

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Rodrigo Bobrow

Rodrigo Yuji Ide

**Modelagem e Análise de Cadeias de Suprimentos em  
Sistemas de Distribuição de Cargas Aéreas**

São Paulo

2015

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Rodrigo Bobrow

Rodrigo Yuji Ide

## **Modelagem e Análise de Cadeias de Suprimentos em Sistemas de Distribuição de Cargas Aéreas**

Monografia apresentada no Departamento de Engenharia  
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título de  
Engenheiro. Área de Concentração: Engenharia  
Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo

2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

--

### Termo de Originalidade:

Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto do nosso próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada.

---

Rodrigo Bobrow

---

Rodrigo Yuji Ide

## Resumo

Em um contexto de crescente globalização e desenvolvimento econômico, as redes de organizações que colaboram em um processo para obter recursos e convertê-los em serviços e produtos estão se tornando cada vez mais complexas. Este fenômeno aliado ao aumento pela busca de vantagens competitivas por parte das empresas levam elas a buscarem uma distribuição geográfica de suas instalações. Esta crescente internacionalização das relações entre companhias na composição de cadeias de suprimentos, elevam a importância e a dependências delas em torno do transporte aéreo. Devido a esta importância do transporte e distribuição de cargas aéreas, as empresas devem estar atentas às condições de risco e vulnerabilidades desta forma de movimentação de carga. Neste contexto, o trabalho apresenta um estudo de uma cadeia de suprimentos de distribuição de cargas aéreas vista como um sistema a eventos discretos. O estudo é feito através do uso de técnicas como a Rede de Petri e de Sistemas Multiagentes.

**Palavras-chave:** Cadeia de Suprimentos, Sistema a eventos discretos, Transporte aéreo, Rede de Petri, Distúrbio e ruptura de cadeia de suprimentos de transporte aéreo.

## Abstract

In a world where globalization and economic development are ever growing in our present lives, the organization networks that cooperate in processes to obtain resources and convert them in services or products are growing more and more complex. This phenomenon enhanced by the increase in the search for competitive advantages that is made by industries, leads them to looking for a global distribution of their enterprises. Added to the growing internationalization of the relationships between industries, their dependence to the air transportation sector grows, making it a more relevant sector. Due to this importance of the sector, companies must be aware of the risks and vulnerabilities involved in this type of transportation. In this context, the work presents study of an air cargo distribution supply chain network seen as a system of discrete events, using techniques such as Petri Net and Multi Agent Systems.

**Keywords:** Supply Chain, System of discrete events, Air cargo transportation, Petri Net, Air cargo supply chain disturbance and disruption.

## Sumário

1. Introdução.....	7
1.1 Objetivo.....	11
1.2 Organização do Texto .....	11
2. Cadeia de suprimentos .....	12
2.1 Rupturas e distúrbios .....	13
3. Contexto atual do transporte de carga aérea.....	14
3.1 Processo de importação e exportação aérea no Brasil.....	17
3.2 Dinâmica e características do transporte aéreo .....	19
4 Métodos e ferramentas para modelagem.....	22
4.1 Sistemas a Eventos Discretos.....	22
4.2 Rede de Petri (RdP) .....	23
4.2.1 Formalização .....	23
4.3 PFS/RdP .....	25
4.4 Metodologia de modelagem.....	27
4.5 Ferramenta para modelagem e análise de RdP.....	29
4.6 Sistema Multiagentes .....	29
5. Modelagem e Análise.....	31
5.1 Definição do objeto de estudo.....	31
5.2 Modelagem em RdP.....	33
5.2.1 Etapa 1: Definição do escopo do sistema. ....	34
5.2.2 Etapa 2: Definição das atividades afetadas pelos eventos de distúrbio e ruptura.....	35
5.2.3 Etapa 3: Desenvolvimento do modelo conceitual e do modelo funcional. ....	37
5.2.4 Etapa 4: Verificação e validação do modelo .....	42
5.2.5 Etapa 5: Coleta de dados e análise do desempenho do modelo.....	42
5.2.6 Etapa 6: Desenvolvimento de cenários em MAS .....	45
5.3 Análise dos cenários.....	49
6. Conclusão.....	54
7. Referências Bibliográficas .....	57

## 1. Introdução

O ímpeto dos administradores de grandes organizações em aumentar o lucro e diminuir os custos de suas empresas fez com que eles adotassem várias iniciativas referentes às criações de cadeias de suprimentos, tanto de produtos físicos como de informações, recursos financeiros, etc, criando uma complexa rede de empresas (TANG, 2006). Segundo Chen e Ong (2013), uma cadeia de suprimentos pode ser definida como uma rede de organizações que coordenam e colaboram em um processo para obter recursos, convertê-los em serviços e produtos e distribuí-los para os varejistas e consumidores finais. Neste cenário de integração intensa entre as empresas e a consequente maior interdependência entre elas, é importante que se tome um cuidado especial, na medida em que, um acontecimento em um determinado local, como por exemplo, uma ruptura ou um distúrbio na cadeia devido a um desastre natural, pode afetar toda uma sequência de processos dentro da rede formada. De acordo com Chen, (2013), distúrbios e rupturas em uma cadeia de suprimentos podem causar grandes prejuízos nos diversos níveis em que ela atua, desde o produtor inicial, passando pelos intermediários e chegando ao consumidor final.

De acordo com artigo publicado pela Universidade da Pennsylvania, Wharton School (2006), a ruptura é um evento ou ocorrência que implica na quebra do fluxo de material, de informação ou financeiro, ou seja, é algo que impede o seguimento das operações necessárias para a distribuição do suprimento. Essas ocorrências podem acarretar não só em um atraso na entrega de suprimentos, devido ao tempo de recuperação da cadeia, mas também, em caso de suprimentos perecíveis, por exemplo, na perda destes. Neste contexto, enquanto os distúrbios podem ser fruto de alterações temporárias na cadeia, como por exemplo alterações da demanda, as rupturas são ocasionadas devido a ocorrências muito difíceis de serem previstas como desastres naturais, guerras, atos terroristas, instabilidade econômica, política e social, e falência do fornecedor (CHOPRA, MEINDL, 2007; CRAIGHEAD, BLACKHURST, RUNGTUSANATHAM, HANDFIELDS, 2007; HENDRICKS, SINGHAL, 2005).

Exemplos de rupturas em cadeias de suprimentos com graves consequências para empresas são o tsunami ocorrido no Japão em 2011 que afetou a indústria automobilística mundial, a erupção vulcânica ocorrida na Tailândia em 2011 que afetou as empresas fabricantes de computadores que dependiam de discos rígidos advindo deste país (CHOPRA, SODHI, 2014), o incêndio em uma planta de semicondutores da Philips em 2000 que afetou principalmente as empresas Nokia e Ericsson, e o terremoto em Taiwan em 1999 que afetou o fornecimento de componentes para a fabricação de computadores da Apple e Dell (TANG, 2006).

Apesar do conhecimento das graves consequências que uma ruptura em sua cadeia de suprimentos pode acarretar para elas, muitas empresas pouco fazem a respeito de forma a mitigar tais efeitos negativos (TANG, 2006). Segundo Chopra e Sodhi (2014), esta dualidade entre a ciência dos graves problemas referente às rupturas e a paralisia frente a eles se deve ao fato de que para que estes impactos negativos sejam minimizados, deve-se abrir mão da eficiência na redução de custo, tanto buscada pelos líderes das grandes corporações. Um outro importante fator considerado para tal comportamento é a crença de que tais eventos que causam rupturas nas cadeias possuem uma baixa probabilidade de ocorrer, não sendo possível a justificativa de uma alocação de gastos nesta área (TANG, 2006).

Segundo Pochard (2003), existem diversas maneiras e procedimentos através dos quais, uma empresa pode se prevenir ou ao menos estipular os prejuízos que uma quebra na cadeia de suprimentos pode ocasionar para ela, isto depende do tipo da ruptura e do nível de preparo da empresa.

Dentro desse contexto, o sistema de distribuição de cargas aéreas representa uma parte específica da cadeia de suprimentos, onde atua como importante meio de transporte rápido entre os diferentes países em uma cadeia de suprimentos global. Destaca-se que o transporte aéreo movimentava cerca de 30% em valor do comércio mundial, equivalente a 1,9 trilhões de dólares por ano, e tem papel fundamental na forma globalizada com que a economia se desenvolve hoje (THE INTERNATIONAL AIR CARGO ASSOCIATION, 2006). Artigo divulgado pela Boeing em 2014 (BOEING, 2014),

projeta um crescimento de mais de 100% ao final dos próximos 20 anos, passando de 200 bilhões de RTKs para 512,3 bilhões de RTKs, onde RTK representa a quantidade de tonelada transportada por quilômetro e é um importante indicador relacionado com a receita das empresas aéreas, devido ao fato de que quanto mais carga ela transportar, maior será a receita proveniente do frete.

Além deste importante papel, outros fatores que corroboram a importância do transporte aéreo são, segundo um artigo divulgado pela ATAG (AIR TRANSPORTATION ACTION GROUP, 2005), o fato dele empregar muitas pessoas (cerca de 13,5 milhões de empregos, diretos e indiretos), de ser um componente vital no comércio mundial, representar o catalisador do crescimento econômico, de proporcionar uma integração mundial e de regiões com acessibilidade limitada, de ter influência, em média, de cerca de 25% das vendas das empresas, de impulsionar o turismo já que cerca de 40% do turismo internacional é feito pelo ar.

Dessa forma, um distúrbio e mais contundentemente uma ruptura relacionada com o sistema de transporte aéreo afeta de forma significativa as cadeias de suprimento, além de ter impacto em diversas outras aéreas. Adicionalmente, é uma atividade relativamente sensível a distúrbios e rompimentos devido ao contexto envolvido, isto é, sensibilidade às condições climáticas, tráfego intenso entre as principais metrópoles, disponibilidade de equipamento (aeronave e aeroporto) relativamente sofisticado, etc. o que reforça a importância de se entender não só a estrutura, mas o comportamento dinâmico do sistema de transporte aéreo e suas limitações.

Em geral, são considerados distúrbios todos casos que apresentam maior probabilidade de ocorrer e que do ponto de vista prático resultam em atrasos do voo (CLAUSEN et. al., 2010). As rupturas em um contexto de transporte aéreo por sua vez estão relacionadas com a impossibilidade de realização do voo programado.

De acordo com AhmadBeygi et al. (2010), os atrasos de voos cresceram substancialmente desde 2003, o que gerou um aumento de 7,7 bilhões de dólares dos custos para a indústria aérea americana em 2006. Dados mais recentes divulgados pelo

*Bureau of Transportation Statistics* (2015) mostram que em 2014, 21,72% dos voos atrasaram, contra 16,48% em 2012, e 2,52% foram cancelados, contra 2,28% dois anos atrás. Segundo a empresa Martins (2015), devido ao fato da maioria dos transportes de carga realizada pelo setor aéreo ao redor do mundo serem feitos em conjunto com o transporte de passageiros, ou seja, as cargas em geral são transportadas em voos comerciais junto com a bagagem dos passageiros (informação verbal)<sup>1</sup>, estes atrasos afetam também a entrega de carga por parte da companhia aérea, o que compromete toda a cadeia de suprimentos em que este transporte está inserido. Como por exemplo, a falta de componentes para a manufatura de um determinado produto devido ao atraso do voo que faz o transporte do item.

No que se refere ao transporte de carga aérea, há trabalhos que focam no estudo da estrutura e da dinâmica do sistema de transporte aéreo, assim como na administração do sistema frente à ocorrência de rupturas e distúrbios. Zhu et. al. (2000) propõem um modelo que otimiza o uso do modal aéreo para a entrega da carga planejada. Kohl, Larsen, Larsen, Ross e Tiourine (2007) adotam uma abordagem onde os principais “agentes” são a aeronave, sua tripulação e a carga transportada, de modo que, monitorando-os de forma eficiente, visa-se estudar soluções para aumentar a eficiência operacional do sistema, mesmo com possíveis ocorrências de distúrbios e rupturas. AhmadBeygi et al. (2010) apresenta uma solução para diminuir a propagação de atraso nas operações, sem qualquer aumento de custos planejados. Tang et al. (2008) propõem um modelo em que são integradas as informações relacionadas a passageiros, cargas e voos programados, e os dados da maior companhia de Taiwan são utilizados para comprovar a eficiência e os bons resultados gerados pelo modelo.

As pesquisas acima somado aos estudos encontrados na base do *ScienceDirect* revelam que boa parcela das empresas áreas de grande importância do setor de transporte aéreo são alvos de estudo. Entre os trabalhos desenvolvidos estão estudos de componentes que compõem a complicada malha aérea, e modelos que otimizam as rotas dos aviões e a integração entre as companhias para que o “caminho ótimo” seja

---

<sup>1</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

determinado. Apesar disto, trabalhos que mostrem as consequências dos eventos de ruptura e distúrbios sobre o personagem final da cadeia de suprimentos são escassos.

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é modelar e analisar as cadeias de suprimentos em sistemas de distribuição de cargas aéreas a fim de entender melhor os efeitos de distúrbios e rupturas apresentadas por elas e propor uma forma de medição destes.

## 1.2 Organização do Texto

O capítulo 2 apresenta uma definição de cadeia de suprimentos globais, fornece alguns exemplos de cadeias existentes. Em seguida, o capítulo descreve a diferença entre distúrbio e ruptura, classifica-os como eventos que podem impactar as relações presentes na cadeia de suprimentos e fornece exemplos de cada evento no contexto do transporte aéreo.

O capítulo 3 apresenta a dinâmica e as características relevantes do sistema de distribuição de carga aérea, assim como seu contexto atual.

O capítulo 4 apresenta a rede de Petri (RdP), técnica formal aqui utilizada na modelagem e análise da cadeia de suprimentos, e o PFS (*Product Flow Schema*), técnica de modelagem *top-down* utilizada na concepção e detalhamento do modelo conceitual. Em seguida, o capítulo descreve a metodologia utilizada na construção/edição dos modelos das cadeias de suprimentos em RdP. Por fim, apresenta-se a abordagem multiagentes (MAS), utilizada na concepção de cenários quando da ocorrência de distúrbios ou rupturas, e a ferramenta utilizada para estudo destes cenários.

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso de transporte aéreo em que é aplicado a metodologia de modelagem em RdP e a partir dele, é desenvolvido um estudo com base na abordagem de multiagentes que possibilita a avaliação dos impactos dos eventos de ruptura e distúrbio sobre as condições de armazenamento da carga nos locais envolvidos, e da entrega ao seu destino final.

Por fim, o capítulo 6 apresenta observações finais do trabalho realizado, as conclusões e reflexões para trabalhos futuro.

## 2. Cadeia de suprimentos

De acordo com Mentzer et al. (2001), a cadeia de suprimentos pode ser definida como um conjunto de três ou mais entidades, podendo ser organizações ou pessoas, diretamente envolvidas e que colaboram em um fluxo de duas vias de produtos, serviços, finanças, e/ou informações de empresas para clientes. Este relacionamento colaborativo também é conhecido como “díade”.

Um exemplo de cadeia de suprimentos é citado em Hafeez et al. (1996) em que é apresentado uma cadeia de suprimentos da indústria de aço composta de um sistema descentralizado em que uma companhia A é responsável pela transformação do metal bruto em metal utilizável, e outras duas empresas B e C são responsáveis por trabalhar este metal, transformando-o em produtos finais. Além delas, está presente uma outra empresa responsável pelo abastecimento alternativo de metal utilizável para B e C em caso de problemas com A. A relação entre essas companhias afim de formar uma cadeia de suprimentos são de forma que A é fornecedora única para B e a principal fornecedora de C, dessa forma, as condições operacionais de A, B e C interferem diretamente no fluxo de materiais, informações, finanças, etc. Outro exemplo de cadeia de suprimentos é citado no trabalho de Leinbach et al. (2003), em que é descrito a importância do transporte aéreo na distribuição dos componentes eletrônicos no sudeste asiático.

Um exemplo de cadeia de suprimentos genérica é apresentado na Figura 1 (os círculos em azul são os centros de distribuição local, o círculo em amarelo é o fornecedor de matéria prima e os círculos em vermelho são as fábricas).



Figura 1 – Exemplo de diagrama de uma cadeia de suprimentos genérica.

O presente trabalho considera as cadeias de suprimentos globais compostas por empresas localizados em diferentes partes do mundo, responsáveis por diferentes partes dos processos, de forma que parte significativo do transporte entre as diferentes localizações é realizado por meio aéreo. Assim como em Kano (2015), estas empresas criam relacionamentos colaborativos do tipo fornecedor-cliente (“díades”), formando uma cadeia de suprimentos global, como ilustra a Figura 1.

## 2.1 Rupturas e distúrbios

Em Kano (2015), define-se que ao sofrer um evento adverso, a cadeia de suprimentos enfrenta um cenário caracterizado pela queda de desempenho, acúmulo de inventário, custos inesperados, restrição do crescimento e dos lucros e redução do mercado atendido. Este evento adverso, pode ser classificado em dois tipos: distúrbios e rupturas. Dessa forma, é válido ressaltar a diferença entre estes dois tipos de eventos.

Weick e Sutcliffe (2007) definem distúrbio como um evento adverso e inesperado, que envolve a adaptação da cadeia de suprimentos de modo que a estrutura dela não se altera, ou seja, não há rompimento da “díade” (GREENING, 2011). Podem ser considerados exemplos de distúrbio em sistema de transporte aéreo os atrasos do voo devido a problemas com a tripulação e/ou manutenções não programadas, desvios não permanentes de rota decorrente de problemas climáticos, etc.

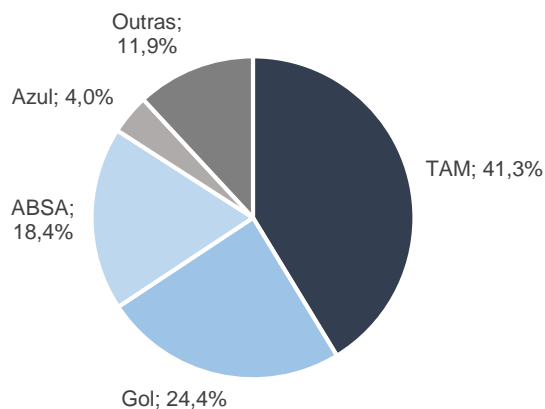
A ruptura indica a quebra na conexão entre produtores e/ou distribuidores com o resto da cadeia, ou seja, há remoção temporária ou permanente da “díade”. Exemplos de ruptura em sistema de transporte aéreo são desastres naturais como terremotos que impossibilitem o uso de determinado aeroporto, obrigando a empresa a mudar drasticamente a rota de transporte e impossibilidade de embarque da carga devido a alteração da legislação local ou internacional ou outros motivos, o que impede que o fornecedor entregue o item desejado.

### 3. Contexto atual do transporte de carga aérea

Apesar do trabalho considerar o sistema de transporte aéreo geral, destaca-se o caso brasileiro para detalhamento das principais características dos processos envolvidos. Para se entender o transporte de cargas como é hoje, é importante rever a história do transporte aéreo. O transporte aéreo brasileiro teve início com a fundação da empresa VARIG em 7 de maio de 1927, entretanto, de acordo com Montilha (2007) e Beting (2007), o setor da aviação voltado especificamente para cargas começa a tomar forma no Brasil apenas na década de 90. Na Europa, este fenômeno acontece duas décadas antes. Foi também na década de 90 que foram criadas empresas como TNT/SAVA, Digex Cargo, TCB, ABSA e Brasmex, que eram destinadas apenas ao transporte aéreo de carga e não de passageiros.

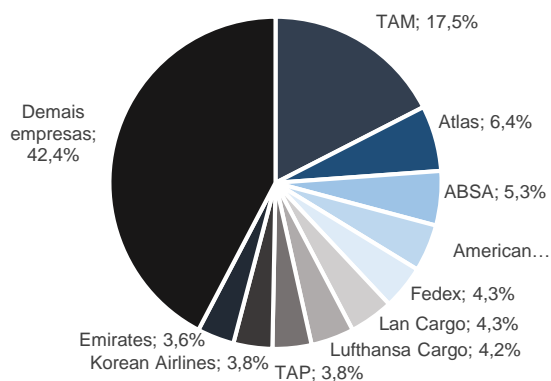
O transporte de cargas brasileiro e as empresas que fazem parte dele, está atualmente, por diversos motivos, sejam eles econômicos ou de outro viés, muito diferente da época em que foi criado. Para uma visualização do mercado e de seu funcionamento nos dias de hoje, ele pode ser dividido entre internacional e brasileiro.

O mercado doméstico transportou, em 2013, 408.620 toneladas e tem sua distribuição entre as empresas aéreas conforme a Figura 2:



**Figura 2- Participação das principais empresas na quantidade de carga transportada – Mercado brasileiro 2013 (AEROMAGAZINE, 2014)**

O mercado internacional transportou, em 2013, 777.600 toneladas de acordo com da ABEAR, e tem sua distribuição entre as empresas aéreas ilustrada na Fig.3:

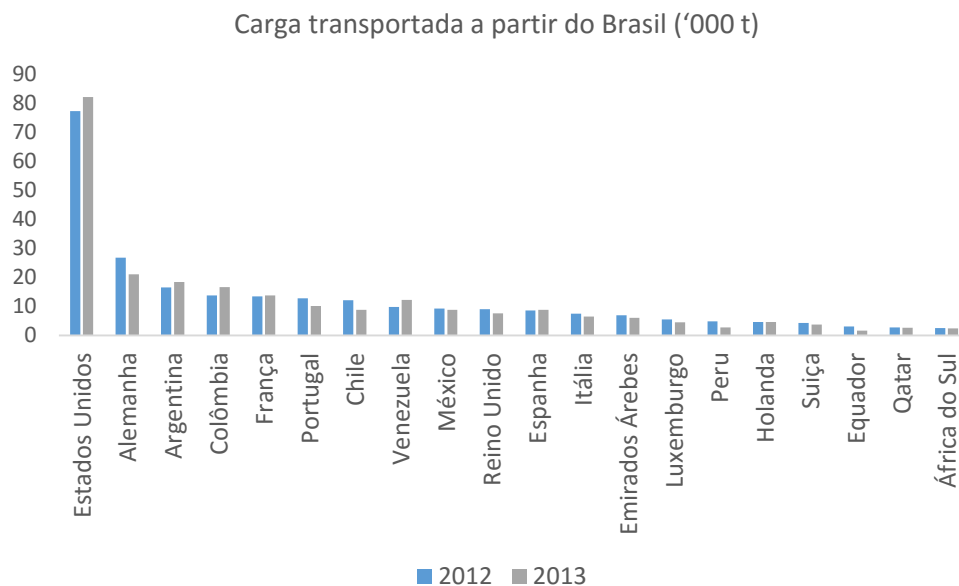


**Figura 3 - Participação das principais empresas na quantidade de carga paga transportada - Mercado internacional 2013 (AEROMAGAZINE, 2014)**

Ainda de acordo com ABEAR e Aeromagazine (2014), as maiores importações realizadas pelo Brasil foram feitas da América do Norte (202.000 toneladas), Europa (171.000 toneladas) e América do Sul (48.000 toneladas). Já as exportações foram

distribuídas da seguinte forma: Europa (94.000 toneladas), América do Norte (89.000 toneladas) e América do Sul (48.000 toneladas).

Na Figura 4 e Figura 5 têm-se os dados das principais rotas Brasil-Exterior e Exterior-Brasil respectivamente, com a quantidade de carga transportada no eixo vertical:



**Figura 4 - Quantidade de carga paga transportada nas 20 principais rotas internacionais a partir do Brasil - 2012 e 2013 (AEROMAGAZINE, 2014)**

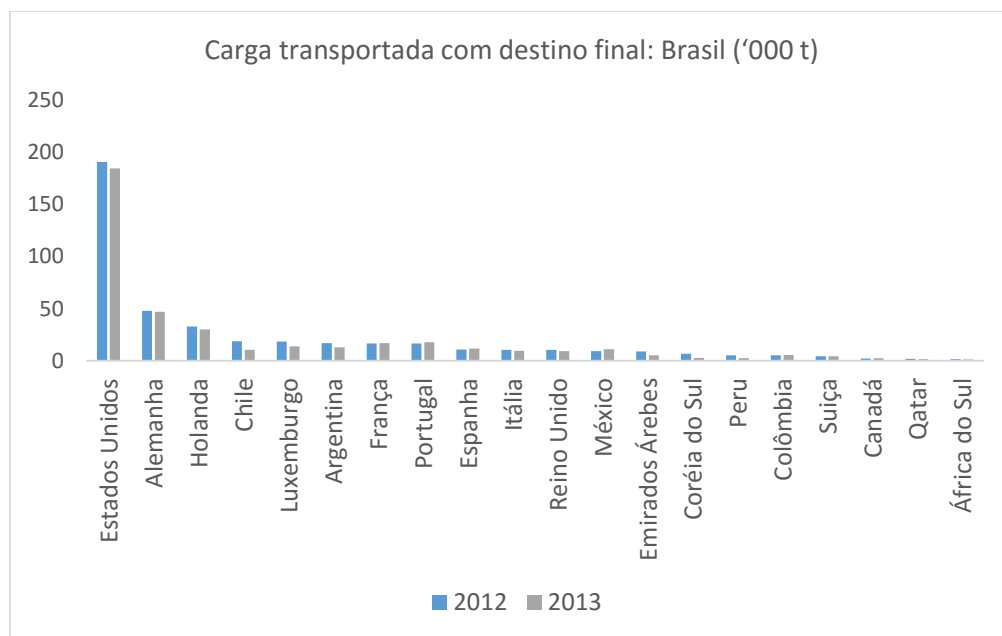


Figura 5 - Quantidade de carga paga transportada nas 20 principais rotas internacionais com destino final o Brasil - 2012 e 2013 (AEROMAGAZINE, 2014)

Tendo como referência mais uma vez as duas fontes citadas anteriormente, apenas 20% da capacidade (em peso) para transporte de cargas é utilizada, o que permite afirmar que o setor tem muito espaço para crescer. Esta observação é considerada válida para praticamente todos os países considerados em desenvolvimento.

### 3.1 Processo de importação e exportação aérea no Brasil

O sistema de transporte aéreo no contexto de mercado global envolve necessariamente importação e exportação de bens que devem seguir a legislação vigente de cada país. Para efeito de exemplificação, apresentam-se aqui os procedimentos de importação e exportação de carga conforme a legislação brasileira. Estes procedimentos são relevantes, pois estão intrinsecamente envolvidos nas atividades de transporte aéreo dentro de uma cadeia de suprimentos com empresas de diferentes países.

Os processos de exportação e importação são controlados e regulados por entidades governamentais como a Infraero e a Receita Federal no caso do Brasil. A seguir o resumo dos procedimentos para a realização de cada um desses processos e de seu funcionamento.

Para realizar exportação, devem-se seguir alguns passos, conforme o documento oficial do Ministério das Relações Exteriores intitulado Exportação Passo a Passo (2012).

- Transporte da carga para o aeroporto (de saída do país)
- Entrega da documentação da carga para o processamento por parte da Receita Federal.
- Após a verificação da documentação, a carga deve ser paletizada e transportada para o avião.

Analogamente ao processo de exportação, os passos a serem seguidos para importação estão resumidos do documento oficial da INFREAERO intitulado Guia Infraero Cargo (3ª edição) são:

- Chegada da aeronave (entrada da carga no país)
- Desembarque do pallet com a carga e conferência pela Receita Federal
- Após a conferência, despaletização da carga e envio para armazenagem
- Após vistoria aduaneira a carga é liberada para seu destinatário

Os procedimentos apresentados envolvem atividades e situações com risco de ocorrência de distúrbios e rupturas devido a fatores externos da díade inicialmente considerada (fornecedor-cliente), isto é, entre a entidade que envia o produto e a entidade que recebe o produto, uma série de outras entidades são envolvidas e, que afetam decisivamente: a disponibilidade de espaço no aeroporto para recepção da carga, a disponibilidade do serviço de recepção de documentos por parte da Receita Federal, a disponibilidade do serviço de paletização da carga e seu embarque no avião, a disponibilidade do avião, o atendimento às condições para partida do avião, as condições

para completar o voo programado, a disponibilidade ao aeroporto para aterrissagem do avião, a disponibilidade do serviço de desembarque do pallet, a disponibilidade do serviço de conferência por parte da Receita Federal, a disponibilidade do serviço de despaletização e armazenagem da carga, a disponibilidade do serviço de vistoria aduaneira.

Quando se trata de transporte dentro de um mesmo país, evidentemente o procedimento acima é mais simples, mas ainda envolve atividades e situações com risco de ocorrência de distúrbios e rupturas.

### 3.2 Dinâmica e características do transporte aéreo

O procedimento descrito acima é apenas parte de um todo que envolve outros processos, que juntos caracterizam a dinâmica do transporte aéreo. Feng et al. (2015) descreve em seu trabalho o processo de transporte de carga aérea, que envolve um conjunto de serviços que transportam a carga de sua origem até seu destino final. Esse movimento é realizado por meio dos seguintes personagens, o remetente, o despachante, o transportador rodoviário, a companhia aérea e o destinatário. As relações entre eles são dadas de maneira que cada dois personagens formam uma relação fornecedor-cliente, o que gera a sequência: o remetente deseja mandar um certo produto para um determinado lugar no planeta de acordo com alguns critérios como custo e qualidade do serviço de transporte, dessa forma, ele contrata um despachante que atua como um intermediário entre o remetente e a companhia aérea. Neste cenário, a companhia aérea é responsável por receber a carga, armazená-la, transportá-la, carregá-la e descarregá-la do avião e administrar a capacidade de transporte de avião, ou seja, mensurar quanto de carga, fora a bagagem dos passageiros é possível transportar; o serviço de transporte terrestre antecede e precede o transporte aéreo. Por fim, o destinatário recebe a mercadoria. Segundo a empresa Martins, nesta atividade, nem sempre há um voo direto para o destino final, dessa forma, há casos em que é necessário que a carga seja transportada até um determinado local que atua como escala intermediária para o destino final. Adicionalmente, há casos em que a companhia aérea não possui voos para um determinado aeroporto, assim, a carga é transportada

do aeroporto inicial até um aeroporto próximo ao do destino final e depois transportado de novo por meio terrestre (informação verbal)<sup>2</sup>. A sequência do processo é ilustrada da Figura 6.

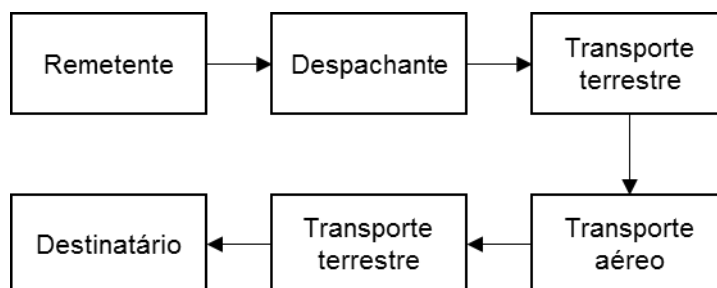


Figura 6 - Processo de transporte aéreo (FENG et al. 2015)

O transporte de carga aérea traz diversos desafios ao longo da sequência dos processos. Neste contexto, o presente trabalho destaca apenas as relações e características das etapas referentes ao transporte aéreo que afetam a entrega da carga ao destinatário final, não detalhando o trajeto correspondente ao transporte terrestre. Dessa forma, entende-se que o transporte da carga pelo caminhão é realizado de forma que não haja imprevistos e é realizado pela própria companhia.

**Companhia aérea:** o serviço de transporte é, em geral, realizado por dois diferentes tipos de companhia aérea: as transportadoras expressas e as que combinam transporte de passageiro com o transporte de carga (FENG 2015). De acordo com a empresa Martins, a maioria dos transportes são realizados por meio do último tipo de transporte, em que a carga é transportada nos espaços vazios deixados pela bagagem dos passageiros (informação verbal)<sup>3</sup>.

**Relação despachante – companhia aérea:** a partir do momento em que o remetente contrata o despachante, a responsabilidade de negociar com os serviços dos aeroportos e com a companhia aérea a entrega efetiva do produto no seu destino final é toda do despachante. Nesta relação o despachante “compra um espaço” em um voo já

<sup>2</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

<sup>3</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

programado pela companhia aérea. A reserva é feita doze ou seis meses antes do voo (FENG 2015). O valor da compra do espaço é acompanhado por um frete, preço pago pelo transporte, que pode variar segundo inúmeros fatores, como por exemplo, a sazonalidade, transporte de carga no final de ano geralmente é mais caro devido à alta demanda por este tipo de serviço. A empresa Martins afirma que dado que o espaço no avião é limitado, o valor pago pelo frete pode decidir a competição pelo espaço entre dois despachantes, ou seja, o valor pego pelo despachante à companhia aérea pode decidir se a carga irá ser transportada ou se ela “ficará no chão” (informação verbal)<sup>4</sup>.

**Transporte da carga:** no contrato assinado entre o despachante e a companhia aérea consta diversos termos que não garantem que a carga será transportada, por exemplo a decisão do comandante do voo em não transportar a carga por considerar ela perigosa. Quando isto ocorre, geralmente a carga é devolvida para o fornecedor original e nenhuma multa é incorrida sobre a companhia aérea. Outro fator é o frete, citado no item anterior (FENG 2015). Da mesma forma, não é passível de multa caso a companhia aérea decida por cancelar ou alterar o voo em que a carga irá ser transportada.

Devido a estes fatores, pode-se dizer que o transporte de carga aérea é uma atividade de muitas incertezas, alta complexidade e flexível. O fato da capacidade de transporte de um determinado voo ter que ser “prometido” doze meses antes dele ocorrer e do fato do despachante não pagar nenhuma multa pelo espaço não utilizado, somada a possibilidade de a carga não ser transportada mesmo após da assinatura do contrato tornam esta atividade muito incerta. A dificuldade de prever a capacidade que um determinado voo terá para comportar a carga, devido ao fato da capacidade disponível não depender apenas do peso, mas também da forma e volume da carga, torna o sistema complexo. A possibilidade de a carga sofrer diversas escalas até que chegue ao destino final no tempo correto adiciona flexibilidade ao sistema, porém, aumenta a chance de ocorrer um extravio do item e alteração nas condições de armazenamento. O aumento de escalas da carga é realizado de forma a minimizar os custos da companhia aérea.

---

<sup>4</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

## 4 Métodos e ferramentas para modelagem

Um sistema é definido como uma estrutura organizada constituída de elementos interdependentes e inter-relacionados que mantem um estado estacionário ao menos que exposta a alterações externas e possui entradas e saída (BUSINESSDICTIONARY). Neste contexto, a definição da fronteira do sistema é parte da atuação do observador. Por outro lado, um modelo é definido como uma representação tão simplificado quanto possível de modo a representar o comportamento desejado do sistema (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Dessa forma, é possível a existência de simplificações do sistema no momento da concepção do modelo representativo.

### 4.1 Sistemas a Eventos Discretos

De acordo com Cury (2001), "Sistema a eventos discretos" (SED) é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta de eventos, em intervalos de tempo em geral irregulares e desconhecidos". Ou seja, qualquer sistema cujo comportamento dinâmico pode ser caracterizado por estados discretos que são alterados exclusivamente função da ocorrência de eventos instantâneos é entendido como um SED.

Na pratica, verifica-se que muitos sistemas possuem comportamentos que podem ser vistos como SED, mas que também possuem variáveis ou parâmetros cujos valores alteram continuamente no tempo. Entretanto, conforme os trabalhos de Miyagi (1996), Cury (2001), Miyagi, Junqueira (2009), desde que o foco do estudo esteja nos estados discretos (que pode envolver uma faixa de variação de variáveis do sistema) e eventos que podem ser tratados como instantâneos, a abordagem de SED pode ser adotada.

Existem várias técnicas e ferramentas para o estudo, isto é, modelagem e análise de SEDs, entretanto conforme a seguir é mencionado, dentre as opções atualmente disponíveis, a rede de Petri é uma das mais utilizadas devido à diversas vantagens, principalmente para a visualização e compreensão dos modelos e posterior especificação de soluções de controle de sistemas.

Segundo Azambuja e Chen (2014), do ponto de vista de teoria de sistemas as cadeias de suprimentos globais podem ser tratadas como sistemas que se comportam

como SED, dessa forma, por ser uma parte específica da cadeia, o sistema de distribuição aérea também pode ser entendido como um SED. Assim, o objeto de estudo pode ser modelado e analisado segundo a técnica de RdP e suas extensões.

## 4.2 Rede de Petri (RdP)

Rede de Petri (RdP) é uma técnica para especificar as relações estruturais e dinâmicas entre diferentes entidades de um sistema. Um modelo em RdP de um sistema é usado para sua análise com base nas propriedades da RdP assim como seu comportamento pode ser simulado em diferentes cenários. A aplicação prática da RdP envolve uma interpretação e mapeamento de elementos estruturais da RdP com os objetos do sistema modelado. Essa interpretação é em geral trivial e facilita o processo de entendimento da estrutura e do funcionamento de sistemas, fornecendo assim informações que facilitam a avaliação de problemas e conseqüentemente a capacidade de tomar decisões para melhorar o desempenho do sistema (ZURAWSKI, ZHOU, 1994).

A RdP incorpora características tanto de máquinas estado finito como de gráficos orientados bipartidos e, com isso, é capaz de expressar precisamente mudanças de estado causadas por eventos como atividades que acontecem em paralelo. Uma RdP é geralmente representada como um grafo bipartido e orientado. Os dois tipos de nós, representam transições (retângulos) e estados (círculos). Os arcos orientados que ligam nós de um tipo a nós do outro representam o relacionamento entre eles (GEROGIANNIS, KAMEAS. PINTELAS, 1998).

### 4.2.1 Formalização

A seguir apresenta-se a definição de RdP com base no trabalho de Fattori, Kano, Junqueira e Miyagi (2012).

Inicialmente tem-se a RdP condição-evento (C/E net) que matematicamente, é descrita como uma 4-tupla  $PN_{CE} = (P, T, F_{CE}, M_{CE})$  em que P é o conjunto de elementos passivos chamados de lugares, T é o conjunto de elementos ativos chamados de transições,  $F_{CE}$  é o conjunto de relacionamentos entre os elementos passivos e os

elementos ativos chamados de arcos orientados,  $M_{CE}$  é um vetor de recursos chamados de marcação, que representa os estados discretos do sistema modelado.

A representação gráfica dos lugares da  $PN_{CE}$  são circunferências; a representação gráfica das transições é um retângulo; a representação gráfica dos arcos orientados são setas apontando do elemento de origem para o elemento de destino; e a representação gráfica das marcas são pontos dentro dos lugares, assim como na Figura 7.



Figura 7 - Representação gráfica da RdP

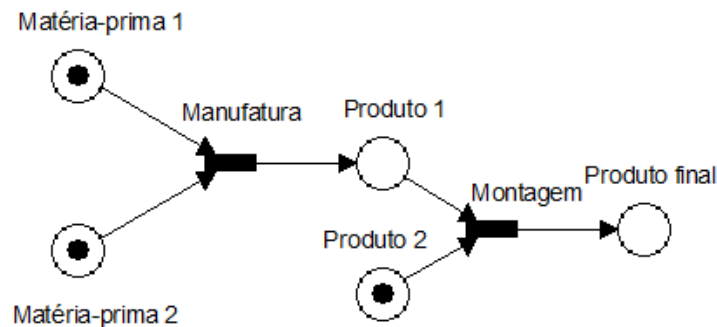


Figura 8 - Exemplo de um processo de produção

Os estados do sistema ou processo são representados pela distribuição das marcas nos lugares da RdP. A dinâmica da  $PN_{CE}$  depende da alteração do estado da rede, resultante do disparo das transições. Pode-se assim adotar a ideia de que as marcas fluem pela RdP direcionadas pelos arcos orientados, isto é, fluem de certos lugares para outros lugares passando pelas transições disparadas. Uma definição mais precisa da RdP encontra-se em Miyagi (1996).

### 4.3 PFS/RdP

Para construir o modelo de um sistema uma abordagem usual é a *top-down*, isto é, primeiro se visualiza o sistema como um todo para depois ir detalhando as partes e descrever o funcionamento detalhado destes. Neste sentido, o PFS foi derivado da RdP para a representação no nível conceitual do sistema antes do detalhamento funcional que pode ser feito com RdP. Similarmente a uma RdP o PFS é composto de atividades, elementos distribuidores e arcos (Figura 9). O PFS é usado inicialmente para descrever a relação estrutural entre as principais partes do sistema (MIYAGI, JUNQUEIRA, 2009), pois a síntese em um único passo da RdP é considerada complicada e pode levar a erros de modelagem caso o sistema em questão seja de alta complexidade (MIYAGI, 1996)

Depois de aplicar esta técnica à descrição conceitual, gradativamente deriva-se o modelo em RdP, que representa os detalhes e o comportamento dinâmico das atividades. No final, um conjunto de processos e elementos básicos que constituem o sistema é identificado, assim como o relacionamento entre eles (MIYAGI, JUNQUEIRA, 2009).

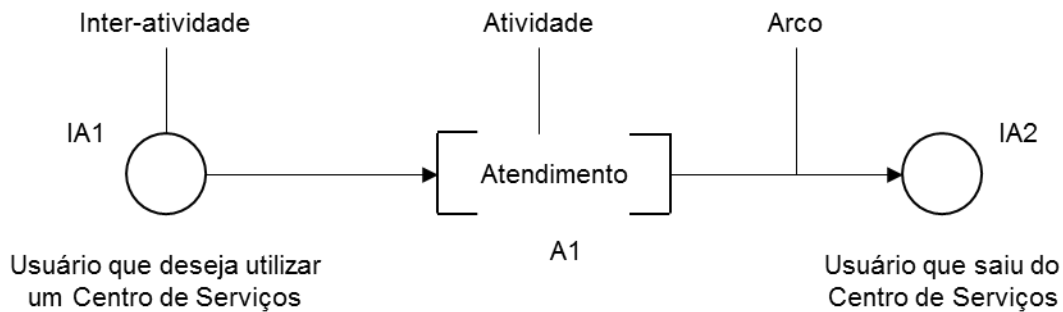


Figura 9 - Exemplo de um PFS (com identificação de seus elementos) da entrada de usuário em um Centro de Serviços (MIYAGI, KISIL, 2002)

Conforme explicado em Miyagi, Miyagi, Kisil, (2002):

- Atividade (componente ativo) - representa uma ação ou um conjunto de ações que alteram o estado do item, na Figura 9, Ai indica a atividade de atendimento.

- Inter-atividade ou distribuidor (componente passivo) representa a disponibilização dos itens que fluem no sistema para a visualização dos estados deste. Arco (fluxo de materiais, pessoas, informações) representa a relação entre uma inter-atividade e uma atividade e vice-versa. Na da Figura 9 representa o fluxo de usuários num Centro de Saúde.

Por exemplo, na Figura 9, IA1 = indica os usuários que desejam entrar no Centro de Serviços, e IA2 indica os usuários que saíram do Centro de Serviços.

Um processo genérico da abordagem *top-down* do PFS é ilustrado pelas Figuras 10 e 11.

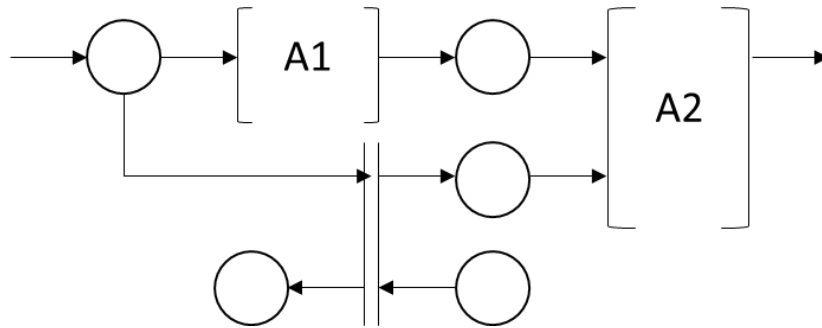


Figura 10 - PFS no nível n

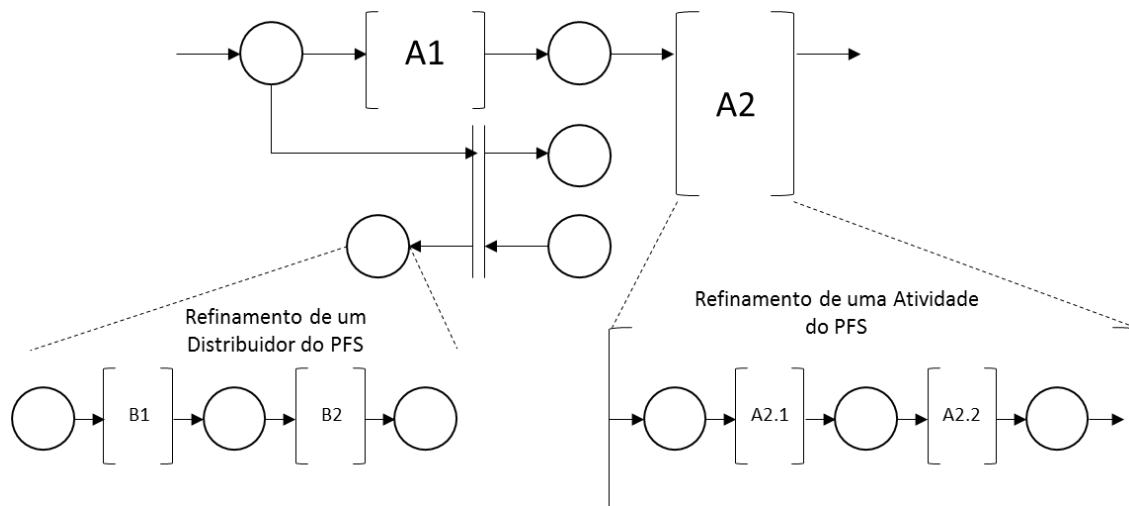


Figura 11 - PFS no nível n+1

A conversão do modelo PFS para a modelagem em RdP é feita utilizando a equivalência dos componentes apresentado pela Figura 12.

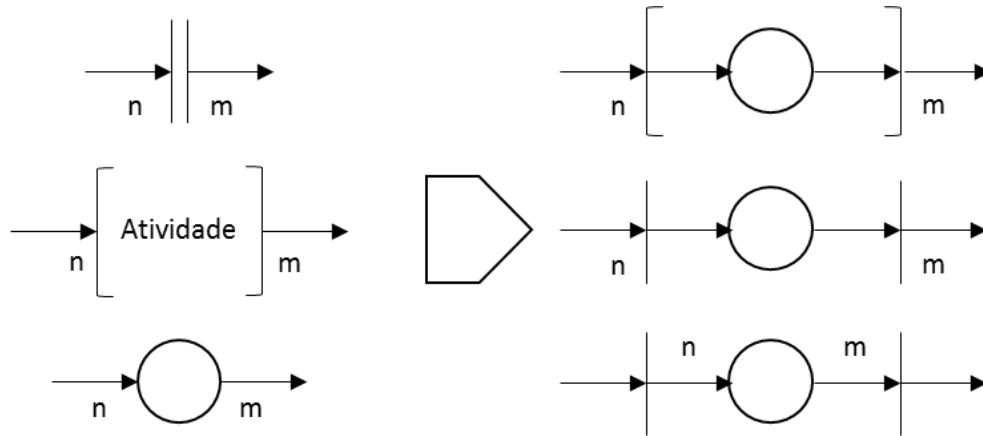


Figura 12 - Correspondência para a conversão do PFS em RdP

Muitos trabalhos já comprovaram a eficácia desta abordagem PFS/RdP como por exemplo, Fattori, Junqueira, Miyagi (2009) que apresenta um modelo de suprimento de peças e Miyagi, Miyagi e Kisil (2002) que estuda o serviço de saúde.

#### 4.4 Metodologia de modelagem

No trabalho desenvolvido por Kano (2015) é introduzido um procedimento geral para a modelagem e análise de cadeias de suprimento globais considerando distúrbios e rupturas. Este procedimento também usa como técnica de modelagem o PFS e a RdP. Além da explicação do procedimento na forma de um conjunto de etapas a serem seguidas, apresenta-se o exemplo de uma cadeia de suprimentos sujeita a ocorrência de rupturas derivadas de problemas com fornecedores. No caso apresentado, o modelo foi validado comparando dados resultantes da simulação do modelo em RdP desenvolvido com o comportamento de casos reais.

O procedimento adotado é apresentado na Figura 13.

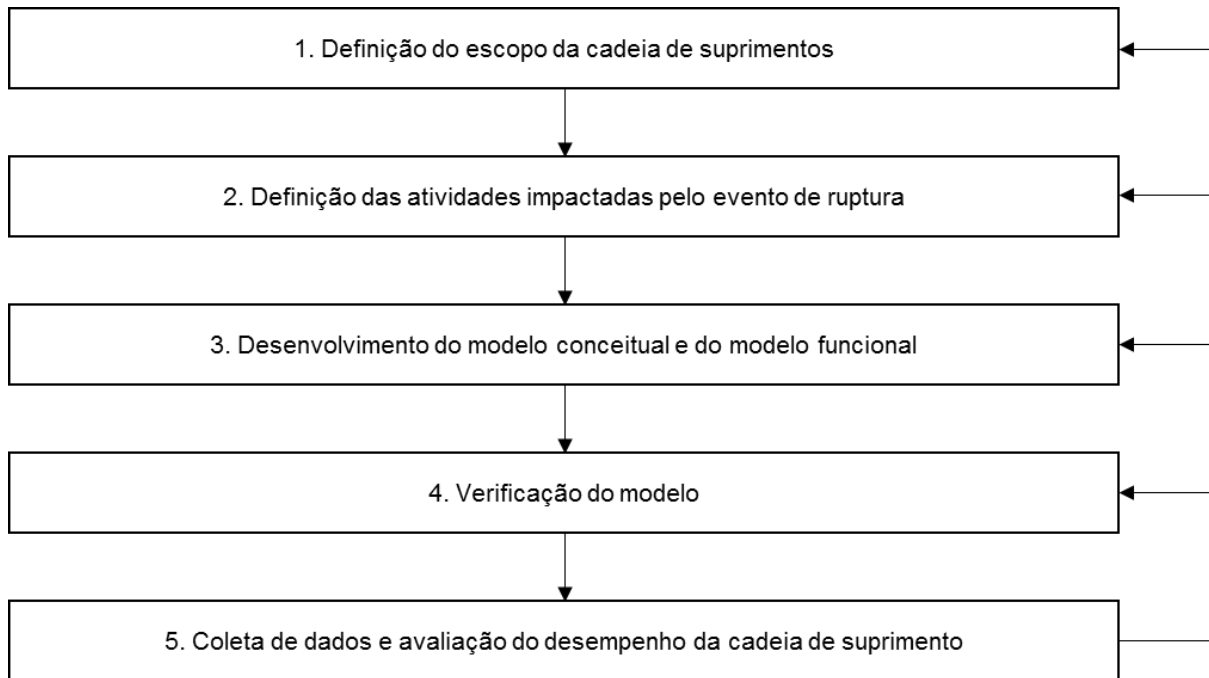


Figura 13 – Fluxograma do procedimento adotado (KANO, 2015)

**Etapa 1:** Definição do escopo do sistema que será estudado - Nesta etapa ocorrem o levantamento do cenário de operação normal da cadeia de suprimentos (sem distúrbio ou ruptura no sistema), e das suas características físicas e funcionais.

**Etapa 2:** Definição das atividades impactadas pelo evento de ruptura e/ou distúrbio do sistema estudado - Nesta etapa ocorrem a identificação do evento de ruptura e/ou distúrbio, dos impactos e suas consequências e da prática de recuperação, e a definição das métricas de desempenho.

**Etapa 3:** Desenvolvimento do modelo conceitual e do modelo funcional - Nesta etapa ocorrem o desenvolvimento dos modelos em PFS e seu refinamento em RdP do sistema estudado, a inclusão dos eventos de ruptura e/ou distúrbios.

**Etapa 4:** Verificação e validação do modelo - Nesta etapa ocorre a análise estrutural (erros de construção do modelo computacional e das características estruturais do sistema modelado) e comportamental (*deadlocks*, presença de estados indesejados, etc.) do modelo funcional em RdP.

#### **Etapa 5:** Coleta de dados e avaliação do desempenho da cadeia de suprimentos

- Nesta etapa ocorrem a escolha das diferentes condições (cenários) de análise por simulação, isto é, diferentes situações do sistema, a execução da simulação e a coleta e análise dos dados.

#### 4.5 Ferramenta para modelagem e análise de RdP

O software utilizado para a modelagem em RdP foi o PIPE2 (FATTORI et al., 2012) devido a interface amigável e intuitiva e oferecer recursos necessários para a realização da modelagem da cadeia em questão. Para realizar os processos de verificação e validação do modelo é utilizado o software HPSim (HPSim, 2013) devido ao recurso de simulação que permite a geração de relatórios em que é possível verificar a quantidade de grafos existentes em cada lugar da RdP, o que torna possível a comparação entre o comportamento do modelo com o descrito no funcionamento real.

#### 4.6 Sistema Multiagentes

A origem de sistemas baseados em agentes ocorreu nos anos 1970 em um contexto de estudo na área de inteligência semiartificial para o desenvolvimento de programas capazes de auxiliar usuários humanos no processamento complexo de informações (Luck et al., 2004). De acordo com Macal et al. (2005), é complicado atribuir um significado universal para o termo “agente”, e por isso em seu trabalho ele cita diversas possíveis definições, como o de Bonabeau (2001) que considera qualquer componente independente como um agente, e que pode responder e atuar de diversas formas, desde uma reação primitiva, até um complexo comportamento adaptativo. Macal et al. (2005) ainda destaca importantes características que são consideradas inerentes aos agentes, entre elas está o fato de cada agente ser um indivíduo discreto, ter seus próprios atributos e regras comportamentais, estar situado em um ambiente em que há a interação entre outros agentes e ter um objetivo a alcançar. Da mesma forma, Chen (2013) define agentes como simples entidades que são capazes de interagir com seu ambiente e tomar decisões baseadas em seu próprio julgamento para atingir um objetivo definido.

Neste contexto, os agentes podem atuar juntos para criar um sistema multiagente (MAS). Neste sistema, cada agente atua em um papel para que juntos possam atingir um objetivo comum. O objetivo de sistemas multiagentes é encontrar métodos que permitem a operação de sistemas complexos compostos por diversos agentes autônomos que, apesar de trabalharem apenas com conhecimento local, e com capacidade limitada, conseguem alcançar um objetivo global (VIDAL, 2010). É importante ressaltar que a produtividade de um agente pode estar relacionada à de outros agentes; por exemplo, se um avião tem a opção de escolher uma rota com menor custo, ele não necessariamente a escolherá pois esta pode atrasar a finalização de entrega devido a outro agente que já otimizou a sequência de recepção de carga; portanto a produtividade do próprio agente pode estar baseada no impacto que ele tem na eficiência de outros agentes não só em seu desempenho.

Sistemas de apoio a tomada de decisão baseados em multiagente apresentam diversos benefícios pois asseguram certo grau de autonomia (SWAMINATHAN, 1997), e de acordo com Chen (2013) ela é uma junção da simulação à eventos discretos e programação orientada a objeto. Dessa forma, este tipo de técnica pode ser utilizado para o presente trabalho, uma vez que a distribuição de carga aérea é composta por diferentes agentes (aviões, aeroportos, etc) dispersos que interagem entre si para atingir um objetivo, a entrega da carga ao seu destino final.

Para o estudo de cenários baseados em MAS, tem-se o software Netlogo. Esta ferramenta possui uma linguagem relativamente simples e de fácil aprendizado.

A ferramenta opera com quatro operadores básicos:

- *Turtles* ou tartarugas, são agentes autônomos que são capazes de tomar decisões próprias.
- *Patches* ou remendos, são os agentes que compõem o sistema e podem possuir propriedades específicas.
- *Links* ou conexões, são utilizados para criarem relações entre tartarugas e remendos ou entre tartarugas. Estas conexões são restrições que fazem

com que um agente influencie o comportamento de outro, para ajudar a integrar o sistema.

- *Observer* ou observador, é um agente externo que comanda tudo o que acontece no sistema.

## 5. Modelagem e Análise

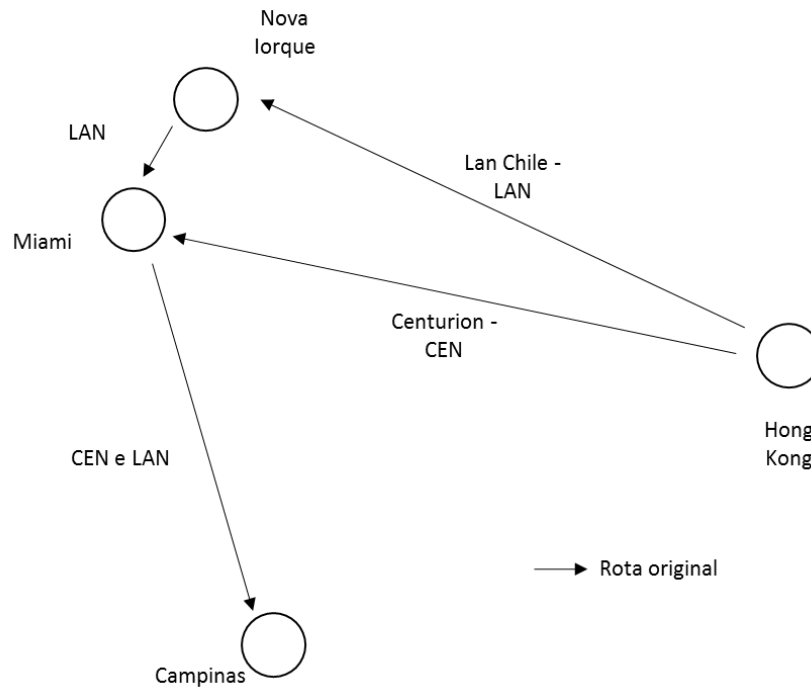
Este capítulo apresenta a modelagem da parte do transporte aéreo de uma cadeia de suprimentos. Primeiramente é definido a cadeia alvo de estudo e suas características. Em seguida, o procedimento de modelagem descrita no capítulo 4 é utilizado para a construção do modelo em RdP. O modelo é então utilizado para avaliar o comportamento do sistema frente aos eventos de ruptura e distúrbio sobre as condições de armazenamento da carga nos locais envolvidos, e da entrega ao seu destino final. Um sistema multiagente é então desenvolvido e aplicado para o estudo de cenários em caso de eventos de distúrbios e ruptura.

### 5.1 Definição do objeto de estudo

A cadeia de suprimentos em questão é formada por empresas localizadas de forma dispersa no planeta, que formam uma relação fornecedor-cliente duas a duas ao longo da cadeia. As empresas envolvidas são o remetente localizado em Hong Kong na China, o despachante/importador localizado no Brasil e as duas companhias aéreas, Lan Chile e Centurion. Para a realização deste estudo, utilizou-se informações cedidas pela empresa de importação Martins (informação verbal)<sup>5</sup>. A Figura 14 ilustra o objeto de estudo.

---

<sup>5</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015



**Figura 14 - Cadeia de suprimentos objeto de estudo**

No sistema em questão, ocorre o transporte aéreo de um item genérico da cidade de Hong Kong, aeroporto internacional de Hong Kong (HKG) na China (local de origem) para a cidade de Campinas, aeroporto de Viracopos (VCP) no Brasil. Entre as companhias aéreas que operam neste trajeto, estão a Centurion (CEN) e a Lan Chile (LAN), de forma que cada uma das empresas possui sua rota. Observa-se que as duas companhias atuam de forma diferente para realizar este transporte, enquanto a CEN possui voos diretos de HKG para aeroporto internacional de Miami (MIA) e de MIA para VCP, a LAN opera apenas no trajeto de HKG para o aeroporto internacional John F. Kennedy em (JFK) Nova Iorque e de MIA para VCP, de maneira que é necessário o transporte terrestre entre os aeroportos de JFK e MIA. Dessa forma, o estudo desta cadeia em questão permite a análise de duas abordagens diferentes. Enquanto uma empresa possui voos diretos, a outra necessita um serviço intermediário do transporte terrestre. Destaca-se que na realidade, a rota Hong Kong – Nova Iorque não é operada pela LAN e sim por uma parceira, mas nas condições do presente trabalho é feita a

simplificação de modo que se adota a LAN como operadora do trajeto. O resumo descritivo das rotas é ilustrado pela Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo das rotas

<b>Rota</b>	<b>Operador</b>	<b>Duração</b>	<b>Frequência</b>	<b>Meio</b>
HKG - JFK	LAN	14 horas	1x / semana	Aéreo
HKG - MIA	CEN	14 horas	1x / semana	Aéreo
MIA - VCP	LAN e CEN	8 horas	2x / semana	Aéreo
JFK - MIA	LAN e CEN	18 horas	Quando necessário	Terrestre

Os voos são previamente programados pelas companhias aéreas e uma tabela de horários é divulgado. A partir dela, a empresa importadora deve ajustar suas demandas de acordo com o cronograma divulgado

Para o presente trabalho, são considerados os seguintes distúrbios: manutenção não programada, falta ou atraso da tripulação, excesso de tráfego aéreo e desvio por condições climáticas. As rupturas consideradas são: não decolagem devido às condições climáticas e o não embarque da carga. Destaca-se a existência de outras situações de rupturas e distúrbios, porém foram consideradas apenas os eventos com maior incidência de acordo com a Martins.

## 5.2 Modelagem em RdP

A seguir, é apresentado o processo de modelagem para a RdP para o caso da cadeia apresentada anteriormente. Destaca-se que o trabalho de Kano (2015) não trata especificamente a ocorrência de distúrbios e rupturas derivadas do sistema de transporte aéreo. Assim, o procedimento proposto por Kano (2015) foi revisado e algumas partes

reinterpretadas para o objetivo do presente trabalho. As etapas do processo são ilustradas na Figura 15. A alteração principal em relação ao procedimento descrito no capítulo 4 é a adição da etapa número 6 referente a análise de cenários da cadeia utilizando MAS e que interage com a etapa 5 para o estudo dos diferentes cenários.

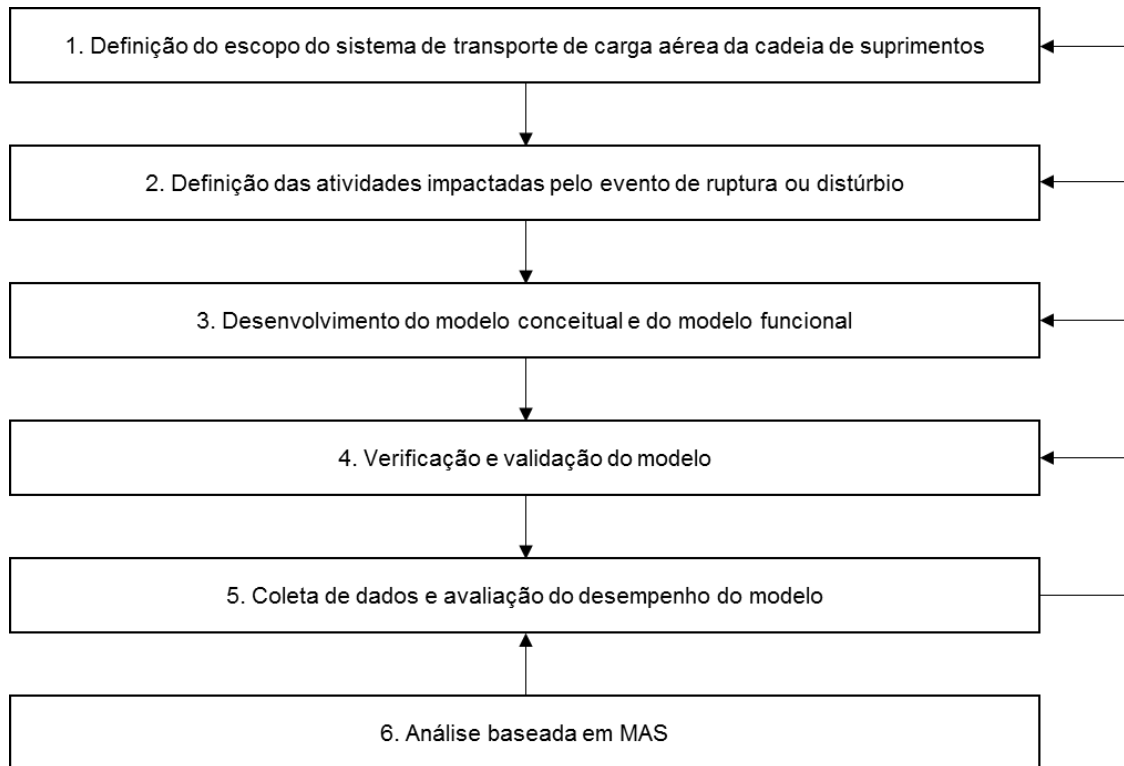


Figura 15 - Etapas do processo de modelagem em RdP

### 5.2.1 Etapa 1: Definição do escopo do sistema.

O presente trabalho define como escopo do sistema apenas o estudo das consequências dos eventos de ruptura e distúrbio no que se refere ao transporte aéreo, de forma que se assume que o transporte terrestre opera de maneira ideal.

Algumas simplificações foram feitas de forma a tornar a modelagem menos complexa sem perda de foco quanto ao objetivo final. O processo alfandegário não foi

detalhado, assim como a limitação da capacidade dos aviões não foi considerada. Outras simplificações realizadas são em relação aos aeroportos que neste estudo sempre conseguem absorver tanto a demanda de aviões como a demanda para o armazenamento de carga quando necessário, e a não existência de uma equipe de tripulantes reserva de forma que quando há a ocorrência de falta ou atraso de algum membro da tripulação o voo necessariamente é atrasado.

Em sua operação ideal, a atividade de transporte aéreo realizado pelas duas companhias ocorre sem problemas com o tempo total de transporte limitado pelos tempos de deslocamento e espera nos aeroportos. As atividades principais são listadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Atividades presentes no escopo do estudo**

<b>Atividade</b>	<b>Descrição</b>
A1	Transporte aéreo de HKG para JFK
A2	Transporte aéreo de HKG para MIA
A3	Transporte terrestre de JFK para MIA
A4	Transporte aéreo de MIA para VCP

### 5.2.2 Etapa 2: Definição das atividades afetadas pelos eventos de distúrbio e ruptura.

Como descrito anteriormente, os distúrbios considerados neste trabalho são: manutenção não programada, falta ou atraso da tripulação, excesso de tráfego aéreo e desvio por condições climáticas. E as rupturas consideradas são: não decolagem devido às condições climáticas e o não embarque da carga. Para cada evento anterior, é determinado uma consequência ou um plano de ação, de acordo com a empresa Martins:

## **Distúrbios:**

- **Manutenção imprevista:** Caso tenha de ocorrer uma manutenção imprevista no horário do voo, isto acarreta em um atraso para a chegada do voo no seu destino final.
- **Falta ou atraso da tripulação:** Caso ocorra de o piloto ou algum membro da tripulação faltar, isto acarreta em um atraso para a chegada do voo no seu destino final.
- **Excesso de trafego aéreo:** Caso muitos voos acumulem, ocorram greves ou por qualquer motivo haja um excesso de trafego aéreo, tem-se um atraso do voo como consequência da falta de infraestrutura necessária para a demanda de voos no momento.
- **Desvios gerados por condições climáticas:** Caso ocorram tempestades ou outras intempéries imprevistas que impossibilitem que um avião pouse ele desviará para um aeroporto auxiliar três horas antes de chegar ao seu destino (tempo suficiente para ter certeza de que será ou não possível pousar no aeroporto em questão). Por motivos de simplificação, assume-se que cada aeroporto possui apenas um aeroporto auxiliar. Caso o voo que estava indo para MIA tenha que ser desviado, ele utilizará o aeroporto de Nova Iorque (JFK) como auxiliar, e vice e versa. Neste primeiro caso, destaca-se o fato o voo da LAN ir direto para MIA, este fato diminui o tempo total de transporte da carga, em compensação, há um encargo a mais sobre a companhia. Caso o voo que estava indo para VCP seja desviado, ele utilizará o aeroporto Internacional Gov. André F. Monteiro em São Paulo/Guarulhos (GRU) como auxiliar. Neste caso a carga será transportada de GRU para VCP com caminhões. Todo este procedimento de desvio temporário de rota acarreta em um atraso para a chegada do voo no seu destino final.

## Rupturas:

- **Não decolagem devido às condições climáticas:** Caso ocorram tempestades ou outras intempéries que impossibilitem que o avião decole, o voo é cancelado e a carga deve retornar para seu fornecedor.
- **Carga não embarcada:** Como o espaço disponível no avião é vendido para a transportadora pelo menos seis meses antes do voo, podem haver erros quanto ao número de passageiros do voo ou quanto a quantidade de bagagem que será levada. A bagagem dos passageiros sempre tem prioridade frente à carga, portanto existe a chance de a carga não ser embarcada. Isto pode ocorrer também devido ao fato do comandante do voo não permitir que a carga embarque por não considerar ela segura ou oferecer algum tipo de risco. Caso isto ocorra, a carga aguarda um outro voo ou retorna para seu fornecedor.

Estes dois eventos são considerados rupturas pois impedem que o voo que transportaria a carga ocorra.

### 5.2.3 Etapa 3: Desenvolvimento do modelo conceitual e do modelo funcional.

Inicialmente um modelo PFS com uma única macro-atividade é criado para a representação global da cadeia de suprimentos e do fluxo principal de material (produto). A partir desta macro-atividade, aplicam-se refinamentos sucessivos de modo a se gerar as subatividades que identificam as principais partes da cadeia de suprimentos, em especial a parte do sistema de transporte aéreo. Neste processo é utilizada uma abordagem *top-down*. Os diferentes níveis de refinamento são mostrados nas Figuras 16 e 17.

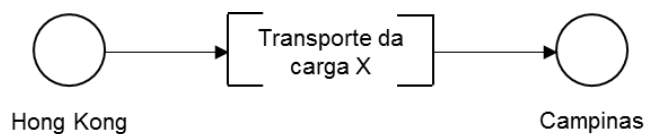


Figura 16 - Modelo conceitual PFS nível 0

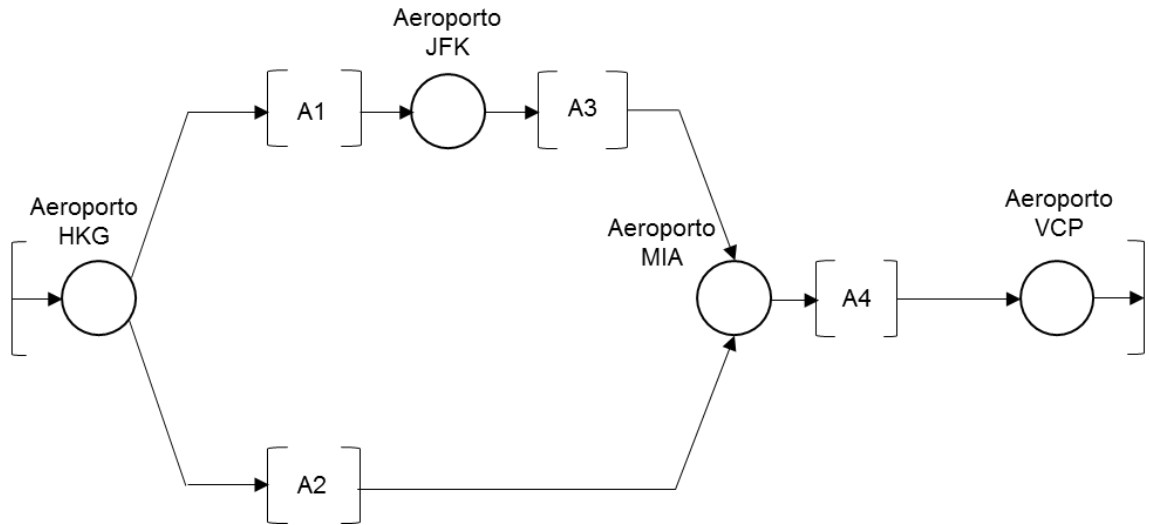


Figura 17 – Detalhamento da atividade [Transporte de carga X] do PFS na Figura 16

A partir dos modelos em PFS são então derivados os modelos em RdP. O mesmo processo *top-down* de modelagem por meio do PFS é utilizado para a modelagem das atividades das duas companhias aéreas. O modelo resultante do processo de conversão do PFS na Figura 17 para uma RdP é ilustrado pela Figura 18.

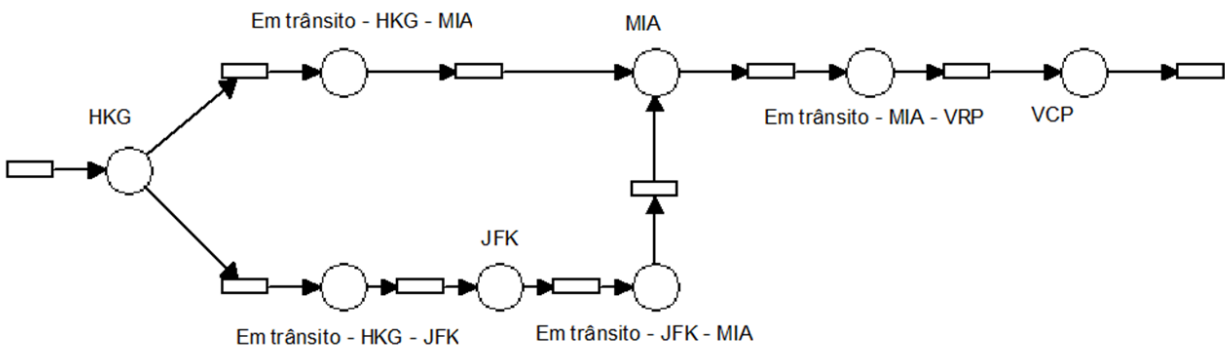


Figura 18 – Modelo funcional em RdP das atividades realizadas pela CEN

Este modelo representa a atividade de transporte aéreo ao longo da cadeia de suprimento em um cenário ideal, em que não há nenhum evento de ruptura/distúrbio.

### 5.2.3.1 Evento de ruptura

Para o desenvolvimento do estudo proposto é necessário a inserção dos eventos de ruptura/distúrbios na modelagem em RdP. Isso acarreta em adição destes eventos no modelo em RdP apresentado anteriormente. Para o presente estudo, define-se a estrutura do evento de ruptura/distúrbio de modo semelhante ao apresentado em Kano (2015), ilustrado pela Figura 19.

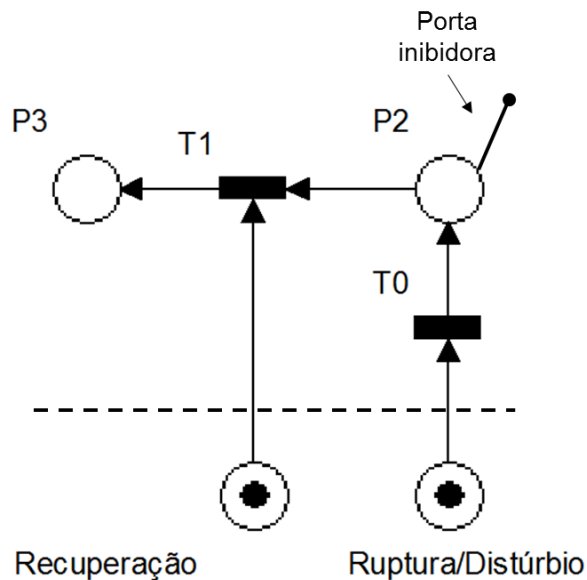


Figura 19 - Representação do evento de ruptura/distúrbio

O funcionamento da estrutura que representa os eventos de ruptura/distúrbio em RdP é relativamente simples. A presença de marca no lugar “Ruptura/Distúrbio” habilita a transição “T0”, que, ao disparar, deve alterar o estado do sistema. A habilitação de “T1” significa que há uma marca no lugar “P2”, indicando que ocorreu um distúrbio/ruptura que altera o estado “normal” do sistema e que houve alguma ação de “recuperação” do sistema. A presença de uma marca em “P2” inibe o disparo de uma transição do sistema, como ilustrado pela Figura 20.

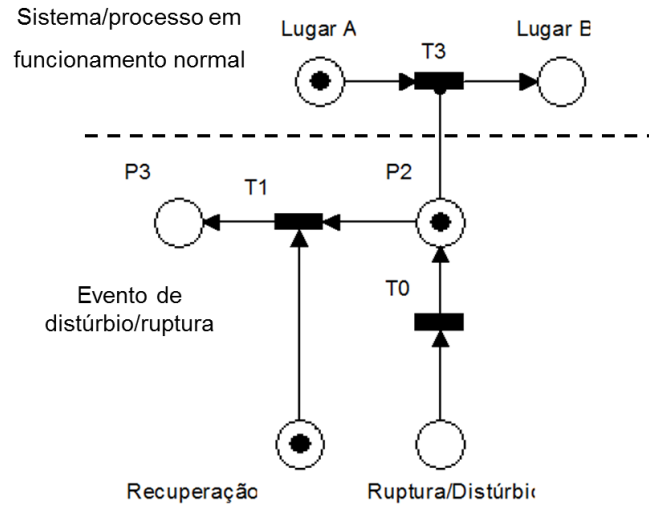


Figura 20 - Exemplo do evento de ruptura/distúrbio

Neste exemplo, a presença de marca em “P2” inibe a transição “T3”, ou seja, impossibilita a passagem de marcas do “Lugar A” para o “Lugar B”. Para que a transição “T3” volte a ficar habilitada, é necessário que ocorra a recuperação, ou seja, que a transição “T1” seja disparada. Neste contexto, define-se que a estrutura do evento de ruptura é semelhante ao do evento de distúrbio. A única diferença entre os dois eventos é a consequência que cada um provoca, a ruptura impede o voo de decolar, e o distúrbio afeta principalmente a operação de pouso do local programado.

Para o modelo em RdP do transporte aéreo, utilizou-se a mesma abordagem em relação ao evento de ruptura/distúrbio como representado pelas Figuras 19 e 20. O desenvolvimento do modelo PFS é ilustrado pelas Figuras 21 e 22.

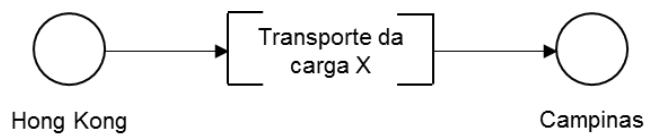


Figura 21 - Modelo PFS nível 0

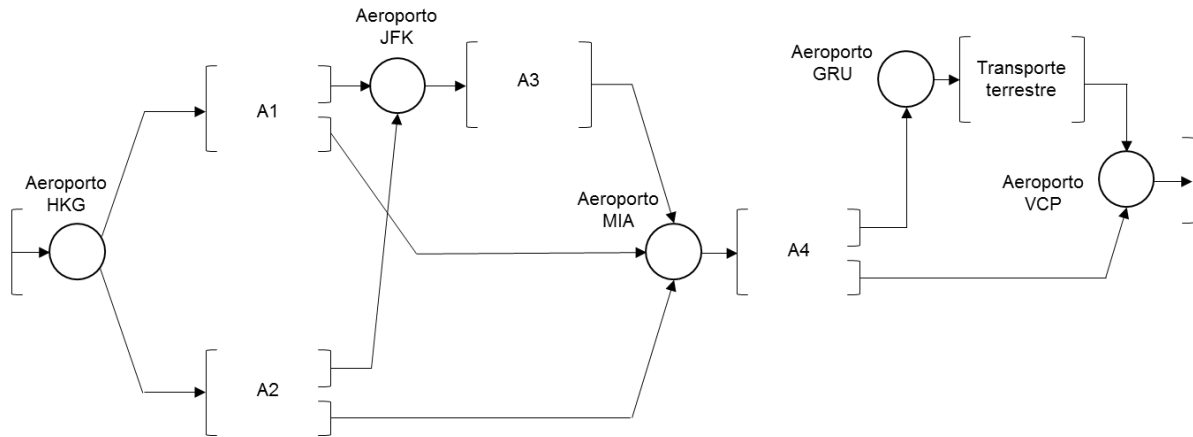


Figura 22 - Modelo PFS nível 1

A partir do modelo PFS é derivado o modelo em RdP, ilustrado pelo Figura 23.

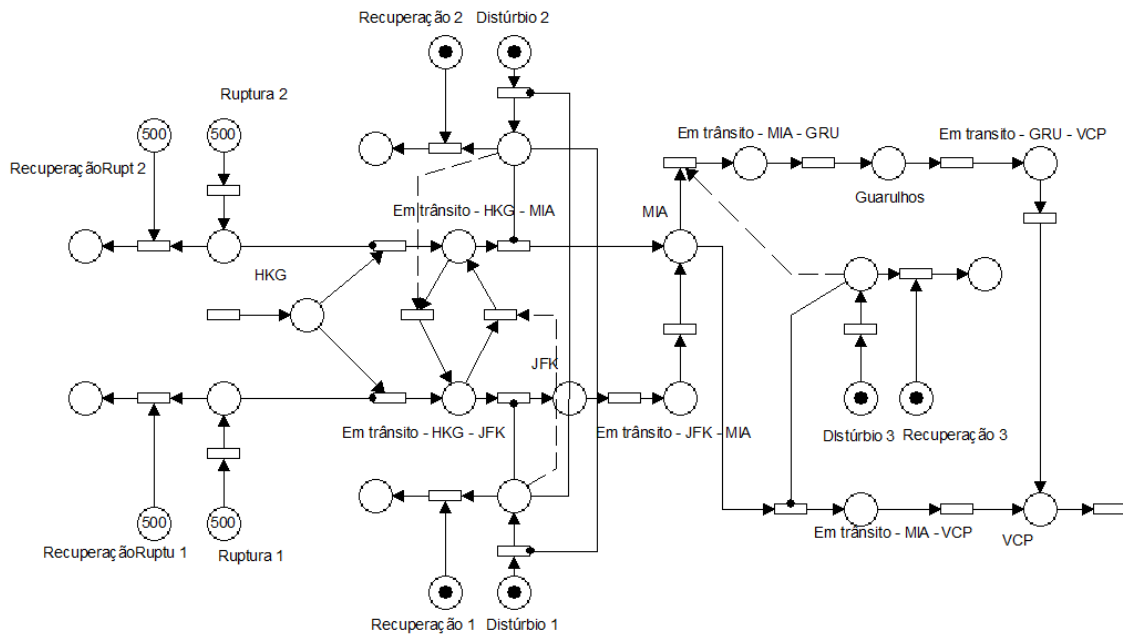


Figura 23 - Modelo RdP com eventos de ruptura/distúrbio

Neste modelo estão representados os eventos de distúrbio: problemas com clima nos aeroportos de JFK, MIA e VCP. E o evento de ruptura: problema relacionado com o embarque da carga. Destaca-se o fato dos eventos de distúrbio 1 e 2 inibirem um ao

outro, de forma que na ocorrência de um deles, o outro não pode ocorrer. Este fato assegura que na ocorrência de problemas climáticos que impossibilite o pouso em um dos aeroportos (JKF ou MIA), o outro conseguirá servir de auxiliar para o pouso do avião.

O tempo de disparo das transições foi mensurado de forma a representar o comportamento descrito pela empresa Martins, ou seja, levou-se em conta o tempo que a carga leva para descolar de um local para o outro.

#### 5.2.4 Etapa 4: Verificação e validação do modelo

O processo de verificação do modelo foi realizado por meio da edição da RdP e sua simulação no do *software* HPSim (HPSim, 2013) e da análise do modelo para verificar o comportamento dinâmico dele, ou seja, a presença de *deadlocks* e estados indesejados. Para a simulação foi adotado para a evolução do tempo o valor de 1 ms, o número máximo de passos seria de 1.000.000 e o tempo de simulação seria de 8.000 ms. Estes parâmetros foram definidos para que a ocorrência dos eventos de ruptura e distúrbio pudessem ser observados. Destaca-se que os tempos utilizados no modelo não correspondem aos valores exatos do sistema real, mas respeitam a relação entre o tempo de ocorrência real e o tempo de simulação.

#### 5.2.5 Etapa 5: Coleta de dados e análise do desempenho do modelo

Após o desenvolvimento dos dois modelos, sem e com os eventos de ruptura e distúrbio, realizou-se a simulação segundo as condições descritas no capítulo 5.2.4 para os dois modelos. A maior diferença que se pode observar é a variação da velocidade de chegada das marcas no lugar VCP que representa o número de produtos/cargas que chegaram ao aeroporto de Viracopos, o destino final. No caso do cenário sem rupturas, a velocidade de chegada é constante, já no cenário em que há rupturas, observa-se uma variação da velocidade à medida em que os eventos de distúrbio e ruptura acontecem. Estes efeitos podem ser observados nas Figuras 24 e 25.

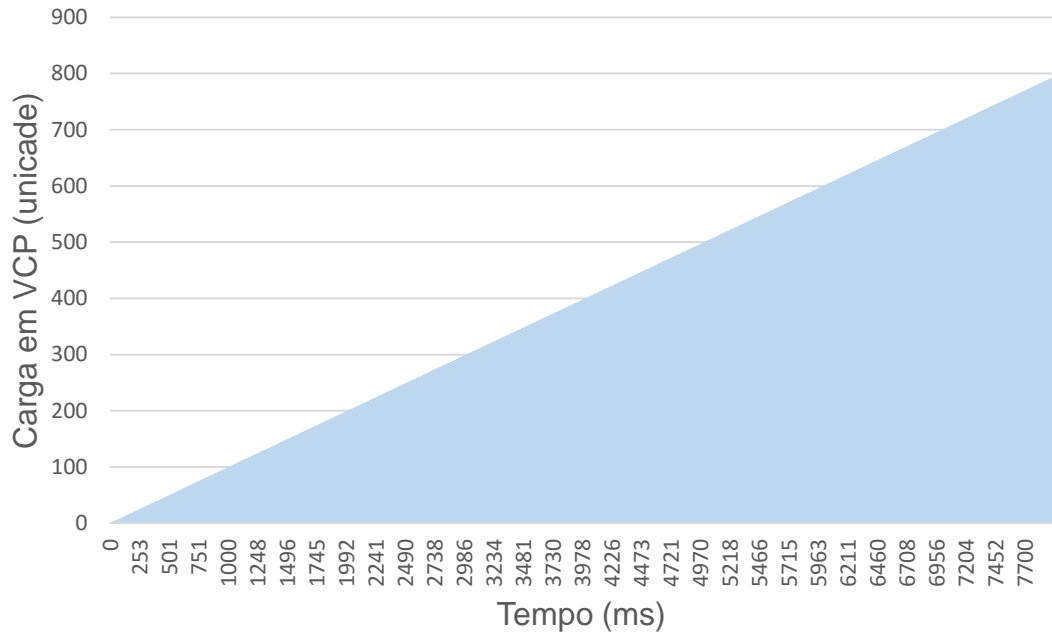


Figura 24 - Cenário sem ruptura/distúrbio

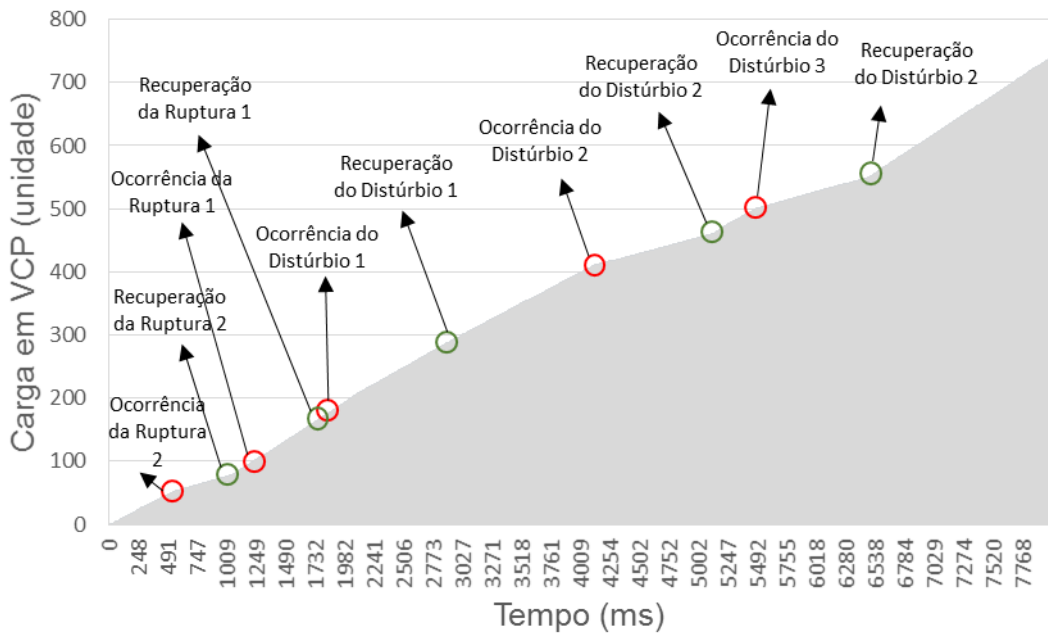


Figura 25 - Cenário com ruptura/distúrbio

Outro resultado expressivo é o total de carga acumuladas em Viracopos ao final de cada simulação. No cenário sem eventos de ruptura e distúrbios, o acumulado foi de 797 marcas, já no cenário em que tais eventos estavam presentes, a entrega total foi de 739. Deste resultado, conclui-se que frente à eventos de ruptura e distúrbios, o sistema responde de forma mais lenta, pois, para um mesmo tempo de simulação, no caso em que estes eventos estavam presentes, a entrega de carga foi menor. Destaca-se o fato dos eventos de rupturas e distúrbios terem sido programado para ocorrerem na sequência definida pelas informações cedidas pela empresa Martins (informação verbal)<sup>6</sup>.

Analisando as consequências de cada evento, observa-se que o comportamento do modelo está de acordo com o descrito pela empresa Martins (informação verbal)<sup>7</sup>.

- “Distúrbio 1” (ocorrência no tempo = 1905 ms): representa o problema climático em JFK. Este evento não afeta de forma significativa a entrega da carga em Viracopos, pois, com a necessidade de desvio temporário da rota de JFK para MIA, o tempo total de percurso da carga se torna menor. Destaca-se o fato deste menor tempo ser acompanhado por uma elevação nos custos da companhia, indicador não considerado no presente trabalho.
- “Distúrbio 2” (ocorrência no tempo = 4121 ms): representa o problema climático em MIA. Este fato afeta de forma significativa a entrega da carga em Viracopos, pois, o desvio temporário da rota de MIA para JFK acrescenta o traslado terrestre entre JFK e MIA, o que eleva o tempo total do percurso da carga.
- “Distúrbio 3” (ocorrência no tempo = 5488 ms): representa o problema climático em VCP. Assim como o “Distúrbio 2”, este fato afeta de forma significativa a entrega da carga em Viracopos, pois, o desvio temporário da rota de VCP para GRU acrescenta o traslado terrestre entre GRU e VCP, o que eleva o tempo total do percurso da carga.

---

<sup>6</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

<sup>7</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

- “Ruptura 1” (ocorrência no tempo = 1284 ms): representa o problema em relação ao embarque da carga no avião com destino à JFK. Este efeito não afeta de forma significativa o modelo, pois, ele afeta o transporte pelo caminho mais longo.
- “Ruptura 2” (ocorrência no tempo = 551 ms): representa o problema em relação ao embarque da carga no avião com destino à MIA. Este efeito afeta de forma significativa o modelo, pois, ele afeta o transporte pelo caminho mais rápido.

Dessa forma, por meio da simulação, da coleta de dados e da análise do modelo, conclui-se que o comportamento mostrado por ele representa a dinâmica real do transporte aéreo.

#### 5.2.6 Etapa 6: Desenvolvimento de cenários em MAS

No sistema de transporte aéreo cada personagem atua de modo independente e autônoma, por exemplo, o avião desvia sua rota ao receber informações de que não há a possibilidade de pousar no destino final programado, isto ocorre de forma que o avião toma esta decisão baseada em regras que definem seu comportamento.

No desenvolvimento do MAS, primeiramente, foram definidos os agentes. Como a proposta aqui é considerar decisões autônomas tomadas por cada agente, assume-se que os aviões e caminhões são os agentes de forma que eles procuram sob seu ponto de vista otimizar a distribuição da carga. Cada avião e caminhão não só tem que verificar suas condições de partida, voo e pouso, mas também define se consegue levar a carga ou não e em que momento pode sair por exemplo ou terá que desviar da rota.

Na plataforma Netlogo, os aviões são “tartarugas”, o que lhes concede a propriedade de agentes. Já os aeroportos são “remendos” que constituem o mapa do sistema. Ou seja, os aeroportos apesar de terem propriedades como capacidade de armazenagem de carga, não são capazes de tomar decisões, eles são apenas locais que influenciam na tomada de decisões das “tartarugas” ou aviões.

Dentre as “tartarugas”, foram criados quatro tipos: aviões da LAN, aviões da CEN, caminhões de GRU a VCP e caminhões de JFK a MIA. Cada um tem suas propriedades específicas e toma decisões de forma diferentes.

Os aviões são mais flexíveis que os caminhões e podem adaptar suas rotas frente à problemas, alterar a quantidade de carga levada ou até mesmo decidir não decolar. Já os caminhões, por estarem fora do escopo do estudo, não têm uma inteligência tão grande, e conseguem simplesmente saber que depois do pouso de um avião precisam levar certo tempo para estarem carregados e então seguem uma única rota específica.

O usuário é o “observador”, que pode interferir em propriedades do sistema sem nenhum vínculo direto com nenhuma “tartaruga” ou “remendo”. Ao definir a probabilidade de chuva em determinado aeroporto, o observador pode alterar as condições climáticas do local o que interfere com a possibilidade ou não de pouso naquele aeroporto que, por sua vez influenciarão na decisão de pousar ou não de alguns aviões.

Estes três elementos em conjunto “observador”, “tartaruga” e “remendo” formam o MAS e ao interagir entre si geram os dados necessários para a construção dos gráficos que o usuário final enxerga. Existe um quarto elemento chamado “conexão”, e que serve para conectar “tartarugas” com “tartarugas” ou “remendos” com “tartarugas”, entretanto, não foram usadas conexões neste modelo.

As premissas adotadas são:

- **Tempo de preparo:** Cada avião precisa de pelo menos uma hora entre voos para manutenção do avião e transferência de cargas. Cada caminhão leva três horas para estar pronto para viagem a partir do momento em que o avião pousou.
- **Queda do avião:** Por motivos de simplificação não foi considerada a possibilidade de queda do avião.
- **Discretização:** O intervalo de tempo adotado para a discretização do sistema é de 1 hora.

- **Capacidade do avião:** Foi considerada uma capacidade fixa de carga para cada avião, ou seja, caso o avião transporte carga ele transportará uma determinada quantidade de carga constante.
- **Rota única:** Cada avião pertence a uma rota e desvia apenas caso ocorram distúrbios climáticos

As soluções de distúrbios/ruptura em MAS foram desenvolvidos de modo que diversos cenários pudessem ser estudados. Dessa forma, os parâmetros ajustáveis são:

- Quantidade de aviões em HKG da Centurion, pertencentes à rota HKG-MIA
- Quantidade de aviões em HKG da LAN Chile, pertencentes à rota HKG-JFK
- Quantidade de aviões em MIA da Centurion, pertencentes à rota MIA-VCP
- Quantidade de aviões em MIA da LAN Chile, pertencentes à rota MIA-VCP
- Quantidade de caminhões em JFK para o transporte de carga para MIA
- Quantidade de caminhões em São Paulo (GRU) para o transporte de carga para VCP
- Frequência de voos de HKG da Centurion para MIA
- Frequência de voos de HKG da LAN Chile para JFK
- Frequência de voos de MIA da Centurion para VCP
- Frequência de voos de MIA da LAN Chile para VCP
- Percentual de chance de ocorrência de tempestade em MIA
- Percentual de chance de ocorrência de tempestade em JFK
- Percentual de chance de ocorrência de tempestade em VCP
- Percentual de chance de ocorrência de manutenção imprevista
- Percentual de chance de ocorrência de atraso da tripulação

- Percentual de chance de ocorrência de excesso de tráfego aéreo
- Percentual de chance de ocorrência de que a carga não seja embarcada
- Carga máxima que cada avião pode levar

Ao ajustar os parâmetros desejados de forma a criar o cenário de estudo, consegue-se mensurar os seguintes indicadores:

- Carga entregue pela LAN
- Carga entregue pela CEN
- Carga atrasada da LAN (devido à distúrbios ou ao mal planejamento de voos)
- Carga atrasada da CEN (devido à distúrbios ou ao mal planejamento de voos)
- Cargas acumuladas em cada aeroporto (por cada companhia)
- Quantidade de voos realizados onde não foi transportada carga (discriminado por companhia e por aeroporto de partida)
- Quantidade de manutenções realizadas que geraram atraso nos voos (discriminado por companhia e por aeroporto)
- Quantidade de atrasos gerados por excesso de tráfego aéreo (discriminado por companhia e por aeroporto)
- Quantidade vezes que a tripulação esteve atrasada (discriminado por companhia e por aeroporto)
- Número de desvios causados por tempestades (discriminado por companhia e aeroporto de destino)

A interface do Netlogo para o estudo desenvolvido pode ser vista na Figura 26.

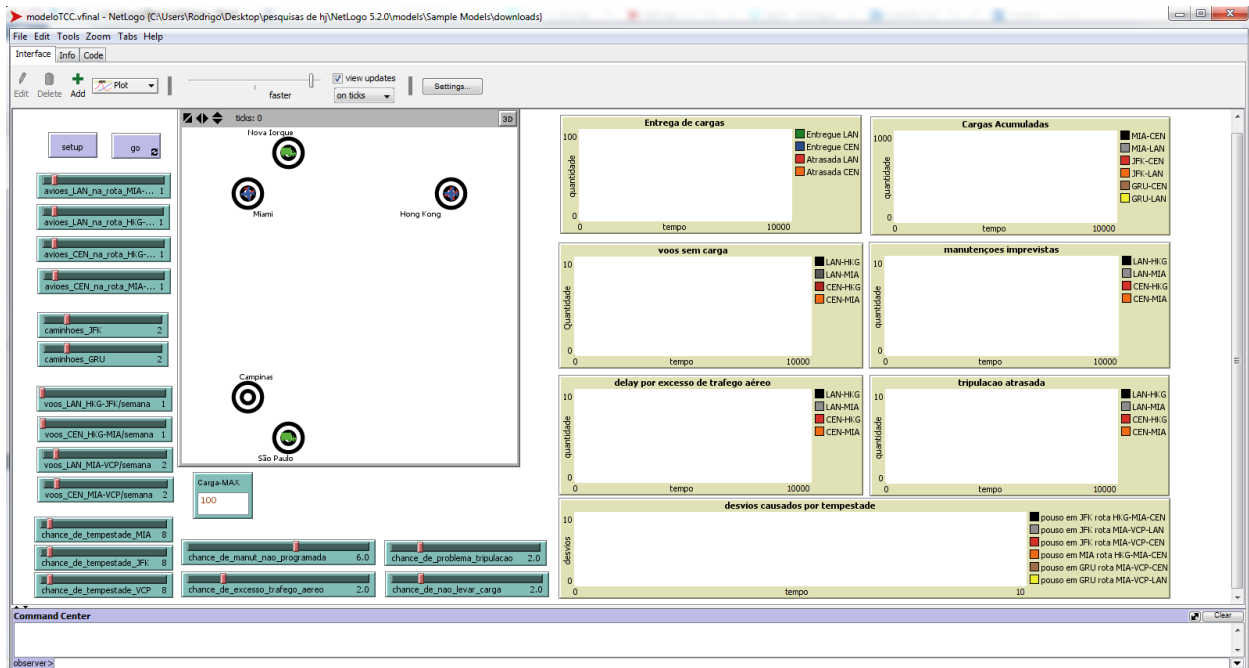


Figura 26 - Interface do Netlogo

A esquerda, em verde, estão os parâmetros que podem ser definidos, e a direita em bege os gráficos que reportam os acontecimentos. No centro está a representação do sistema de transporte onde se visualiza a movimentação dos caminhões e aviões entre aeroportos.

### 5.3 Análise dos cenários

O estudo foi conduzido para ser flexível e se adaptar tanto às diferentes companhias que possam utilizá-lo quanto à mudanças nas condições envolvidas na operação do transporte aéreo. Para testar as situações de distúrbio/rupturas foram feitas

algumas simulações. Primeiramente uma simulação onde a probabilidade de distúrbios ou rupturas foi “setada” para zero.

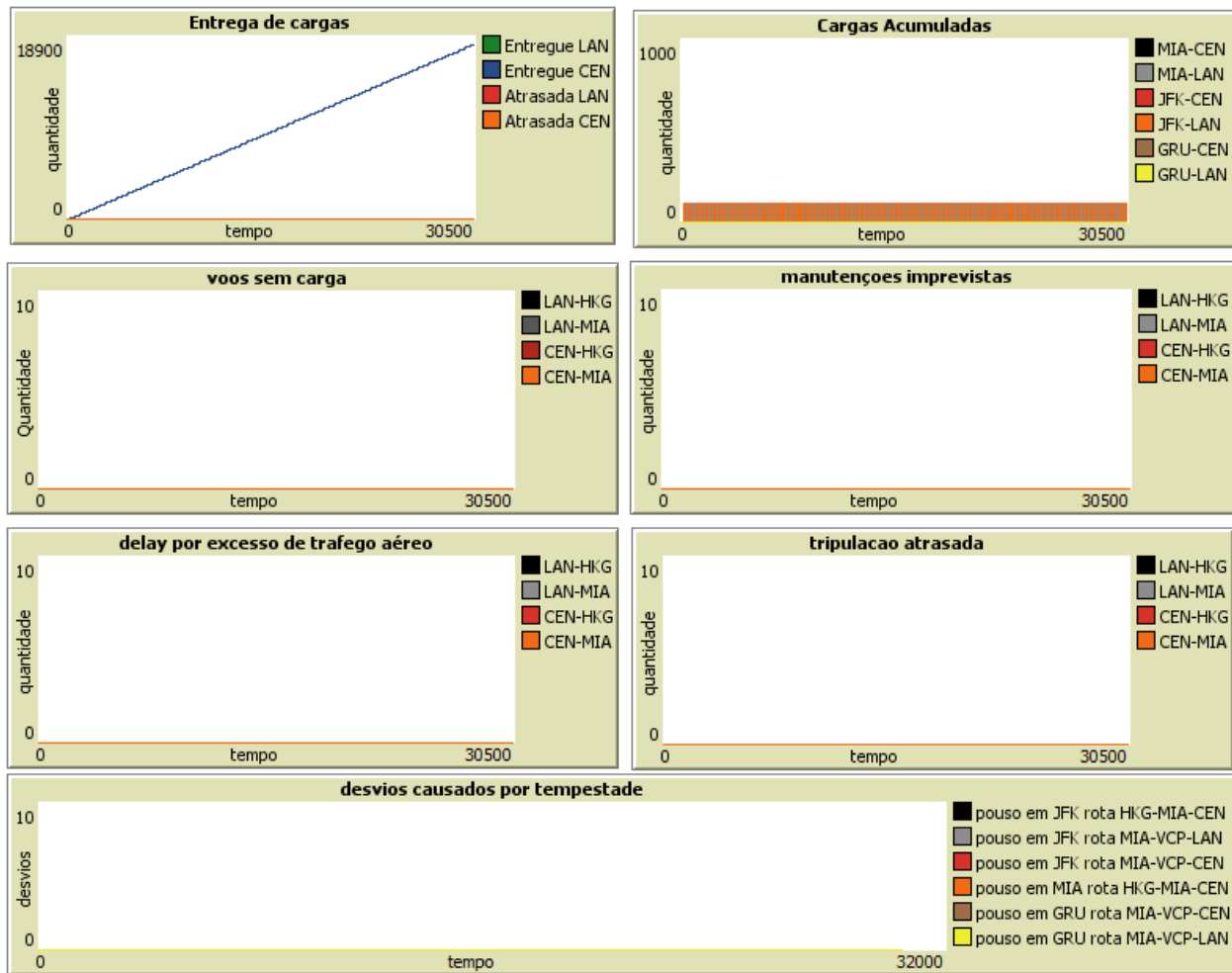


Figura 27 - Simulação controle

Como pode ser visto na Figura 27, não são reportados distúrbios e o máximo de carga acumulada é de 100 (carga de um avião) que representa que a carga está sendo transportada entre aeronaves quando a escala normal em MIA é feita. Destaca-se também que o gráfico “Entrega de cargas” apresenta o mesmo comportamento que o gráfico da Figura 24, resultado da simulação da RdP.

Ao fazer a simulação com os dados reais fornecidos pela empresa Martins (informação verbal)<sup>8</sup> com os ajustes da Figura 28, obtém-se o output da Figura 29.

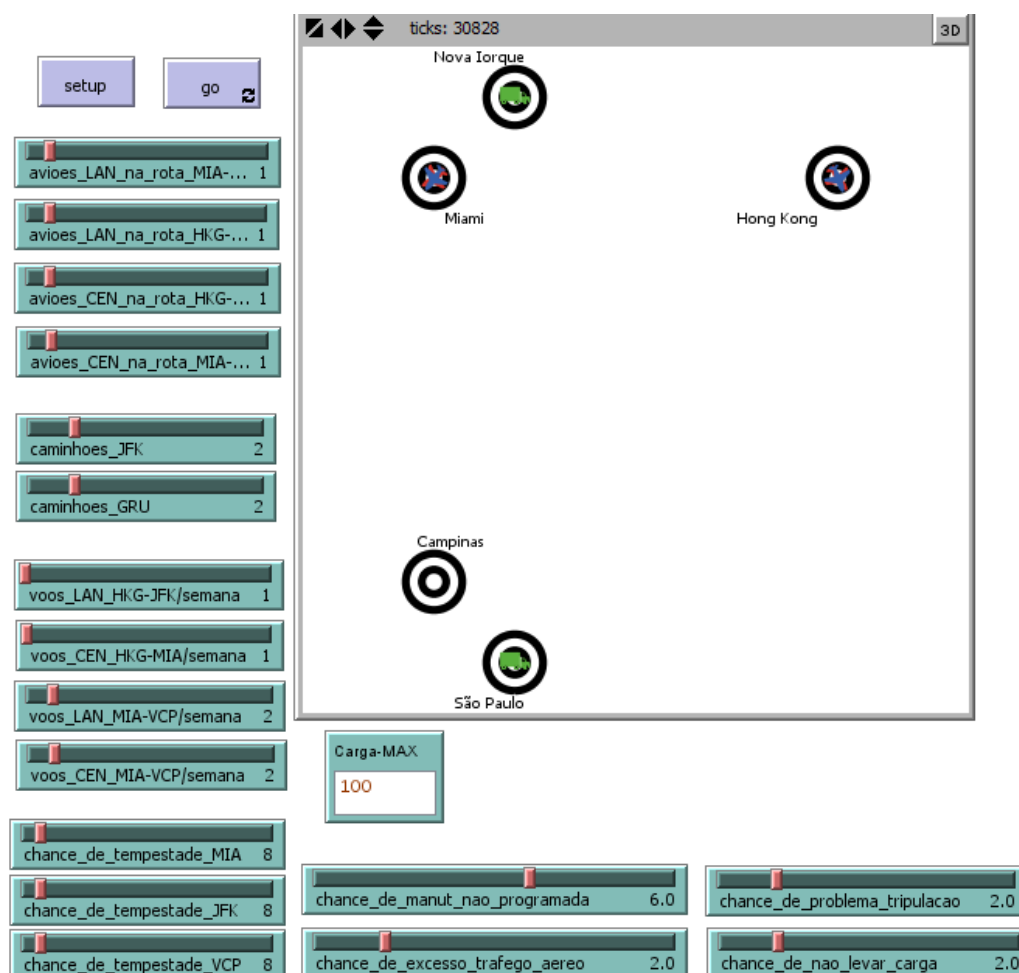


Figura 28 - Informações ajustadas para o caso real

A partir destes dados, pode-se confirmar ver que o plano de transporte atual funciona conforme esperado, isso porque, apesar de atrasos acontecerem, nenhuma carga fica mantida nos aeroportos, toda a carga chega ao destino final. Mesmo com cerca de 30 desvios de rota feitos no total, mais de 100 horas de atrasos totais (devido a atraso de tripulação, atraso por tráfego aéreo e manutenções imprevistas) e cerca de 30 voos sem carga, a carga não se acumula, pois, a relação entre voos que escoam carga de MIA e voos que transportam carga para MIA é de 2:1.

<sup>8</sup> Informação fornecida pela empresa Martins Despachos em Poá, em 2015

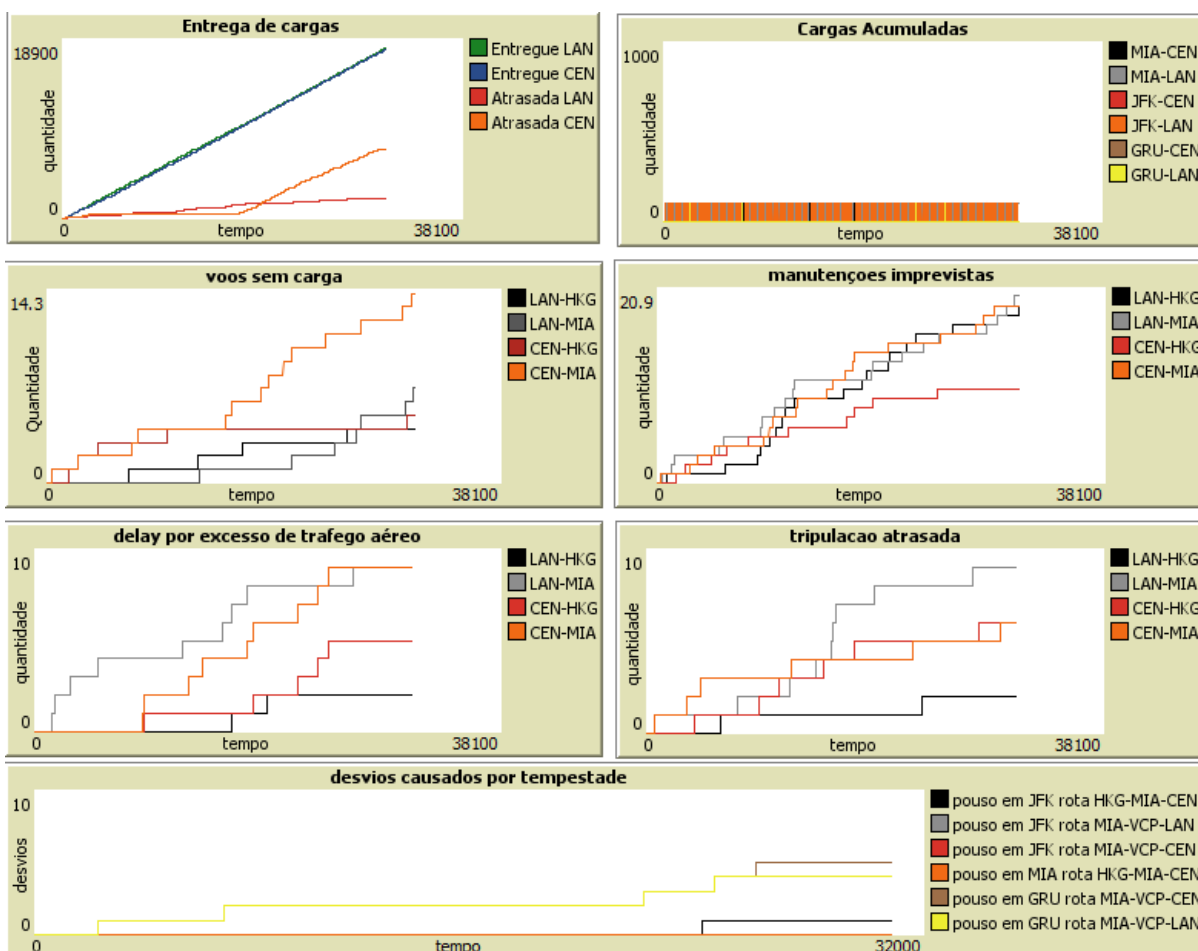


Figura 29 - Resultado da simulação em condições reais

Já no caso ilustrado para Figura 30, esta relação foi alterada para 1:1, o que seria possível apenas caso nenhuma ruptura acontecesse.

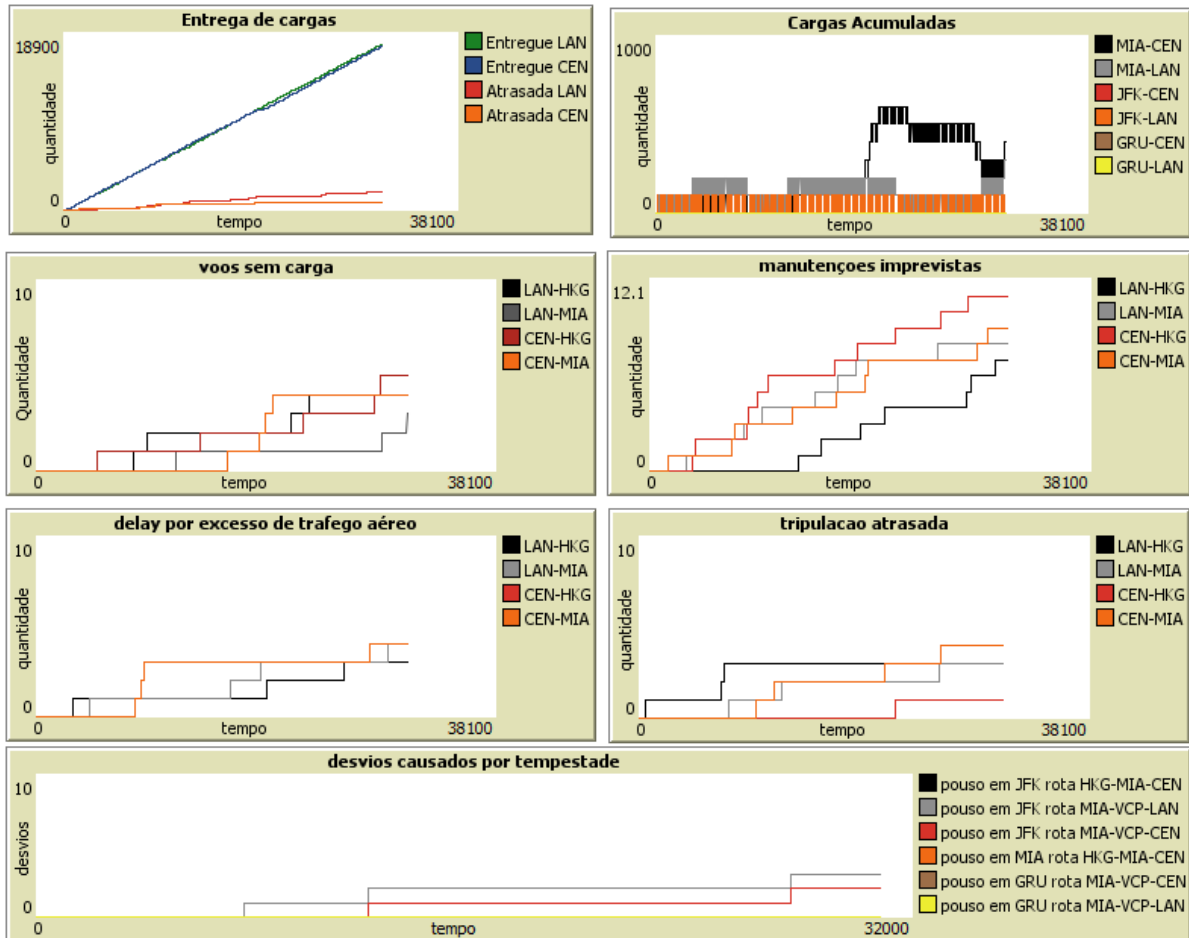


Figura 30 - Resultado de ajustes 2

Como pode-se ver no gráfico de cargas acumuladas, da Figura 30, há um acúmulo de cargas em MIA, mesmo que o número de distúrbios e rupturas tenha sido menor que no exemplo anterior. Isso acontece pois com atrasos repetidos, a carga chega em Miami após o horário de partida do voo, o que faz com que o próximo voo, mesmo que não ocorram mais atrasos tenha o dobro de carga para transportar e assim a carga se acumula.

Com estes gráficos o gestor das operações de cadeia de suprimentos tem mais recursos para entender problemas não só no planejamento de rotas e viagens, mas também em sua gestão e controle de operações e recursos.

## 6. Conclusão

O trabalho desenvolvido permite um melhor entendimento das condições de distúrbios e rupturas apresentadas em sistemas de transporte aéreo de carga. O caso apresentado, apesar de envolver apenas duas rotas básicas de transporte aéreo comprova o quão complexo o transporte de carga entre dois pontos pode ser. Por meio dos indicadores o trabalho identifica qual é o problema em cada caso.

O estudo, entretanto, ainda tem diversas limitações. Não foram considerados problemas alfandegários, ou aviões que voam com quantidades variáveis de carga, além disso, seria também muito útil projetar a receita e o prejuízo gerado por cada sinistro.

Um estudo futuro poderia avaliar o uso dos aviões enquanto não estão fazendo um dos voos planejados na rota. Para isso a modelagem deve considerar todas as rotas de uma companhia aérea, tentando-se assim otimizar o planejamento da companhia ao se entender os possíveis riscos e gargalos que podem ser causados por distúrbios e rupturas.

Com acesso às informações que neste estudo não estavam disponíveis por serem confidenciais das companhias aéreas, pode-se estimar o prejuízo gerado por cada evento de forma que se pode facilmente utilizar o modelo para uma análise financeira fazendo com que a decisão de cada agente seja mais precisa em relação ao lucro ou prejuízo que cada ação acarreta.

Destaca-se também a contribuição do presente trabalho para a cadeia de suprimentos. A análise de cenários em que ocorrem os eventos de distúrbios e rupturas podem ser incluídas no estudo da dinâmica da cadeia de suprimentos, uma vez que, em um cenário de globalização, o transporte aéreo é muito utilizado como meio de transporte entre diversas empresas do mundo. Um exemplo desta possível contribuição é a adição deste estudo ao trabalho realizado por Kano (2015). A adição dos eventos relacionados com o transporte aéreo acrescentaria no estudo das consequências de uma ruptura de grande impacto em cadeias globais, de forma que seria possível mensurar a adição dos

efeitos de rupturas e/ou distúrbios do transporte aéreo aos efeitos de outras rupturas ao longo da cadeia.

Dessa forma, o estudo realizado é considerado valiosa para companhias aéreas e empresas de diversos setores, que compõem uma cadeia de suprimentos, e que sofrem perdas significativas devido a imprevistos para se planejar, pois ao ser capaz de entender não só quais são os gargalos de sua operação, mas também onde o impacto de cada gargalo será sentido, pode tratar de modo mais eficaz o problema gerado pelos gargalos de forma a reduzir o prejuízo gerado por eles.

No que diz respeito às ferramentas utilizadas no presente trabalho, destaca-se que a RdP pode ser utilizada para a modelagem da cadeia de suprimentos de modo a obter resultados expressivos e que representam os eventos reais quanto ao transporte de carga aérea. Em relação ao PFS, observou-se que esta técnica auxilia e facilita a modelagem de sistemas uma vez que ela é desenvolvida segundo a abordagem *top-down*. O sistema baseado em multiagente se mostrou bastante útil no trabalho em que se deseja estudar e analisar diversos cenários. A abordagem considerando “agentes” auxilia em situações que se deseja que o sistema se comporte de forma autônoma e tome decisões baseado na troca de informações entre os integrantes do próprio sistema. Em relação os *softwares* utilizados, o HPSim mostrou-se se uma ótima ferramenta para se realizar simulações e obter dados resultantes delas, uma vez que possibilita gerar um relatório com a evolução das marcações nos lugares ao longo do sistema.

Adicionalmente, o Netlogo provou ser uma ferramenta intuitiva e de proporcionar um aprendizado relativamente rápido. O fato de se criar o sistema por meio da programação permite que estudos de diversas áreas sejam passíveis de serem realizados. Esta flexibilidade possibilita também a variação do foco do estudo, como por exemplo, no presente trabalho optou-se por mensurar determinados indicadores variando-se certas condições iniciais, porém, o MAS possibilita que em trabalhos futuros se crie outros cenários a partir de outros pontos de vista.

Por fim, pode-se relacionar o presente trabalho com a engenharia mecatrônica, uma vez que se emprega a integração entre sistemas e tecnologia, como se pode

observar na utilização de técnicas, ferramentas e *software* no estudo do sistema de distribuição de carga aérea.

## 7. Referências Bibliográficas

ABEAR. Disponível em <<http://www.abear.com.br/>>, Acesso em 10 de junho de 2015

AEROMAGAZINE; Cargas Aéreas no Brasil. Disponível em: [http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/cargas-aereas-no-brasil\\_1821.html](http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/cargas-aereas-no-brasil_1821.html); Acesso em: 10 jun. 2015

AHMADBEYGI, S.; COHN A.; LAPP M. Decreasing airline delay propagation by reallocating scheduled slack, IIE Transactions, 42:7, 2010, p. 478-489.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS (ABEAR): 2012-2015. São Paulo. Disponível em: <http://www.abear.com.br/>. Acesso em 10 jun. 2015

ATAG. The economic & social benefits of air transport, 2005. Disponível em: <[http://www.icao.int/Meetings/wrdss2011/Documents/JointWorkshop2005/ATAG\\_SocialBenefitsAirTransport.pdf](http://www.icao.int/Meetings/wrdss2011/Documents/JointWorkshop2005/ATAG_SocialBenefitsAirTransport.pdf)>. Acesso em: 6 mai. 2015.

BETING, G. Transporte Aéreo de Cargas. 2007. Disponível em: [http://www.jetsite.com.br:80/2006/mostra\\_destacando.asp?whichpage=3&pagesize=1&](http://www.jetsite.com.br:80/2006/mostra_destacando.asp?whichpage=3&pagesize=1&). Acesso em 10 jun 2015.

BOEING. WORLD AIR CARGO FORECAST 2014-2015. 2014. Disponível em <<http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2015.

BONABEAU, E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. In Proc. National Academy of Sciences 99, 2001, p. 7280-7287.

BONET, P.; LLADÓ, C. M.; PUIGJANER, R.; KNOTTENBELT. W. J; PIPE v2.5: a Petri Net Tool for Performance Modeling, 2007.

BUREAU OF TRANSPORTATION STATISTICS: Air traffic data. Disponível em: <[http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/subject\\_areas/airline\\_information/in](http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/subject_areas/airline_information/in)

dex.html >. Acesso em 10 nov 2015.

BUSINESSDICTIONARY. Disponível em <  
<http://www.businessdictionary.com/definition/system.html> >, Acesso em 10 de novembro  
de 2015

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

CHEN, X.; ONG, Y. S. Agent-based modeling and simulation for supply chain risk  
management – a survey of the state-of- the-art. IEEE International Conference on  
Systems, Man, and Cybernetics, 2013.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. Supply Chain Management – Strategy, Planning and  
Operation. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHOPRA, S.; SODHI, M.S. Reducing the risk of supply chain disruptions. MIT Sloan  
Management Review, 2014

CLAUSEN, J.; LARSEN, A.; LARSEN, J.; REZANOVA, N.J. Disruption management in  
the airline industry-Concepts, models ainda methods. Computers & Operation Research,  
v. 37, 2010.

CRAIGHEAD, C.W.; BLACKHURST, J.; RUNGTUSANATHAM, M.J.; HANDFIELDS,  
R.B. The severity of supply chain disruptions: design characteristics and mitigation  
capabilities. Decision Science, v. 38, n. 1, 2007.

CURY, J. E. R.; Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos. V  
Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2001

FATTORI, C. C.; KANO, C. H.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P.E. Rede de Petri e o  
aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE), Apostila, Escola Politécnica da  
USP, 2012.

FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P.E. Framework for collaborative  
manufacturing systems based in services. COBEM 20th International Congress of  
Mechanical Engineering, Porto Alegre, 2009

FENG, B.; LI, Y.; SHEN, Z. M. Air cargo operations: Literature review and comparison with practices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, p. 263-280.

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

HAFEEZ, K.; GRIFFITHS, M.; GRIFFITHS, J.; NAIM, M. M. Systems design of a two-echelon steel industry supply chain. *International Journal of Production Economics*, 1996, p. 121-130.

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

HENDRICKS, K.; SINGHAL, V. R. An empirical analysis of the effect of supply chain disruptions on long-run stock price performance and equity risk of the firm. *Production and Operations Management*, 2005, p. 35–52.

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.

INFRAERO Guia Infraero Cargo (3ª edição); 1970-2015. Brasília. Disponível em: <http://www.infraero.gov.br/images/stories/Arquivos/guia%20cargo%203%20edio.pdf>; Acesso em 10 de junho de 2015.

KANO, C. H.; BLOS, M. F.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P. E. Modeling and analysis of global supply chain disruption based on Petri net. COBEM 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, 2013.

KANO, C. H. Modelagem e Análise das Cadeias de Suprimentos Globais e Resilientes Baseadas em Rede de Petri. 2015. Dissertação de Mestrado, EPUSP. São Paulo, 2015.

KLIBI, W.; MARTEL, A. Scenario-based supply chain network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 2012, p. 644-658.

KOHL, N.; LARSEN, A.; LARSEN, J.; ROSS, A.; TIOURINE, S. Airline disruption management-perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, 2007, p. 149-162.

LEINBACH, T.R.; BOWEN J.T. Air cargo services and the electronics industry in Southeast Asia. *Journal of Economic Geography*, 2004, p. 299-321.

LUCK, M.; MCBURNEY, P.; SHEHORY, O. et al. Agent technology roadmap: Overview and consultation report. AgentLink III, 2004.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation, Proc. Of the 2005 Winter Simulation Conf., Orlando, USA, 2005.

METZER, J.T.; DEWITT, W.; KEEBLER, J. S.; MIN, S.; NIX, N.W.; SMITH, C.D.; ZACHARIA, Z.G. Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 2001.

MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES. Disponível em: <<http://www.brasilexport.gov.br/sites/default/files/publicacoes/manuais/PUBExportPassoPasso2012.pdf>>. Acesso em 10 de junho de 2015.

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

MIYAGI, P.E.; JUNQUEIRA, F. Modelagem e simulação distribuída de sistema produtivo baseados em rede de Petri. *Controle & Automação*, 2009.

MIYAGI, M.M.; MIYAGI, P.E.; KISIL, M. Modelagem e análise de serviços de saúde baseados em redes de Petri interpretadas. *Revista Produção*, 2002.

MONTILHA, P.C. O transporte Aéreo de Cargas no Brasil. 2007. Monografia apresentada no curso de Tecnologia e Logística com ênfase em transporte. FATEC ZL. São Paulo, 2007.

POCHARD, S. Managing risks of supply-chain disruptions: dual sourcing as a real option. Master Thesis in Science of Technology and Policy. Engineering Systems Division Massachusetts Institute of Technology. 2003.

SWAMINATHAN, J. M. Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach. Decision Sciences, 1997, p. 607-632.

TANG, C.S. Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. International Journal of Logistics Research and Applications, 2006.

TANG, C.H.; YAN, S.; CHEN, Y.H. An integrated model and solution algorithms for passenger, cargo, and combi flight scheduling. Transp. Res. Part E, 2008, p. 1004–1024.

THE INTERNATIONAL AIR CARGO ASSOCIATION (2006). The Impact of the air cargo industry on the global economy. Disponível em: <[http://www.aerotropolis.com/files/2006\\_09\\_AirCargoGlobalEcon.pdf](http://www.aerotropolis.com/files/2006_09_AirCargoGlobalEcon.pdf)>. Acesso em: 7 jun. 2015.

UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA – WHARTON SCHOOL (2006). Flexibilidade ante o desastre: gerenciando o risco de ruptura na cadeia de suprimentos. Disponível em: <<https://www.knowledgeatwharton.com.br/article/flexibilidade-ante-o-desastre-gerenciando-o-risco-de-ruptura-na-cadeia-de-suprimentos/>> . Acesso em: 22 abr. 2015.

VIDAL, J. M. Fundamentals of Multi Agent Systems with NetLogo Examples, 2010

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

WU, T.; BLACKHURST, J.; O'GRADY, P.O. Methodology for supply chain disruption analysis. International Journal of Production Research, 2007.

ZHU, K.; LUDEMA, M.; VAN DER HEIJDEN, R. Air cargo transports by multi-agent based planning. In: Thirty-third Hawaii International Conference on System Science, Hawaii, 2000.

ZURAWSKI, R.; ZHOU, M. Petri nets and industrial applications: a tutorial. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994.