

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RUPTURAS DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS BASEADOS EM REDE DE PETRI

CÉLIA H. KANO, MAURICIO F. BLOS, DIOLINO J. SANTOS FILHO, FABRICIO JUNQUEIRA, PAULO E. MIYAGI

*Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos,  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP  
Avenida Professor Mello Moraes, 2231, 05508-030, Cidade Universitária, São Paulo – SP, Brasil  
E-mails: {chkano, blosmauf, diolinos, fabri, pemiayagi}@usp.br*

**Abstract**— Currently, companies need to assess their exposure to risks due to the increasing dependence on global operation with suppliers, customers and other partners, and therefore, there is great interest in developing methods for operational risks assessment and Business Continuity Plans. In this context, this paper introduces a method for modeling and simulation of global supply chains focusing on disruption and resilient practices analysis. The method considers supply chains as discrete event systems and Petri net as the graphical and mathematical formal technique to supply chain modeling and simulation. The paper presents a hypothetic supply chain to explain the method application and assumes alternative suppliers negotiation as a resilient practice.

**Keywords**— Dispersed production system, Petri net, discrete event system, supply chain disruption, business continuity plan, supply chain resilience.

**Resumo**— Atualmente, as empresas precisam avaliar sua exposição aos riscos devido à crescente dependência dela com operações globais de fornecedores, clientes e outros parceiros e, por esse motivo, existe grande interesse no desenvolvimento de métodos de avaliação dos riscos operacionais e Planos de Continuidade de Negócios. Nesse contexto, o artigo introduz um método para a modelagem e simulação das cadeias de suprimentos globais focado na análise de rupturas e práticas resilientes. O método considera as cadeias de suprimentos como sistemas a eventos discretos e a rede de Petri como a técnica formal gráfica e matemática para modelagem e simulação da cadeia de suprimento. O artigo apresenta uma cadeia de suprimentos hipotética para explicar a aplicação do método e assume a negociação com fornecedores substitutos como prática resiliente.

**Palavras-chave**— Sistema produtivo disperso, rede de Petri, sistema a eventos discretos, ruptura de cadeia de suprimentos, plano de continuidade de negócios, resiliência de cadeia de suprimentos.

### 1 Introdução

Na década de 60, 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 foi desenvolvida para a comunicação de máquinas de estado (Penha *et al.*, 2004) e 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 *et al.*, 1998; Villani *et al.*, 2007, Silva, 2013).

Considerando que a cadeia de suprimentos pode ser vista também como uma classe de SED, em comparação com outras ferramentas de modelagem, diversos trabalhos comprovam a eficácia da rede de Petri na modelagem, análise e controle da cadeia de suprimentos (Wu e Blackhurst, 2005; Tuncel e Alpan, 2010; Lam e Yip, 2012, Lu *et al.*, 2011).

Num contexto mais amplo, nota-se que o controle automático de processos e as tecnologias de auto-

mação industrial têm evoluído concomitantemente com a atuação global das organizações empresariais. Dessa forma, a fim de modelar, analisar e controlar as cadeias de suprimentos dessas empresas deve-se considerar as características e restrições atuais dessa atuação global.

Em uma pesquisa recente, o *World Economic Forum* (2013) confirmou que os benefícios da globalização têm sido acompanhados de vulnerabilidades: 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). Dessa forma, a fim de se preparar para lidar com essas vulnerabilidades, o *World Economic Forum* revelou que as empresas têm adotado processos de análise e gerenciamento de riscos. Nessa linha, em apresentação na Conferência do CSCMP (*Council os Supply Chain Management Professionals*), a empresa Intel destacou o terremoto, tsunami e a crise nuclear ocorrido no Japão em 2011 que afetou 60 fornecedores, sendo alguns deles fornecedores únicos de matérias-primas, ocasionando a ruptura de várias cadeias de suprimentos. Por fim, a Intel confirmou a necessidade de criação de um “plano de continuidade de negócios” (PCN) baseado na seleção criteriosa do site (diversificação das localidades geográficas das fábricas), redundância (replicação dos processos em mais de uma fábrica e busca de três ou

mais fornecedores por segmento), desenvolvimento dos fornecedores e a flexibilidade da capacidade produtiva das fábricas (Davies e Chai, 2014).

À medida que os clientes criam relacionamento com os fornecedores, e estes fornecedores se tornam clientes de outros fornecedores em diferentes localizações geográficas, relacionamentos colaborativos entre fornecedores-clientes (díades) são criados e conectados formam uma cadeia de suprimentos global (Greening e Rutherford, 2011). Nesse contexto, rupturas envolvem a remoção de díades como consequência de um evento crítico, de modo que, a estrutura da cadeia pós-ruptura é diferente da estrutura da cadeia pré-ruptura e o processo de adaptação inevitavelmente necessita que os atores residuais façam renegociações ou, em alguns casos, estabeleçam novos relacionamentos (Greening e Rutherford, 2011).

Devido à suposição de baixa probabilidade de ocorrência de uma ruptura e a dificuldade de prognosticá-la, as medidas de tratamento dos eventos de ruptura normalmente são ignoradas (Chopra e Sodhi, 2004). Contudo, apesar da probabilidade ser aparentemente pequena, com a globalização, as cadeias de suprimentos estão cada vez mais expostas às rupturas e os efeitos indiretos das rupturas ultrapassam os limites geográficos (Sheffi, 2005). Assim, com o objetivo de contribuir para uma melhor avaliação dos riscos e o aperfeiçoamento dos PCNs, aqui é proposto um método para 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. Essa abordagem considera as cadeias de suprimentos globais como sistemas que se comportam como sistemas a eventos discretos (SED) de modo que a rede de Petri (PN) é adotada como técnica de modelagem gráfica e matemática para descrição, análise formal e especificação das soluções de controle.

Ressalta-se que o foco aqui está nos fundamentos considerados e principais aspectos do método. Assim, um exemplo fictício, mas com as principais características operacionais e estruturas de cadeia de suprimentos global é utilizada para demonstrar o impacto pela ruptura de um fornecedor (possivelmente gerada por um terremoto, tsunami, crise nuclear, como a Intel, citada anteriormente).

Este artigo tem quatro sessões. A sessão 2 do artigo apresenta uma revisão bibliográfica dos fundamentos. Em seguida, a sessão 3 descreve o procedimento para modelagem e simulação e a sessão 4 apresenta a aplicação do procedimento para uma cadeia de suprimentos global. Por fim, a conclusão é apresentada na sessão 5.

## 2 Fundamentos

### 2.1 Perfil da ruptura

Segundo Sheffi e Rice (2005), o desempenho da cadeia de suprimentos pode ser medido pelas suas

vendas, nível de produção, rendimentos e serviço ao cliente. Considerando a ocorrência de uma ruptura na cadeia de suprimentos, o perfil de desempenho ao longo do tempo pode ser caracterizado em oito etapas (Figura 1): (1) preparação, no qual a empresa pode 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 parar as operações devidas; (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 transporte; (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, tem-se os impactos permanentes da ruptura na cadeia de suprimentos (Sheffi e Rice, 2005).

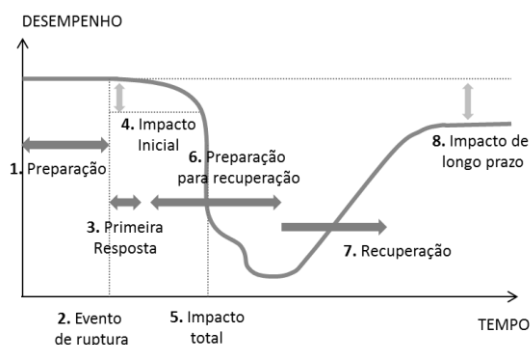


Figura 1. Perfil da ruptura numa cadeia de suprimentos (adaptado de Sheffi e Rice; 2005).

Adicionalmente, Weick e Sutcliffe (2007) afirmam que as rupturas auditam a resiliência da cadeia de suprimentos, indicando o quão flexíveis podem ser sem “quebrar” e, também afirmam que a habilidade de lidar com uma situação de crise é muito dependente das estruturas que foram desenvolvidas, ou seja, das práticas adotadas que reduzem o impacto das rupturas e que agilizam o processo de recuperação. Neste contexto, reforçando a necessidade de negociação de novos laços com fornecedores alternativos no processo de recuperação da cadeia, a pesquisa “*US CEO Survey: Creating value in uncertain times*” constatou que 90% dos empresários entrevistados consideram que criar novas alianças, parcerias e outros relacionamentos baseados na colaboração, a fim de aumentar suas respostas às mudanças na demanda está entre as principais práticas para criar resiliência contra rupturas (PricewaterhouseCoopers, 2013).

### 2.2 Sistemas a eventos discretos e rede de Petri

A rede de Petri é matematicamente descrita como uma 4-tupla:  $PN = (P;T;F;M)$  em que:  $P$  é o conjunto de elementos passivos chamados de lugares,  $T$  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 e  $M$  um vetor chamado de marcação que representa os estados discretos do sistema modelado. A definição da rede de Petri 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 rede de Petri encontra-se em Murata (1989), Miyagi (1996) ou Villani *et al.* (2007). Graficamente, os elementos básicos que formam a estrutura da rede de Petri são apresentados na Figura 2.

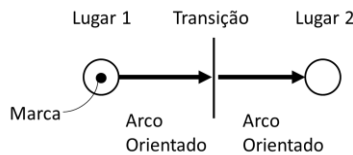


Figura 2. Elementos da rede de Petri.

### 2.3 Cadeias de suprimentos como SED

A cadeia de suprimentos está associada a sistemas produtivos (SPs) que são plantas ou unidades produtivas, que processam itens físicos a fim de se produzir bens ou executar serviços (Villani *et al.*, 2007). Assim, a cadeia de suprimentos global consiste em SPs geograficamente dispersos, que criam relacionamentos fornecedores-clientes (díades) e necessitam se comunicar e trabalhar de forma colaborativa. Entende-se por diferentes localizações geográficas: continentes, países, cidades, bairros, etc.

Além das interpretações genéricas sugeridas para as transições e os lugares da rede de Petri em Murata (1989), aqui consideram-se as seguintes interpretações específicas:

- **Transição** como eventos de transformação física (tecnológica) ou de movimentação dos bens dos sistemas produtivos e as cadeias de suprimentos;
- **Lugares** como locais onde os bens podem ser estocados ou onde as transformações físicas ocorrem. O volume máximo é definido na rede de Petri pela capacidade finita, ou seja, o número máximo de marcas ( $K$ ) que o lugar pode acomodar de uma só vez (Figura 3).

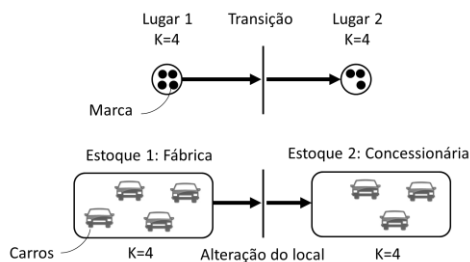


Figura 3. Interpretação da capacidade dos lugares.

- **Peso dos arcos** como a quantidade de itens movimentados ou necessária para a transformação física ocorrer (ver Figura 4). Os arcos possuem a

propriedade de peso, no qual um arco com peso  $N$  equivale a um conjunto de  $N$  de arcos em paralelo (Murata, 1989). Na ausência da indicação do peso considera-se que é unitário.

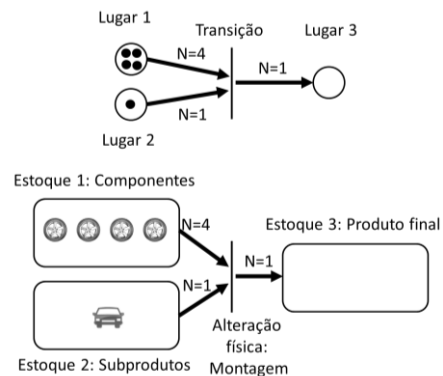


Figura 4. Interpretação dos pesos dos arcos.

- **Arco inibidor** para a definição da prioridade de ocorrência das operações da cadeia. Um arco inibidor conecta um lugar a uma transição e é representado por uma linha tracejada com um pequeno círculo na sua extremidade. O arco inibidor desabilita o disparo da transição quando esse lugar possui uma marca e permite que a transição fique habilitada se esse lugar não possui marca (Murata, 1989). No caso das operações de uma cadeia de suprimento, um evento de ruptura impede o disparo de uma transição por meio de um arco inibidor, como exemplificado na Figura 5.

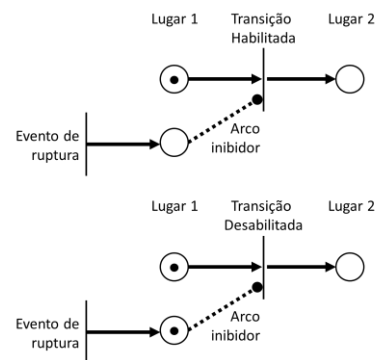


Figura 5. Interpretação do arco inibidor.

As interpretações acima indicadas são fundamentais para a análise e caracterização de situações de conflitos (decisão ou escolha), paralelismo (concorrência), sincronização e o caso específico no qual o conflito e o paralelismo podem coexistir (chamado de “confusão”).

Adicionalmente, Wild (1977) e Villani *et al.* (2007) sugerem outras interpretações para os diferentes tipos de sistemas conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Interpretação adicional para as transições e lugares.

Sistema	Lugares de entrada e saída	Transição
Manufatura	Entidades físicas	Alteração física
Transporte	Entidades físicas	Alteração do local
Suprimento	Entidades físicas	Alteração da propriedade
Serviço	Entidades físicas	Tratamento ou acomodação
Informação	Informações	Manipulação de dados

## 2.4 Production Flow Schema

O PFS (Production Flow Schema) é um grafo inspirado na rede de Petri, mas focado na descrição conceitual dos processos de um SP, ou seja, em um alto nível de abstração (Miyagi, 2006, Villani *et al.*, 2007). A ideia é que um sistema visto como um SED pode ser caracterizado com base no fluxo de itens e qualquer processo produtivo pode ser decomposto em três elementos básicos: (a) elemento ativo ou atividade; (b) elemento distribuidor e (c) arco orientado que define a relação entre os componentes anteriores. Os elementos estruturais do PFS são representados na Figura 6.



Figura 6: Elementos básicos do PFS.

O PFS está associado uma sistemática para a conversão de um modelo conceitual para um modelo funcional detalhado e comportamental como a rede de Petri, como ilustrado nos trabalhos de Fattori *et al.* (2011), Garcia Melo *et al.* (2010), Souit *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2012). Esta técnica é utilizada no procedimento proposto.

## 3 Procedimento para modelagem e simulação

Para a geração de uma representação estrutural e comportamental da cadeia de suprimentos para a avaliação do impacto nas cadeias de suprimentos após a ruptura de um sistema de manufatura e, a verificação do procedimento de recuperação por meio de práticas resilientes, introduz-se um procedimento composto por 06 etapas:

**Etapa 1: Definição do escopo da cadeia de suprimentos e de cada sistema produtivo** – Nessa etapa, os SPs são identificados no cenário 0 (de operação normal). Em seguida, as características funcionais (tipo de sistema, entradas e saídas) são identificadas e documentadas. Todas as díades que formam a cadeia de suprimento são indicadas nesta etapa. Por fim, o fluxo de material e o fluxo de informação são caracterizados.

**Etapa 2: Definição do evento de ruptura e modelagem da cadeia de suprimento** – Esta etapa é dividida em duas sub-etapas.

- **Etapa 2A: Definição do evento de ruptura e os cenários para simulação** - O evento de ruptura é especificado, bem como o(s) SP(s) impactado(s) e as consequências para o cenário 0. A prática de recuperação do desempenho da cadeia é definida. Por fim, os cenários e as métricas de desempenho são descritas.

- **Etapa 2B: Modelagem conceitual e funcional dos sistemas produtivos e da cadeia de suprimento** – A modelagem conceitual do fluxo de material e do fluxo de disponibilidade é desenvolvida e, com base no resultado obtido tem-se a tradução do modelo conceitual para um modelo funcional do fluxo de material e do fluxo de disponibilidade.

**Etapa 3: Inclusão da ruptura no modelo funcional da cadeia de suprimento** - Nessa etapa, a ruptura definida na Etapa 2A é incluída no modelo em rede de Petri.

**Etapa 4: Inclusão da prática de recuperação da cadeia no modelo funcional da cadeia de suprimento** - Nessa etapa, a prática de recuperação da cadeia definida na Etapa 2A é incluída no modelo em rede de Petri.

**Etapa 5: Verificação e validação do modelo** - Nesta etapa, o modelo em rede de Petri é verificado e validado submetendo-o inicialmente a uma análise estrutural e depois de comportamento dinâmico da cadeia de suprimentos

**Etapa 6: Coleta de informações sobre o desempenho da cadeia** - Nesta última etapa, as condições da simulação são definidas, como a marcação inicial, a quantidade de disparos das transições, etc. Por fim, os experimentos (avaliação das rupturas, mitigação dos problemas e recuperação da cadeia) são realizados e os dados obtidos devem ser devidamente avaliados.

## 4 Exemplo de aplicação

O procedimento é aplicado para uma cadeia de suprimentos global hipotética, ilustrada na Figura 7.

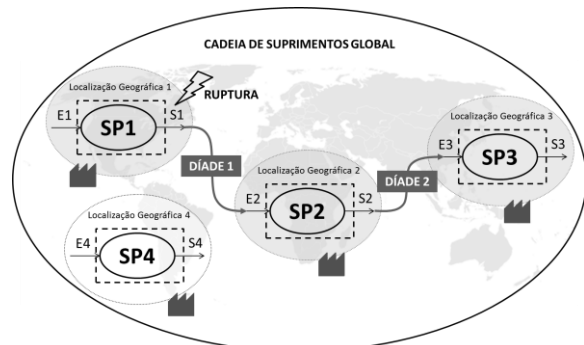


Figura 7. Esquema da cadeia de suprimentos global hipotética.

*Etapa 1: Definição do escopo da cadeia de suprimentos* – Inicialmente (cenário 0), a cadeia de suprimentos global é composta por 4 SPs (SP1, SP2, SP3 e SP4). Nesse cenário, o SP4 não possui participação na cadeia de suprimentos global, mas seus processos e os produtos (tipo e qualidade) são semelhantes aos do SP1 e, portanto, pode ser uma opção para fornecimento de materiais. As características funcionais (tipo do sistema, entradas e saídas) são identificadas e documentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características funcionais de cada entidade.

ID	Tipo de sistema	Entrada	Saída
SP1	Manufatura	Matéria prima	Componentes
SP2	Manufatura	Componentes	Produto final
SP3	Suprimento	Produto final	Produto final
SP4	Manufatura	Matéria prima	Componentes

No cenário 0, a cadeia de suprimentos global é composta por 2 díades (díades 1 e 2). A díade 1 é formada pelo SP1, responsável pelo fornecimento de componentes para seu cliente, o SP2. Analogamente, a díade 2 é formada pelo SP2, responsável pelo fornecimento de produtos finais para seu cliente, o SP3.

Por fim, o fluxo de material é definido pelo caminho percorrido pelos itens físicos (matéria primas, componentes e produtos) ao longo dos SPs. Em paralelo, o fluxo de informação consiste no fluxo de disponibilidade de recursos, que informa se o SP está disponível (ou habilitado) para uma nova produção.

*Etapa 2: Definição do evento de ruptura e modelagem da cadeia de suprimento*

*- Etapa 2A: Definição do evento de ruptura e os cenários para simulação* - Um evento de ruptura é considerado no SP1, como indica a Figura 8. O evento causa a ruptura da operação normal do SP1, impedindo o fornecimento de materiais para o seu cliente, dependendo das ações de recuperação tomada. Como citado anteriormente, a literatura reforça a necessidade de negociação de novos laços com fornecedores alternativos no processo de recuperação da cadeia. Dessa forma, após notar a falta de abastecimento, como prática de recuperação, o SP2 deve buscar novos fornecedores para o estabelecimento de uma nova relação que substitua a díade 1 para restabelecer o desempenho do cenário 0. Como opção para SP1, a díade com SP4 (díade 3) pode ser estabelecida.

Por fim, para efeitos de comparação, os cenários para a análise do desempenho da cadeia de suprimentos global são definidos e descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Descrição dos cenários.

Cenário	Ocorrência de ruptura	Ação de recuperação é estabelecida?
1	Sim	Não
2	Sim	Sim

Para a análise de desempenho da cadeia de suprimentos, a métrica de desempenho considerada é a produtividade acumulada, ou seja, o comportamento no tempo da produtividade acumulada (itens/m s).

*- Etapa 2B: Modelagem conceitual e funcional dos sistemas produtivos e da cadeia de suprimento* – Inicialmente, um modelo conceitual em PFS é criado para a representação da atividade “Processo de Execução de Pedido”. Um processo compõe-se de atividades inter-relacionadas que, executadas numa sequência determinada, agregam valor, ou seja, a saída do processo tem maior valor que as entradas do processo. Dessa forma, no nível 0 (Figura 8), o refinamento indica três macro-atividades sequenciais para o “Processo de Execução de Pedido”: o “Processo de Produção”, “Processo de Montagem” e o “Processo de Venda”. A partir deste aplicou-se a técnica de refinamento sucessivo por meio de uma abordagem *top-down* (Miyagi, 1996), apresentadas nas Figuras 9, 10 e 11.

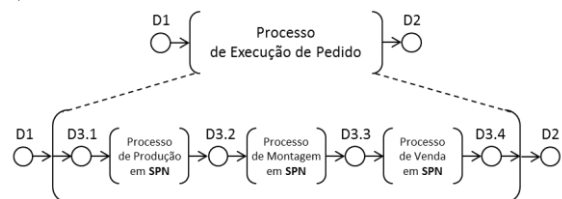


Figura 8. PFS do fluxo de material – Nível 0.

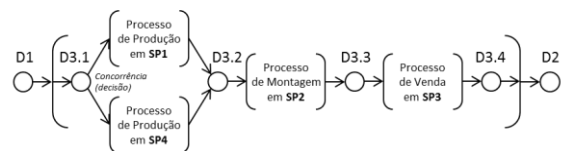


Figura 9. PFS do fluxo de material – Nível 1.

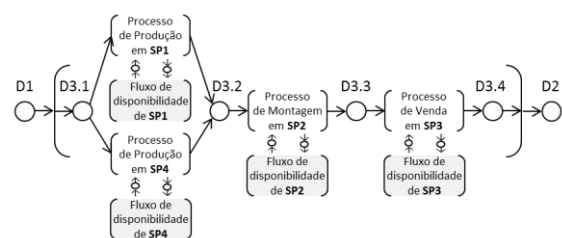


Figura 10. PFS do fluxo de material e do fluxo de disponibilidade – Nível 2.

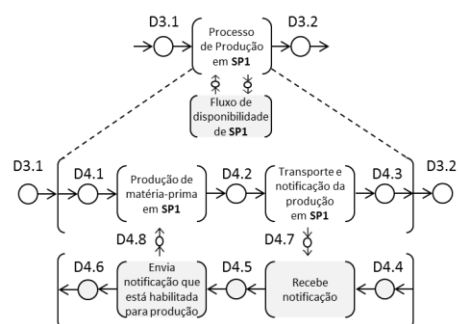


Figura 11. PFS do fluxo de material e do fluxo de disponibilidade – Nível 3.

Em seguida, a conversão para um modelo funcional em rede de Petri é feita (Figura 12) sendo que neste caso o modelo resultante foi editado no software HPSim (2013).

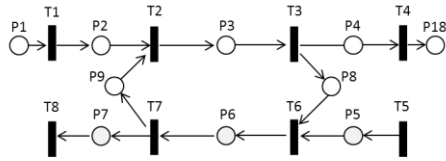


Figura 12. Modelo em rede de Petri, resultado da conversão do PFS da Figura 12.

*Etapas 3 e 4: Inclusão da ruptura e da prática de recuperação no modelo funcional da cadeia de suprimento* - Para a inclusão da ruptura no modelo,

os fluxos de disponibilidade do SP1, SP2 e SP4 devem ser considerados. Deve-se incluir a ocorrência de um evento de ruptura de forma que o lugar P9, seja desmarcado. Um arco inibidor é associado à transição T7. Em seguida, a prática de recuperação da cadeia (definida na Etapa 2A), ou seja, a negociação com um novo fornecedor (SP4) como prática de recuperação é utilizada neste exemplo de aplicação e incluída no modelo em rede de Petri (Figura 13). Dessa forma, para a recuperação, o lugar P17 é habilitado, indicando a substituição de SP1 por SP4. A habilitação da transição T37 após um certo tempo (definido no *delay* da transição T37) representa o período de procura por novos fornecedores e o estabelecimento do novo relacionamento com o fornecedor substituto.

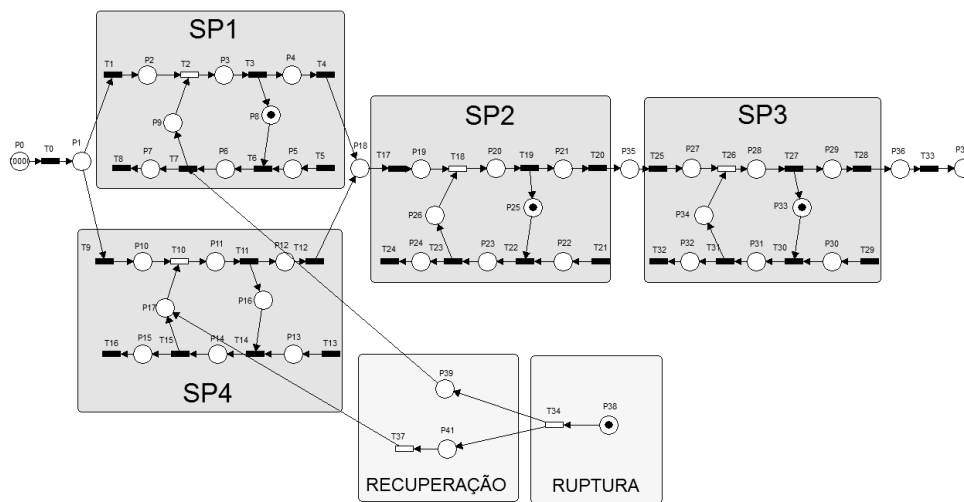


Figura 13. Inclusão da prática de recuperação no modelo.

*Etapa 5: Verificação e validação do modelo* - Nesta etapa, o modelo em rede de Petri é validado e verificado através da geração de um diagrama do espaço de estados, no qual verificam-se os estados possíveis do sistema a partir de uma marcação inicial. Através do uso do software PIPE2 (2009), gerou-se este diagrama e verificou-se os estados resultantes. Para simular e validar o comportamento dinâmico do modelo em rede de Petri, o software HPSim foi utilizado.

*Etapa 6: Coleta de informações sobre o desempenho da cadeia* - Neste exemplo, definiu-se que o incremento adotado para a evolução do tempo na simulação (*Sample Time*) é de 1 ms, o número máximo de passos é 1.000.000 e o tempo máximo de simulação é 15.000ms. As marcações iniciais e os intervalos de disparos das transições do modelo são definidos na Tabela 4. Foi associado um tempo de 2ms de atraso (*Initial Delay*) associado às transições T2, T10, T18, T26, 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 à produção, montagem e venda nos processos.

Após a simulação dos cenários, a métrica de desempenho (produtividade acumulada) foi coletada e calculada. Na rede de Petri desenvolvida, a produtividade acumulada foi calculada pela quantidade de marcas no lugar P37 (estoque de produtos finais) de SP3 e o número de *steps* da simulação.

Por fim, uma comparação é feita entre os cenários 1 e 2, ambos com a existência de um evento de ruptura. A diferença é que no cenário 1 não existe uma ação de recuperação do desempenho da cadeia e no cenário 2 existe a ação de recuperação. No cenário 1 (Figura 14) verifica-se após a ruptura, o declínio da produtividade da cadeia devido à propagação da perturbação nos SP2 e SP3. Por sua vez, no cenário 2 (Figura 15), após a ruptura, a cadeia apresenta uma fase de impacto e sua recuperação se dá no momento que todos os SPs afetados (SP2 e SP3) voltam a operar em condições normais simultaneamente. Nota-se que o perfil da curva da Figura 15 é semelhante ao perfil descrito para uma ruptura por Sheffi e Rice (2005).

Tabela 4. Condições iniciais dos modelos em rede de Petri.

Descrição	Sigla no modelo	Cenário 1	Cenário 2
Quantidade de matéria prima	P0	1000	1000
SP1	T1	0	0
	P2	0	0
	T2	2	2
	P3	0	0
	T3	0	0
	P4	0	0
	T4	0	0
	P5	0	0
	T5	0	0
	P6	0	0
SP2	T6	0	0
	P7	0	0
SP3	T7	0	0
	P8	1	1
SP4	T8	0	0
	P9	0	0
Lugares e transições auxiliares da rede de Petri	T0	0	0
	P1	0	0
	P18	0	0
	P35	0	0
	P36	0	0
Ruptura	T33	0	0
	P38	1	0
Recuperação	T34	200	200
	P39	0	0
	P41	0	0
	T37	200	0

## 5 Conclusão

O exemplo apresentado comprova que o PFS e a rede de Petri podem ser efetivamente utilizados como ferramentas gráficas formais para a modelagem do fluxo de material e o fluxo de informação de uma cadeia de suprimento global. Verifica-se que as propriedades da rede de Petri podem representar de forma adequada os estoques de produtos, as atividades em paralelo, concorrente e as prioritárias.

Quanto à simulação, as ferramentas utilizadas permitem o uso de animações para demonstrar e comprovar o funcionamento do modelo etapa por etapa. Comparativamente, o software HPSim apresenta a vantagem de gerar relatórios com as marcações passo a passo para cada disparo das transições. Complementarmente, o PIPE2 possui a vantagem de gerar análises com gráficos, como a árvore de alcançabilidade (grafo com todas as marcações possíveis da rede).

Quanto à ruptura, o método proposto permitiu verificar que o desempenho da cadeia de suprimento impactada se comporta como o perfil da ruptura proposto por Sheffi e Rice (2005). Dessa forma, o procedimento contribui para uma melhor avaliação dos riscos e o aperfeiçoamento dos PCNs.

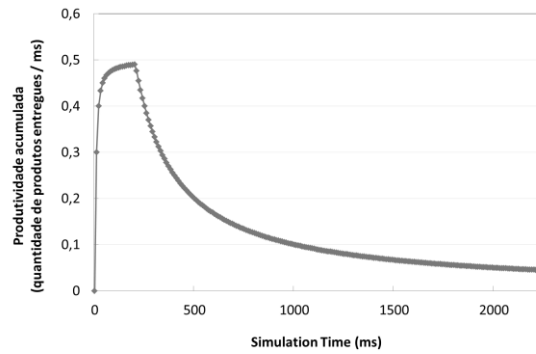


Figura 14. Produtividade acumulada do cenário 1 sem ação de recuperação da cadeia de suprimentos.

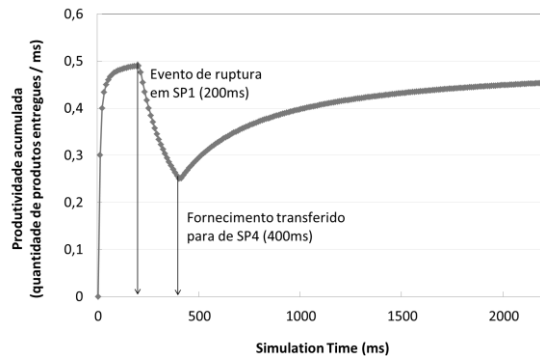


Figura 15. Produtividade acumulada do cenário 2 com ação de recuperação da cadeia de suprimentos.

Quanto à sistematização do procedimento para a modelagem e simulação, o trabalho está subsidiando o estudo da conversão automática dos modelos conceituais para funcionais (PFS/rede de Petri) e o desenvolvimento de um procedimento padrão para inserção do evento de ruptura e da prática de recuperação da cadeia.

Para trabalhos futuros, considera-se o estudo da possibilidade de retorno das díades pré-rupturas como fornecedoras da cadeia de suprimentos e o levantamento dos tipos de rupturas para estudo dos diferentes impactos que as cadeias podem sofrer.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos atuais e ex-integrantes do Laboratório de Sistemas de Automação (LSA), da Poli-USP que contribuíram com o trabalho, e ao apoio de entidades como o CNPq, CAPES e FAPESP.

## Referências Bibliográficas

- Adam, N. R., Atluri, V. e Huang, W. K., 1998. Modeling and analysis of work\_ows using Petri nets. *J. of Intelligent Information System*, 10(2), p.131-158.

- Chopra, S. e Sodhi, M. S., 2004. Managing risk to avoid supply-chain breakdown. *MIT Sloan Management Review*, 46(1), p. 53-62
- Davies, M. e Chai, D., 2014. *Managing supply chain risk at Intel*. Singapore: CSCMP Conference 2014 - Effective strategies for managing supply chain risk: assuring the viability of your supply chain. Available at: <[http://cscmp.org/sites/default/files/user\\_uploads/educational/downloads/thursday-desmond-chai-mel-davis.pdf](http://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/educational/downloads/thursday-desmond-chai-mel-davis.pdf)> [Accessed 05 March 2014].
- Fattori, C.C., Junqueira, F., Santos Filho, D.J. e Miyagi, P.E., 2011. Service composition modeling using interpreted Petri net for system integration. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Istanbul, p.696-701.
- Garcia Melo, J.I., Fattori, C.C., Junqueira, F. e Miyagi, P.E., 2010. Framework for collaborative manufacturing systems based in services. *ABCm Symposium Series in Mechatronics*, 4, p. 528-537.
- Greening, P. e Rutherford, C., 2011. Disruptions and supply networks: a multi-level, multi-theoretical relational perspective. *The Intern. J. of Logistics Management*, 22(1), p.104-126.
- HPSim, 2003. *Tool features, environments, tool description and contact information*. Available at: <<http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools/db/hpsim.html>> [Accessed 14 June 2013].
- Hunter, E., 2014. Creating value through business continuity. Singapore: CSCMP Conf. 2014 - Effective strategies for managing supply chain risk: assuring the viability of your supply Chain. Available at: <[http://cscmp.org/sites/default/files/user\\_uploads/educational/downloads/thursday-desmond-chai-mel-davis.pdf](http://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/educational/downloads/thursday-desmond-chai-mel-davis.pdf)> [Accessed 05 Mar 2014].
- Kunreuther, H., Michel-Kerjan E., e Useem M., 2013. *Corporate strategies for managing catastrophic risks in the S&P 500: linking intuitive and deliberative thinking*. Available at: <[http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/CorpStrategiesForManagingCatRisksInP500\\_WhartonRiskCtr\\_2013Nov.pdf](http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/CorpStrategiesForManagingCatRisksInP500_WhartonRiskCtr_2013Nov.pdf)> [Accessed 22 Febr 2014].
- Lam, J.S.L. e Yip, T.L., 2012. Impact of port disruption on supply chains: a Petri net approach. *Computer Logistics*, 7555, p. 72-85.
- Lu, Q., Wu, T. e Zhang, X., 2011. Petri-net based applications for supply chain management: an overview. *Intern. J. of Production Research*, 49(13), p. 3939-3961.
- Miyagi, P. E., Junqueira, F., Garcia Melo, J. I. e Santos Filho, D. J., 2009. Internet based manufacturing and disperse productive systems. In: *Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications (DINCON)*, Bauru, SP.
- Miyagi, P.E., 1996. *Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- Murata, T., 1989. Petri nets: properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), p.541-580.
- Penha, D.O., Freitas, H.C. e Martins, C.A.P., 2004. *Modelagem de Sistemas Computacionais usando Redes de Petri: aplicação em projeto, análise e avaliação*. Available at: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/erirjes/2004/001.pdf>> [Accessed 03 April 2010].
- PIPE2, 2009. *Platform Independent Petri net Editor 2*. Available at: <<http://pipe2.sourceforge.net/>> [Accessed 14 June 2013].
- PricewaterhouseCoopers, 2013 *US CEO Survey: creating value in uncertain times*. PwC.
- Sheffi, Y. e Rice, J. B., 2005. A supply chain view of the resilient enterprise. *MIT Sloan Management Review*, 47(1), p. 41-48.
- Sheffi, Y., 2005. *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*. Cambridge: The MIT Press.
- Silva, M., 2013. Half a century after Carl Adam Petri's Ph.D. thesis: A perspective on the field. *Annual Reviews in Control*, 37, p. 191-219.
- Silva, R.M.; Junqueira, F.; Santos Filho, D.J. e Miyagi, P.E., 2012 Modelling of holonic manufacturing control systems considering reconfiguration and timing constraints. *XIX Congr. Bras. de Automática (CBA)*, Campina Grande, p.1100-1105.
- Simchi-Levi, D., Kamisky, P. e Simchi-Levi, E., 2010. *Cadeia de Suprimentos, projeto e gestão: Conceitos, estratégias e estudos de caso*. 3a ed. Porto Alegre: Bookman.
- Souit, S.; Junqueira, F.; Santos Filho, D.J.; e Miyagi, P.E., 2012 Orquestração de sistemas produtivos dispersos. *XIX Congr. Bras. de Automática (CBA)*, Campina Grande, p.2627-2633.
- Tuncel, G. e Alpan, G., 2010. Risk assessment and management for supply chain networks: a case study. *Computers in Industry*, 61, p. 250-259.
- Villani, E., Miyagi, P. E. e Valette, R., 2007. *Modelling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems: a Petri net approach*. Springer.
- Weick, K. E. e Sutcliffe, K. M., 2007. *Managing the unexpected: Resilient Performance in an Age of Uncertainty*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc..
- Wild, R., 1977. *Concepts for Operations Management*. John Wiley & Sons.
- World Economic Forum, 2013. *Global Risks 2014 – Ninth Edition*. Geneva: World Economic Forum.
- Wu, T.T. e Blackhurst, J., 2005. A methodology for supply chain synthesis and disruption analysis. *Intern. J. of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*, 9(2), p. 93-105.