WESLEY JOSÉ NOGUEIRA MEDEIROS

Modelo para determinação de resiliência em sistemas de transportes: uma aplicação no sistema de tráfego aéreo

São Paulo
2018

WESLEY JOSÉ NOGUEIRA MEDEIROS

Modelo para determinação de resiliência em sistemas de transportes: uma aplicação no sistema de tráfego aéreo

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

São Paulo
2018

WESLEY JOSÉ NOGUEIRA MEDEIROS

Modelo para determinação de resiliência em sistemas de transportes: uma aplicação no sistema de tráfego aéreo

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

Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador: Prof. Dr. João Batista Camargo Junior

São Paulo

2018

Catálogo na Publicação

M488 Medeiros, Wesley José Nogueira

Modelo para determinação de resiliência em sistemas de transporte: uma aplicação no sistema de tráfego aéreo / Wesley José Nogueira Medeiros. -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

120 p. il.; 30 cm

Orientador: João Batista Camargo Junior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Logísticos, São Paulo, 2018.

1. Resiliência 2. Logística. 3. Sistemas de transportes. 4. Controle de tráfego aéreo I. Camargo, João Batista, orient. II. Universidade de São Paulo. Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos. III. Título.

CRB-8/2368

629.046 Engenharia de Transportes - Sistemas

629.13 Engenharia Aeronáutica

Ao meu pai, José Medeiros, que trabalhou incansavelmente em meio às adversidades para garantir ao seu filho uma boa estrutura familiar e uma educação de qualidade, sem os quais eu nunca teria alcançado o tão desejado título de Mestre.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Talita Pouzo Minatel, pelo incentivo, paciência e companheirismo dispensados durante a minha trajetória educacional na USP.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. João Batista Camargo Junior, pelos ensinamentos, orientações e principalmente pelo otimismo nas palavras de incentivo que tanto me encorajaram na condução deste trabalho científico.

Aos pesquisadores membros do Grupo de Análise de Segurança (GAS) da Escola Politécnica da USP pelas sugestões de melhoria e pelo suporte fornecido durante a pesquisa.

Aos profissionais do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) da Força Aérea Brasileira pelo conhecimento aeronáutico compartilhado e pela cooperação ao longo das simulações computacionais desenvolvidas no TAAM.

À empresa Boeing por ter disponibilizado uma versão do software TAAM para o Grupo de Análise de Segurança (GAS) da Escola Politécnica da USP, facilitando o desenvolvimento das simulações computacionais.

“A criação de sistemas que estejam prontos para evoluir em resposta às condições imprevistas coloca um desafio para desenvolver também uma nova maneira de pensar sobre design e engenharia de sistemas” (HOLLNAGEL; NEMETH, 2014)

RESUMO

Este trabalho propõe um modelo de análise quantitativa baseado em simulação de eventos discretos para a determinação do nível de resiliência em sistemas de transporte. O nível de resiliência é avaliado considerando as funções de desempenho relacionadas a capacidade, ao nível de serviço e ao tempo de recuperação do sistema de transporte frente a um evento de ruptura. O modelo é validado através de estudo de caso aplicado ao sistema de tráfego aéreo brasileiro, considerando um espaço aéreo composto por 12 setores de uma região de informação de voo (FIR), suas demandas diárias de aeronaves, sua malha de rotas aéreas e sua rede de aeródromos instalada. O evento de ruptura é oriundo de condições meteorológicas adversas que afetam simultaneamente as operações de pouso e decolagem no aeroporto do Rio de Janeiro - Santos Dumont (SBRJ) e no aeroporto de São Paulo - Congonhas (SBSP). Conclui-se que o modelo de análise permite a plena determinação do nível de resiliência em sistemas de transportes, mesmo em situações de rupturas operacionais simultâneas.

Palavras-chave: Logística, Resiliência, Sistemas de Transporte, Controle de Tráfego Aéreo.

ABSTRACT

This work proposes a quantitative analysis model based on discrete event simulation (DES) to determine the resilience level of transport systems. The resilience level is evaluated considering the performance functions related to capacity, service level and recovery time of the transport system in a presence of disruptive events. The model is validated through a case study applied to the Brazilian air traffic system, considering an airspace with 12 sectors of a flight information region (FIR), its daily aircraft demands, its air route network and its aerodromes network installed. The disruptive event comes from adverse weather conditions that simultaneously affect the landing and takeoff operations at Rio de Janeiro – Santos Dumont (SBRJ) and São Paulo – Congonhas (SBSP) airports. It is concluded that the analysis model allows the full determination of the resilience level in transport systems, even in situations of simultaneous operational disruptions.

Keywords: Logistic, Resilience, Transport Systems, Air Traffic Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das etapas do método científico.....	19
Figura 2 – Componentes internos e externos em sistemas de transporte	25
Figura 3 – Grafos de redes de transportes.....	26
Figura 4 – Regiões de informação de voo (FIR).....	31
Figura 5 – Distribuição geográfica dos aeroportos brasileiros.....	32
Figura 6 – Principais fontes de ruptura em cadeias de suprimento (2015)	34
Figura 7 – Panorama mundial de eventos naturais severos (2014)	36
Figura 8 – Panorama mundial de eventos naturais severos (2015).	37
Figura 9 – Perfil de eventos de ruptura em sistemas	38
Figura 10 – Transições do estado operacional de sistemas em eventos de ruptura.	40
Figura 11 – Abordagens para análise de resiliência em sistemas.....	44
Figura 12 – Mapa de vulnerabilidade para uma empresa.	45
Figura 13 – Estrutura de resiliência em sistemas logísticos.....	46
Figura 14 – Quatro habilidades essenciais de um sistema resiliente.	49
Figura 15 – Nível de resiliência na matriz de capacidades e vulnerabilidades.....	51
Figura 16 – Medida de perda de resiliência	53
Figura 17 – Transições de estado em um sistema sofrendo evento de ruptura.....	54
Figura 18 - Problema do Parque Seervada.....	56
Figura 19 – Análise de resiliência para o evento de ruptura 1	58
Figura 20 – Comparação entre estratégias para o evento 1	59
Figura 21 – Comparação entre estratégias para o evento 2	60
Figura 22 – Trajetória para um sistema resiliente	62
Figura 23 – Evolução de eventos discretos e contínuos ao longo do tempo.....	65
Figura 24 – Etapas da simulação computacional.....	66
Figura 25 – Modelo para determinação do nível de resiliência	72
Figura 26 – Setores de Tráfego Aéreo da FIR Curitiba (SBCW).....	80
Figura 27 – Etapas do voo e seus espaços aéreos.....	83
Figura 28 – Tela Inicial do TAAM	85
Figura 29 – Regiões de Informação de Voo (FIR) no TAAM.....	85
Figura 30 – Aeródromos nacionais e internacionais no TAAM.....	86
Figura 31 – Rotas de navegação aérea configuradas no TAAM.....	86
Figura 32 – Visualização das aeronaves em tempo real no TAAM.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estoque de segurança para diferentes taxas de atendimento.....	23
Tabela 2 – Causas de eventos de ruptura em sistemas de transporte	33
Tabela 3 – Dez maiores eventos de ruptura em sistemas de transporte (2015)	33
Tabela 4 – Principais fontes de ruptura na região da América Latina e Central.....	34
Tabela 5 – Principais fontes de ruptura na indústria de transporte e armazenagem.	35
Tabela 6 – Definições de resiliência.....	42
Tabela 7 – Fatores de vulnerabilidade em sistemas logísticos	47
Tabela 8 – Fatores de capacidade em sistemas logísticos	48
Tabela 9 – Taxas aceitáveis de falhas em sistemas de transporte aéreo	61
Tabela 10 – SBRJ - Condições Meteorológicas em 30/05/2017	77
Tabela 11 – SBSP - Condições Meteorológicas em 30/05/2017	78
Tabela 12 – Mínimos Meteorológicos para SBRJ e SBSP	79
Tabela 13 – Capacidade Horária do Setores (CHS) da FIR SBCW	81
Tabela 14 – Total de voos para 01 dia de operações aéreas na FIR SBCW	83
Tabela 15 – Tempo de Recuperação e Taxa de Ocupação Máxima (FIR SBCW)..	100
Tabela 16 – Níveis de severidade do TAAM para conflitos de tráfego aéreo.....	101
Tabela 17 – Conflitos de Tráfego Aéreo na FIR SBCW	101
Tabela 18 – Atrasos no tempo total de voo das aeronaves na FIR SBCW	103
Tabela 19 – Estimativa do custo do QAV-1 para a simulação (U\$/kg).....	104
Tabela 20 – Subfatores de vulnerabilidades em sistemas logísticos	115
Tabela 21 – Subfatores de capacidades em sistemas logísticos	116
Tabela 22 – Questões para análise da habilidade de resposta de sistemas.....	118
Tabela 23 – Questões para análise da habilidade de monitoramento de sistemas.	119
Tabela 24 – Questões para análise da habilidade de antecipação de sistemas	119
Tabela 25 – Questões para análise da habilidade de aprendizado de sistemas.....	120

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ferramenta RAG para nível de resiliência	49
Gráfico 2 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 01	88
Gráfico 3 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 01	88
Gráfico 4 – Curva de resiliência do setor CW 01	88
Gráfico 5 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 02	89
Gráfico 6 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 02	89
Gráfico 7 – Curva de resiliência do setor CW 02	89
Gráfico 8 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 03	90
Gráfico 9 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 03	90
Gráfico 10 – Curva de resiliência do setor CW 03	90
Gráfico 11 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 04	91
Gráfico 12 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 04	91
Gráfico 13 – Curva de resiliência do setor CW 04	91
Gráfico 14 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 05	92
Gráfico 15 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 05	92
Gráfico 16 – Curva de resiliência do setor CW 05	92
Gráfico 17 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 06	93
Gráfico 18 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 06	93
Gráfico 19 – Curva de resiliência do setor CW 06	93
Gráfico 20 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 07	94
Gráfico 21 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 07	94
Gráfico 22 – Curva de resiliência do setor CW 07	94
Gráfico 23 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 08	95
Gráfico 24 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 08	95
Gráfico 25 – Curva de resiliência do setor CW 08	95
Gráfico 26 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 09	96
Gráfico 27 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 09	96
Gráfico 28 – Curva de resiliência do setor CW 09	96
Gráfico 29 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 10	97
Gráfico 30 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 10	97
Gráfico 31 – Curva de resiliência do setor CW 10	97
Gráfico 32 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 11	98
Gráfico 33 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 11	98

Gráfico 34 – Curva de resiliência do setor CW 11.....	98
Gráfico 35 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 12.....	99
Gráfico 36 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 12.....	99
Gráfico 37 – Curva de resiliência do setor CW 12.....	99
Gráfico 38 – Distribuição dos Conflitos de Tráfego Aéreo na FIR SBCW	102
Gráfico 39 – Curva de resiliência para o KPI 03 na FIR SBCW	102
Gráfico 40 – Custo horário total com combustível de aviação na FIR SBCW	104
Gráfico 41 – Curva de resiliência para o KPI 05 na FIR SBCW	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agencia Nacional de Aviação Civil
ATC	<i>Air Traffic Control</i> (Controle de Tráfego Aéreo)
ATZ	<i>Airdrome Traffic Zone</i> (Zona de Tráfego de Aeródromo)
EUROCONTROL	<i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i> (Agência Européia para a Segurança da Aviação)
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
CTR	<i>Control Zone</i> (Zona de Controle)
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
ETA	<i>Estimated Time of Arrival</i> (Horário Estimado de Chegada)
ETD	<i>Estimated Time of Departure</i> (Horário Estimado de Partida)
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> (Agência Federal de Aviação dos EUA)
FIR	<i>Flight Information Region</i> (Região de Informação de Voo)
GAS	Grupo de Análise de Segurança da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IAC	<i>Instrument Approach Chart</i> (Carta de Aproximação por Instrumentos)
IAC	Instrução de Aviação Civil da ANAC
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i> (Regras de Voo por Instrumentos)
ILS	<i>Instrument Landing System</i> (Sistema de Pouso por Instrumentos)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
MCA	Manual do Comando da Aeronáutica
METAR	Informe Meteorológico Aeronáutico Regular
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Agência Aeronáutica e Espacial dos EUA)
NSC	<i>Nil Significant Cloud</i> (Nenhuma nuvem significativa)
QAV-1	Querosene de aviação para motores à turbina
RAG	Resilience Analyzis Grid
SID	<i>Standard Departure Chart Instrument</i> (Carta de Saída Padrão por Instrumentos)
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SPECI	Informe Meteorológico Especial de Aeródromo
TMA	<i>Terminal Control Area</i> (Área de Controle Terminal)
USP	Universidade de São Paulo
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> (Tempo Universal Coordenado)
VFR	<i>Visual Flight Rules</i> (Regras de Voo Visual)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 ESCOPO DE PESQUISA	17
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1 MÉTODO CIENTÍFICO	19
2.2 ENFOQUE SISTÊMICO	20
2.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE	24
2.4 EVENTOS DE RUPTURA.....	32
2.5 RESILIÊNCIA EM SISTEMAS LOGÍSTICOS.....	40
2.6 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS	64
3. MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE RESILIÊNCIA.....	72
3.1 DISCUSSÃO DOS OBJETIVOS	72
3.2 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE	73
3.3 ESCOLHA DAS FUNÇÕES DE DESEMPENHO	73
3.4 FORMULAÇÃO DAS MÉTRICAS DE RESILIÊNCIA	73
3.5 CONCEPÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	73
3.6 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	74
3.7 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	74
3.8 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE RESILIÊNCIA.....	74
3.9 ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS PARA O AUMENTO DA RESILIÊNCIA.....	75
4. APLICAÇÃO NO SISTEMA DE TRÁFEGO AÉREO.....	76
4.1 OBJETIVO DA ANÁLISE	76
4.2 SISTEMA DE TRÁFEGO AÉREO E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	80
4.3 FUNÇÕES DE DESEMPENHO	82
4.4 MÉTRICAS DE RESILIÊNCIA.....	82
4.5 CONCEPÇÃO DO MODELO	83
4.6 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	84

4.7	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	87
4.8	NÍVEL DE RESILIÊNCIA	105
4.9	ESTRATÉGIAS DE MELHORIA DO NÍVEL DE RESILIÊNCIA	105
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
5.1	CONCLUSÕES.....	107
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	109
	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICE A - CAPACIDADES E VULNERABILIDADE DO SCRAM™.....	115
	APÊNDICE B - RESILIENCE ANALYSIS GRID (RAG).....	118

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos obtidos no século XX moveram a sociedade para um sistema complexo que poderia ser caracterizado como uma grande “rede de redes”. Os sistemas sociais, econômicos e ambientais que as pessoas acreditavam serem distintos um dos outros estão se tornando, a cada dia, mais interconectados e interdependentes. As sociedades estão cada vez mais dependentes de sistemas de infraestruturas críticas como os de energia, informação, comunicação e logística. A ruptura de um desses sistemas acaba espalhando ondas de impacto sobre os demais (GATTORNA, 2015; ZOLLI; HEALY, 2012).

Em função desse cenário de complexidade, o fórum econômico mundial estabeleceu em 2010 um conselho específico para analisar os desafios globais enfrentados pelo setor de logística e *supply chain management*. Uma das preocupações reinantes nesse conselho foi o grande histórico de rupturas logísticas sofridas pelas economias globais ao longo da primeira década do século XXI. Essas rupturas foram geradas por eventos de baixa probabilidade e previsibilidade, porém de altos impactos econômico-sociais como os desastres naturais e os ataques terroristas (WORLD ECONOMIC FORUM, 2011).

Como principal recomendação, o relatório final do conselho alerta que as empresas, indústrias e economias globais necessitam ser mais resilientes. No contexto logístico, elas precisam que seus sistemas de transportes sejam capazes de responder mais rapidamente aos eventos inesperados, retornando de forma rápida ao seu estado operacional normal logo após sofrer uma ruptura. Dessa forma, o nível de resiliência dos sistemas de transporte passa a ser fator primordial para a sobrevivência das economias globais (WORLD ECONOMIC FORUM, 2011).

Essa preocupação com os sistemas de transportes justifica-se pois a ocorrência de um evento de ruptura nesse tipo de sistema acaba reduzindo o nível de serviço previsto e gerando custos adicionais aos passageiros, embarcadores e destinatários das cargas transportadas bem como aos próprios provedores do serviço de transporte (JANIĆ, 2015).

Pelo exposto, torna-se cada vez mais pertinente o desenvolvimento de estudos que busquem analisar o nível de resiliência em sistemas. O foco deste trabalho são os sistemas de transportes, em especial os sistemas de transporte críticos em segurança por serem essenciais à sociedade.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é apresentar um modelo para a análise quantitativa do nível de resiliência em sistemas de transporte. Pretende-se que a dissertação alcance os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o nível de resiliência em relação aos impactos gerados por eventos de rupturas na eficiência e na segurança de um sistema de transporte;
- b) Contextualizar a resiliência como característica importante dos sistemas de transportes críticos em segurança, em especial o sistema de tráfego aéreo;
- c) Evidenciar que a técnica de simulação de eventos discretos pode ser plenamente utilizada como ferramenta para análise de resiliência em sistemas de transportes, inclusive sob efeito de eventos de ruptura simultâneos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de transportes atuais necessitam ser mais resilientes para enfrentar a complexidade das redes e o aumento na ocorrência de eventos de ruptura. Para tanto, é necessário propor modelos capazes de analisar a resiliência desses sistemas em relação à sua capacidade operacional e seu nível de serviço.

1.3 ESCOPO DE PESQUISA

As análises de resiliência foram feitas considerando o cenário atual de operação do sistema de transporte, as suas características operacionais e demandas existentes. Adicionalmente, foi analisado um segundo cenário considerando rupturas no sistema através da simulação de condições meteorológicas adversas que afetaram

simultaneamente dois aeroportos brasileiros, com graus de impacto diferentes em suas operações de pouso e decolagem.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução do tema de pesquisa e os objetivos do trabalho, evidenciando ainda sua justificativa, seu escopo e estrutura organizacional.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura pertinente ao tema de pesquisa, apresentando o referencial teórico necessário ao desenvolvimento do modelo para análise de resiliência.

O capítulo 3 apresenta a estrutura do modelo proposto para determinação do nível de resiliência, suas etapas e premissas operacionais.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através da aplicação do modelo proposto em cenários de simulação relacionados ao sistema de tráfego aéreo, bem como as análises realizadas para a determinação do nível de resiliência nesse sistema de transporte.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas e aponta sugestões para trabalhos futuros relacionados aos estudos de resiliência em sistemas de transporte.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o alicerce conceitual da pesquisa e as referências teóricas que solidificam o modelo de determinação de resiliência proposto. Trata-se de conceitos sobre o método científico, enfoque sistêmico, sistemas de transporte, eventos de ruptura, resiliência e simulação de eventos discretos.

2.1 MÉTODO CIENTÍFICO

Segundo Gualda (1995), o processo para a solução de um problema enseja a adoção de um método. Lakatos e Marconi (2010) definem método como o conjunto de atividades sistemáticas e racionais que permitem atingir um objetivo.

Nesse contexto, Gualda (1995) resume a aplicação do método científico através de seis etapas, conforme sumarizado na Figura 1:

Figura 1 – Representação das etapas do método científico.

Fonte: Adaptado de Gualda (1995).

Esta dissertação parte do princípio de que a aplicação do método científico é, senão a mais rápida, a melhor forma de desenvolver soluções estruturadas e de qualidade para novos desafios. Torna-se, portanto, o caminho correto a ser seguido para a produção de conhecimento científico de forma segura e eficiente.

2.2 ENFOQUE SISTÊMICO

Churchman (1972) define que um sistema é um conjunto de partes coordenadas para realizar um grupo de finalidades. Por sua vez, Bertalanffy (1973) ressalta a importância das relações entre essas partes e define um sistema como um “complexo de elementos em interação”.

Meredith et al (1985) aglutinam essas duas visões definindo sistema como um conjunto de componentes, conectados por diversos tipos de interações ou inter-relacionamentos que, coletivamente, respondem a um estímulo ou demanda e satisfazem algum objetivo ou função.

Uma visão mais recente define sistema como a construção ou reunião de elementos que, juntos, produzem resultados que não podem ser obtidos pelos elementos separadamente. Essa definição busca ressaltar o valor coletivo da construção de um sistema (NASA, 2007).

Dos conceitos apresentados é possível entender que os elementos de um sistema são entidades capazes de responder a estímulos ou demandas e de realizar alguma função.

Dependendo do tipo de sistema, esses elementos podem ser pessoas, máquinas, hardwares, softwares, instalações, organizações, empresas ou até mesmo instituições públicas que estarão interagindo entre si para a produção de um resultado específico.

Nesse sentido, o enfoque sistêmico (*systems approach*) apresenta-se como um método para analisar problemas, especificando suas características sob a ótica de um sistema. Através de um conjunto de procedimentos e etapas, é possível identificar corretamente o papel dos elementos desse sistema, suas interações, restrições e premissas (GUALDA, 1995).

Meredith et al (1985) acrescentam ainda que o enfoque sistêmico torna-se útil nos cenários onde o problema é complexo e afetado por inúmeros fatores, pressupondo então a criação de um modelo do problema em um contexto mais próximo possível da realidade.

2.2.1 Características dos sistemas

Ao se pensar o significado de um sistema, Churchman (1972) preconiza cinco considerações básicas a serem avaliadas:

- a) Os objetivos e as medidas de rendimento totais do sistema;
- b) O ambiente do sistema e suas restrições ou coações fixas;
- c) Os recursos do sistema;
- d) Os elementos do sistema, suas rotinas operacionais, funções e métricas de desempenho;
- e) A administração total do sistema.

O mesmo autor ressalta que o processo de avaliação dessas considerações não é obrigatoriamente sequencial. Portanto, o contínuo reexame das considerações básicas elencadas deve ser feito ao longo de todo o estudo de um sistema.

De maneira objetiva, tanto Meredith et al (1985) quanto Gualda (1995) apontam as seguintes características inerentes a um sistema:

- a) Um sistema necessita ter um propósito a ser alcançado, uma função a ser atingida ou alguma tarefa a ser realizada;
- b) Um elemento isolado não constitui um sistema. É necessário identificar atributos ou características capazes de distinguir pelo menos dois elementos integrantes do sistema e suas respectivas interações;
- c) O relacionamento entre os componentes precisa ser consistente, obedecendo a natureza da interface entre eles;
- d) Em todo sistema há coações fixas ou restrições que afetam o comportamento e a resposta individual dos elementos;

- e) Um sistema pode ser composto de subsistemas distintos entre si, mas que se interagem e produzem resultados para atingir o objetivo final do sistema dentro do ambiente em que estão situados.

Um importante exemplo de sistema é o sistema de transporte aéreo. As aeronaves, os aeródromos (aeroportos), o sistema de controle do tráfego aéreo e as companhias aéreas podem ser considerados subsistemas com inúmeros elementos cujos comportamentos são independentes, mas que interagem entre si para a execução do transporte de passageiros e cargas em condições seguras.

2.2.2 Análise sistêmica

Entendendo o conceito de sistema, a análise sistêmica de um problema torna-se factível através das seguintes etapas sugeridas por Gualda (1995):

- a) Caracterização do sistema, com a respectiva identificação dos seus componentes, objetivos, recursos, ambiente, restrições e aspectos de gestão;
- b) Definição do problema e identificação das métricas de rendimento a serem consideradas;
- c) Geração de alternativas para a solução do problema;
- d) Análise das alternativas em relação às métricas de rendimento estipuladas;
- e) Seleção da alternativa que melhor atende às premissas consideradas.

Sempre que possível, deve-se aplicar a realimentação de informações entre os procedimentos descritos nas etapas da análise sistêmica. Essa iniciativa permitirá uma análise final mais apurada sobre o sistema.

2.2.3 Capacidade e nível de serviço de um sistema

O valor agregado de um sistema não é definido apenas pela soma dos rendimentos individuais de cada elemento, mas também pelo grau de relacionamento, interação e conectividade entre esses elementos. Esse valor agregado pode ser definido através da capacidade e dos níveis de serviço especificados para o sistema (NASA, 2007).

Tanto Gualda (1995) quanto Medau (2011) defendem que a capacidade de um sistema está diretamente associada aos níveis de serviço estabelecidos ao próprio

sistema e seus componentes. Esse pressuposto surge porque, em síntese, o nível de serviço deve expressar a qualidade oferecida aos usuários do sistema frente à uma determinada demanda projetada.

O desbalanceamento da capacidade de um sistema ocorrerá, portanto, quando pelo menos um de seus componentes apresentar nível de serviço abaixo ou acima do desejável para o atendimento da demanda. Um nível de serviço abaixo do ideal pode provocar um gargalo ou restrição local, reduzindo a capacidade do sistema em atender a demanda geral projetada. Essa redução no nível de serviço acaba por representar também a perda de eficiência do sistema (GUALDA, 1995).

Por outro lado, um nível de serviço acima do desejável também pode provocar um desbalanceamento da capacidade do sistema. Um nível de serviço acima do desejável em um elemento pode criar excesso de demanda no elemento subsequente do sistema, gerando filas, tempos de espera e reduzindo a qualidade do serviço oferecido; além de indicar o desperdício de recursos materiais aplicados.

Como exemplo simples dessa correlação entre capacidade e nível de serviço, Chopra e Meindl (2011) citam que a definição do estoque de segurança de um sistema logístico deve estar projetada em relação ao nível de serviço desejado para atender o cliente final (taxa de atendimento). Os autores utilizam o exemplo da venda de um determinado tipo de brinquedo em uma grande rede varejista norte-americana, conforme indicado na Tabela 1:

Tabela 1 – Estoque de segurança para diferentes taxas de atendimento

Taxa de Atendimento (%)	Estoque de Segurança (caixas)
97,5%	67
98,0%	183
98,5%	321
99,0%	499
99,5%	767

Fonte: Adaptado de Chopra e Meindl (2011).

É possível observar nesse exemplo que a capacidade do sistema (Estoque de Segurança) precisará aumentar significativamente para atender níveis de serviço mais elevados (Taxa de Atendimento). Portanto, focar na manutenção da capacidade e do nível de serviço projetados para um sistema significa encontrar o equilíbrio adequado para eliminar o excesso ou a falta de recursos em seus elementos, visando obter a máxima eficiência possível.

2.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE

Segundo Janić (2014), os sistemas de transportes são e continuarão a ser fundamentais para o desenvolvimento econômico de uma nação. Button e Hensher (2001) também ressaltam que o transporte é um elemento importante para o desenvolvimento econômico, capaz ainda de proporcionar interações políticas e sociais valiosas para a população de um país. Para esses autores, o transporte deve ser fornecido através de um sistema de redes que conectam vários pontos (nós) e propiciam demandas de viagens entre os nós.

Kutz (2004) reafirma essa concepção de rede ao definir que um sistema de transporte é composto de redes interconectadas de instalações e postos de serviços, em âmbito regional, nacional ou mesmo internacional. Ainda segundo o mesmo autor, um sistema de transporte é projetado para movimentar pessoas, bens e serviços de forma eficiente, econômica e segura de um ponto a outro dessa rede.

Tamvakis e Xenidis (2012) enfatizam a crescente complexidade nas atividades de transportes, mencionando o surgimento de redes de transporte capazes de integrar, em larga escala, todos os modais possíveis de transportes através de rotas multinacionais de passageiros e cargas.

Em função dessa complexidade, Tamvakis e Xenidis (2012) afirmam que os sistemas de transportes se tornaram:

- a) Multimodais, em termos de possibilidades distintas para a execução do transporte de cargas e de passageiros;
- b) Multifacetados, em relação aos diferentes tipos de impactos na sociedade (benefícios/malefícios);

- c) Multiparamétricos, em função de diferentes características de projeto, operação e métricas de gerenciamento desses sistemas.

Ainda segundo os autores, os elementos envolvidos nessa rede de transporte podem ser separados em duas categorias distintas:

- a) Componentes Internos: são os elementos relacionados à estrutura física do sistema de transporte. Dentro dessa categoria estão inclusos os veículos, equipamentos de carga, a infraestrutura de terminais, os subsistemas de energia, os combustíveis e os subsistemas de localização, comunicação e controle da rede de transporte.
- b) Componentes Externos: são os elementos ou entidades que impactam a rede de transporte pela sua relação gerencial. Nessa categoria enquadram-se o governo, os clientes, a indústria, os concorrentes, as entidades financeiras e a sociedade local afetada pela rede de transporte.

A Figura 2 exemplifica a correlação sistêmica entre esses componentes externos e internos (TAMVAKIS; XENIDIS, 2012):

Figura 2 – Componentes internos e externos em sistemas de transporte

Fonte: Adaptado de Tamvakis & Xenidis (2012).

Quanto a sua representação estrutural, os sistemas de transportes são usualmente definidos em redes que interligam vários nós (MATTSSON; JENELIUS, 2015). Zhang, Miller-Hooks e Denny (2015) realizam um amplo levantamento de representações de redes de transporte e identificam os 17 tipos de grafos mais frequentes nessas redes, conforme indicado na Figura 3:

Figura 3 – Grafos de redes de transportes.

Fonte: Traduzido de Zhang, Miller-Hooks e Denny (2015).

Pelo exposto, uma rede de transporte pode ser graficamente representada por um grafo ordenado $G(V, E)$, composto por um conjunto de nós (vértices) $V = \{0, 1, \dots, n\}$ e um conjunto de arcos (arestas) $E = \{0, 1, \dots, m\}$ onde cada arco $e \in E$ possui comprimento não nulo $l_{ij}(e)$ responsável pela conexão entre dois nós distintos ($i, j \in V / i \neq j$).

Quanto ao direcionamento, essa rede pode ser não direcionada (não há sentido de percurso definido no arco que interliga dois nós) ou direcionada (há um sentido definido para cada arco existente entre o nó inicial e outro nó final distinto do primeiro).

Quanto à capacidade de transporte dos arcos, essa rede pode ser do tipo não capacitada (todos os arcos possuem o mesmo comprimento não nulo $l_{ij}(e)$) ou capacitada (os arcos possuem diferentes comprimentos não nulos $l_{ij}(e)$).

Ainda segundo Mattsson e Jenelius (2015), os nós e arcos desse grafo representativo da rede podem conter outros atributos dependendo das características reais da rede de transporte que se pretende representar. Em um sistema de tráfego aéreo, por exemplo, cada nó $i \in V$ pode representar um aeródromo com uma demanda específica d_i associada. Essa demanda pode expressar a quantidade de passageiros, a quantidade de pousos, decolagens ou qualquer outro atributo específico do sistema.

2.3.1 Sistemas de transporte críticos em segurança

Embora incrementem sua complexidade e busquem evoluir em requisitos de segurança, historicamente os sistemas de transporte sempre estiveram associados ao risco de morte e danos materiais. Por esses riscos, os sistemas de transportes podem ser enquadrados na categoria dos chamados sistemas críticos em segurança (BUTTON; HENSHER, 2001).

Knight (2002) define sistema crítico em segurança (*safety critical system*) como aquele onde a ocorrência de uma falha pode gerar consequências inaceitáveis para a sociedade. Em outras palavras, são sistemas cujas falhas podem resultar em perdas de vida, danos materiais significativos ou grandes impactos ambientais. Como exemplo, o mesmo autor cita os sistemas de equipamentos médicos, o sistema de tráfego aéreo, os sistemas de armas e de energia nuclear.

Por transportar constantemente grandes quantidades de passageiros e cargas, outros sistemas de transportes, além do aéreo, também são denominados críticos em segurança como o sistema ferroviário e o sistema metroviário (COX; PRAGER; ROSE, 2011; IP; WANG, 2011).

Janić (2014) apresenta as condições de operação desses sistemas de transportes críticos, elencando as seguintes características comuns:

- a) Elevada capacidade de transporte: grandes quantidades de pessoas, bens ou serviços são transportados ao mesmo tempo em uma única operação.
- b) Uso intensivo de tecnologia: elevada quantidade de softwares, hardwares e sensores interagem entre si para garantir a correta execução do transporte.

- c) Alto grau de complexidade: inúmeros e complexos processos são estabelecidos entre os vários elementos do sistema para proporcionar uma redução do risco na atividade de transporte.
- d) Elevados custos de implantação: altos custos de desenvolvimento e implantação desses sistemas até a completa comercialização do serviço de transporte.

Essas características conjuntas auxiliam no entendimento da criticidade e complexidade dos sistemas de transportes uma vez que a ocorrência de um erro ou falha pode acarretar em danos significativos para a sociedade.

2.3.2 Sistema de tráfego aéreo

Neufville e Odoni (2003) apontam que um sistema de tráfego aéreo tem por objetivo garantir a segurança operacional (*Safety*) e a eficiência durante o fluxo de aeronaves em um espaço aéreo. Os mesmos autores apontam o aumento da complexidade nos sistemas de tráfego pois a cada vez mais eles precisam:

- a) Atender ao crescente número de usuários (passageiros, cargas, voos, aeronaves, empresas, etc.) com diferentes capacidades e requisitos;
- b) Atingir níveis excepcionais de segurança sob o forte acompanhamento das instituições regulatórias, dos usuários e dos meios de comunicação;
- c) Coordenar uma grande estrutura de operadores altamente qualificados (pilotos, controladores de tráfego, meteorologistas, etc.) com uma rede sofisticada de computadores e outros equipamentos de comunicação, vigilância, navegação e controle.
- d) Aplicar os avanços tecnológicos sem interromper as operações, garantindo uma evolução gradual para que os usuários consigam se adaptar de forma segura às mudanças;
- e) Realizar todos os itens anteriores à um custo razoável para os envolvidos na prestação do serviço e os usuários.

No âmbito internacional, os padrões operacionais e as regras de tráfego aéreo são estabelecidos pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) a todos os seus

países membros signatários. Dentre suas principais recomendações, destacam-se as contidas nos seguintes documentos (MEDAU, 2011):

- a) Annex 2 – Rules of the Air (Regras do Ar);
- b) Annex 11 – Air Traffic Services (Serviços de Tráfego Aéreo);
- c) Doc 4444 – Air Traffic Management (Gerenciamento do Tráfego Aéreo);
- d) Doc 7030 – Regional Supplementary Procedures (Procedimentos Regionais Suplementares);

No contexto brasileiro os padrões recomendados pela ICAO são ratificados pelo Comando da Aeronáutica e operacionalizados pelo DECEA, responsável por manter em funcionamento o Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Da mesma forma, as principais regras e serviços de tráfego aéreo aplicados no Brasil estão especificados nos seguintes documentos (MEDAU, 2011):

- a) ICA 100-12: Regras do Ar;
- b) ICA 100-37: Serviços de Tráfego Aéreo;

Analisando as documentações supracitadas, pode-se descrever os seguintes elementos básicos do sistema de tráfego aéreo brasileiro (BRASIL, 2016, 2017):

- a) Aeródromo: Área definida de terra ou água destinada total ou parcialmente à chegada, partida e movimentação de aeronaves em sua superfície. Fazem parte do aeródromo todas as suas edificações, instalações e equipamentos.
- b) Aeroporto: Aeródromo público dotado de instalações e facilidades para apoio de operações de aeronaves e de embarque e desembarque de pessoas e cargas.
- c) Aeronave: Qualquer aparelho que possa sustentar-se na atmosfera a partir de reações do ar que não sejam as reações do ar contra a superfície da terra
- d) Área de Controle: Espaço aéreo controlado que se estende para cima a partir de um limite especificado sobre o terreno. Esse conceito abrange também as aerovias e áreas de controle terminal.
- e) Aerovia (AWY): Área de Controle, ou parte dela, disposta em forma de corredor para um melhor fluxo das aeronaves.
- f) Área de Controle Terminal (TMA): Área de Controle situada geralmente na confluência de aerovias e nas imediações de um ou mais aeródromos.

- g) Zona de Tráfego de Aeródromo (ATZ): partes do espaço aéreo ao redor de um aeródromo dentro das quais determinam-se requisitos especiais para a proteção das aeronaves chegando, saindo ou em voo ao redor do próprio aeródromo.
- h) Espaço Aéreo Controlado: Espaço aéreo de dimensões definidas, dentro do qual se presta o serviço de controle de tráfego aéreo de conformidade com a sua classificação.
- i) Espaço Aéreo Inferior: Espaço aéreo cujo limite vertical inferior é o nível do solo ou água e o limite vertical superior é o nível de voo 245 (24.500 pés), inclusive;
- j) Espaço Aéreo Superior: Espaço aéreo cujo limite vertical inferior é o nível de voo 245 (exclusive) e o limite vertical superior é ilimitado;
- k) Plano de Voo: informações específicas, relacionadas com um voo planejado ou com parte de um voo de uma aeronave, fornecidas aos órgãos que prestam serviço de tráfego aéreo.
- l) Regra de voo visual (VFR): Regras de navegação aérea onde a aeronave desloca-se no espaço aéreo, mantendo referências visuais com o terreno.
- m) Regra de voo por instrumentos (IFR): Regras de navegação aérea que permitem à aeronave deslocar-se no espaço aéreo, mantendo as referências apenas nos equipamentos de bordo;
- n) Região de Informação de Voo (FIR): Espaço aéreo de dimensões definidas, dentro do qual são proporcionados serviços de informação de voo e de alerta.

Todos esses elementos integram o espaço aéreo brasileiro que é composto por 05 regiões de informação de voo (FIR) abrangendo até o meridiano 10 Oeste (West). Cada FIR possui seu fluxo de aeronaves controlado por um Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA) conforme elencado abaixo e ilustrado na Figura 4:

- a) FIR Amazônica (SBAZ) – Controlada pelo CINDACTA IV;
- b) FIR Atlântico (SBAO) – Controlada pelo CINDACTA III;
- c) FIR Brasília (SBBS) – Controlada pelo CINDACTA I;
- d) FIR Curitiba (SBCW) – Controlada pelo CINDACTA II;
- e) FIR Recife (SBRE) – Controlada pelo CINDACTA III.

Figura 4 – Regiões de informação de voo (FIR)

Fonte: DECEA (2015)

Pelo que se pode observar na Figura 4, a área de responsabilidade do sistema de tráfego aéreo brasileiro contempla até espaços aéreo sobre regiões oceânicas. Essa ampla abrangência territorial (aproximadamente 9,9 milhões de km²) incrementa a complexidade da rede de transporte uma vez que a distribuição da demanda não é igualitária em todas as regiões (DECEA, 2015).

A diferença de demanda por região acaba refletindo na malha aeroportuária do país, onde a atual distribuição geográfica dos aeroportos privilegia a região litorânea do território brasileiro, conforme pode ser visto através da localização dos principais aeroportos indicados na Figura 5:

Figura 5 – Distribuição geográfica dos aeroportos brasileiros

Fonte: DECEA (2015)

Com essas características, a análise de um evento de ruptura no sistema de tráfego aéreo torna-se desafiadora, exigindo novas e eficientes abordagens.

2.4 EVENTOS DE RUPTURA

Um evento de ruptura podem ser compreendido como qualquer estímulo perturbador que afete significativamente o desempenho do sistema, impactando sua capacidade ou nível de serviço. Entender os conceitos, características e o perfil desse evento disruptivo torna-se fundamental para a compreensão dos impactos e determinação do nível de resiliência de um sistema.

2.4.1 Conceito e exemplos

Meredith et al (1985) afirmam que todos os problemas em um sistema possuem como característica o fato de um estímulo perturbador produzir um efeito no ambiente. Ainda segundo o mesmo autor, a identificação desse efeito é importante por dois motivos:

- a) As características do efeito podem ajudar na definição da causa raiz do problema (estímulo perturbador) e direcionar a escolha da solução inicial;
- b) Quando uma solução factível é proposta, deve-se considerar todas as consequências ou novos efeitos que irão resultar ao longo do ambiente do sistema.

Uma distinção para compreender as origens desses eventos de ruptura em sistemas de transporte é proposta por Mattsson e Jenelius (2015). Esses autores diferenciam as causas dos eventos de ruptura entre internas e externas ao sistema, correlacionando ainda entre eventos acidentais e interferências intencionais. A Tabela 2 apresenta essa distinção:

Tabela 2 – Causas de eventos de ruptura em sistemas de transporte

Causas	Eventos Acidentais	Interferências Intencionais
Internas ao sistema	Falhas técnicas, Sobrecarga	Greves, Conflitos do mercado de trabalho
Externas ao sistema	Condições meteorológicas adversas, Desastres naturais	Sabotagens, Ataques terroristas, Atos de guerra

Fonte: Adaptado de Mattsson e Jenelius (2015).

Para exemplificar essa diferenciação, a Tabela 3 cita os dez maiores eventos de ruptura ocorridos em cadeias de suprimento ao longo de 2015 e classificados em função da magnitude dos seus prejuízos econômicos (DHL, 2015):

Tabela 3 – Dez maiores eventos de ruptura em sistemas de transporte (2015)

Nº	Evento de Ruptura	Causas
1º	Explosão em porto de Tianjin (China)	Internas/Acidentais
2º	Inundações em Chennai (Índia)	Externas/Acidentais
3º	Greve no porto de Navha Sheva (Índia)	Internas/Intencionais
4º	Embargo ao trânsito de mercadorias entre Turquia e Rússia (Turquia)	Externas/Intencionais
5º	Greve no porto de Mombaça (Quênia)	Internas/Intencionais
6º	Bloqueio de estradas e greve de caminhoneiros (Brasil)	Internas/Intencionais
7º	Paralisação de funcionários da alfândega (Chile)	Internas/Intencionais
8º	Congestionamento de navios no canal do Panamá (Panamá)	Internas/Acidentais
9º	Furacão Patrícia (Categoria 5) (México)	Externas/Acidentais
10º	Nevasca e inverno extremo (EUA)	Externas/Acidentais

Fonte: Adaptado de DHL (2015).

Visando também monitorar os principais tipos de eventos de ruptura em cadeias de suprimentos e sistemas logísticos, o *Business Continuity Institute* realiza anualmente uma pesquisa com mais de 500 instituições participantes. Nessa pesquisa, cada participante indica que tipo de ruptura a sua cadeia de suprimentos sofreu no último ano. Em sua mais recente pesquisa, as três principais fontes de ruptura reportados globalmente pelos profissionais foram (BUSINESS CONTINUITY INSTITUTE, 2015):

Figura 6 – Principais fontes de ruptura em cadeias de suprimento (2015)

Fonte: Traduzido de Business Continuity Institute (2015).

Da Figura 6 é possível entender que 64% dos entrevistados indicaram que suas cadeias de suprimento sofreram interrupções não planejadas de TI ou telecomunicações. 54% dos participantes reportaram rupturas em suas cadeias de suprimento por violação de dados e ataques cibernéticos. Em terceiro lugar, 50% dos participantes assinalaram que suas cadeias de suprimento sofreram rupturas pela ocorrência de condições meteorológicas adversas.

Analisando somente a região denominada América Latina e Central, o mesmo estudo apontou as cinco principais fontes de ruptura reportadas pelos profissionais de acordo com a Tabela 4:

Tabela 4 – Principais fontes de ruptura na região da América Latina e Central

Posição	Região: América Latina e Central
1º	Ruptura na Rede de Transporte (60%)
2º	Falha de TI / Telecomunicação (55%)
3º	Incêndios (55%)
4º	Novas Leis e Regulamentações (50%)
5º	Ataques Cibernéticos e violação de dados (50%)

Fonte: Traduzido de Business Continuity Institute (2015).

Analizando apenas as repostas dos profissionais pertencentes à Indústria de Transporte e Armazenagem, o estudo aponta os cinco principais eventos de ruptura de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 – Principais fontes de ruptura na indústria de transporte e armazenagem

Posição	Indústria: Transporte e Armazenagem
1º	Condições Meteorológicas Adversas (60%)
2º	Falha de TI / Telecomunicação (50%)
3º	Perda de Profissionais / Talentos (40%)
4º	Novas Leis e Regulamentações (40%)
5º	Falhas de Serviço de Fornecedores (35%)

Fonte: Traduzido de Business Continuity Institute (2015).

Comparando os dados da Tabela 4 e Tabela 5 com a Figura 6, pode-se inferir que na região da América Latina e Caribe a ruptura na rede de transporte é o evento de maior ocorrência (60%). Analisando as respostas dos profissionais que atuam especificamente no setor de transporte e armazenagem, conclui-se que a maior causa de ruptura são as condições meteorológicas adversas (60%). Estas, por sua vez, apresentam-se como a terceira maior causa de eventos de ruptura em todas as cadeias logísticas (50%).

Janić (2015) também analisa os sistemas de transportes e elenca os principais eventos de ruptura que afetam a capacidade desses sistemas:

- a) Condições meteorológicas adversas (nevoeiros densos, chuvas fortes, nevascas, furacões, tornados, etc.);
- b) Falhas imprevisíveis e catastróficas em componentes do sistema de transporte (bloqueio de vias, desmoronamentos, etc.);
- c) Desastres naturais (furacões, tornados, terremotos, tsunamis, etc.);
- d) Conflitos, incidentes e acidentes de tráfego;
- e) Ataques terroristas.

Pelo exposto, os eventos de ruptura oriundos de condições meteorológicas adversas recebem especial atenção em sistemas de transportes, principalmente pela relativa frequência com que ocorrem e pelos significativos prejuízos causados.

Em 2014, por exemplo, foram registrados 980 eventos naturais de grandes perdas ou catástrofes no mundo. A distribuição geográfica desses eventos e a magnitude das perdas provocadas podem ser visualizadas na Figura 7 (MUNICH RE, 2015):

Figura 7 – Panorama mundial de eventos naturais severos (2014)

Fonte: Munich RE (2015)

Destaca-se na figura anterior a ocorrência de 18 grandes eventos classificados como catástrofes, onde as perdas econômicas conjuntas superaram 1,5 milhões de dólares. Desses, 09 grandes eventos são de origens meteorológicas (tempestades tropicais, chuvas convectivas, etc.), 01 grande evento de origem geofísica (terremoto), 04 grandes eventos de origens climatológicas (secas, invernos severos, etc.) e 04 grandes eventos de origens hidrológicas (inundações, movimentos de massa, etc.).

Analisando os eventos ocorridos ao longo de 2015, percebe-se um aumento de 8,16% na quantidade de eventos naturais extremos. Foram registrados 1060 eventos em 2015 em relação aos 980 eventos em 2014. A Figura 8 apresenta esses eventos severos de 2015 em suas respectivas classificações (MUNICH RE, 2016):

Figura 8 – Panorama mundial de eventos naturais severos (2015).

Fonte: Munich RE (2016)

Mantendo a tendência, foram identificados 20 grandes eventos em 2015 que podem ser considerados como catástrofes. São 09 eventos com origens meteorológicas (tempestades tropicais, chuvas convectivas, etc.), 02 de origens geofísica (terremotos), 04 origens climatológicas (temperaturas extremas, secas, incêndios florestais, etc.) e 05 eventos de origens hidrológicas (inundações, movimentos de massa, etc.).

Comparando os eventos de ruptura elencados nos estudos, percebe-se que as condições meteorológicas adversas permanecem como as principais fontes de eventos de ruptura em sistemas logísticos, principalmente pela sua frequência e poder de impacto. Por esses motivos, as condições meteorológicas adversas recebem especial atenção neste trabalho.

2.4.2 Perfil de ruptura em sistemas

Como visto até aqui, os tipos de eventos de ruptura são variados e com graus de impacto bem diferentes. Entretanto, a manifestação desse impacto em um sistema possui características similares e fases importantes ao longo do tempo.

Sheffi e Rice Jr (2005) propõem a representação desse perfil de impacto dos eventos de ruptura através de um gráfico de 8 fases conforme evidenciado na Figura 9:

Figura 9 – Perfil de eventos de ruptura em sistemas

Fonte: Traduzido de Sheffi e Rice Jr (2005)

Esses 08 elementos do perfil de impacto abrangem, resumidamente, as seguintes características e aspectos (SHEFFI; RICE JR., 2005):

- a) Preparação: fase em que o próprio sistema detecta a possível ocorrência de uma ruptura e se prepara ao início do evento. Em alguns sistemas contra desastres civis, por exemplo, alertas podem ser emitidos 30 minutos antes da chegada de um tornado ampliando a capacidade de resposta.
- b) Evento de ruptura: momento em que o evento perturbador impacta diretamente o sistema.
- c) Resposta primária: fase em que os recursos imediatos aplicam as primeiras medidas de resposta ao evento perturbador. Nessa primeira resposta, os sistemas buscam normalmente controlar a situação adversa, salvando ou protegendo vidas, desligando subsistemas inoperantes e prevenindo danos maiores.
- d) Impacto inicial: o impacto total de alguns eventos pode ser sentido imediatamente. Outros eventos podem levar um determinado tempo para afetar totalmente um sistema em função de fatores como a magnitude da ruptura, a disponibilidade de redundâncias e a capacidade atual de resiliência do próprio sistema. Nessas condições, um impacto inicial é sentido antes de um impacto maior.

- e) Impacto total: fase que o impacto total é identificado pelos elementos do sistema, normalmente de forma abrupta.
- f) Preparação para recuperação: a preparação para a recuperação normalmente ocorre em paralelo com a fase de resposta primária e normalmente antes da ruptura total, quando essa é previamente antecipada. Concentra-se na definição de alternativas para o sistema, na busca por outras fontes de recurso e em meios diferentes de execução das atividades.
- g) Recuperação: Fase em que todos os recursos disponíveis são alocados para o sistema recuperar o nível de desempenho pré-ruptura. Nessa fase, estratégias não convencionais podem ser utilizadas como assumir a perda de produtividade momentânea no sistema em troca da sua operação acima da capacidade original. A utilização de horas extras no sistema, bem como nas fontes de recurso e nos fornecedores são exemplos dessas estratégias.
- h) Impacto de longo prazo: é normal levar um bom tempo para o sistema recuperar sua capacidade original, principalmente nos casos onde o nível de confiança ou relacionamento com o cliente são prejudicados. Nessas situações, o nível de desempenho original pode levar muito tempo para ser retomado.

É possível perceber na Figura 9 que o nível de serviço do sistema (Desempenho) sofre redução em relação ao avanço do tempo. A capacidade do sistema não está representada nesse mesmo gráfico mas pode, de forma similar, sofrer um impacto frente a deterioração dos elementos desse sistema. Assim, o estado de funcionamento do sistema também varia ao longo do tempo durante a ocorrência de um evento de ruptura.

Henry e Ramirez-Marquez (2012) propõem uma representação do perfil de ruptura mais simples e focada justamente na evolução do estado de funcionamento do sistema ao longo do tempo. Buscando generalizar o perfil de impacto dos eventos de ruptura para qualquer tipo de sistema, esses autores propõem uma transição de estados de funcionamento conforme Figura 10:

Figura 10 – Transições do estado operacional de sistemas em eventos de ruptura.

Fonte: Traduzido de Henry e Ramirez-Marquez (2012).

Analisando o perfil dos eventos de ruptura descritos, identifica-se que o tempo de recuperação, a capacidade e o nível de serviço atingido pelo sistema após a recuperação final são itens relevantes para a determinação da resiliência de um sistema.

2.5 RESILIÊNCIA EM SISTEMAS LOGÍSTICOS

Inicialmente, a resiliência pode ser entendida como a habilidade que um sistema possui para retornar rapidamente ao seu estado original após sofrer uma mudança turbulenta ou um evento de ruptura (interrupção) em suas atividades (FIKSEL, 2006).

O estudo da resiliência em sistemas de transportes é relativamente novo no Brasil, porém vem se estabelecendo internacionalmente como um vasto e importante campo de análise para sistemas logísticos. Os primeiros trabalhos internacionais surgiram no início dos anos 2000, ainda dentro do contexto de áreas afetadas à segurança como as de gerenciamento de risco e as de identificação de vulnerabilidades (CHRISTOPHER; PECK, 2004)

Nessa época, o centro de estudos para a logística e *supply chain management* da universidade de Cranfield na Inglaterra iniciou pesquisas sobre resiliência a pedido do governo britânico. As principais preocupações do governo diziam respeito às vulnerabilidades logísticas sofridas e os impactos econômicos gerados após os protestos dos preços de combustíveis em setembro de 2000 e o surto de febre aftosa em fevereiro de 2001 (CRANFIELD UNIVERSITY, 2002).

De forma similar, estudos científicos foram publicados nos EUA após os atentados de 11 de setembro de 2001 ressaltando a importância da pronta resposta das empresas e de suas cadeias de suprimento frente às ameaças externas imprevisíveis como os ataques terroristas (SHEFFI, 2001)

Em sua maioria, as pesquisas desenvolvidas após esses eventos buscaram estabelecer os conceitos e as teorias fundamentais sobre resiliência em sistemas logísticos, resultando em importantes instrumentos para as organizações avaliarem qualitativamente a resiliência de seus sistemas (PETTIT, 2008).

No Brasil, os estudos de resiliência em sistemas logísticos concentram-se ainda nas revisões de literatura e consolidação de terminologias. Santos e Alcântara (2015) realizam uma pesquisa exploratória em bases de dados científicas para a identificação das características conceituais de resiliência em cadeia de suprimentos. Suas conclusões apontam para a emergência desse campo de estudo e a heterogeneidade conceitual do termo resiliência.

Da mesma forma, uma revisão de literatura é feita por Costa, Silva e Pereira (2015) para a identificação dos principais facilitadores de resiliência em cadeia de suprimentos. Nesse trabalho, os autores elencam 13 fatores que podem facilitar ou criar a resiliência em cadeias de suprimentos.

Na busca pela prática dos conceitos de resiliência, pode-se destacar o trabalho de Carim Junior e Saurin (2013) que desenvolveram um questionário para a identificação e análise qualitativa de vulnerabilidade e fontes de resiliência em duas empresas de taxi aéreo brasileiras.

Não é pretensão dessa seção esgotar todos os estudos existentes e possibilidades de análise sobre o histórico da teoria de resiliência. Pretende-se apenas priorizar o conceito de resiliência, suas principais características e correlações com os sistemas de transportes.

2.5.1 Definições de resiliência

A resiliência é um conceito aplicável à diversas áreas do conhecimento e vem sendo redefinida em cada contexto científico específico (ABDULLAH; NOOR; IBRAHIM,

2013). A Tabela 6 apresenta, de forma resumida, algumas definições de resiliência em relação às suas respectivas áreas de estudo (PETTIT, 2008):

Tabela 6 – Definições de resiliência

Autor	Definição de Resiliência	Área de Estudo
Merriam-Webster (2007)	Capacidade que um corpo possui de recuperar o seu tamanho e sua forma após sofrer uma deformação.	Engenharia
Folke et al. (2004)	Capacidade de se recuperar de uma perturbação, mantendo a diversidade, integridade e processos ecológicos.	Ecologia
Gorman et al. (2005)	Capacidade de se recuperar das adversidades.	Psicologia
Stoltz (2004)	Capacidade de se recuperar das adversidades e seguir em frente, mais forte do que nunca.	Liderança
Rice e Caniato (2003)	Capacidade de reagir a uma perturbação inesperada e restaurar as condições normais de operação.	<i>Supply Chain Management</i>
Scheffi (2005)	Capacidade de conter as perturbações e se recuperar a partir delas.	<i>Supply Chain Management</i>
Christopher e Peck (2004)	Capacidade de um sistema para retornar ao seu estado original ou mudar para um estado novo, mais desejável, depois de ser perturbado.	<i>Supply Chain Management</i>
Fiksel (2006)	Habilidade dos sistemas industriais complexos para sobreviver, se adaptar e crescer em face às mudanças turbulentas.	<i>Supply Chain Management</i>

Fonte: Adaptado de Pettit (2008).

Embora a resiliência possa ser diferentemente conceituada dependendo da área de estudo científico, observa-se que todas as definições anteriores apresentam como premissa a “capacidade de recuperação frente a uma adversidade” (ABDULLAH; NOOR; IBRAHIM, 2013).

Abdullah, Noor e Ibrahim (2013) ressaltam ainda que a “capacidade de recuperação frente a uma adversidade” pressupõe também a capacidade do sistema manter a sua função principal (*core business*) enquanto enfrenta um evento de ruptura. Essa linha de pensamento ressalta a habilidade de resposta do conceito de resiliência

Por outro lado, Hollnagel, Woods e Levenson (2006) definem resiliência como a habilidade de um sistema prevenir ou se preparar para manter a sua função principal enquanto enfrenta mudanças nas condições operacionais. Essa definição busca ressaltar a capacidade de antecipação no conceito de resiliência.

Para conseguir se antecipar, um sistema resiliente deve possuir uma capacidade de monitoramento bem desenvolvida. Hollnagel et al (2011) defendem que o conceito de

resiliência deve compreender também a capacidade de monitorar as ameaças que são ou que podem vir a ser impactantes no curto prazo.

Hollnagel et al (2011) acrescentam ainda a habilidade de aprendizagem ao conceito de resiliência, indicando que um sistema resiliente deve ser capaz de aprender com os fatos e experiências vividas preparando-se ainda mais para as condições futuras.

Para Hosseini, Barker e Ramirez-Marquez (2016), as definições de resiliência apresentam os seguintes dilemas:

- a) Algumas definições não especificam como atingir a resiliência, porém várias delas focam na capacidade de um sistema absorver e se adaptar aos eventos de ruptura;
- b) Algumas definições enfatizam que o retorno ao estado original (anterior ao evento de ruptura) é requisito fundamental para a definição de resiliência, enquanto outras não impõem essa característica ao sistema e ainda admitem um estado final intermediário ou próximo ao original;
- c) Algumas abordagens definem resiliência focando as atividades de preparação para o evento de ruptura, enquanto as atividades de recuperação são descartadas. Outras enfatizam essas duas áreas atividades como fundamentais para o conceito de resiliência.

Pelo exposto, várias são as visões sobre o conceito de resiliência e seus atributos básicos. Para a análise em sistemas de transporte, este trabalho utiliza-se da definição de resiliência proposta por Hollnagel et al (2011):

Resiliência é a capacidade intrínseca de um sistema para regular o seu funcionamento antes de, durante ou após sofrer alterações e perturbações, de modo que possa manter as operações requeridas sob condições esperadas e inesperadas.

Essa definição apresenta-se mais abrangente e completa, tratando a resiliência não só como a habilidade de um sistema se recuperar após sofrer um evento de ruptura, mas também como a capacidade do sistema atuar antes, durante e após a ocorrência de um evento de ruptura.

Tão importante quanto definir o conceito de resiliência em sistemas é mensurá-lo. Hosseini, Barker e Ramirez-Marques (2016) realizam uma ampla revisão de conceitos e métricas aplicadas em artigos científicos no período entre 2000 e 2015 para a determinação de resiliência. Nessa revisão, eles identificam as principais abordagens de mensuração de resiliência em sistemas conforme indicado na Figura 11:

Figura 11 – Abordagens para análise de resiliência em sistemas.

Fonte: Traduzido de Hosseini, Barker e Ramirez-Marques (2016).

Da Figura 11 compreende-se a existência de duas correntes distintas para abordagens de determinação de resiliência: as análises qualitativas e as análises quantitativas. Cabe, portanto, compreender os principais aspectos dessas duas vertentes.

2.5.2 Análise qualitativa de resiliência

Os trabalhos que utilizam abordagens qualitativas buscam determinar o nível de resiliência através da avaliação de aspectos ou características ditas essenciais a um sistema resiliente. São atributos normalmente relacionados com vulnerabilidades, capacidades, flexibilidades, velocidades, adaptabilidade, etc.

Nessa perspectiva, Sheffi e Rice Jr (2005) argumentam que o nível de resiliência de um sistema pode ser avaliado através de um questionário conceitual (*framework*) de

identificação de vulnerabilidades e capacidades existentes no momento. Esses autores pregam a utilização de mapas de vulnerabilidades conforme Figura 12:

Figura 12 – Mapa de vulnerabilidade para uma empresa.

Fonte: Traduzido de Scheffi e Rice Jr (2005).

Da figura anterior pode-se identificar a correlação entre a probabilidade de cada evento de ruptura e sua consequência (impacto). Através dessas correlações, uma empresa tem condições de classificar suas maiores ameaças e planejar ações visando o aumento de seu nível de resiliência (SHEFFI; RICE JR., 2005).

Utilizando-se dessa mesma linha teórica, Pettit (2008) realizou uma ampla pesquisa visando construir uma estrutura de avaliação qualitativa conceitual (*framework*) para a determinação de resiliência em cadeias de suprimentos. Suas definições de capacidades e vulnerabilidades são descritas como:

- a) Vulnerabilidades: são fatores fundamentais que tornam um sistema susceptível a rupturas.

- b) Capacidades: são atributos que habilitam um sistema a se antecipar e superar rupturas.

A construção dessa avaliação conceitual (*framework*) utilizou-se dos seguintes postulados e proposições elencados por Pettit (2008):

- a) Postulado 1: Forças de mudança criam vulnerabilidades em sistemas logísticos;
- b) Postulado 2: Controles gerenciais criam capacidades em sistemas logísticos;
- c) Proposição 1: A resiliência aumenta à medida que as capacidades de um sistema aumentam e suas vulnerabilidades reduzem.
- d) Proposição 2: Entre as capacidades e vulnerabilidades existem conexões que podem aumentar diretamente a resiliência do sistema logístico.
- e) Proposição 3: Há três efeitos relacionados diretamente ao nível de resiliência:
 - i. Proposição 3A: Excesso de vulnerabilidades em relação às capacidades resultará em excessivo risco no sistema logístico.
 - ii. Proposição 3B: Excesso de capacidades em relação às vulnerabilidades irá corroer a rentabilidade do sistema logístico.
 - iii. Proposição 3C: O desempenho do sistema logístico aumenta quando as capacidades e vulnerabilidades são devidamente balanceadas.

As correlações entre as capacidades, vulnerabilidade, postulados e proposições elencadas por Pettit (2008) podem ser visualizadas no fluxo da Figura 13:

Fonte: Traduzido de Pettit (2008).

Denominado de Supply Chain Resilience Assessment and Management (SCRAMTM), a ferramenta de avaliação proposta por Pettit (2008) pode ser compreendida como uma abordagem semi-quantitativa uma vez que os fatores de capacidade e vulnerabilidade são classificados em uma escala numérica (1 a 5) para a determinação do nível de resiliência através de um indicador global.

No trabalho de Pettit (2008) são elencados 07 (sete) fatores de vulnerabilidade compostos de 40 (quarenta) subfatores, além de 14 (quatorze) fatores de capacidade e seus respectivos 71 (setenta e um) subfatores que através de médias e pesos geram o nível de resiliência final do sistema.

A Tabela 7 apresenta resumidamente as definições dos fatores de vulnerabilidades presentes no SCRAMTM:

Tabela 7 – Fatores de vulnerabilidade em sistemas logísticos

Fator de Vulnerabilidade	Definição
Turbulência	Ambiente caracterizado por frequentes mudanças nos fatores externos e além do seu controle próprio.
Ameaças Deliberadas	Ataques intencionais com o objetivo de provocar rupturas operacionais, prejuízos financeiros ou danos à vida.
Pressões Externas	Influências, não especificamente visando o sistema ou a empresa, capazes de criar restrições de negócio ou barreiras.
Limitação de Recursos	Restrições na produção originadas na disponibilidade de algum fator ou insumo produtivo.
Integridade	Importância das condições cuidadosamente controladas para a integridade dos produtos e processos.
Conectividade	Grau de interdependência e confiança com entidades externas.
Rupturas no Fornecedor/Cliente	Susceptibilidade de fornecedores e clientes a forças ou perturbações externas.

Fonte: Traduzido de Pettit (2008).

A Tabela 8 apresenta resumidamente a definição dos fatores de capacidades presentes no SCRAMTM:

Tabela 8 – Fatores de capacidade em sistemas logísticos

Fator de Capacidade	Definição
Flexibilidade na Terceirização	Habilidade para rapidamente mudar as entradas ou insumos do sistema ou a forma de receber essas entradas ou insumos
Flexibilidade no atendimento de pedidos	Habilidade para rapidamente mudar as saídas/produtos do sistema ou a forma de entregar essas saídas/produtos
Capacidade	Disponibilidade de ativos para permitir níveis de produção sustentáveis
Eficiência	Capacidade de produzir saídas/produtos no sistema com os mínimos recursos necessários
Visibilidade	Conhecimento do estado dos ativos operacionais e do ambiente
Adaptabilidade	Capacidade de modificar as operações em resposta aos desafios e oportunidades
Antecipação	Habilidade para discernir potenciais eventos futuros ou situações
Recuperação	Habilidade de retornar ao estado operacional normal rapidamente
Dispersão	Distribuição ampla ou descentralização de ativos
Colaboração	Capacidade de trabalhar eficazmente com outras entidades para benefício mútuo
Organização	Estruturas de recursos humanos, políticas, competências e cultura da organização/sistema.
Posição de Mercado	Estado/posicionamento de uma empresa ou seus produtos em relação a mercados específicos
Segurança (“Security”)	Defesa contra a invasão deliberada ou ataque
Força Financeira	Capacidade de absorver flutuações no fluxo de caixa

Fonte: Traduzido de Pettit (2008).

O Apêndice A apresenta todos os fatores pertencentes ao SCRAM™ devidamente definidos, com seus respectivos subfatores elencados.

Tanto no trabalho de Sheffi e Rice Jr (2005) quanto no trabalho de Pettit (2008), o nível de resiliência é baseado em avaliações de especialistas para cada um dos fatores mencionados. Essas avaliações são obtidas através de questionários e grupos de discussão, privilegiando o conhecimento dos especialistas no sistema.

Contrapondo-se à simples identificação de vulnerabilidade e atributos específicos que podem variar de acordo com cada tipo de sistema, Hollnagel et al. (2011) defendem que resiliência não é algo que um sistema quantitativamente “tem”, mas algo que um sistema qualitativamente “faz”.

A resiliência torna-se, nesse sentido, um conceito multifacetado em oposição à alguns poucos atributos ou capacidades específicas unidimensionais. Segundo o mesmo autor, as quatro habilidades essenciais que capacitam um sistema a ser resiliente são as indicadas na Figura 14:

Figura 14 – Quatro habilidades essenciais de um sistema resiliente.

Fonte: Traduzido de Hollnagel et al (2011)

Para determinar o nível de resiliência nessa abordagem, Hollnagel et al (2011) preconizam uma ferramenta semi-quantitativa denominada *The Resilience Analysis Grid* (RAG) para analisar as 04 habilidades inerentes ao sistema resiliente. Esse modelo é baseado em um questionário conceitual (*framework*) com várias perguntas, classificando as repostas dos especialistas em uma escala de 05 fatores (Excelente, Satisfatório, Aceitável, Inaceitável e Deficiente).

A representação do nível de resiliência de um sistema através do RAG torna-se visível em gráficos como o indicado no Gráfico 1:

Gráfico 1 – Ferramenta RAG para nível de resiliência

Fonte: Traduzido de Hollnagel et al (2011)

O Apêndice B apresenta possíveis questões para aplicação do RAG como ferramenta de avaliação qualitativa de resiliência, em função de cada habilidade indicada (Monitorar, Antecipar, Responder, Apreender).

Pelas análises mencionadas, percebe-se que as abordagens qualitativas apresentam noções sobre alguns fatores de resiliência dos sistemas, sem apresentar um valor quantitativo determinante.

2.5.3 Análise quantitativa de resiliência

Os estudos apresentados até aqui analisam o nível de resiliência em sistemas tomando como base atributos que, como visto, variam de acordo com cada tipo de sistema. Em alguns as vulnerabilidades e capacidades são semelhantes. Em outros são completamente diferentes.

Os trabalhos que utilizam abordagens quantitativas buscam determinar a resiliência através de modelos matemáticos capazes de mensurar a evolução da capacidade e do nível de serviço de um sistema. Dessa forma, calculam o nível de resiliência em sistemas de transportes através de fatores como demanda, custo, tempo, distâncias, etc.

Conforme mencionado anteriormente, as abordagens qualitativas podem trazer consigo algum tipo de tendência de opinião. Visando reduzir esse tipo de interferência, alguns autores passaram a aplicar técnicas de lógica difusa (*fuzzy*) para melhorar os resultados dos questionários conceituais (*frameworks*) frente à subjetividade dos especialistas e à complexidade dos itens avaliados.

Bukowski e Feliks (2012) aplicam um modelo de lógica difusa para propor um conceito multidimensional quantitativo para o nível de resiliência em uma cadeia de suprimentos. São analisados apenas três fatores de capacidade: Segurança (*Security*), Sobrevivência (*Survivability*) e Recuperação (*Recovery*). Todavia, suas conclusões apontam para uma estimação de valores médios em cada classe de parâmetros antes de sua aplicação real.

Fakkor et al (2013) também aplicam um modelo de lógica difusa para determinar a resiliência na cadeia de suprimentos de um indústria automotiva, usando uma

metodologia similar a proposta por Pettit (2008). Nesse estudo, porém, os fatores de capacidade e de vulnerabilidades geram um indicador quantitativo único do nível de resiliência que pode ser representado em uma escala bidimensional após os processos de fuzzificação e defuzzificação característicos da lógica fuzzy, conforme Figura 15:

Figura 15 – Nível de resiliência na matriz de capacidades e vulnerabilidades

Fonte: Traduzido de Fakkor et al (2013)

Todavia esse indicador quantitativo proposto por Fakkor et al (2013) assemelha-se muito ao mapa de vulnerabilidades e capacidades proposto por Scheffi e Rice Jr (2005) de forma qualitativa.

Albores e Shaw (2008) aplicam simulação de eventos discretos para analisar a resiliência de um sistema de busca e salvamento frente à um ataque terrorista. No primeiro cenário de simulação são avaliados os procedimentos de descontaminação em massa da população logo após o ataque terrorista. No segundo cenário são avaliadas a alocação e harmonização geográficas dos recursos do sistema ao longo das várias regiões de atuação.

Avaliando a resiliência na indústria automotiva, Carvalho et al (2012) aplicam simulação de eventos discretos para estudar 06 cenários de distúrbios em cadeias de suprimento. Assim, um melhor redesenho logístico dos elos da cadeia industrial é

proposto para incrementar o nível de resiliência com base na avaliação desses cenários.

Chen e Miller-Hooks (2012) propõem um modelo de programação inteira mista para a determinação de resiliência em uma rede de transporte intermodal frente à desastres naturais ou provocados por falhas humanas. Sua definição quantitativa de resiliência reflete a fração de demanda pós-desastre que é atendida com os recursos já recuperados pelo sistema em relação à demanda original pré-desastre.

Faturechi e Miller-Hooks (2014) aplicam um modelo matemático estocástico multiobjetivo para a determinação de resiliência em um sistema de pistas de um aeroporto. Através desse modelo, os autores buscam maximizar o tempo de viagem e o nível de resiliência de uma rede composta por inúmeras pistas de pouso e pistas de taxiamento.

Bruneau e Reinhorn (2006) apresentam uma das primeiras medidas genéricas para a quantificação determinística de resiliência em sistemas. Baseando-se na premissa que uma medida $Q_{(t)}$ pode expressar a qualidade da infraestrutura de um sistema em porcentagem para um determinado instante t , o nível de resiliência (RL) desse sistema ao sofrer um evento de ruptura passa a ser determinado pela equação:

$$RL = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q_{(t)}] dt \quad (1)$$

Onde t_0 é o instante de tempo em que o evento de ruptura se inicia e t_1 é o instante de tempo em que a infraestrutura do sistema retorna ao seu estado original ou pré-evento de ruptura.

Nessa abordagem, a qualidade da infraestrutura danificada do sistema é comparada com a qualidade original da infraestrutura planejada para o sistema (100) ao longo de todo o período analisado. Assim, o nível de resiliência pode ser representado pela área sombreada da Figura 16, denominada triângulo da resiliência (HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016):

Figura 16 – Medida de perda de resiliência

Fonte: Traduzido de Hosseini, Barker e Ramirez-Marquez (2016)

Essa abordagem genérica proposta por Bruneau e Reinhorn(2006) possui como vantagem a possibilidade da função qualidade $Q(t)$ representar diferentes tipos de métricas de desempenho dos sistemas. Assim, a função qualidade $Q(t)$ pode assumir o perfil de qualquer função de desempenho quantificável inerente ao sistema e a interpretação dos resultados do nível de resiliência (RL) deve ser feita considerando que:

- a) quanto maior o valor da área sombreada (RL) menor será o nível de resiliência do sistema, uma vez que o tempo de recuperação gasto será grande e o nível de serviço do sistema permanecerá abaixo do ideal por um longo tempo.
- b) analisando de forma oposta, quanto menor o valor da área sombreada (RL) maior será o nível de resiliência do sistema, demonstrando que o sistema recuperou-se rapidamente e o nível de serviço foi restaurado em um menor tempo.

Por outro lado, algumas dificuldades surgem dessa abordagem. Bruneau e Reinhorn (2006) assumem que a qualidade inicial do sistema sempre será 100%, o que na realidade é uma premissa irreal. Outro ponto é que a compreensão da área sombreada pode se tornar difícil para os gestores, uma vez que existem eventos de ruptura cujos impactos são instantâneos assim como as recuperações são muito rápidas. Isso resulta em gráficos cujas áreas são de difícil quantificação e análise.

Expandindo o conceito quantitativo de resiliência, Henry e Ramirez-Marquez (2012) apresentam uma métrica genérica mais robusta e baseada no tempo de recuperação

do sistema. Nessa abordagem, os autores quantificam resiliência como uma razão de recuperação das perdas.

Seja $\mathcal{R}(t)$ a resiliência de um sistema no instante t . Em sua forma básica, $\mathcal{R}(t)$ descreve a razão de recuperação no instante t para uma perda sofrida pelo sistema em algum instante prévio t_d de acordo com a equação (HENRY; RAMIREZ-MARQUEZ, 2012):

$$\mathcal{R}(t) = \frac{\text{Recuperação}(t)}{\text{Perda}(t_d)} \quad (2)$$

Essa formulação básica está de acordo com o conceito de resiliência que, em sua essência, é a habilidade de um sistema se recuperar em função de perdas sofridas. A formulação indica ainda que se a recuperação é igual à perda, então o sistema está completamente resiliente (100%).

Para uma aplicação geral dessa fórmula, deve-se primeiro identificar o sistema (S) a ser analisado, determinar a função de desempenho $F(t)$ que rege o sistema e entender os tempos de transição de estado (t) em que o sistema sofre a ação de um evento de ruptura (e_j). A Figura 17 ilustra esses elementos:

Figura 17 – Transições de estado em um sistema sofrendo evento de ruptura

Fonte: Traduzido de Henry e Ramirez-Marquez (2012)

Com base nos elementos representados na Figura 17, o nível de resiliência $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ correspondente à função de desempenho específica $F(t_r|e_j)$ do sistema S , em um dado instante t_r (onde $t_r \in (t_e; t_f)$) sob a ação de um evento de ruptura e_j pode ser calculada pela equação (HENRY; RAMIREZ-MARQUEZ, 2012):

$$\mathcal{R}(t_r|e_j) = \frac{F(t_r|e_j) - F(t_d|e_j)}{F(t_o) - F(t_d|e_j)} \quad (3)$$

O valor de $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ representa a proporção da função de desempenho que foi recuperada desde o estado de ruptura do sistema (S_d). Essa métrica de resiliência de um sistema está coerente com a concepção principal do termo resiliência.

Segundo Henry e Ramirez-Marquez (2012), algumas considerações sobre essa fórmula de determinar o nível de resiliência são importantes:

O valor de $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ só é quantificável se, e somente se, a função de desempenho do sistema $F(t_r|e_j)$ também é quantificável.

O mínimo valor para $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ é zero, calculado se $F(t_r|e_j) = F(t_d|e_j)$. Nesse cenário, o sistema não se recuperou do seu estado de ruptura. Isso pode indicar que nenhuma ação de resposta foi executada ou que todas as iniciativas de resposta falharam em seus propósitos.

Sempre que $F(t_r|e_j) = F(t_o)$ o nível de resiliência $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ será igual a 1, indicando que o sistema retornou completamente ao seu estado original estável (S_o). É importante mencionar que o valor de $F(t_r|e_j)$ não está restrito a $F(t_o)$ e, portanto, podem existir ações de resposta que elevem o estado final do sistema (S_f) à um patamar superior ao estado original (S_o).

Vale reparar que $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ é indefinido para $F(t_d|e_j) = F(t_o)$. Porém, essa condição é evitada se ao menos um evento de ruptura (e_j) for considerado. Na prática, se não há perdas por evento de ruptura no sistema, não há recuperação a ser analisada.

Outros modelos quantitativos disponíveis na literatura quantificam resiliência através da razão entre a demanda atendida pelo sistema logo após um evento de ruptura

ocorrer e a demanda original prevista para o sistema, caso este não tivesse sofrido o impacto do evento de ruptura. Chen e Miller-Hooks (2012) atuam dessa forma para determinar a resiliência em uma rede intermodal de transportes.

Janić (2015) também segue essa proposta de quantificação (demanda atendida / demanda prevista) para determinar a resiliência de um sistema aeroportuário sob o efeito da passagem de um furacão. Todavia, essas abordagens não relacionam o tempo de recuperação dos sistemas, analisando apenas os seus estados iniciais e finais. Dessa forma, ficam em desvantagem quando comparadas à metodologia proposta por Henry e Ramirez-Marquez (2012) .

2.5.4 Exemplo de análise quantitativa de resiliência

Para exemplificar a importância da análise quantitativa de resiliência, Henry e Ramirez-Marquez (2012) aplicam a abordagem proposta anteriormente em um problema de rede de transporte denominado Seervada Parque. A Figura 18 apresenta a estrutura de rede de transporte característica do problema:

Figura 18 - Problema do Parque Seervada

Fonte: Henry e Ramirez-Marquez (2012)

Esse problema é originalmente proposto por Hiller e Liberman (2006) para demonstrar conceitos sobre o caminho mínimo em redes e problemas de máximo fluxo em gestão de operações. Sua representação é feita através de um grafo direcionado onde

existem 7 nós e 12 arcos capacitados que configuram a rede de transportes de passageiros interna ao parque.

A entrada do parque localiza-se junto ao nó “O” e há uma importante atração turística junto ao nó “T” do parque. Os nós “A” e “E” servem de pontos de conexão dentro da rede de transporte. O parque fornece bondes para os visitantes poderem se locomover até o nó “T” onde ocorre o espetáculo. As distâncias entre os nós (milhas) e as capacidades máximas de viagens (*trips*) dos bondes estão especificadas em cada arco do grafo direcionado.

Existem 03 funções de desempenho (figure of merit – FOM) estabelecidas para o sistema de transporte do Seervada Parque:

- a) FOM1: Calcula o menor caminho entre o nó “O” e o nó “T”. Essa função de desempenho objetiva identificar sempre a menor distância possível entre esses dois nós.
- b) FOM2: Calcula o máximo fluxo de bondes entre o nó “O” e o nó “T”. Essa função de desempenho objetiva identificar a melhor rota possível que maximize o fluxo diário de viagens realizadas pelos bondes entre esses dois nós.
- c) FOM3: Calcula a disponibilidade total da rede de transporte. Cabe ressaltar que alguns eventos de ruptura acabam não afetando os valores das funções de desempenho anteriores. Por exemplo, a interrupção de um trecho entre dois nós que não fazem parte do caminho mínimo calculado pela FOM1 entre os nós “O” e “T” em nada irá afetar o valor dessa função. Todavia, apresenta um trecho a menos disponível para os bondes transitarem. A FOM03, portanto, calcula o nível de disponibilidade da rede de transportante somando todas as distâncias existentes em todas as rotas disponíveis.

O Seervada Parque está localizado em uma região montanhosa, cortada por um rio de considerável volume d’água. Nesse contexto, existem dois eventos de ruptura que afetam o parque de formas diferentes:

- a) Evento de ruptura 1: uma rocha se desprenda da encosta próxima à entrada do parque, destruindo os arcos OA, OB, OC, AB e BC.

- b) Evento de ruptura 2: o alto volume do rio que corta o parque provoca uma inundação na área e acaba destruindo os arcos AD, BD, BE e CE.

Para atuar na reconstrução dos arcos, o Seervada Parque possui apenas uma equipe de restauração que atua em um único arco por vez. Dessa forma, a estratégia de atuação dessa equipe torna-se o fator decisivo para a resiliência do sistema.

Analisando o primeiro evento de ruptura 01, identifica-se que 05 arcos da rede são destruídos. Para recuperar o sistema, duas estratégias de restauração são propostas:

- a) Estratégia 1: restaurar os arcos na ordem OA, OB, OC, AB e BC;
b) Estratégia 2: restaurar os arcos na ordem inversa BC, AB, OC, OB e OA.

Henry e Ramirez-Marquez (2012) aplicam a equação (3) para determinar o nível de resiliência do sistema para o evento de ruptura 1 e suas estratégias. Os resultados para as 03 funções de desempenho são apresentados na Figura 19:

Figura 19 – Análise de resiliência para o evento de ruptura 1

Fonte: Traduzido de Henry e Ramirez-Marquez (2012)

A Figura 20 traz um comparativo entre os resultados das estratégias 1 e 2 utilizadas no evento de ruptura 1, para cada função de desempenho existente no sistema:

Figura 20 – Comparação entre estratégias para o evento 1

Fonte: Traduzido de Henry e Ramirez Marquez (2012)

É possível identificar da Figura 19 que o nível de resiliência em cada estratégia aumenta em velocidades diferentes enquanto os arcos da rede de transporte são reconstruídos. Analisando em conjunto com os resultados da Figura 20, conclui-se que a Estratégia 1 consegue recuperar a rede do sistema de transporte mais rapidamente que a Estratégia 2 em duas das três funções de desempenho do sistema (FOM 1 e FOM2).

Para o evento de ruptura 2, as mesmas estratégias de recuperação são aplicadas e analisadas. Nesse caso, a estratégia 1 foca na reconstrução dos 04 arcos da rede na sua ordem original AD, BD, BE e CE. Já a estratégia 2 propõe a reconstrução dos seguimentos na ordem inversa CE, BE, BD e AD. Os resultados são apresentados na Figura 21:

Figura 21 – Comparação entre estratégias para o evento 2

Fonte: Traduzido de Henry e Ramirez Marquez (2012)

Comparando os níveis de resiliência obtidos para o evento de ruptura 2, percebe-se que a estratégia 2 apresenta melhor velocidade de recuperação em todas as funções de desempenho.

O problema do Seervada ilustra de forma simples a aplicação de métricas quantitativas para determinação de resiliência em sistemas de transportes. Desse exemplo, podem ser ressaltados os seguintes conceitos (HENRY; RAMIREZ-MARQUEZ, 2012):

- A análise quantitativa de resiliência pode ser aplicada em sistemas que possuem múltiplas funções de desempenho existentes;
- Uma mesma estratégia de recuperação ou resposta do sistema pode resultar em níveis de resiliência diferentes para funções de desempenho distintas;
- A análise quantitativa de resiliência será tão eficiente quanto maior for o conhecimento do sistema estudado, da determinação das funções de desempenho e das estratégias de recuperação/resposta aplicadas.

2.5.5 Resiliência versus Segurança (*Safety*)

No âmbito dos sistemas de tráfego aéreo, a ICAO define segurança (*Safety*) como o estado no qual o risco de lesões às pessoas ou danos materiais reduz-se e mantém-se em um nível aceitável, ou abaixo deste nível, por meio de um processo contínuo de identificação de perigos e gestão de riscos (ICAO, 2013).

De maneira similar, a agência espacial americana define segurança como o estado em que há ausência de condições que podem causar morte, lesões, doenças, danos em equipamentos, danos as propriedades ou ao meio ambiente (NASA, 2011).

Para exemplificar esse ambiente ou estado seguro, Hirst (2008) elenca os seguintes níveis aceitáveis de falhas em um sistemas de transporte aéreo:

Tabela 9 – Taxas aceitáveis de falhas em sistemas de transporte aéreo

Impacto da falha	Taxa aceitável de falhas no sistema
Menor	1 em cada 10^3 horas de voo (ou 10^{-3} falhas por hora).
Maior	1 em cada 10^5 horas de voo (ou 10^{-5} falhas por hora).
Perigoso	1 em cada 10^7 horas de voo (ou 10^{-7} falhas por hora).
Catastrófico	1 em cada 10^9 horas de voo (ou 10^{-9} falhas por hora).

Fonte: Traduzido de Hirst (2008)

Pelas definições e valores apresentados, um sistema considerado seguro é aquele que apresenta poucas falhas perigosas e onde a quantidade dessas falhas está controlada e abaixo de um nível crítico aceitável. Regularmente, a típica estratégia utilizada para o aumento da segurança (*Safety*) em sistemas é baseada na identificação e quantificação de falhas perigosas, seguida das intervenções necessárias para reduzir essa quantidade (HOLLNAGEL et al., 2011).

A Resiliência, por outro lado, surge como um novo paradigma para o aumento da segurança (*Safety*) em sistemas. Sua estratégia não é atuar em falhas, mas sim incrementar as habilidades existentes no sistema para melhorar o seu próprio desempenho em cenários críticos, de grande pressão e muitas vezes imprevisíveis (HOLLNAGEL et al., 2011).

Nemeth e Hollnagel (2014) ressaltam inclusive que a trajetória para um sistema mais seguro pressupõe o desenvolvimento das habilidades de resiliência mesmo que ainda

estejam prematuras no sistema. Independente de qual seja o status atual do sistema, deve-se sempre buscar progredir o seu desempenho em direção às quatro habilidades que proporcionam a resiliência. A Figura 22 ilustra essa trajetória de progresso:

Figura 22 – Trajetória para um sistema resiliente

Fonte: Traduzido de Nemeth e Hollnagel (2014)

Essas 04 (quatro) habilidades (Responder, Monitorar, Aprender e Antecipar) permitem ao sistema sobreviver em um ambiente cada vez mais complexo, rápido, variável e imprevisível. A determinação do nível de resiliência contribui, portanto, no desenvolvimento de todas as 04 (quatro) habilidades supracitadas e no incremento do nível de segurança (Safety) em um sistema de transporte.

No presente trabalho, a análise dessas habilidades no sistema de transporte aéreo se baseia na simulação de situações adversas (eventos de ruptura) em seu ambiente. Dentre esses eventos, cabe destacar as condições meteorológicas adversas por serem mais frequentes nos sistemas de transporte conforme ressaltado no item 2.4.

2.5.6 Estratégias para aumento da resiliência em sistemas

As alternativas para desenvolver resiliência em cada uma das 04 (quatro) habilidades (Responder, Monitorar, Aprender e Antecipar) são inúmeras e se encontram em constante evolução. Madni e Jackson (2009) apresentam as seguintes estratégias baseadas nos princípios e postulados de resiliência em sistemas:

- a) Redundância funcional: o sistema deve possuir alternativas internas para executar um função específica de tal forma que essas alternativas não dependam de um mesmo componente físico do sistema;
- b) Redundância física: o sistema deve possuir componentes físicos em redundância para se proteger de falhas críticas quando a redundância funcional não é possível de ser implementada;
- c) Reorganização: o sistema deve ser capaz de se reorganizar em resposta à um evento de ruptura interno ou mudança no ambiente externo;
- d) Redundância humana: intervenção conjunta de vários indivíduos quando o sistema necessitar de uma “cognição rápida” e geração de opções criativas;
- e) Previsibilidade: os sistemas devem se comportar de maneira previsível para garantir a confiança e não requerer intervenções humanas freqüentes;
- f) Abrangência de contexto: os sistema deve ser capaz de suportar os piores e mais prováveis cenários existentes, sendo esses naturais ou providados pela ação humana;
- g) Degradação gradual: o desempenho do sistema deve degradar de forma gradual na presença de um evento inesperado para o qual o sistema não foi devidamente preparado;
- h) Correção de desvio: o sistema deve ser capaz de monitorar e corrigir os desvios em direção à ruptura, através de adequadas análises de alternativas e tomando ações preventivas oportunas;
- i) Estado neutro: o sistema deve ser capaz de evitar que mais danos ocorram quando for atingido por um evento inesperado e desconhecido até que o problema possa ser devidamente diagnosticado;
- j) Inspeção: o sistema deve permitir a intervenção ou inspeção humana necessária sem exigir que os indivíduos façam suposições infundadas;

- k) Consciência intencional: o sistema e os indivíduos devem manter um modelo intencional pré-estabelecido e compartilhado para apoiar um ao outro quando for necessária atuação conjunta;
- l) Aprendizado e Adaptação: o sistema deve continuamente adquirir conhecimento do ambiente para se reconfigurar, adaptar, reorganizar e crescer.

Os mesmos autores enfatizam que as estratégias podem complementar uma às outras, seguindo o conceito de que algumas estratégias se tornam mais eficientes na presença de outras previamente implementadas no sistema.

2.6 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Meredith et al (1985) argumentam que a simulação apresenta-se como um poderoso instrumento para análise de sistemas críticos. O autor ressalva, contudo, que a precisão e a confiabilidade dos resultados dependem diretamente do nível de representatividade do modelo de simulação em relação as características do sistema real.

Para a Botter (2002), a simulação tem por objetivo compreender o comportamento de um sistema e avaliar estratégias de operação do mesmo através da construção de modelos quantitativos próximos da realidade e que possibilitem a condução de experimentos.

Medina e Chwif (2014) ressaltam, por sua vez, que a simulação não é uma ferramenta analítica pura que irá fornecer a solução matemática ótima para um determinado problema. Segundo os autores, a simulação é uma importante ferramenta de análise do comportamento de um sistema, sendo então utilizada para responder questionamentos do tipo: “O que ocorre no sistema se ...”.

A vantagem da simulação reside, portanto, na capacidade de avaliar quantitativamente diversos cenários e apresentar o comportamento de sistemas em relação às modificações em seus elementos, interações ou ambiente. Assim, a simulação torna-se uma importante ferramenta para a tomada de decisão.

2.6.1 Tipos de simulação

Nance (1993) apresenta três grandes áreas da simulação computacional:

- Simulação de Eventos Discretos: área da simulação que emprega modelos matemáticos lógicos para analisar sistemas cujos estados variam de forma precisa e em pontos específicos ao longo do tempo (discretamente).
- Simulação de Eventos Contínuos: área da simulação que busca analisar sistemas onde a mudança de estado não pode ser determinada de forma precisa ao longo do tempo. Nesses sistemas, as mudanças de estado ocorrem continuamente ao longo do tempo e são normalmente determinadas por equações diferenciais.
- Simulação de Monte Carlo: área da simulação onde a determinação do estado do sistema independe do tempo. Outra característica dessa área de simulação é o fato do estado de um sistema ser definido através de variáveis aleatórias (estocásticas).

A diferença entre eventos discretos e contínuos pode ser graficamente entendida pela evolução dos estados de um sistema ao longo do tempo de acordo com a Figura 23 proposta por Chwif (1999):

Figura 23 – Evolução de eventos discretos e contínuos ao longo do tempo

Fonte: Chwif (1999)

Os sistemas de transportes possuem tempos de operação bem definidos como, por exemplo, os instantes de partida e chegada de um veículo ou os tempos de espera em fila. Por essas características, a simulação de eventos discretos apresenta-se como uma alternativa para o estudo de resiliência em sistemas de transportes onde o estado do sistema varia de forma discretamente identificável ao longo do tempo.

2.6.2 Etapas de simulação

O desenvolvimento de um modelo de simulação compreende, basicamente, três etapas conforme proposto por Medina e Chwif (2014):

- Concepção do modelo: etapa na qual se busca compreender plenamente o sistema a ser analisado e definir os objetivos da simulação (formulação). Compreende ainda as atividades de construção do modelo conceitual da simulação (representação) e obtenção dos dados de entrada do modelo;
- Implementação do modelo: etapa na qual o modelo conceitual é implementado em um modelo computacional através de uma linguagem de programação ou de um software de simulação. Compreende ainda as atividades de verificação e validação do modelo computacional em relação ao modelo conceitual representativo do sistema;
- Análise dos resultados do modelo: etapa na qual são executadas várias simulações no modelo computacional já validado (modelo operacional). Os resultados das simulações são analisados e documentados, gerando conclusões e recomendações sobre o sistema em estudo.

A Figura 24 representa essas etapas da simulação e suas principais atividades:

Figura 24 – Etapas da simulação computacional

Fonte: Chwif (1999)

Cabe destacar que as etapas supracitadas não são essencialmente lineares, podendo ser realimentadas na medida em que o conhecimento sobre o modelo de simulação evolui ao longo do ciclo de análise.

2.6.3 Softwares de simulação para o transporte aéreo

Um software de simulação possui como objetivo facilitar a implementação do modelo conceitual de um sistema. Há diversos softwares para a realização de simulações computacionais em sistemas de transporte. Alguns são mais genéricos e abrangentes, possibilitando a implantação de qualquer tipo de sistema como a fila de atendimento em um supermercado ou um processo produtivo industrial (MEDAU, 2011; MOSER, 2007; NEUFVILLE; ODoni, 2003; RIBEIRO, 2003).

Outros softwares são mais específicos e desenvolvidos para campos de estudos únicos como os sistemas aeroportuários e de tráfego aéreo. Nesses tipos de softwares, as regras de simulação para o fluxo aeroportuário e para o tráfego aéreo são previamente configuradas, deixando a representação do modelo de simulação mais próxima ao sistema real (MEDAU, 2011; MOSER, 2007; NEUFVILLE; ODoni, 2003; RIBEIRO, 2003).

As características de alguns dos principais softwares de simulação são elencadas a seguir:

- a) ARENA: é um software de simulação de eventos discretos com aplicação abrangente, largamente utilizado em função de sua capacidade de representar sistemas nos mais variados graus de grandeza e níveis de processos operacionais. Lançado em 1993 através da junção da linguagem de simulação SIMAN e do pacote de visualização gráfica CINEMA, pertence atualmente à *Rockwell Automation*. Destaca-se por ser estruturado em módulos de comando para execução de atividades e por possuir uma interface gráfica que facilita a construção do modelo de simulação. Dessa forma, não há necessidade de programação direta de códigos em linguagem de simulação. Possui ainda ferramentas de análise de dados (*Input e Output Analyser*) que possibilitam a validação da melhor distribuição estatística

relacionada aos dados do sistema representado (MEDAU, 2011; RIBEIRO, 2003).

- b) SIMMOD (*Airport and Airspace Simulation Model*): é uma ferramenta de simulação de eventos discretos para aplicação específica. Atualmente é mantida pela empresa *Aviations Analysis Experts* (ATAC) mas foi desenvolvido a pedido da FAA em 1980 para a análise de cenários de fluxo de aeronaves. Permite a simulação detalhada de operações em aeroportos (pistas de pouco, pistas de taxi, áreas de pátio e terminais de passageiros) e de operações em seu espaço aéreo subjacente (Área de Controle Terminal). No SIMMOD, os aeroportos e as aerovias são representados por redes de nós e arcos onde as aeronaves se movimentam para ocupar uma posição no espaço aéreo. Caso haja conflito de utilização de um mesmo recurso do espaço aéreo ou aeroporto, as regras de tráfego pré-programadas no sistema determinam qual aeronave ocupará o recurso e qual aguardará, gerando o atraso inerente. Seus principais indicadores de desempenho estão relacionados ao tempo de viagem das aeronaves, fluxo de aeronaves no espaço aéreo, capacidade de atendimento dos aeroportos, tempos de atraso e consumo de combustíveis (MEDAU, 2011; MOSER, 2007; RIBEIRO, 2003).
- c) RAMS (*Reorganized ATC Mathematical Simulator*): é um simulador de eventos discretos também de aplicação específica, desenvolvido pela empresa ISA Softwares a pedido do EUROCONTROL. Aplicado principalmente para o estudo preliminar de aeroportos e espaços aéreos, possui capacidade de identificar conflitos em rotas aéreas, determinar a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo e calcular atrasos ou economias de tempo em novos procedimentos de voo. Seus cálculos são baseados nas características operacionais do aeroporto ou Área de Controle Terminal, nos procedimentos de pouso e decolagem e nas características das aeronaves predominantes. Possui uma interface gráfica que também auxilia na montagem e configuração do modelo de simulação (MEDAU, 2011; MOSER, 2007).
- d) TAAM (*Total Airspace and Airport Modeler*): é um simulador de eventos discretos com aplicação específica ao sistema aeroportuário e de tráfego aéreo. Com capacidade de simulação 4D (3D mais a dimensão tempo) em larga escala, pertence a empresa *Jeppesen* que é membro do grupo *Boeing*.

Apresenta-se como a mais completa plataforma de simulação para o sistema de tráfego aéreo, sendo capaz de atuar não só nas operações aeroportuárias (pistas de pouco, pistas de taxi, etc.) mas também em todos os tipos de espaço aéreo (Zona de Tráfego de Aeródromo, Área de Controle Terminal, Espaço Aéreo em Rota, etc.). Possui um nível de detalhamento das informações muito maior do que os seus concorrentes (SIMMOD e RAMS), sendo capaz de analisar tempos de voo, atrasos em rota, carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo, identificação e resolução de conflitos de tráfego, ruídos nas proximidades dos aeroportos, consumo de combustível e até o desempenho geral de um sistema nacional de aeroportos. Por essa última característica, é amplamente utilizado por autoridades regulatórias da aviação como a FAA, o EUROCONTROL e o DECEA no Brasil (MEDAU, 2011; MOSER, 2007; NEUFVILLE; ODoni, 2003; RIBEIRO, 2003).

Todos os softwares mencionados anteriormente apresentam a capacidade de simulação em tempo acelerado (*fast time simulation*), permitindo análises mais rápidas sobre o fluxo das aeronaves no sistema de tráfego aéreo.

Neufville e Odoni (2003) afirmam que a escolha da ferramenta de simulação deve seguir critérios como o nível de detalhes fornecidos, a flexibilidade do recursos do software e o escopo da análise a ser realizada.

Segundo os mesmos autores, não há uma ferramenta perfeita para todas as simulações. Diferentes ferramentas são ditas “melhores” para diferentes objetivos. Os autores ressaltam ainda que a disponibilidade ou acesso à ferramenta de simulação é outro fator importante, uma vez que diferentes softwares possuem diferentes custos de utilização.

Essas premissas são tão relevantes que Ribeiro (2003) utiliza-se da grande flexibilidade do software ARENA para propor um modelo de simulação único para analisar operacionalmente o desempenho das operações de pátios em aeroportos. Após estudar os softwares disponíveis, identificou que a melhor alternativa seria construir seu próprio modelo de simulação a partir de uma plataforma abrangente onde pudesse colocar todas as características operacionais relevantes ao estudo.

Moser (2007), por sua vez, se utiliza do SIMMOD para apresentar um modelo de avaliação de intervenções no lado aéreo de aeroportos. Sua decisão de escolha pauta-se na simplicidade de aprendizado e utilização do software, implicando em menores custos operacionais para a simulação.

Oliveira (2007), por outro lado, utiliza-se do RAMS para simular diferentes cenários de separação radar na área de controle terminal de Brasília e determinar o impacto na carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo. Justifica-se a aplicação do RAMS pela parametrização dos fatores de cálculo de carga de trabalho estarem em consonância com os utilizados pelo EUROCONTROL.

Medau (2011) retoma a utilização do SIMMOD para analisar a capacidade do lado aéreo de aeroportos através de simulação computacional, associando os diversos cenários simulados ao nível de serviço oferecido às aeronaves. Suas conclusões apontam que é possível melhorar o nível de serviço oferecido sem investir em grandes infraestruturas, apenas modificando os parâmetros nos procedimentos de decolagem.

Rocha (2012) utiliza-se do TAAM, através de uma parceria entre o INPE e o ICEA, para simular as emissões aeronáuticas de gases (CO_2 , CO , H_2O , NO_x e SO_2) em um dia normal para todos os voos das aeronaves regulares no Brasil. Sua simulação compreende o desempenho de uma ampla malha aeroportuária composta por 32 aeroportos e 2632 trajetórias de voos, justificando a utilização do TAAM como ferramenta robusta para a execução dessa simulação.

Em função das inúmeras características dos softwares elencados anteriormente, o presente trabalho opta pelo TAAM como ferramenta de simulação para a análise de resiliência. Essa escolha pauta-se nos seguintes critérios:

- a) O TAAM possui capacidade de analisar as características de um sistema de tráfego aéreo completo e de grandes proporções, abrangendo a malha aérea com seus principais aeroportos. Esse fator é essencial para a determinação do nível de resiliência de um sistema de transporte aéreo;
- b) As capacidades e funcionalidades do TAAM apresentam-se em maior número do que as de seus concorrentes isoladamente (SIMMOD e RAMS), sendo utilizado por diversas agências reguladoras internacionais da aviação (FAA, EUROCONTROL, ICEA);

- c) A utilização de um software abrangente como o ARENA não se torna vantajosa, uma vez que não foram encontradas restrições nas variáveis e funcionalidades das plataformas existentes que venham a prejudicar a determinação do nível de resiliência do sistema;
- d) Há uma parceria em andamento entre a USP e o ICEA – Instituto de Controle do Espaço Aéreo, através do GAS – Grupo de Análise de Segurança, para o desenvolvimento conjunto de pesquisas em sistemas de transporte aéreos, com a possível utilização dos Laboratórios de Simulação em Tempo Acelerado do ICEA que possui uma licença do TAAM;
- e) Há um convênio de pesquisa já assinado entre a Universidade de São Paulo (USP) e a empresa *Boeing*, para o suporte às pesquisas relacionadas ao sistema de transporte aéreo desenvolvidas pelo GAS. Dessa parceria é possível ter disponível uma licença do TAAM bem como suporte técnico na ferramenta.

3. MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE RESILIÊNCIA

Este capítulo apresenta o modelo proposto para a determinação de resiliência em sistemas de transporte, sua formulação, etapas e premissas operacionais.

O modelo proposto engloba os conceitos do método científico, do enfoque sistêmico, da teoria sobre resiliência em sistemas e das técnicas de simulação de eventos discretos apresentados no capítulo anterior. O modelo é composto por 9 (nove) etapas básicas para a análise do nível de resiliência em sistemas de transportes, conforme resumido na Figura 25:

Figura 25 – Modelo para determinação do nível de resiliência

Fonte: Elaborado pelo autor.

As premissas e principais características de cada etapa estão elencadas a seguir:

3.1 DISCUSSÃO DOS OBJETIVOS

Os objetivos da análise devem ser claramente discutidos e definidos pelos envolvidos no projeto, de tal forma que seja possível determinar o nível de resiliência do sistema de transporte quando avaliados sua capacidade, seu nível de serviço e os tempos de recuperação frente ao evento de ruptura.

Nessa etapa devem ser definidos os eventos de rupturas de interesse do projeto de simulação, com suas características essenciais ao correto dimensionamento da simulação.

O comportamento esperado do sistema de transporte, bem como os possíveis impactos oriundos do evento de ruptura devem ser identificados nessa etapa. A discussão prévia desses fatores é importante para a identificação dos elementos críticos do sistema que devem ser monitorados no modelo de simulação.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE

O sistema de transporte deve ter seus elementos claramente discutidos e identificados pelos envolvidos no projeto de simulação, com os respectivos objetivos definidos. Esses objetivos devem ser a base para escolha das funções de desempenho a serem monitoradas durante a simulação do evento de ruptura.

3.3 ESCOLHA DAS FUNÇÕES DE DESEMPENHO

As funções de desempenho (*Key Process Indicator* – KPI) devem ser escolhidas pelos envolvidos no projeto levando-se em consideração a sua relevância para o sistema de transporte. Recomenda-se que todas as funções de desempenho sejam matematicamente quantificáveis, indicando claramente se os objetivos do sistema estão sendo alcançados ao longo do tempo.

3.4 FORMULAÇÃO DAS MÉTRICAS DE RESILIÊNCIA

As métricas de resiliência devem ser construídas através da equação (3) presente na seção 2.5.3 desse trabalho, tal qual proposta por Henry e Ramirez Marquez (2012). Espera-se dessa forma, que o nível de resiliência $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ seja determinado ao longo do tempo para cada função de desempenho escolhida. A representação gráfica do nível de resiliência também deve ser discutida nessa etapa do projeto de simulação.

3.5 CONCEPÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Um modelo conceitual da simulação deve ser elaborado considerando as interações entre os elementos do sistema, podendo conter fluxogramas e descrições textuais que traduzam o funcionamento do sistema de transporte em seus processos básicos.

Nessa etapa devem ser discutidos também o escopo da simulação, assim como quais as fontes de informação e bases de dados devem ser utilizadas. Na ausência de dados

reais das operações, a utilização de dados aleatórios deve ser validada estatisticamente para garantir aderência à distribuição de probabilidade predominante e às características do sistema de transporte.

3.6 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação deve ser implementado para refletir o funcionamento do sistema de transporte em sua forma mais próxima da realidade e de acordo com o escopo identificado na concepção do modelo conceitual (etapa anterior).

Nessa etapa devem ser executadas atividades de verificação e validação que visem garantir a integridade dos resultados apresentados pelo modelo de simulação. Todas as mensagens de erro do modelo ou problemas de simulação devem ser solucionadas nessa etapa.

3.7 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a implantação e validação do modelo operacional, a simulação dos cenários deve ser realizada de acordo com a quantidade de rodadas estabelecidas para o projeto de simulação. Essa iniciativa visa garantir a significância estatística das simulações nas situações onde são utilizados dados aleatórios ou probabilísticos para refletir a operação de transporte.

Sendo possível a utilização de dados reais da operação de transporte, a quantidade de rodadas estabelecidas deve ter como objetivo garantir que os resultados obtidos são os mesmos, independentemente de quantas execuções do modelo de simulação sejam feitas.

3.8 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE RESILIÊNCIA

O nível de resiliência do sistema de transporte deve ser calculado para cada evento de ruptura definido e suas respectivas funções de desempenho associadas. O resultado final deve ser obtido após a identificação dos cenários mais restritivos e menos restritivos da simulação, identificando possíveis perdas de capacidade e impactos no nível de serviço do sistema de transporte.

3.9 ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS PARA O AUMENTO DA RESILIÊNCIA

Após a avaliação dos resultados obtidos, é importante identificar estratégias que visem ajustar a capacidade do sistema, melhorar o seu nível de serviço ou diminuir o tempo de reação do sistema na presença de um evento de ruptura.

Essa iniciativa é essencial para a evolução do sistema de transporte e deve tomar como ponto de partida as estratégias de incremento de resiliência já mencionadas no item 2.5.6 do capítulo 2.

4. APLICAÇÃO NO SISTEMA DE TRÁFEGO AÉREO

Nesse capítulo são apresentados os resultados da aplicação do modelo proposto no capítulo 3, através da análise do nível de resiliência para o sistema de tráfego aéreo.

4.1 OBJETIVO DA ANÁLISE

O objetivo da análise consiste em avaliar o nível de resiliência dos 12 setores de tráfego aéreo pertencentes à região de informação de voo Curitiba (FIR SBCW) na presença de um evento de ruptura que afete as operações de pouso e decolagem nos aeroportos do Rio de Janeiro (SBRJ) e São Paulo (SBSP), ao longo de um único dia e de forma simultânea. Ressalta-se que SBSP e SBRJ são, respectivamente, o 2º e o 5º aeroporto nacional no total de movimentações aéreas anuais.(DECEA, 2016)

4.1.1 Evento de ruptura analisado

O evento de ruptura analisado consiste na presença de condições meteorológicas adversas (nevoeiro), ocorrendo simultaneamente nos aeroportos SBRJ (Aeroporto do Rio de Janeiro / Santos Dumont) e SBSP (Aeroporto de São Paulo / Congonhas).

A presença de nevoeiro afeta diretamente a rotina operacional de um aeroporto pois reduz a visibilidade e o teto das operações aéreas à níveis que, por segurança, recomendam a suspensão dos pousos e decolagens.

Cabe esclarecer que segundo a ICA 100-37 (BRASIL, 2017), visibilidade é o maior valor predominante em um aeródromo dentre os seguintes itens:

- a) maior distância em que um objeto de cor escura e de dimensões satisfatórias, situado perto do chão, pode ser visto e reconhecido, quando observado contra um fundo luminoso;
- b) maior distância em que as luzes de 1000 candelas, nas vizinhanças, podem ser vistas e identificadas contra um fundo não iluminado.

Ainda segundo a ICA 100-37 (BRASIL, 2017), o teto é definido com a altura, acima do solo ou água, da base da mais baixa camada de nuvens, abaixo de 6.000 metros ou

20.000 pés (ft), que cobre mais da metade do céu predominante na região do aeródromo.

As informações de visibilidade, teto, direção do vento, velocidade do vento e temperatura são disponibilizadas através dos informes meteorológicos METAR e SPECI.

4.1.2 Condições meteorológicas adversas simuladas

As condições meteorológicas adversas utilizadas neste trabalho correspondem às condições reais observadas no dia 30 de maio de 2017. Para o aeroporto SBRJ, as condições meteorológicas são as detalhadas na Tabela 10:

Tabela 10 – SBRJ - Condições Meteorológicas em 30/05/2017

Informe	Hora (UTC)	Direção Vento (°)	Velocidade Vento (nós)	Temperatura (°C)	Visibilidade (m)	Teto (ft)
METAR	00:00	150	5	21	9000	NSC
METAR	01:00	140	1	20	7000	NSC
METAR	02:00	20	2	20	7000	NSC
METAR	03:00	110	2	20	5000	NSC
METAR	04:00	10	7	21	4000	NSC
METAR	05:00	350	6	21	1000	NSC
METAR	06:00	360	4	20	100	0
METAR	07:00	350	5	20	100	0
METAR	08:00	360	4	20	100	0
METAR	09:00	30	2	20	0	0
METAR	10:00	30	4	20	50	0
METAR	11:00	140	4	20	500	200
SPECI	11:15	150	5	20	1200	400
SPECI	11:35	160	6	21	4000	NSC
METAR	12:00	160	5	22	4000	NSC
METAR	13:00	60	3	23	4000	1200
METAR	14:00	60	4	25	4000	1200
METAR	15:00	120	3	25	4200	1200
METAR	16:00	140	4	25	4500	1200
SPECI	16:45	130	5	25	5000	NSC
METAR	17:00	150	6	27	6000	NSC
METAR	18:00	190	10	25	8000	NSC
METAR	19:00	180	9	24	9999	NSC
METAR	20:00	170	5	23	9999	NSC
METAR	21:00	150	7	21	9999	NSC
METAR	22:00	140	5	21	8000	NSC
METAR	23:00	180	5	22	7000	NSC

Fonte: Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica (REDEMET)(DECEA, 2017a)

Observa-se na Tabela 10 que a visibilidade e o teto no aeroporto SBRJ sofrem grande redução a partir das 06:00 UTC, permanecendo em condições adversas até as 11:35 UTC.

Para o aeroporto SBSP, as condições meteorológicas adversas são menos restritivas em relação ao teto e visibilidade, conforme pode ser verificado na Tabela 11:

Tabela 11 – SBSP - Condições Meteorológicas em 30/05/2017

Informe	Hora (UTC)	Direção Vento (°)	Velocidade Vento (nós)	Temperatura (°C)	Visibilidade (m)	Teto (ft)
METAR	00:00	230	4	22	9999	NSC
METAR	01:00	240	3	21	9999	NSC
METAR	02:00	0	0	20	9999	NSC
METAR	03:00	0	0	19	9999	NSC
METAR	04:00	0	0	19	9999	3600
METAR	05:00	0	2	19	9999	4400
METAR	06:00	180	5	19	9999	4500
SPECI	06:50	170	8	19	9999	1300
METAR	07:00	170	8	19	9999	1300
SPECI	07:14	170	7	19	9999	800
SPECI	07:26	160	6	19	9999	800
SPECI	07:29	160	6	19	9999	800
SPECI	07:41	150	6	19	9999	900
METAR	08:00	160	6	18	9999	900
METAR	09:00	160	8	18	9999	600
SPECI	09:23	160	7	18	3000	500
METAR	10:00	160	7	18	4000	500
SPECI	10:13	140	6	18	2500	400
METAR	11:00	150	6	18	5000	500
METAR	12:00	140	4	18	7000	700
METAR	13:00	150	7	19	9000	900
SPECI	13:24	170	6	19	9999	1500
METAR	14:00	150	5	20	9999	1100
METAR	15:00	160	6	24	9999	1500
METAR	16:00	150	7	20	9999	1300
METAR	17:00	150	8	19	9999	800
METAR	18:00	140	8	19	9999	1300
METAR	19:00	180	9	18	9999	800
METAR	20:00	160	9	18	9999	900
METAR	21:00	160	9	17	8000	700
METAR	22:00	170	10	17	9999	700
METAR	23:00	170	7	17	9999	800

Fonte: Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica (REDEMET)(DECEA, 2017a)

Observa-se na Tabela 11 que a visibilidade e o teto no aeroporto SBSP sofrem importante redução a partir das 09:23 UTC, permanecendo em condições adversas até as 12:00 UTC.

4.1.3 Impactos do evento de ruptura analisado

Os aeroportos SBRJ e SBSP possuem equipamentos de navegação aérea instalados em seus sítios aeroportuários que permitem, em condições adversas, a utilização de mínimos meteorológicos de voo por instrumentos (IFR) de acordo com a Tabela 12:

Tabela 12 – Mínimos Meteorológicos para SBRJ e SBSP

Aeroporto	Movimentação	Visibilidade (m)	Teto (ft)	Carta de Navegação
SBRJ	Pouso	1600	300	IAC RNAV (RNP) W RWY 20L
SBRJ	Decolagem	900	400	SID RWY 02R/02L PUMSO 1B
SBSP	Pouso	800	200	IAC ILS Z RWY 17 R
SBSP	Decolagem	600	N/A	SID RWY 17R/17L RNAV PORBI 2A

Fonte: Serviço de Informação Aeronáutica do DECEA (AISWEB) (DECEA, 2017b)

Comparando as condições meteorológicas adversas presentes na Tabela 10 e Tabela 11 (31 de maio de 2017) com os mínimos operacionais descritos na Tabela 12, são identificados os seguintes impactos operacionais a serem considerados no modelo de simulação:

- Operações de Pouso e Decolagem VFR em SBRJ suspensas das 04:00 UTC até as 16:45 UTC;
- Operações de Pouso e Decolagem IFR em SBRJ suspensas das 06:00 UTC as 11:35 UTC;
- Operações de Pouso e Decolagem VFR em SBSP suspensas por quase todo o dia, com dois pequenos períodos de exceção iniciando as 13:24 UTC até as 14:00 UTC e depois entre as 15:00 UTC e as 16:00 UTC;
- Operações de Pouso IFR em SBSP restrita às aeronaves homologadas ao procedimento de aproximação de precisão através de ILS Categoria 1, entre as 09:23 UTC e as 12:00 UTC.
- Uma vez que as operações de pouso e decolagem em solo estão suspensas, acredita-se que possíveis incrementos na quantidade de aeronaves ocorrerão nos setores da FIR SBCW com real impacto na capacidade desses setores.

- f) Acredita-se ainda que deve ocorrer um aumento no tempo de viagem com possíveis atrasos nos voos em função do aumento e da concentração de aeronaves nos setores da FIR SBCW. Principalmente, nos setores responsáveis por receber as aeronaves que pousam e decolam dos aeroportos SBSP e SBRJ, reduzindo assim o nível de serviço do sistema.
- g) Com mais aeronaves voando em uma mesma região de voo, espera-se um aumento na quantidade de conflitos de tráfego aéreo, sinalizando o impacto na segurança do sistema de transporte.

4.2 SISTEMA DE TRÁFEGO AÉREO E SUAS CARACTERÍSTICAS

A FIR Curitiba (SBCW) possui 12 setores de controle de tráfego aéreo separados e numerados conforme indicação presente na Figura 26:

Figura 26 – Setores de Tráfego Aéreo da FIR Curitiba (SBCW)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa região do espaço aéreo possui como objetivo prestar o serviço de controle de tráfego aéreo visando prevenir colisões entre aeronaves, bem como acelerar e manter ordenado o fluxo de tráfego de aeronaves com destino aos aeroportos nacionais ou internacionais (BRASIL, 2017).

Para cumprir tais objetivos, cada espaço aéreo possui uma Capacidade Horária do Setor (CHS) definida como sendo o número de aeronaves que um setor de tráfego aéreo é capaz de prestar o serviço de monitoramento seguro no período de uma hora (BRASIL, 2014).

A forma de cálculo do CHS é definida no Manual do Comando da Aeronáutica (MCA) 100-17, levando-se em consideração o tempo médio de permanência das aeronaves no setor, o número de referência e o número pico de aeronaves que o controlador de tráfego aéreo consegue monitorar em função das complexidades do fluxo existentes no setor (BRASIL, 2014).

Para o presente estudo, a CHS utilizada em cada um dos 12 setores da FIR Curitiba (SBCW) é indicada na Tabela 13 e foi gentilmente fornecida pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) após análise de capacidade realizada em 2016:

Tabela 13 – Capacidade Horária do Setores (CHS) da FIR SBCW

Setor	CHS	Controladores de Tráfego Aéreo no Setor
CW_01	42	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_02	55	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_03	60	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_04	40	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_05	44	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_06	48	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_07	45	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_08	31	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_09	45	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_10	44	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_11	49	02 (01 Principal + 01 Assistente)
CW_12	45	02 (01 Principal + 01 Assistente)

Fonte: ICEA (2016)

4.3 FUNÇÕES DE DESEMPENHO

As funções de desempenho (KPI) foram selecionadas após a compreensão das características do evento de ruptura, dos objetivos do espaço aéreo analisado, das restrições de tráfego e dos impactos esperados no sistema de transporte. As funções de desempenho foram separadas em dois grupos, conforme especificado a seguir:

4.3.1 Relacionadas a capacidade do sistema de transporte:

- a) **KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor:** representa a quantidade total de aeronaves que voarem em um determinado setor, a cada hora.
- b) **KPI 02 – Taxa de ocupação do setor:** representa o valor percentual da quantidade total de aeronaves em relação ao CHS definido para cada setor.

4.3.2 Relacionadas ao nível de serviço do sistema de transporte:

- a) **KPI 03 – Conflitos de tráfego aéreo:** representa a quantidade total de conflitos de tráfego aéreo ocorridos na FIR SBCW, em todos os seus níveis de severidade.
- b) **KPI 04 – Atraso em rota:** representa a quantidade em minutos adicionada ao tempo total de viagem das aeronaves em função dos impactos sofridos ao longo das rotas voadas.
- c) **KPI 05 – Custo total com combustível:** representa o custo em dólares (US\$) despendido pelo consumo de combustível das aeronaves de acordo suas características operacionais e com as rotas de voo realizadas.

4.4 MÉTRICAS DE RESILIÊNCIA

As métricas de resiliência foram aplicadas aos KPI 02, 03 e 05, seguindo a equação (3) presente na seção 2.5.3 desse trabalho, tal qual proposta por Henry e Ramirez Marquez (2012). As curvas com o nível de resiliência $\mathcal{R}(t_r|e_j)$ foram determinadas ao longo do tempo para cada função de desempenho escolhida.

O KPI 01 e o KPI 04 foram analisados à luz dos impactos imediatos apresentados, sem a necessidade da construção das curvas de resiliência.

4.5 CONCEPÇÃO DO MODELO

O TAAM usa uma combinação das informações referentes às características das aeronaves, às rotas aéreas, à programação dos voos, aos procedimentos de decolagem, aos procedimentos de pouso, aos tipos de espaços aéreos, às regras de tráfego aéreo, aos aeroportos e às condições meteorológicas predominantes para construir um perfil de voo específico para cada aeronave. Esse perfil contempla, de forma resumida, os espaços aéreos e as 8 (oito) etapas ilustradas na Figura 27:

Figura 27 – Etapas do voo e seus espaços aéreos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização das simulações foram considerados dados de voos reais realizados em todo os setores do espaço aéreo da FIR SBCW em um único dia de movimentação aérea. Os tipos de voo e a sua distribuição estão especificadas na Tabela 14:

Tabela 14 – Total de voos para 01 dia de operações aéreas na FIR SBCW

Tipo de Voo	Voos (un)	Voos (%)
IFR – Internacional (INT)	268	15,7%
IFR – Doméstico (DOM)	1.374	80,4%
Militar (MIL)	19	1,1%
Visual (VFR)	47	2,8%
Total	1.708	100%

Fonte: ICEA (2016)

Para análise de resiliência do sistema de transporte foram considerados dois cenários de simulação:

- a) **Cenário 01 (Sc01):** As operações de tráfego aéreo são realizadas considerando a base de dados e a distribuição de voos indicadas na Tabela 14, com os aeródromos SBRJ e SBSP operando sem qualquer tipo de restrição meteorológica.
- b) **Cenário 02 (Sc02):** As operações de tráfego aéreo são realizadas considerando a mesma base de dados e distribuição de voos indicadas na Tabela 14, com os aeródromos SBRJ e SBSP operando sob as condições meteorológicas adversas especificadas na Tabela 10 e Tabela 11. Os impactos oriundos das condições meteorológicas adversas serão observados nesse cenário de simulação para serem comparados com o cenário 01.

Em ambos os cenários, a validação da integridade do modelo foi obtida através de 03 rodadas de simulação no TAAM. A utilização de base de dados real dos voos na FIR SBCW não enseja a validação estatística, conforme mencionado na seção 3.5.

4.6 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

O modelo foi implementado na plataforma *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM) em sua versão V2016.3.0, *release* 18 (64-bit) de 28/09/2016. De forma resumida, a implementação do modelo consistiu nas seguintes etapas de trabalho:

- a) Construção e validação dos espaços aéreos referentes às 05 (cinco) regiões de informação de voo (FIR) no TAAM, em especial os 12 setores da FIR SBCW;
- b) Configuração e validação dos aeroportos nacionais e internacionais no TAAM;
- c) Configuração e validação das rotas áreas para todos os 1708 voos no TAAM;
- d) Configuração e validação dos tipos de aeronaves cadastradas na base de dados do TAAM em relação aos 1708 voos planejados;
- e) Configuração da base de dados com os horários estimados de partida (ETD) e/ou horários estimados de chegada (ETA) para todos os 1708 voos no TAAM
- f) Execução do modelo de simulação para os dois cenários definidos, visando identificar os erros reportados pelo TAAM e atuar nas correções.

A Figura 28 apresenta a tela inicial da plataforma com os principais módulos de trabalho do TAAM e a lista das bases de dados necessárias ao projeto:

Figura 28 – Tela Inicial do TAAM

Fonte: Elaborado pelo autor.

A representação das regiões de informação de voo (FIR) e seus respectivos setores de voos no TAAM podem ser verificados na Figura 29:

Figura 29 – Regiões de Informação de Voo (FIR) no TAAM

Fonte: Elaborado pelo autor.

A representação no TAAM dos aeroportos nacionais e internacionais, com suas respectivas localizações pode ser verificada na Figura 30 seguir:

Figura 30 – Aeródromos nacionais e internacionais no TAAM

Fonte: Elaborado pelo autor.

A visualização das rotas nacionais e internacionais configuradas no TAAM para esse trabalho pode ser verificada na Figura 31 seguir:

Figura 31 – Rotas de navegação aérea configuradas no TAAM

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.1 Resultados para o setor CW 01

O setor de tráfego CW 01 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 2 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 01 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 4 – Curva de resiliência do setor CW 01

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.2 Resultados para o setor CW 02

O setor de tráfego CW 02 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 5 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 02 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 7 – Curva de resiliência do setor CW 02

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.3 Resultados para o setor CW 03

O setor de tráfego CW 03 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 8 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 03 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 10 – Curva de resiliência do setor CW 03

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.4 Resultados para o setor CW 04

O setor de tráfego CW 04 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 11 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 04 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 13 – Curva de resiliência do setor CW 04

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.5 Resultados para o setor CW 05

O setor de tráfego CW 05 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 14 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 05 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 16 – Curva de resiliência do setor CW 05

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.6 Resultados para o setor CW 06

O setor de tráfego CW 06 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 17 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 18 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 06 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 19 – Curva de resiliência do setor CW 06

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.7 Resultados para o setor CW 07

O setor de tráfego CW 07 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 20 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 21 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 07 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 22 – Curva de resiliência do setor CW 07

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.8 Resultados para o setor CW 08

O setor de tráfego CW 08 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 23 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 24 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 08 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 25 – Curva de resiliência do setor CW 08

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.9 Resultados para o setor CW 09

O setor de tráfego CW 09 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 26 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 27 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 09 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 28 – Curva de resiliência do setor CW 09

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.10 Resultados para o setor CW 10

O setor de tráfego CW 10 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 29 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 30 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 10 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 31 – Curva de resiliência do setor CW 10

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.11 Resultados para o setor CW 11

O setor de tráfego CW 11 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 32 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 11

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 33 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 11

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 11 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 34 – Curva de resiliência do setor CW 11

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.12 Resultados para o setor CW 12

O setor de tráfego CW 12 apresentou os seguintes resultados no KPI 01 e KPI 02:

Gráfico 35 – KPI 01 – Evolução horária das aeronaves no setor CW 12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 36 – KPI 02 – Taxa de ocupação horária do setor CW 12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do setor CW 12 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 37 – Curva de resiliência do setor CW 12

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.13 Análise dos resultados referente ao KPI 01 e KPI 02

Após análise de todos os gráficos relativos ao KPI 01 e ao KPI02 percebe-se que o sistema de tráfego aéreo não teve sua capacidade horária (CHS) comprometida em nenhum momento.

A Tabela 15 apresenta o tempo utilizado por cada setor para equilibrar suas curvas de resiliência bem como a maior taxa de ocupação detectada em ambos os cenários de simulação:

Tabela 15 – Tempo de Recuperação e Taxa de Ocupação Máxima (FIR SBCW)

Setor	Início do Impacto (UTC)	Término do Impacto (UTC)	Tempo de Recuperação (horas)	Taxa de Ocupação Máxima
CW 01	12:00	15:00	03	42,9%
CW 02	10:00	15:00	05	61,8%
CW 03	10:00	14:00	04	58,3%
CW 04	09:00	13:00	04	25,0%
CW 05	09:00	16:00	07	75,0%
CW 06	09:00	14:00	05	58,3%
CW 07	11:00	14:00	03	33,3%
CW 08	01:00	03:00	02	29,0%
CW 09	11:00	16:00	05	26,7%
CW 10	10:00	14:00	04	45,5%
CW 11	08:00	14:00	06	32,7%
CW 12	09:00	23:00	14	86,7%

Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas de resiliência demonstraram que o evento de ruptura impactou os setores da FIR SBCW com durações e intensidades diferentes. Verifica-se que a maioria dos setores de tráfego aéreo conseguiu retornar ao seu estado normal de operação em até 05 horas, excetuando-se os setores CW 05, CW 11 e CW 12.

Os resultados obtidos para as funções de desempenho relacionadas ao nível de serviço do sistema de transporte (KPI03, KPI04 e KPI05) foram mensurados de maneira global para toda a FIR SBCW, sempre comparando o cenário 01 (Sc01) com o cenário 02 (Sc02), de acordo com os dados a seguir.

4.7.14 Resultados para o KPI 03 na FIR SBCW:

Um conflito de tráfego aéreo pode ser compreendido como uma violação dos requerimentos de separação espacial entre duas ou mais aeronaves. O TAAM analisa, detecta e classifica os conflitos de tráfego aéreo seguindo níveis de severidade conforme especificado na Tabela 16 (JEPPESEN, 2015):

Tabela 16 – Níveis de severidade do TAAM para conflitos de tráfego aéreo

Severidade	% da separação espacial exigida	Cenário
0	0%	Acidente de Tráfego Aéreo (Colisão)
1	Menor que 20 %	Incidente de Tráfego Aéreo
2	Entre 20% e 50%	Incidente de Tráfego Aéreo
3	Entre 50% e 100%	Incidente de Tráfego Aéreo

Fonte: JEPPESEN (2015)

Os níveis de severidade indicam qual o percentual de proximidade uma aeronave estava da outra em relação à separação espacial mínima exigida entre elas, no momento da detecção do conflito. Comparando os dois cenários de simulação, verifica-se na Tabela 17 um aumento de 10% na quantidade de conflitos na FIR SBCW:

Tabela 17 – Conflitos de Tráfego Aéreo na FIR SBCW

SBCW	Severidade p/ Sc01					Severidade p/ Sc02					Impacto/Redução
Setor	0	1	2	3	Total (Sc01)	0	1	2	3	Total (Sc02)	Total (%) (Sc02 / Sc01)
CW 01	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0%
CW 02	-	-	2	11	13	-	-	2	12	14	8%
CW 03	-	-	-	3	3	-	-	1	3	4	33%
CW 04	-	1	1	6	8	-	-	1	11	12	50%
CW 05	-	-	2	11	13	-	-	2	11	13	0%
CW 06	-	-	-	8	8	-	-	-	8	8	0%
CW 07	-	3	-	3	6	-	3	-	3	6	0%
CW 08	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0%
CW 09	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0%
CW 10	-	-	2	2	4	-	-	3	1	4	0%
CW 11	-	-	-	2	2	-	-	1	2	3	50%
CW 12	-	1	-	4	5	-	1	-	3	4	-20%
Total	0	5	7	50	62	0	4	10	54	68	10%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição dos conflitos de tráfego aéreo ocorridos ao longo da simulação pode ser visualizado através do Gráfico 38:

Gráfico 38 – Distribuição dos Conflitos de Tráfego Aéreo na FIR SBCW

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esse perfil de distribuição de conflitos, a curva de resiliência para o KPI 03 na FIR SCBW apresenta o perfil do Gráfico 39:

Gráfico 39 – Curva de resiliência para o KPI 03 na FIR SBCW

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que o evento de ruptura simulado no cenário 02 impacta a quantidade de conflitos de tráfego aéreo na FIR SBCW, aumentando os conflitos a partir das 12:00 UTC até as 21:00 UTC, porém sem a ocorrência de conflitos com criticidade 0 (zero).

4.7.15 Resultados para o KPI 04 na FIR SBCW:

Em ambos os cenários ocorreram atrasos nos voos simulados. As quantidades adicionadas ao tempo total de viagem das aeronaves em função dos impactos sofridos ao longo das rotas podem ser verificadas na Tabela 18:

Tabela 18 – Atrasos no tempo total de voo das aeronaves na FIR SBCW

Atraso (hh:mm:ss)	Voos afetados (Sc01)	% acumulado no Sc01	Voos afetados (Sc02)	% acumulado no Sc02
Até 00:05:00	1552	90,87%	1504	88,06%
Até 00:15:00	133	98,65%	128	95,55%
Até 00:30:00	18	99,71%	15	96,43%
Até 00:45:00	3	99,88%	7	96,84%
Até 01:00:00	2	100,00%	8	97,31%
Até 02:00:00	0	100,00%	25	98,77%
Até 03:00:00	0	100,00%	18	99,82%
Até 04:00:00	0	100,00%	2	99,94%
Até 05:00:00	0	100,00%	1	100,00%
Total:	1708		1708	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fins de controle da pontualidade da aviação regular, a Agencia Nacional de Aviação Civil (ANAC) contabiliza como atrasados todos os voos domésticos finalizados após 15 min do horário previsto de chegada (ETA) e todos os voos internacionais finalizados após 30 min do horário previsto de chegada (ETA) (ANAC, 1999).

Admitindo por simplificação que todos os voos com atrasos inferiores a 30 min serão considerados como pontuais, verifica-se na Tabela 17 que o evento de ruptura simulado no cenário 02 reduziu o nível de serviço do sistema de transporte de 99,71% para 96,43% (impacto de 3,28% na pontualidade dos pousos).

Outro fato impactante originado pelo evento de ruptura é a quantidade de atrasos superiores à 01 hora (46 voos). Atrasos desse tipo não ocorreram na simulação do cenário 01.

4.7.16 Resultados para o KPI 05 na FIR SBCW:

O TAAM permite a análise do consumo de combustível das aeronaves através da parametrização do valor de custo do querosene de aviação (QAV-1) em U\$/kg. Em função das inúmeras regras de taxação de impostos no Brasil, o mercado de aviação aplica preços diferentes para o consumo do QAV-1 em voos domésticos e em voos internacionais. Portanto, a estimativa utilizada neste trabalho para determinar o valor médio do QAV-1 para ambos os cenários é especificada na Tabela 19:

Tabela 19 – Estimativa do custo do QAV-1 para a simulação (U\$/kg)

Cotação QAV-1			Massa Específica do QAV à 20° C (771,3 - 836,6)		
Aeroporto	Tipo de Voo	Preço (U\$/L)	Limite Inferior (kg/m³)	Limite Inferior (kg/L)	Preço (U\$/kg)
SBGR	Internacional	2,1	771,3	0,7713	2,7
SBGR	Doméstico	2,7	771,3	0,7713	3,5
Preço médio (QAV -1):					3,1

Fonte: Adaptado de Folha de São Paulo (2017) e Petrobrás (2014).

A evolução horária do custo de combustível resultante dos cenários da simulação possui o perfil descrito no Gráfico 40:

Gráfico 40 – Custo horário total com combustível de aviação na FIR SBCW

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por consequência, a curva de resiliência do KPI 05 apresentou o seguinte perfil:

Gráfico 41 – Curva de resiliência para o KPI 05 na FIR SBCW

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas informações do Gráfico 40 e do Gráfico 41 verifica-se uma forte variação no consumo de combustível de aviação entre as 09:00 UTC e as 14:00 UTC.

O resultado dessa variação é o incremento de gasto com QAV-1 no valor de U\$ 20.702,00 (aproximadamente R\$ 67.530,92). Essa variação representa um aumento de 0,07% nos gastos de combustível, quando comparados os cenários 01 e 02 da simulação.

4.8 NÍVEL DE RESILIÊNCIA

O sistema de tráfego aéreo analisado apresentou um nível de resiliência adequado e plenamente capaz de absorver os impactos do evento de ruptura originado pelas condições meteorológicas adversas identificadas nos aeroportos SBRJ e SBSP no dia 31 de maio de 2017.

Com a capacidade horária (CHS) gerada pelo emprego de dois controladores de tráfego aéreo em cada setor da FIR SCBW, o sistema de transporte consegue gerenciar os incrementos de demanda sem resultar em conflitos de tráfego aéreo com severidade crítica (zero).

As oportunidades de melhoria recaem, portanto, na busca por estratégias que evitem as quedas nos indicadores de nível de serviço do sistema de transporte. Os impactos na pontualidade do voo (queda de 3,28%), na quantidade de conflitos de tráfego (aumento de 10%) e no gasto de combustível de aviação (aumento de 0,07%) ensejam alternativas para minimizá-los.

4.9 ESTRATÉGIAS DE MELHORIA DO NÍVEL DE RESILIÊNCIA

As estratégias de melhoria para aumentar o nível de resiliência do sistema de tráfego aéreo podem compreender desde ações simples como a atualização de processos operacionais até ações mais difíceis como a instalação de novos equipamentos ou a revisão de normas e políticas públicas.

Uma possível estratégia para melhorar a curva de resiliência do setor CW 12 passa pelo emprego de setorização dinâmica na FIR SBCW. Através desse conceito, são criados setores de tráfego aéreo menores e temporários para dividir a demanda no setor CW 12, estabilizando a curva de resiliência em um período de tempo inferior ao identificado.

A estratégia de setorização dinâmica poder ser uma alternativa para reduzir também o acréscimo de 10% identificado na quantidade de conflitos de tráfego aéreo (KPI 03). Ao criar setores menores e temporários, a demanda de aeronaves passa a ser dividida entre novos controladores de tráfego aéreo, possibilitando ações preventivas de melhor qualidade contra esses conflitos.

Para reduzir o impacto verificado no KPI 04 (Atrasos em voo), uma estratégia a ser considerada é instalar equipamentos em solo que permitam a aproximação de precisão (ILS) no aeroporto SBRJ. O equipamento ILS reduziria os valores mínimos exigidos para o teto e visibilidade no aeroporto SBRJ, permitindo a operação de pousos e decolagens em condições meteorológicas mais severas. Assim, o período de suspensão das operações aéreas seria reduzido e a pontualidade dos voos seria menos impactada.

Embora não tenha ocorrido ruptura no sistema detectada pelo KPI 01 (Evolução horária das aeronaves) e KPI 02 (taxa de ocupação do setor), uma estratégia para reduzir o aumento na taxa de ocupação dos setores passa por incentivar a capacitação e homologação de pilotos da aviação não-regular para a execução de aproximação de precisão (ILS) em SBRJ e SBSP. Essa ação aumentaria a frota de aeronaves capazes de pousar e decolar sob situações meteorológicas adversas, garantindo as operações aéreas dentro dos períodos de voo programados.

A revisão das políticas nacionais de taxação diferenciada sobre o preço do combustível de aviação poderia ser uma estratégia para tentar minimizar o impacto detectado pelo KPI 05 (Custo Total com Combustível). Essa estratégia pode ser motivo de análises mais aprofundadas sobre os impactos econômicos.

Cabe ressaltar que as estratégias sugeridas anteriormente dizem respeito aos efeitos provocados pelo evento de ruptura simulado. A replicação dessas estratégias em outros aeroportos e espaços aéreo similares enseja também a avaliação do nível de resiliência pelo modelo proposto. Em sistemas de transporte muito diferentes do simulado, a relação custo-benefício de uma estratégia pode inviabilizar a sua implantação.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este último capítulo apresenta as conclusões da pesquisa, alguns comentários adicionais sobre a aplicação do modelo proposto, as sugestões de melhoria e as propostas de trabalhos futuros identificadas.

5.1 CONCLUSÕES

Pode-se compreender dos conceitos e abordagens discutidas neste trabalho que o estudo da resiliência em sistemas de transporte encontra-se em desenvolvimento, mas que já existe um ferramental metodológico significativo para a sua mensuração tanto qualitativa quanto quantitativa.

Fica evidenciado que a definição de resiliência varia de acordo com cada área de estudo específica, mas é possível contextualizar essa definição para os sistemas de transporte sem nenhuma dificuldade.

Depreende-se também que a resiliência dos sistemas de transporte é uma habilidade que precisa ser avaliada através da aplicação de técnicas científicas que busquem relacionar suas capacidades, seus níveis de serviço e seus tempos de recuperação frente ao evento de ruptura.

O modelo proposto mostra-se eficiente para a análise de resiliência em sistemas de transportes, com 09 (nove) etapas claras e premissas definidas que viabilizam sua implementação. Assim, a capacidade do sistema, seu nível de serviço e os tempos de recuperação podem ser analisados de forma efetiva à luz dos impactos do evento de ruptura.

A aplicação de simulação por eventos discretos para análise de resiliência tornou-se viável com o referencial teórico existente, mesmo em sistemas de transportes regidos por inúmeras funções de desempenho. Evidencia-se, assim, que a técnica de simulação de eventos discretos pode ser plenamente utilizada como ferramenta para análise de resiliência em sistemas de transportes.

A análise de resiliência em sistemas de tráfego aéreo torna-se plenamente factível através do modelo proposto, como evidenciado no estudo de caso aplicado. Não

foram identificadas limitações no modelo para análise de eventos de ruptura ocorrendo simultaneamente em aeródromos distintos, mesmo com seus reflexos impactando o fluxo de tráfego de forma diferente em setores de tráfego pertencente à uma mesma região de informação de voo (FIR).

Através do modelo proposto foi possível identificar que o evento de ruptura simulado reduziu o nível de pontualidade do sistema de transporte de 99,71% para 96,43% (impacto de 3,28%), com 46 voos apresentando atrasos acima de 01 hora em seus tempos de viagem.

É possível identificar também que a maioria dos setores de tráfego aéreo retornaram aos seus níveis operacionais normais em até 05 horas após serem impactados, resultando em uma taxa de ocupação máxima de 87,5% (setor CW 12).

Verifica-se que a quantidade de conflitos de tráfego aéreo cresceu em 10% na presença do evento de ruptura. Por outro lado, o nível de segurança permaneceu equilibrado pois não ocorreram colisões entre aeronaves (conflitos de severidade 0).

Identifica-se que o evento de ruptura simulado gera um incremento de 0,07% no total gasto com combustível de aviação. Aparentemente pequeno, esse impacto representa o valor de U\$ 20.702,00 (aproximadamente R\$ 67.530,92) de custo adicional.

Conclui-se que o sistema de tráfego aéreo apresentou nível de resiliência adequado para as funções de desempenho definidas (KPI 01, 02, 03, 04 e 05), não extrapolando sua capacidade operacional (CHS) em todos os setores da FIR SBCW e sofrendo impactos controlados em seus níveis de serviço.

Pelos resultados finais obtidos, verifica-se que o modelo proposto para análise de resiliência pode ser executado em outros sistemas de transportes desde que respeitadas as premissas e etapas definidas no modelo. Não foram identificadas restrições críticas à aplicação do modelo proposto em sistema de transportes, inclusive se forem utilizados diferentes ambientes computacionais de simulação.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Trabalhos futuros na área de resiliência podem considerar, por exemplo, eventos de ruptura com impactos maiores no fluxo operacional, visando testar assim a capacidade limite do sistema de transporte.

Surge como interessante campo de estudo as análises de resiliência em sistemas de transportes na presença de ataques cibernéticos (*cyber attack*). Esses eventos de ruptura podem afetar toda a infraestrutura do sistema de transporte em um curto período de tempo, impactando significativamente a capacidade e o nível de serviço do sistema.

Em relação aos sistemas de tráfego aéreo, outra alternativa de estudo passa pelo incremento na demanda de voos do sistema de transporte, avaliando assim se o nível de serviço será mantido em condições controladas durante o mesmo evento de ruptura.

As análises de eventos de ruptura que afetem elementos de infraestrutura em solo como pistas de pouso, pistas de taxi e pontes de embarque/desembarque (gateways) também apresentam interessante campo de estudo para a resiliência aeroportuária. Essas análises podem enfatizar a relação custo-benefício para novos elementos de infraestrutura aeroportuária que visem aumentar o nível de resiliência do sistema.

Da mesma forma, torna-se interessante a análise de resiliência em espaços aéreos cujas características de voo são mais complexas como as áreas de controle terminal (TMA). Nesses espaços aéreos as capacidades horárias de setor (CHS) são geralmente menores e mais restritivas, demandando uma recuperação rápida e um maior nível de resiliência.

Por último, torna-se importante avaliar em trabalhos futuros se as estratégias para melhoria dos níveis de resiliência podem ser generalizadas para outros ambientes de tráfego aéreo. A existência de similaridade nas condições dos sistemas de tráfego aéreo pode promover discussões e conclusões interessantes sobre o modelo proposto para determinação do nível de resiliência.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, N. A. S.; NOOR, N. L. M.; IBRAHIM, E. N. M. **Resilient organization: Modelling the capacity for resilience**. 2013 International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS), nov. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6716729/>>
- ALBORES, P.; SHAW, D. Government preparedness: Using simulation to prepare for a terrorist attack. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 6, p. 1924–1943, jun. 2008.
- ANAC. **IAC 1502-0699 - Cálculo dos Índices de Regularidades, de Pontualidade e de Eficiência Operacional**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- BERTALANFFY, L. VON. **Teoria Geral dos Sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1973.
- BOTTER, R. C. **Tratamento de dados em modelos de simulação discreta**. São Paulo, 2002.
- BRASIL. **MCA 100-17 - Capacidade de Setor ATC**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<http://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4065>>.
- BRASIL. **ICA 100-12 - Regras do Ar**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4429>>.
- BRASIL. **ICA 100-37 - Serviços de Tráfego Aéreo**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4662>>.
- BRUNEAU, M.; REINHORN, A. M. Overview of the resilience Concept. **Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering**, n. 2040, p. 2–6, 2006.
- BUKOWSKI, L. A.; FELIKS, J. **Multi-Dimensional Concept of Supply Chain Resilience**. Congress Proceedings - CLC 2012: Carpathian Logistics Congress, 2012. Disponível em: <<http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/09/reports/1218.pdf>>
- BUSINESS CONTINUITY INSTITUTE. **Supply Chain Resilience 2015 Annual Survey**, 2015. Disponível em: <<http://www.bcifiles.com/bci-supply-chain-resilience-2015.pdf>>
- BUTTON, K. J.; HENSHER, D. A. **Handbook of Transport Systems and Traffic Control**. Bingley, UK: Emerald, 2001.
- CARIM JUNIOR, G. C.; SAURIN, T. A. Diretrizes para identificação e análise de fontes de resiliência e fragilidades: estudo de caso em duas empresas de táxi-aéreo. **Produção**, v. 23, n. 4, p. 777–792, dez. 2013.
- CARVALHO, H. et al. Supply chain redesign for resilience using simulation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 62, n. 1, p. 329–341, fev. 2012.
- CHEN, L.; MILLER-HOOKS, E. Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport. **Transportation Science**, v. 46, n. 1, p. 109–123, 2012.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gestão da Cadeira de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Gestão**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

CHRISTOPHER, M.; PECK, H. Building the Resilient Supply Chain. **The International Journal of Logistics Management**, v. 15, n. 2, p. 1–14, jul. 2004.

CHURCHMAN, C. W. **Introdução a Teoria dos Sistemas**. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 1972.

CHWIF, L. **Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Concepção: Uma Abordagem Causal**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1999.

COSTA, F. H. DE O.; SILVA, A. L.; PEREIRA, C. R. Facilitadores à resiliência na cadeia de suprimentos: uma revisão sistemática de literatura. **Anais do XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**, p. 16, 2015.

COX, A.; PRAGER, F.; ROSE, A. Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics. **Transport Policy**, v. 18, n. 2, p. 307–317, 2011.

CRANFIELD UNIVERSITY. **Supply chain vulnerability**, 2002. Disponível em: <http://www.som.cranfield.ac.uk/som/dinamic-content/research/lscm/downloads/Vulnerability_report.pdf>

DECEA. **Anuario Estatística de Tráfego Aéreo 2015** Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.cgna.gov.br/wp-content/themes/cgna/documentos/do/anuarios/anuario_2015.pdf>

DECEA. **Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2016**. Rio de Janeiro, 2016.

DECEA. **Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica (REDEMET)**. Disponível em: <<https://www.redemet.aer.mil.br>>. Acesso em: 30 maio. 2017a.

DECEA. **Serviço de Informação Aeronáutica do DECEA (AISWEB)**. Disponível em: <<https://www.aisweb.aer.mil.br>>. Acesso em: 19 nov. 2017b.

DHL. A look back at 2015: The top 10 supply chain disruptions. **Delivered. The Global Logistics Magazine**, 2015.

FAKOOR, A. M. et al. A Method for Measuring Supply Chain Resilience in the Automobile Industry. **Journal of Basic and Applied Scientific Research**, v. 3, n. 2, p. 537–544, 2013.

FATURECHI, R.; MILLER-HOOKS, E. Travel time resilience of roadway networks under disaster. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 70, p. 47–64, dez. 2014.

FIKSEL, J. Sustainability and resilience: toward a systems approach. **Sustainability: Science, Practice & Policy**, v. 2, n. 2, p. 1–8, 2006.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Preço do combustível de aviação no Brasil é 46% maior do que nos EUAS** São PauloFolha de São Paulo, , 2017. Disponível em: <<http://estudio.folha.uol.com.br/brasil-que-voa/2017/05/1886629-preco-do-combustivel-de-aviacao-no-brasil-e-46-maior-do-que-nos-eua.shtml>>

GATTORNA, J. **Dynamic Supply Chains: How to design, build and manage people-centric value networks**. 3rd. ed. Harlow, UK: Pearson Education Limited, 2015.

GUALDA, N. D. F. **Terminais de Transporte: Contribuição ao Planejamento e ao Dimensionamento Operacional**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1995.

HENRY, D.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 99, p. 114–122, 2012.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8 ed. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

HIRST, M. **The Air Transport System**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008.

HOLLNAGEL, E. et al. **Resilience Engineering in Practice: A Guidebook**. Aldershot: Ashgate, 2011.

HOLLNAGEL, E.; NEMETH, C. P. **Resilience Engineering in Practice: Becoming Resilient**. Cambridge: Ashgate, 2014.

HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVENSON, N. **Resilience Engineering: Concepts and Precepts**. Aldershot: Ashgate, 2006.

HOSSEINI, S.; BARKER, K.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. A review of definitions and measures of system resilience. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 145, p. 47–61, jan. 2016.

ICAO. **Safety Management Manual** Quebec, Canada, 2013. Disponível em: <http://www.icao.int/fsix/_Library/SMM-9859_1ed_en.pdf>

ICEA. **Capacidade Horário dos Setores da FIR Curitiba (SBCW)**. São José dos Campos, SP: [s.n.].

IP, W. H.; WANG, D. Resilience and Friability of Transportation Networks: Evaluation, Analysis and Optimization. **IEEE Systems Journal**, v. 5, n. 2, p. 189–198, jun. 2011.

JANIĆ, M. **Advanced Transport Systems**. London: Springer, 2014.

JANIĆ, M. Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 71, p. 1–16, jan. 2015.

JEPPESEN. **TAAM Reporter User Manual**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.jepesen.com>.

KNIGHT, J. C. **Safety critical systems** **Proceedings of the 24th international conference on software engineering** New York, USAACM Press, , 2002. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=581339.581406>>

KUTZ, M. **Handbook of Transportation Engineering**. New York: McGraw-Hill Book, 2004.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. DE A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MADNI, A. M.; JACKSON, S. Towards a conceptual framework for resilience engineering. **IEEE Systems Journal**, v. 3, n. 2, p. 181–191, 2009.

MATTSSON, L.-G.; JENELIUS, E. Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 81, p. 16–34, nov. 2015.

MEDAU, J. C. **Análise de capacidade do lado aéreo de aeroportos baseada em simulação computacional: aplicação ao aeroporto de são paulo – congonhas** São Paulo, 2011.

MEDINA, A. C.; CHWIF, L. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 4 Rev. Amp ed. São Paulo: Elsevier, 2014.

MEREDITH, D. D. et al. **Design and Planning of Engineering Systems**. 2. ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1985.

MOSER, R. F. **Simulação e Análise de Configurações Aeroportuárias utilizando o SIMMOD: aplicação ao aeroporto internacional de São Paulo/Guarulhos** São Paulo, 2007.

MUNICH RE. **Natural Loss Events Worldwide - 2014 - Geographical Overview**, 2015. Disponível em: <<http://reliefweb.int/report/world/loss-events-worldwide-2014-geographical-overview>>

MUNICH RE. **Natural Loss Events Worldwide - 2015 - Geographical Overview**, 2016. Disponível em: <https://www.munichre.com/site/wrap/get/documents_E1656163460/mram/assetpool.munichreamerica.wrap/PDF/07Press/2015_World_map_of_nat_cats.pdf>

NANCE, R. E. A history of discrete event simulation programming languages. **ACM SIGPLAN Notices**, v. 28, n. 3, p. 149–175, 1 mar. 1993.

NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**. Washington, DC: NASA, 2007.

NASA. **NASA System Safety Handbook**. Washington, DC: NASA, 2011. v. 1

NEUFVILLE, R. DE; ODoni, A. **Airport Systems : Planning, Design and Management**. New York: McGraw-Hill, 2003.

OLIVEIRA, M. DE. **Carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo - análise da área de controle terminal Brasília por meio de simulação**. São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

PETROBRÁS. **Querosene de Aviação - Informações Técnicas versão 1.3** Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticnica/public/downloads/QAV-Informações-Técnicas-v.1.3-29.pdf>>

PETTIT, T. J. **Supply Chain Resilience: Development of a Conceptual Framework, an Assessment Tool and an Implementation Process**. Ohio, US: The Ohio State University, 2008.

RIBEIRO, F. R. **Modelo de simulação para análise operacional de pátio de aeroportos** São Paulo, 2003.

ROCHA, A. C. **Estimativa simulada das emissão atmosféricas provenientes da aviação civil regular no Brasil em um dia específico**. São José dos Campos, SP: INPE, 2012.

SANTOS, M. G. DOS; ALCANTARA, R. L. C. Características conceituais da resiliência em cadeia de suprimentos: uma revisão sistemática da literatura. **Anais do XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**, p. 14, 2015.

SHEFFI, Y. Supply Chain Management under the Threat of International Terrorism. **The International Journal of Logistics Management**, v. 12, n. 2, p. 1–11, 2001.

SHEFFI, Y.; RICE JR., J. B. A Supply Chain View of the Resilient Enterprise. **MIT Sloan Management Review**, v. 47, n. 1, p. 41–48, 2005.

TAMVAKIS, P.; XENIDIS, Y. Resilience in Transportation Systems. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 48, p. 3441–3450, 2012.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Logistics & Supply Chain Industry Agenda CouncilWorld Economic Forum**, 2011. Disponível em: <<http://www.weforum.org/reports/logistics-supply-chain-industry-agenda-council-final-report-2010-2011>>

ZHANG, X.; MILLER-HOOKS, E.; DENNY, K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience. **Journal of Transport Geography**, v. 46, p. 35–45, jun. 2015.

ZOLLI, A.; HEALY, A. M. **Resilience: Why things bounce back**. New York, USA: Simon & Schuster, Inc, 2012.

APÊNDICE A - Capacidades e Vulnerabilidade do SCRAM™

O levantamento realizado por Pettit (2008) para a construção da estrutura de avaliação de resiliência em sistemas logísticos elenca 7 fatores de vulnerabilidade compostos de 40 subfatores específicos, além de 14 fatores de capacidade e seus respectivos 71 subfatores específicos.

A Tabela 20 apresenta e define os fatores de vulnerabilidade com seus respectivos subfatores pertencentes ao SCRAM™:

Tabela 20 – Subfatores de vulnerabilidades em sistemas logísticos

Fator de Vulnerabilidade	Definição	Subfatores
Turbulência	Ambiente caracterizado por frequentes mudanças nos fatores externos e além do seu controle próprio.	Desastres naturais, Exposição a rupturas geopolíticas, Imprevisibilidade da demanda, Flutuações no câmbio e preços, Falhas tecnológicas imprevistas, Pandemias.
Ameaças Deliberadas	Ataques intencionais com o objetivo de provocar rupturas operacionais, prejuízos financeiros ou danos à vida.	Pirataria e roubo, Terrorismo e sabotagem, Disputas trabalhistas, Espionagem industrial, Interesses coletivos especiais, Falhas em produtos (<i>Recall</i>).
Pressões Externas	Influências, não especificamente visando o sistema ou a empresa, capazes de criar restrições de negócio ou barreiras.	Inovação competitiva, Mudanças sociais/culturais, Mudanças políticas/regulatórias, Pressões de preço, Responsabilidade corporativa, Mudanças ambientais.
Limitação de Recursos	Restrições na produção originadas na disponibilidade de algum fator/insumo produtivo.	Capacidade dos fornecedores, Capacidade de produção, Capacidade de distribuição, Disponibilidade de matéria-prima, Disponibilidade de insumos básicos (energia, água, etc.), Recursos humanos.
Integridade	Importância das condições cuidadosamente controladas para a integridade dos produtos e processos.	Complexidade, Pureza do produto, Materiais restritos, Fragilidade, Confiabilidade de equipamentos, Riscos potenciais de segurança, Visibilidade de rupturas para as partes interessadas (<i>stakeholders</i>), Perfil simbólico da marca, Concentração de capacidade.
Conectividade	Grau de interdependência e confiança com entidades externas.	Escala/extensão da rede, Confiança no fluxo de informação, Grau de terceirização, Canais de importação e exportação, dependência de insumos especializados.
Rupturas no Fornecedor / Cliente	Suscetibilidade de fornecedores e clientes a forças ou perturbações externas.	Confiança nos fornecedores, Ruptura nos clientes.

Fonte: Traduzido de Pettit (2008).

A Tabela 21 apresenta e define os fatores de capacidade com seus respectivos subfatores pertencentes ao SCRAM™:

Tabela 21 – Subfatores de capacidades em sistemas logísticos

Fator de Capacidade	Definição	Subfatores
Flexibilidade na Terceirização	Habilidade para rapidamente mudar as entradas ou insumos do sistema ou a forma de receber essas entradas ou insumos	Compartilhamento de instalações e processos, Modularidade e intercambio de produtos, Múltiplo uso para os suprimentos, Flexibilidade de contrato com fornecedores, Múltiplas fontes.
Flexibilidade no atendimento de pedidos	Habilidade para rapidamente mudar as saídas/produtos do sistema ou a forma de entregar essas saídas/produtos	Canais de distribuição alternativos, Compartilhamento de riscos, Multi-terceirização, Adiamento da produção (<i>postponement</i>), Gestão de inventário, realinhamento rápido de requisitos.
Capacidade	Disponibilidade de ativos para permitir níveis de produção sustentáveis	Capacidade reserva (materiais, bens, equipes, inventário), Redundância (ativos, equipes), Backup de fontes de energia/comunicação.
Eficiência	Capacidade de produzir saídas/produtos no sistema com os mínimos recursos necessários	Eliminação de desperdícios, Produtividade do trabalho, Utilização de ativos, Redução da variabilidade do produto, Prevenção de falhas.
Visibilidade	Conhecimento do estado dos ativos operacionais e do ambiente	Aplicação de <i>business intelligence</i> , Uso de tecnologia da informação, Visibilidade de produtos, ativos e pessoas, Intercâmbio colaborativo de informação.
Adaptabilidade	Capacidade de modificar as operações em resposta aos desafios e oportunidades	Realinhamento rápido de requisitos, Melhoria de Processos, Redução de tempo de execução, Jogos estratégicos e simulação, Aprendizagem vantajosa das rupturas, Desenvolvimento de tecnologias alternativas, Aprender com a experiência (reengenharia).
Antecipação	Habilidade para discernir potenciais eventos futuros ou situações	Monitoramento de sinais de alerta, Previsão de desvios, Análise de incidentes (<i>Near-miss analysis</i>), Planejamento de contingência, Preparação (planos de formação / treino / exercício), Gestão de riscos, Plano de continuidade de negócios, Reconhecimento de oportunidades.
Recuperação	Habilidade de retornar ao estado operacional normal rapidamente	Gerenciamento de crise, Mobilização de recursos, Estratégia de comunicação, Mitigação de consequências.
Dispersão	Distribuição ampla ou descentralização de ativos	Tomada de decisões distribuídas, Distribuição de ativos e capacidades, Descentralização de recursos-chave (incluindo dados), Localização específica de forças, Dispersão geográfica dos mercados.

Colaboração	Capacidade de trabalhar eficazmente com outras entidades para benefício mútuo	Previsão colaborativa e gestão do relacionamento com clientes, Comunicações (internas, externas), Adiamento de pedidos (<i>postponement</i>), Gestão de ciclo de vida do produto, Compartilhamento de riscos com fornecedores.
Organização	Estruturas de recursos humanos, políticas, competências e cultura da organização/sistema.	Aprendizagem, <i>benchmarking</i> e <i>feedback</i> , Responsabilidade e delegação, Trabalho em equipe e resolução criativa de problemas, Formação de equipes, Capacidade de substituição de lideranças, Cultura de cuidar de empregados.
Posição de Mercado	Estado/posicionamento de uma empresa ou seus produtos em relação a mercados específicos	Diferenciação do produto, Lealdade e retenção do cliente, Participação de mercado (<i>market share</i>), Valor da marca, Relações com os consumidores, comunicação com os clientes.
Segurança	Defesa contra a invasão deliberada ou ataque	Defesas em camadas, restrições de acesso, Envolvimento dos trabalhadores na manutenção da segurança, Colaboração com governo, Cibersegurança, Segurança pessoal.
Força Financeira	Capacidade de absorver flutuações no fluxo de caixa	Seguros, Diversificação da carteira, Reservas financeiras e nível de liquidez, Margem de preço.

Fonte: Traduzido de Pettit (2008).

APÊNDICE B - Resilience Analysis Grid (RAG)

Hollnagel et al (2011) preconizam que a resiliência é uma característica mais qualitativa do que quantitativa em um sistema. Em função dessa visão, sua ferramenta de análise (RAG) pode ser aplicada através de questionários entregues aos especialistas visando conhecer suas avaliações acerca das quatro habilidades que tornam um sistema resiliente.

As tabelas a seguir apresentam alguns exemplos de questões de avaliação para cada uma das habilidades necessárias à análise de resiliência através do RAG:

Tabela 22 – Questões para análise da habilidade de resposta de sistemas

Crítérios	Questões
Lista de Eventos de Ruptura	Existe uma lista de eventos para o qual o sistema está preparado para responder? Os eventos da lista atual fazem sentido? A lista está completa?
Experiência	Há uma base clara para a seleção dos eventos? A lista de eventos é baseada na tradição, requerimentos regulatórios, bases de projeto, experiência, especialidades, avaliações de risco, padrões da indústria, etc.?
Relevância	A lista é mantida atualizada? Há orientações e regras sobre quando ela deve ser atualizada (por exemplo, regularmente ou quando necessário)? Em que base ela é revisada (por exemplo, eventos estatísticos, acidentes, etc.)?
Fronteiras	Existem critérios claros para ativar uma reposta? Os critérios referem-se a um valor limite ou uma taxa de mudança? Os critérios são absolutos ou dependem de algum fator interno/externo? Há alguma análise de benefício entre segurança e produtividade?
Lista de Resposta aos Eventos de Ruptura	Como é determinada qual resposta é adequada para a situação a ser enfrentada? Empiricamente ou baseada em análises e modelos? Está claro como as respostas foram escolhidas?
Velocidade	Em quanto tempo uma resposta eficaz inicia? Quão rápido a capacidade total de resposta pode ser estabelecida?
Duração	Por quanto tempo uma resposta eficaz pode ser mantida? Qual rápido os recursos podem ser substituídos? Qual é o período de resistência?
Recursos	Existem recursos de resposta adequados e disponíveis (pessoas, materiais, conhecimento, tempo, etc.)? Quantos recursos são mantidos exclusivamente para as respostas?
Regras de Parada	Há um critério claro para o retorno ao estado normal?
Verificação	A prontidão para responder está mantida? Como e quando a prontidão de resposta é verificada?

Fonte: Traduzido de Hollnagel et al (2011).

Tabela 23 – Questões para análise da habilidade de monitoramento de sistemas

Crítérios	Questões
Lista de Indicadores	Como os indicadores foram definidos? (Por análise, pela tradição, pelo padrão da indústria, pelo regulador, pelos padrões internacionais, etc.)
Relevância	Quando a lista de indicadores foi criada? Com que frequência é revisada? Com que bases ela é revisada? Há algum responsável por manter a lista?
Tipo de Indicador	Quais os tipos de indicadores aplicados (qualidade, capacidade, produtividade, etc.? Os indicadores são medidos de forma isolada ou agregada?
Validade	Como a validade dos indicadores é estabelecida? Eles estão baseados em um modelo de processo estruturado?
Atraso	Qual a duração dos atrasos nos indicadores?
Tipo de Medição	Quão apropriados são os cálculos dos indicadores? Eles são qualitativos ou quantitativos? Se quantitativo, há algum tipo de escala razoável de valores? Qual confiáveis são as medições?
Análise / Interpretação	Qual o tempo entre a medição e a análise ou interpretação do indicador? Quantos indicadores são diretamente explícitos e quantos precisam de algum tipo de análise? Como os resultados são comunicados e usados?
Estabilidade	Os efeitos medidos pelos indicadores são transientes ou permanentes? Como isso é determinado?
Suporte Organizacional	Existe um regime de controle regular ou programado dos indicadores? Eles são dotados de recursos suficientes?

Fonte: Traduzido de Hollnagel et al (2011).

Tabela 24 – Questões para análise da habilidade de antecipação de sistemas

Crítérios	Questões
Experiência	Há experiência ou conhecimento disponíveis para vislumbrar o futuro? Eles são internos ou externos?
Frequência	Com que frequências as oportunidades e ameaças futuras são avaliadas? As avaliações e reavaliações são regulares ou irregulares?
Comunicação	Quão bem as expectativas sobre eventos futuros são comunicados e compartilhados dentro da organização?
Premissas para o futuro	A organização possui um modelo de futuro reconhecido? Esse modelo está claramente formulado? O modelo ou as premissas de futuro são explícitas ou implícitas? É um modelo estruturado ou popular (por exemplo, modelo de senso comum)?
Horizonte de tempo	Qual distante a organização está olhando à frente? Há um horizonte de tempo comum para diferentes áreas de organização? O horizonte de tempo atinge a natureza dos processos chaves do negócio?
Aceitação aos riscos	Há um explícito reconhecimento dos riscos aceitáveis e inaceitáveis? As bases para essa distinção são claramente expressas?
Natureza	Qual a natureza das ameaças futuras adotadas? Como elas são e como se desenvolvem? Qual a natureza das oportunidades futuras adotadas? Como elas são e como se desenvolvem?
Cultura	Em que medida a consciência dos riscos é parte da cultura organizacional?

Fonte: Traduzido de Hollnagel et al (2011).

Tabela 25 – Questões para análise da habilidade de aprendizado de sistemas

Critérios	Questões
Critérios de seleção	Há princípios claros para determinar quais eventos serão investigados e quais não irão (valor, severidade, etc.)? A seleção é feita sistematicamente ou atropeladamente? A seleção depende de alguma condição (tempo, recurso, etc.)
Base de aprendizado	A organização tenta aprender com base no que é comum (cases de sucesso, coisas que estão indo bem) assim como busca aprender com o que é raro (falhas, coisas que vão mal)?
Coleta de dados	Há algum treinamento formal ou suporte organizacional para a coleta de dados, análise e aprendizagem?
Classificação	Como os eventos são descritos? Como os dados são coletados e categorizados? A categorização depende dos resultados das investigações?
Frequência	O aprendizado é contínuo ou é uma atividade isolada?
Recursos	Há recursos adequados alocados para a análise e investigação assim como para a disseminação dos resultados e aprendizagem? Essa alocação é estável ou é baseada em objetivos específicos?
Atraso	Qual o tempo despendido entre o reporte do evento, a análise e o aprendizado? Qual rápido os resultados são comunicados internamente e externamente na organização?
Metas de Aprendizado	Em que nível o aprendizado produz efeito (individual, coletivo, organizacional, etc.)? Há alguém responsável por compilar as experiências e deixa-las fáceis de serem aprendidas?
Implementação	Como as lições aprendidas são implementadas? Através de procedimentos, normas, treinamentos, instruções, reorganizações, etc.)?
Verificação / Manutenção	Existem meios para verificar ou confirmar se o aprendizado pretendido ocorreu mesmo? Existem meios no local para manter o que foi aprendido?

Fonte: Traduzido de Hollnagel et al (2011).