

REDES DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS

Análise de Desempenho e Riscos dos Setores de Energia, Petróleo, Gás, Água, Finanças, Logística e Comunicações



REDES DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS

Análise de Desempenho e Riscos dos Setores de Energia, Petróleo, Gás, Água, Finanças, Logística e Comunicações

IONY PATRIOTA DE SIQUEIRA



EDITORA INTERCIÊNCIA

Rio de Janeiro – 2014



Copyright © 2013, by Iony Patriota de Siqueira, D.Sc.

Direitos Reservados em 2014 por **Editora Interciência Ltda.**

Diagramação: Claudia Regina S. L. de Medeiros

Revisão Ortográfica: Maria Paula da M. Ribeiro

Márcia Valéria Nogueira da Rocha

Capa: Marcella Real

CIP-Brasil. Catalogação-na-Fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ

S628r

Siqueira, Iony Patriota de

Redes de infraestruturas críticas: análise de desempenho e riscos dos setores de energia, petróleo, gás, água, finanças, logística e comunicações/Iony Patriota de Siqueira. – 1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

580 p. il.; 28 cm.

Inclui apêndice, bibliografia e índice

ISBN 978-85-7193-315-6

1. Engenharia de estruturas. I. Título.

13.06026

CDD: 624.1

CDU: 624.1

É proibida a reprodução total ou parcial, por quaisquer meios,
sem autorização por escrito da editora.

www.editorainterciencia.com.br



Editora Interciência Ltda.

Rua Verna Magalhães, 66 – Engenho Novo

Rio de Janeiro – RJ – 20710-290

Tels.: (21) 2581-9378 / 2241-6916 – Fax: (21) 2501-4760

e-mail: vendas@editorainterciencia.com.br

Impresso no Brasil – *Printed in Brazil*

Dedicatória

A Gislaine

Agradecimentos

O autor agradece à sua família, pelo amor,
incentivo e suporte, sempre presentes.

Prefácio

Redes de serviços essenciais, de energia, petróleo, gás, saneamento, finanças, logística e comunicações fazem parte da infraestrutura básica de funcionamento de cidades, regiões, nações e continentes inteiros. Preservar sua integridade física e funcional é requisito para a qualidade de vida e segurança das sociedades modernas. Por sua extensão geográfica, capacidade, interdependência e complexidade, estão sujeitas a falhas intrínsecas, de natureza tecnológica, e extrínsecas, de causas naturais ou provocadas pelo homem. As consequências afetam pessoas, famílias e empresas, e as áreas sociais, legais, ambientais, geopolíticas, internacionais, técnicas e econômicas de cidades, estados, países e continentes.

Com capilaridade entre as demais redes de infraestrutura sociais, os sistemas elétricos de potência e as redes de dados e comunicações desempenham papéis integradores e motores dos mecanismos críticos de funcionamento das sociedades modernas. Todas as redes de utilidades e serviços sociais, militares e econômicos modernos dependem do funcionamento e afetam o desempenho destes sistemas. A dimensão e estrutura comuns a estas redes, de extensões transnacionais e transcontinentais, motivaram sua denominação, no final da década de 1990, de Redes Complexas, iniciando um novo ramo da ciência, dedicado à modelagem, análise, simulação e previsão de seu comportamento.

A ocorrência de grandes desligamentos ou “apagões” nestes sistemas tem gerado questionamentos da sociedade sobre sua segurança e responsabilidades. A recente introdução da concorrência nos mercados de energia elétrica, gás, água, comunicações e petróleo, antes operados de forma monopolista, além de regras operacionais claras exige o estabelecimento de processos efetivos e auditáveis de avaliação de desempenho e risco, para balizar decisões de planejamento, projeto, fiscalização, operação e manutenção. A pesquisa destes métodos tem desafiado planejadores, investidores, gestores, operadores e projetistas durante várias décadas. Mais recentemente o assunto mereceu a atenção renovada de órgãos reguladores e opinião pública em geral, após a reformulação dos modelos das indústrias elétrica, de comunicações, de gás e petróleo mundiais, com crescente demanda de qualidade e confiabilidade na prestação de serviços.

A formação de blocos coesos de países – por razões geopolíticas, econômicas, militares ou religiosas – promove a interligação e extensão das redes de infraestrutura além das fronteiras nacionais. A possibilidade de ataques terroristas ou militares transformam estes blocos em alvos e objetivos estratégicos para o bem-estar e segurança das nações. Preservar a integridade física e funcional dos setores de infraestrutura básica tornou-se um fator crítico de sucesso da geopolítica, estratégia militar e segurança pública de todas as nações. O estudo de catástrofes naturais utilizando modelos de interdependência das infraestruturas básicas de estados, regiões e países, tornou-se possível e necessário, como objeto de pesquisa e política pública. A previsão e gestão de calamidades oriundas de eventos da natureza, de origem geofísica (abalos sísmicos, terremotos, avalanches, deslizamentos de terra, *tsunamis*, erupções vulcânicas), de origem meteorológica (ciclones, nevasescas), de origem hidrológica (chuvas torrenciais, tempestades, enxurradas, inundações), ou

de origem diversa (contaminações, vazamentos radioativos), etc., torna-se uma necessidade das sociedades modernas. Sistemas multidisciplinares de previsão, acompanhamento, avaliação e controle em tempo real podem ser implementados para administrar situações de contingências em redes de infraestrutura básicas, como simuladores, monitores e diagnosticadores da origem de falhas, ataques e catástrofes naturais.

Para analisar estas questões, este livro documenta uma metodologia formal para análise de contingências e contabilização de indicadores de desempenho e riscos associados à exploração de redes de infraestrutura sociais críticas. Partes destes métodos foram propostos em artigos publicados em congressos técnicos e científicos, ou em relatórios de pesquisa conduzidas pelo autor nas Universidades Federais de Pernambuco (UFPE) e Campina Grande (UFCG), Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), Tecnix E.A.R. e no International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ), como parte de suas atividades acadêmicas e industriais, teses de doutorado, dissertação de mestrado e especialização. Os resultados indicam a possibilidade de aplicação em muitos setores industriais e de infraestrutura críticas, complementando o conjunto atual de técnicas computacionais, agregando resultados da Teoria dos Grafos, Processos Markovianos, Redes de Petri e Bayesianas em um único arcabouço para análise de sistemas sociotécnicos e econômicos. Assim, o conteúdo do livro poderá ser útil para várias entidades relacionadas a redes de infraestruturas críticas:

- Planejadores e projetistas interessados no desempenho e riscos de redes sociotécnicas.
- Reguladores, auditores e legisladores de serviços prestados por concessionários de serviços públicos e privados.
- Investidores e proprietários de redes de infraestrutura responsáveis pela eficiência e riscos associados a sua exploração.
- Operadores e mantenedores de redes sociotécnicas críticas interessados em sua otimização.
- Estrategistas e militares responsáveis pela segurança e defesa das estruturas nacionais.
- Público em geral e usuários de redes de infraestrutura públicas e privadas.
- Estudantes e profissionais das áreas de Engenharia, Administração, Economia, Meio Ambiente, Pesquisa Operacional, Planejamento e Políticas Públicas.

Além de documentar os resultados da pesquisa, o livro pode ser usado como fonte de consulta e autoestudo, com muitas tabelas, figuras, definições e exemplos dos conceitos utilizados, indexados didaticamente para fácil referência e localização. Apenas conhecimentos básicos de Estatística e Álgebra Linear são necessários para seu estudo. Os conceitos usados da Teoria dos Grafos e Redes de Markov, Petri e Bayes são introduzidos no próprio texto. Todos os exemplos são derivados de uma rede de infraestrutura simples, comum a vários setores industriais, com parâmetros unitários independentes do sistema de unidades, interligando quatro empresas dispersas geograficamente, escolhidas para facilitar o entendimento dos métodos adotados. Um programa computacional foi desenvolvido e utilizado em todos os exemplos e cálculos, inclusive no estudo de caso real, demonstrando a viabilidade prática dos métodos.

Sumário

Prefácio	IX
Lista de Abreviaturas	XI
Simbologia	XV

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO

1

Introdução	3
1.1 Introdução	3
1.2 Motivação	4
1.3 Contextualização	5
1.4 Objetivos	6
1.5 Escopo	7
1.6 Organização	8
1.7 Notação	9
1.8 Sumário	11

2

Redes de Infraestrutura	13
2.1 Introdução	13
2.2 Redes Sociotécnicas	14
2.3 Segurança de Infraestruturas Críticas	17
2.4 Redes de Energia Elétrica	19

2.5	Redes de Distribuição de Água	21
2.6	Redes de Distribuição de Gás	23
2.7	Redes de Distribuição de Óleo	25
2.8	Redes de Esgotamento Sanitário	27
2.9	Redes de Distribuição Logísticas	30
2.10	Redes de Comunicação e Dados	32
2.11	Redes Financeiras e Interbancárias	35
2.12	Redes de Serviços Emergenciais	37
2.13	Redes de Infraestruturas Interdependentes	40
2.14	Sumário	43

3

Revisão Histórica	45	
3.1	Introdução	45
3.2	Avaliação de Desempenho	46
3.3	Avaliação de Riscos	51
3.4	Modelagem Estocástica	54
3.5	Redes Complexas	55
3.6	Contribuições Metodológicas	57
3.7	Sumário	58

4

Metodologia	59	
4.1	Introdução	59
4.2	Interessados	59
4.3	Definições	60
4.4	Métricas de Desempenho	63
4.5	Metodologia de Desempenho	63
4.6	Modelo de Impacto Cruzado	66
4.7	Metodologia de Risco	68
4.8	Sumário	69

SEGUNDA PARTE

MODELAGEM DE COMPONENTES

5

Introdução à Modelagem de Componentes	73	
5.1	Introdução	73
5.2	Justificativa	74

5.3	Objetivo	75
5.4	Metodologia	76
5.5	Sumário	76

6

	Modelos Estocásticos	77
6.1	Introdução	77
6.2	Grafos e Redes	77
6.3	Árvores de Falha	78
6.4	Modelos Markovianos	80
6.5	Redes de Petri	82
6.6	Redes de Petri Estocásticas	84
6.7	Redes de Petri Estocásticas Generalizadas	85
6.8	Redes Bayesianas	87
6.9	Sumário	89

7

	Modelos de Componentes	91
7.1	Introdução	91
7.2	Componentes de Redes	92
7.3	Modelos de Manutenção	92
7.4	Modelos de Operação	97
7.5	Modelos de Proteção	100
7.6	Estados da Proteção	103
7.7	Transições da Proteção	104
7.8	Sumário	108

8

	Análise e Parametrização	109
8.1	Introdução	109
8.2	Vetorização	110
8.3	Frequência Própria de Saída Forçada	110
8.4	Frequência Própria de Saída Programada	114
8.5	Duração Própria de Saída Forçada	117
8.6	Duração Própria de Saída Programada	120
8.7	Duração Própria de Reconexão	123
8.8	Carga e Geração Própria Conectada	126
8.9	Confiabilidade Própria da Proteção	129
8.10	Vulnerabilidade Própria da Proteção	133
8.11	Sumário	136

TERCEIRA PARTE**MODELAGEM DE REDES****9**

Introdução à Modelagem de Redes.....	141
9.1 Introdução.....	141
9.2 Justificativa.....	142
9.3 Objetivo.....	143
9.4 Metodologia	144
9.5 Sumário.....	145

10

Modelos de Riscos	147
10.1 Introdução.....	147
10.2 Redes Industriais	147
10.3 Níveis de Risco e Modos de Falha.....	150
10.4 Árvore de Falha do Sistema.....	152
10.5 Árvore de Falhas Críticas	154
10.6 Grafo de Adjacência de Proteção.....	155
10.7 Sumário.....	158

11

Modelos Topológicos.....	159
11.1 Introdução.....	159
11.2 Modelo de Adjacência Forçada.....	160
11.3 Modelo de Adjacência Programada	183
11.4 Modelo de Adjacência Protetiva	201
11.5 Modelo de Alcançabilidade Forçada	211
11.6 Modelo de Alcançabilidade Programada.....	225
11.7 Modelo de Vulnerabilidade Protetiva.....	237
11.8 Modelo de Simultaneidade Forçada	246
11.9 Modelo de Alcançabilidade Simultânea.....	252
11.10 Modelos de Alcançabilidades Restritas.....	256
11.11 Modelos de Alcançabilidades Probabilísticas	260
11.12 Modelos Equivalentes Topológicos	263
11.13 Indicadores de Centralidade Forçada.....	275
11.14 Indicadores de Centralidade Programada	285
11.15 Indicadores de Centralidade Protetiva	296
11.16 Sumário.....	299

QUARTA PARTE**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO****12**

Introdução à Avaliação de Desempenho	305
12.1 Introdução.....	305
12.2 Objetivo.....	305
12.3 Metodologia	306
12.4 Fontes de Informação.....	308
12.5 Sumário.....	311

13

Indicadores de Desempenho.....	313
13.1 Introdução.....	313
13.2 Frequência de Interrupções	314
13.3 Responsabilidade por Frequência de Interrupções	321
13.4 Duração de Interrupções.	325
13.5 Responsabilidade por Duração de Interrupções.....	341
13.6 Continuidade em Pontos de Controle.....	349
13.7 Lucros e Receitas Cessantes	353
13.8 Interrupções no Consumo de Serviços.....	357
13.9 Responsabilidade por Interrupções no Consumo.....	371
13.10 Interrupções no Fornecimento de Serviços	375
13.11 Responsabilidade por Interrupções no Fornecimento	390
13.12 Probabilidade e Esperança de Interrupções no Consumo	394
13.13 Probabilidade e Esperança de Interrupções de Fornecimento.....	400
13.14 Frequência e Probabilidade do Risco.....	406
13.15 Fatores de Risco Marginais	415
13.16 Robustez e Severidade.	418
13.17 Resiliência e Inoperabilidade	428
13.18 Eficiência da Rede	433
13.19 Eficiência dos Equipamentos	436
13.20 Disponibilidade dos Equipamentos.....	439
13.21 Qualidade dos Equipamentos.....	441
13.22 Eficiência Global dos Equipamentos	443
13.23 Análise de Sensibilidade.....	445
13.24 Sumário.....	449

14

Análise de Contingências	451
14.1 Introdução	451
14.2 Controle de Contingências	452
14.3 Monitoramento de Estado	453
14.4 Monitoramento de Alarmes	454
14.5 Propagação de Falhas	455
14.6 Análise de Impactos	456
14.7 Prospecção de Falhas	456
14.8 Diagnóstico de Falhas Primárias	457
14.9 Diagnóstico de Falhas Secundárias	460
14.10 Diagnóstico de Falhas de Proteção	462
14.11 Sumário	465

15

Estudo de Caso	467
15.1 Introdução	467
15.2 Modelo de Risco	467
15.3 Zonas de Risco	470
15.4 Modelo dos Componentes Primários	476
15.5 Modelo dos Componentes Secundários	476
15.6 Áreas de Risco Catastrófico	477
15.7 Melhorias nos Equipamentos	478
15.8 Melhorias nas Proteções	479
15.9 Sumário	480

16

Conclusões	481
16.1 Introdução	481
16.2 Resultados	481
16.3 Aplicações	482
16.4 Limitações	483
16.5 Generalizações	483
16.6 Extensões	484
16.7 Sumário	486
Apêndices	487
Glossário	509
Lista de Definições	523
Lista de Exemplos	531
Referências	537
Índice Alfabético-Remissivo	551