) deve ser adaptado para lidar com as rupturas.

⁵ Segundo a ISO 22301:2012, a Gestão de Continuidade de Negócios especifica requisitos para planejar, definir, implantar, operar, monitorar, revisar, manter e melhorar continuamente um sistema de gerenciamento no caso de incidentes disruptivos. Segundo a ISO, o Plano de Continuidade de Negócios (*Business Continuity Plan*) define os procedimentos a serem seguidos pelas empresas.

Assim, com o objetivo de contribuir para uma melhor avaliação dos riscos e o aperfeiçoamento dos PCNs, diversos pesquisadores têm estudado a modelagem de uma cadeia de suprimentos global visando à análise do impacto de uma ruptura em suas operações e a adoção de práticas para a recuperação da cadeia.

Do ponto de vista de teoria de sistemas as cadeias de suprimentos globais podem ser tratadas como sistemas que se comportam como sistemas a eventos discretos (SED) (NUNES; CRUZ-MACHADO, 2014; AZAMBUJA; CHEN, 2014; SAMVEDI; JAIN, 2013; LAM; YIP, 2012; TUNCEL; ALPAN, 2010; WU et al., 2010) de modo que a rede de Petri (PN) e suas extensões podem ser adotadas como técnicas de modelagem gráfica e matemática para descrição e análise formal da cadeia de suprimentos.

1.1 OBJETIVO

A dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um procedimento sistematizado para modelagem e análise do gerenciamento das cadeias de suprimentos globais (GCSM) com o foco na ocorrência de rupturas nas operações da cadeia de suprimentos e a adoção de práticas para a sua resiliência e se for o caso sua recuperação. Para tanto, considera-se que as cadeias de suprimentos globais são SED e adota-se a rede de Petri e suas extensões para a modelagem e análise como técnica formal.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O capítulo 2 define que a cadeia de suprimentos global é formada por sistemas produtivos que criam relacionamentos colaborativos do tipo fornecedor-cliente, também chamado de “díade”. Em seguida, o capítulo descreve as rupturas como eventos que podem impactar essas díades, e conseqüentemente, podem impactar o desempenho do GSCM. O capítulo descreve também o “perfil da ruptura”, uma curva caracterizada por 8 etapas que indicam os primeiros impactos negativos de uma ruptura no desempenho e a evolução da recuperação, caso a cadeia de suprimentos adote práticas resilientes. Por fim, o capítulo apresenta algumas práticas resilientes adotadas pelo GSCM.

No capítulo 3, diversos trabalhos são citados confirmando que as cadeias de suprimentos podem ser consideradas como sistemas a eventos discretos e que a rede de Petri pode ser adotada como técnica formal de modelagem e análise. O capítulo também introduz o *Production Flow Schema* como uma técnica de modelagem *top-down*, que pode ser utilizada para um detalhamento gradativo do modelo. Em seguida, o capítulo apresenta o modelo SCOR (*Supply Chain Operations Reference*) como um modelo de referência para os processos de negócio básicos para a modelagem dos sistemas produtivos e propõe a modelagem de *building blocks* que facilitem a modelagem dos sistemas produtivos, e por fim, das cadeias de suprimentos globais.

Em seguida, o capítulo 4 descreve o procedimento para modelagem e análise do GSCM com o foco no problema de ocorrência de rupturas nas operações da cadeia de suprimentos e a adoção de práticas para a sua recuperação. O procedimento adota a rede de Petri e o *Production Flow Schema* como técnicas de modelagem.

O capítulo 5 apresenta um exemplo de aplicação do procedimento baseado na cadeia de suprimentos global da empresa Toyota, e considera o terremoto de 2011 no Japão como um evento de ruptura que afetou globalmente as operações do setor automotivo. O capítulo descreve brevemente os efeitos do terremoto e os impactos nas cadeias de suprimentos automotivas e, em seguida, descreve a aplicação do procedimento proposto.

Por fim, o capítulo 6 apresentam as observações finais do procedimento desenvolvido, as conclusões e reflexões para a realização de trabalhos futuros.

2 CADEIAS DE SUPRIMENTOS GLOBAIS

Segundo Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi (2010), a cadeia de suprimentos consiste de fornecedores, centros de produção, depósitos, centros de distribuição, varejistas, além de matérias-primas, estoques de produtos em processo e produtos acabados que são movimentados entre as instalações. Como exemplo, Chopra e Meindl (2003) descrevem a cadeia de suprimentos de um fornecedor de detergente. Primeiramente, no fim da cadeia de suprimentos encontra-se a loja Wal-Mart, que o cliente procura para comprar o detergente. A Wal-Mart abastece suas prateleiras com um estoque próprio ou um distribuidor terceiro, que por sua vez é abastecido pelo fabricante (por exemplo, a Procter & Gamble). A fábrica recebe matérias primas de diversos fornecedores, que podem, por sua vez, terem sido abastecidos por outros fornecedores. Por exemplo: o material para embalagens pode vir da empresa Tenneco, que por sua vez recebe matéria prima de outros fornecedores para fabricar suas embalagens.

Complementarmente, Chopra e Meindl (2003) consideram que a cadeia de suprimentos envolve um fluxo de informações, material e financeiro. Dessa forma, retomando o exemplo citado, a Wal-Mart fornece ao cliente o produto, bem como as informações sobre preço e disponibilidade. O cliente transfere dinheiro à Wal-Mart que, por sua vez, transmite informações para reabastecimento do produto ao centro de distribuição. A Wal-Mart, então, transfere dinheiro para a distribuidora após o reabastecimento, e o distribuidor fornece informações sobre preços e prazos a seus fornecedores. Fluxos semelhantes de informação, de material e de financeiro acontecem em toda a cadeia de suprimentos.

Nesse cenário, o presente trabalho considera que as cadeias de suprimentos globais consistem em sistemas produtivos (SPs), ou seja, plantas ou unidades produtivas geograficamente dispersas, que processam itens físicos a fim de se produzir bens ou executar serviços (VILLANI; MIYAGI; VALETTE, 2007). Entende-se por diferentes localizações geográficas: continentes, países, cidades, bairros, etc. Estes SPs criam relacionamentos colaborativos do tipo fornecedor-cliente, isto é, “díades”, formando por fim uma cadeia de suprimentos global, como ilustra a Figura 2.

Este capítulo descreve os eventos que podem impactar o desempenho das cadeias: os distúrbios e as rupturas. Por fim, o “perfil da ruptura” é detalhado,

práticas resilientes são listadas e exemplos são descritos para ilustrar algumas práticas resilientes normalmente adotadas no mercado.

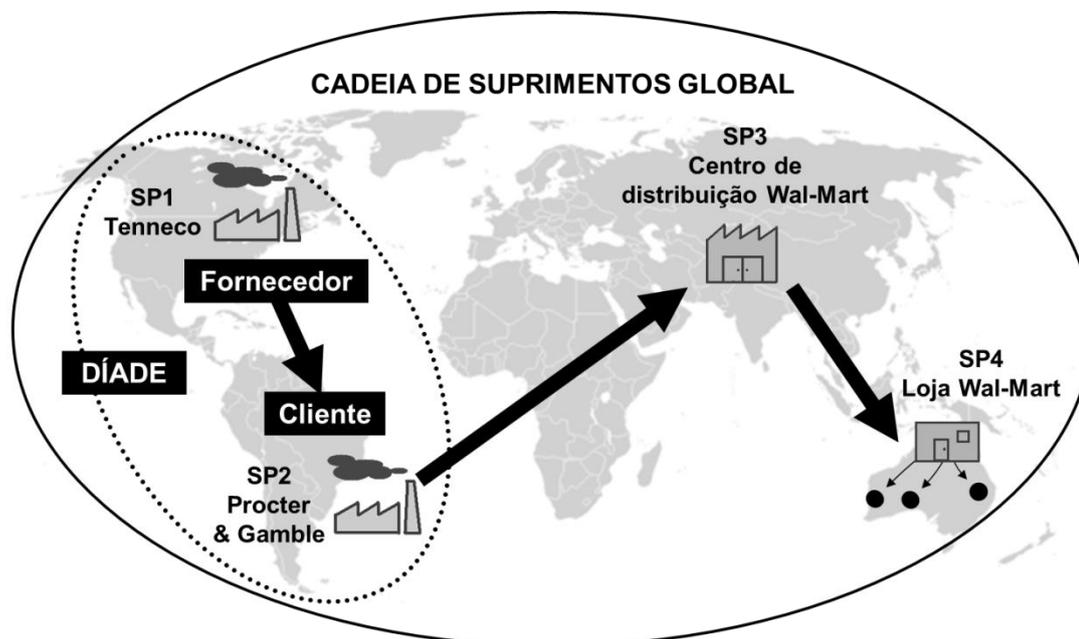


Figura 2 – Díades na cadeia de suprimentos global.

2.1 RUPTURAS

Entende-se que com a ocorrência de um evento adverso não previsto pelo GSCM, a cadeia enfrentará uma fase de queda de desempenho do serviço, acúmulo de inventários, custos inesperados, restrição do crescimento e dos lucros e redução do mercado atendido. Considerando o impacto gerado pós-evento, a literatura divide os eventos em 02 tipos: distúrbios e rupturas.

Os distúrbios são eventos adversos, inesperados e contínuos (WEICK; SUTCLIFFE, 2007), que envolvem no geral a necessidade das cadeias de suprimentos se adaptando às variações no fluxo de material ou informações e que não geram a alteração da estrutura da cadeia como resultado do processo de adaptação (GREENING; RUTHERFORD, 2011). Como exemplo, citam-se: a variação imprevista da demanda, a variação anormal do fornecimento de materiais e serviços, as restrições temporárias de capacidade, problemas transitórios de qualidade nas peças, as estratégias isoladas e provisórias entre os envolvidos da cadeia de suprimentos, isto é, ocorrências efêmeras que não estavam no planejamento das operações da cadeia e/ou que afetam o compartilhamento das

metas com os envolvidos da cadeia (SHEFFI; RICE, 2005; BOLSTORFF; ROSENBAUM, 2012).

Em contrapartida, rupturas, envolvem a remoção permanente ou temporária de díades da cadeia como consequência de um evento adverso crítico, de modo que, a estrutura da cadeia pós-ruptura é diferente da estrutura da cadeia pré-ruptura (GREENING; RUTHERFORD, 2011).

Nesse sentido, a pesquisa do Business Continuity Institute (2014) apresentou a evolução das principais causas de ruptura nos últimos anos e uma projeção para 2019 (Tabela 1).

Tabela 1 – Principais causas de rupturas (baseado em Business Continuity Institute, 2014).

#	2011	2012	2013	2014	Previsão para 2019
1	Condições climáticas adversas	Ruptura em TI ou telecomunicações	Ruptura em TI ou telecomunicações	Ruptura em TI ou telecomunicações	<i>Cyber Attack</i>
2	Ruptura em TI ou telecomunicações	Condições climáticas adversas	Condições climáticas adversas	Condições climáticas adversas	Ruptura em TI ou telecomunicações
3	Ruptura da rede de transportes	Falha na prestação de serviço terceira			
4	Terremoto ou Tsunami	Perda de talentos ou habilidades	Ruptura da rede de transportes	Ruptura da rede de transportes	Violação de dados
5	Falha na prestação de serviço terceira	Troca de governo, regulação ou leis	Perda de talentos ou habilidades	Perda de talentos ou habilidades	Condições climáticas adversas
6	Perda de talentos ou habilidades	Falência de fornecedor	Troca de governo, regulação ou leis	Troca de governo, regulação ou leis	Perda de talentos ou habilidades
7	Qualidade do produto	Ruptura da rede de transportes	Qualidade do produto	<i>Cyber attack</i>	Troca de governo, regulação ou leis
8	Erupção vulcânica	Conversão monetária volátil	<i>Cyber attack</i>	Violação de dados	Ruptura da rede de transportes
9	Falência de fornecedor	Qualidade do produto	Incidente na saúde ou segurança	Disputa industrial	Escassez de energia
10	Desordem civil	Escassez de energia	Escassez de energia	Conversão monetária volátil	Terrorismo

Na ocorrência de um evento de ruptura, Sheffi e Rice (2005) indicam que o processo de recuperação pode ser caracterizado em oito etapas (Figura 3): (1) preparação, no qual a empresa deve prever e se preparar (em alguns casos, como em desastres naturais ou ataques terroristas, a previsão é pequena ou não existe); (2) evento de ruptura, (3) primeira resposta, focada em controlar a situação, proteger vidas e, se for o caso, parar o funcionamento do sistema; (4) impacto inicial, (5) impacto total, no qual o desempenho cai drasticamente; (6) preparo para a

recuperação, com a procura de novos fornecedores e busca de novos meios de movimentação dos produtos; (7) recuperação para voltar ao nível normal de operação, no qual as empresas excedem a utilização do tempo e dos recursos disponíveis; e (8) impacto de longo prazo onde, por fim, notam-se os impactos permanentes da ruptura na cadeia de suprimentos.

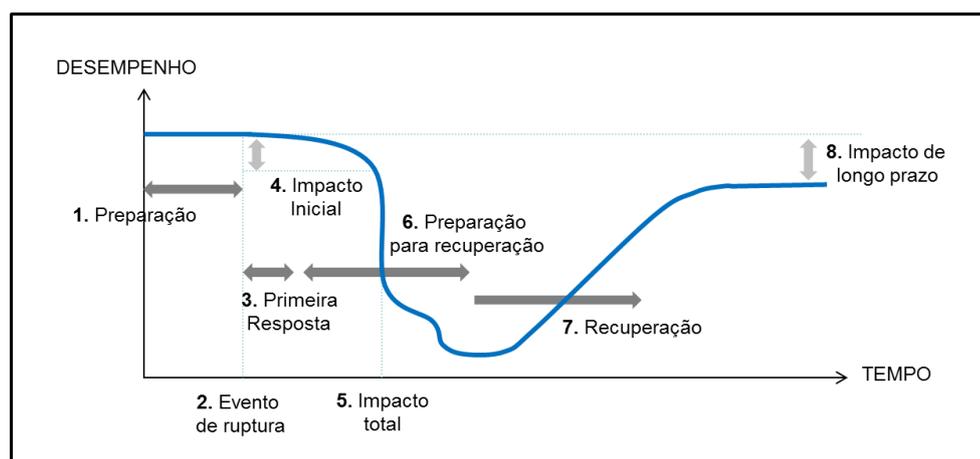


Figura 3 – O perfil previsto da ruptura (SHEFFI; RICE, 2005).

Nota-se que o perfil da ruptura baseia-se no desempenho da cadeia de suprimentos, que pode ser medido pelas vendas, nível de produção, rendimentos, serviço ao cliente, nível de competitividade, retorno das ações e do valor da empresa (SHEFFI; RICE, 2005; HENDRICKS; SINGHAL, 2003 apud VAKHARIA; YENIPAZARLI, 2009; WAGNER; NESHAT, 2011).

Ressaltando o impacto financeiro, em 2014, a pesquisa do Business Continuity Institute (2014) indicou que 23,6% das empresas perderam mais de 1,0 milhão de euros (1,2 milhões de dólares) no ano devido a problemas com rupturas na cadeia de suprimentos. Dentre as rupturas recentes, destaca-se o terremoto de Tohoku, no Japão, em 2011, considerado o desastre natural mais caro para a indústria entre 1980 e 2013, com danos estimados em 210 bilhões de dólares (GUHA-SAPIR *et al.*, 2011) (Figura 4).

Registrado às 14 horas e 46 minutos da tarde do dia 11 de março de 2011, o “Grande Terremoto do Leste do Japão” atingiu a região de Tohoku e afetou as atividades econômicas do Japão. Dentre as indústrias mais afetadas, tem-se a indústria automotiva, que em 2011, envolvia 5,32 milhões de trabalhadores do Japão, ou seja, 8,5% da população trabalhadora do Japão foram diretamente ou indiretamente prejudicados, reforçando o impacto local (JAMA, 2011). Em poucos

dias após o terremoto, outras partes do mundo foram afetadas na cadeia automotiva.

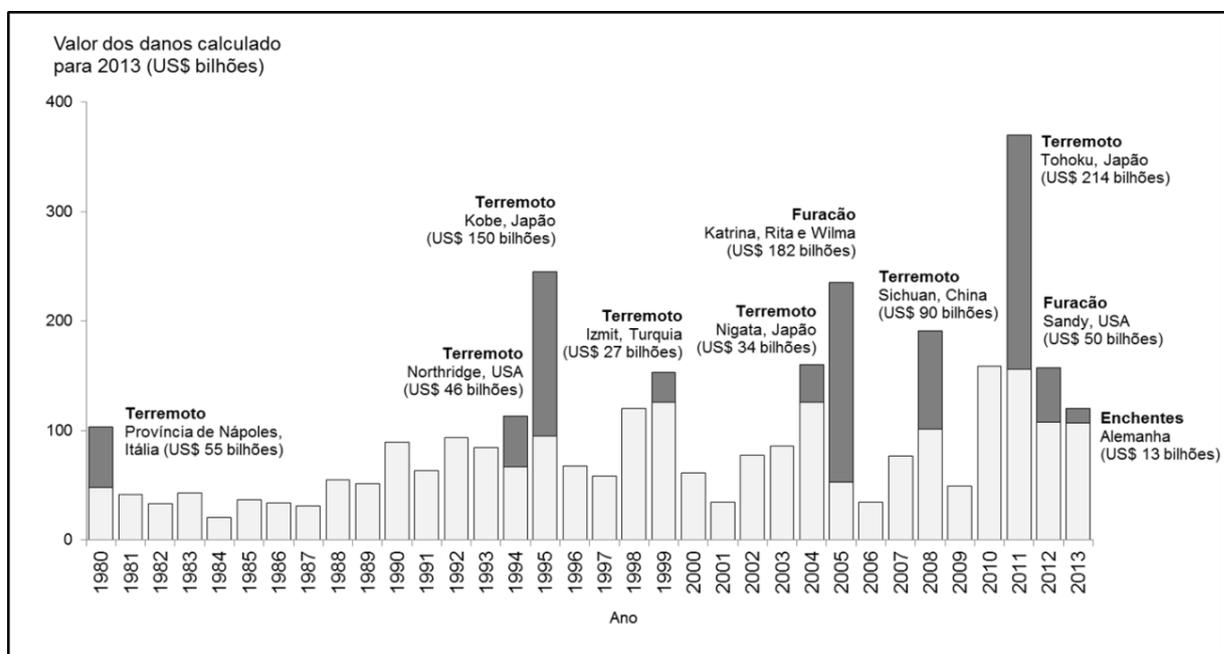


Figura 4 - Danos econômicos anuais por desastres naturais (CRED, 2013).

Considerando a interdependência das empresas na cadeia, Lee, Padmanabhan e Whang (1997) e Wu, Blachurst e O'Grady (2007) indicam uma preocupação com o “efeito chicote”⁶, ou seja, a propagação dessas perturbações negativas nas cadeias de suprimentos globais. Este fenômeno explica algumas consequências do terremoto de Tohoku, no Japão. Para as cadeias de suprimentos automotivas, a interdependência global das empresas com as empresas japoneses se dava por três motivos: (1) na busca por eficiência nas montadoras japonesas, grande parte das matérias primas e das peças e partes produzidas (como o pneu, baterias, ar condicionado e sistemas de som) foram terceirizadas e muitas das utilidades, como eletricidade, combustíveis, água e comunicações dependiam de fornecedores externos; (2) alguns desses fornecedores estavam concentrados na região de Tohoku e (3) em 2011, o Japão se posicionava como o terceiro maior exportador mundial, com 4,46 milhões de veículos, confirmando a dependência da cadeia automotiva global com o Japão (JAMA, 2012). Assim, o desastre natural

⁶ O *Bullwhip Effect* é um fenômeno descrito por FORRESTER (1961) e evidenciado no “jogo de distribuição de cerveja” (do inglês *beer distribution game*) (STERMAN, 1989), que descreve o caso em que os pedidos para os fornecedores tendem a ter uma variação maior do que as vendas para o cliente, e esta distorção se propaga de uma forma amplificada pela cadeia de suprimentos.

resultou na ruptura da cadeia de suprimentos global: a produção e o suprimentos de peças, materiais e serviços reduziram ou pararam em alguns negócios locais e os efeitos se espalharam mundialmente pelas cadeias de suprimentos globais (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011).

Ciente que o Japão é o quarto país mais exposto a acidentes naturais (UNU, 2014), este vêm adotando práticas resilientes na sua indústria e, certamente isso permitiu que, em poucos meses após o terremoto de Tohoku em 2011, 93% das indústrias fossem reparadas e 80% retomassem a produção em níveis iguais ou maiores que os anteriores ao desastre (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011). Entretanto, estas práticas resilientes não são comuns em países em desenvolvimento como o Brasil (UNU, 2014).

2.2 RESILIÊNCIA

No campo de ciências dos materiais, resiliência representa a habilidade do material readquirir sua forma original após uma deformação. Comparativamente, nos negócios, as rupturas auditam a resiliência da cadeia de suprimentos, indicando o quão flexíveis podem ser sem quebrar (WEICK; SUTCLIFFE, 2007). O conceito resiliência é definido de diferentes formas na Tabela 2.

Tabela 2: Definições de resiliência por diferentes autores.

Autores	Definição
SHEFFI; RICE, 2005	Determinada pelo bom posicionamento da empresa frente aos seus competidores e capacidade de responder às rupturas da cadeia.
WEICK; SUTCLIFFE, 2007	Habilidade intrínseca da organização de se manter ou recuperar o estado dinâmico estável, que permite que ela continue sua operação após um percalço e/ou na presença de um contínuo estresse.
MURINO; ROMANO; SANTILLO, 2011	Habilidade da empresa de resistir a eventos que causem danos.
WORLD ECONOMIC FORUM, 2013a	Habilidade do sistema de retornar ao seu estado original depois de uma ruptura.

Para definir as práticas resilientes, Sheffi e Rice (2005) propõem a classificação dos eventos de ruptura de acordo com a probabilidade e o impacto na cadeia de suprimentos (Figura 5). Considerando a probabilidade de ocorrência de um evento de ruptura, Sheffi e Rice (2005) classificam os eventos de ruptura em três tipos: eventos aleatórios, acidentes e intencionais. Segundos os autores, a

probabilidade de um evento aleatório como um desastre natural (terremoto, furacão, enchente, etc.) pode ser estimada com dados históricos. A probabilidade de um acidente pode ser estimada com base em dados da indústria e o programa de segurança da empresa. E por fim, a probabilidade de um evento intencional é dependente, normalmente, das decisões e ações específicas das empresas. Para Sheffi e Rice (2005), esta classificação define os eventos com alta probabilidade de ocorrência e alto impacto na operação que devem ser priorizados.

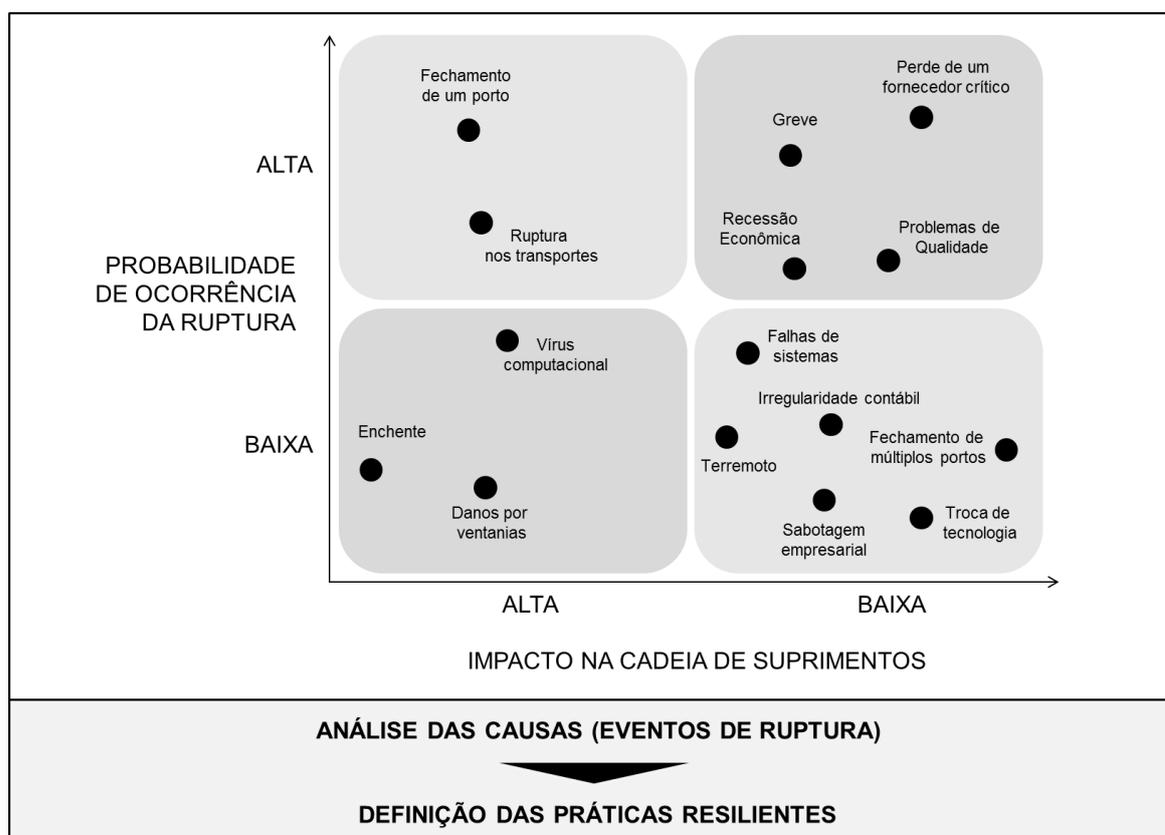


Figura 5 – Exemplo de classificação dos eventos de ruptura de uma empresa (SHEFFI; RICE, 2005).

Por outro lado, Simchi-Levi, Schmidt e Wei (2014) afirmam que o GSCM vem adotando nos últimos anos métodos para análise da probabilidade de ocorrência dos eventos de ruptura, como sugerida por Sheffi e Rice (2005), contudo ressaltam que a falta ou inexistência de dados históricos dificultam a previsão de “eventos *black swan*”⁷, como a epidemias de SARS na Ásia em 2003, incêndios em fábricas ou revoltas políticas. Dessa forma, Simchi-Levi, Schmidt e Wei (2014)

⁷ Conceito introduzido por Nassim Nicholas Taleb no livro “*Fooled by Randomness*”. Focado no mercado financeiro, Taleb define que eventos “*black swan*” como inesperados, de grande impacto financeiro e que, após notado, parece ser um fenômeno explicável e previsível.

propõem um modelo matemático que se foca no impacto dos eventos de ruptura na cadeia de suprimentos, independente da causa dos eventos de ruptura. Para isso, os autores analisam o tempo de recuperação de cada sistema produtivo e o impacto no desempenho (por exemplo, a volume de produtos não vendidos, redução do faturamento e redução na margem do lucro), e por fim, calculam o Índice de Exposição ao Risco (Figura 6).

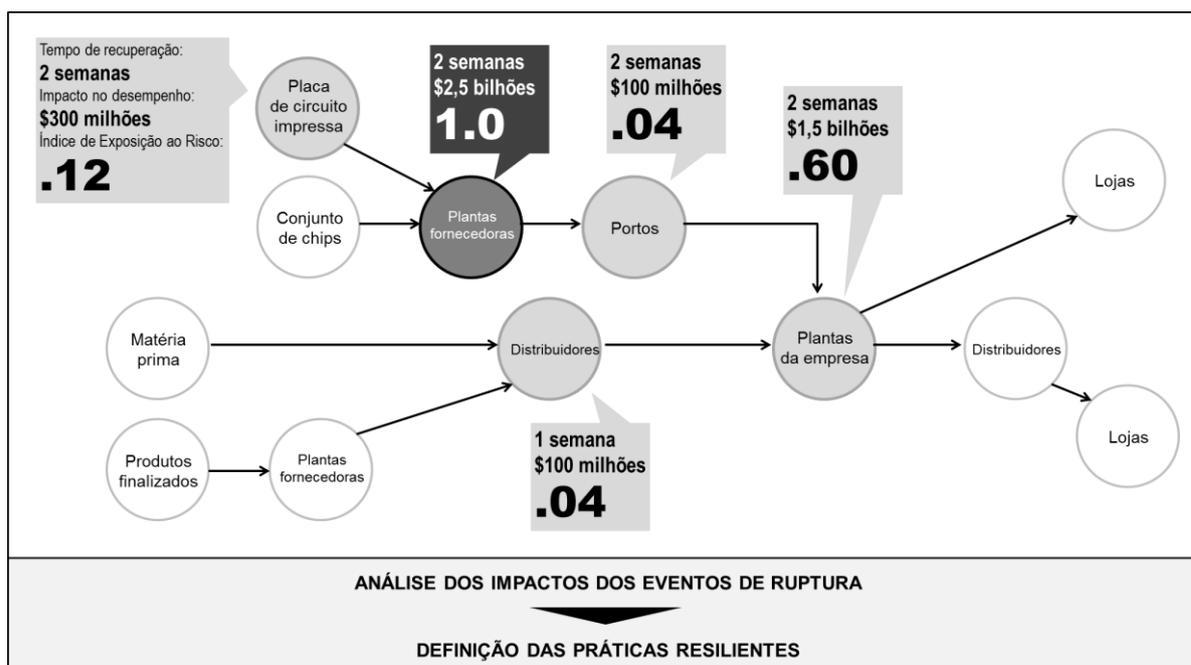


Figura 6 – Exemplo de modelo proposto por SIMCHI-LEVI, SCHMIDT e WEI (2014).

Após analisar as **causas** (SHEFFI; RICE, 2005) ou os **impactos** (SIMCHI-LEVI; SCHMIDT; WEI, 2014), os autores indicam que práticas resilientes são definidas. Nesse sentido, a literatura cita a adoção de práticas, como a criação de inventários ao longo da cadeia de suprimentos e o investimento em uma capacidade adicional. Contudo, fazer isso significa apenas aceitar a ineficiência, em direção oposta à maioria das estratégias de redução de inventários como a filosofia “lean” (GREENING; RUTHERFORD, 2011; WOMACK; JONES, 1996).

Assim, como alternativa a essas práticas resilientes, diversas outras são encontradas na literatura (CHOPRA; MEINDL, 2003; SHEFFI; RICE, 2005; WEICK; SUTCLIFFE, 2007; LAM; YIP, 2012; MURINO; ROMANO; SANTILLO, 2011; VAKHARIA; YENIPAZARLI, 2009; DAVIES; CHAI, 2014; SIMCHI-LEVI; SCHMIDT; WEI, 2014; NUNES; CRUZ-MACHADO, 2014). A seguir, se introduz uma

classificação das práticas resilientes em 06 tipos conforme indicado na Figura 7 e na Tabela 3: (1) fornecimento, (2) processos, (3) produtos e entrega; (4) sistemas de gestão; (5) pessoas e (6) cultura. Exemplos reais são apresentados para algumas práticas resilientes.

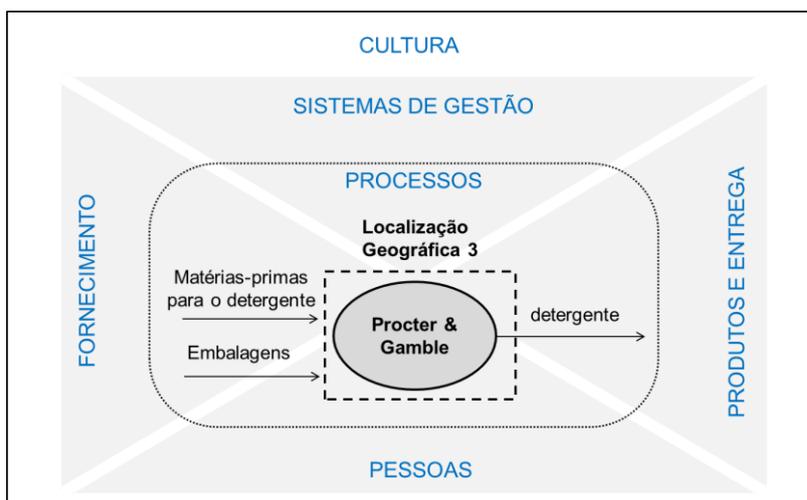


Figura 7 – Classificação sugerida para as práticas resilientes.

Tabela 3: Práticas resilientes indicadas na literatura.

Tipo	Prática resiliente
1. Fornecimento	1.1 Busca de três ou mais fornecedores para as peças críticas; 1.2 Uso de componentes padrões nos produtos para facilitar a substituição de fornecedor no caso de uma ruptura; 1.3 Gerenciamento do estoque de segurança.
2. Processos	2.1 Entendimento do funcionamento da cadeia através do mapeamento dos sistemas produtivos que a compõem; 2.2 Seleção criteriosa do site (diversificação das localidades geográficas das unidades produtivas); 2.3 Padronização dos processos; 2.4 Equipamentos de manutenção de máquinas; 2.5 Sistemas robustos para backup que duplicam as informações e manutenção desses sistemas.
3. Produtos e entrega	3.1 Definição das regras de atendimento aos clientes, logo após uma ruptura, de forma a prejudicar o mínimo possível seus relacionamentos com os clientes; 3.2 Design do produto que garanta flexibilidade de customização até a demanda do cliente ser conhecida; 3.3 Após uma ruptura, a empresa deve manter uma comunicação transparente com as partes interessadas; 3.4 Gerenciamento do estoque de segurança; 3.5 Meios e canais de transporte alternativos.
4. Sistemas de gestão	4.1 Gestão que inclua a monitoração de possíveis rupturas (como verificações e inspeções de qualidade); 4.2 Compartilhamento das informações entre os sistemas produtivos sobre as falhas de operação na cadeia como um sintoma de que algo pode estar errado;

5. Pessoas	5.1 Consideração da habilidade dos indivíduos sobre os eventos de ruptura já experimentados;
6. Cultura	6.1 Compartilhamento e troca das práticas resilientes (<i>benchmarking</i>) entre as empresas; 6.2 Ações colaborativas na cadeia de suprimentos para a recuperação de empresas afetadas por rupturas.

A seguir alguns exemplos de aplicação das práticas resilientes indicadas na literatura são apresentadas.

Exemplo para a prática resiliente 1.1 (“Busca de três ou mais fornecedores para as peças críticas”) – Em Dezembro de 2001, a UPF-Thompson, a única fornecedora de chassis dos veículos Discovery, faliu, ameaçando o fornecimento e a parada das linhas de produção da Land Rover. Quando contatado pela Land Rover, a KPMG, administradora da falência, afirmou que a entrega de novos chassis estava condicionada ao pagamento entre 35 e 45 milhões de libras, dado a necessidade de recuperar o dinheiro dos credores da UPF (CRANFIELD, 2003). Pressionada a suspender a produção do Discovery por nove meses até o desenvolvimento de novas máquinas, demitir 1.500 funcionários da planta de Solihull e impactar 10.000 funcionários de outros fornecedores, em 2002, a Land Rover e a KPMG renegociaram o valor do pagamento e o novo contrato de fornecimento a fim de impedir a ruptura da cadeia (SHEFFI; RICE, 2005).

Exemplo para a prática resiliente 2.1 (“Entendimento do funcionamento da cadeia através do mapeamento dos sistemas produtivos que a compõem”) – Como exemplo de ferramenta cita-se o *Sourcemap* em desenvolvimento pelo *MIT Center for Transportation & Logistics*. A ferramenta está em construção desde 2011, e deve funcionar como uma plataforma colaborativa mapeamento das cadeias de suprimentos globais e dar visibilidade das localizações de cada fornecedor, alertar para as díades frágeis e, no caso de uma ruptura, indicar cadeias de suprimentos alternativas (BONANNI et al., 2010; SOURCEMAP, 2014). Além desses benefícios, a ferramenta poderá ser utilizada para garantir maior transparência da sua cadeia de suprimentos aos clientes, agregando valor para a marca, como foi o caso da empresa *Stonyfield*⁸ (Figura 8).

Exemplo para a prática resiliente 2.3 (“Padronização dos processos”) – Em janeiro de 1994, uma nevasca fechou as estradas e, conseqüentemente, o

⁸ <http://stonyfield.com/sourcemap/>

movimentado *hub* aéreo da UPS localizado na cidade de Louisville, em Kentucky. Após alterar a rota de mais de 100 aviões para aeroportos alternativos, a UPS ainda tinha o desafio de entregar os pacotes que estavam no seu *hub*. Em um dia, o aeroporto retomou sua operação, mas a cidade continuava com as estradas locais cobertas por neve, impedindo a ida dos funcionários até o *hub*. Dessa forma, ao invés de utilizar os funcionários locais, a UPS transferiu temporariamente os funcionários de outros locais para Louisville, estratégia executada com sucesso graças à padronização dos seus processos e o uso de máquinas intercambiáveis em todas as unidades (SHEFFI; RICE, 2005).

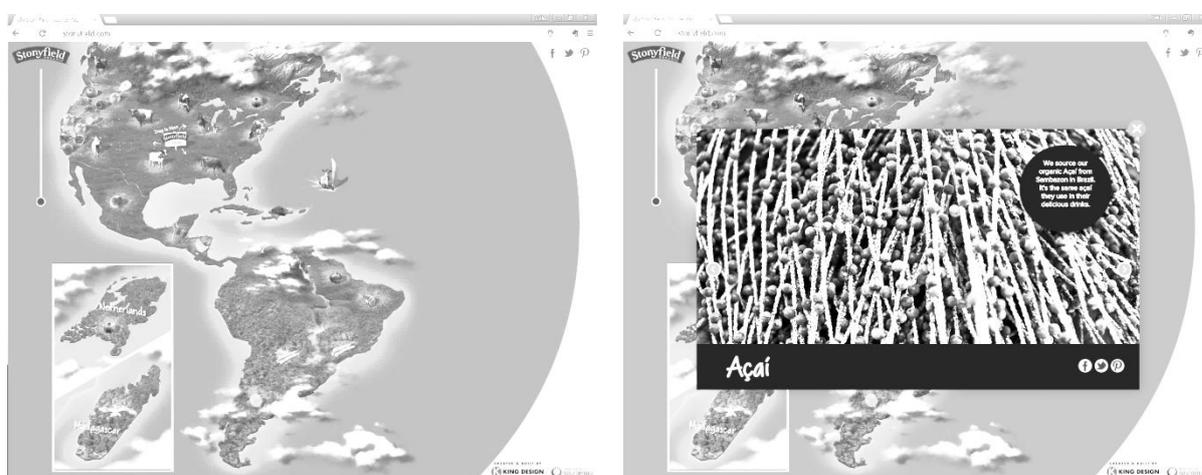


Figura 8 – Cadeia de suprimentos no site da Stonyfield e informações do produtor de Açaí (exemplo).

Exemplos para a prática resiliente 2.5 (“Sistemas robustos para backup que duplicam as informações e manutenção desses sistemas”) – Após o ataque terrorista de 2001, a empresa Solomon Smith Barney, que possuía um escritório com 7 mil funcionários no World Trade Center, continuou suas operações em 12 horas em uma planta de Nova Jersey e resgatando seus dados através de um sistema de *backup* emergencial (SHEFFI, 2001).

Exemplos para a prática resiliente 3.1 (“Definição das regras de atendimento aos clientes, logo após uma ruptura, de forma a prejudicar o mínimo possível seus relacionamentos com os clientes”) – Em setembro de 2011, após os ataques terroristas, a Continental Teves teve que tomar decisões envolvendo a escolha dos clientes que seriam atendidos. Para isso, levantou a quantidade de peças, dividiu entre os clientes e calculou a quantidade de dias de produção para cada cliente até a parada de suas linhas (SHEFFI; RICE, 2005).

Exemplo para a prática resiliente 3.2 (“Design do produto que garanta flexibilidade de customização até a demanda do cliente ser conhecida”) – Em setembro de 1999, após o terremoto na cidade de Chi-Chi, em Taiwan, diversas fábricas de semicondutores foram atingidas, impactando o fornecimento da Apple Computer Inc. e a Dell. Nesse episódio, a Apple, que havia anunciado o lançamento de novos produtos e se viu incapaz de modificar os pedidos já realizados pelos clientes, recebeu uma avalanche de críticas e iniciou um processo de ressarcimento para seus clientes (SHEFFI; RICE, 2005). Por sua vez, a Dell dirigiu os clientes para os produtos disponíveis utilizando preços atrativos e o serviço dos representantes da marca. Por trás desse modelo operacional, os processos da cadeia de suprimentos garantiam que antes da personalização para os clientes, os produtos fossem mantidos em estados semi-acabados de modo que poderiam ser convertidos para quaisquer produtos finais, garantindo a flexibilidade da companhia frente às demandas do cliente (SHEFFI; RICE, 2005).

Exemplo para a prática resiliente 4.1 (“Gestão que inclua o monitoração de possíveis rupturas”) – Em Agosto de 2001, a empresa Baxter International Inc. foi acusada na Europa pela morte de pacientes que passaram por diálise com os filtros de sangue fabricados pela empresa. Após refazer os testes, a Baxter finalmente identificou perfluorocarbono nos filtros, que podem criar bolhas pequenas no sangue dos pacientes e leva-los a morte. Tal desfecho poderia ser evitado se os testes realizados pelo laboratório contratado fossem mais acurados (SHEFFI; RICE, 2005).

Exemplos para a prática resiliente 6.2 (“Ações colaborativas na cadeia de suprimentos para a recuperação de empresas afetadas por rupturas”) – **(Caso 1)** Em março de 2000, um incêndio na planta de Albuquerque da Philips Electronics, no Novo México, gerou a ruptura do fornecimento de chips para a Nokia e a Ericsson. Enquanto a Ericsson não se mostrou proativa e perdeu o lançamento de um novo produto, resultando em perdas de 400 milhões de dólares, a Nokia adotou uma estratégia totalmente diferente (SHEFFI; RICE, 2005). Após notar que, dos cinco componentes fornecidos para a Nokia, dois eram indispensáveis para a fabricação de celulares, a Nokia decidiu reunir um time de 30 funcionários focados: (1) no redesenho do chip (para tornar o produto mais flexível e permitir a produção em outras plantas da Philips ou outras empresas), (2) na busca de fornecedores alternativos, e (3) realocação da produção para as fábricas da Philips em Eindhoven

e Shanghai (THE WALL STREET JOURNAL, 2001). Por fim, a atuação fortaleceu a parceria e garantiu a manutenção da Nokia como líder do mercado no ano seguinte (de 2000 para 2001, a Nokia apresentou acréscimo de 27% para 30% do mercado consumidor, o dobro da Motorola, enquanto a Ericsson havia caído de 12% para 9% em 2001) (THE WALL STREET JOURNAL, 2001); **(Caso 2)** Em Fevereiro de 1997, um incêndio na empresa japonesa Aisin Seiki Co. resultou na ruptura do fornecimento de válvulas de freio e, em três dias, a parada de 20 linhas de produção da Toyota (SHEFFI; RICE, 2005). No processo de recuperação, com o *keiretsu*⁹, 62 empresas responderam a convocação da Aisin e imediatamente assumiram etapas do processo de produção, enquanto 150 empresas se envolveram indiretamente no fornecimento de máquinas e ferramentas (NISHIGUCHI; BEAUDET, 1998). Ao final de março, dois meses após o incêndio, a Aisin retomava sua produção e atendimento da Toyota.

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Primeiramente o capítulo apresentou a estrutura de uma cadeia de suprimentos global, dando destaque, em seguida, para a ocorrência dos eventos de ruptura, que necessitam a alteração da estrutura da cadeia de suprimentos no processo de recuperação. Para maior entendimento desse processo de recuperação, descreveu-se o perfil da ruptura proposto por Sheffi e Rice (2005). Por fim, apresentou-se as práticas resilientes normalmente adotadas pelo GSCM.

Com o objetivo de modelar e analisar o GSCM na ocorrência de rupturas e com a adoção de práticas resilientes, o próximo capítulo analisa a abordagem das cadeias de suprimentos globais como SEDs e a adoção da rede de Petri (PN) e uma de suas extensões e o Production Flow Schema (PFS) como técnica formal de modelagem e análise.

⁹ Complexo modelo japonês de parceria de colaboração a longo prazo entre empresas e seus fornecedores, que promove a coordenação de respostas a crises.

3 FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA MODELAGEM DAS CADEIAS DE SUPRIMENTOS GLOBAIS

Ao notar que o conceito “sistema” não atravessava somente os fenômenos biológicos, mas também todos os campos da ciência, o biólogo Ludwig Von Bertalanffy motivou-se a estudar os sistemas de forma interdisciplinar. Assim, na década de 60, a Teoria Geral dos Sistemas destacou os conceitos que permitiam a compreensão de todo tipo de sistemas, dando destaque para a Computação e a Cibernética¹⁰ como áreas de aplicação da teoria (BERTALANFFY, 1968).

Em paralelo, na mesma década, enquanto na área de Ciência da Computação se discutia o paradigma de problemas matemáticos computacionais complexos, Carl Adam Petri explorou a visão de Teoria de Sistemas, indo além dos problemas de informática e introduziu uma nova abordagem aplicável a diversos tipos de sistemas discretos (ciência da computação, processo legal, sistema de manufatura, sistema de transportes, processo químico, processo epidemiológico, processo demográfico, etc.) (SILVA, 2013). Defendida na tese de doutorado de Carl Adam Petri, em 1962, a rede de Petri (PN) tem sido considerada uma ferramenta efetiva de modelagem gráfica e matemática para a descrição da dinâmica do sistema, análise formal e projeto de sistemas a eventos discretos (SEDs) (MIYAGI, 1996; ADAM; ATLURI; HUANG, 1998; VILLANI; MIYAGI; VALETTE, 2007; SILVA, 2013).

Nesse sentido, diversos trabalhos têm considerado as cadeias de suprimentos como SED e adotado a PN como técnica de modelagem e análise (WANG et al., 2013; ZEGORDI; DAVARZANI, 2012; LAM; YIP, 2012; TUNCEL; ALPAN, 2010; WU; BLACKHURST; OGRADY, 2007; DOTOLI; FANTI, 2005; WU; BLACKHURST, 2005).

Este capítulo apresenta as características de um SED, descreve a PN e consolida os trabalhos mais significativos que adotaram ela como técnica para modelagem e análise das rupturas de uma cadeia de suprimentos. Em seguida, o capítulo apresenta o *Production Flow Schema* (PFS) e suas vantagens na modelagem conceitual dos processos produtivos em geral. Por fim, o capítulo faz

¹⁰ Segundo o autor, a Cibernética era a “teoria dos sistemas de controle baseada na comunicação entre o sistema e o meio ambiente” (BERTALANFFY, 1968).

uma introdução do procedimento de modelagem, indicando a interpretação adotada para modelar as cadeias de suprimentos com o PFS e a PN.

3.1 SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS

Um sistema é composto pelas suas entradas, processos e saídas, que interagem com um propósito (CHUNG, 2004; OGATA, 2006). Este conceito não fica restrito apenas a algo físico, pois pode ser aplicado a fenômenos abstratos, como aqueles encontrados na economia (OGATA, 2006).

Enquanto um sistema é algo real (por exemplo, um carro, uma fábrica, um corpo humano), um modelo é uma “abstração” que geralmente se aproxima do comportamento verdadeiro de um sistema (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Ressalta-se que a seleção das fronteiras do sistema é uma questão de escolha e é influenciada pelos objetivos do estudo (WILD, 1977). Além da fronteira, deve-se ter atenção à quantidade de variáveis e restrições que serão consideradas, pois inúmeras simplificações podem impactar a análise do sistema (KIM et al., 2004). Assim, o modelo é uma forma de representação simplificada de um sistema, mas deve de alguma forma processar e manipular os dados e variáveis de interesse.

Para o processo de modelagem e análise de um sistema faz-se necessário inicialmente identificar o tipo do sistema. A Figura 9 apresenta um esquema que organiza as diversas classificações de sistemas. O Anexo A faz uma descrição para cada tipo de sistema.

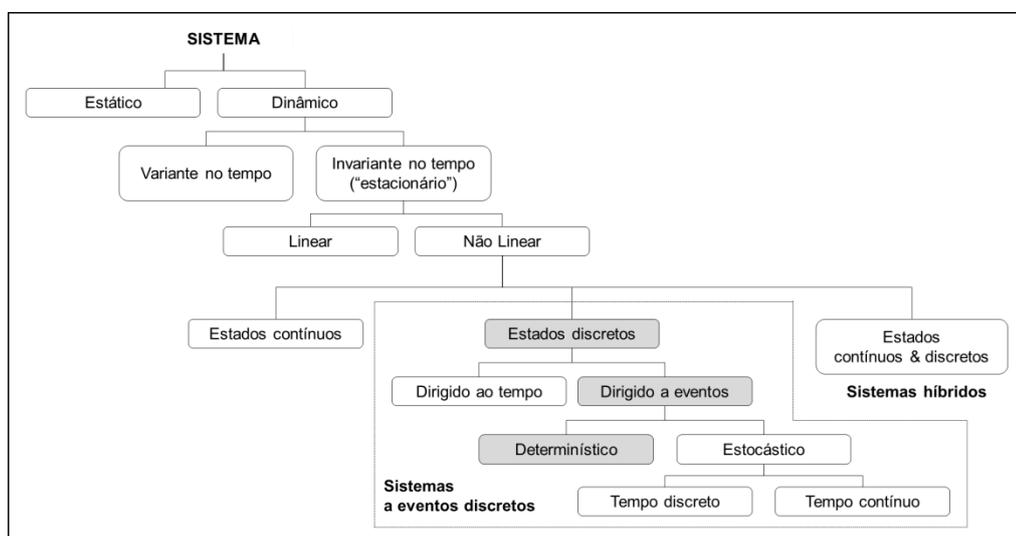


Figura 9 - Classificações de sistema (baseado em CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Os sistemas dinâmicos a eventos discretos, ou simplesmente chamados de sistemas a eventos discretos (SED), emergiram como uma das formas de tratamento dos sistemas com regras e procedimentos criados pelo homem (*man-made systems*), como os sistemas de manufatura, redes de comunicação, sistemas de transporte, sistemas de gerenciamento de banco de dados e sistemas computacionais (VILLANI; MIYAGI; VALETTE, 2007, KUMAR; GARG, 1995). Nesse sentido, o presente trabalho levantou na literatura, os trabalhos que consideram as cadeias de suprimentos como SED e que analisaram a ocorrência de rupturas (Tabela 4). Para este levantamento, o Scopus e o Web of Science foram as bases de dados utilizadas.

Tabela 4: Síntese dos trabalhos relevantes que abordam as cadeias de suprimentos como SED e que analisaram a ocorrência de rupturas nas operações das cadeias de suprimentos.

Trabalho	Setor da cadeia de suprimentos	Tipo da ruptura	Descrição do trabalho	Simulador	Procedimento de modelagem e análise?
NUNES; CRUZ-MACHADO, 2014	Automotiva	Greve dos funcionários em uma montadora	Nunes e Cruz-Machado (2014) propõem a modelagem de rupturas e a análise dos impactos para as cadeias de suprimentos através do cálculo de índices de desempenho de cada sistema produtivo e da cadeia global.	Arena	Não
AZAMBUJA; CHEN, 2014	Construção civil	Diversos	Azambuja e Chen (2014) descrevem o uso da FMECA, ferramenta para análise das falhas, efeitos e criticidade, combinada com a simulação discreta para avaliar os riscos, identificar as vulnerabilidades e medir os impactos das rupturas na cadeia de suprimentos.	Minitab	Não
BRUZZONE et al., 2014	Alimentos	Produtos contaminados	Bruzzone, Longo, Massei, Nicoletti e Agresta (2014) propõem um modelo estocástico que simula a ruptura e uma análise de uma ação de recall para reter a distribuição de produtos contaminados.	ExtendSim	Não
SAMVEDI; JAIN, 2013	Têxtil	Diversos	Samvedi e Jain (2013) estudam modelos matemáticos para a previsão do desempenho das cadeias de suprimento durante distúrbios e rupturas.	Modelo criado em Matlab	Sim
LAM; YIP, 2012	Semicondutor	Porto marítimo afetado por um furacão	Lam e Yip (2012) confirmam que a rede de Petri pode ser utilizada para analisar os impactos de uma ruptura portuária na cadeia de suprimentos.	Artifex PN	Não

TUNCEL; ALPAN, 2010	Industrial	Diversos	Tuncel e Alpan (2010) adotaram a rede de Petri e propuseram a modelagem da cadeia de suprimentos para simular os efeitos de rupturas.	Artifex PN	Não
WU et al., 2010	Industrial	Fábrica afetada por um terremoto	Wu, Dong, Tang e Chen (2010) propõem um modelo baseado na Cadeia de Markov para determinar a capacidade produtiva da cadeia de suprimentos em cenários de rupturas.	Modelo criado em C#	Sim
FINKE; SCHIMITT, 2010	Indústria aeroespacial	Ruptura no processo (Ex.: falha nas máquina) ou na localidade (Ex.: furacão)	Finke e Schmitt (2010) modelam uma cadeia de suprimentos aeroespacial, que diferentemente da industrial tradicional, se foca em projetos de longa duração e um único produto. O modelo é estocástico e as rupturas são caracterizadas pelo “tempo de chegada” (arrival time) e a duração da ruptura. O impacto na cadeia é medido através do tempo necessário para a entrega do produto (completion time), medido em anos.	Arena	Não
SCHMITT; SINGH, 2009	Bens de consumo	Diversos	Schmitt e Singh (2009) sugerem a modelagem da cadeia de suprimentos como SED e a adoção do método de Monte Carlo para inserir os riscos de cada sistema produtivo. Por fim, a análise se focou nos níveis de estoque da cadeia e o atendimento do cliente (comparação entre a demanda solicitada e o volume atendido).	Arena e @Risk	Não
CHEN et al., 2006	Semicondutor	Diversos	Chen, Fowler, Wu, Callarman, Ambrose e Hargaden (2006) propõem um modelo para simulação que considera o Filtro de Kalman para calibrar a capacidade produtiva de cada sistema produtivo da cadeia.	Modelo criado em C++	Não

Os trabalhos citados indicam a preocupação dos autores em entender como as cadeias de suprimentos de diferentes setores (automotivo, construção civil, alimentos, têxtil, etc.) são impactadas pelas rupturas. Considerando as cadeias de suprimentos globais como SED, os autores empregaram diferentes técnicas para a modelagem e análise: teoria das probabilidades, métodos algébricos e outras. Dado que alguns modelos são relativamente complexos e as soluções matemáticas não são consideradas suficientes, a simulação computacional foi utilizada para representar o comportamento do sistema ao longo do tempo, coletar dados e estimar informações do sistema. Para essa simulação computacional, softwares comerciais e desenvolvidos pelos autores foram empregados (Arena, Minitab, ExtendSim e outros). Citando a vantagem da simulação computacional, Schmitt e

Singh (2009) indicam que a simulação permite analisar como o sistema se comportaria em condições extremas, como é o caso de uma ruptura.

Considerando ainda os trabalhos citados, nota-se uma baixa preocupação dos autores com o desenvolvimento da sistematização dos procedimentos de modelagem e análise, principalmente para os modelos gráficos. Dado que a PN possui uma notação gráfica consolidada, regras formalizadas e um grande poder de representação de SEDs (PETRI, 1966; MURATA, 1989; ZURAWSKI; ZHOU, 1994; MIYAGI, 1996), entende-se que essa técnica deve ser melhor explorada na sistematização de um procedimento para modelagem e análise do GSCM.

A próxima seção apresenta a PN, as regras para a construção do grafo e mapeia o “estado da arte”, ou seja, as pesquisas significativas que adotaram a PN como técnica para a modelagem GSCM e a análise de suas rupturas.

3.2 REDE DE PETRI (PN)

Em 1962, Carl Adam Petri apresentou a sua tese de doutorado intitulada *Kommunikation mit Automaten* (Comunicação com Autômatos) à Universidade de Bonn, na Alemanha (PETRI, 1966). A fim de solucionar o problema gerado por funções recursivas em programas computacionais, Petri sugeriu que componentes fossem adicionados e trabalhassem de forma autônoma em um sistema computacional assíncrono (BRAUER; REISIG, 2006). Diante dessa proposta, Petri concluiu que a teoria dos autômatos não era capaz de representar adequadamente o fluxo de informação dos componentes assíncronos e propôs um novo modelo para representação do sistema computacional assíncrono (PETRI, 1966).

A PN é formalmente definida como uma 5-tupla: $P = (E; T; F; W; M)$ em que: E é o conjunto de elementos passivos chamados de lugares (neste texto os termos específicos da rede de Petri estão sublinhados), T é o conjunto de elementos ativos chamados de transições, F é o conjunto de relacionamentos entre os elementos passivos e os elementos ativos chamados de arcos orientados, W é um vetor que define os pesos de cada arco e M é um vetor de marcação que representa os estados discretos do sistema modelado. A definição da PN envolve também regras para o “disparo” das transições que altera a marcação e com isso se descreve o comportamento dinâmico do sistema modelado. Uma definição mais precisa da PN encontra-se, por exemplo, em Peterson (1981), Murata (1989), Zurawski e Zhou

(1994), Cassandras e Lafortune (2008) ou Villani, Miyagi e Valette (2007). Graficamente, os elementos básicos que formam a estrutura da PN são apresentados na Figura 10.

Curiosamente, a PN, como é conhecida hoje, não é descrita na tese de Carl Adam Petri, mas apareceu pela primeira vez na palestra “Fundamentos na descrição de um processo discreto”, em Hannover, no ano de 1966 (BRAUER; REISIG, 2006). Por fim, em 2007, ao receber a medalha de ouro da Academia de Aprendizagem Transdisciplinar e Estudos Avançados, Petri surpreendeu ao discursar que havia inventado a PN antes da tese, em 1939, com o objetivo de memorizar processos químicos, utilizando círculos para as substâncias e os quadrados para as reações, conectados por setas para indicar as entradas e saídas (Figura 11) (SILVA, 2013).

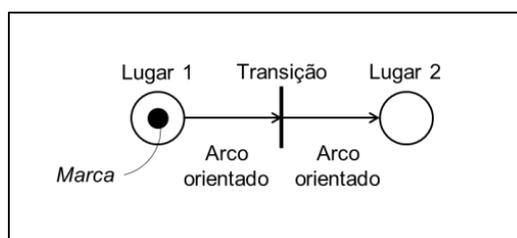


Figura 10 – Notação gráfica na PN.

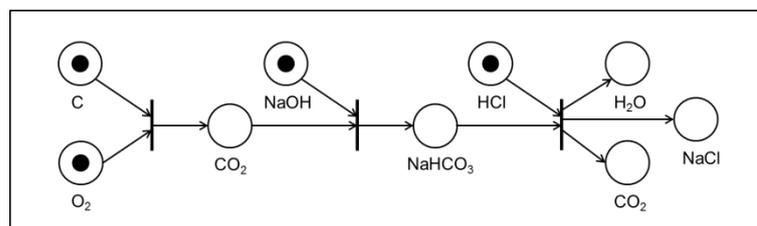


Figura 11 – Exemplo de um processo químico (PETRI; REISIG, 2008).

Além de ser uma técnica que facilita a visualização por ser um modelo gráfico, a PN permite a visualização de propriedades comportamentais como a sincronização, causalidade, paralelismo, concorrência e conflito entre processos e eventos, além do compartilhamento de recursos (MURATA, 1989; ZURAWSKI; ZHOU, 1994).

Tais características permitiram o uso da PN para diversas aplicações, como: avaliação de protocolos de comunicação, modelagem e análise de sistemas de software, sistemas de controle de produção/manufatura, sistema de armazenagem, sistemas legais, redes neurais, filtros digitais, modelos de decisão, sistemas biológicos, gerenciamento de semáforos de trânsito, gerenciamento de tráfego

aéreo, controle de reator nuclear, redes de distribuição de água, modelagem de processos de negócio e outras aplicações. Por vezes, as aplicações motivaram e justificaram extensões da PN “original”, destacando-se: a PN temporizada (transições com atrasos determinados), a PN estocástica (transições com a probabilidade dos atrasos especificados), a PN colorida (marcas coloridas e “disparo” das transições definido para cada cor) e a PN hierárquica (que incluem técnicas de refinamento de transições e abstração de “subredes”). Exemplos dessas (e outras) aplicações e extensões são citados nos trabalhos de Murata (1989), Jensen (1992), Zurawski e Zhou (1994), Gerogiannis, Kameas e Pintelas (1998), Balbo, Desel, Jensen, Reisig, Rozenberg e Silva (2000), Bause e Kritzinger (2002), Zhang, Lu e Wu (2011), Van der Aalst e Stahl (2011) e Silva (2013).

Considerando as cadeias de suprimentos globais como SED e o uso da PN como técnica formal de modelagem do GSCM, a Tabela 5 consolida alguns dos trabalhos mais relevantes e indica quais trabalhos incluíram a análise de rupturas e práticas resilientes. Para este levantamento, o Scopus e o Web of Science foram novamente as bases de dados utilizadas.

Tabela 5: Síntese dos trabalhos relevantes que abordam as cadeias de suprimentos como SED e o uso da PN como técnica de modelagem do GSCM.

Trabalho	Extensão da PN	PN modelou?		Simulador	Procedimento de modelagem da PN?	PN modelou?		Procedimento de análise da ruptura [A] e da recuperação [B]?
		Fluxo de material	Fluxo de informação			Ruptura	Prática resiliente	
WANG et al., 2013	Hierárquica	Sim	Sim	CPN Tools	Sim	Não	Não	Não
ZEGORDI; DAVARZANI, 2012	Colorida	Sim	Sim	Não cita	Sim	Sim	Não	Não
LAM; YIP, 2012	Estocástica e Temporizada	Sim	Não	Artifex PN	Não	Sim	Não	Não
TUNCEL; ALPAN, 2010	Estocástica	Sim	Não	Artifex PN	Não	Sim	Não	Somente [A]
WU; BLACKHURST; OGRADY, 2007	PN com atributos nos <u>lugares</u> e <u>transições</u>	Sim	Sim	Modelo criado pelos autores	Não	Sim	Não	Não
DOTOLI; FANTI, 2005	Estocástica	Sim	Sim	SPNP	Não	Não	Não	Não
WU; BLACKHURST, 2005	PN com atributos nos <u>lugares</u> e <u>transições</u>	Sim	Não	Modelo criado pelos autores	Não	Não	Não	Não

YOU; ZHANG; JIAO, 2006	Colorida	Sim	Sim	Não cita	Sim	Não	Não	Não
MEVIUS; PIBERNIK, 2004	PN com atributos nas <u>transições</u>	Sim	Sim	XML-Net Modeler	Não	Não	Não	Não
VISWANADHAM, RAGHAVAN, 2000	Estocástica	Sim	Sim	SPNP	Não	Não	Não	Não

Os trabalhos citados revelam que os autores têm focado na representação do fluxo de material e do fluxo de informação nos seus modelos. Isso se dá, principalmente, pela preocupação de representar a adoção da filosofia “*lean*” como a produção puxada (também conhecida como “*make-to-order*”). Dentre os trabalhos, destacam-se os trabalhos de Viswanadham e Raghavan (2000) e Dotoli e Fanti (2005) que compararam as políticas de gerenciamento “*make-to-order*” e “*make-to-stock*” (produção empurrada).

Adicionalmente, nota-se que os trabalhos mais recentes têm incluído as rupturas nos modelos e, para isso, diversas extensões da PN têm sido propostas. Dentre elas, destaca-se a facilidade da representação das rupturas nas PN estocásticas, nas quais o evento de ruptura é considerado por meio de probabilidades das transições atrasarem seus “disparos” (LAM; YIP, 2012; TUNCEL; ALPAN, 2010).

Nesse sentido, com o objetivo de desenvolver um procedimento sistematizado para modelagem e análise do GSCM, o *Production Flow Schema* (PFS) é aqui introduzido como técnica para facilitar a modelagem das PNs. A próxima seção descreve este grafo e as regras para o refinamento gradativo do PFS para um modelo em PN.

3.3 MÉTODO PFS/PN

A síntese em um único passo da PN é complicada e provavelmente pode conduzir a erros se o sistema em questão for de grande complexidade, assim, é racional considerar o uso de uma linguagem mais informal e um detalhamento gradativo para a modelagem em PN (MIYAGI, 1996).

Considerando essas limitações e a fim de modelar e analisar o controle de SED, o PFS foi criado da derivação da PN “*Channel-Agent*” de Reisig (1992), como

novos distribuidores conectados por atividades (FATTORI et al., 2011). Em seguida, a conversão do modelo conceitual (PFS) para o modelo funcional (PN) pode ser realizada, tomando as regras ilustradas na Figura 14: (a) atividades são traduzidas em duas transições e um lugar; e (b) o distribuidor é traduzido para um lugar e suas transições de entrada e saída (HASEGAWA et al., 1999).

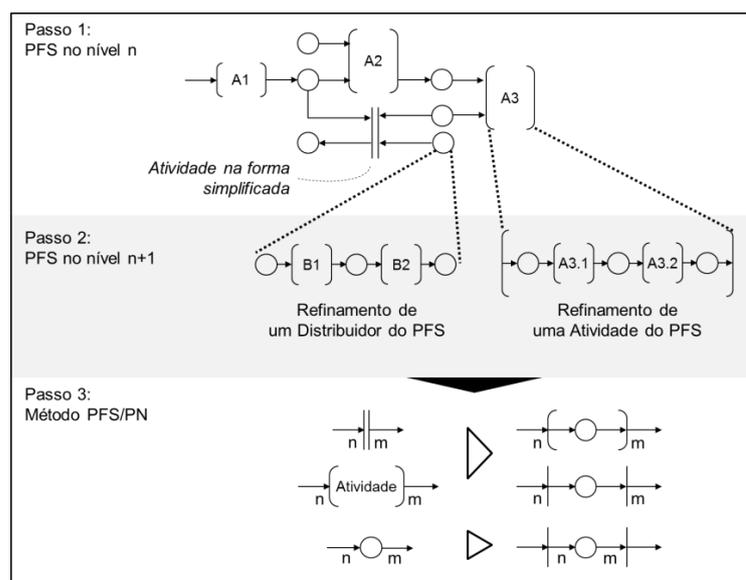


Figura 14 - Abordagem *top-down* do PFS e tradução PFS/PN

Dentre os trabalhos que se utilizaram da técnica de refinamento com PFS, destacam-se os seguintes trabalhos: em serviços de saúde (MIYAGI; MIYAGI; KISIL, 2002), em sistemas de manufatura (NASSAR, 2008), em sistemas de controle de edifícios inteligentes considerando a ocorrência de falhas (SILVA, 2008), na composição de *web services* (GARCIA et al, 2010; FATTORI et al., 2011), nos sistemas de ensino (SANTOS; AQUINO, 2013) e na orquestração de sistemas produtivos (SQUIT, 2013).

3.4 INTERPRETAÇÕES DO PFS E DA PN APLICADA PARA O GSCM

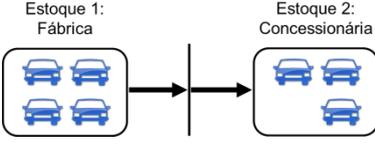
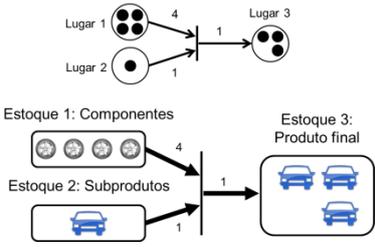
Segundo Murata (1989), algumas interpretações da PN são comuns na literatura para as transições e os lugares de entrada (cujos arcos têm origem no lugar e são orientados para a transição) e os lugares de saída (cujos arcos têm origem na transição e são orientados para o lugar) (Tabela 6).

Tabela 6: Interpretações para as transições e lugares (MURATA, 1989).

Lugares de entrada	Transição	Lugares de saída
Pré-condições	Evento	Pós-condições
Informação de entrada	Passo computacional	Informação de saída
Sinal de entrada	Processador de sinais	Sinal de saída
Recursos necessários	Tarefa	Recursos liberados
Condições	Lógica	Conclusões
Estoques	Processador	Estoques

Considerando que as cadeias de suprimentos globais podem ser entendidas como SED e que a PN pode ser utilizada na sua modelagem e análise (VISWANADHAM, RAGHAVAN, 2000; MEVIUS; PIBERNIK, 2004; WU; BLACKHURST, 2005; WU; BLACKHURST; OGRADY, 2007; TUNCEL; ALPAN, 2010; LAM; YIP, 2012; ZEGORDI; DAVARZANI, 2012; WANG et al., 2013), além das interpretações genéricas sugeridas para as transições e os lugares da PN por Murata (1989), o presente trabalho introduz interpretações específicas descritas na Tabela 7.

Tabela 7: Exemplos de interpretações específicas da PN para o GSCM.

Elemento da PN	Exemplos de interpretação para o GSCM
Transição	<p>Eventos de transformação física ou de movimentação dos itens dos SP e das cadeias de suprimentos globais.</p> 
Lugares	<p>Locais onde os itens podem ser estocados ou onde as transformações físicas ocorrem. O volume máximo é definido na PN pela capacidade finita, ou seja, o número máximo de marcas (K) que o lugar pode acomodar de uma só vez.</p> 
Peso dos arcos	<p>Os <u>arcos</u> possuem a propriedade de peso, no qual um <u>arco</u> com peso N equivale a um conjunto de N de <u>arcos</u> em paralelo (MURATA, 1989). Na ausência da indicação do peso considera-se que este é unitário. Os pesos podem ser interpretados como a quantidade de itens movimentados ou necessários para a transformação física ocorrer.</p> 

Arco inibidor	<p>Um <u>arco inibidor</u> conecta um <u>lugar</u> a uma <u>transição</u> e é representado por uma linha tracejada com um pequeno círculo na sua extremidade. O <u>arco inibidor</u> desabilita o disparo da <u>transição</u> quando esse <u>lugar</u> possui uma <u>marca</u> e permite que a <u>transição</u> fique habilitada se esse <u>lugar</u> não possui <u>marca</u> (MURATA, 1989). A interpretação adotada é que um evento de ruptura impede o disparo de uma <u>transição</u> por meio de um <u>arco inibidor</u>.</p>	
---------------	--	--

Esta seção se foca na descrição das interpretações adotadas no presente trabalho para na modelagem em PFS e PN. Esta seção apoia o entendimento do Capítulo 4, no qual o procedimento para modelagem e análise do GSCM é descrito.

3.4.1 Descrição do sistema produtivo (SP) baseada no modelo SCOR (*Supply Chain Operations Reference*)

Com o objetivo de modelar os SPs, e por fim analisar o GSCM, é importante adotar um modelo de referência como o SCOR, detalhado no Anexo B.

Na versão SCOR 11.0, o GSCM é definido pela integração de seis processos de negócios básicos: *Plan* (planejar), *Source* (abastecer), *Make* (produzir), *Deliver* (entregar), *Return* (retornar) e *Enable* (habilitar) – desde o fornecedor original até o cliente final (SCOR, 2012), conforme ilustra a Figura 15. Os seus processos são descritos na Tabela 8.

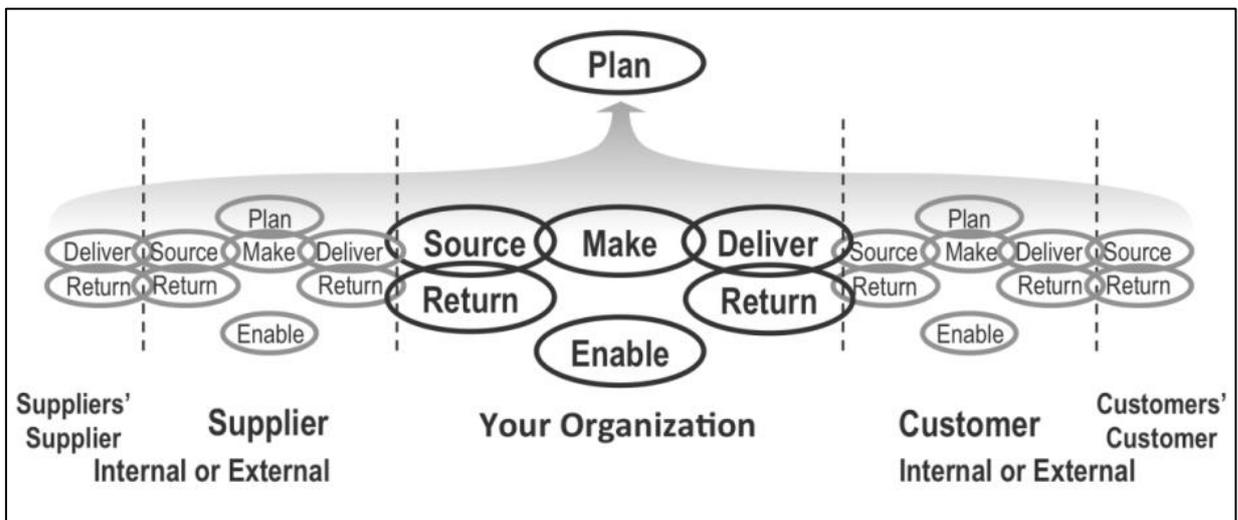


Figura 15 – Nível 1 do modelo SCOR (SCOR, 2012).

Tabela 8: Descrição dos processos de negócios básicos do Nível 1 do SCOR (SCOR, 2012)

Processos	Descrição
<i>Plan</i>	Atividades associadas ao desenvolvimento de planos para operar a cadeia de suprimentos. Inclui a coleta de requisitos, coleta de informações da disponibilidade dos recursos, balanceamento dos requisitos e recursos para determinar a capacidade planejada e a lacuna da demanda ou dos recursos e identificar as ações para corrigir essas lacunas.
<i>Source</i>	Atividades relacionadas à ordenação (ou agendamento das entregas) e o recebimento de matérias-primas e serviços. O processo contempla a emissão de ordens de compra, recebimento, validação e armazenamento das matérias-primas e aceitação da fatura do fornecedor. São de três tipos: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Source</i> para produtos do tipo <i>Make-to-Stock</i>; • <i>Source</i> para produtos do tipo <i>Make-to-Order</i>; • <i>Source</i> para produtos do tipo <i>Engineer-to-Order</i>.
<i>Make</i>	Atividades associadas com a conversão de materiais ou a realização dos serviços. Como exemplo de conversão de materiais cita-se: montagem, processamento químico, manutenção, reparação, reciclagem e remanufatura. São de três tipos: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Make-to-Stock</i>; • <i>Make-to-Order</i>; • <i>Engineer-to-Order</i>.
<i>Deliver</i>	Atividades associadas à criação, manutenção e o cumprimento dos pedidos dos clientes. O processo contempla o recebimento, validação, criação de pedidos do cliente, entrega dos pedidos agendados do cliente, separação, embalagem, expedição e faturamento ao cliente. São de quatro tipos: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Deliver</i> para produtos do tipo <i>Make-to-Stock</i>; • <i>Deliver</i> para produtos do tipo <i>Make-to-Order</i>; • <i>Deliver</i> para produtos do tipo <i>Engineer-to-Order</i>; • <i>Deliver</i> para o setor do varejo.
<i>Return</i>	Atividades associadas com o fluxo reverso de materiais. O processo contempla a identificação da necessidade de retorno, a tomada de decisão sobre a disposição, o agendamento do retorno e o recebimento dos produtos devolvidos. A reparação, reciclagem e a remanufatura não são descritas por esse processo. São de dois tipos: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Return</i> para matérias primas; • <i>Return</i> para produtos finais;
<i>Enable</i>	Atividades associadas com o gerenciamento da cadeia de suprimentos. O processo contempla a gestão de regras de negócios, gestão do desempenho, gestão de dados, gestão de recursos, gestão das instalações, gestão de contratos, gestão dos fornecedores, conformidade regulatória e gestão de riscos.

Segundo o SCOR, utilizando esses processos de negócios básicos como *building blocks*, diferentes processos industriais podem ser modeladas (SCOR, 2012). Nesse sentido, o presente trabalho considera os processos de negócio básicos (ou *building blocks*) *Source*, *Make* e *Deliver* para a modelagem dos SPs.

Os processos de negócio básicos *Return* e *Enable* não foram considerados nesse trabalho. O processo de negócio básico *Return* tem como objetivo descrever o fluxo reverso de materiais e poderia representar a devolução de matérias primas aos fornecedores ou produtos finais para a empresa devido a problemas de qualidade ou por questões sustentáveis (para reciclagem ou reaproveitamento, por exemplo). A

autora entende que esse fluxo reverso necessitaria um estudo mais aprofundado em sustentabilidade e um levantamento sobre as práticas adotadas hoje pelas empresas. Em paralelo, o processo de negócio básico *Enable* não foi considerado pois também necessitaria um estudo mais aprofundado sobre práticas de gestão nas empresas e por isso não foi considerado na modelagem e no método atual.

Para a análise da ocorrência de rupturas e a adoção de práticas resilientes no GSCM, o presente trabalho foca na modelagem do fluxo de material e de informação das cadeias de suprimentos. Não se considera nessa abordagem: a análise da capacidade versus a demanda (referentes ao processo *Plan*), o retorno de matérias-primas para os fornecedores e de produtos finais do cliente (referentes ao processo *Return*) e o gerenciamento de atividades suportes (referentes ao processo *Enable*).

3.4.2 Tipos de SPs

As cadeias de suprimentos globais consistem em SPs, que processam itens físicos a fim de se produzir bens ou executar serviços (VILLANI; MIYAGI; VALETTE, 2007) e, de acordo com o “processamento” feito pelo SP, este pode ser classificado em quatro tipos (WILD, 1977): de manufatura, de transporte, de suprimento ou de serviço. Além da descrição desses quatro tipos de SP, a Tabela 9 indica a modelagem desenvolvida aqui para cada tipo de SP, baseado nos *building blocks* do modelo SCOR (*Source, Make e Deliver*) (Figura 16, 17, 18 e 19).

Tabela 9: Modelagem proposta para cada tipo de SP.

Tipo de SP	Entrada	Processamento	Saída	Exemplos de SP	Modelagem
Manufatura	Item físico	Alteração física	Item físico	<ul style="list-style-type: none"> • Montadora de automóveis; • Mina de carvão; • <i>Fast-food</i> com entrega a domicílio. 	<i>Source, Make, Deliver</i>
Transporte	Item físico	Alteração do local	Item físico	<ul style="list-style-type: none"> • Serviço de táxi; • Remoção de lixo. 	<i>Deliver</i>
Suprimento	Item físico	Alteração da propriedade	Item físico	<ul style="list-style-type: none"> • Posto de gasolina; • Supermercado; • Concessionária de veículos. 	<i>Source</i>
Serviço	Item físico	Tratamento ou acomodação	Item físico	<ul style="list-style-type: none"> • Consultórios médicos; • Lavanderia; • Motel. 	<i>Make</i>

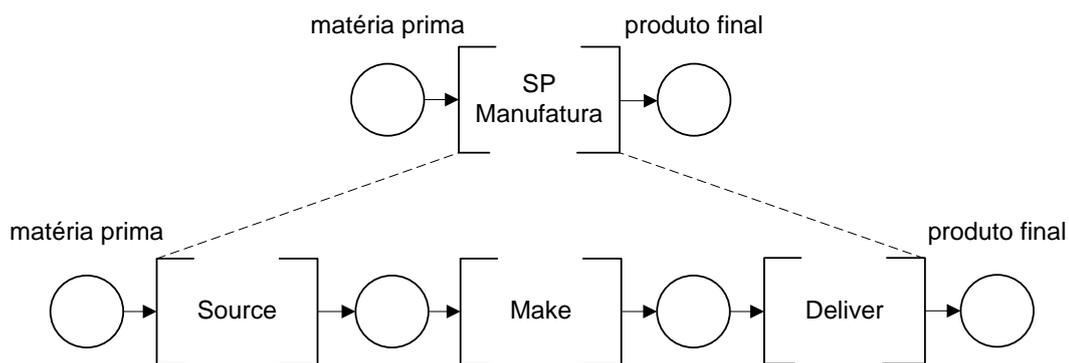


Figura 16 – PFS do SP do tipo “manufatura”.

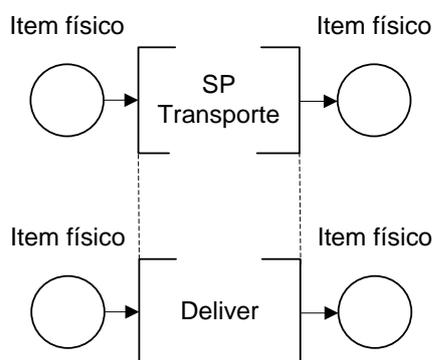


Figura 17 – PFS do SP do tipo “transporte”.

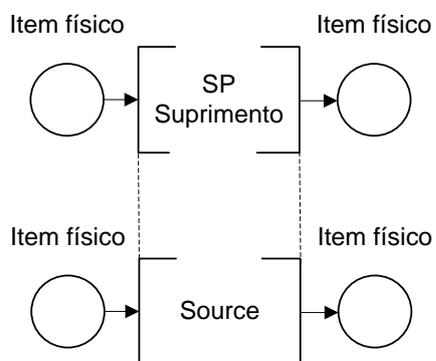


Figura 18 – PFS do SP do tipo “suprimento”.

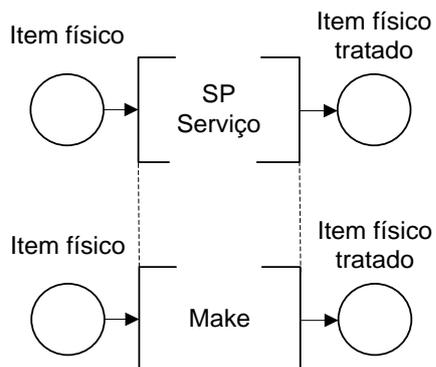


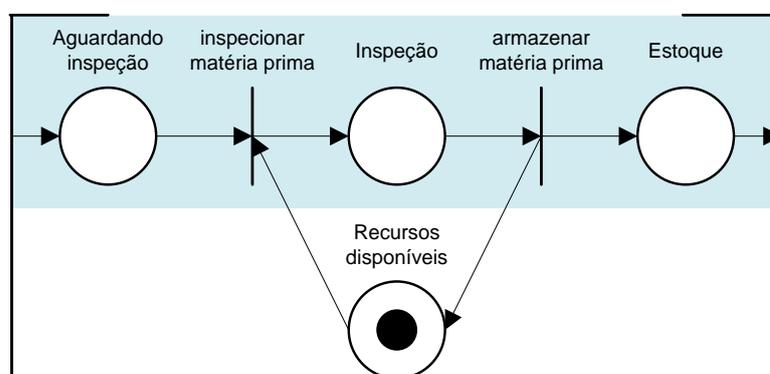
Figura 19 – PFS do SP do tipo “serviço”.

3.4.3 Modelagem dos *building blocks* dos tipos “Source”, “Make” e “Deliver”

Nessa subseção, a tradução feita para PN do *building block* do tipo “Source” é descrita. Os demais modelos de PN foram desenvolvidos de forma similar.

Inicialmente, o fluxo de material (destacado em azul, na Figura 20) é criado a partir do modelo em PFS do *building block* do tipo “Source”. Segundo Hasegawa, Takahashi e Miyagi (1988), a atividade do PFS pode ter diferentes níveis conceituais que geram uma estrutura hierárquica. Como exemplo, os autores indicam que um sistema de controle de produção pode ter três níveis: (1) no Nível de Ação, que inclui as ações executadas pelos movimentos das máquinas e equipamentos (como mover, parar, abrir, fechar, trocar, para frente, para trás); (2) no Nível de Operação, que inclui as operações finais executadas (como juntar, rosquear, abertura de porta, fechamento de porta) e (3) no Nível de Tarefa, no qual o sistema de controle pode ser avaliado (como, por exemplo, montar, desmontar, embalar, desembalar, processar, etc.). O nível conceitual abordado pelo PFS depende do objetivo do trabalho (HASEGAWA; TAKAHASHI; MIYAGI, 1988).

Nesse sentido, para a análise do GSCM, o modelo do fluxo de material em PN (destacado em azul, na Figura 21) é derivado considerando apenas a execução da tarefa “inspecionar matéria prima” no *building block* do tipo “Source”. Considerando que esta execução depende da disponibilidade de recursos, como equipamentos, pessoas e infraestrutura, a PN incluiu um lugar que representa os “recursos disponíveis”.

Figura 20 – PN do fluxo de material do *building block* do tipo “Source”.

Em seguida, para caracterizar uma produção puxada, o fluxo de informação foi modelado na PN (destacado em amarelo, na Figura 21). Os lugares indicados por “*kanban*” são adicionados para habilitar o “disparo” da transição anterior. Dessa forma, a retirada de 01 unidade de matéria prima do elemento Estoque envia um *kanban* requisitando a armazenagem de 01 nova unidade de matéria prima, e assim por diante.

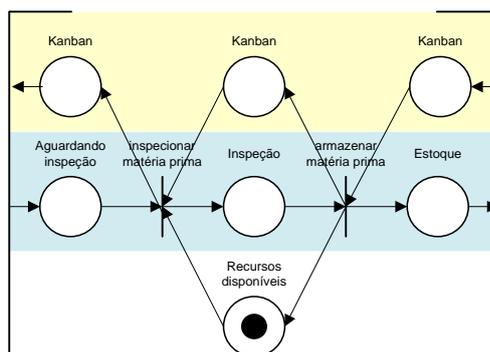


Figura 21 – PN do fluxo de material e de informação do *building block* do tipo “*Source*”.

Por fim, para a inclusão de um evento de ruptura e da recuperação no modelo PN, o trabalho sugere a introdução do fluxo de disponibilidade (destacado em vermelho, na Figura 22). Ressalta-se que este passo é necessário para a inclusão do evento de ruptura e da recuperação e é garantido pelas propriedades do arco inibidor, que desabilita o disparo das transições como descrito a seguir.

Caso o lugar “Ruptura” tenha uma marca, após um período de tempo Δt_1 , a transição “evento de ruptura” é “disparada” e as transições “inspecionar matéria prima” e “armazenar matéria prima” são inabilitadas por um arco inibidor. Se o lugar “Prática de recuperação” tiver uma marca, após um período de tempo Δt_2 , a transição “evento de recuperação” é “disparada” e as transições “inspecionar matéria prima” e “armazenar matéria prima” são habilitadas novamente. A seguir, as Figuras 22, 23 e 24 apresentam o modelo final em PN do *building block* do tipo “*Source*”, “*Make*” e “*Deliver*”.

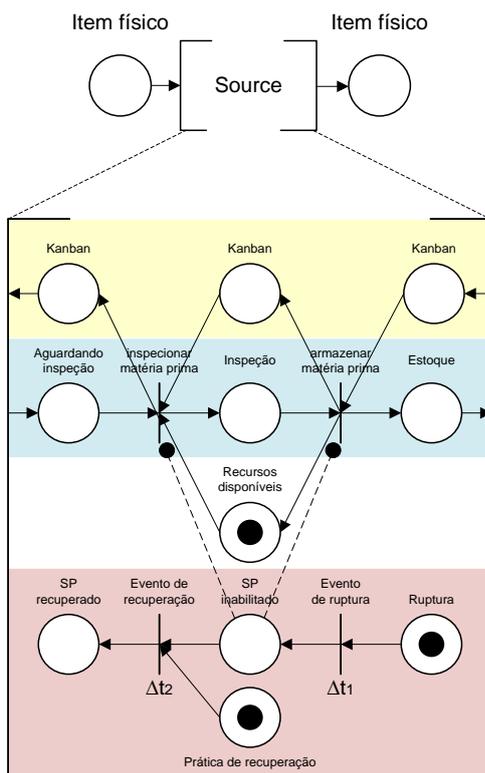


Figura 22 – PN final do *building block* do tipo “Source”.

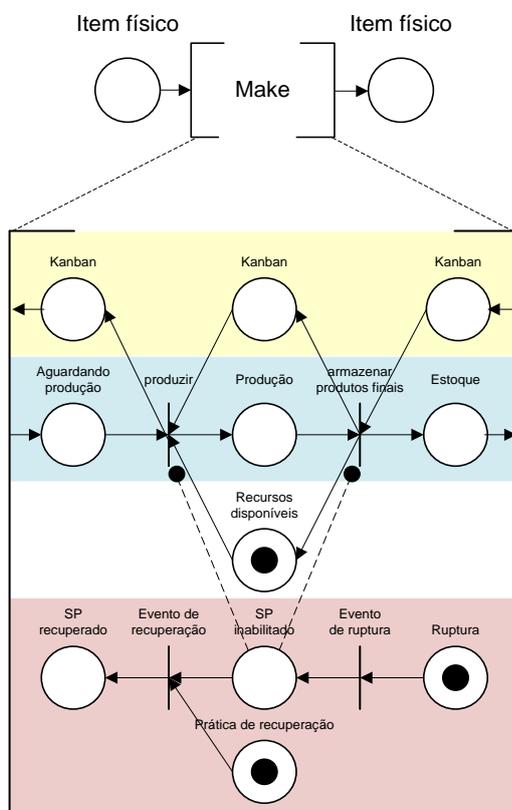


Figura 23 – PN final do *building block* do tipo “Make”.

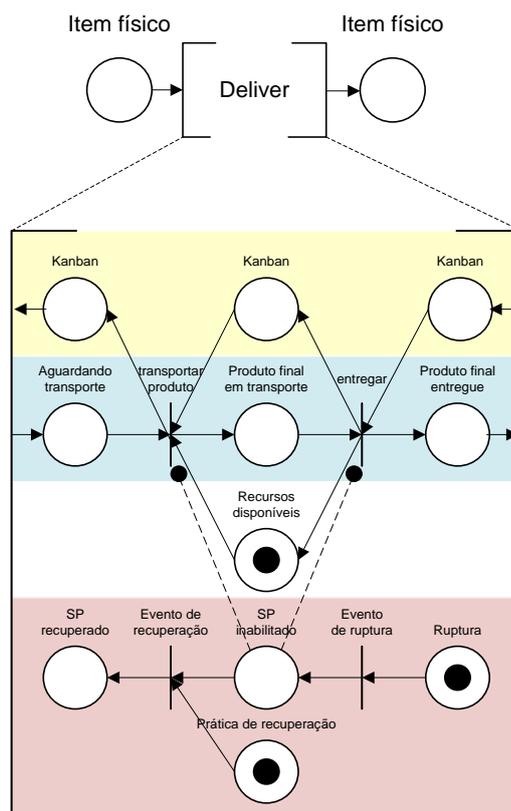


Figura 24 – PN final do *building block* do tipo “Deliver”.

3.4.4 Comentários sobre a modelagem hierárquica e modularizada

O presente trabalho considera uma abordagem *top-down* na qual os *building blocks* em PN e os SPs em PFS são organizados hierarquicamente para a composição de uma cadeia de suprimentos. Nesse caso, a modelagem dos SPs do tipo “manufatura”, “transporte”, “suprimento” e “serviço” são baseados nos *building blocks* do tipo “Source”, “Make” e “Deliver”, e por sua vez, a modelagem das cadeias de suprimentos é desenvolvida a partir dos modelos dos SPs.

Essa abordagem *top down* é vantajosa primeiramente porque permite um melhor entendimento do sistema (VAN DER AALST; STAHL, 2011). Em segundo lugar, as PN garantem a modelagem hierárquica, ou seja, elementos de uma rede podem ser substituídos por um lugar ou uma transição, ou um lugar e uma transição podem ser substituídos por “subredes”, sem perder o formalismo, garantindo a validação e a verificação do modelo em PN (GEROGIANNIS; KAMEAS; PINTELAS, 1998).

Além das vantagens da modelagem hierárquica, diversos autores também tem se destacado as vantagens da “modularização”. Dentre eles, cita-se o trabalho

de Dotoli e Fanti (2005) que propuseram a modularização de quatro subredes que representavam o fornecedor, a manufatura, o transportador e o consumidor. Na mesma linha, o trabalho de Alves Jr, Maciel e Lima (2007) propôs a modularização de três subredes: fábrica, armazéns e consumidores. Complementarmente, focados na criação dos modelos PN, Wu e Blackhurst (2005) apresentaram uma proposta de operadores dos tipos “e” e “ou” para a união das subredes e Wang, Ip, Muddada, Huang e Zhang (2013) apresentaram as técnicas de refinamento de transições e de descrição das subredes.

Para a modelagem e análise do modelo, o presente trabalho se utilizou de programas computacionais existentes como o *software* HPSim (HPSIM, 2013) devido aos recursos disponíveis para a geração de relatórios com as marcações passo a passo dos estados do sistema. Contudo destaca-se que para a abordagem *top-down* adotada, existem ferramentas com recursos mais sofisticados como o CPN tools, que permitem a modelagem de PN hierárquicas (VAN DER AALST; STAHL, 2011)

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Primeiramente o capítulo apresentou as características de um SED e indicou os trabalhos relevantes que abordam as cadeias de suprimentos como SED. Em seguida, a PN foi apresentada como uma das técnicas de modelagem e análise de SEDs e os trabalhos relevantes que utilizaram a PN como técnica de análise do GSCM foram listados. Dessa pesquisa, verificou-se que existe uma ausência de trabalhos que focam a sistematização dos procedimentos de modelagem das cadeias de suprimentos como SED e adotam a PN como técnica de análise. Em seguida o capítulo apresentou o PFS como técnica de apoio com abordagem *top-down* para sistematizar e facilitar a modelagem das PNs.

Por fim, o capítulo apresentou algumas interpretações específicas da PN para o presente trabalho, focado no GSCM. Considerando as vantagens de uma modelagem hierárquica e modularizada, o capítulo apresentou os *building blocks* em PN para a composição dos SPs (dos tipos “*Source*”, “*Make*” e “*Deliver*”) e os modelos PFS de cada tipo de SP (dos tipos “manufatura”, “transporte”, “suprimento” e “serviço”).

O próximo capítulo descreve assim o procedimento sistematizado para modelagem e análise do GSCM com o foco na ocorrência de rupturas nas operações da cadeia de suprimentos e a adoção de práticas para a sua resiliência e se for o caso sua recuperação.

4 PROCEDIMENTO PARA MODELAGEM E ANÁLISE DO GSCM

Baseado em trabalhos na área de processos produtivos e sistemas produtivos (SPs) em geral o procedimento proposto para modelagem e análise do GSCM considerando cenários de ruptura da cadeia de suprimentos global é composto por cinco etapas como ilustra a Figura 25.

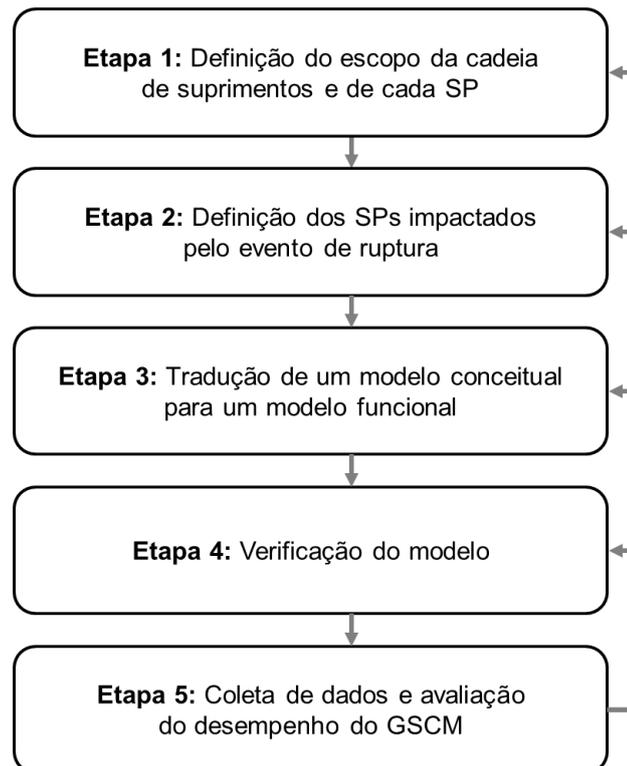


Figura 25 – Etapas do procedimento proposto.

- Etapa 1: Definição do escopo da cadeia de suprimentos e de cada SP - Nessa etapa, os SPs são identificados no cenário 0 (de operação normal). Em seguida, as características funcionais (tipo de sistema, entrada e saídas), as características físicas (localização geográfica) e premissas de cada entidade que compõe a cadeia de suprimentos são identificadas e documentadas. Por fim, todas as díades que formam a cadeia de suprimento são definidas nesta etapa.
- Etapa 2: Definição dos SP impactados pelo evento de ruptura - O evento de ruptura é definido, bem como o(s) SP(s) impactado(s) e as consequências para o cenário 0. A prática GSCM de recuperação do desempenho da cadeia é definida. Por fim, as métricas de desempenho são definidas.

- Etapa 3: Tradução de um modelo conceitual para um modelo funcional - Inicialmente a cada sistema produtivo (SP) é representado por um modelo conceitual, isto é, em PFS. Em seguida, desenvolve-se a tradução do modelo conceitual para um modelo funcional em PN. Por fim, a ruptura e a prática resiliente são incluídas no modelo em PN (em outras palavras, o estado inicial do modelo é definido).
- Etapa 4: Verificação do modelo – Nessa etapa, o modelo passa por uma análise estrutural e comportamental do grafo (*deadlocks*, instabilidade do comportamento dinâmico e presença de estados indesejáveis).
- Etapa 5: Coleta de dados e avaliação do desempenho do GSCM - Por fim, nesta última etapa, as condições da simulação são definidas como, por exemplo, a quantidade de disparos das transições e os experimentos (avaliação das rupturas, mitigação dos problemas e recuperação da cadeia) são realizados e os dados obtidos são devidamente avaliados.

4.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Destaca-se que o processo de modelagem adotado envolve um procedimento incremental e iterativo, que envolve a verificação e a validação do modelo para toda alteração realizada no modelo (KIM et al. 2004). No caso do procedimento proposto, a verificação se dá na Etapa 4 e a validação na Etapa 5.

Sistemas complexos envolvem maiores riscos na modelagem computacional, por isso a **verificação** está relacionada ao modelo computacional (ou modelo implementado em algum software de simulação) e em geral checa se o modelo executa os passos conforme o esperado (CHWIF; MEDINA, 2014. MIYAGI, 2006). Em outras palavras, a verificação é um processo de “debug” do modelo computacional para a identificação e correção de erros incorporados no processo de “codificação” (KIM et al. 2004). Especificamente para a verificação de uma PN, Murata (1989), Gerogiannis, Kameas e Pintelas (1998), Penha, Freitas e Martins (2010) e Chwif e Medina (2014) indicam que existem algumas técnicas para verificação, por meio de: (1) árvores de alcançabilidade, que define todas as marcações alcançáveis a partir da marcação inicial da PN; (2) matrizes de incidência, nas quais todas as marcações são representadas por um vetor; (3) implementação modular, ou seja, uma análise por redução ou decomposição, nas

quais a PN é reduzida de tamanho garantindo a manutenção das suas propriedades; (4) utilização do *debugger*, *trace* ou depurador; (5) animação gráfica.

Por sua vez, enquanto a verificação garante a “correta construção de um modelo”, a **validação** está relacionada ao modelo conceitual e garante a “construção do modelo correto” (CHWIF; MEDINA, 2014. CHUNG, 2004). Ou seja, a validação analisa se o modelo reflete suficientemente o comportamento para o estudo proposto. Para isso, uma das técnicas básicas de validação é a aplicação de condições reais para o modelo e a comparação das saídas da simulação com dados históricos do sistema real. Como exemplo, o trabalho de Schmitt e Singh (2009) modelou uma cadeia de suprimentos e validou por meio do cálculo do erro das saídas, ou seja, a diferença entre o nível de inventário real e o gerado pelo modelo. Além da comparação dos dados reais com o modelo, Chwif e Medina (2014) citam: (1) duplicação de modelos (criação de dois modelos e comparação dos resultados); (2) comparação com modelos anteriores; (3) análise de sensibilidade para determinar a influência de alterações dos parâmetros de entrada nos resultados obtidos a partir do modelo.

Por fim, destaca-se que as técnicas de verificação e validação podem ser combinadas com o uso de simulação dinâmica dos modelos (PENHA, FREITAS, MARTINS, 2010). Do ponto de vista da verificação, a simulação pode ser interpretada como uma “caminhada na árvore de alcançabilidade”, sendo possível assim, checar se existem estados indesejáveis. E do ponto de vista da validação, a simulação pode ser utilizada para coletar dados de várias iterações do modelo (VAN DER AALST; STAHL, 2011).

4.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu o procedimento sistematizado para modelagem e análise do GSCM com o foco na ocorrência de rupturas nas operações da cadeia de suprimentos e a adoção de práticas para a sua recuperação. Nesse procedimento, as cadeias de suprimentos globais são consideradas SED e a PN e o PFS são as técnicas empregadas para a modelagem e a análise. A seguir, o Capítulo 5 apresenta um exemplo de aplicação do procedimento proposto.

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Este capítulo apresenta a aplicação do procedimento proposto descrito no capítulo anterior para a modelagem da cadeia de suprimentos da empresa Toyota. O exemplo foca na análise do impacto global que uma ruptura da cadeia, no caso, gerada por um terremoto em 2011 no Japão, e na avaliação, de forma simplificada, da adoção de práticas para sua recuperação.

Antes da aplicação do procedimento, o capítulo faz um breve resumo do que ocorreu no terremoto de 2011 no Japão, os impactos na cadeia de suprimentos automotiva e um relato das consequências para a empresa Toyota. Por fim, o procedimento proposto aplicado ao exemplo é descrito.

5.1 TERREMOTO E A CADEIA DE SUPRIMENTOS AUTOMOTIVA

O Grande Terremoto do Leste do Japão, registrado as 14 horas e 46 minutos da tarde do dia 11 de março de 2011, foi o maior terremoto registrado no Japão e o quarto maior terremoto medido no mundo desde o início do século 20, ficando atrás apenas do terremoto no Chile (1960), Alasca (1964) e Sumatra (2004). No passado, o Japão já havia experimentado outros terremotos, tsunamis e erupções de vulcões, mas essa foi a primeira vez que 14 de suas províncias foram afetadas simultaneamente por um mesmo terremoto e a primeira vez que seis províncias sofreram inundação na costa por um mesmo tsunami. Duas semanas após o terremoto, o governo japonês fez uma estimativa do custo dos danos em termos das casas, fábricas e infraestrutura como vias e pontes, que resultou no valor de aproximadamente 17 milhões de ienes (por volta de 220 bilhões de dólares) de danos, equivalente a 3,4% do PIB (Produto Interno Bruto) do Japão.

Uma vez que o arquipélago japonês está localizado no Círculo de Fogo do Pacífico (*Pacific Ring of Fire*) e a noroeste da Alameda dos Tornados do Pacífico (*Pacific's Typhoon Alley*), o Japão é repetidamente alvo de tornados, inundações, deslizamento de terras, rigorosas nevascas, terremotos, tsunamis e erupção de vulcões. Apesar de cobrir apenas 0,25% de toda extensão territorial do mundo, o Japão experimenta a desproporção de 20,5% dos terremotos de magnitude 6 ou mais e 7,0% dos vulcões ativos (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011).

No terremoto de março de 2011, o hipocentro do tremor foi abaixo do Oceano Pacífico a 24 quilômetros da superfície, a 130 quilômetros da costa leste da região de Tohoku e a 360 quilômetros de Tóquio. Apenas 8,6 segundos do início dos tremores, o JMA (*Japan Meteorological Agency*) emitiu alertas pelo sistema EEW (*Earthquake Early Warning*) para as províncias de Iwate, Miyagi, Fukushima, Akita e Yamagata (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011). As 14:49 da tarde, três minutos após o início do terremoto, o JMA emitiu um alerta de tsunami maior que 3 metros (Major Tsunami Warning) para a costa pacífica, de Iwate a Fukushima. Devido ao hipocentro estar localizado abaixo do mar, ele alavancou um grande tsunami que causou enormes danos em uma escala nunca antes experimentada. Segundo Funabashi e Takenaka (2011), em algumas localidades, o tsunami aparentemente atingiu 40 metros de altura. No Havaí, Califórnia, Chile e Equador, ondas de 2 metros foram observadas, indicando que o tsunami viajou através do Pacífico em um dia.

Além dos impactos já citados, cita-se a Usina de Fukushima Daiichi (*Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*) atingida pelo tsunami. Com o terremoto, os reatores pararam automaticamente no momento do terremoto e depois disso o equipamento responsável pelo resfriamento dos reatores foi destruído pelo tsunami, assim como as fontes de energia em backup. Com isso, explosões espalharam a radioatividade no meio ambiente e a água que deveria ser utilizada para resfriamento foi contaminada e vazou, agravando ainda mais a situação. Outros danos são citados nas notícias sobre o desastre: casas submersas pela enchente, deformação de terras, danos nos transportes (rodovias, trens, aeroportos, portos), danos/escassez no abastecimento das cidades (gasolina, água), danos nas telecomunicações (telefones, correios), radiação no meio ambiente, evacuação das áreas contaminadas com a radiação, contaminação da agricultura, falta de energia e impacto nas cadeias de suprimentos globais.

A JAMA (*Japan Automobile Manufacturers Association*), associação sem fins lucrativos que reúne 14 empresas manufactureiras automotivas, dentre elas a Honda, Kawasaki, Mitsubishi, Nissan, Suzuki e Toyota, publicou no relatório "*The motor industry of Japan 2012*", que no ano do desastre, em 2011, a produção de veículos motorizados totalizava 8,4 milhões de unidades, sendo que os carros de passeio representaram 85,2% do total da indústria automotiva. O relatório também indicou que 5,45 milhões de trabalhadores do Japão, ou seja, 8,7% da população

trabalhadora estavam envolvidos diretamente ou indiretamente com a indústria automotiva, reforçando a importância dessa indústria no país (JAMA, 2012).

Na produção do Japão, a dependência externa e a terceirização foram consequências dos esforços pela eficiência. Dessa forma, um automóvel típico japonês, composto de 20.000 a 30.000 peças, tem terceirizado a produção ou realizado a compra de produtos acabados (como pneus, baterias, ar condicionados e sistemas de som) internamente ou fora do país (JAMA, 2012). Como resultado, devido ao desastre em Tohoku e a dependência do mundo em relação ao Japão como terceiro maior exportador mundial de veículos, a produção e o suprimento de peças, materiais e serviços reduziu ou parou em alguns negócios locais e se espalhou mundialmente pelas cadeias de suprimentos globais (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011).

Segundo dados da JAMA (2012), no mês de março de 2008, a produção de veículos no Japão superou um milhão de unidades por mês. No início do ano de 2009, o Japão sofreu com a crise financeira mundial e a produção de veículos foi reduzida, se reestabelecendo a partir de setembro daquele ano. A produção de veículos foi afetada novamente somente em março de 2011 devido ao terremoto em Tohoku (Figura 26). Paralelamente, a exportação de veículos foi afetada também devido ao terremoto em Tohoku (Figura 27). Em maio, nota-se uma recuperação tanto na produção quanto na exportação, e um reestabelecimento da capacidade próxima aos padrões anteriores ao desastre em junho de 2011.

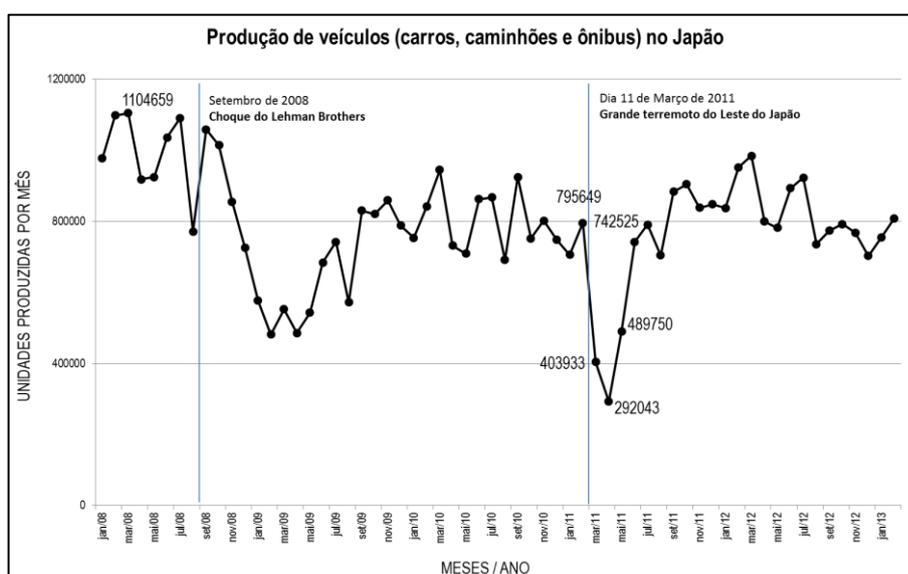


Figura 26 – Produção de veículos do Japão extraído de JAMA (2013).

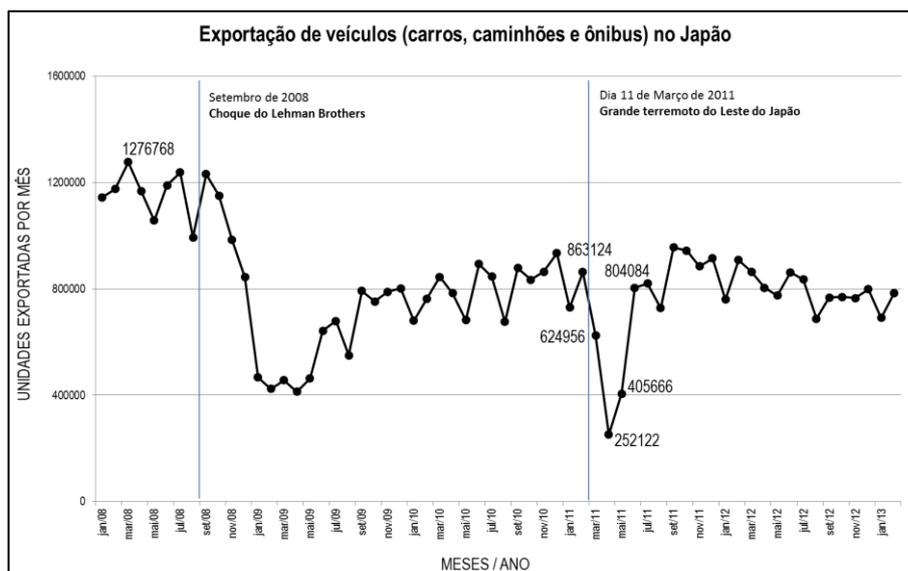


Figura 27 – Exportação de veículos do Japão extraído de JAMA (2013).

Em poucos meses, segundo Funabashi e Takenaka (2011), 93% das indústrias haviam sido reparadas e 80% retomaram a produção em níveis iguais ou maiores que os anteriores ao desastre.

5.2 RUPTURA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS GLOBAL DA TOYOTA

Com o desastre natural, a planta de montagem final da Toyota Motor Corporation na Província de Miyagi e seus fornecedores foram afetados, resultando na parada de produção doméstica por duas semanas e a falta de peças para as plantas internacionais da Toyota no mês de abril, o que ocasionou as paradas ou redução na produtividade dessas plantas (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011). Cita-se que as plantas nos Estados Unidos da Toyota operaram nesse período com 30% de sua capacidade (CANIS, 2011). Felizmente, em maio de 2011, a produção doméstica alcançou metade do nível de produção padrão; em junho, a produção doméstica e de suas plantas fora do Japão estavam recuperadas; e em julho, a Toyota anunciou que suas plantas haviam aumentado sua produtividade para recuperar os períodos de parada da produção (JAPÃO, 2011a).

Logo após o desastre, em abril, o Ministério de Economia, Comércio e Indústria do Japão apresentou os resultados da pesquisa “*Emergency Survey on the Actual Status of Industries*”. Das 55 empresas de manufatura que responderam a pesquisa,

88% afirmaram que seus fornecedores foram afetados pelo desastre e 42% afirmaram que os fornecedores de seus fornecedores foram afetados, indicando o impacto da ruptura na cadeia de suprimentos (JAPÃO, 2011b). Em agosto, a atualização da pesquisa revelou que 12% das empresas de manufatura não conseguiram fornecedores substitutos para sua matéria-prima ou componentes (JAPÃO, 2011c). Foi o caso da indústria dos semicondutores, responsável por componentes dos *airbags*, sistemas ABS, injeção eletrônica, GPS e o sistema de combustível dos carros híbridos (CANIS, 2011). Devido à produção exigir “finas tolerâncias”, as plantas são sensíveis a terremotos e a falta de energia (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011). Fornecedores substitutos estavam disponíveis no Japão e internacionalmente para uma parte dos produtos produzidos pela indústria dos semicondutores, mas foi difícil assegurar um fornecedor substituto para pedidos especiais, como os microcomputadores de carros (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011). Nos Estados Unidos, atualmente, considera-se que 25% de todas as peças de um carro americano é importado da Ásia e da Europa, e que o Japão é responsável por grande parte das exportações de pneus, rolamentos, faróis e semicondutores (CANIS, 2011). A ruptura na cadeia de suprimentos da indústria dos semicondutores, CANIS (2011) indicou que devido à falta na entrega dos sensores produzidos pela Hitachi, a General Motors parou a planta de Shreveport, em Los Angeles, e conseqüentemente, reduziu-se a produção na planta de Tonawanda que fabrica os motores para a planta de Shreveport (CANIS, 2011).

Considerando ainda a indústria dos semicondutores destaca-se a planta de Naka (Província de Ibaraki) da Renesas Electronics Corporation afetada diretamente pelo desastre, que responde por 20% da produção de microcontroladores da Renesas (JAPÃO, 2011a). Esta planta teve danos no teto, paredes, rede elétrica e nos equipamentos (JAPÃO, 2011a). Devido à dificuldade de substituir o fornecedor, a recuperação da planta de Naka era essencial, portanto 2000 funcionários do grupo Renesas foram realocados para trabalhar na restauração da planta (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011), enquanto, em paralelo, parte de sua produção foi transferida para as plantas de Saijo, Tsugaru, Tsuruoka e outras plantas (RENESAS, 2013). CANIS (2011) ressalta que devido à complexidade do produto, a manufatura dos chips levaria dois meses para se estabelecer nessas novas plantas. Segundo notícias da Renesas de junho de 2011, a produção da planta de Naka estava

recuperada e previa-se o reestabelecimento das exportações para setembro de 2011 (RENESAS, 2013).

5.3 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MODELAGEM E ANÁLISE

A seguir, a aplicação do procedimento proposto para a cadeia de suprimentos da empresa Toyota e a descrição das etapas para este exemplo são apresentadas.

5.3.1 Etapa 1: Definição do escopo da cadeia de suprimentos e de cada SP

Um esquema simplificado da cadeia de suprimentos da Toyota Motor Corporation é apresentado na Figura 28. Destaca-se que o presente trabalho levantou informações na literatura e de notas públicas divulgadas pelas empresas Toyota e Renesas Electronics, por instituições (MIT Sloan Management Review, World Economic Forum e Japan Automotive Manufacturers Association) e pelo governo japonês. As premissas adotadas foram destacadas ao longo do texto para a modelagem da cadeia de suprimentos da empresa Toyota.

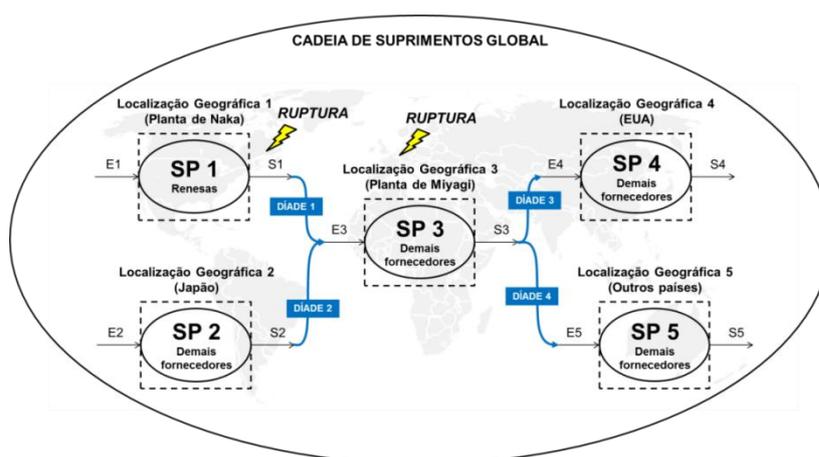


Figura 28 – Esquema simplificado da cadeia de suprimentos da Toyota Motor Corporation.

No cenário 0, a cadeia de suprimentos global é composta por 5 SPs (SP1, SP2, SP3, SP4 e SP5). As características funcionais (tipo do sistema, entradas e saídas) e características físicas (localização geográfica) são identificadas e documentadas na Tabela 10; as premissas dos SPs, na Tabela 11; e as premissas de cada díade, na Tabela 12.

Tabela 10: Características funcionais, físicas e premissas de cada SP.

ID	Tipo de SP	Descrição	Localização Geográfica	Entrada	Saída
SP1	Manufatura	Fornecedores diversos da Toyota	Japão	Matérias primas e componentes.	Peças do motor, chassi, roda, vidros, radiadores e outros (JAPÃO, 2012).
SP2	Manufatura	Renasas Electronics	Planta de Naka	Matérias primas e componentes.	Micro computadores de carros
SP3	Manufatura	Toyota	Planta de Miyagi	Peças do motor, chassi, roda, vidros, radiadores e micro computadores e outros.	Carros montados
SP4	Suprimento	Concessionárias	EUA	Carros montados recebidos da montadora.	Carros montados vendidos para o cliente final
SP5	Suprimento	Concessionárias	Demais países (França, Itália, Brasil, etc).	Carros montados recebidos da montadora.	Carros montados vendidos para o cliente final

Tabela 11: Premissas de cada SP.

ID	Premissas e simplificações
SP1	1. Fornecedores da Toyota não impactados pelo terremoto de Tohoku.
SP2	2. Planta com produção parada após o terremoto de Tohoku. 3. Recuperação em dois meses, no mês de junho de 2011.
SP3	4. O terremoto de Tohoku resultou na parada de produção doméstica da Toyota por duas semanas (FUNABASHI; TAKENAKA, 2011). 5. A planta de Miyagi é cliente apenas do SP1 e SP2.
SP4 SP5	6. As concessionárias são os únicos canais de venda entre a montadora (SP3) e o cliente final.

Tabela 12: Descrição das díades.

Díade	Fornecedor	Cliente	Premissas e simplificações adotadas no estudo
1	SP1	SP3	1. A planta de Miyagi da Toyota (SP3) é o único cliente de SP1.
2	SP2	SP3	2. A planta de Miyagi da Toyota (SP2) é o único cliente de SP1.
3	SP3	SP5	3. O mercado doméstico equivale a 52% da produção de veículos do Japão; o mercado americano, 19% e as demais, 29% (JAPÃO, 2012). Nessa simulação, considera-se que os dois SPs possuem a mesma demanda.
4	SP3	SP6	

5.3.2 Etapa 2: Definição dos SPs impactados pelo evento de ruptura

Um evento de ruptura é considerado no SP1 e SP3, como indica a Figura 28. O evento causa a ruptura das operações normais do SP1 e SP3, impedindo

imediatamente o fornecimento de materiais para os seus clientes, que podem notar ou não a falta de abastecimento, dependendo das ações de recuperação tomadas. A literatura alerta que o SP pode ficar sem peças críticas para o seu processo caso dependa de um único fornecedor e sugere que o GSCM deve permitir o processo de recuperação da cadeia de suprimento por meio da renegociação urgente dos laços com outros atores (SHEFFI; RICE, 2005). Nesse sentido, Greening e Rutherford (2011) reforçam uma diferença na motivação para o novo laço: afirmam que em situações comuns, as empresas fazem escolhas racionais relacionadas à escolha do mercado e das parcerias, sendo o ponto inicial para a criação de uma nova relação colaborativa motivada por uma vantagem competitiva, seguida pela criação de um laço com outros atores na cadeia de suprimentos, uma nova coordenação dos processos e o alinhamento dos sistemas produtivos para uma mesma meta. Em contraste a essa motivação, no caso de uma ruptura na cadeia, o ponto inicial para a criação de uma nova relação é o realinhamento dos processos e a recuperação do desempenho pré-ruptura da cadeia de suprimento. Dessa forma, após notar a falta de abastecimento, como prática do GSCM, o SP1 e SP3 realocam recursos extras para a restauração da Planta e recuperação da produção pré-ruptura.

Para efeitos de comparação, os cenários para a análise do desempenho da cadeia de suprimentos global são definidos e descritos na Tabela 13.

Tabela 13: Descrição dos cenários.

Cenário	Evento de ruptura	Prática de recuperação
0	Não	-
1	Sim (em SP1 e SP3)	Não
2	Sim (em SP1 e SP3)	Sim (em SP1 e SP3)

Como premissa desse exemplo de aplicação, no cenário 1 e 2, considera-se que o evento de ruptura impacta ao mesmo tempo SP1 e SP3. O Anexo C apresenta as condições iniciais da PN e indica que, no cenário 1 e 2, o evento de ruptura ocorre aos 1000 ms. No cenário 1 não haverá recuperação da cadeia de suprimentos. Por sua vez, no cenário 2, a cadeia de suprimentos se recuperará com a restauração das plantas SP1 e SP3 em dois momentos distintos: SP3 se recuperará em 1000 ms após o evento de ruptura e SP1 se recuperará em 2000 ms após o evento de ruptura.

Para a análise de desempenho da cadeia de suprimento, as métricas listadas na Tabela 14 são consideradas. A tabela indica também a interpretação adotada da PN.

Tabela 14: Métricas de desempenho.

Métrica	Descrição	Unidade	Fórmula de cálculo	Interpretação na PN	
1	Produtividade geral da cadeia	Quanto maior a produtividade (itens/ <i>step</i>), mais rápido é o atendimento dos pedidos.	%	Número de pedidos atendidos por todos os SPs / Número de pedidos atendidos por todos os SPs no cenário 0.	Quantidade de <u>marcas</u> nos <u>lugares</u> (pedidos atendidos por todos os SPs) / Quantidade de <u>marcas</u> nos <u>lugares</u> (pedidos atendidos por todos os SPs) no cenário 0.
2	Pedidos atendidos	A cadeia deve atender a quantidade de pedidos do cliente.	Itens	Número de pedidos atendidos.	Quantidade de <u>marcas</u> nos <u>lugares</u> (estoques finais).
3	Produtividade de cada SP	A produtividade é calculada pela quantidade de pedidos atendidos.	%	Número de pedidos atendidos pelo SP / Número de pedidos atendidos pelo SP no cenário 0.	Quantidade de <u>marcas</u> nos <u>lugares</u> (pedidos atendidos pelo SP) / Quantidade de <u>marcas</u> nos <u>lugares</u> (pedidos atendidos pelo SP) no cenário 0.
4	Nível dos estoques intermediários	Os estoques intermediários devem apresentar níveis estáveis, indicando uma “produção puxada”, ou seja, o consumo de um item do estoque requisita o abastecimento por outro item.	Itens	Número de itens nos estoques intermediários.	Número de <u>marcas</u> nos <u>lugares</u> (estoques intermediários).

5.3.3 Etapa 3: Tradução de um modelo conceitual para um modelo funcional

Inicialmente, um modelo conceitual em PFS é criado para a representação da atividade “Processo de Execução de Pedido” (Figura 29). Um processo compõe-se de atividades inter-relacionadas que, executadas numa sequência determinada, agregam valor na percepção do cliente, ou seja, a saída do processo tem maior valor que as entradas do processo. A partir deste modelo aplica-se a técnica de refinamento sucessivo por meio de uma abordagem *top-down*. Dessa forma, no nível 1 (Figura 30) o refinamento indica três atividades em PFS do “Processo de Execução de Pedido”: o “Processo de Produção”, “Processo de Montagem” e o “Processo de Venda”. Por sua vez, no nível 2 (Figura 31), para o cenário 0, a cadeia de suprimentos global é formada por SP1 e SP2 do tipo “Processo de Produção”;

SP3 do tipo “Processo de Montagem”; e SP4 e SP5, do tipo “Processo de Venda”. A Tabela 15 descreve a interpretação dos elementos distribuidores do modelo conceitual no nível 2.

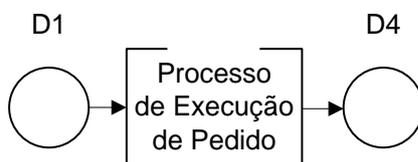


Figura 29: Modelo conceitual em PFS - Nível 0.



Figura 30: Modelo conceitual em PFS - Nível 1.

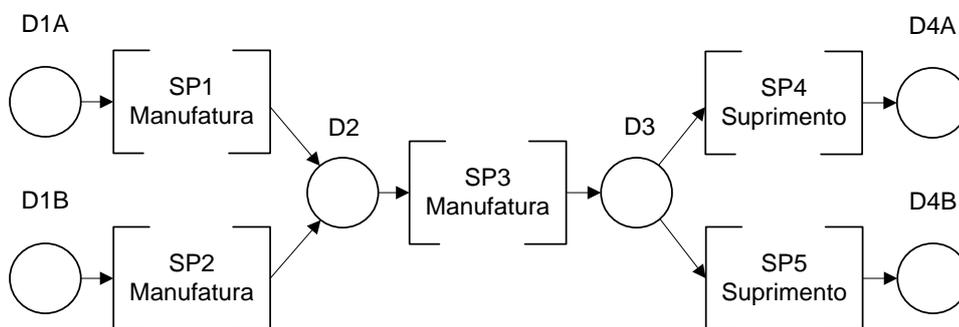


Figura 31: Modelo conceitual em PFS - Nível 2.

Tabela 15: Descrição do modelo conceitual em PFS no nível 2.

Nível	Distribuidor	Descrição
2	D1A	Armazenar matéria-prima para o processo de produção.
2	D1B	Armazenar matéria-prima para o processo de montagem.
2	D2	Armazenar componentes para o processo de montagem.
2	D3	Armazenar produtos finais para o processo de venda.
2	D4A	Armazenar produtos finais com o cliente.
2	D4B	Armazenar produtos finais com o cliente.

Em seguida, o modelo conceitual no nível 2 é traduzido para um modelo funcional em PN no *software* HPSim, utilizando-se dos *building blocks* do modelo

SCOR (*Source, Make e Deliver*), previamente descritos na seção 3.4. A Figura 32 ilustra o modelo funcional em PN. Nele, o fluxo de material é definido pelo caminho percorrido pelos itens físicos (componentes e produtos) ao longo dos SPs. Em paralelo, o fluxo de informação pode ser dividido em três partes: (1) da disponibilidade de recursos, que informa se o SP está disponível (ou habilitado) para uma nova produção, (2) do pedido, que requisita a entrega do produto para o cliente, e (3) de kanbans, gerado entre os SPs para abastecimento dos estoques intermediários de acordo com a necessidade de reposição. Nesse contexto, o fluxo de kanbans permite a criação de uma “produção puxada”. O fluxo de material e os fluxos de informação são destacados na Figura 33.

Além do fluxo de material e os fluxos de informação, destaca-se que a Figura 33 indica com uma seta verde no SP1, um lugar que foi acrescentado para medir a quantidade de pedidos atendidos pelo SP1, e conseqüentemente, a produtividade do SP1 (métrica sugerida na seção anterior). Analogamente, um lugar para medir a produtividade do SP2 e SP3 foi acrescentado. Especificamente, para o SP4 e SP5, dois lugares foram acrescentados (setas verdes no SP4) (como indica a Figura 33): um lugar para medir a quantidade de pedidos feitos pelo cliente e um lugar para medir a quantidade de pedidos atendidos pelo SP4. Analogamente, dois lugares foram acrescentados no SP5. Esses lugares permitirão o cálculo da quantidade de pedidos atendidos e a produtividade do SP4 e SP5 (métricas sugeridas na seção anterior).

Após a tradução do modelo para PN, a ruptura e a prática resiliente (de recuperação) são incluídas por meio de uma marcação inicial dos lugares “Ruptura” e dos lugares “Prática de recuperação” dos *building blocks*. No exemplo, as plantas do SP1 e do SP3 foram impactadas resultando na parada completa da inspeção, produção e transporte. Por esse motivo, os *building blocks* do tipo “*Source*”, “*Make*” e “*Deliver*” foram configurados para serem impactados pelo evento de ruptura. Caso a ruptura impactasse uma parte específica do fluxo de produção, como por exemplo, a falta de funcionários para a inspeção ou a parada de máquinas na produção ou os meios de transportes estivesse indisponíveis, a marcação inicial dos lugares “Ruptura” e “Prática de recuperação” representaria essa ruptura específica.

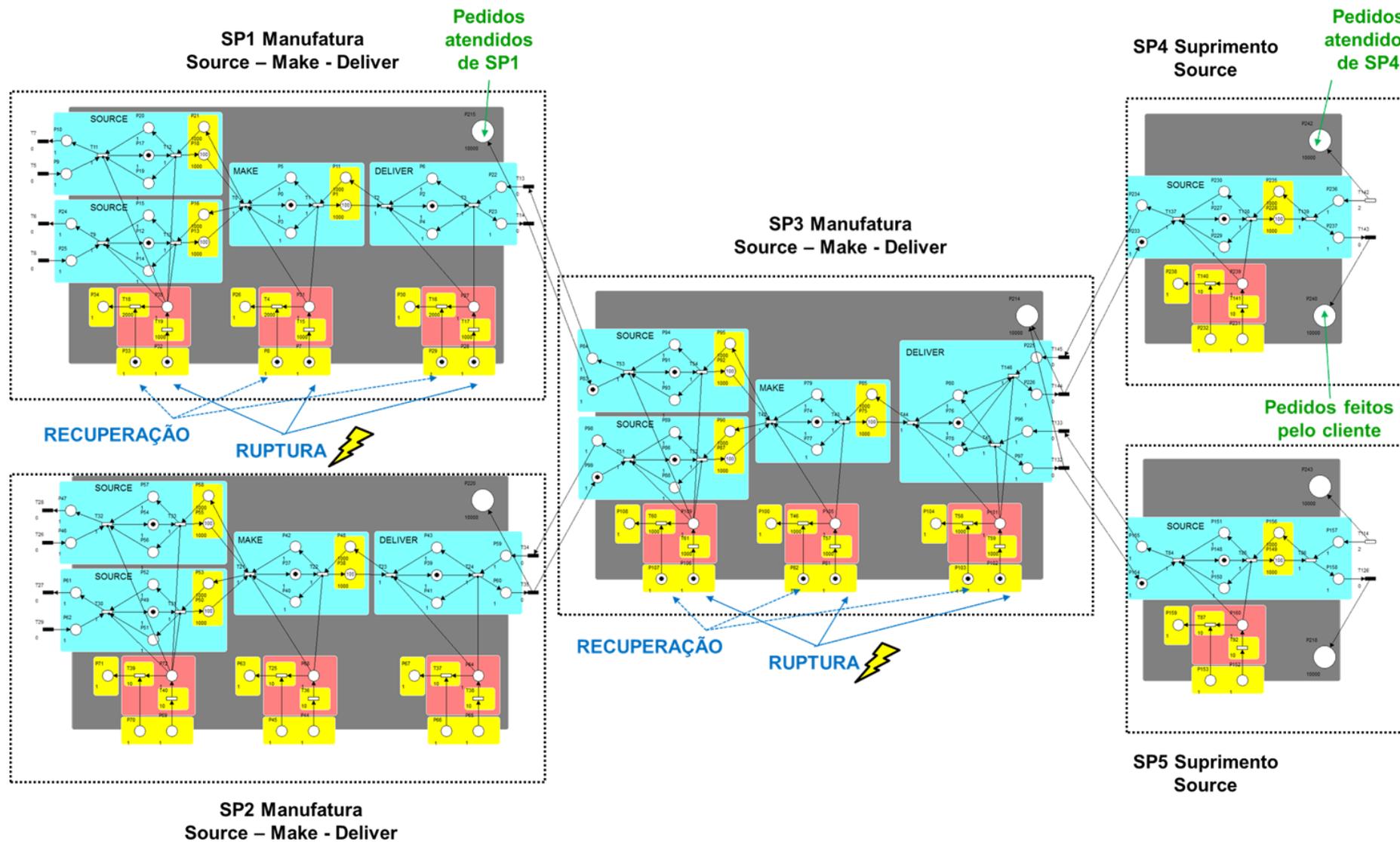


Figura 32: Modelo funcional em PN.

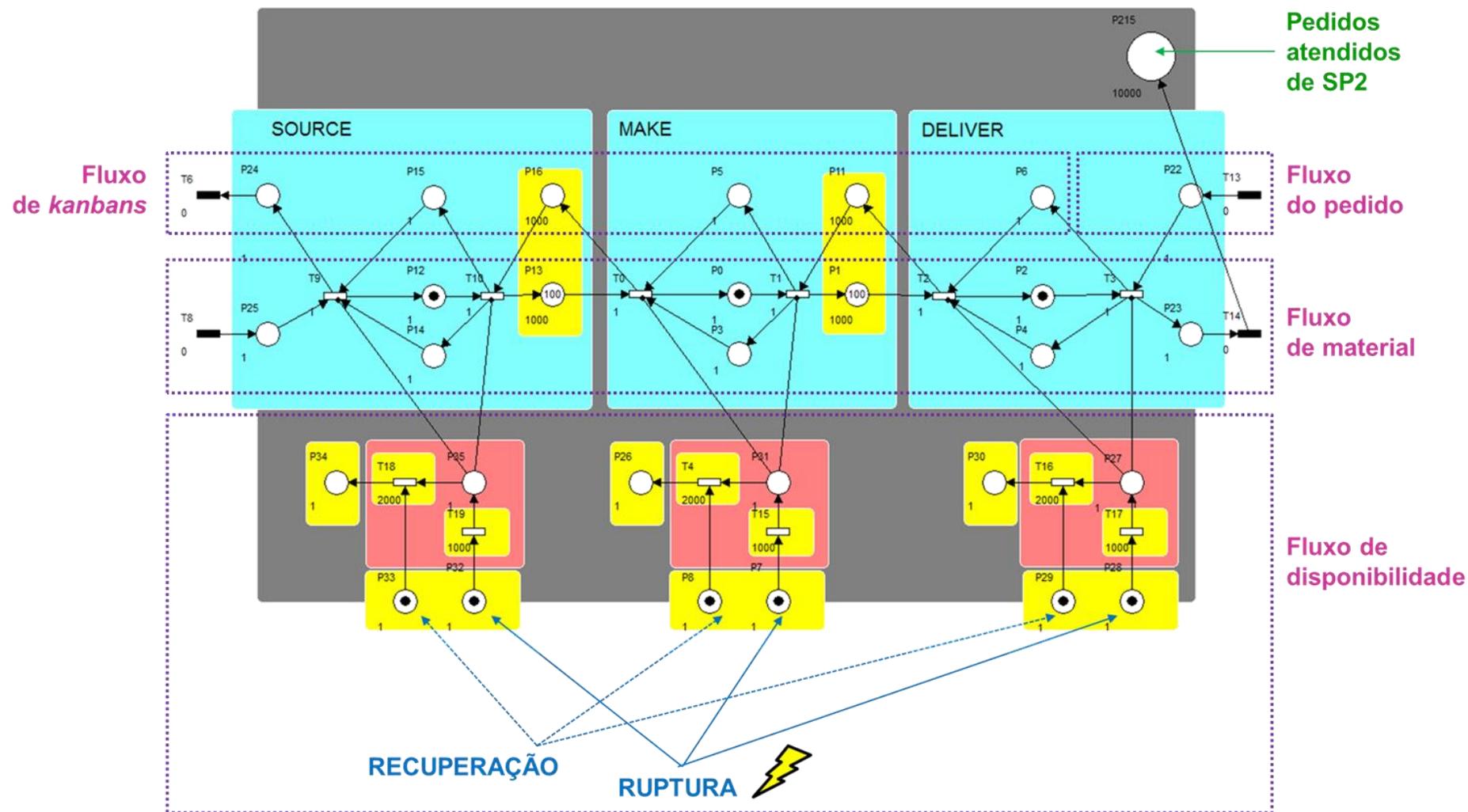


Figura 33: Modelo funcional em PN do SP3.

Por fim, as condições iniciais da PN (marcações e os intervalos de “disparos” das transições) para os cenários de simulação foram definidos. O Anexo C apresenta as condições iniciais da PN para esses cenários. Foi associado um tempo de 1ms de atraso (“*Initial Delay*”) associado às transições, dessa forma, uma vez que as transições são habilitadas, deve-se aguardar este intervalo de tempo até o seu “disparo”. Entende-se que esse atraso representa o tempo dedicado às atividades da produção, montagem e venda dos materiais.

5.3.4 Etapa 4: Verificação do modelo

No estudo de caso, a simulação com ajuda da ferramenta HPSim foi realizada para verificar o comportamento dinâmico do modelo (*deadlocks*, instabilidade do comportamento dinâmico e presença de estados indesejáveis).

5.3.5 Etapa 5: Coleta de dados e avaliação do desempenho do GSCM

Neste exemplo, definiu-se que o incremento adotado para a evolução do tempo na simulação (“*Sample Time*”) seria de 1 ms, o número máximo de passos seria de 1.000.000 e o tempo máximo de simulação seria de 5.000ms (Figura 34). Destaca-se que esses parâmetros de simulação foram definidos iterativamente, analisando as marcações para toda iteração, de forma a analisar a ocorrência do evento de ruptura, e observar o efeito da adoção da prática de recuperação da durante o tempo da simulação.

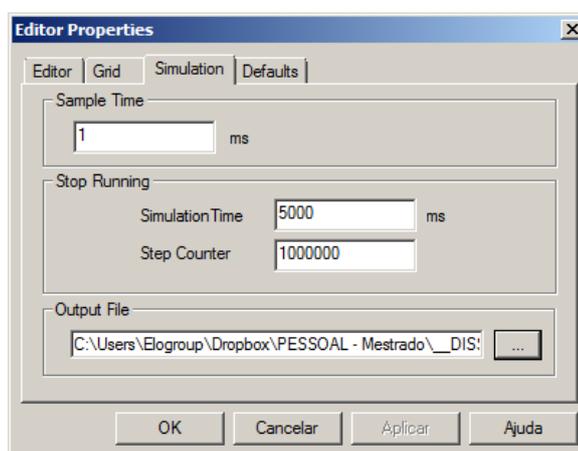


Figura 34: Critérios para a simulação definidos no HPSim.

Após a simulação dos cenários, as métricas de desempenho (definidas na Etapa 2) foram coletadas e calculadas. Os resultados das simulações se encontram no Anexo C, cabendo aqui somente os comentários mais relevantes da análise.

Destaca-se que no modelo gerado pelo procedimento proposto não se faz distinção se as marcas representam unidades de itens ou lotes de itens. Para o estudo de caso, considerou-se que são unidades de itens (ou seja, componentes ou produtos finais). Além disso, o modelo não faz distinção para os diferentes itens que podem ser inspecionados, produzidos e movimentados nos SPs. Considerou-se que os diferentes itens são representados pelas mesmas marcas.

Inicialmente, a **produtividade geral da cadeia** é calculada pela relação entre o número de pedidos atendidos por todos os SPs e o número de pedidos atendidos por todos os SPs no cenário 0, ou seja, toma o cenário 0 como base de referência. Nesse sentido, considerando a produtividade geral da cadeia, os cenários 1 e 2 (Figuras 35 e 36) indicam que a curva reflete o perfil descrito por Sheffi e Rice (2005). Após o evento de ruptura aos 1000 ms, o desempenho da cadeia de suprimentos é impactado e a curva decai, evolução observada tanto no cenário 1 (Figura 35) quanto no cenário 2 (Figura 36). No cenário 1 (Figura 35) não houve a recuperação da cadeia de suprimentos após o evento de ruptura. Dessa forma, a curva de desempenho é impactada e cai ao longo do tempo. Por sua vez, no cenário 2 (Figura 36), a cadeia de suprimentos se recuperou em dois momentos distintos: a planta SP3 se restaurou aos 2000 ms e a planta SP1 se restaurou aos 3000 ms. Nesse cenário, observa-se que aos 2000 ms, após a recuperação de SP3, a curva de desempenho retoma sua ascensão positiva, mas logo volta a cair. Esta ascensão positiva da curva é explicada pela restauração da planta SP3, que garante a retomada do atendimento dos pedidos. Em seguida, a matéria prima abastecida por SP1 esgota, o atendimento dos pedidos é interrompido novamente e a curva de desempenho volta a cair. De fato, a curva somente volta a ascender positivamente aos 3000 ms com a restauração da planta SP1.

Ressalta-se que o modelo gerado pelo procedimento considera que o evento de ruptura não impacta os estoques de matérias primas da planta. Assim, após a restauração da planta impactada, o SP retoma a produção com a quantidade de matérias primas existente antes do evento de ruptura.

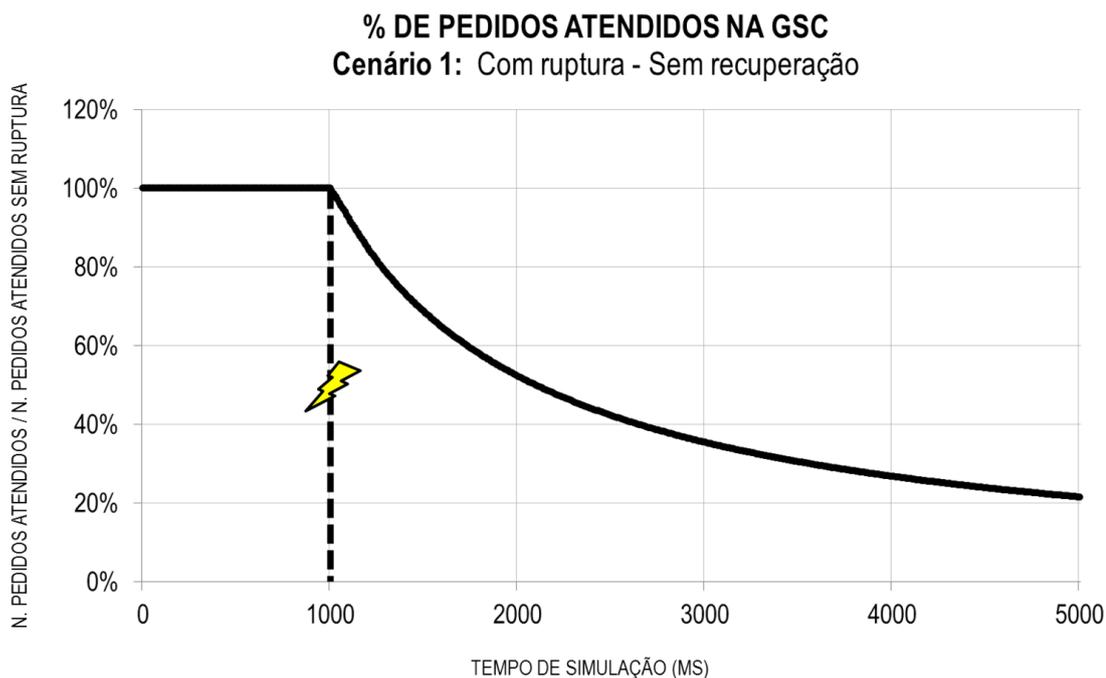


Figura 35: Desempenho do GSCM, no cenário 1.

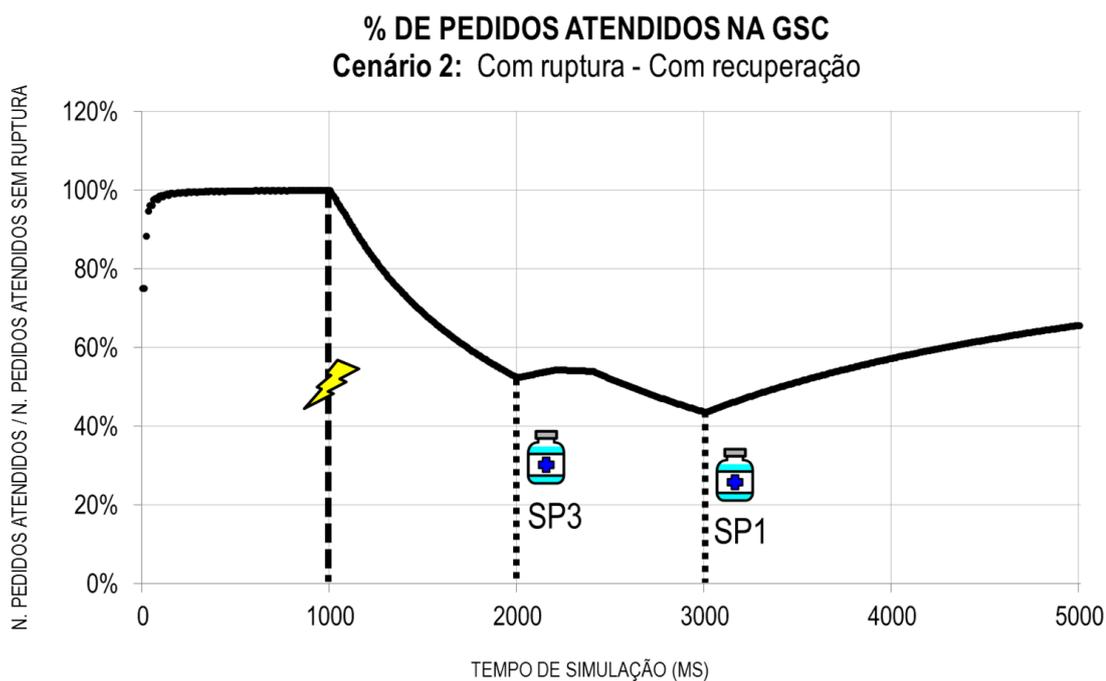


Figura 36: Desempenho do GSCM, no cenário 2.

Dando continuidade a avaliação do desempenho do GSCM, os **números de pedidos atendidos** são apresentados na Tabela 16. Em 5000 ms, o cenário 1 atendeu apenas 28% dos pedidos que o cenário 0 atendeu. Comparativamente, em

5000 ms, o cenário 2 atendeu 76%, indicando que a recuperação dos SPs impactados pela ruptura garantem uma maior quantidade de pedidos atendidos.

Tabela 16: Métrica de desempenho 2 – Pedidos atendidos.

Cenário	Número de pedidos atendidos	$\frac{\text{N. pedidos no cenário}}{\text{N. pedidos no cenário 0}}$
0	2500 pedidos atendidos em 5000 ms	100%
1	703 pedidos atendidos em 1087 ms	28%
2	1898 pedidos atendidos em 5000 ms	76%

No cenário 2, simulações feitas com o modelo em PN indicaram que o número de pedidos atendidos é maior se: 1) o tempo de recuperação dos SP1 e SP3 for reduzido ou 2) se o volume de estoques intermediários forem maiores. Dado que aumentar os inventários é uma ação contrária a filosofia “lean”, as cadeias de suprimentos globais devem buscar práticas resilientes que reduzem o tempo de recuperação das plantas.

Com relação **aos níveis dos estoques de produtos finais** nas concessionárias, as Figuras 37, 38 e 39 indicam a evolução do estoque de produtos finais para o cenário 0 (sem ruptura), cenário 1 (com ruptura, sem recuperação) e cenário 2 (com ruptura, com recuperação) de uma das concessionárias (SP4). Como premissa adota-se que a cadeia possui estoques intermediários e finais e aguarda o recebimento de um pedido para os SPs produzirem, montarem ou transportarem os materiais ao longo da cadeia.

Nota-se, pelo cenário 0, que a realização dos pedidos do cliente acontece em um período de tempo menor em comparação ao abastecimento de produtos finais pelo SP3, dado que o estoque cai em relação ao tempo. Tal evolução indica que os clientes deverão formar uma fila para a compra de novos produtos, dado que a cadeia de suprimentos não se adequou e é menor que a “velocidade” de compra dos clientes. No cenário 0, os clientes continuam sendo atendidos devido aos pedidos de abastecimento dos *kanbans*. Comparativamente ao cenário 0, o cenário 1 indica que o estoque é reduzido até sua completa extinção de produtos finais, resultando assim, na decaída do seu desempenho (calculado aqui pela relação entre o número de pedidos atendidos no cenário 1 e o número de pedidos atendidos no cenário 0). Por sua vez, o cenário 2 revela a recuperação do desempenho devido a adoção da prática resiliente. No cenário 2, assim como acontece no cenário 0, o

estoque não é restaurado aos níveis iniciais, pois o cliente compra em um ritmo mais “acelerado” do que a cadeia de suprimentos consegue atender. Contudo após a recuperação de SP1 e SP3, os clientes continuam sendo atendidos devido aos pedidos de abastecimento dos *kanbans*. A recuperação do nível do estoque em SP4 seria possível somente se todas as atividades da cadeia aumentassem a velocidade de suas atividades, ou se as plantas trabalhassem “hora extra”, ou se um segundo fornecedor para SP4 fosse adicionado.

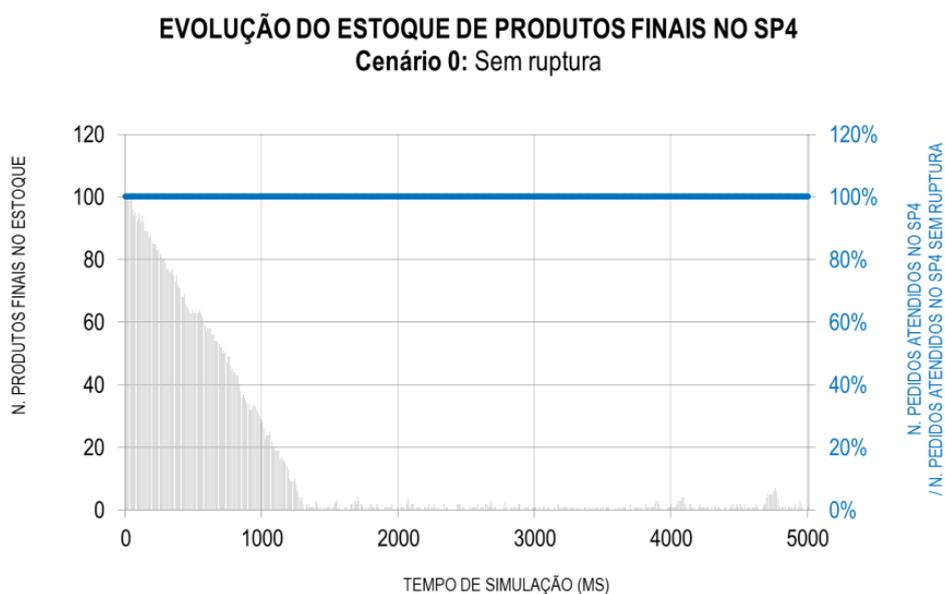


Figura 37: Evolução do estoque de produtos finais na concessionária SP4, no cenário 0.

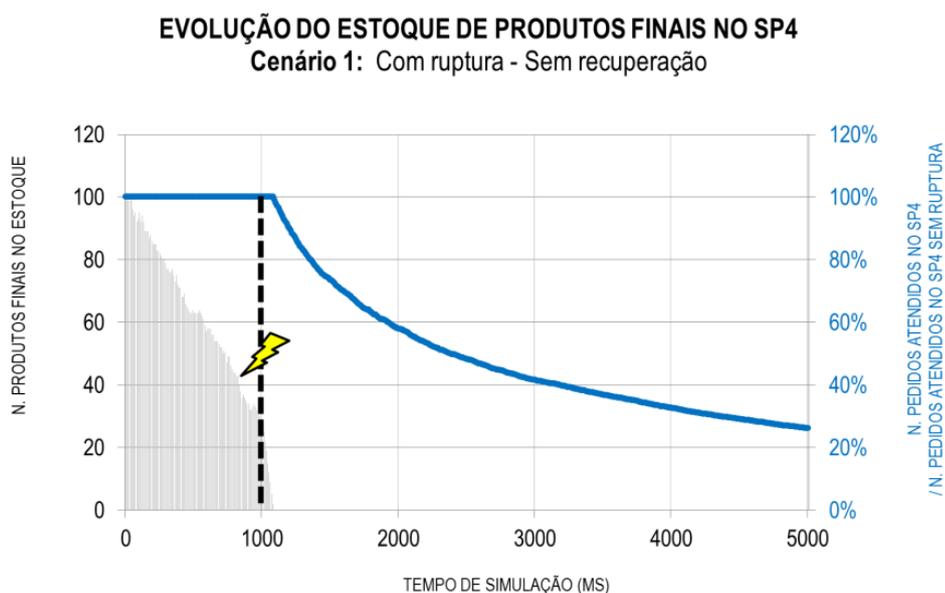


Figura 38: Evolução do estoque de produtos finais na concessionária SP4, no cenário 1.

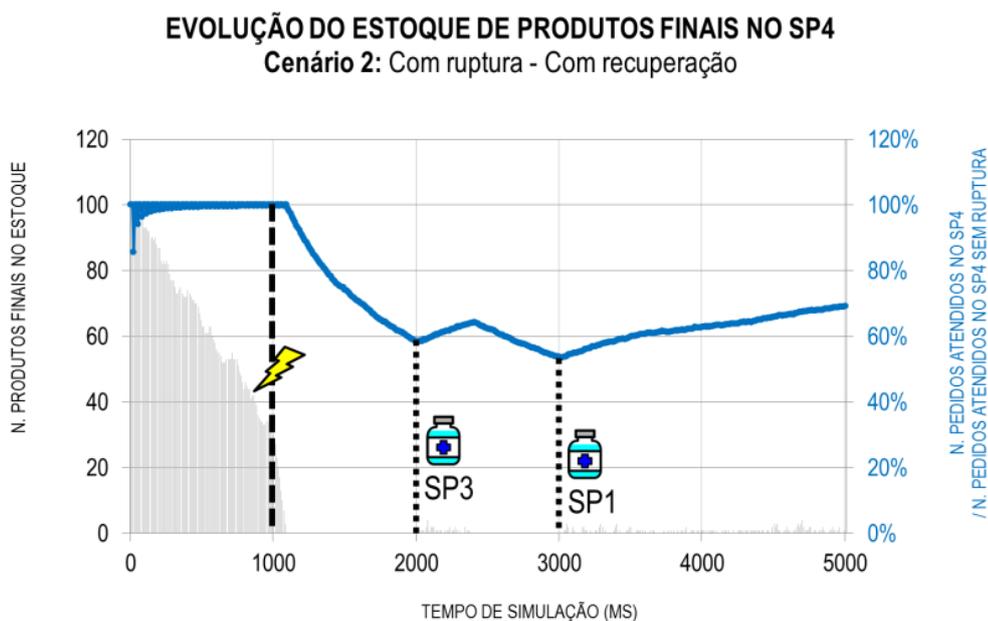


Figura 39: Evolução do estoque de produtos finais na concessionária SP4, no cenário 2.

Com relação aos **níveis dos estoques de matérias-primas** nos fornecedores SP1 e SP2, as Figuras 40 e 41 indicam a evolução do estoque para o cenário 1 (com ruptura, sem recuperação) e cenário 2 (com ruptura, com recuperação) do SP2. Destaca-se que os resultados do SP1 são similares ao de SP2, contudo por motivos diferentes.

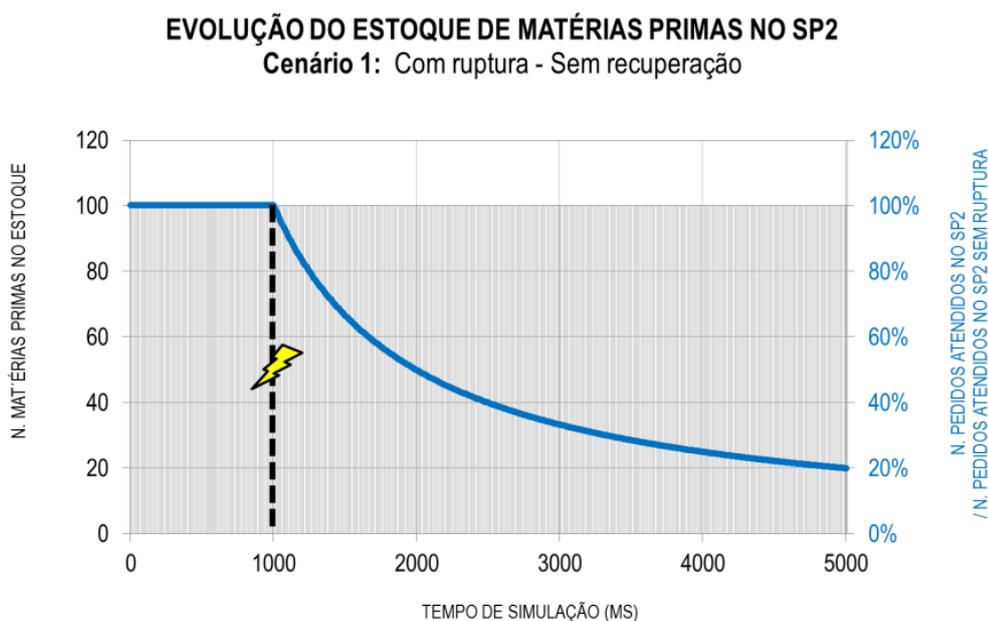


Figura 40: Evolução do estoque de matérias primas no fornecedor SP2, no cenário 1.

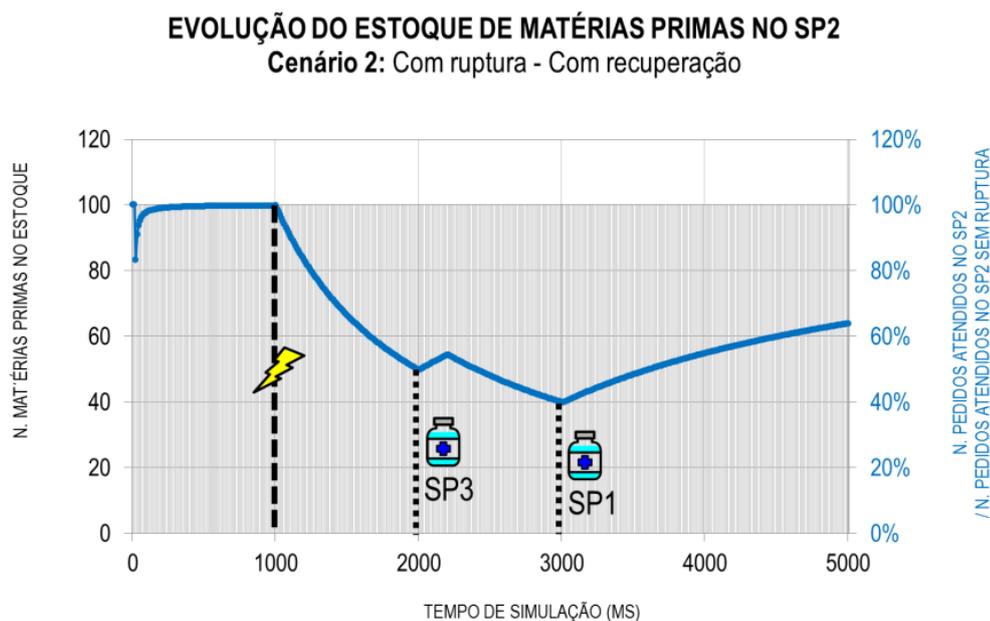


Figura 41: Evolução do estoque de matérias primas no fornecedor SP2, no cenário 2.

Enquanto o SP1 não mantém seu atendimento por conta do impacto direto sofrido pelo evento de ruptura, o SP2 não mantém seu atendimento, pois seu único cliente (SP3) não faz mais pedidos de compra. Nota-se que apesar do estoque de matérias primas não reduzir, o desempenho (calculado aqui pela relação entre o número de pedidos atendidos no cenário 1 e o número de pedidos atendidos no cenário 0) é afetado pela ruptura. Tal comportamento indica que um fornecedor, mesmo que não seja diretamente afetado pelo evento de ruptura, pode sofrer consequências indiretas devido a sua dependência da díade formada com o cliente impactado.

6 CONCLUSÃO

Considerando a atual interdependência das empresas devido às cadeias de suprimentos globais, estas tem se preocupado em lidar com os eventos de rupturas, dado que estes podem impactar e propagar efeitos negativos nas suas operações. A literatura destaca diversas práticas resilientes que busca mitigar e, na ocorrência de um evento de ruptura, recuperar rapidamente o desempenho de suas cadeias de suprimentos. Nesse contexto, o presente trabalho propôs um procedimento sistematizado para modelagem e análise do gerenciamento das cadeias de suprimentos globais, com o foco na ocorrência de rupturas. Uma vez construído, o modelo pode ser simulado para comparar o desempenho (produtividade e atendimento dos pedidos) e os níveis de estoque dos cenários pré-ruptura e pós ruptura, com ou sem adoção de prática de recuperação.

Com a aplicação do procedimento proposto, o estudo de caso evidenciou que a rede de Petri pode ser efetivamente utilizada como ferramenta gráfica para a modelagem do fluxo de material e o fluxo de informação de uma cadeia de suprimento global. Especificamente, o procedimento adotou a rede de Petri determinística e temporizada e verificou-se que as propriedades dessa extensão podem representar de forma adequada os estoques de produtos, as atividades em paralelo, concorrente e as prioritárias.

Além disso, o estudo de caso evidenciou que o *Production Flow Schema* facilita a modelagem do fluxo de material e o fluxo de informação, pois permite uma abordagem *top-down* através da técnica de refinamento do modelo. Por fim, o estudo de caso evidenciou que o uso dessa técnica de refinamento, somado a adoção do modelo de referência SCOR, tornou possível a “modularização” dos processos de negócio básicos de um SP em *building blocks*. Essa “modularização” tem como vantagem o melhor entendimento do sistema e garante a modelagem hierárquica sem a perda do formalismo da rede de Petri.

Quanto à simulação, dentre as ferramentas testadas, o software HPSim apresentou a vantagem de gerar relatórios com as marcações passo a passo para cada disparo das transições. O HPSim permitiu comprovar as vantagens do uso de ferramentas computacionais: (1) na obtenção de conhecimento sobre o funcionamento da cadeia de suprimentos global modelada, (2) obtenção de

informações sobre a cadeia de suprimentos sem perturbar o sistema real, (3) teste do impacto das rupturas e da adoção de práticas resilientes.

Quanto à análise da ruptura, o estudo de caso permitiu confirmar que na ocorrência de um evento de ruptura, os efeitos negativos na produtividade, no número de pedidos atendidos pelos SPs e nos níveis dos estoques se propagam pela cadeia de suprimentos global, e o desempenho da cadeia de suprimento se comporta como o “perfil da ruptura” proposto por Sheffi e Rice (2005). Após simulações com o modelo em PN, o estudo de caso evidenciou que o desempenho da cadeia de suprimento é menos impactado quanto menor for o tempo de recuperação das plantas ou quanto maior for o volume de estoques intermediários. Além disso, simulações com o modelo em PN indicaram que quanto mais distante (no *upstream*) do cliente, a ruptura impactar a cadeia de suprimentos, maior o tempo para o cliente ser impactado.

Ressalta-se que os resultados parciais obtidos durante o desenvolvimento do presente trabalho foram divulgados e submetidos à discussão em eventos científicos. Em 2013, cita-se a submissão, aprovação e apresentação do trabalho “*Modeling and analysis of global supply chain disruption based on Petri net*” no Congresso Internacional de Engenharia Mecânica 2013 (COBEM), realizado entre os dias 3 e 7 de novembro de 2013, na cidade de Ribeirão Preto. Em 2014, cita-se a submissão, aprovação e apresentação do trabalho “Modelagem e simulação de rupturas de cadeias de suprimentos baseados em rede de Petri” no Congresso Brasileiro de Automática (CBA), realizado entre os dias 20 e 24 de setembro de 2014, na cidade de Belo Horizonte. Os artigos apresentaram os fundamentos do procedimento de modelagem e análise de rupturas em cadeias de suprimentos globais com diferentes exemplos de aplicação e permitiram o aprimoramento e evolução do presente trabalho.

Por fim, sobre a aplicabilidade do procedimento, o estudo de caso exemplificou a aplicação das etapas para uma cadeia de suprimentos automotiva global. Dado que diversos tipos de cadeias de suprimentos e SPs podem ser facilmente modelados por *building blocks* (Tabela 9), outros tipos de cadeias de suprimentos podem ser modeladas com o uso do procedimento sistematizado nesse trabalho.

TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho permitiu o levantamento de diversos outros temas para trabalhos futuros, que não foram abordados no procedimento proposto, como:

- No estudo de caso descrito, a ruptura acontece uma vez e sua ocorrência não pode ser habilitada novamente. Uma nova situação seria o estudo de rupturas consecutivas;
- No estudo de caso descrito, o evento de ruptura não impacta os estoques de matérias primas da planta. Assim, após a restauração da planta impactada, o SP retoma a produção com a quantidade de matérias primas existente antes do evento de ruptura. Um nova situação seria o estudo de plantas com as matérias primas impactadas pelo evento de ruptura;
- Para a recuperação do GSCM, o estudo de caso optou pela recuperação dos sistemas produtivos que compõem a cadeia de suprimentos. Uma nova situação seria a inclusão de fornecedores substitutos temporários;
- Criação de um procedimento para incluir a modelagem do fluxo financeiro, junto ao fluxo de material e de informação, para análise dos custos e impactos financeiros das rupturas para o GSCM;
- Estudo para abordar todos os aspectos sugeridos pelo SCOR, incluindo os processos de negócio Plan, Return e Enable (respectivamente, a análise da capacidade versus a demanda, o retorno de matérias-primas para os fornecedores e de produtos finais do cliente e o gerenciamento de atividades suportes);
- Análise de uma arquitetura de controle para as cadeias de suprimentos que defina os parâmetros de monitoração das rupturas e atuação com práticas resilientes para mitigação e recuperação do GSCM.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALST, V.; STAHL, C. Modeling Business Processes – A Petri Net-Oriented Approach by W.M.P., The MIT Press, 2011.

ADAM, N.R.; ATLURI, V.; HUANG, W.K. Modeling and analysis of work_ows using Petri nets. Journal of Intelligent Information System, v. 10, n. 2, p.131-158, 1998.

Alves Jr, G.; Maciel, P.; Lima R. A GSPN based approach to evaluate outbound logistics. IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Montreal, 2007.

ANDERSON, K.; STRUTT, A. The changing geography of world trade: Prohections to 2030. Journal of Asian Economics, v 23, p. 303-323, 2012.

AZAMBUJA, M; CHEN, x. Risk Assessment of a ready-mis concrete supply chain. Construction Research Congress 2014, p. 1695-1703, 2014.

BADURDEEN, F.; WIJEKOON, K.; SHUAIB, M.; GOLDSBY, T. J; IYENGAR, D.; JAWAHIR, I. S. Integrated modeling to enhance resilience in sustainable supply chain. IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Toronto, 2010.

Balbo, g; Desel j.; Jensen, k; Reisig, w; Rozenberg, g; Silva, M. Petri Nets 2000: Introductory Tutorial. International Conference on Application and Theory of petri nets, Dinamarca, 2000.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L. Discrete-Event System Simulation. 2ª ed. Prentice Hall, 1996.

BAUSE, F.; KRITZINGER, P.; Stochastic Petri Nets: An Introductcion to the Theory. 2ª ed., 2002

BERTALANFFY, L. General System Theory: Foundations, Development, Applications. Penguin University Books, 1968.

BOLSTORFF, P.; ROSENBAUM, R. Supply Chain Excellence: A handbook for dramatic improvement using the SCOR model. 3ª ed. AMACOM, 2012.

BONANNI L.; CSIKSZENTMIHÁLYI, C.; HOCKENBERRY, M.; ZWARG, D. Small Business Application of Sourcemap: A Web Tool for Sustainable Design and Supply Chain Transparency. Atlanta, 2010.

BRAUER, W.; REISIG, W. Carl Adam Petri and Petri Nets. *Fundamental Concepts in Computer Science*, v. 3, p. 129-139, 2006.

BRUZZONE, A.; LONGO, F.; MASSEI, M.; NICOLETTI, L.; AGRESTA, M. Safety and Security in Fresh Good Supply Chain. *International Journal of Food Engineering*, p. 545-556, 2014.

BUSINESS CONTINUITY INSTITUTE. Business Continuity Institute Supply Chain Resilience 2014: An International survey to consider the origin, causes & consequences of supply chain disruption. Disponível em: <<http://www.thebci.org/index.php/obtain-the-supply-chain-resilience-report>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

CANIS, B. The motor vehicle supply chain: Effects of the japanese earthquake and tsunami. Estados Unidos: Congressional Research Service, 2011. Disponível em: <<http://fpc.state.gov/c6694.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2013.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. Introduction to discrete event systems. 2ª ed. Springer, 2008.

CHEN, Y. et al. An Adaptative Distributed Simulation Framework for a Server Fulfillment Supply Chain. International Conference on Automation Science and engineering, Shanghai, 2006.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. Gerenciamento da cadeia de suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operação. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 465 p.

CHOPRA, S.; SODHI, M. S. Managing risk to avoid supply-chain breakdown. *MIT Sloan Management Review*, v. 46, n. 1, p. 53-62, 2004.

CHRISTOPHER, M.; LEE, H. Mitigating supply chain risk through improved confidence. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 34, n. 5, p. 388–396, 2004.

CHUNG, C. A. Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2004

CHWIF, L; MEDINA, A. C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos. 4ª ed. Editora Campus, 2014.

COHEN, M. A., MALLIK, S. Global Supply Chains: Research and applications. Production and Operations Management, v. 6, n. 3, p. 193, 1997.

COOPER, M.; LAMBERT, D. Supply chain Management: More than a new name for logistics. The International Journal of Logistics Management, v. 8, n.1, p. 1-14, 1997.
CRANFIELD. Creating Resilient Supply Chains: A Practical Guide. Reino Unido: West Yorkshire. 2003. Disponível em: <http://www.som.cranfield.ac.uk/som/dinamic-content/research/lscm/downloads/57081_Report_AW.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2014.

DAVIES, M.; CHAI, D. Managing supply chain risk at intel. CSCMP Conference Singapore 2014. Disponível em: <https://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/educational/downloads/thursday-desmond-chai-mel-davis.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2014.

DELOITTE. Global Cyber Executive Briefing: Lessons from the front lines. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Risk/dttl-risk-Deloitte%20Global%20Cyber%20Executive%20Briefing-2014.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2014.

DOTOLI, M. D.; FANTI, M. P. F. A generalized stochastic petri net model for management of distributed manufacturing systems. IEEE Conference on Decision and Control, p. 2125-2130, 2005.

ELLRAM, L.; COOPER, M. C. Supply chain management: Its all about the journey, not the destination. SCM Journey, v. 50, n. 1, p. 8-20, 2014.

EXAME. Zara é responsabilizada por trabalho escravo no Brasil. Exame.com, 15 abril 2014. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/negocios/noticias/zarabrasileresponsabilizadaportrabalhoescravo>>. Acesso em: 28 dez. 2014.

EY. Disrupt or be disrupted: Creating value in the consumer products brand new order. Disponível em: <[http://www.ey.com.br/Publication/vwLUAssets/Disrupt_or_be_disrupted:_creating_value_for_brand_new_order/\\$FILE/EY_Disrupt_or_be_disrupted_lowres.pdf](http://www.ey.com.br/Publication/vwLUAssets/Disrupt_or_be_disrupted:_creating_value_for_brand_new_order/$FILE/EY_Disrupt_or_be_disrupted_lowres.pdf)>. Acesso em: 28 dez. 2014.

FATTORI, C.C.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Service composition modeling using interpreted Petri net for system integration. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Istanbul, p.696-701, 2011.

FINKE, G.; SCHMITT, A.; SINGH, M. Modeling and Simulating Supply Chain Schedule Risk, [S.l. s.n.] 2010

FORRESTER, J. Industrial Dynamics. Nova Iorque: MIT Press e John Wiley & Sons, 1961.

FUNABASHI, Y.; TAKENAKA, H. (Ed.) Lessons from the Disaster: Risk management and the compound crisis presented by the Great East Japan Earthquake. Tokyo: The Japan Times, 2011. 316 p.

GARCIA MELO, J.I., FATTORI, C.C., JUNQUEIRA, F., MIYAGI, P.E. Framework for collaborative manufacturing systems based in services. ABCM Symposium Series in Mechatronics. Rio de Janeiro: ABCM, vol. 4, p. 528-537, 2010.

GEROGIANNIS, V.; KAMEAS, A.; PINTELAS, P. Comparative study and categorization of high-level petri nets. The Journal of Systems and Software, v 43, p. 133-160, 1998.

GREENING, P.; RUTHERFORD, C. Disruptions and supply networks: a multi-level, multi-theoretical relational perspective. The International Journal of Logistics Management, v. 22, n. 1, p. 104-126, 2011.

GUHA-SAPIR, D.; VOS, F.; BELOW, R.; PONSERRE, S. Centre for research on the Epidemiology of Disasters. Annual Disaster Statistical Review 2011: the number and trends. Bruxelas: Université catholique de Louvain, 2011.

HASEGAWA, K.; MIYAGI, P. E.; SANTOS FILHO, D. J.; TAKAHASHI, K.; MA, L.; SUGISAWA, M. On resource arc for petri net modelling of complex resource sharing system. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, v. 26, p. 423-437, 1999.

HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K.; MIYAGI, P. E. Application of the mark flow graph to represent discrete event production systems and system control. *Transaction of the society of instrument and control engineers*, v. 24, n. 1, p. 69-75, 1988.

HENDRICKS, K. B.; SINGHAL, V. R. The effect of supply chain glitches on shareholder wealth. *Journal of Operations Management*, v. 21, p. 501-522, 2003.

HEWLETT-PACKARD Development Company. Approaches for Managing the Impact of Natural Disasters on the Supply Chain. CSCMP conference, Singapore, 22-24 jan. 2014.

HOULIHAN, J. International Supply Chain Management. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, v. 15, n. 1 p. 22-38, 1985.

HPSim. Tool features, environments, tool description and contact information. Disponível em: <<http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools/db/hpsim.html>>. Acesso em: 14 jun. 2013.

Isto é Dinheiro, Nike na Marca do Pênalti. [Istoedinheiro.com.br](http://istoedinheiro.com.br). Disponível em: <[istoedinheiro.com.br /noticias/negocios/20001103/nikemarcapenalti/25231.shtml](http://istoedinheiro.com.br/noticias/negocios/20001103/nikemarcapenalti/25231.shtml)>. Acesso em: 28 dez. 2014.

JAMA. Japan Automotive Manufacturers Association Active Matrix Database System. 2013. Disponível em: <<http://jamaserv.jama.or.jp/newdb/eng/index.html>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

JAMA. Japan Automotive Manufacturers Association Active Matrix Database System. 2012. Disponível em: < <http://www.jama-english.jp/publications/MIJ2012.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2013.

JAMA. Japan Automotive Manufacturers Association Active Matrix Database System. 2013. Disponível em: < <http://www.jama-english.jp/publications/MIJ2013.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2013.

JAPÃO. Government of Japan. Economic Impact of the great east japan earthquake and current status of recovery. Japão: METI, 2011a. Disponível em: < <http://www.meti.go.jp/english/earthquake/recovery/> >. Acesso em: 18 mai. 2013.

JAPÃO. Government of Japan. Results of an Emergency Survey on the Actual Status of Industries after the Great East Japan Earthquake. Japão: METI, 2011b. Disponível em: < <http://www.meti.go.jp/english/earthquake/recovery/>>. Acesso em: 18 mai. 2013.

JAPÃO. Government of Japan. Results of Second Emergency Survey on the Actual Status of Industries after the Great East Japan Earthquake. Japão: METI, 2011c. Disponível em: < <http://www.meti.go.jp/english/earthquake/recovery/>>. Acesso em: 18 mai. 2013.

JENSEN, K.; Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use. SpringerVerlag, Berlin, 1992.

KIM, C.S.; TANNOCK, J.; BYRNE, M. State-of-the-art review: techniques to model the supply chain in an extended enterprise. VIVACE WP2.5/UNOTT/T/04021-1.0. Operations Management Division, University of Nottingham, 2004.

KPMG. Future State 2030: The global megatrends shaping governments. Canada: MOWAT, 2014a. Disponível em: <<http://www.kpmg.com/CN/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/Future-State-2030-O-201311.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

KPMG. Transforming for growth: Consumer business in the digital age. The Consumer Goods Forum, 2014b. Disponível em: <<https://www.kpmg.com/dutchcaribbean/en/Documents/Publications/TOMPDF2014Final.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

KPMG. Global Manufacturing Outlook: Performance in the crosshairs. Suíça, 2014c. Disponível em: <<http://www.kpmg.com/CN/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/Global-Manufacturing-Outlook-O-201405.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

KUMAR, R.; GARG, V. Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1995. 143 p.

LAGOUDIS, I. Supply Chain Risk Assessment Through Contract Negotiations. CSCMP conference, Singapore, 22-24 jan. 2014.

LAM, J.S.L.; YIP, T.L. Impact of port disruption on supply chains: a Petri net approach". Computer Logistics, v. 7555, p. 72-85, 2012.

LEE, H. L.; PADMANABHAN, V.; WHANG, S. Information Distortion in a Supply Chain : the Bullwhip Effect. Management Science, v. 43, n. 4, p. 546-558, 1997.

LUMMUS, R. R.; VOKURKA, R. J. Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. Industrial Management & Data Systems, v. 99 n. 1, p. 11-17, 1999.

MENTZER, J. T.; DEWITT, W.; KEEBLER, J. S.; MIN, S.; NIX, N. W.; SMITH, C. D. Defining supply chain management. Journal of business logistics, v. 22, n. 2, 2001.

MENTZER, J. T.; STANK, T. P.; MYERS, M. B. (Ed.). Handbook of Global Supply Chain Management. [S.l.]: Sage Publications, 2007.

MEVIUS, M.; PIBERNIK, R. Process Management in Supply Chains – A New Petri-Net Based Approach. Hawaii International Conference on System Sciences, v37, 2004.

MIYAGI, P. E. ; JUNQUEIRA, F. ; GARCIA MELO, J. I.; SANTOS FILHO, D. J. Internet based manufacturing and disperse productive systems. In: Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 2009, Bauru, SP.

MIYAGI, P.E. Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1996.

MIYAGI, M. M.; MIYAGI, P. E.; KISIL, M. Modelagem e análise de serviços de saúde baseados em redes de petri interpretadas. Revista Produção, v. 11, n. 2, 2002.

MURATA, T. Petri nets: properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE, v. 77, n. 4, p.541-580, 1989.

MURINO, T.; ROMANO, E.; SANTILLO, L. C. Supply chain performance sustainability through resilience function. Winter Simulation Conference, Estados Unidos, p. 1600-1611, 2011

NASSAR, M.G.V.; GARCIA MELO, J.I.; MIYAGI, P.E.; SANTOS FILHO, D.J. Modeling and analyzing of the material entry ow system in a pickling line process using Petri nets. ABCM Symposium Series in Mechatronics, v.3, p. 444-453, 2008.

NISHIGUCHI, T.; BEAUDET, A. The Toyota Group and the Aisin Fire. MIT Sloan Management Review, 1998.

NUNES, I.; MACHADO, C. A supply chain disturbance management fuzzy decision support system. International Journal of Industrial and Systems Engineering, v.18, n.3, p. 306-334, 2014.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 4^a.ed. Pearson Prentice Hall, 2006. 788 p.

PENHA, D. O.; FREITAS, H. C.; MARTINS, C. A. P. Modelagem de Sistemas Computacionais usando Redes de Petri: aplicação em projeto, análise e avaliação. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/erirjes/2004/001.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2010.

PETERSON, J.L. Petri net theory and the modeling of systems. Englewood Cliffs Prentice Hall, 1981.

PETRI, C. A. Kommunikation mit Automaten. 1962. Tese (Doutorado) - Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962. Também em inglês, "Communication with Automata", New York: Griffiss Air Force Base, Tech. Rep.RADC-TR-65-377, v. 1, supplement 1, 1966.

PETRI, C. A.; REISIG, W. Scholarpedia, 2008. Disponível em: <http://www.scholarpedia.org/article/Petri_net>. Acesso em: 8 ago. 2014.

PIRES, S. R. I. Gestão da cadeia de suprimentos (Supply Chain Management): Conceitos, estratégias, práticas e casos. São Paulo: Editora Atlas, 2004.

PWC. How to Make Your Supply Chain More Resilient: A conversation with PwC's Joseph Roussel, 2014.

RENESAS. Tóquio. Press Center - News Release. Disponível em: <<http://am.renesas.com/press/notices/index.jsp>>. Acesso em: 01 ago. 2013.

SAMVEDI, A.; JAIN, V. A grey approach for forecasting in a supply chain during intermittent disruptions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 26, p. 1044-1051, 2013.

SANTOS, F. L. G.; AQUINO, F. J. A. Modelagem e análise do sistema de ensino baseada em rede de petri interpretada - Avaliação do empenho de professores. Disponível em: <<http://www.infobrasil.inf.br/userfiles/OK-Modelagem-122396.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2013.

SARPONG, S. Traceability and supply chain complexity: confronting the issues and concerns. Centre for Communication and Entrepreneurship Skills, University of Mines and Technology (UMAT), Tarkwa, Ghana. *Emerald Business Review*, v.26, n. 3, p. 271-284, 2014.

SCHMITT, A.; SINGH, M. Quantifying Supply Chain Disruption Risk Using Monte Carlo and Discrete-Event Simulation. *Winter Simulation Conference*, 2009.

SCOR. Supply Chain Operations Reference Model – Revision 11.0. Estados Unidos: Supply Chain Council, 2012.

SCRLC. SCRLC Emerging risks in the supply chain 2013. Supply Chain Risk Leadership Council, 2013. Disponível em: <http://www.scrclc.com/articles/Emerging_Risks_2013_feb_v10.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2013.

SHEFFI, Y. Supply Chain Management under the Threat of International Terrorism. *The International Journal of Logistics Management*, v. 12, n. 2, 2001.

SHEFFI, Y. The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage. Cambridge: The MIT Press, 2005.

SHEFFI, Y., RICE, J.B. "A supply chain view of the resilient enterprise". *MIT Sloan Management Review*, vol.47, n.1, p. 41-48, 2005.

SILVA, R. M. Modelagem de sistemas de controle de edifícios inteligentes considerando a ocorrência de falhas. 2008. 183 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, M. Half a century after Carl Adam Petri Ph.D. thesis: A perspective on the Field. *Annual Reviews in Control*, 37, p.191-219, 2013.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. Cadeia de Suprimentos, projeto e gestão: Conceitos, estratégias e estudos de caso. 3ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 584 p.

SIMCHI-LEVI, D.; KYRATZOGLOU, I. M.; VASSILIADIS, C. G. Supply chain and risk management: Making the right decisions to strengthen operations performance. MIT Forum for Supply chain innovation, 2003.

SIMCHI-LEVI, D.; SCHMIDT, W.; WEI, Y. From Superstorms to Factory Fires: Managing Unpredictable Supply-Chain Disruptions. *Harvard Business Review*, January 2014.

SOUIT, S. Orquestração de sistemas produtivos dispersos. 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SOURCEMAP. Visualizing Supply Chains in Distress, 30 oct. 2014. Disponível em: <<http://blog.sourcemap.com/visualizing-supply-chains-in-distress>>. Acesso em: 28 dez. 2015.

STERMAN, J. D. Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science*, v. 35, n. 3, p. 321-339, 1989.

THE GUARDIAN. Horsemeat scandal: the essential guide. *The Guardian*, 2013. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/uk/2013/feb/15/horsemeatscandaltheessentialguide>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

THE WALL STREET JOURNAL. Trial by fire A Blaze in Albuquerque sets off major crisis for cell-phone giants. The Wall Street Journal, 2001. Disponível em: <http://web.mit.edu/course/15/15.795/WSJ_Nokia%20HandlesSupplyChainShock.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2015.

TUNCEL, G.; ALPAN, G. Risk assessment and management for supply chain networks: a case study. Computers in Industry, v. 61, p. 250-259, 2010.

UNU. World Risk Report 2014. United Nations University – Institute for environment and human security, 2014. Disponível em: <<https://www.ehs.unu.edu/file/get/11895.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

VAKHARIA, A. J.; YENIPAZARLI, A. Managing supply chain disruptions. Foundations and Trends in Technology, Information and Operations Management, v. 2, n. 4, p. 243-325, 2009.

VILLANI, E. Modelagem e análise de sistemas supervisórios híbridos. 2004. 363 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

VILLANI, E.; MIYAGI, P. E.; VALETTE, R. Modelling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems: A petri net approach. Springer, 2007.

VISWANADHAM, N.; RAGHAVAN, N. R. Performance analysis and design of supply chain: A petri net approach. Journal of the Operational Research Society, v. 51, n. 10, p. 1158-1169, 2000.

VOCÊ SA. O trabalho em 2030. Revista Você AS, 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/revista-voce-rh/edicoes/35/>>. Acesso em 01 fev. 2015.

THE GUARDIAN. Horsemeat scandal: the essential guide. The Guardian, 2013. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/uk/2013/feb/15/horsemeatscandaltheessentialguide>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

WAGNER, S. M.; NESHAT, N. A comparison of supply chain vulnerability for different categories of firms. *International Journal of Production Research*, v. 50, n. 11, p. 2877-2891, 2011.

WANG, J. W.; IP, W. H.; MUDDADA, R. R.; HUANG, J. L.; ZHANG, W. J. On Petri net implementation of proactive resilient holistic supply chain networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013.

WEICK, K. E.; SUTCLIFFE, K. M. *Managing the unexpected: Resilient Performance in an Age of Uncertainty*. 2^a ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007. 194 p.

WILD, R. *Concepts for Operations Management*. John Wiley & Sons, 1977. 185 p.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in your organization*. Simon & Shuster, 1996. 307 p.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Building Resilience in supply chains: An Initiative of the risk response network in collaboration with Accenture*. Suíça: World Economic Forum, 2013a. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_RRN_MO_BuildingResilienceSupplyChains_Report_2013.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Insight Report: Global Risks 2014*. Suíça: World Economic Forum, 2013b. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalRisks_Report_2014.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

WU, T.; BLACKHURST, J. Modeling methodology for supply chain synthesis and disruption analysis. *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*, v. 9, n. 2, p. 93-105, 2005.

WU, Y. et al. Performance analysis of serial supply chain networks considering system disruptions. *Production Planning & Control*, v. 21, n. 8, p. 774-793, dez. 2010.

WU, T.; BLACKHURST, J.; O'GRADY, P. Methodology for supply chain disruption analysis. *International Journal of Production Research*, v. 45, n. 7, p. 1665-1682, 2007.

WU, T.T.; BLACKHURST, J. A methodology for supply chain synthesis and disruption analysis. *International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*, v. 9, n. 2, p. 93-105, 2005.

WU, T.; BLACKHURST, J.; OGRADY, P. Methodology for supply chain disruption analysis. *International Journal of Production Research*, v. 45, n. 7, p. 1665-1682, 2007.

YOU, S.; ZHANG, L.; JIAO, J. Supply chain configuration based on colored petri nets. *IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*, p. 921-925, 2006.

ZEGORDI, S. H.; DAVARZANI, H. Developing a supply chain disruption analysis model: Application of colored Petri Nets. *Expert systems with application*, v. 39, p. 2102-2111, 2012.

ZHANG, X.; LU, Q.; WU, T. Petri-net based applications for supply chain management: an overview, *International Journal of Production Research*, v. 49, n. 13, p. 3939-3961, 2011

ZURAWSKI, R., ZHOU, M. Petri nets and industrial applications: a tutorial. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 41, n. 6, p. 567-583, 1994.

ANEXO A – CLASSIFICAÇÕES DE SISTEMAS

Em um processo de modelagem, as variáveis mensuráveis (por exemplo, posição de partículas, velocidades, voltagens, correntes) associadas a um sistema são coletadas por um período de tempo e a esse conjunto de variáveis dá-se o nome de *input* (ou variáveis de entrada) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Por sua vez, o *output* (ou variáveis de saída) pode ser entendido como uma resposta ao estímulo proveniente do input (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). A Figura 42 representa um processo simples de modelagem e simplifica os *inputs* com um vetor $u(t)$ e os *outputs* com um vetor $y(t)$.

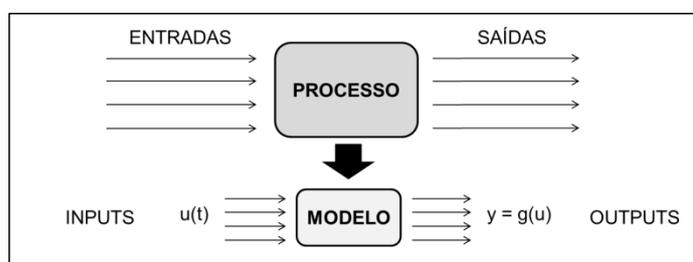


Figura 42 – Processo simples de modelagem (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Para facilitar a leitura, o esquema que organiza as diversas classificações de sistemas (Figura 43) é replicado nesse anexo. Em seguida, os tipos de sistemas são definidos.

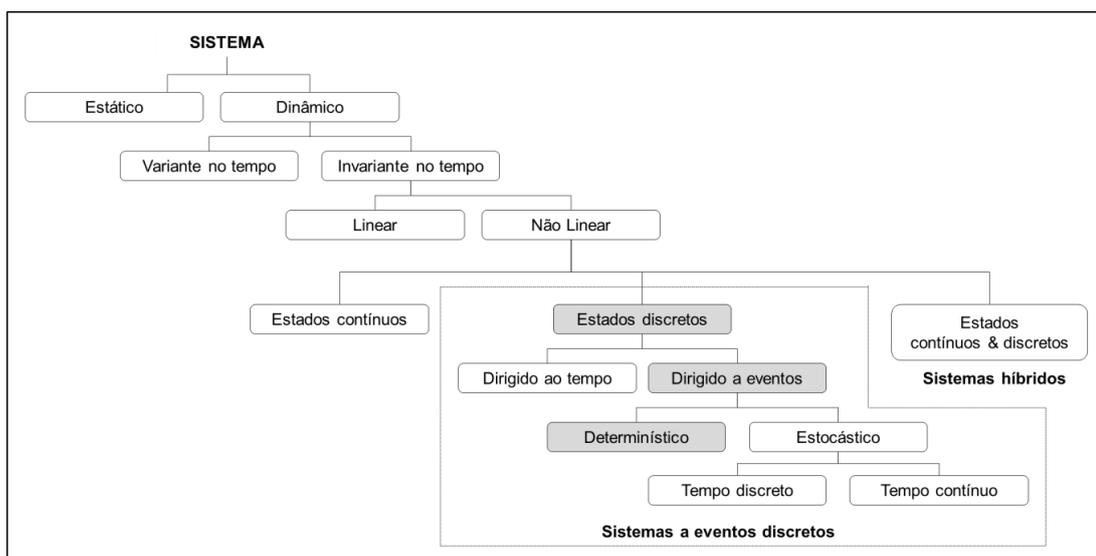


Figura 43 - Classificações de sistema (baseado em CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Primeiramente, um sistema estático é aquele no qual o *output* $y(t)$ independe dos valores passados dos *inputs* $u(t)$ (é dito “sem memória”), enquanto o sistema dinâmico é aquele no qual o *output* depende dos valores passados do *input* (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Por sua vez, um sistema dinâmico pode ser variante ou invariante no tempo. Um sistema é dito variante no tempo quando o *output* pode variar para um mesmo *input* no tempo. Nesse caso, $y=g(u,t)$ onde a função g explicitamente depende da variável tempo t . Quando não depende do tempo (e pode-se esperar sempre a mesma resposta $y(t)$ para um específico *input* $u(t)$) é chamado de sistema invariante no tempo ou sistema estacionário (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Antes de continuar as definições, faz-se relevante a definição de alguns conceitos. O estado de um sistema em um instante t descreve o seu comportamento nesse instante, ou seja, o estado é definido por um conjunto de variáveis do sistema nesse instante (BANKS; CARSON; NELSON, 1996). Nesse contexto, CASSANDRAS e LAFORTUNE (2008) definem que o estado de um sistema no tempo t_0 é a informação requerida em t_0 tal que o *output* $y(t)$, para todo $t \geq t_0$, é unicamente determinado por essa informação e por $u(t)$, com $t \geq t_0$. Assim como o *input* $u(t)$ e o *output* $y(t)$, o estado é também representado por um vetor $x(t)$. Os componentes do vetor, $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$ são chamados de variáveis de estado. O objetivo de um modelo é obter as equações de estado, ou seja, o conjunto de equações que definem $x(t)$, a partir de $x(t_0)$ e o *input* $u(t)$, com $t \geq t_0$ (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Ao conjunto de todos possíveis estados que um sistema pode assumir é chamado de espaço de estado (X), especificado pelas Equações (1) e (2), no qual (1) especifica as condições iniciais e (2) define as equações de *output*.

Variáveis de estado:	$x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$	(1)
Modelo de espaço de estados:	$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \\ y(t) = g(x(t), u(t), t) \end{cases}$	(2)

Continuando, a classificação de um sistema em linear e não linear está relacionada à natureza das funções f e g . Matematicamente, o sistema é linear quando as funções f e g são lineares. A noção de linearidade está associada ao “princípio de superposição” (Equação (3)).

Princípio de Superposição: $\begin{cases} g(a_1u_1 + a_2u_2) = a_1g(u_1) + a_2g(u_2) \\ f(a_1u_1 + a_2u_2) = a_1f(u_1) + a_2f(u_2) \end{cases} \quad (3)$ <p style="text-align: center;">com a_1 e a_2 números reais</p>
--

Os sistemas não lineares se dividem em três tipos: contínuo, discreto e híbrido. Em um modelo contínuo, o espaço de estado X é contínuo e as variáveis de estado podem assumir qualquer valor real (ou complexo) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Simplificadamente, o estado do sistema está continuamente mudando ao longo do tempo (CHUNG, 2004). Dentre os exemplos citam-se os sistemas da natureza, cuja dinâmica é regida por leis físicas e uma forma de modelar este tipo de sistema é por meio de equações diferenciais (VILLANI, 2004). Por sua vez, em um modelo discreto, os estados são modificados de forma discreta, ou seja, o mecanismo da transição de estados é normalmente baseada em lógicas como “se algo específico acontecer e o estado atual é x_1 , então o próximo estado é x_2 ” (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008; CHUNG, 2004). Dentre os exemplos citam-se: armazenamento, centros de serviço, indústrias de manufatura, centros logísticos. A Figura 44 ilustra o comportamento de um sistema com estados contínuos e um sistema com estados discretos.

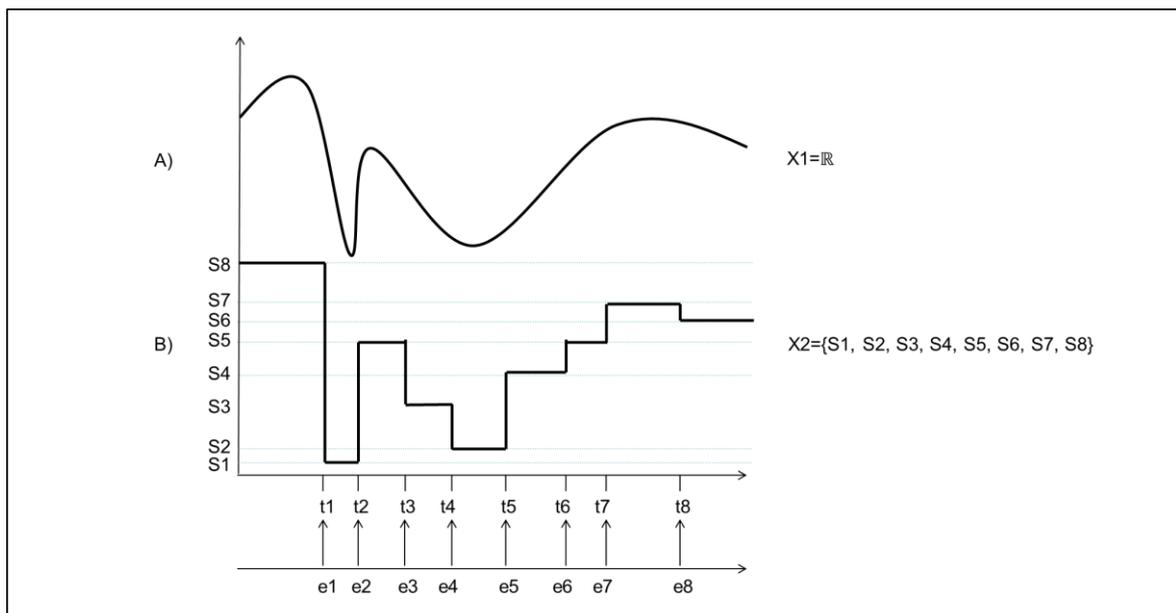


Figura 44 – Exemplo de um A) Sistema com estados contínuos e B) Sistema com estados discretos (SED), com a indicação dos eventos (e_1, e_2, e_3, \dots) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Por sua vez, os sistemas discretos se dividem em sistemas dirigido ao tempo e dirigido a eventos. Os dirigidos a eventos podem ser estocásticos e determinísticos. Assim, enquanto em um sistema determinístico, o estado $x(t)$ é determinado pelo *input* $u(t)$, ou seja, o próximo estado é dependente do estado atual e dos eventos ocorridos; em um sistema estocástico, o próximo estado é dependente do estado atual, dos eventos ocorridos e a probabilidade dos eventos ocorrerem. Nesse caso, o estado do sistema estocástico requer o uso de conceitos probabilísticos para caracterizar o comportamento do sistema.

E finalmente, os sistemas podem ser híbridos, onde se encontram características dos sistemas contínuos e discretos. VILLANI (2004) salienta que a classificação do sistema refere-se a uma abstração da determinada realidade e que um mesmo sistema pode ser considerado e modelado como pertencente a diversas classes. Como exemplo, a autora cita a modelagem da evolução da temperatura dentro de uma sala com um aquecedor: como sistema discreto, a dinâmica do sistema é regida por relações de causa e efeito do tipo “quando o aquecedor é ligado, a sala se aquece” e “quando o aquecedor é desligado, a sala se esfria”; ou como sistema contínuo, onde se equaciona a troca de calor entre o aquecedor e o ambiente da sala e se obter a evolução da variável temperatura em todos os instantes de tempo; ou como sistema híbrido, onde se estuda a evolução da temperatura na sala após o aquecedor ser ligado ou desligado, sendo a decisão de liga-lo ou desliga-lo tomada quando a temperatura da sala ultrapassa certos limites discretos (VILLANI, 2004).

ANEXO B – SCOR

Em 1996, as empresas Pittiglio Rabin Todd & McGrath e *Advanced Manufacturing Research* (AMR) organizaram o *Supply-Chain Council* (SCC), uma organização sem fins lucrativos que desenvolveu o SCOR (*Supply-Chain Operations Reference Model*). Recentemente, em abril de 2014, o SCC anunciou a fusão com a associação americana APICS (Association for Operations Management). Hoje, a missão do APICS SSC é difundir, aperfeiçoar e perpetuar o uso do modelo SCOR através de congressos, iniciativas de educação e outras atividades.

Segundo PIRES (2004), o modelo SCOR é considerado o primeiro modelo de referência construído para descrever, comunicar, avaliar e melhorar o desempenho do gerenciamento de cadeias de suprimentos. Seu desenvolvimento foi baseado em pesquisas e levantamento das boas práticas de mercado.

Na versão SCOR 11.0, lançada em 2012, o GSCM é definido pela integração de seis processos de negócios básicos: *plan* (planejar), *source* (abastecer), *make* (produzir), *deliver* (entregar), *return* (retornar) e *enable* (habilitar) – desde o fornecedor original até o cliente final (SCOR, 2012). O detalhamento de cada processo de negócio básico é feito para três níveis, como ilustra a Figura 45, e medidas padrões para medir o desempenho das cadeias de suprimentos são sugeridas (PIRES, 2004).

	Level		Examples	Comments
	#	Description		
Within scope of SCOR	1	Process Types (Scope)	Plan, Source, Make, Deliver, Return and Enable	Level-1 defines scope and content of a supply chain. At level-1 the basis-of-competition performance targets for a supply chain are set.
	2	Process Categories (Configuration)	Make-to-Stock, Make-to-Order, Engineer-to-Order, Defective Products, MRO Products, Excess Products	Level-2 defines the operations strategy. At level-2 the process capabilities for a supply chain are set. (Make-to-Stock, Make-to-Order)
	3	Process Elements (Steps)	<ul style="list-style-type: none"> • Schedule Deliveries • Receive Product • Verify Product • Transfer Product • Authorize Payment 	Level-3 defines the configuration of individual processes. At level-3 the ability to execute is set. At level-3 the focus is on the right: <ul style="list-style-type: none"> • Processes • Inputs and Outputs • Process performance • Practices • Technology capabilities • Skills of staff
Not in scope	4	Activities (Implementation)	Industry-, company-, location- and/or technology specific steps	Level-4 describes the activities performed within the supply chain. Companies implement industry-, company-, and/or location-specific processes and practices to achieve required performance

Figura 45 – Estrutura de detalhamento do SCOR 11.0 (SCOR, 2012).

ANEXO C – DETALHES DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

CENÁRIO 0 - SEM RUPTURA

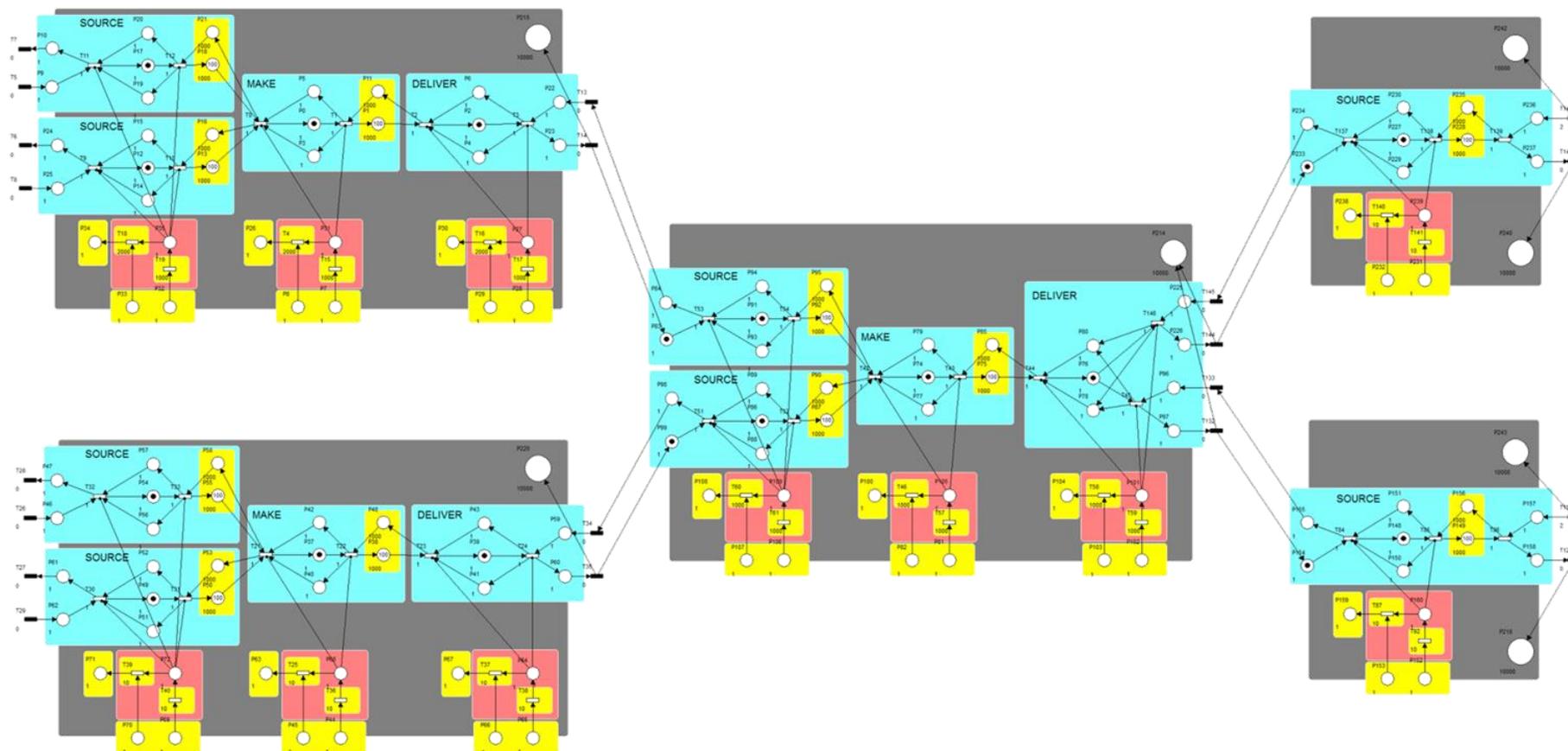
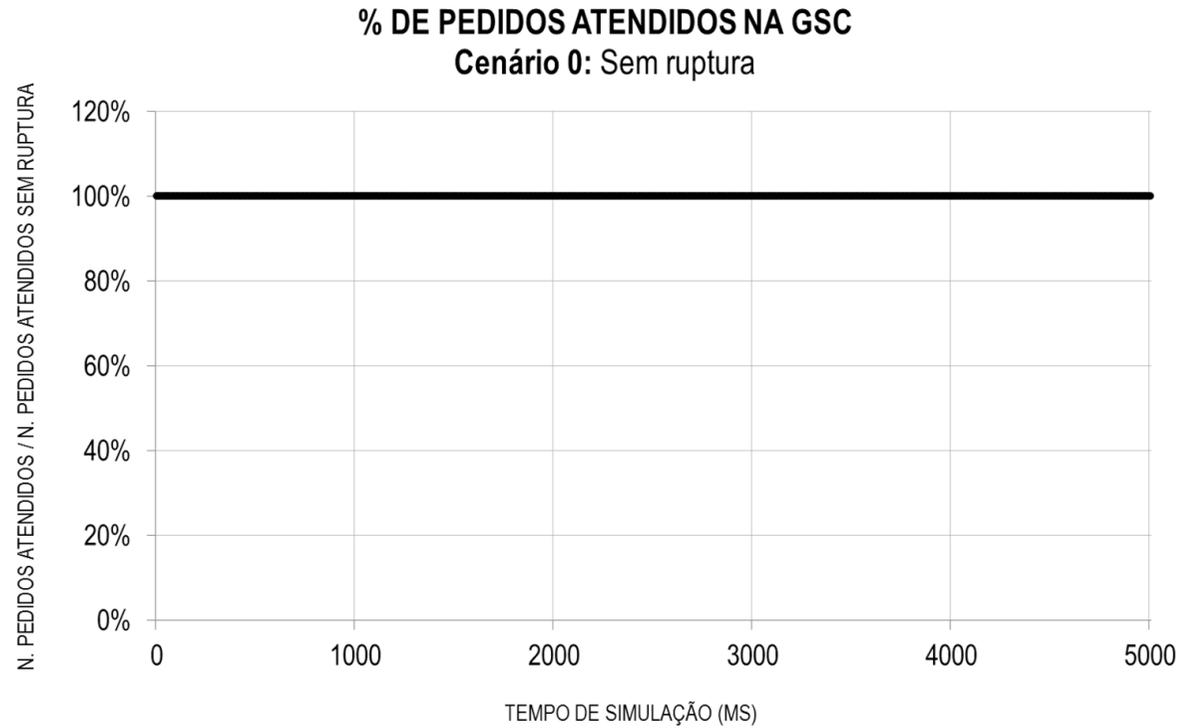


Figura 46 – Modelo funcional em PN do cenário 0 (sem ruptura).

MÉTRICA 1: PRODUTIVIDADE GERAL DA CADEIA DE SUPRIMENTOS



MÉTRICA 2: PEDIDOS ATENDIDOS

SP4: 1375 pedidos atendidos
(número de marcas no lugar P240)

+

SP5: 1325 pedidos atendidos
(número de marcas no lugar P218)

=

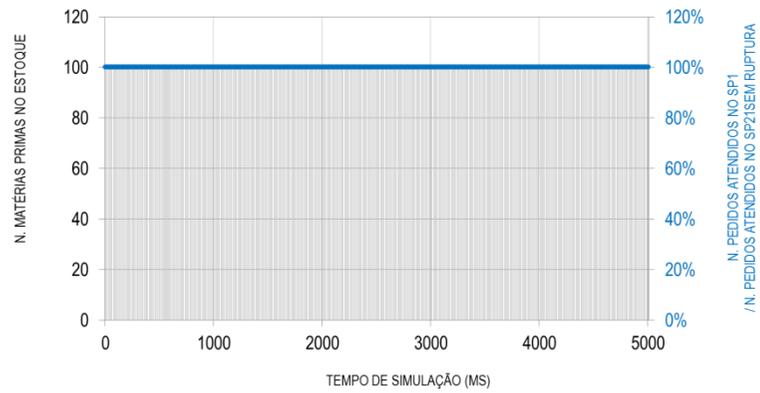
**2700 pedidos atendidos
em 5000 ms.**

MÉTRICA 3 E 4: PRODUTIVIDADE DE CADA SP E NÍVEL DOS ESTOQUES INTERMEDIÁRIOS

SP1

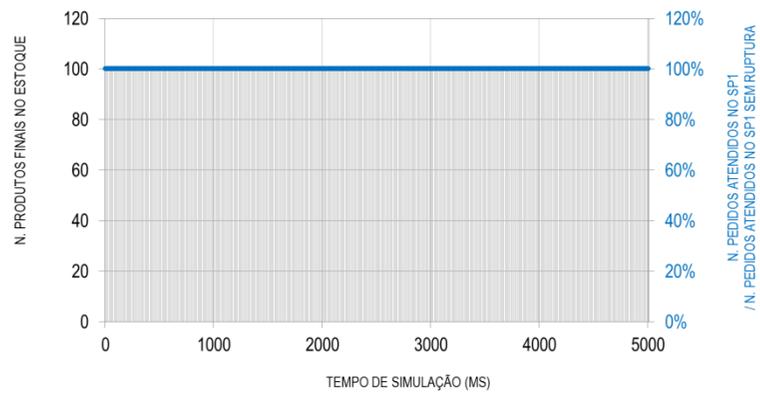
EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP1

Cenário 0: Sem ruptura



EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP1

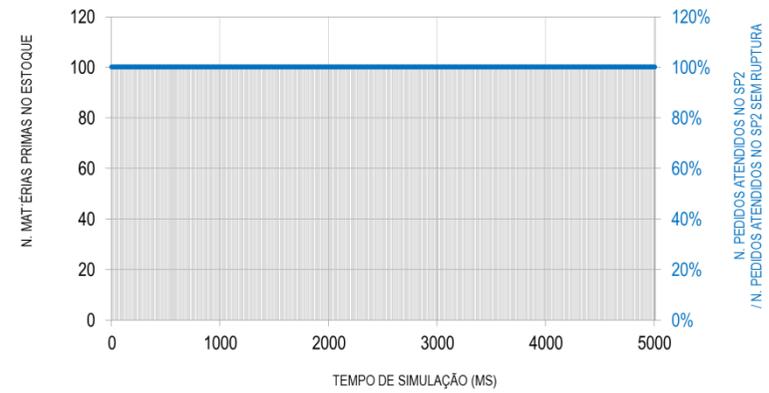
Cenário 0: Sem ruptura



SP2

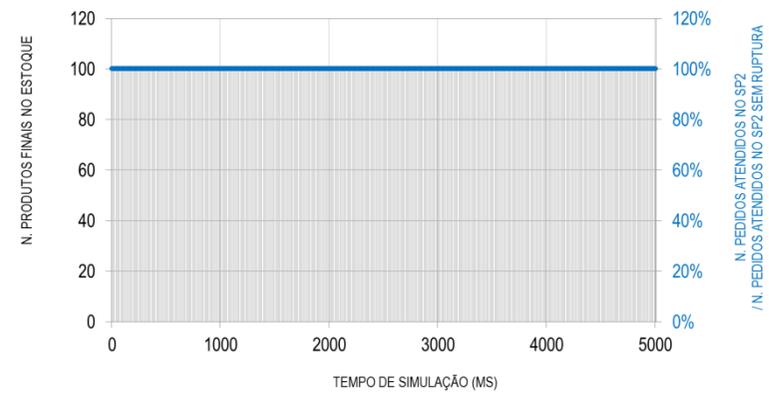
EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP2

Cenário 0: Sem ruptura



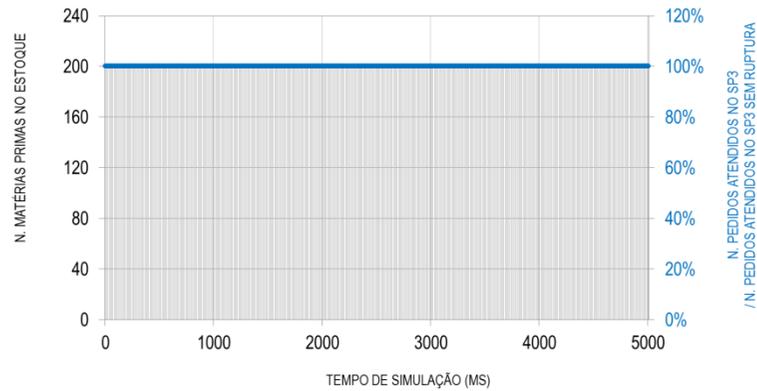
EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP2

Cenário 0: Sem ruptura

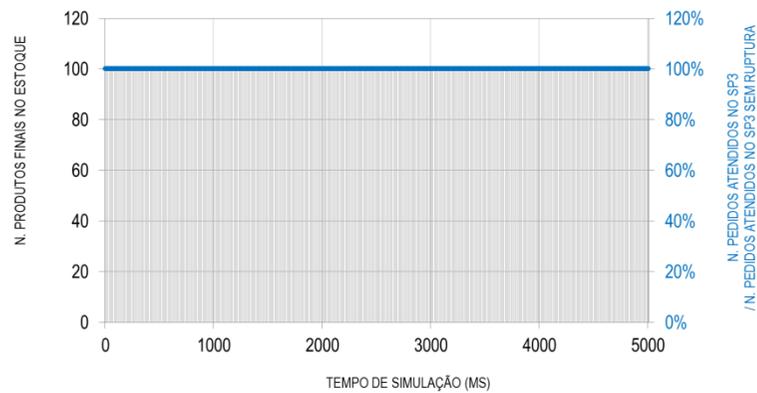


SP3

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP3
Cenário 0: Sem ruptura

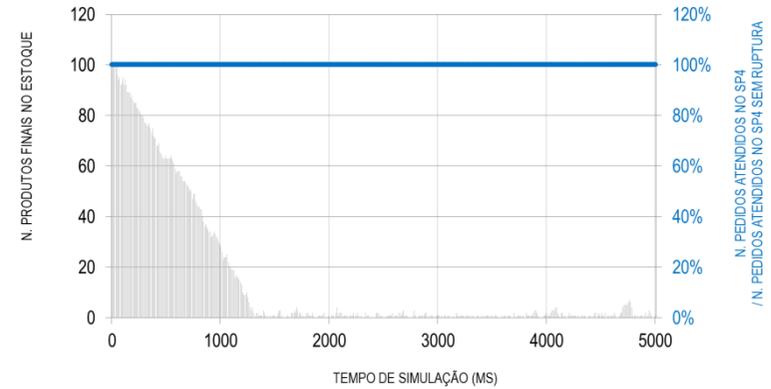


EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP3
Cenário 0: Sem ruptura



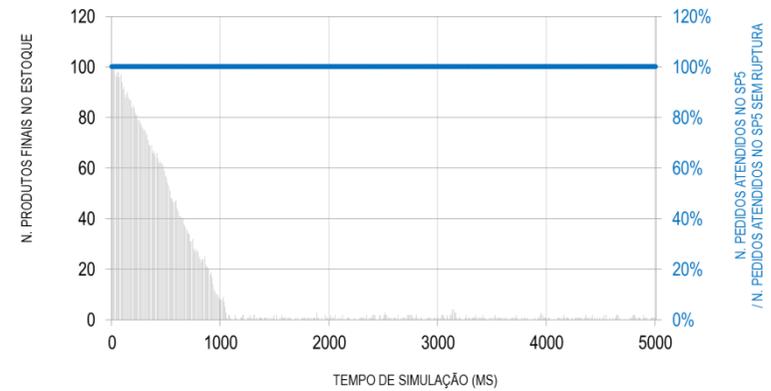
SP4

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP4
Cenário 0: Sem ruptura

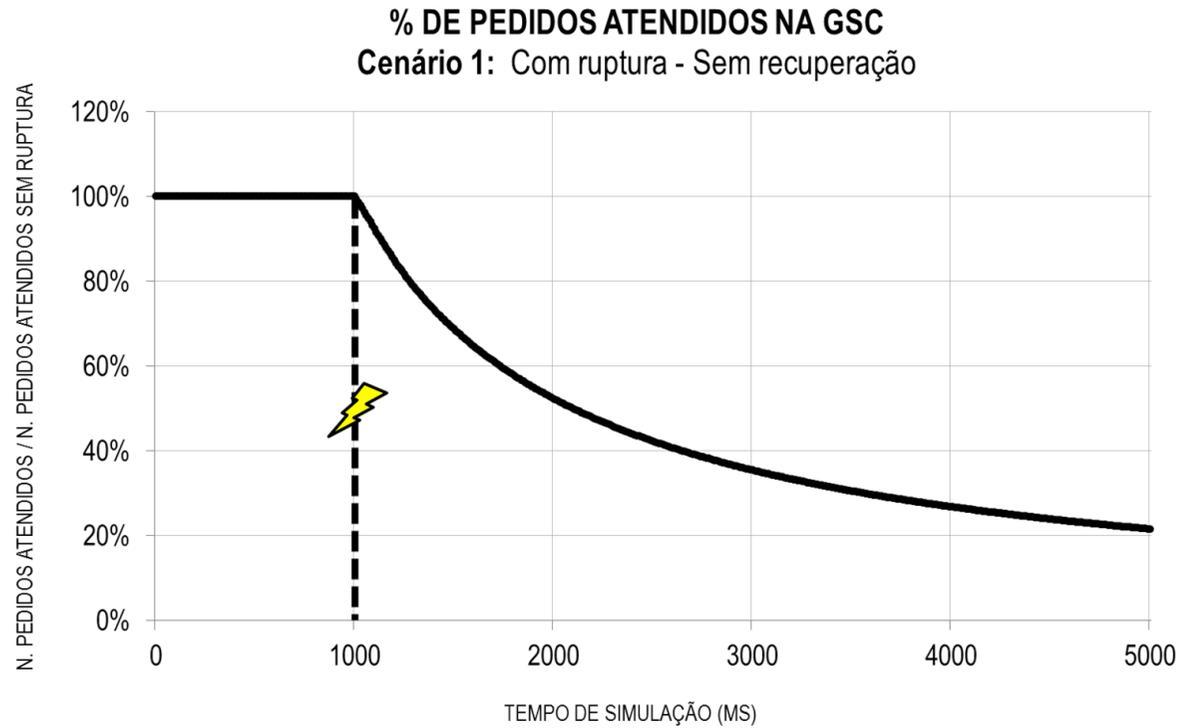


SP5

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP5
Cenário 0: Sem ruptura



MÉTRICA 1: PRODUTIVIDADE GERAL DA CADEIA DE SUPRIMENTOS



MÉTRICA 2: PEDIDOS ATENDIDOS

SP4: 362 pedidos atendidos
(número de marcas no lugar P240)

+

SP5: 341 pedidos atendidos
(número de marcas no lugar P218)

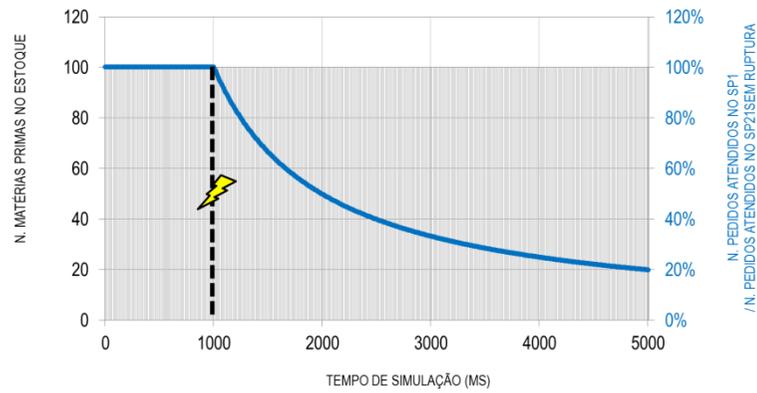
=

703 pedidos atendidos
em 1087 ms (a partir desse tempo de simulação, a cadeia de suprimentos global interrompe o atendimento dos pedidos dos clientes).

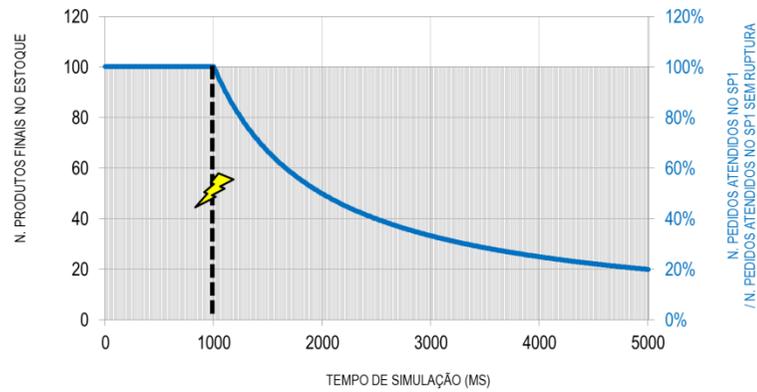
MÉTRICA 3 E 4: PRODUTIVIDADE DE CADA SP E NÍVEL DOS ESTOQUES INTERMEDIÁRIOS

SP1

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP1
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação

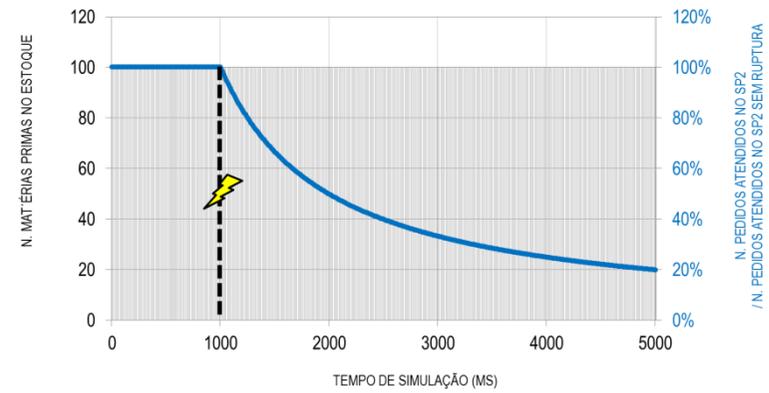


EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP1
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação

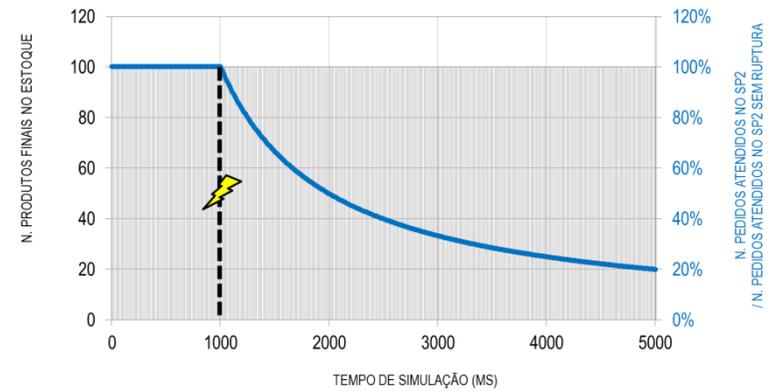


SP2

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP2
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação

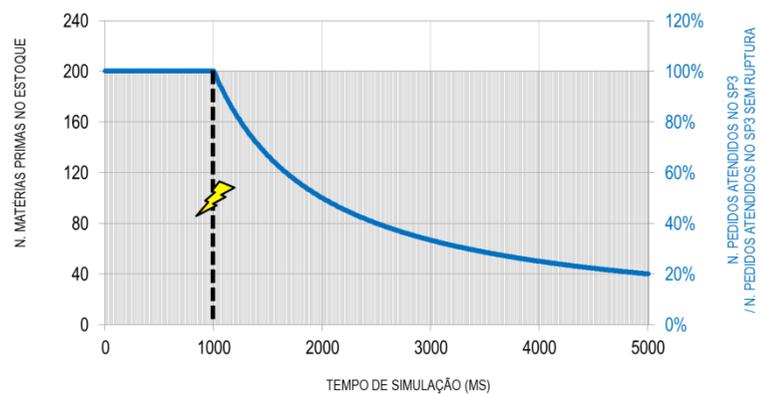


EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP2
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação

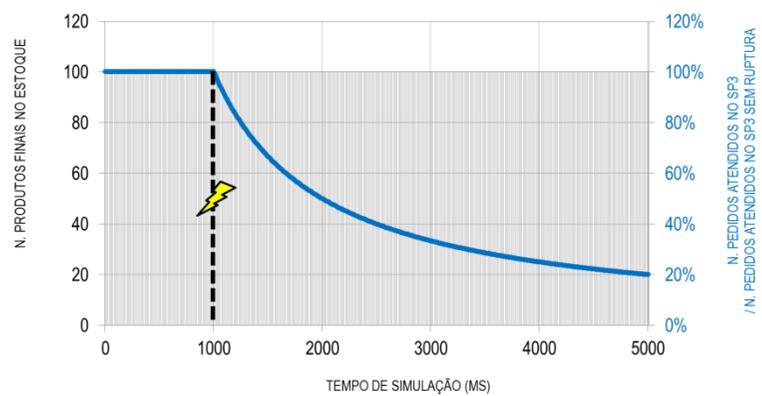


SP3

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP3
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação

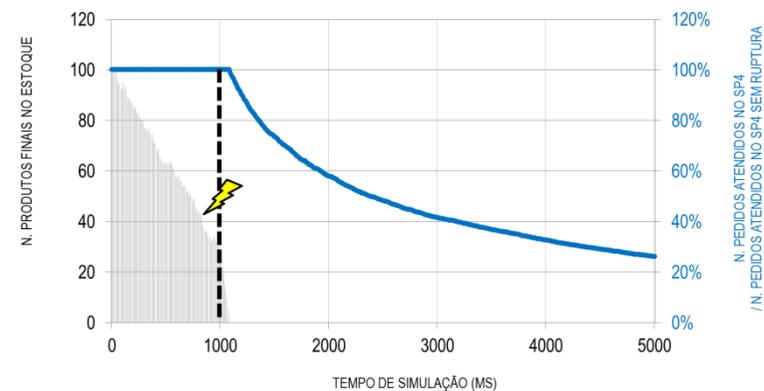


EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP3
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação



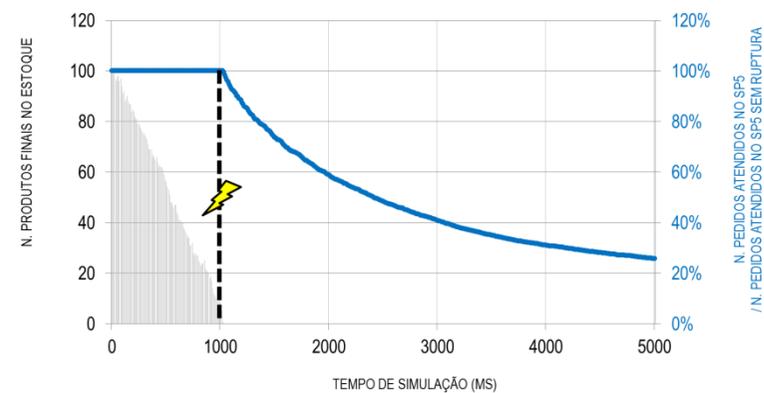
SP4

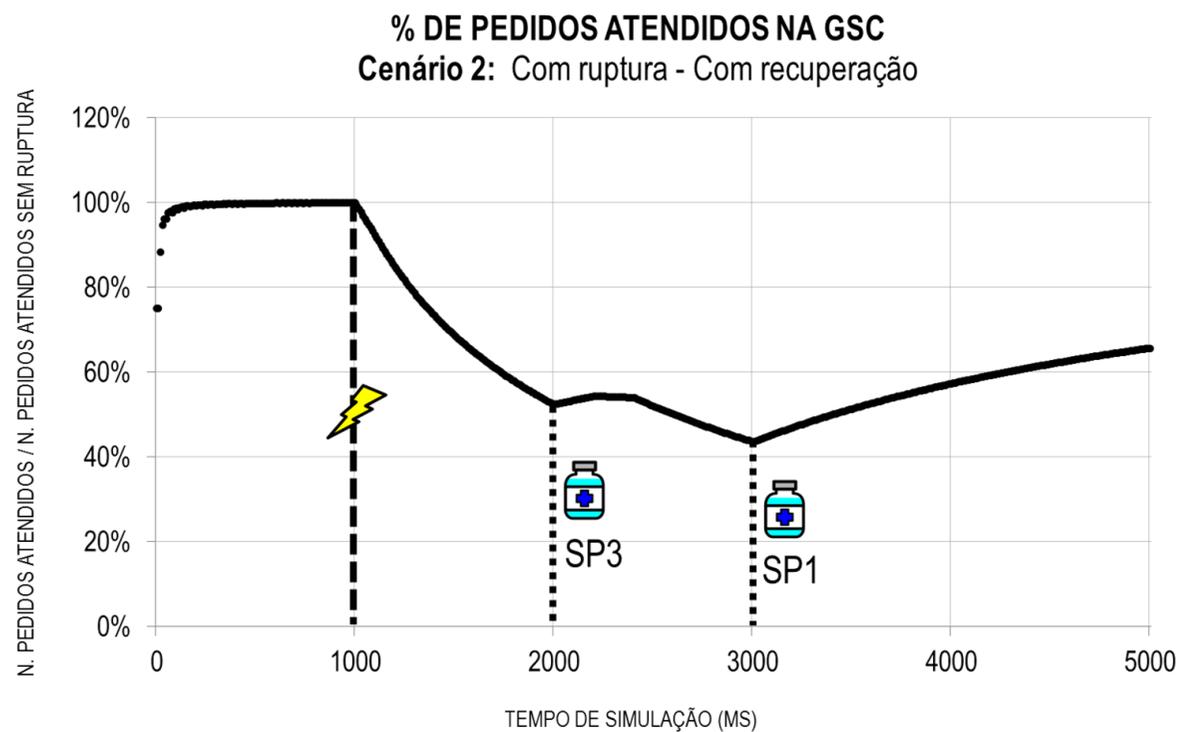
EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP4
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação



SP5

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP5
Cenário 1: Com ruptura - Sem recuperação



MÉTRICA 1: PRODUTIVIDADE GERAL DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

MÉTRICA 2: PEDIDOS ATENDIDOS

SP4: 951 pedidos atendidos
(número de marcas no lugar P240)

+

SP5: 947 pedidos atendidos
(número de marcas no lugar P218)

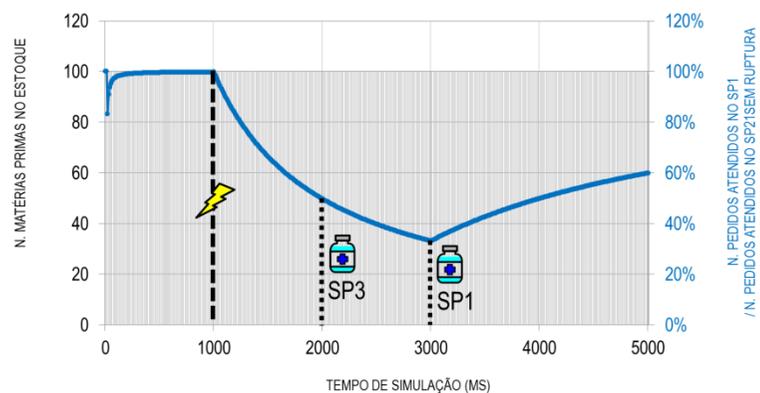
=

**1898 pedidos atendidos
em 5000 ms.**

MÉTRICA 3 E 4: PRODUTIVIDADE DE CADA SP E NÍVEL DOS ESTOQUES INTERMEDIÁRIOS

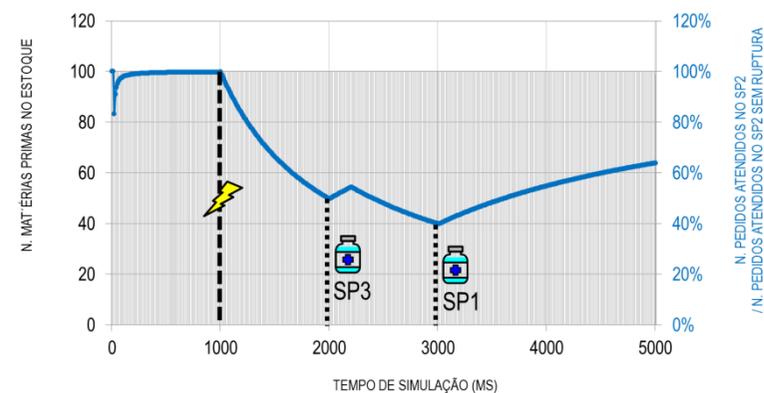
SP1

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP1
Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação

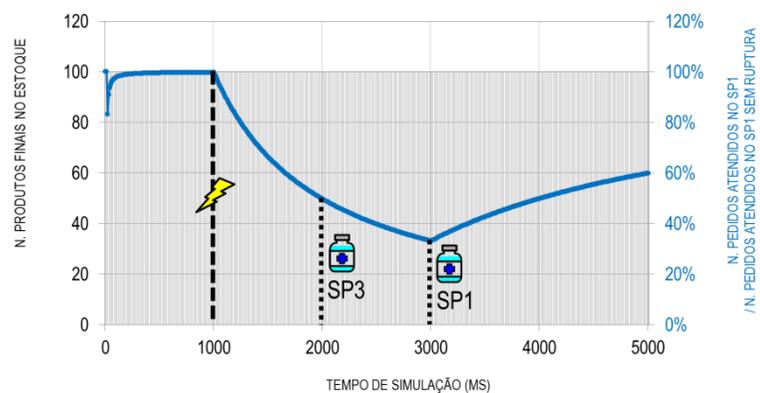


SP2

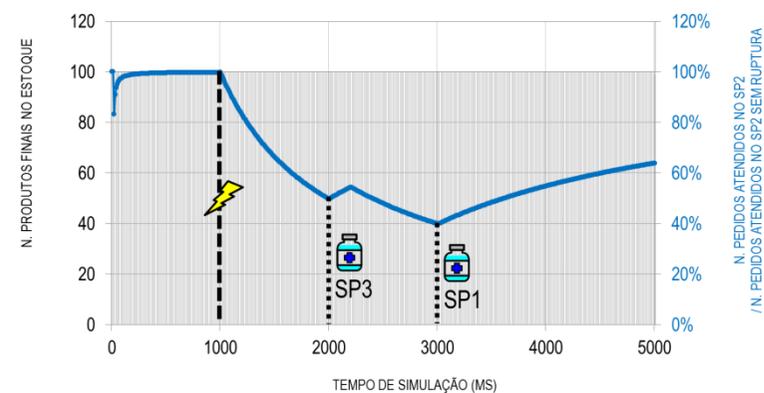
EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP2
Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação



EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP1
Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação

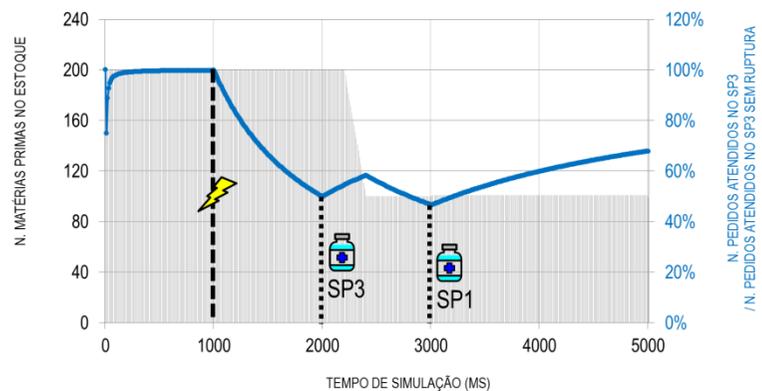


EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP2
Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação

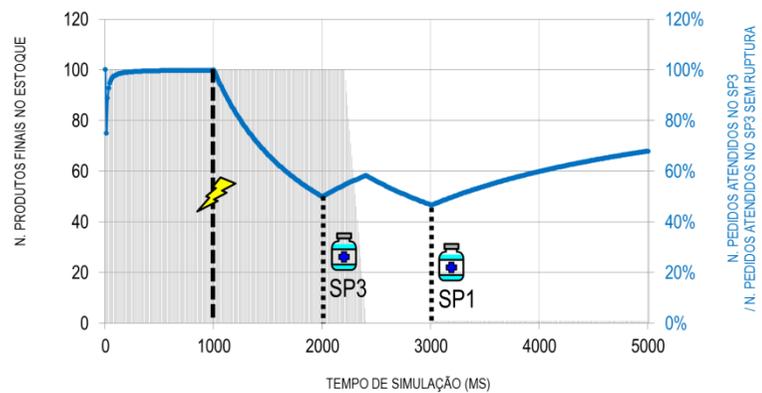


SP3

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE MATÉRIAS PRIMAS NO SP3
 Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação

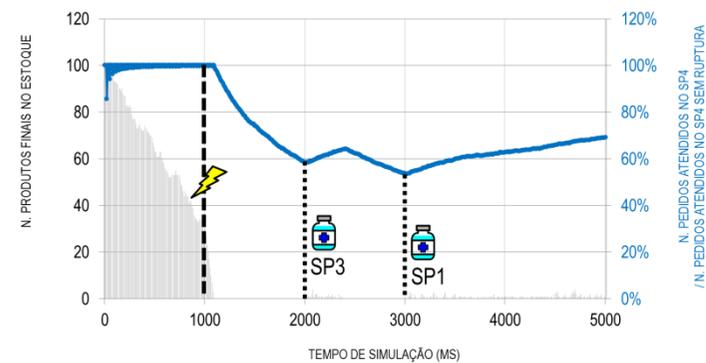


EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP3
 Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação



SP4

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP4
 Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação



SP5

EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE PRODUTOS FINAIS NO SP5
 Cenário 2: Com ruptura - Com recuperação

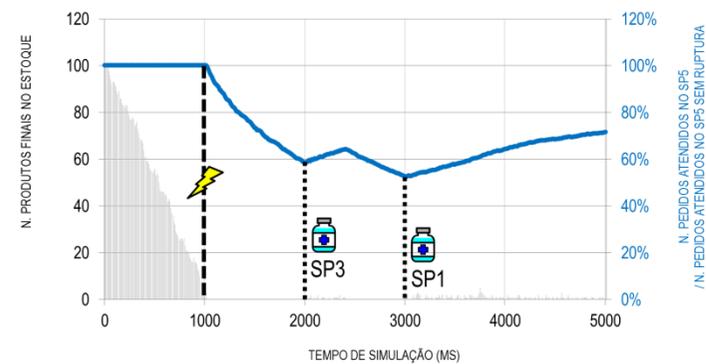


Tabela 17: Condições iniciais da PN para os cenários.

SP 1 - TIPO: MANUFATURA		SEM RUPTURA	COM RUPTURA	COM RUPT. COM REC.
Tempo das atividades	<i>Transição: Initial Delay</i>	1	1	1
SOURCE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		2	2	2
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		1 e 2	1 e 2	1 e 2
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	1	1
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	1000	1000
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	0	1
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	2000
MAKE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
MAKE		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	1	1
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	10	1000
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	0	1
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	2000
DELIVER		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	1	1
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	10	1000
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	0	1
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	2000
Previsão de ruptura do SP	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura do SP	<i>Transição: Initial Delay</i>	10	10	10

SP 2 - TIPO: MANUFATURA		SEM RUPTURA	COM RUPTURA	COM RUPT. COM REC.
Tempo das atividades	<i>Transição: Initial Delay</i>	1	1	1
SOURCE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		2	2	2
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		1 e 2	1 e 2	1 e 2
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	-	-
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-

MAKE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
MAKE		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	-	-
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
DELIVER		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	-	-
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de ruptura do SP	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura do SP	<i>Transição: Initial Delay</i>	10	10	10

SP 3 - TIPO: MANUFATURA

		SEM RUPTURA	COM RUPTURA	COM RUPT. COM REC.
Tempo das atividades	<i>Transição: Initial Delay</i>	1	1	1
SOURCE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		2	2	2
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		1 e 2	1 e 2	1 e 2
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	1	1
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	10	1000
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	0	1
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	1000
MAKE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
MAKE		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	1	1
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	10	1000
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	0	1
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	1000
DELIVER		1, 2 e 3	1, 2 e 3	1, 2 e 3
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	1	1
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	10	1000
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	0	1
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	1000
Previsão de ruptura do SP	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura do SP	<i>Transição: Initial Delay</i>	10	10	10

SP 4 - TIPO: SUPRIMENTO

		SEM RUPTURA	COM RUPTURA	COM RUPT. COM REC.
Tempo das atividades	<i>Transição: Initial Delay</i>	1	1	1
SOURCE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	-	-
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de ruptura do SP	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura do SP	<i>Transição: Initial Delay</i>	10	10	10

SP 5 - TIPO: SUPRIMENTO

		SEM RUPTURA	COM RUPTURA	COM RUPT. COM REC.
Tempo das atividades	<i>Transição: Initial Delay</i>	1	1	1
SOURCE		1	1	1
Estoque máximo	<i>Lugar: Capacidade</i>	1000	1000	1000
Estoque inicial	<i>Lugar: N. de marcas</i>	100	100	100
SOURCE		1	1	1
Previsão de ruptura	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de recuperação	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	-	-	-
Tempo para recuperação	<i>Transição: Initial Delay</i>	-	-	-
Previsão de ruptura do SP	<i>Lugar: 01 ou 00 marcas</i>	0	0	0
Tempo para ruptura do SP	<i>Transição: Initial Delay</i>	10	10	10