



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Carlos Augusto Ribeiro Soares

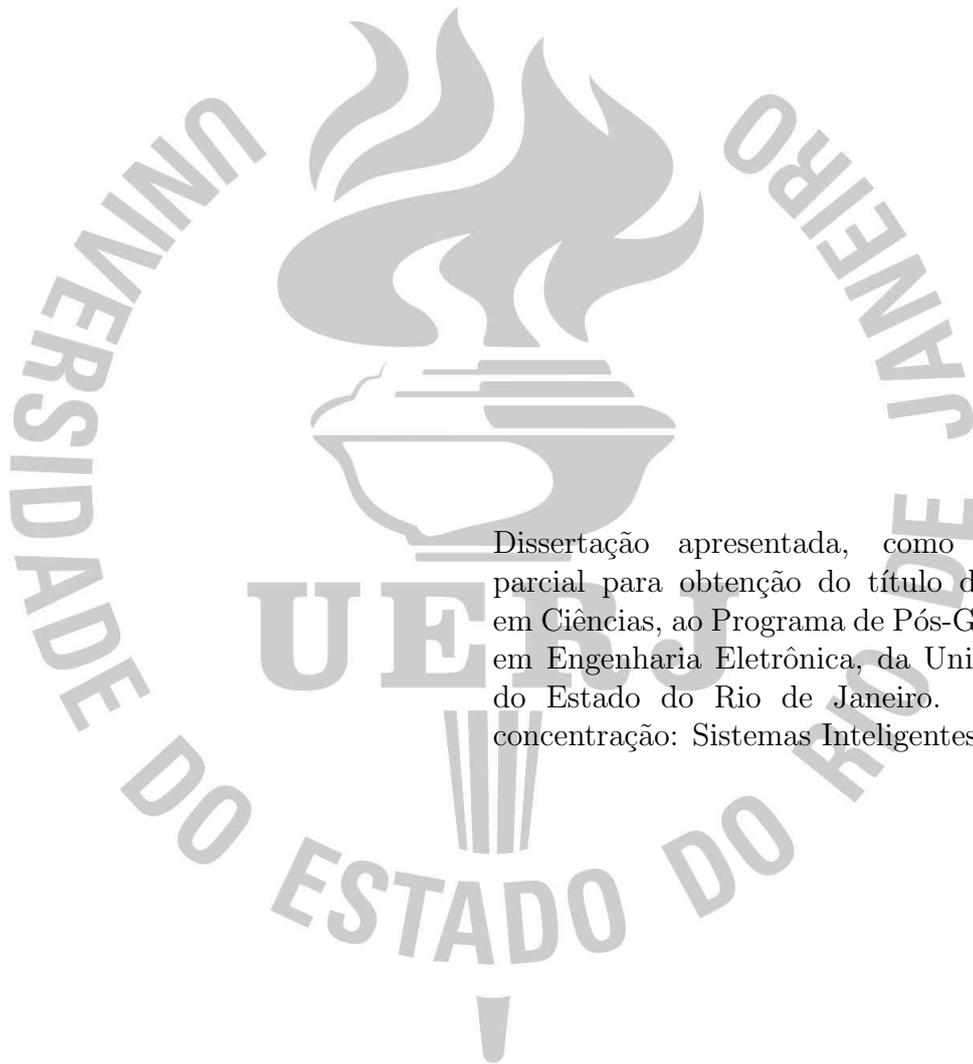
**POSIMNET-R: Uma ferramenta de apoio a projeto de redes  
sem fio resilientes para automação industrial**

Rio de Janeiro

2018

Carlos Augusto Ribeiro Soares

**POSIMNET-R: Uma ferramenta de apoio a projeto de redes sem fio  
resilientes para automação industrial**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Machado do Amaral

Rio de Janeiro

2018

**CATALOGAÇÃO NA FONTE**  
**UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B**

S676 Soares, Carlos Augusto Ribeiro.  
POSIMNET-R: uma ferramenta de apoio a projeto de redes sem fio resilientes para automação industrial / Carlos Augusto Ribeiro Soares. – 2018.  
129f.

Orientador: Jorge Luís Machado do Amaral.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica - Teses. 2. Automação industrial - Teses. 3. Roteadores (Redes de computação) - Teses. 4. Redes locais sem fio - Teses. 5. Teoria dos grafos - Teses. I. Amaral, Jorge Luís Machado do. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 004.421

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Carlos Augusto Ribeiro Soares

**POSIMNET-R: Uma ferramenta de apoio a projeto de redes sem fio  
resilientes para automação industrial**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes.

Aprovado em: 05 de fevereiro de 2018

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Jorge Luís Machado do Amaral (Orientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Felipe Maia Galvão França  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE

---

Prof. Dr. Alexandre Sztajnberg  
Instituto de Matemática e Estatística - UERJ

Rio de Janeiro

2018

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos, dos dois lados da vida, que  
com comentários e pensamentos me inspiraram a  
transpor os inúmeros desafios vividos  
durante a sua trajetória.

## AGRADECIMENTO

Agradeço:

À Deus em primeiro lugar pela saúde, força e proteção espiritual, que me permitiram chegar neste momento para realização de mais um sonho.

Ao meu guia espiritual, ou anjo da guarda para alguns, pela paciência e dedicação, sempre me intuindo com pensamentos de força, luz e encorajamento.

Aos meus pais (in memoriam) Maria do Amparo Soares e Osvaldo Ribeiro Soares, pelos exemplos de: moral, respeito ao próximo, conduta ética, dedicação, resiliência e sacrifício na formação dos filhos, pois sempre priorizaram pela nossa educação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Amaral por acreditar em mim, me dando o benefício da dúvida, nos momentos em que poucos acreditavam de que eu seria capaz de chegar ao final de mais esta etapa da minha vida, mesmo já tendo sido dadas inúmeras provas da minha capacidade, dedicação e foco nos resultados. Ao Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida e a Profa. Dra. Maria Luiza Fernandes Velloso por compartilharem seus conhecimentos com dedicação, entusiasmo e apreço pela arte de ensinar.

À minha filha Laura Sofia de Farias Soares, pela sua doçura e carinho. E, principalmente por me dar o privilégio de ser seu pai, acreditando na minha capacidade de conduzi-la em sua educação e formação de cidadã cumpridora de seus deveres materiais e espirituais.

À minha esposa Shirley Leite de Farias, pelos projetos que realizamos juntos.

Aos demais familiares Osvaldo Luis (irmão), Rosimery (irmã), Consuelo (cunhada), Regina (cunhada), Joice (sobrinha), Rone (sobrinho) e Júlia (sobrinha neta), por estarem sempre ao meu lado com palavras positivas de conforto e incentivo.

À psicóloga Dra. Márcia Gil, que em alguns momentos difíceis, foi fundamental no meu fortalecimento.

Ao amigo Márcio Sebastião Costa por mais uma vez acreditar em mim e me apresentar ao professor Jorge Amaral.

Aos técnicos, seguranças e administrativos da UERJ, que cuidaram da infraestrutura, mantendo as salas de aula e os equipamentos sempre em condições para serem utilizados de forma segura pelos alunos.

*”Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”*

*(Chico Xavier)*

## RESUMO

**SOARES**, Carlos Augusto Ribeiro. *POSIMNET-R: Uma ferramenta de apoio a projeto de redes sem fio resilientes para automação industrial*. 2018. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2018.

A crescente demanda imposta pela Indústria 4.0 tem aumentado o interesse por aplicações de Redes de Sensores sem Fio (RSSF) na área de automação industrial. Dentre as vantagens de sua utilização pode-se citar: facilidade de instalação e manutenção, redução de tempo de instalação de dispositivos, inexistência de estrutura de cabeamento, economia no custo de projetos, economia em infraestrutura, flexibilidade de configuração de dispositivos, economia no custo de montagem, flexibilidade na alteração de arquiteturas existentes. Entretanto, para a área de automação industrial é necessário enfatizar a confiabilidade da rede, pois a perda de controle pela falta de realimentação pode ter resultados catastróficos. Esse trabalho propõe uma ferramenta, chamada POSIMNET-R (*Positioning Immune Network Resilient* - Rede Imunológica de Posicionamento - Resiliente), capaz de desenvolver uma rede confiável, a partir do posicionamento de nós roteadores, atendendo os critérios de baixo grau de falha e de redundância de caminhos. Assim como seu antecessor desenvolvido por Barreira (2013), O POSIMNET-R é baseado nas redes imunológicas artificiais, que propõe criar  $K$  caminhos quaisquer ou disjuntos (arestas e nós) para as informações enviadas pelos nós sensores chegarem ao nó central. Este trabalho propõe outros operadores de mutação baseados na Teoria de Grafos: *Steiner* e Destilação Elíptica, além de dois métodos de inicialização da rede, a saber: QuasiAleatória (Sobol) e a *QuadTree*, a fim de auxiliar no processo de aceleração da convergência. Foram realizados estudos de casos em diferentes cenários: um artificial e dois baseados em refinarias existentes. Os resultados mostram que o POSIMNET-R consegue gerar redes tolerantes a falhas simples e múltiplas de seus nós.

**Palavras-chave:** Posicionamento de nós roteadores; Automação industrial; Resiliência; Indústria 4.0; Mutação *Steiner*; Mutação por Destilação; *QuadTree*; Aceleração da convergência; Sistemas Imunológicos Artificiais; Grafos; Funções submodulares.

## ABSTRACT

**SOARES**, Carlos Augusto Ribeiro. *POSIMNET-R: A tool to support the design of resilient wireless networks for industrial automation*. 2018. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2018.

The increasing demand imposed by Industry 4.0 has increased the interest for applications of Wireless Sensor Networks (WSN) in the area of industrial automation. The advantages of its use include: ease of installation and maintenance, reduction of installation time of devices, lack of cabling structure, savings in the cost of projects, savings in infrastructure, flexibility of configuration of devices, savings in cost flexibility in altering existing architectures. However, in the industrial automation, it is necessary to emphasize the reliability of the network, since loss of control due to lack of feedback can have catastrophic results. This work proposes a tool, called POSIMNET-R (Positioning Immune Network Resilient), which is able to develop a reliable network, from the positioning of routing nodes, meeting the criteria of low degree of failure and path redundancy. Just like its predecessor developed by Barreira (2013), the POSIMNET-R is based on the artificial immunological networks, which proposes to create  $K$  any or disjoint paths (edges and nodes) for the information sent by the sensor nodes to reach the central node. This work proposes other mutation operators based on the Theory of Graphs: Steiner and Elliptical Distillation, in addition to two methods of initialization of the network, namely: QuasiAleatory (Sobol) and QuadTree, in order to aid in the process of acceleration of convergence. Case studies were carried out in different scenarios: one artificial and two based on existing refineries. The results show that POSIMNET-R can generate simple and multiple fault-tolerant networks of its nodes.

**Keywords:** Positioning of nodes-routers; Industrial automation; Resilience; Industry 4.0; Steiner Mutation; Distillation Mutation; QuadTree; Acceleration of convergence; Artificial Immune Systems; Graphs; Submodular Functions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede de Sensores Sem Fio. Adaptada de Barreira (2013) .....	21
Figura 2 - Componentes da RSSF <i>WirelessHART</i> . Adaptada da IEC 62591 (2009)..	23
Figura 3 - Características da uma rede em malha. Adaptada de Barreira (2013) ....	26
Figura 4 - Pirâmide da Automação. Adaptada de Bartodziej (2017) .....	26
Figura 5 - <i>Falha</i> → <i>Erro</i> → <i>Cadeia de falha</i> . Adaptada de Sterbenz (2010) .....	32
Figura 6 - Disciplinas da Resiliência. Adaptada de Sterbenz (2010).....	33
Figura 7 - Exemplo de 3 Topologias de árvore Cayley homogênea. Adaptada de Anderson, Neumann e Perelson (1993) .....	35
Figura 8 - Assumindo um modelo de cobertura de disco, a falha do T7 causa um hiato de cobertura na rede. Adaptada de Younis et al.(2014) .....	41
Figura 9 - Exemplo de um cenário de falha de um único nó; círculos amarelos são classificados como “nó-de-corte” e a falha desses nós divide a rede em várias partições disjuntas. Enquanto isso, os círculos verdes representam os nós não essenciais e a sua falha não causa o particionamento da rede. Adaptada de Younis et al.(2014) .....	42
Figura 10- Ilustração de uma RSSF segmentada devido a danos em larga escala; círculos vermelhos indicam que os nós falharam, enquanto que os círculos verdes representam os nós operacionais. Adaptada de Younis et al.(2014) .	43
Figura 11 - Classificação dos mecanismos de tolerância às Falhas para RSSFs. Adap- tada de Younis et al. (2014) .....	44
Figura 12- Arquitetura de múltiplas camadas do AIS [Castro; Zuben (1999)].....	47
Figura 13- Anatomia do Sistema Imunológico Humano. Adaptada de Castro (2001))	48
Figura 14- Imunidades Inata e Adaptativa. Adaptada de Abbas (2007).....	49
Figura 15- Resposta Imune Adaptativa. Adaptada de Abbas (2007) .....	50
Figura 16- Diagrama esquemático das reações do centro germinal em um “nódulo linfático”. Adaptada de Abbas (2007) .....	51
Figura 17- Respostas imunes humorais primárias e secundárias. Adaptada de Abbas (2007) .....	52
Figura 18- Modelo POSIMNET. Adaptada de Barreira (2013).....	54

Figura 19- Modelo proposto para o POSIMNET-R .....	56
Figura 20- Uma figura e seu <i>QuadTree</i> [Hunter; Steiglitz (1979)].....	58
Figura 21- Inicialização <i>QuadTree</i> para o cenário referente à refinaria do Texas .....	59
Figura 22- Número ideal de Hops x Número de Hops Obtidos .....	60
Figura 23- Representação do processo de seleção aleatória .....	61
Figura 24- Incentros (pontos em vermelho) calculados a partir da triangulação de Delaunay .....	62
Figura 25- Destilação de Grafos.....	64
Figura 26- Mutação por Destilação entre o nó Sensor 7 e o nó Roteador 12 .....	64
Figura 27- Excentricidade da Elipse .....	65
Figura 28- Cenário POSB (Nó central=1 e os sensores = de 2 à 9) .....	68
Figura 29- (a): Cenário Refinaria do Texas - (imagem extraída do “ <i>Google Earth</i> ”) e (b): Cenário Texas preparado para o POSIMNET-R (Nó central=1 e os sensores = de 2 à 7) .....	68
Figura 30- (a): Cenário Refinaria de New Jersey - (imagem extraída do “ <i>Google Earth</i> ”) e (b): Cenário New Jersey preparado para o POSIMNET-R (nó central = 1 e os sensores = de 2 à 4) .....	69
Figura 31- Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 1 a 4 ....	71
Figura 32- Rede e o Trace do Estudo de Caso 1 - <i>Clona Hyper</i> .....	72
Figura 33- Rede e o Trace do Estudo de Caso 2 - Condição NET.....	73
Figura 34- Rede e o Trace do Estudo de Caso 3 - <i>Steiner</i> .....	73
Figura 35- Rede e o Trace do Estudo de Caso 4 - Destilação .....	73
Figura 36- Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 5 a 8 ....	75
Figura 37- Rede e o Trace do Estudo de Caso 5 - <i>Clona Hyper</i> .....	76
Figura 38- Rede e o Trace do Estudo de Caso 6 - Condição NET.....	76
Figura 39- Rede e o Trace do Estudo de Caso 7 - <i>Steiner</i> .....	76
Figura 40- Rede e o Trace do Estudo de Caso 8 - Destilação .....	77
Figura 41- Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 9 a 12...	77
Figura 42- Rede e o Trace do Estudo de Caso 9 - <i>Clona Hyper</i> .....	79
Figura 43- Rede e o Trace do Estudo de Caso 10 - Condição NET .....	79
Figura 44- Rede e o Trace do Estudo de Caso 11 - <i>Steiner</i> .....	80
Figura 45- Rede e o Trace do Estudo de Caso 12 - Destilação.....	80

Figura 46- Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 13 a 16 .	81
Figura 47- Rede e o Trace do Estudo de Caso 13 - <i>Clona Hyper</i> .....	82
Figura 48- Rede e o Trace do Estudo de Caso 14 - Condição NET .....	83
Figura 49- Rede e o Trace do Estudo de Caso 15 - <i>Steiner</i> .....	83
Figura 50- Rede e o Trace do Estudo de Caso 16 - Destilação.....	83
Figura 51- (a): Foto da refinaria do Texas extraída do “ <i>Google Earth</i> ”; (b): Inicia- lização através do <i>QuadTree</i> ; (c): primeira geração com 4 sensores e (d): uma rede totalmente conectada, a partir da segunda geração.....	85
Figura 52- Resultado do POSIMNET-R para a Refinaria do TEXAS .....	86
Figura 53- Resultado do POSIMNET-R para a Refinaria de New Jersey.....	87
Figura 54- Caso 02 do POSIMNET (Condição NET), caminhos Quaisquer .....	88
Figura 55- Caso 02 do POSIMNET-R (Condição NET), caminhos Quaisquer .....	88
Figura 56- Análise de Múltiplas Falhas dos Estudos de casos 13, 14, 15 e 16 do Apêndice C .....	89
Figura 57- Análise Múltiplas Falhas (POSIMNET x POSIMNET-R).....	90
Figura 58- Venn e a arte da Submodularidade. Adaptada de Bilmes (2016) .....	106
Figura 59- Gráficos: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,1 .....	119
Figura 60- Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,1 .....	120
Figura 61- Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais- Raio = 0,1.....	121
Figura 62- Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais- Raio = 0,1 .....	122
Figura 63- Gráficos: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,2.....	123
Figura 64- Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,2 .....	124
Figura 65- Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais- Raio = 0,2.....	125
Figura 66- Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais- Raio = 0,2 .....	126
Figura 67- Redes produzidas nas Gerações 1 e 2 .....	127
Figura 68- Redes produzidas nas Gerações 3, 4 e 5.....	128
Figura 69- Redes produzidas nas Gerações 6, 7 e 8.....	129
Figura 70- Redes produzidas nas Gerações 9, 10 e 11 .....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de RSSFs .....	22
Tabela 2 - Características de alguns trabalhos sobre Posicionamento.....	29
Tabela 3 - Parâmetros utilizados nos 96 Estudos de caso.....	70
Tabela 4 - Planejamento dos Estudos de Caso .....	70
Tabela 5 - Resultados dos Estudos de Casos - de 1 a 4 .....	71
Tabela 6 - Resultados dos Estudos de Casos - de 5 a 8 .....	74
Tabela 7 - Resultados dos Estudos de Casos - de 9 a 12 .....	78
Tabela 8 - Resultados dos Estudos de Casos - de 13 a 16.....	81
Tabela 9 - Estudos de Caso de 01 a 12, referente ao cenário POSB.....	111
Tabela 10- Estudos de Caso de 13 a 24, referente ao cenário POSB.....	112
Tabela 11- Estudos de Caso de 25 a 36, referente ao cenário POSB.....	113
Tabela 12- Estudos de Caso de 37 a 48, referente ao cenário POSB.....	114
Tabela 13- Estudos de Caso de 49 a 60, referente ao cenário POSB.....	115
Tabela 14- Estudos de Caso de 61 a 72, referente ao cenário POSB.....	116
Tabela 15- Estudos de Caso de 73 a 84, referente ao cenário POSB.....	117
Tabela 16- Estudos de Caso de 85 a 96, referente ao cenário POSB.....	118
Tabela 17- Inicialização: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,1 .....	119
Tabela 18- Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,1 .....	120
Tabela 19- Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais - Raio = 0,1 ...	121
Tabela 20- Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais - Raio = 0,1 .....	122
Tabela 21- Inicialização: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,2 .....	123
Tabela 22- Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,2.....	124
Tabela 23- Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais - Raio = 0,2 ...	125
Tabela 24- Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais - Raio = 0,2 .....	126

## LISTA DE SIGLAS

AIN	<i>Artificial Immune Network</i>
AIS	<i>Artificial Immune System</i>
AISPL	<i>Average Inverse Shortest Path Length</i>
AR-SC	<i>Adjustable Range Set Covers</i>
ASPL	<i>Average Shortest Path Length</i>
BS	<i>Base Station</i>
CSPRA	<i>Conserved Self Pattern Recognition Algorithm</i>
CWGC	<i>Communication Weighted Greedy Cover</i>
DCA	<i>Dendritic Cells Algorithm</i>
DoS	<i>Denial of Service</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISA	<i>Industry Standard Architecture</i>
LCC	<i>Largest Connected Component</i>
OCCH	<i>Optimized Connected Coverage Heuristic</i>
ORC-SMT	<i>Optimized Relay node placement algorithm using a Minimum Steiner Tree on the Convex hull</i>
OTCC	<i>Overlapped Target and Connected Coverage</i>
POSIMNET-R	<i>Positioning Immune Network - Resilient</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SI	<i>Swarm Intelligence</i>
SMP	<i>Steiner Minimum Point</i>
SMT	<i>Steiner Minimum Tree</i>
WIA-PA	<i>Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation</i>

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1	<b>CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RSSF</b> .....	20
1.1	<b>Rede de Sensores Sem Fio</b> .....	20
1.2	<b>Redes de Sensores Sem Fio na Automação Industrial</b> .....	21
1.3	<b>Protocolo <i>WirelessHart</i></b> .....	22
1.4	<b>Posicionamento dos Roteadores</b> .....	24
1.5	<b>O Problema de Posicionamento de nós</b> .....	25
1.6	<b>Trabalhos Relacionados</b> .....	27
2	<b>RESILIÊNCIA</b> .....	30
2.1	<b>Falha → Erro → Cadeia de falha</b> .....	31
2.2	<b>Categorias da Resiliência</b> .....	32
2.3	<b>Gerenciamento de Tolerância à Falhas em nós de RSSI</b> .....	38
2.4	<b>Classificação das Técnicas de Tolerância a Falhas em RSSFs</b> .....	41
2.4.1	Modelos de falhas de nó .....	41
2.4.2	Técnicas de Tolerância a falhas .....	43
2.5	<b>Metodologia Proativa para tolerância às Falhas simples</b> .....	44
3	<b>MODELO PROPOSTO</b> .....	46
3.1	<b>Visão geral do Sistema Imunológico</b> .....	46
3.1.1	Imunidade Inata e Adaptativa .....	46
3.1.2	Resposta Imune Adaptativa .....	47
3.1.3	Maturação de Afinidade e Seleção Clonal .....	47
3.1.4	Memória Imunológica .....	48
3.2	<b>Sistemas Imunológicos Artificiais</b> .....	50
3.3	<b>POSIMNET</b> .....	53
3.4	<b>POSIMNET-R</b> .....	55
3.4.1	Inicialização .....	56
3.4.2	Avaliação .....	58
3.4.2.1	Razão entre o Número de <i>hops</i> ideal e o obtido .....	59

3.4.2.2	Probabilidade de Falha (MinCut).....	59
3.4.3	Poda .....	61
3.4.4	Seleção .....	61
3.4.5	Operadores .....	62
3.4.5.1	Mutação <i>Steiner</i> .....	62
3.4.5.2	Mutação por Destilação .....	63
3.4.6	Balanceamento de Cargas .....	65
4	<b>ESTUDO DE CASOS</b> .....	67
4.1	Descrição dos Estudos de Caso .....	67
4.2	Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Quaisquer .....	70
4.3	Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Disjuntos (Arestas) .....	74
4.4	Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Disjuntos (Arestas e Nós parciais) .....	77
4.5	Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Disjuntos (Arestas e Nós totais) .....	80
4.6	Estudo da Aceleração de Convergência .....	84
4.7	Casos reais .....	85
4.8	Estudo de Múltiplas falhas aleatórias e independentes .....	87
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	90
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	94
Apêndice A	<b>- TEORIA DE GRAFOS</b> .....	104
A.1	Conceitos Básicos .....	104
A.2	Teorema de MinCut .....	105
Apêndice B	<b>- FUNÇÕES SUBMODULARES</b> .....	106
B.1	Aplicações das funções submodulares .....	108
B.2	Capacidade de Cortes .....	108
Apêndice C	<b>- ESTUDOS DE CASO PARA O CENÁRIO POSB</b> .....	110
Apêndice D	<b>- ESTUDO DE CASOS DAS INICIALIZAÇÕES</b> .....	119

Apêndice E	- 11 PRIMEIRAS GERAÇÕES DO CENÁRIO POSB, OPERADOR DE MUTAÇÃO <i>STEINER</i> .....	127
------------	--	-----

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação sem fio se espalharam por inúmeras áreas de aplicação e já alcançaram grande popularidade. A telefonia sem fio e o acesso à internet móvel sem fio são agora uma parte importante de nossas vidas diárias, e as tecnologias de rede local sem fio (WLAN), por exemplo, baseadas em WiFi, tornaram-se a principal forma de acessar dados comerciais e pessoais.

Diversos benefícios importantes das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são fundamentais para este sucesso: redução de tempo de instalação de dispositivos, inexistência de estrutura de cabeamento, economia no custo de projetos, economia em infraestrutura, flexibilidade de configuração de dispositivos, economia no custo de montagem, flexibilidade na alteração de arquiteturas existentes e possibilidade de instalação de sensores em locais de difícil acesso, como aborda Akyildiz e Vuran (2010). Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados, principalmente em função da crescente demanda que vem sendo imposta pela Indústria 4.0, amplamente utilizadas em fábricas inteligentes, bem como em seus sistemas, como apresenta Li et al. (2017).

Nas fábricas, a tecnologia sem fio pode ser usada de várias formas, como nos mostram Willig, Matheus e Wolisz (2005), Willig (2008) e Gungor e Hancke (2009), tais como: (i) - Fornecer serviços de comunicação para aplicativos de controle distribuído, apresentado por Hespanha, Naghshtabrizi e Xu (2007) onde envolve subsistemas móveis como veículos de transporte autônomos, robôs ou plataformas giratórias; (ii) - Implementar sistemas de controle distribuídos em áreas explosivas ou na presença de produtos químicos agressivos; (iii) - Facilitar as constantes reconfigurações da planta, pois é necessário montar menos cabos; (iv) - Obter diagnóstico de instalações móveis e estações sem fio para programação e configuração no local. Devido a essa grande variedade de aplicações, desenvolver e planejar uma rede é uma tarefa complexa, pois envolve objetivos algumas vezes conflitantes, como por exemplo, minimizar o número de roteadores e maximizar a sua confiabilidade.

A garantia de que as informações não sejam extraviadas é um dos critérios fundamentais para a realização do monitoramento e controle dos processos. Além disso, existem outros critérios que são também muito importantes em uma rede sem fio industrial, dentre os quais pode-se citar: segurança, confiabilidade, disponibilidade, robustez

e desempenho; não podendo ser sensível às interferências e nem parar por falha de um equipamento, tampouco ter alta latência na transmissão dos dados, como apresentado por Santos (2007).

No ambiente industrial, a transmissão dos dados se depara com o problema de interferências, geradas por outros equipamentos eletromagnéticos, tais como: rádios de comunicação, outras redes de comunicação sem fio e equipamentos elétricos; assim como, obstáculos móveis (caminhões, guindastes, etc) e fixos (prédios, tubulações, tanques, etc).

Na tentativa de minimizar esses efeitos são utilizadas técnicas de espalhamento em frequência e topologias em malha ou árvore em que uma mensagem pode ser transmitida de um nó para outro com auxílio de outros nós, que funcionam como roteadores, direcionando as mensagens para outros nós até que chegue a seu destino. Isto permite que a rede obtenha maior alcance e seja mais tolerante a falhas, pois se um nó intermediário apresenta uma falha ou não possa receber uma mensagem, esta pode ser redirecionada para outro nó, como vemos em Akyildiz e Vuran (2010) e Costa e Amaral (2010).

Uma rede em malha exige um estudo cuidadoso do posicionamento de nós roteadores, uma vez que eles são responsáveis por fazer o encaminhamento dos dados gerados pelos sensores da rede até o nó central de forma direta ou indireta, através de saltos (*hops*). Segundo Hoffert, Klues e Orjih (2005), os nós roteadores são dispositivos responsáveis por atender os critérios supracitados e, são de suma importância no suporte à transmissão dos dados, podendo deixar parte da rede ou toda ela inoperante, caso apresentem qualquer falha.

Costa (2011) tratou o problema do posicionamento de nós roteadores através da utilização de Algoritmo Genético [Goldberg (1989); Michalewicz (1996)] e sua contribuição foi gerar redes, minimizando o número desses nós necessários para haver conectividade da rede, o grau de falhas, o número de saltos (*hops*) e a energia consumida por esses sensores. Neste trabalho, avalia-se a rede como um todo, levando em conta o posicionamento dos roteadores de forma conjunta.

Os pontos vulneráveis do modelo de Costa (2011) foram minimizados com o trabalho de Barreira (2013), que passou a desenvolver redes escaláveis, menos custosas computacionalmente. Isto foi possível pela aplicação de uma metáfora do sistema imunológico que permitiu que a obtenção da rede fosse feita de forma descentralizada, isto é, que a rede fosse formada a partir da avaliação do posicionamento de cada roteador de forma

individual.

O aumento da interação com a *Internet of Things* (IoT) e a sofisticação dos serviços vem tornando as RSSFs industriais muito vulneráveis. Com isso, surgem consequências relacionadas com o aumento da probabilidade de interrupção, pois as tornam assim um alvo muito atraente para os cibercriminosos. Desta forma, entende-se que resiliência deve ser vista como foco fundamental para as futuras redes.

A contribuição desse trabalho visa desenvolver Redes resilientes de Sensores Sem Fio aplicadas à automação industrial, mantendo a escalabilidade, assim como a avaliação do posicionamento dos roteadores de forma descentralizada, adotando os conceitos de Sistemas Imunológicos Artificiais, conforme trabalhado por Barreira (2013). Entretanto, neste modelo foram incluídos aspectos de resiliência com foco principalmente em QoS (Qualidade de Serviços), garantindo as propriedades de rede referentes à latência (número de *hops*), consumo de energia (equilíbrio de cargas, evitando sobrecarga dos nós roteadores) e o custo do projeto de redes (aplicando o menor número de nós roteadores possível). Para isso, este modelo inclui operadores de mutação *Steiner* e de Destilação, bem como melhorias na inicialização, disponibilizando para análise 3 métodos: Aleatório, Quase Aleatório (SOBOL) e *QuadTree*, acelerando o processo de convergência pela busca da otimização do resultado.

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, e estes estão organizados da seguinte forma: O Capítulo 1 aborda os conceitos básicos de RSSF aplicados à automação industrial, bem como os problemas relacionados ao posicionamento dos nós roteadores e como os pesquisadores estão investigando algumas maneiras de contornar as restrições impostas por tais situações. O Capítulo 2 apresenta os conceitos multidisciplinares que definem Resiliência, e a constante preocupação em torno do assunto face a alta demanda que vem sendo imposta pela Indústria 4.0. O Capítulo 3 descreve o modelo proposto por esta dissertação, abordando sucintamente o seu predecessor, bem como alguns conceitos básicos sobre Sistema Imunológico biológicos, traçando uma analogia com Sistemas Imunológicos Artificiais. No Capítulo 4 serão detalhados os estudos de casos que comprovam que o algoritmo POSIMNET-R, proposto por esta dissertação, é capaz de resolver o problema da resiliência, a partir de uma análise da rede simulando falhas simples e múltiplas, através do teorema MinCut da Teoria de Grafos. No Capítulo 5, apresentamos uma explanação dos resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros.

## 1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RSSF

As RSSFs são aplicadas em diversas áreas, tais como: automação industrial, monitoramento ambiental, localização de veículos rodoviários, monitoramento de tráfego, vigilância militar, gerenciamento de desastres, exploração espacial, proteção de fronteiras entre outras, conforme vimos em Akyildiz e Vuran (2010), Younis et al. (2014) e Costa e Amaral (2012). Para cada aplicação há uma peculiaridade sobre as características desejáveis da rede, como por exemplo: escalabilidade, auto-organização, baixo consumo de energia, cooperação, segurança, caminhos redundantes e outros.

### 1.1 Rede de Sensores Sem Fio

Uma RSSF é uma rede autônoma e dinâmica de sensores inteligentes e com alto grau de cooperação entre si, sendo responsável por realizar o monitoramento de um processo, trabalhar a informação coletada, classificá-la conforme o grau de importância, e se necessário, difundir-la aos outros sensores ou roteadores mais próximos ao nó central.

A grande vantagem de não utilizar cabos na transmissão de dados é a facilidade de instalação da rede em todos os ambientes, incluindo aqueles onde não é possível a passagem de cabos, seja pela dificuldade de acesso, ou por se tratar de área perigosa ou classificada. Outra vantagem é a facilidade de manutenção dos equipamentos, conforme explicado em Akyildiz e Vuran (2010) e Younis (2014).

A Figura 1, adaptada de Barreira (2013) apresenta os principais elementos de uma RSSF, dentre os quais podemos citar: sensor, observador, fenômeno, roteador e *gateway* (nó central).

O sensor é o dispositivo responsável, utilizado em processos industriais, por realizar as medições de grandezas físicas, tais como: fluxo, pressão, temperatura, nível, entre outras. Isto significa que, para cada tipo de fenômeno, existe um tipo específico de sensor.

Um nó sensor é composto pelos seguintes blocos principais: transceptor, memória, processador, bateria e transdutor. O fenômeno é monitorado pelo elemento sensor, e difundido pela rede de sensores sem fio para avaliação final do observador. A rede de sensores sem fio poderá coletar amostras discretas de múltiplos fenômenos, sujeitas a precisão de cada sensor.

O roteador direciona a informação gerada pelo sensor ao componente da rede mais

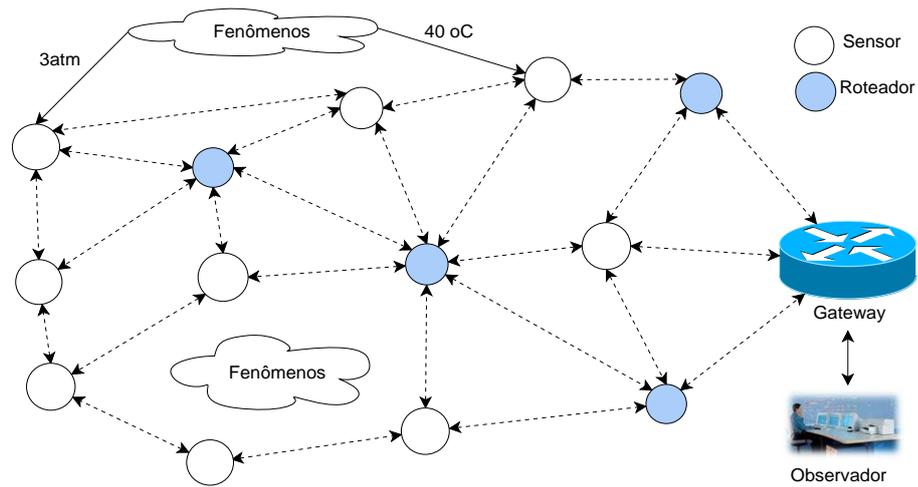


Figura 1 - Rede de Sensores Sem Fio. Adaptada de Barreira (2013)

próximo e dentro do seu raio de transmissão, de forma que a informação possa chegar ao nó central. Ele é responsável por receber todas as informações eletromagnéticas enviadas pelos sensores, decodificá-las em grandezas físicas do fenômeno monitorado de forma que o observador seja capaz de entendê-los e tomar as providências cabíveis à situação, caso a grandeza física esteja fora do parâmetro aceitável.

Na maioria das aplicações, o monitoramento do fenômeno desejado é realizado por um tipo ou um conjunto de tipos de sensores (acústico, sísmico, infravermelho, vídeo-câmera, calor, etc) grupados em *cluster*. Além disso, as redes podem ser compostas por centenas de nós, de baixo custo, que operam com o menor consumo de energia possível para prolongar o tempo de vida de cada nó e que obtém a maior cobertura possível do fenômeno.

## 1.2 Redes de Sensores Sem Fio na Automação Industrial

A utilização de RSSF em automação industrial ainda é um assunto que causa preocupação com relação à confiabilidade e à segurança dos dados por parte dos usuários. Porém, os protocolos de RSSF industriais mais populares, tais como *WirelessHart*, ISA 100.11a e WIA-PA já estão bastante consolidados, e seus fabricantes seguem normas internacionais garantindo o mínimo necessário para compatibilizar seus produtos, dando a tranquilidade necessária aos usuários, conforme apontam Soares, Costa e Amaral (2018). Essas normas são: IEC 62591 para *WirelessHart* (IEC, 2009); IEC 62734 para ISA 100.11a (SC65C, 2014) e IEC 62601 para WIA-PA (PAS, 2015). Além disso, é impor-

tante observar que as características da RSSF para automação industrial se diferenciam das RSSFs tradicionais pelos seguintes aspectos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de RSSFs

#	CARACTERÍSTICAS	RSSF <sup>1</sup> (Automação Industrial)	RSSF <sup>2</sup> (Tradicional)
1	Quantidade de Sensores	Na ordem de dezenas, podendo chegar a centenas	Na ordem de dezenas, milhares ou milhões
2	Grau de Tolerância à Falhas	-	Maior do que a RSSF <sup>1</sup>
3	Topologia	Fixa e em Malha	Aleatória
4	Energia, Capacidade computacional e Memória	Mais eficiente do que a RSSF <sup>2</sup>	-
5	Preço e Qualidade	Mais cara e robusta do que a RSSF <sup>2</sup>	-
6	Confiabilidade e Latência	Imprescindíveis	Importantes, podendo ser tolerável, dependendo da Aplicação
7	Manutenção dos equipamentos	Totalmente acessível	Menos acessível
8	Grau de Criticidade	Maior do que a RSSF <sup>2</sup>	-
9	Posicionamento dos Nós	Calculada e precisa, devido ao alto custo dos valores dos equipamentos	Realizada de forma densa e aleatória

Para mensurar a quantidade de nós roteadores e definir o seu posicionamento na rede, alguns aspectos importantes em automação industrial devem ser considerados. Para tal, devem-se estabelecer: a) caminhos redundantes de forma que o sistema seja o máximo possível tolerante a falhas dos nós; b) conectividade total entre os nós (sensores e roteadores) da rede para que um nó possa se conectar com todos os outros aproveitando a função colaborativa dos roteadores; c) a eficiência de energia dos nós de forma que nenhum nó fique sobrecarregado com retransmissão de muitas informações oriundas dos sensores; d) a baixa latência do sistema para uma melhor eficiência no tempo de resposta.

Todos esses fatores devem ser atendidos, sempre levando em consideração o fator primordial de segurança: tolerância à falha. Uma vez que o problema do posicionamento de nós roteadores seja resolvido, atendendo os critérios especificados anteriormente, a rede resultante será robusta e confiável.

### 1.3 Protocolo *WirelessHart*

Segundo Costa e Amaral (2012), o *WirelessHART* foi o primeiro padrão de comunicação sem fio em controle de processo, sendo oficialmente lançado pela *HART Communication Foundation* em 2007, para que além de incluir as funcionalidades das RSSFs ao

tradicional protocolo HART, mantivesse compatibilidade com os dispositivos HART já instalados. Esse protocolo utiliza a topologia da rede em malha e cada dispositivo pode servir como um roteador para mensagens de outros dispositivos, o que determina que um dispositivo não precise se comunicar diretamente com *gateway* (nó central), mas que necessite de um dispositivo próximo para repassar sua mensagem. Esse mecanismo faz com que o alcance da rede se torne extenso, além de criar alternativas de rotas redundantes de comunicação, aumentando a confiabilidade da rede. Esse tipo de arquitetura suporta grande variedade de dispositivos de vários fabricantes, como se pode verificar na Figura 2.

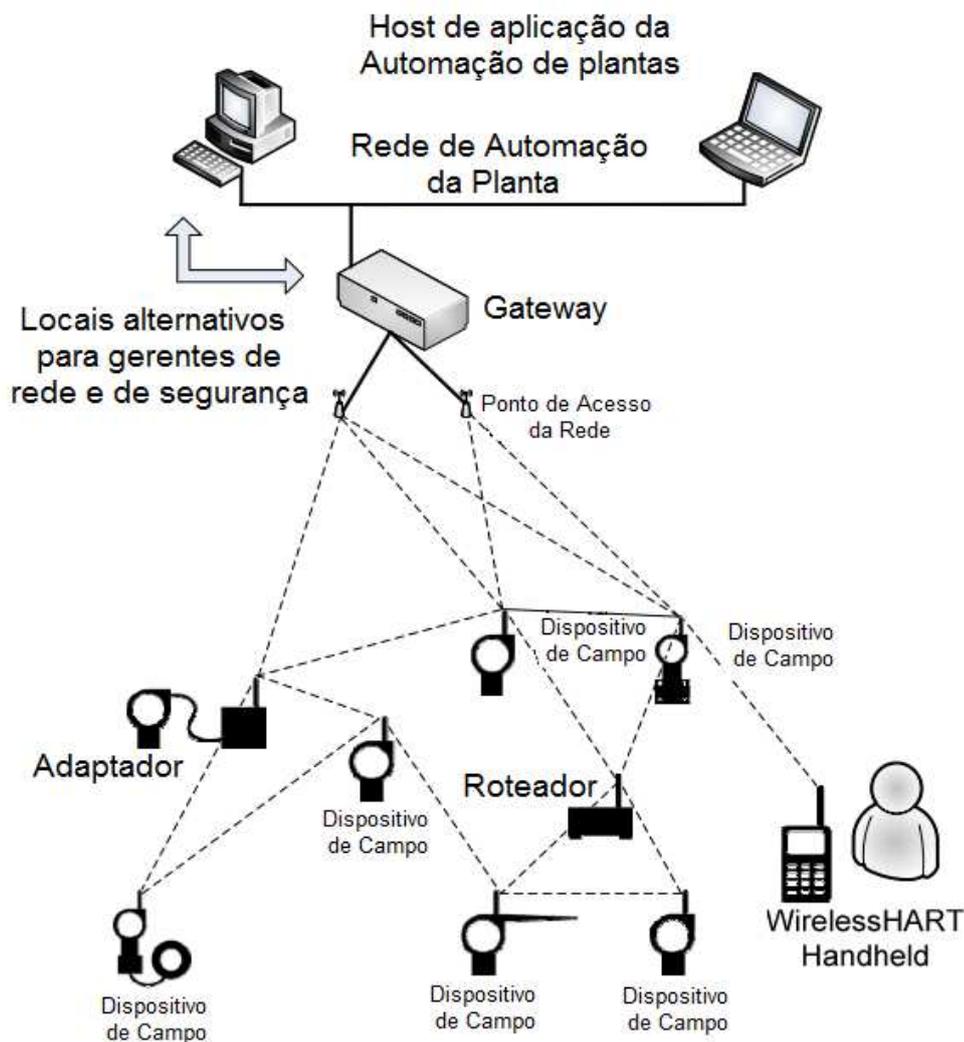


Figura 2 - Componentes da RSSF *WirelessHART*. Adaptada da IEC 62591 (2009)

Os elementos que compõem a arquitetura *WirelessHART* são: (i) Dispositivos de campo - conectados diretamente ao processo para medições das variáveis de campo, além

de ter a capacidade de retransmitir mensagens recebidas vindas de outros dispositivos;

- (ii) Adaptadores - para conectividade de um dispositivo que não seja *WirelessHART*;
- (iii) *Gateway* - tem a função de conectar a rede sem fio com a rede de automação da planta, fornecendo acesso das aplicações *host*;
- (iv) *Handheld* - computador portátil para configuração de dispositivos, diagnósticos, calibrações e gerenciamento de informações de rede;
- (v) *Network Manager* (Gerente da rede) - faz parte de uma funcionalidade lógica do *Gateway* e é responsável pela configuração da rede, pelo sincronismo entre os dispositivos, pelo gerenciamento das tabelas de rotas e pelo monitoramento do estado dos dispositivos;
- (vi) *Security Manager* (Gerente de Segurança) - também é uma funcionalidade do *Gateway* e é responsável pela geração, armazenamento, gerenciamento e distribuição das chaves utilizadas na autenticação de dispositivos e na criptografia de dados da rede.

O *WirelessHART* e alguns outros protocolos utilizam a topologia da rede em malha, onde um dispositivo pode servir como roteador das mensagens de outros dispositivos até o seu destino final. Isto faz com que o alcance da rede seja maior, além de criar redundância de caminhos, atenuando problemas com interferências e obstáculos sem interferência do usuário e contribuindo para o aumento da confiabilidade da rede. As rotas são configuradas pelo gerenciador da rede com base nas informações de diagnósticos recebidas dos dispositivos. Desta forma, as rotas redundantes são continuamente adaptadas visando às melhores condições do espectro de frequência [(IEC, 2009); (RAZA et al., 2009)].

#### 1.4 Posicionamento dos Roteadores

O posicionamento dos nós de forma adequada é de suma importância para que as redes sem fio atendam os critérios de segurança, confiabilidade e eficiência. Entretanto, este é um problema de difícil solução, pois para tal devem-se levar em consideração todos os obstáculos e as interferências que um ambiente industrial promove. Na automação industrial, o posicionamento dos nós sensores é pré-definido próximo ao fenômeno a ser monitorado pelo dispositivo. O nó central, assim como os nós sensores, em geral, tem sua posição fixa. O nó central ficando próximo à sala de controle e nós sensores próximos às variáveis de processo que necessitam ser monitoradas ou controladas.

Já o posicionamento dos nós roteadores, que são responsáveis pelo encaminhamento dos dados gerados pelos sensores da rede até o nó central é um problema complexo e, deve ser realizado de forma a garantir tolerância à falha, cobertura da rede, redundância, menor

número de *hops*, entre outros.

## 1.5 O Problema de Posicionamento de nós

A determinação da posição geográfica dos nós na área de interesse pode ser realizada de duas formas: controlada ou aleatória. A forma controlada do posicionamento dos nós geralmente é usada em ambiente fechado, e em poucos casos com área aberta. Na forma aleatória, os elementos da rede, por serem mais baratos e descartados após o término da sua vida útil, são posicionados aleatoriamente no ambiente de interesse e com difícil acesso.

O posicionamento tem que ser realizado com o máximo de cuidado, pois pode comprometer toda a rede de sensores sem fio ao se posicionar os nós inadequadamente, fazendo com que: a cobertura de parte da área monitorada seja perdida; não sejam atendidos os requisitos temporais ou ainda; apareçam nós críticos, isto é, nós funcionando em condições inadequadas podendo ocasionar falhas de conexão na rede.

Na Figura 3 pode-se visualizar alguns desses problemas e apenas um benefício (vide item iii), tais como: (i) - Os sensores 3 e 4 estão conectados entre si, porém sem conectividade direta ou indireta com o nó central; (ii) - Os sensores 1 e 2 apresentam conectividade indireta com o nó central, através de 3 *hops* ou 5 *hops*; (iii) - Os sensores 1 e 2 apresentam caminhos redundantes; (iv) - O roteador 1 é nó crítico, pois se houver qualquer problema com ele, as informações enviadas pelos sensores 1 e 2 não chegarão ao nó central; (v) - O roteador 3 também é um nó crítico, pois em caso de sua falha, o sensor 1 só terá um caminho ao nó central e o sensor 2 não conseguirá enviar a sua informação até o mesmo; (vi) - O roteador 3 é vizinho dos sensores 1 e 2, ou seja, logo ele será responsável por retransmitir as mensagens provenientes dos dois sensores e, portanto, poderá ter um maior consumo de energia. Isto significa que a duração de sua bateria será menor, e que este nó vai parar de funcionar antes dos outros.

Younis et al. (2014) afirma que os estudos relacionados ao posicionamento dos nós não estão apenas ligados a localização dos sensores, mas também no posicionamento dos roteadores, do nó central e cabeça do *cluster* (nó responsável por coletar as informações dos sensores e difundi-las pelo resto da rede).

Em uma Fábrica Inteligente, a base para a integração digital de ponta a ponta deve ser estabelecida e isto implica em um fluxo bidirecional de dados e informações entre

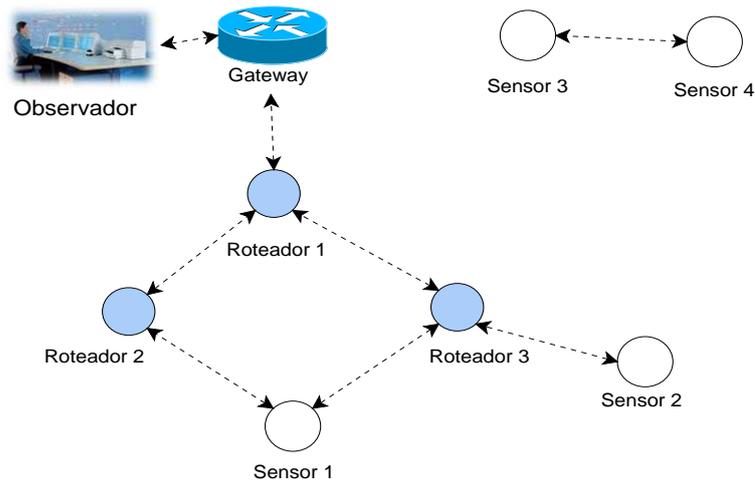


Figura 3 - Características da uma rede em malha. Adaptada de Barreira (2013)

todos os sistemas tecnológicos estruturados envolvidos em tempo real, capaz de garantir o planejamento, o controle e a execução de processos de logística de produções. Essa transformação permite uma interconexão de níveis estratégicos, táticos e operacionais em termos de integração vertical completa (ver grafo, à direita da Figura 4).

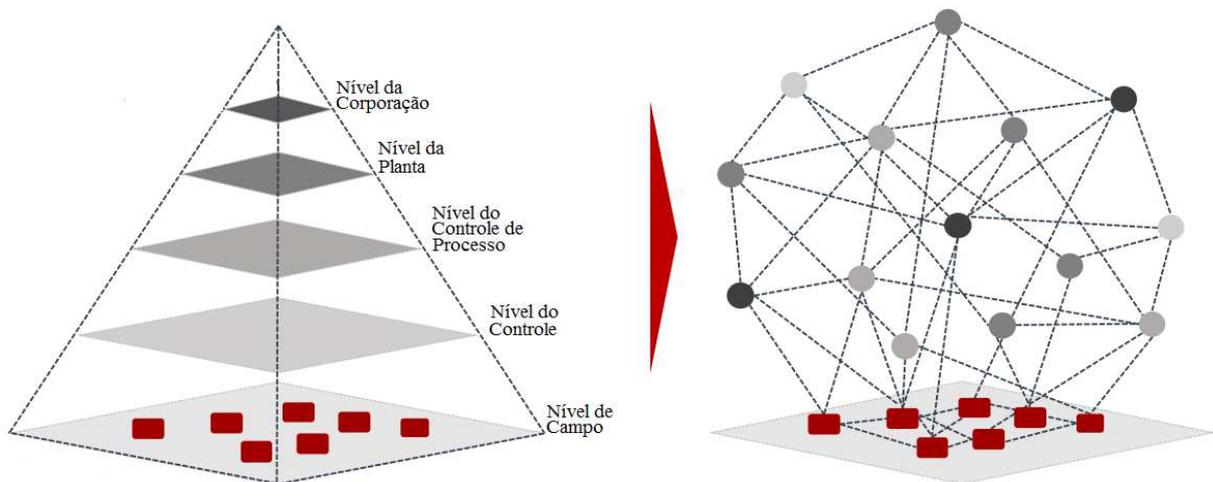


Figura 4 - Pirâmide da Automação. Adaptada de Bartodziej (2017)

Os sistemas atuais em diferentes níveis da pirâmide de automação clássica (vide Figura 4) geralmente estão mal ou mesmo não interconectados, de modo que existem fluxos de informações limitados. Os sistemas não conseguem refletir adequadamente a situação real na produção, conforme informa Bartodziej (2017).

## 1.6 Trabalhos Relacionados

Bhattacharya et al. (2014) estudaram uma estratégia de posicionamento dos nós roteadores e do nó central de forma a obter um desempenho relacionado a restrição de saltos (*hops*), sob um modelo de pacote único, garantindo a entrega dos dados para o Nó Central dentro de um prazo máximo determinado. Outra preocupação dos autores se referiu ao tempo de computação do algoritmo, onde se pode obter resultados de boa qualidade em um tempo razoável.

Lee e Younis (2010) trataram o problema de conectar segmentos disjuntos em uma RSSF particionada. A solução que eles encontraram foi popular nós roteadores adicionais no interior da rede, a fim de estabelecer nós entre segmentos.

Costa (2011), Azharuddin e Jana (2015) e Gupta, Kuila e Jana (2016) desenvolveram redes de sensores sem fio baseados no posicionamento de nós roteadores a partir da ferramenta de Algoritmo Genético. Costa (2011) utilizou uma representação onde o cromossomo era composto pelas coordenadas do posicionamento de cada roteador adicional necessário a formação da rede. A função de avaliação utilizava uma soma ponderada de diferentes métricas do desempenho da rede, tais como: maior número de saltos, porcentagem da rede ativa em caso de falha simples e número máximo de retransmissões por nó, dentre outros.

Barreira (2013) e Coelho (2016) apresentaram projetos de rede a partir de um modelo de posicionamento dos nós roteadores utilizando metáforas do sistema imunológico com o desenvolvimento de operadores de mutação específicos para o problema.

Wang et al. (2017) propuseram um modelo robusto para sistemas industriais contra os ciber ataques, que soluciona o problema de posicionamento de roteadores com múltiplas restrições, através de um algoritmo MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) melhorado.

Lee e Younis (2012) se baseiam no ORC-SMT (*Optimized Relay node placement algorithm using a Minimum Steiner Tree on the Convex hull*), cuja ideia é usar a *Steiner Minimum Tree* (SMT), considerando três segmentos externos que são formados depois de aplicar o algoritmo do casco convexo recursivamente de forma cíclica. Os pontos assim obtidos são então aplicados de forma recursiva para encontrar mais *Steiner Minimum Point* (SMP) para os nós roteadores. Os múltiplos pontos que aparecem no alcance do rádio do nó tornam-se um único ponto para o posicionamento do nó roteador. Desta forma,

o processo se repete até que todos os segmentos externos para os quais a execução tenha sido feita não sejam inferiores a três. Em seguida, os nós roteadores são posicionados nesses pontos aplicando o algoritmo da Árvore de Expansão Mínima (MST - Mínimo *Steiner* Tree), como o algoritmo Kruskal ou Prim. A principal vantagem do ORC-SMT é conectar vários segmentos de forma rápida e eficiente com um pequeno número de nós roteadores.

Wang et al. (2011) propuseram um algoritmo baseado em *Particle Swarm Optimization* (PSO), para determinar o melhor posicionamento dos nós em ambientes industriais em termos de confiabilidade da rede, uniformidade de carga, custo total e velocidade de convergência.

Wang e Zhang (2009) estudaram uma área de cobertura eficiente e uma relação de nó de área de cobertura eficiente ao analisar problemas de cobertura de WSNs. Em seu artigo, ele apresenta uma proposta para obter o número mínimo de nós para cobrir a área de sensoriamento desejada. No entanto, as influências do ambiente e dos dispositivos sensoriais, sobretudo ao que se refere à potência de transmissão, não foram levadas em consideração, e o resultado foi baseado na análise teórica, matemática e geométrica.

Wang, Medidi e Medidi (2009) consideraram o raio do sensor variável e propuseram uma técnica de cobertura “*T*” baseada em Triangulação *Delaunay* para obter cobertura “*k*” de eficiência energética. Embora eles tenham dado um passo além de Wang e Zhang (2009), as soluções geométricas são difíceis de satisfazer os requisitos de cobertura complexa. A solução geométrica não é flexível e também apresenta como desvantagem um alto custo computacional no cálculo para múltiplas demandas de cobertura.

O algoritmo *Swarm Intelligence* (*SI*), baseado no compartilhamento de informações de Otimização de enxames de partículas (PSO) e mecanismo de manutenção da diversidade do sistema imunológico artificial (AIS) foi projetado por Mo et al. (2012), apresentando um modelo para problemas de cobertura.

Na Tabela 2, observa-se de forma resumida os objetivos de Youssef e Younis (2007), Xu et al. (2005), Bredin et al. (2005), Toumpis e Tassiulas (2005), Lloyd e Xue (2007) e Zhang, Xue e Misra (2007), quando abordam as questões relacionadas ao posicionamento dos nós e vemos que latência, tempo de vida da rede sob a ótica do consumo de energia, conectividade, número de mínimo de roteadores à serem adicionados na rede a fim de garantir conectividade e por fim a tolerância são preocupações constantes.

Tabela 2 - Características de alguns trabalhos sobre Posicionamento

AUTOR	APLICAÇÃO	DIMENSÃO	INICIALIZAÇÃO	TIPO DE NÓ	OBJETIVO		RESTRIÇÕES
					PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO	
Youssef e Younis (2007)	Genérica	2D	Determinístico	Coletor de Dados	Latência	Energia	-
Xu et al. (2005)	Área externa	2D	Aleatório	Roteador	Tempo de vida da rede	-	-
Bredin et al. (2005)	Área externa	2D	Determinístico	Sensor	Conectividade	Tolerância à Falhas	-
Toumpis e Tassiulas (2005)	Redes densas	2D	Aleatório	Roteador	Número mínimo de sensores	Latência e Energia	Largura de Banda
Lloyd e Xue (2007)	Genérica	2D	Determinístico	Roteador	Número mínimo de sensores	-	Conectividade
Zhang, Xue e Misra (2007)	Genérica	2D	Determinístico	Roteador	Tolerância a Falhas	Número mínimo de roteadores	Conectividade

As métricas (objetivos), apresentados na Tabela 2, podem ser vistas como uma avaliação da qualidade de serviço. Esta se constitui um dos pontos de vista através do qual pode ser explorado o conceito de resiliência, conforme será discutido no capítulo 3.

## 2 RESILIÊNCIA

Resiliência é “(i) propriedade de um corpo de recuperar a sua forma original após sofrer choque ou deformação. (ii) capacidade de superar, de recuperar de adversidades” (AURÉLIO, 2018).

Aggelou (2008) define a resiliência da rede como a capacidade de um nó tolerar (resistir e recuperar autonomicamente) três tipos de impactos severos na rede e suas aplicações: condições extremas de rede, ataques de coordenadas e anomalias de tráfego de dados. As condições extremas de rede ocorrem, por exemplo, em alguns ambientes dinâmicos e hostis devido às suas altas condições de mobilidade e topografia.

Os ataques de coordenadas podem ser lógicos ou físicos. No primeiro caso, o principal alvo são os protocolos e serviços de rede. Geralmente, Douligeris e Mitrokosta (2004) e Liu (2009) classificam tais ataques como ataques de negação de serviço (DoS ou DoS distribuídos). Os ataques físicos consistem na destruição da infra-estrutura de rede pelo inimigo em uma operação de guerra, terrorismo ou mesmo desastres naturais.

As anomalias de tráfego de informação são qualquer tipo de comportamento ou falha imprevisível, afetando severamente os serviços de rede, especialmente os aplicativos de missão crítica. Desta forma, a resiliência da rede é um amplo tópico para pesquisa e pode incluir ou estar relacionado à robustez, sobrevivência, recuperação de rede, tolerância a falhas e interrupção.

Gutfraind (2010) vê resiliência como um atributo amplamente utilizado para estudar diversos tipos diferentes de sistemas e redes, abrangendo desde redes socioeconômicas, financeiras, terroristas, até as redes de computadores.

Sterbenz et al. (2010) apresentam várias disciplinas relevantes que servem de base à resiliência da rede e para as quais uma ampla definição de resiliência está subordinada. Como essas disciplinas se desenvolveram de forma independente ao longo de várias décadas, não existe um esquema e uma terminologia auto-consistente estabelecida.

Sterbenz et al. (2010) introduziram estas disciplinas e sua organização dentro do domínio da resiliência, depois de apresentar um importante conceito sobre “*Falha* → *Erro* → *Cadeia de falha*”.

## 2.1 Falha → Erro → Cadeia de falha

Laprie (1994), Steinder e Sethi (2004) apresentam a Falha como sendo um defeito no sistema que pode causar um erro, podendo ser uma imperfeição acidental no projeto, tal como um *bug de software* ou mesmo uma falha intencional devido a restrições impostas ao projeto, como por exemplo custos limitados, impedindo assim de se projetar um sistema suficientemente robusto.

Uma falha “adormecida” pode ser desencadeada, transformando-se em uma falha ativa, passando a ser classificada como um erro. Um erro é um desvio entre um valor do estado observado e um valor do estado correto (ou especificado), conforme definido em Standard (1996), Atis (2001) e Steinder e Sethi (2004) que pode levar a uma falha de serviço subsequente, como nos mostra Laprie (1994).

Uma falha no serviço (frequentemente reduzida à falha) é um desvio do serviço desejado do sistema que pode fazer com que este não atenda às suas especificações ou expectativas, conforme definido por Laprie (1994), Standard (1996), Atis (2001), Atis (2001), Atis (2004) e Avizienis et al. (2004).

Assim, uma falha pode causar um erro observável que, por sua vez, pode se manifestar de forma que o sistema não atenda às suas especificações de serviço. Esta relação é mostrada na Figura 5, onde é representado alguns dos motivos que levam um sistema à condição de erro operacional. Esses erros podem ser motivados a partir de falhas internas ou externas. Dentre as internas, umas ocorrem por falha operacional e outras por se encontrarem adormecidas;

Sterbenz et al. (2010) explicam em sua seção 4, que as caixas rotuladas como defesa e detecção fazem parte da estratégia de resiliência. Note que as defesas de rede podem impedir que os desafios desencadeiem uma falha e que muitos erros observáveis não resultem em falha. A tolerância à interrupções apresentada em Sterbenz et al. (2010) é um exemplo de redução dos impactos da falha e dos erros na entrega do serviço. Além disso, desafios e erros podem ser detectados, o que também fornece uma base para ações tomadas como parte de uma estratégia de resiliência.

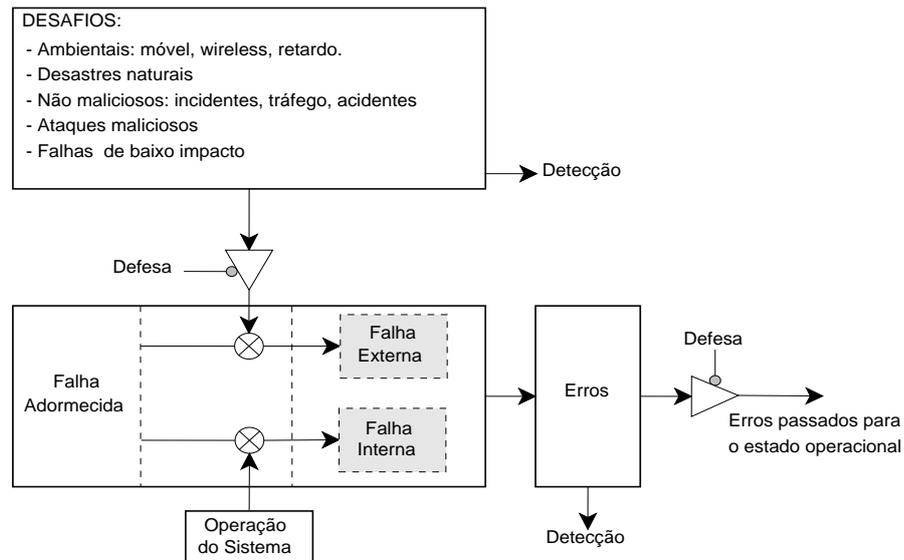


Figura 5 - *Falha → Erro → Cadeia de falha*. Adaptada de Sterbenz (2010)

## 2.2 Categorias da Resiliência

Sterbenz et al. (2010) classificam as disciplinas apresentadas na Figura 6, referentes à Resiliência em duas categorias. No lado esquerdo estão as disciplinas relacionadas à tolerância ao desafio que lidam com a concepção e engenharia de sistemas que continuam a oferecer serviços em face de desafios. Do lado direito, estão as disciplinas de confiabilidade, que descrevem propriedades mensuráveis de sistemas resilientes. A relação entre elas é a robustez, que formalmente está relacionada ao desempenho de um sistema de controle quando perturbado, a confiabilidade de um sistema quando desafiado. Neste modelo, serão abordadas 3 (três) das disciplinas apresentadas na Figura 6: Latência, Energia e Conectividade.

Najjar e Gaudiot (1990) foram um dos primeiros a estudarem resiliência de rede e a apresentarem uma medida para avaliar a tolerância à falhas. A medida foi definida como o número de falhas que uma rede pode sofrer antes de ser desconectada. Eles calcularam uma aproximação analítica da probabilidade da rede se desconectar e validaram sua proposta usando os resultados de simulação de Monte Carlo. O cenário de simulação empregou três classes de grafos particulares para representar suas topologias: cubo conectado-ciclos, torus e cubos n-binários - todos eles eram simétricos e com graus de nó fixos.

Callaway et al. (2000) empregaram a Teoria da Percolação para caracterizar a

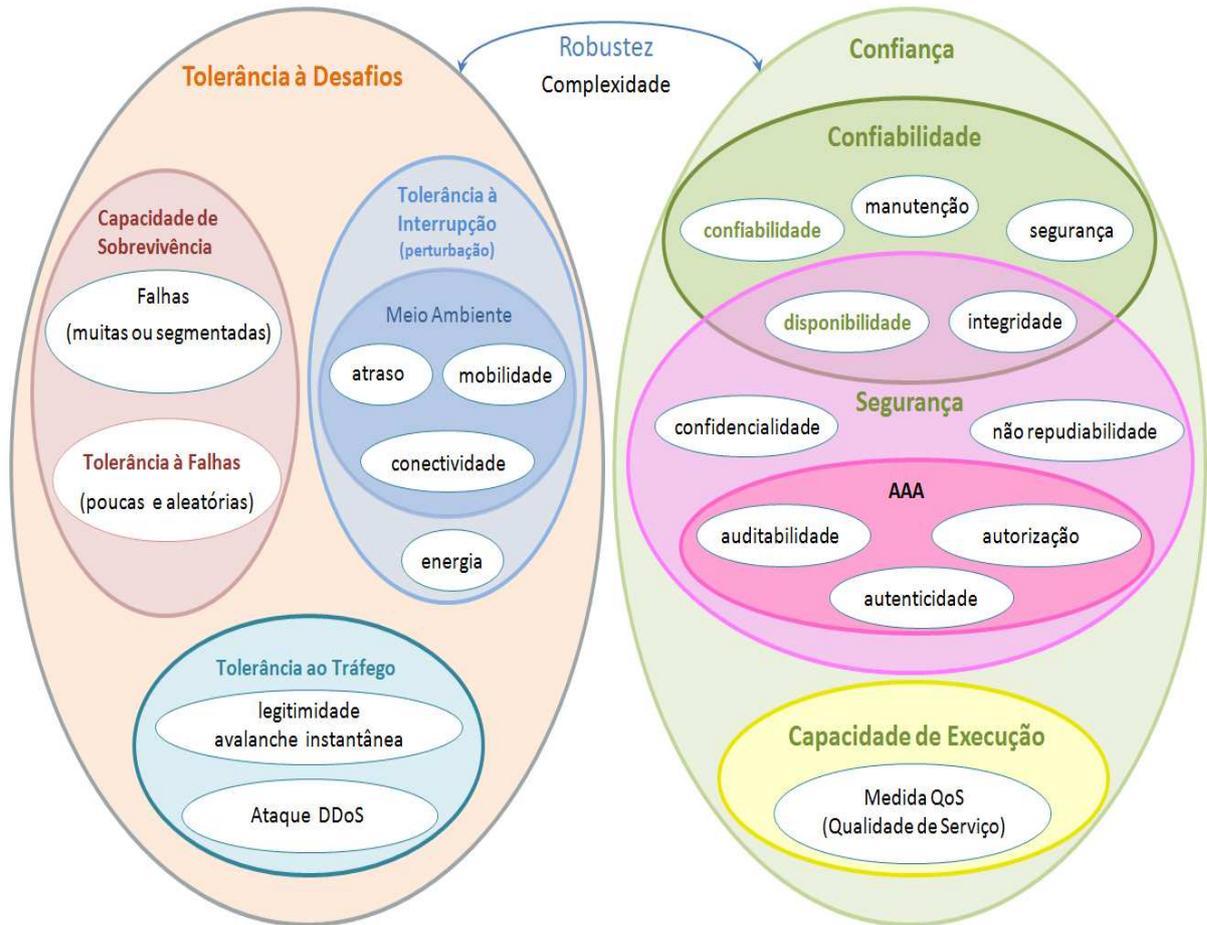


Figura 6 - Disciplinas da Resiliência. Adaptada de Sterbenz (2010).

robustez e a fragilidade da rede. A ideia era determinar um certo limite, “ $p_c$ ”, que representasse uma fração dos nós da rede e suas conexões, que quando removidos, a integridade da rede fosse comprometida, se desintegrando em partes menores e desconectadas. Tais limites críticos podem ocorrer, mas ainda existe um grande componente conectado que abrange a maior parte da rede. Uma rede com maior limiar de percolação é preferida em termos de resiliência, uma vez que será mais difícil desconectá-la. Outros trabalhos na literatura também estudaram a resiliência sob a perspectiva da Percolação. Por exemplo, Cohen et al. (2000) usaram percolação para caracterizar a resiliência da Internet.

O objetivo principal do trabalho de Liu e Ji (2009) foi quantificar a resiliência da rede para que seja possível comparar diferentes redes de acordo com essa propriedade. Os autores utilizaram como métricas de resiliência a porcentagem de perda de tráfego devido a falhas na rede; Eles também consideraram um parâmetro de escalabilidade em relação ao tamanho da rede, probabilidade de falha e volume de tráfego da rede. A resiliência foi

avaliada tendo em conta padrões de tráfego uniformes e falhas de ligação dependentes ou independentes, com ou sem proteção. O tráfego de entrada também foi modelado pelos processos de Poisson. Os autores concluíram que as topologias completas (malha) são as mais resistentes; E considerando topologias regulares com o mesmo número de nós e links, as topologias de grafo Moore apresentaram melhor desempenho.

O trabalho de Najjar e Gaudiot (1990), e mais tarde Liu e Ji (2009), apresentaram métricas de resiliência com base em cálculos de probabilidade e também usando ambientes específicos com padrões de tráfego uniformes e topologias de rede regulares.

Menth et al. (2009) apresentaram um importante trabalho sobre resiliência, apontando que algumas combinações de falha de rede podem levar à perda de conectividade de entrada-saída ou a congestão severa devido ao tráfego reencaminhado. Eles forneceram um quadro completo para analisar a resiliência de acordo com as falhas. A estrutura é baseada no cálculo da disponibilidade de fronteira de uma rede e da função de distribuição cumulativa complementar da carga do link, dependendo das falhas da rede e das flutuações de tráfego.

Dekker e Colbert (2004) associaram o conceito de resiliência à capacidade de uma determinada rede para tolerar ataques e falhas em nós. Eles se centraram em topologias de rede e estudaram conectividade e propriedades de simetria dos grafos correspondentes. Também, consideraram outras métricas em sua avaliação, como conectividade de link, distância entre nós, regularidade de grafo (distribuição de grau de nós), etc. As topologias de rede foram divididas e estudadas em grupos: grafos de Cayley, grafos aleatórios, redes de dois níveis e escala - redes livres. Além disso, concluíram que, para alcançar um bom nível de resiliência, a rede deve ter um alto grau e um baixo diâmetro, ser simétrica e não conter grandes subgrafos.

Um modelo de árvore de *Cayley* para redes idiotípicas que inclui a dinâmica de células B e anticorpos é formulado e analisado por Anderson, Neumann e Perelson (1993). Na Figura 7 cada nó representa um clone, tanto a população de células B quanto a concentração de anticorpos segregados. Cada clone está conectado a clones adjacentes de  $z$ . Uma árvore Cayley com número de coordenação  $z = 1$  é equivalente a um modelo de dois clones. Uma árvore Cayley com  $z = 2$  corresponde a uma cadeia linear com o clone 1 como a raiz da árvore. Com  $z \geq 3$ , uma árvore Cayley é uma representação de uma rede sem *loops*.

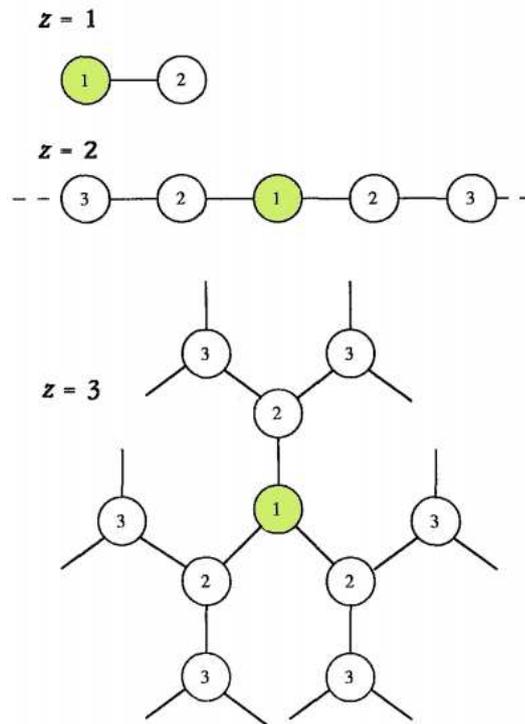


Figura 7 - Exemplo de 3 Topologias de árvore Cayley homogênea. Adaptada de Anderson, Neumann e Perelson (1993)

A resiliência das redes contra ataques também é estudada por Annibale, Coolen e Bianconi (2010), onde é modelado o custo para o invasor desativar um nó como uma função do grau do nó. Dependendo desta função de custo, um certo tipo de rede (*Poisson*, *Power Law*, etc.) pode tornar-se mais fácil ou mais difícil de desconectar, ou seja, menos ou mais resiliente, respectivamente. Essa função de custo pode depender do cenário particular em estudo e também pode ser difícil de determinar.

O trabalho de Beygelzimer et al. (2005) considerou três métricas importantes para avaliar a resiliência da rede em relação a falhas aleatórias e ataques direcionados. A primeira está relacionada ao maior componente conectado (*LCC - Largest Connected Component*), que dá o tamanho do maior subgrafo que ainda permanece conectado depois que a rede é atacada ou desconectada por falhas. A segunda métrica estudada foi o comprimento do caminho médio mais curto (*ASPL - Average Shortest Path Length*), que varia de acordo com as alterações topológicas. Na verdade, os autores usaram O inverso do comprimento médio do menor caminho. (*AISPL - Average Inverse Shortest Path Length*) para evitar problemas numéricos quando os nós se desconectaram. E por fim, o diâmetro da rede também foi considerado para avaliar a robustez da rede.

O interesse em aplicações de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) continua motivando muitos trabalhos de investigação nos últimos anos, tais como: Han et al. (2017) e XU et al. (2017).

Han et al. (2017) estudaram as características de quatro estratégias de cobertura de eficiência energética, dando especial atenção à: vida útil da rede, tempo de cobertura, consumo médio de energia, proporção de nós mortos, através de relevantes algoritmos da literatura: CWGC (*Communication Weighted Greedy Cover*), OCCH (*Optimized Connected Coverage Heuristic*), OTCC (*Overlapped Target and Connected Coverage*) e AR-SC (*Adjustable Range Set Covers*).

XU et al. (2017) trataram o problema do posicionamento de nós roteadores com o objetivo de obter o menor número possível de nós, tratando-o como um problema NP-hard de árvores *Steiner* através da obtenção do menor número de pontos *Steiner*, com comprimento de arestas delimitado em tamanhos variados. XU et al. (2017) apresentaram esta meta-heurística de dimensão variável baseada na otimização de enxame de partículas multi espacial.

Segundo Karl e Willig (2005) e Romer e Mattern (2004), a conectividade de rede permite que os nós coordenem a sua atuação durante a execução de uma tarefa, e encaminhem suas leituras aos usuários no centro de controle ou em uma estação-base (BS - *Base Station*), que serve como porta de entrada para centros de comando remoto. De fato, em muitas configurações, tais como uma aplicação de gestão de desastres, os nós precisam colaborar uns com os outros, a fim de pesquisar de forma eficaz os sobreviventes, avaliar os danos e identificar caminhos de fuga seguros. Para permitir tais interações, os nós precisam ficar acessíveis entre si e encaminharem os dados para a BS. Portanto, a conectividade entre sensores, bem como entre os sensores e a BS tem um impacto significativo na eficácia de redes de sensores e deve ser mantida o tempo todo.

No entanto, uma falha súbita de um nó pode causar uma perturbação no funcionamento da rede. Um nó pode falhar devido a um dano externo causado pelo ambiente inóspito ou simplesmente por causa do mau funcionamento de hardware. A perda de um nó pode quebrar caminhos de comunicação na rede e fazer alguns de seus vizinhos inacessível. Além disso, RSSFs que operam em um ambiente hostil podem sofrer danos em grande escala que divide a rede em segmentos disjuntos. Por exemplo, num campo de batalha, partes da área de implantação podem ser atacadas por explosivos e, assim, um

conjunto de nós de sensores nas vizinhanças seria destruído e os nós sobreviventes seriam divididos em partições disjuntas (segmentos). Restaurar a conectividade inter-segmento é fator preponderante para que a RSSF possa tornar-se novamente operacional.

Younis et al. (2014) destacam os desafios que as falhas de nó apresentam ao funcionamento de redes de sensores, bem como fornecem taxonomia de técnicas de recuperação que são orientadas para restaurar a conectividade de rede. Também, categorizam técnicas de tolerância à falha propostas na literatura de acordo com a metodologia de recuperação apresentadas em técnicas proativas e reativas. Outra classificação é feita dentro de cada categoria com base nos pressupostos do sistema, estado necessário da rede, métricas e objetivos para o processo de recuperação, etc. Em cada categoria, são discutidos vários algoritmos, dos quais são destacados seus pontos fortes e fracos e além disso, é analisado os regimes de tolerância à falhas de conectividade centrada contemporâneas para RSSF.

Uma vez que o processo de fornecer tolerância a falhas é, em geral, uma forma de gerenciamento de topologia (ou seja, muitas vezes leva a alterações nos parâmetros de topologia da rede), Younis et al. (2014) apresentam uma visão geral das técnicas contemporâneas e o objetivo do gerenciamento dessas topologias; categoriza as abordagens existentes; discute técnicas para tolerar uma falha de um único nó ou uma sequência de falhas independentes e não simultâneas que afetam os nós e por fim, aborda a recuperação da falha simultânea de múltiplos nós.

Segundo Lima (2006), enquanto a vulnerabilidade de redes é considerada uma medida negativa, já que redes mais vulneráveis são estruturalmente fracas, a confiabilidade é classificada como uma medida positiva, por ser entendida como a probabilidade que uma rede tem de permanecer conexa mesmo quando, após uma falha, acarretar na remoção de um ou mais de seus subconjuntos de nós e/ou arestas. Assim, redes altamente confiáveis são estruturas fortes e podemos afirmar que uma rede é mais confiável que outra se a probabilidade da primeira ser desconectada for menor que a da segunda. Sendo assim, enquanto os parâmetros de vulnerabilidade são determinísticos, os de confiabilidade são calculados por funções probabilísticas que envolvem parâmetros determinísticos da teoria dos grafos.

Melo, Nogueira e Santos (2014) apresentam um sistema indicador de resiliência, abordando fragilidade e robustez, que avalia a criticidade dos enlaces de comunicação e a redundância de rotas entre os nós da rede para indicar o grau de resiliência em diferentes

redes de acesso a um ambiente de redes heterogêneas sem fio sobrepostas.

Sterbenz et al. (2010) e Melo, Nogueira e Santos (2014) definem resiliência como a capacidade da rede para fornecer e manter um nível de serviço e qualidade aceitáveis diante de várias possíveis falhas e desafios para o funcionamento normal.

### 2.3 Gerenciamento de Tolerância à Falhas em nós de RSSI

A falha de nós pode deixar algumas áreas descobertas e degradar a fidelidade dos dados. A consequência mais grave ocorre quando a rede fica dividida em segmentos disjuntos, causando um efeito muito negativo sobre as aplicações, uma vez que impede a troca de dados e dificulta a coordenação entre alguns nós. Dada a configuração de recursos limitados, a recuperação deve impor menos sobrecarga e menor impacto possível no desempenho. Um nó sensor é normalmente limitado em seus recursos energéticos, computação e comunicação, e por isso um grande conjunto de sensores estão envolvidos para garantir a cobertura de área e aumentar a fidelidade dos dados. Após a implantação da rede, se espera que os nós fiquem acessíveis entre si e formem uma rede.

O processo de fornecer tolerância a falhas é em geral uma forma de gerenciamento de topologia, levando muitas vezes à mudanças em seus parâmetros.

O principal objetivo das técnicas de gerenciamento de topologia em RSSFs é atingir uma cobertura sustentável, mantendo a conectividade da rede e a conservação de energia. Por exemplo, estas técnicas são empregadas para: controlar o status de links de comunicação entre os nós; economizar energia desligando alguns dos nós sem degradar a cobertura de rede e conectividade; apoiar a atribuição de tarefa hierárquica para agregação de dados; equilibrar a carga sobre nós existente e ligações; ou fornecer escalabilidade, minimizando colisão de acesso ao meio e limitando sobrecarga. Segundo Younis e Akkaya (2008), o gerenciamento de topologia em RSSF pode ser feito através de posicionamento determinístico do nó ou executado de forma autônoma após a implantação aleatória, dada a intervenção humana limitada. As técnicas e os algoritmos existentes para o gerenciamento de topologia das RSSFs podem ser classificados em cinco categorias:

- **Localização de Nó:** Detectar os nós e suas localizações é uma função essencial em uma RSSF não só após a implantação inicial, mas também para integrar os nós recém-adicionados. O escopo da Localização de nós está sujeito a certas compensações com base nas metas de aplicação. Por exemplo, para grandes redes, a

economia de recursos em termos de energia e largura de banda pode ser obtida simplificando a topologia em certos trechos da rede, como afirma Deb, Bhatnagar e Nath (2004).

- **Gestão do Ciclo de “Sono”:** Para economizar energia e estender a vida útil da rede, alguns nós redundantes em uma RSSF podem ser desligados. Além da economia de energia, esta técnica faz com que o número de mensagens transmitidas diminua, o que reduz a interferência de sinal e as tentativas por falha de transmissão. Determinar o horário de “sono”, enquanto mantém cobertura total de área e conectividade total da rede, é uma otimização popular de gerenciamento de topologia que tem recebido uma grande atenção por parte da comunidade científica [Cerpa e Estrin (2004), Godfrey e Ratajczak (2004), Schurgers et al. (2002) e Xu, Heidemann e Estrin (2001)].

- **Clusterização:** Para alcançar escalabilidade e eficiência energética, os nós de uma RSSF podem ser agrupados para formar uma topologia hierárquica. Desta forma, os nós podem enviar suas leituras a um “cabeça de grupo” no qual junta e encaminha os dados para o nó central após eliminar dados redundantes, como demonstra Abbasi e Younis (2007).

Embora a falha do “cabeça de grupo”, muitas vezes exija re-agrupamento, algumas abordagens têm provisionado o ajuste da topologia adotando “cabeça de grupo” principal e backup para cada nó sensor, como vemos em Lai e Chen (2007), Gupta e Younis (2003) e Bagheri (2012).

- **Controle de Potência:** O alcance de transmissão reflete a distância máxima a que um receptor pode ter de um transmissor. Quanto maior for o intervalo, maior será o consumo de energia. Muitos dos rádios avançados permitem potência de transmissão programável para que um nó possa evitar o consumo excessivo de energia para alcançar os receptores nas proximidades.

Transmissão de baixa potência também pode reduzir a interferência e aumentar a taxa de transferência (*throughput*) da rede. No entanto, o uso de baixa potência de transmissão limita a conectividade de rede, uma vez que nós teriam menos vizinhos diretamente acessíveis. Ao contrário de gerenciamento do ciclo de “sono”, controle

de potência é uma técnica puramente de camada de enlace que não afeta a cobertura ou as tarefas de processamento de dados que um nó executa. Muitas técnicas de otimização no controle de energia têm sido propostas para explorar tais trocas (*trade-off*) para gerir adequadamente a topologia RSSF. Podemos exemplificar algumas dessas propostas em Correia et al. (2007), Lin et al. (2006) e Jeong, Culler e Oh (2007).

- **Controle de Movimento:** Mobilidade de nó tem sido explorada como um meio para otimizar o desempenho da rede. Os objetivos atingidos pelo movimento variam. Por exemplo, em Luo e Hubaux (2005), Wang et al. (2005), Chatzigiannakis, Kinalis e Nikoletsias (2006) e Alsalih, Akl e Hassanein (2007), o foco está em prolongar o tempo de vida da rede reduzindo a energia consumida por sensores estacionários, enquanto em Akkaya, Younis e Bangad (2005) e Youssef, Younis e Akkaya (2006) outras métricas, tais como a segurança de ativos e a latência na entrega de dados têm sido os alvos. Além disso, os roteadores móveis com mais capacidade do que os sensores são usados como encaminhadores de dados, a fim de prolongar a vida útil de uma rede de sensores estacionários, como vemos em Wang, Srinivasan e Chua (2005) e Jun et al. (2007) ou para conectar lotes disjuntos de nós, apresentados nos trabalhos de Zhao, Ammar e Zegura (2004), Almasaeid (2007) e Almasaeid e Kamal (2008).

Devido ao ambiente hostil, energia e recursos de hardware limitados em RSSF, gerenciamento de topologia também pode ser considerado juntamente com o gerenciamento de falhas. Por exemplo, as falhas do nó roteador podem criar buracos na área de cobertura e até mesmo desligar a rede em várias partições deixando vários nós funcionais inacessíveis. Em tal caso, o gerenciamento da topologia deve funcionar como auto-diagnóstico e auto-cura servindo como um serviço de tratamento de falhas.

Uma série de soluções estão disponíveis na literatura para referência, tais como o aumento da faixa de transmissão (por exemplo, controle de potência), reposicionamento de nós existentes (por exemplo, controle de movimento) ou instalação de nós roteadores adicionais para que o gerenciamento de topologia possa atuar como um serviço de gerenciamento de falhas, descobrindo ou estabelecendo caminhos alternativos.

## 2.4 Classificação das Técnicas de Tolerância a Falhas em RSSFs

Diferentes técnicas de tolerância a falhas em redes de sensores são aplicadas em resposta à perda de nós sensores. Dependendo da natureza da falha, distintas abordagens podem ser necessárias. Portanto, antes de descrever a classificação das técnicas de tolerância a falhas, primeiro explicaremos os diferentes modelos de falhas.

### 2.4.1 Modelos de falhas de nó

Em redes de sensores, falhas de nó podem ser classificadas em duas categorias: individuais e de múltiplos nós. Um modelo de falha de nó único indica a perda de um nó por vez. Este tipo de falha pode ser simplesmente detectada utilizando mensagens locais. A menos que haja sobreposição na cobertura, o nó vai deixar de fora parte da área não monitorada, como mostrado na Figura 8. Por outro lado, a posição do nó dentro da topologia de rede determina a sua criticidade de conectividade. Considerando a topologia como um grafo, um nó da extremidade da árvore (nó folha) não se encontra no caminho entre dois nós quaisquer e, portanto, não seria fundamental para a conectividade. O Nó  $M_{15}$  na Figura 9 é um exemplo de nó folha. Alguns nós, como o  $M_{13}$ , também não são críticos para a conectividade da rede, desde que os seus vizinhos  $M_{12}$  e  $M_{14}$  tenham um caminho entre eles que não incluam o  $M_{13}$ .

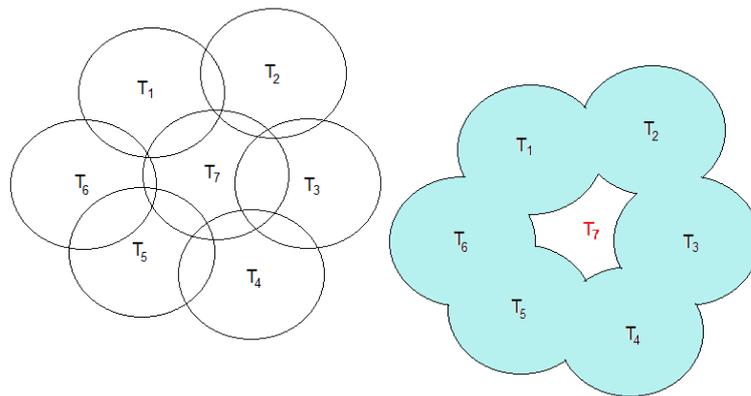


Figura 8 - Assumindo um modelo de cobertura de disco, a falha do T7 causa um hiato de cobertura na rede. Adaptada de Younis et al.(2014)

No entanto, alguns nós agem como “nó-de-corte” e quando uns falham, a rede fica dividida em blocos disjuntos. O “nó-de-corte” de um grafo é um nó que divide o grafo em vários sub-grafos conectados se for removido. Em outras palavras, um “nó-de-corte” na

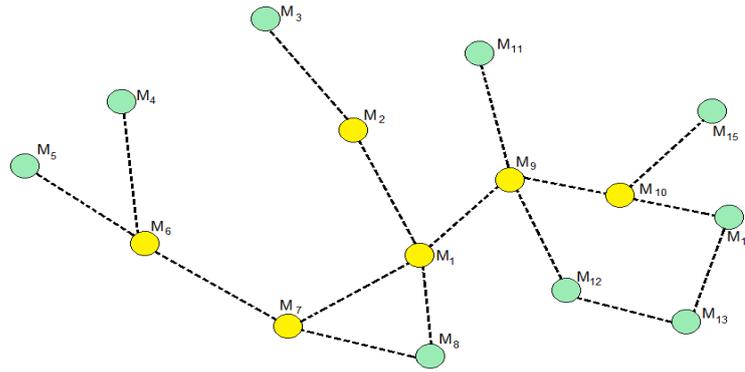


Figura 9 - Exemplo de um cenário de falha de um único nó; círculos amarelos são classificados como “nó-de-corte” e a falha desses nós divide a rede em várias partições disjuntas. Enquanto isso, os círculos verdes representam os nós não essenciais e a sua falha não causa o particionamento da rede. Adaptada de Younis et al.(2014)

rede desempenha o papel de uma passagem entre duas sub-redes. Na Figura 9, os nós  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_6$ ,  $M_7$ ,  $M_9$  e  $M_{10}$  são classificados como “nó-de-corte” e são considerados críticos para a conectividade. A falha de um único nó crítico, portanto, afeta negativamente o funcionamento da rede e pode inutilizar a rede. Obviamente, o efeito do particionamento depende do tamanho da rede e a quantidade de tráfego trocado entre os nós.

O segundo modelo de falha baseia-se na falha simultânea de múltiplos nós. RSSFs que operam em um ambiente hostil podem estar sujeitas a danos que podem ser de escala tão significativa em uma parte da área coberta que a rede fica dividida em segmentos disjuntos. Por exemplo, em um campo de combate, partes da área de implantação podem ser bombardeadas, destruindo os nós sensores nas imediações. Figura 10 mostra uma articulação, em que as áreas escuras representam a extensão dos danos. A falha simultânea de vários nós justapostos é muito exigente, não só no processo de recuperação, mas também para determinar o âmbito da falha. Técnicas para tolerar uma única falha do nó não são nem capazes de analisar o alcance da falha nem recuperar a rede de danos em larga escala. Consequentemente, têm sido propostas abordagens especiais para lidar com essas falhas de nó simultâneas.

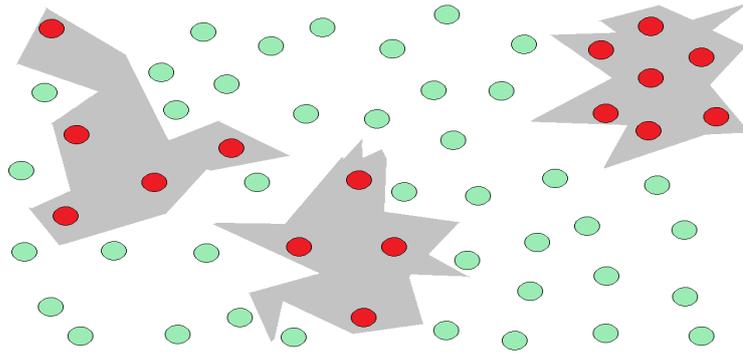


Figura 10 - Ilustração de uma RSSF segmentada devido a danos em larga escala; círculos vermelhos indicam que os nós falharam, enquanto que os círculos verdes representam os nós operacionais. Adaptada de Younis et al.(2014)

Uma variante do modelo de falha de múltiplos nós é a composição de falhas de nós simples espacialmente independentes. Por exemplo, vários nós podem falhar em diferentes partes da rede, ao mesmo tempo. Em princípio, estas falhas podem ser tratadas de forma independentes. No entanto, em alguns casos, conflitos de recursos e condições de competição podem surgir e o processo de recuperação tem que compartilhar a provisão de recursos e sincronizar a movimentação das falhas individuais.

#### 2.4.2 Técnicas de Tolerância a falhas

Segundo Younis et al. (2014), existem duas metodologias a fim de tolerar falhas de nó em RSSF: Proativa e Reativa.

A Proativa, também conhecida como pré-cautelar, provisiona recursos na topologia da rede. Esta possui duas variantes, onde na primeira, os recursos disponibilizados ocorrem na instalação e portanto, foi aplicada à esta dissertação. A segunda variante se dá em operação normal e é baseada em aumentar a topologia existente com nós redundantes ou designando nós de conectividade dispensáveis como sobressalentes. Esta última é inadequada para lidar com múltiplas falhas co-instaladas.

A Reativa ocorre através da restauração em tempo real da conectividade, na qual Younis et al. (2014) destacam três das principais estratégias apresentadas na literatura. A primeira utiliza nós móveis, que fazem parte da rede e se reposicionam para restaurar a conectividade. A segunda estratégia envolve o posicionamento cuidadoso de nós rotea-

dores para restaurar a conectividade, e é usada principalmente para lidar com falhas de múltiplos nós. A terceira estratégia prossegue na recuperação usando nós móveis e estabelece ligações intermitentes onde os nós excursionam entre os blocos de nós disjuntos e transportam os dados entre eles. Uma variante dessa estratégia explora a disponibilidade de ambos os nós fixos e móveis. Nesse caso, os nós fixos são usados para estabelecer alguns laços estáveis entre subconjunto de segmentos/sensores ou são apenas posicionados para encurtar a excursão que os nós móveis têm de fazer. A categorização das técnicas de tolerância a falhas é resumida na Figura 11, porém nesta dissertação foi aplicada a metodologia proativa.

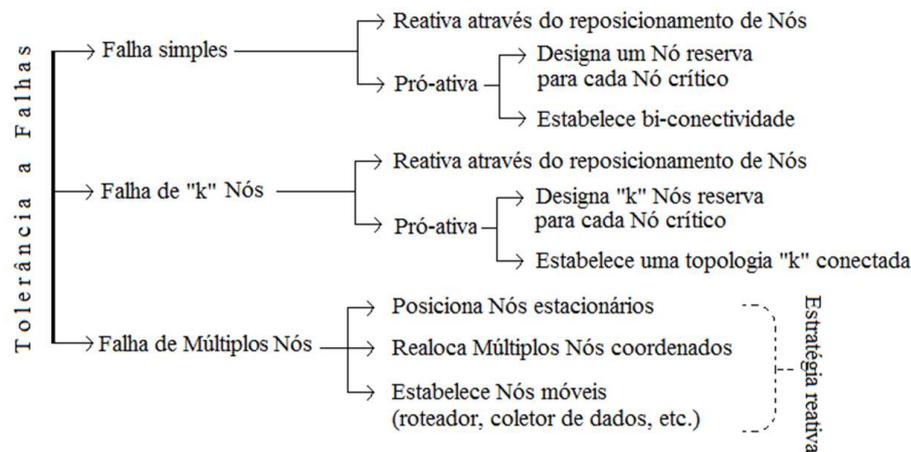


Figura 11 - Classificação dos mecanismos de tolerância às Falhas para RSSFs. Adaptada de Younis et al. (2014)

## 2.5 Metodologia Proativa para tolerância às Falhas simples

A estratégia proativa em preservar a conectividade de rede na presença de nós com defeito opta por mitigar o efeito da falha, de modo que um particionamento de rede nunca aconteça.

Duas metodologias notáveis foram tratadas na literatura até o momento:

- A primeira consiste em instalar cuidadosamente os nós redundantes na RSSF. A ideia é fornecer mais de um caminho de roteamento entre cada par de sensores na rede. As rotas alternativas também devem ocorrer através de nó disjunto, para que a falha de um único nó não vá quebrar todas as rotas viáveis. Esta ideia é denominada como conectividade de “k-vértice” ou simplesmente k-conectividade ( $k \geq 2$ ) em que

a falha dos nós  $k - 1$  não crie qualquer problema de particionamento, como nos apresenta Li e Hou (2004), Ghosh e Boyd (2006), Han et al. (2010) e Al-Turjman, Hassanein e Ibnkahla (2011).

Segundo Carpenter (1991), a maioria dos esquemas publicados concentraram-se em 2-conectividade enquanto poucos propuseram soluções generalizadas para  $k$ -conectividade. Formar topologia "k-conectada" é muitas vezes considerada uma atenuação de falha ao invés de uma estratégia para recuperação.

- Enquanto isso, a segunda metodologia consiste em designar peças de reposição para nós críticos da rede, que representa um corte de vértice na topologia da rede, como nos mostram Vaidya e Younis (2010) e Imran et al. (2010).

### 3 MODELO PROPOSTO

O modelo proposto foi desenvolvido usando o mesmo arcabouço de redes imunológicas artificiais empregado no POSIMNET desenvolvido por Barreira (2013) e estudado por Coelho (2013) e Coelho (2016), que avaliam a tolerância à falhas a partir de simulações exaustivas de falhas simples, com o intuito de gerar redes que se mantenham conectadas caso algum nó roteador pare de funcionar. Isto significa que o POSIMNET sintetiza redes tolerantes a perda de conexão. Por outro lado, o modelo proposto nesta dissertação, denominado como POSIMNET-R, procura, além de obter redes tolerantes a desconexão, garantir que a rede seja resiliente. Isto significa dizer que a rede resultante irá minimizar a perda da qualidade de serviço. A maximização da resiliência da rede é obtida com o auxílio de uma ferramenta de otimização por funções submodulares que aplica o teorema *MinCut* da Teoria de Grafos. Além disso, foram desenvolvidos 2 (dois) operadores de mutação denominados “*Steiner*” e “*Destilação*”, nos quais visam obter o menor número possível de roteadores em uma rede com cargas balanceadas e o menor número possível de *hops*. Outro estudo realizado nesse trabalho teve por objetivo avaliar o impacto de diferentes métodos de inicialização de roteadores candidatos a participar da rede, dentre os quais pode-se citar: aleatório, quasi-aleatório (SOBOL) e *QuadTree*.

#### 3.1 Visão geral do Sistema Imunológico

O Sistema Imunológico Natural consiste de um mecanismo de proteção dos seres vivos, capaz de reconhecer e combater organismos indesejáveis, sejam eles de origem interna ou de invasores externos. Castro e Zuben (1999) apresentam este sistema na forma de uma arquitetura de múltiplas camadas como mostrada na Figura 12, composta de: Pele, Barreiras químicas, Respostas Imunes Inatas e as Adaptativas. Na Figura 13 encontram-se representados os principais órgãos responsáveis pelo sistema imunológico humano.

##### 3.1.1 Imunidade Inata e Adaptativa

Os mecanismos de imunidade inata fornecem a defesa inicial contra infecções. As respostas imunes adaptativas se desenvolvem mais tarde e consistem na ativação de

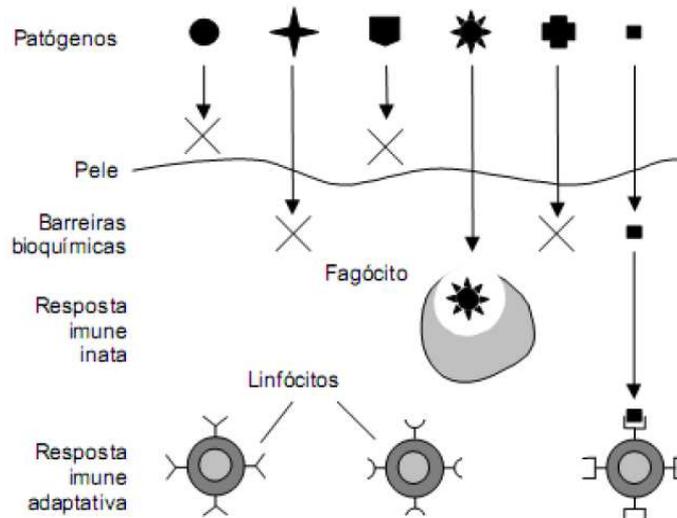


Figura 12 - Arquitetura de múltiplas camadas do AIS [Castro; Zuben (1999)]

linfócitos. A cinética das respostas imunes inatas e adaptativas são aproximações e podem variar em diferentes infecções. A Figura 14 ilustra as imunidades inata e adaptativa.

### 3.1.2 Resposta Imune Adaptativa

Abbas (2007) descreve que as respostas imunes adaptativas consistem de fases distintas, como se observa na Figura 15, sendo as primeiras três o reconhecimento do antígeno, a ativação de linfócitos e a eliminação do antígeno (a fase efetora). Os contratos de resposta (declínios) à medida que os linfócitos estimulados pelo antígeno morrem pela apoptose, restaurando a homeostase e as células específicas do antígeno que sobrevivem são responsáveis pela memória. A duração de cada fase pode variar em diferentes respostas imunes. O eixo y representa uma medida arbitrária da magnitude da resposta. Esses princípios se aplicam à imunidade humoral (mediada por linfócitos B) e à imunidade mediada por células (mediada por linfócitos T).

### 3.1.3 Maturação de Afinidade e Seleção Clonal

As células B que foram ativadas por células T auxiliares na borda de um folículo primário, conforme representadas na Figura 13 e Figura 16, migram para o folículo e proliferam, formando a zona escura. Mutações somáticas de genes Ig V ocorrem nestas células B, e elas migram para a zona de luz onde encontram células dendríticas foliculares que exibem antígeno. As células B com os receptores de Ig de afinidade mais elevada

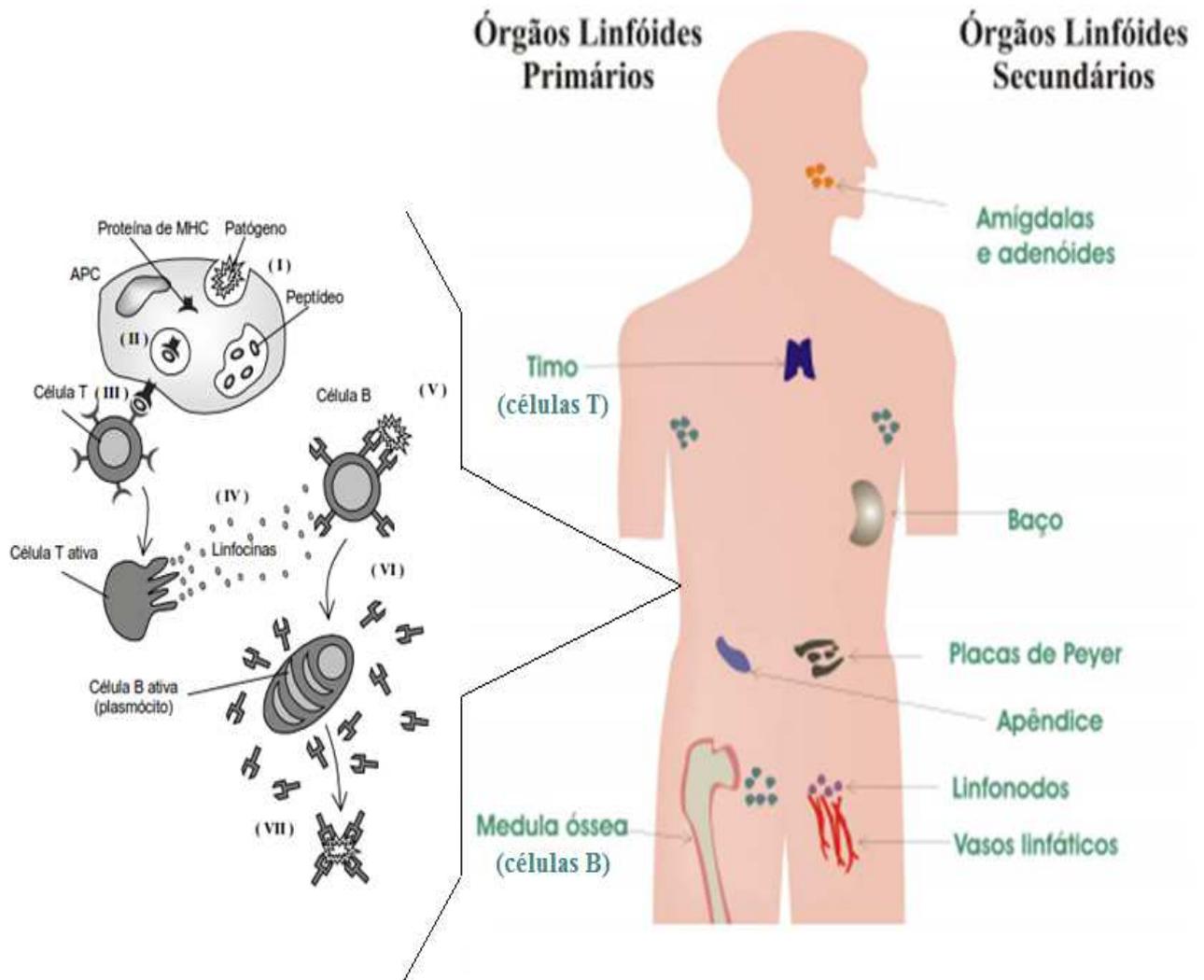


Figura 13 - Anatomia do Sistema Imunológico Humano. Adaptada de Castro (2001))

são selecionadas para sobreviver e diferenciam-se em células B secretoras ou secretoras de memória. A Figura 16 representa o processo de Maturação e Seleção Clonal.

### 3.1.4 Memória Imunológica

Em uma resposta imune primária, células B nativas são estimuladas pelo antígeno, tornando-se ativadas e, se diferenciam em células secretoras de anticorpos que produzem anticorpos específicos para o antígeno descoberto. Algumas das células plasmáticas secretoras de anticorpos sobrevivem na medula óssea e continuam a produzir anticorpos por longos períodos. As células B de memória de longa duração também são geradas durante a resposta primária. Uma resposta imune secundária é provocada quando o mesmo antígeno estimula essas células B da memória, levando a uma proliferação e diferenciação

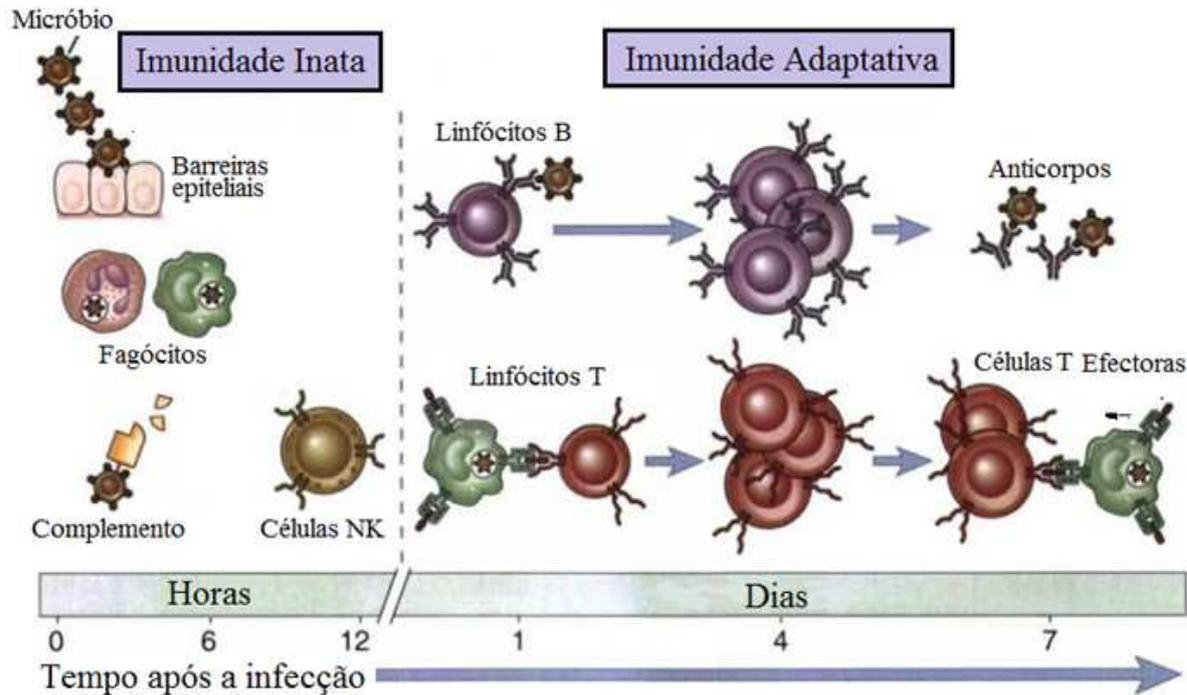


Figura 14 - Imunidades Inata e Adaptativa. Adaptada de Abbas (2007)

mais rápida e à produção de maiores quantidades de anticorpos específicos do que os produzidos na resposta primária. A Figura 17 ilustra em detalhe a Memória Imunológica.

De acordo com essa breve descrição, pode se notar que existem muitas características a serem exploradas, pois existem diversas possibilidades de abordagens, considerando mecanismos, modelos e até a dinâmica biológica envolvida nos processos imunes. O estado atual da técnica explorou algumas dessas características, a maioria delas em um alto nível de abstração. Novas abordagens apresentam um maior número de fatores biológicos e fornecendo modelos matemáticos ou computacionais para esses mecanismos. As analogias biológicas podem não ser perfeitas, mas devem ser adequadas para o desenvolvimento de algoritmos adequados para um determinado problema. No entanto, o sucesso de AISs pode ser explicado pelos resultados fornecidos por essas analogias e pela pesquisa intensiva sobre esses algoritmos e como aprimorá-los para fornecer melhores resultados. Aparentemente, não só o AIS, mas a maioria dos métodos inspirados na natureza possui vários recursos a serem explorados, servindo como analogias no desenvolvimento de novos sistemas.

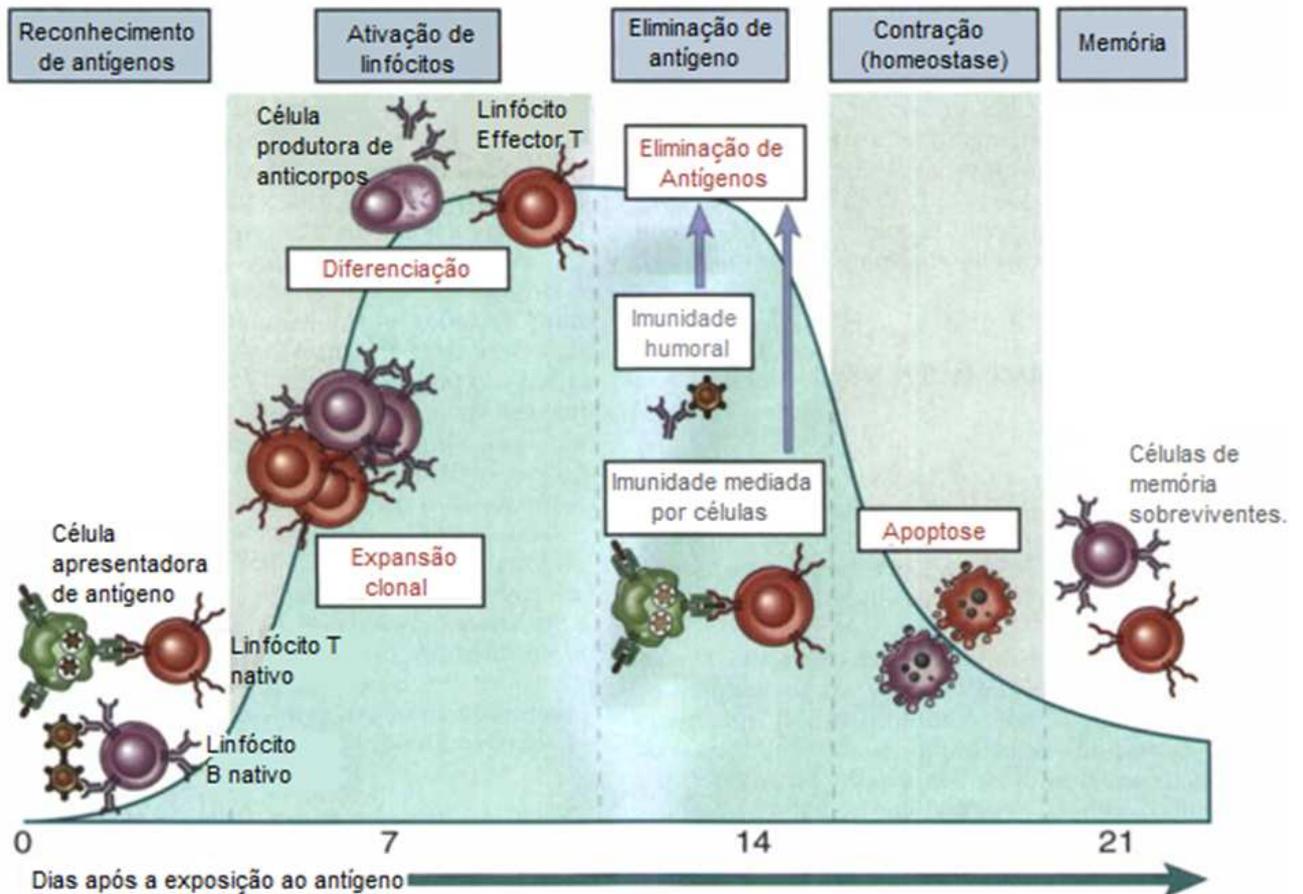


Figura 15 - Resposta Imune Adaptativa. Adaptada de Abbas (2007)

### 3.2 Sistemas Imunológicos Artificiais

De acordo com Dasgupta (1998), os sistemas imunológicos artificiais são compostos por metodologias inteligentes, inspiradas no sistema imunológico biológico, para a solução de problemas de mundo real. Esses sistemas são representados por algoritmos que apresentam características de escalabilidade, de auto-organização, de habilidade de aprendizado contínuo e de tratamento de ruído, que são de suma importância em muitas aplicações, tais como, aprendizagem de máquina, análise de dados, reconhecimento de padrão, navegação autônoma e função de otimização.

Os AISs têm sido amplamente estudados ao longo dos anos, com várias abordagens e aplicações na literatura, com o desenvolvimento e melhoria dos mesmos, tornando suas aplicações muito populares. Além disso, existem alguns outros aspectos que podem ser considerados relevantes e recentes observações na pesquisa, como o aumento das abordagens híbridas do AIS, as contribuições da pesquisa em alguns estudos multidisciplinares,

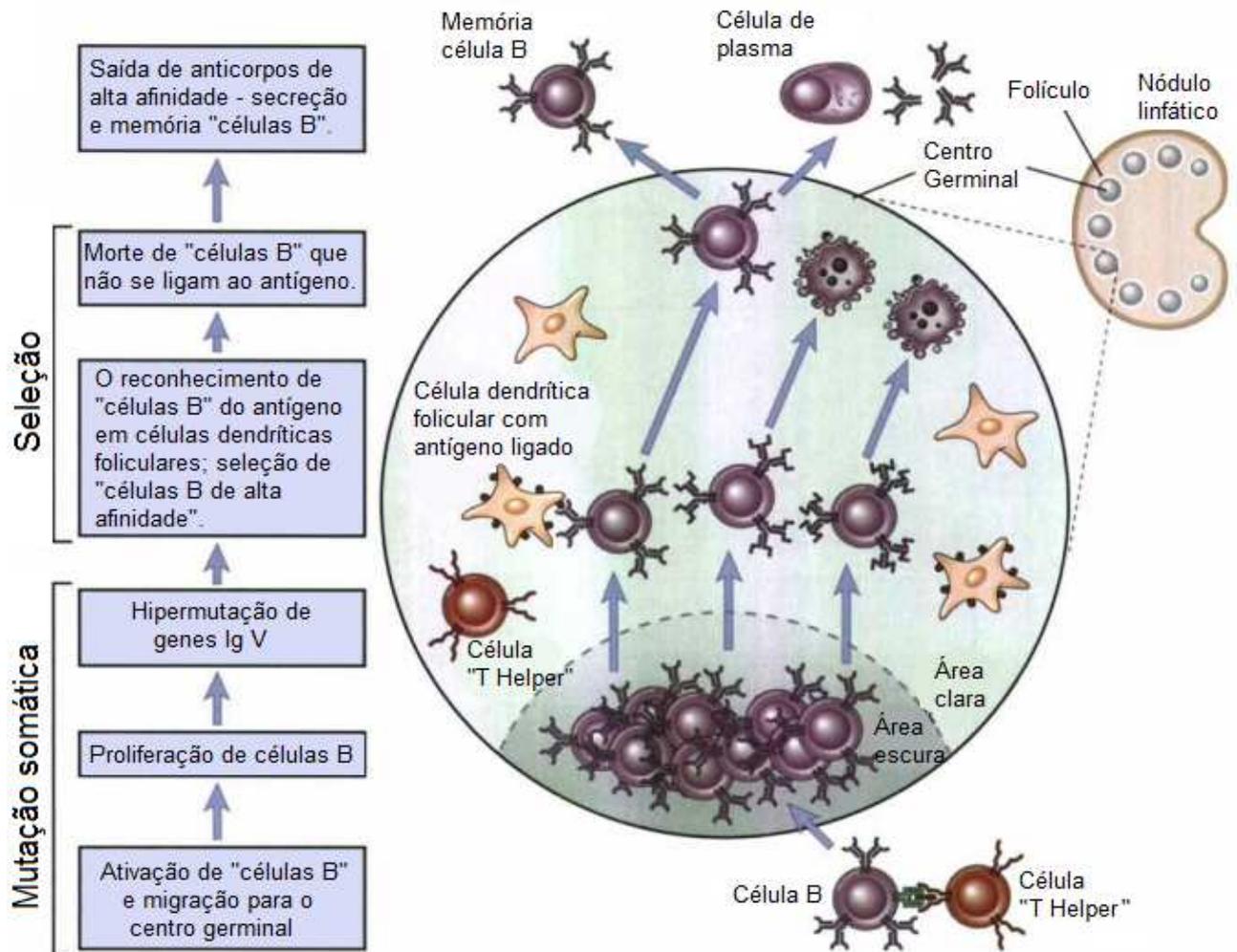


Figura 16 - Diagrama esquemático das reações do centro germinal em um "nódulo linfático". Adaptada de Abbas (2007)

as abordagens do AIS na imunologia cujo impacto é ainda desconhecido, entre outros.

Silva e Dasgupta (2016) abordam alguns trabalhos que foram publicados, bem como modelos que apareceram ao longo destes últimos anos. Os modelos de Seleção negativa e Seleção clonal, por exemplo, foram empregados com sucesso em suas adequadas aplicações e atualmente estão consolidados como algoritmos de inspiração imune bem sucedidos. As aplicações baseadas na rede imune também são bem utilizadas, principalmente em agrupamento de dados.

Outros modelos de resposta imune inspiraram alguns novos algoritmos, tais como: DCA (*Dendritic Cells Algorithm*) apresentado por Greensmith (2007) e CSPRA (*Conserved Self Pattern Recognition Algorithm*) apresentado por Silva, Dângelo e Caminhas (2017), e continua havendo espaço para o surgimento de outros novos, pois seu potencial

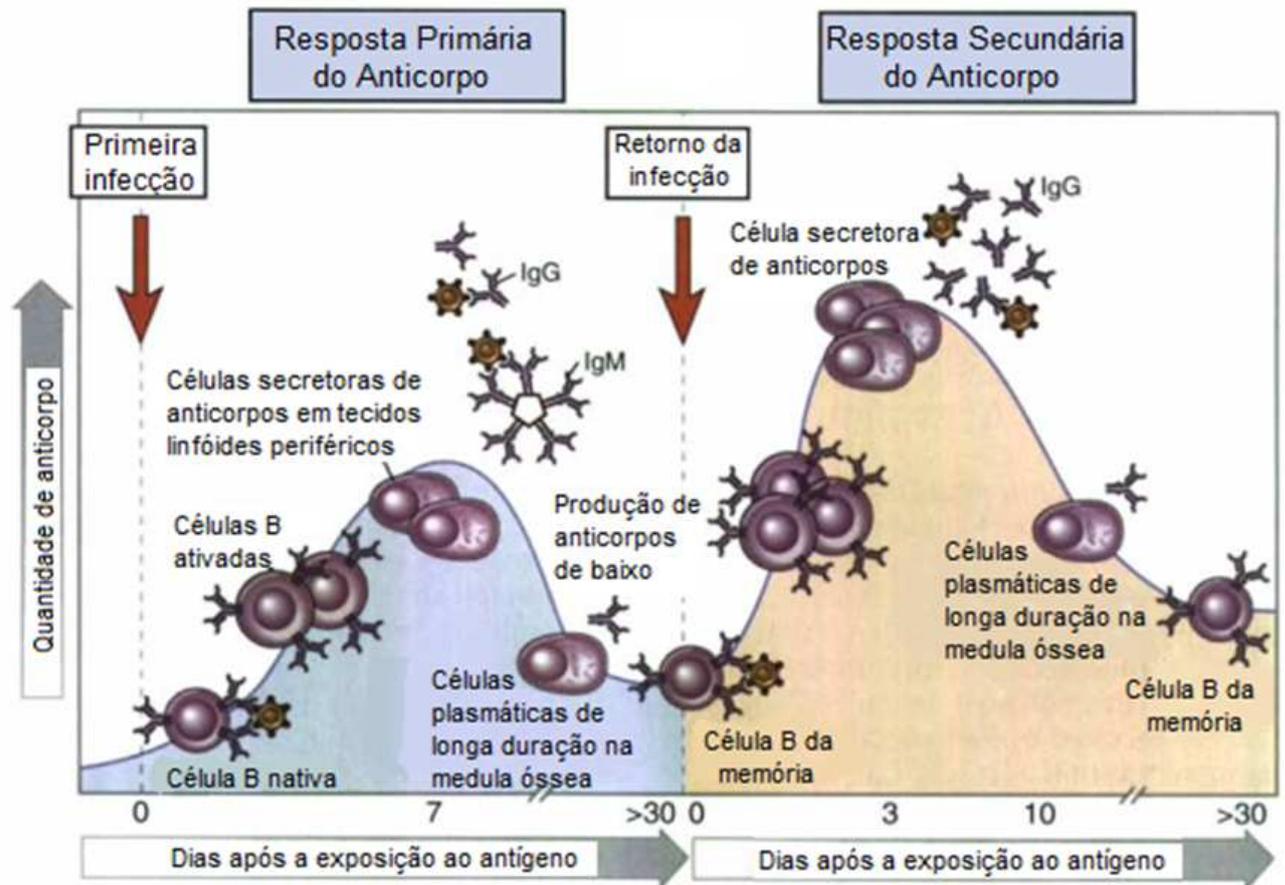


Figura 17 - Respostas imunes humorais primárias e secundárias. Adaptada de Abbas (2007)

ainda está sendo explorado corretamente para suas aplicações. Por outro lado, o desenvolvimento e estudo de abordagens híbridas ou sua combinação vêm aumentando, onde os métodos de AIS estão sendo implementados através de diferentes técnicas podendo reproduzir resultados distintos e melhorados. Nesta visão, o AIS está sendo melhorado por alguns métodos, além de servir como melhoria para outros sistemas. Possivelmente, cada mecanismo pode ser isolado para uma melhor exploração, uma vez que algumas pesquisas dizem respeito a algoritmos específicos, a fim de proporcionar uma boa solução para os problemas através das diferentes combinações.

Os principais algoritmos que implementam o sistema imunológico artificial foram desenvolvidos a partir de analogias do sistema imunológico humano, dos quais podemos citar: mecanismo de seleção negativa, teoria da rede imune, de Jerne (1974) e princípio da seleção clonal, originalmente proposto por Burnet et al. (1959).

A função do mecanismo de seleção negativa é fornecer tolerância às proteínas que

pertencem ao organismo. Assim, o sistema imunológico gera a capacidade de detectar antígenos desconhecidos e não reagir às próprias células do corpo. Isto é possível graças a um mecanismo de maturação no timo, denominado seleção negativa, em que as células T que reagem às proteínas do corpo são destruídas. Assim, apenas as células que não se conectam às proteínas do corpo podem deixar o timo. As células T, conhecidas como células maduras, circulam no corpo para detectar proteínas estranhas ao corpo, que normalmente estão presentes em antígenos.

A teoria da rede do sistema imunológico considera vários aspectos importantes como a combinação de anticorpos com os antígenos para a eliminação precoce dos antígenos. Cada anticorpo possui seu próprio determinante antigênico, chamado idiótopo. Neste contexto, Jerne (1974) propôs a Teoria da Rede Imunológica para descrever a atividade dos linfócitos de forma alternativa e segundo o Jerne, os anticorpos e linfócitos não atuam sozinhos, mas o sistema imunológico mantém uma rede de células B para o reconhecimento de antígenos. Essas células podem estimular e inibir um ao outro de várias maneiras, levando à estabilização da rede. Duas células B estão conectadas se compartilham uma afinidade acima de um certo limite e a força desta conexão é diretamente proporcional à afinidade que compartilham.

O princípio de seleção clonal descreve as características básicas de uma resposta imune a um estímulo antigênico e garante que somente as células que reconhecem o antígeno sejam selecionadas para proliferar. As células filhas são cópias ou clones de seus pais e estão sujeitas a um processo de mutação com altas taxas, chamada hipermutação somática. E, segundo Castro e Timmis (2002), este processo de hipermutação tem o objetivo de proliferar células maduras mais adequadas, isto é, aquelas com maior afinidade aos antígenos.

### 3.3 POSIMNET

Barreira (2013) propôs uma ferramenta de posicionamento de nós roteadores (nós intermediários), denominada POSIMNET (*Positioning Immune Network* - Rede Imunológica de Posicionamento), que auxilia projetistas de redes de automação industrial a encontrar a melhor configuração da rede sem fio. O POSIMNET é baseado nas redes imunológicas artificiais, e se propõe criar redes com “ $n$ ” caminhos quaisquer ou disjuntos para que as informações enviadas pelos nós sensores cheguem ao nó central, através da

supressão, clonagem e reconfiguração de nós roteadores intermediários. Este algoritmo também é capaz de atender os objetivos de baixo grau de falha, baixo número de retransmissão pelos roteadores, número mínimo de roteadores instalados e número mínimo de vezes que o nó roteador é usado. Tais objetivos podem ser habilitados individualmente ou combinados de forma ponderada com pesos iguais ou diferentes para cada um. Ainda dentro dos recursos do POSIMNET, existem dois módulos: (i) Rede Imunológica, que agrega componentes de dois modelos de redes imunológicas (SSAIS e AiNet); (ii) Campos Potenciais, onde os candidatos a nós roteadores são posicionados em função das forças de atração e repulsão, em que Sensores críticos atraem os nós roteadores, enquanto que os Obstáculos e demais roteadores os repelem. A Figura 18, mostra a estratégia do modelo POSIMNET desenvolvida por Barreira (2013).

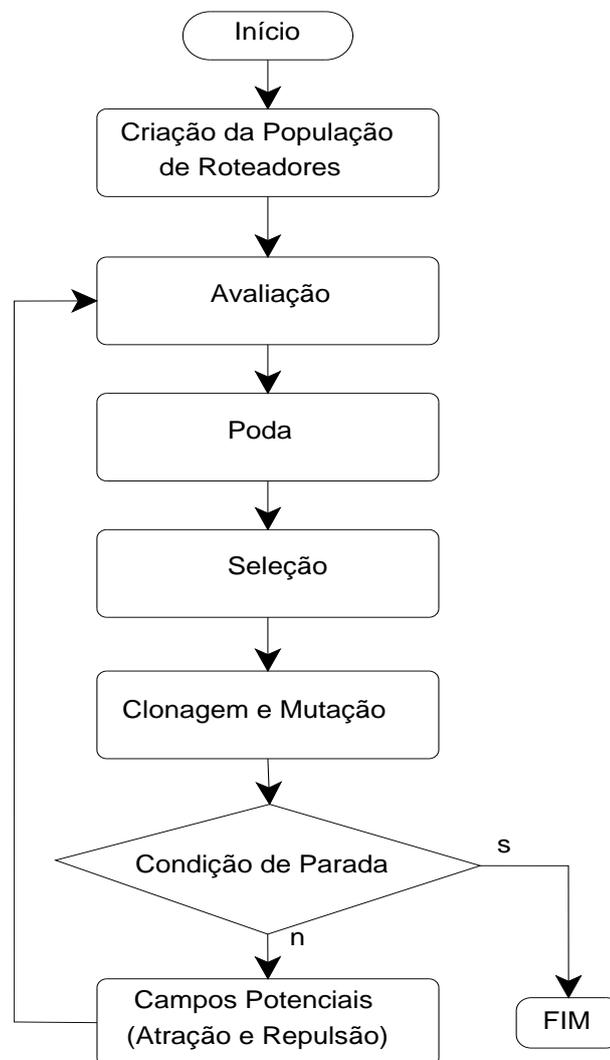


Figura 18 - Modelo POSIMNET. Adaptada de Barreira (2013)

Conforme desenvolvido por Howard, Mataric' e Sukhatme (2002) e aplicado por Barreira (2013), bem como neste modelo (POSIMNET-R), o posicionamento dos roteadores é influenciado pela ação dos campos potenciais, que são formados pelos conjuntos de forças de atração e repulsão, representando analogamente e dando a dinamicidade ao processo, conforme o sistema linfático do corpo humano.

As forças de atração são exercidas pelos sensores sob os roteadores e as forças de repulsão são exercidas por roteadores e obstáculos sob os outros roteadores. Em outras palavras, os roteadores são atraídos pelos sensores e são repelidos pelos demais roteadores e pelos obstáculos. Cada roteador estará sujeito a um conjunto de forças  $F$  provenientes dos campos potenciais  $U$ , que são inversamente proporcionais a distância euclidiana ( $d = \sqrt{(x_{rot} - x_{dc})^2 + (y_{rot} - y_{dc})^2}$ ) entre os roteadores, conforme equação (1).

$$F = - \nabla U \quad (1)$$

A equação (2) resume o somatório dos campos potenciais sofrido por cada roteador individualmente.

$$U = U_{Obs} + U_{Atr} + U_{Rep} \quad (2)$$

### 3.4 POSIMNET-R

Assim como no POSIMNET, as células B do POSIMNET-R, que formam a rede imunológica, serão compostas pelos conjuntos de nós sensores e de nós roteadores. Os nós sensores tem posição fixa, próxima dos locais onde a instrumentação da planta é necessária. Os nós roteadores são adicionados para manter a resiliência da rede. A posição destes nós será alterada durante o processo de otimização da rede. Na etapa dinâmica, a estimulação das células B, conjunto de nós roteadores, será definida pelo grau de afinidade existente entre as células B na formação da rede. O papel de antígeno no POSIMNET-R não é realizado por um conjunto de dados separados como ocorre no AiNet e no SSAIS, mas o antígeno é visto de uma forma mais ampla como a entidade que estimula as células B. Sendo assim, a função do antígeno neste algoritmo é representada por situações anormais ou indesejadas e é indicada pelo Grau de *hops* e pela Probabilidade de Falha. Essas métricas podem ser habilitadas para formar a afinidade dos roteadores. Deste modo, o

roteador que estiver mais estimulado, poderá ser selecionado para clonar outros roteadores, cujas presenças podem fazer com que a rede tenha a resiliência necessária. Este aspecto é verificado no teste da condição de parada. Caso o objetivo não seja atingido, os roteadores são submetidos aos campos potenciais e uma nova rede é formada, fazendo com que o algoritmo seja repetido até que a condição de parada seja satisfeita. A Figura 19 apresenta um fluxograma do modelo proposto (POSIMNET-R), que será descrito a seguir.

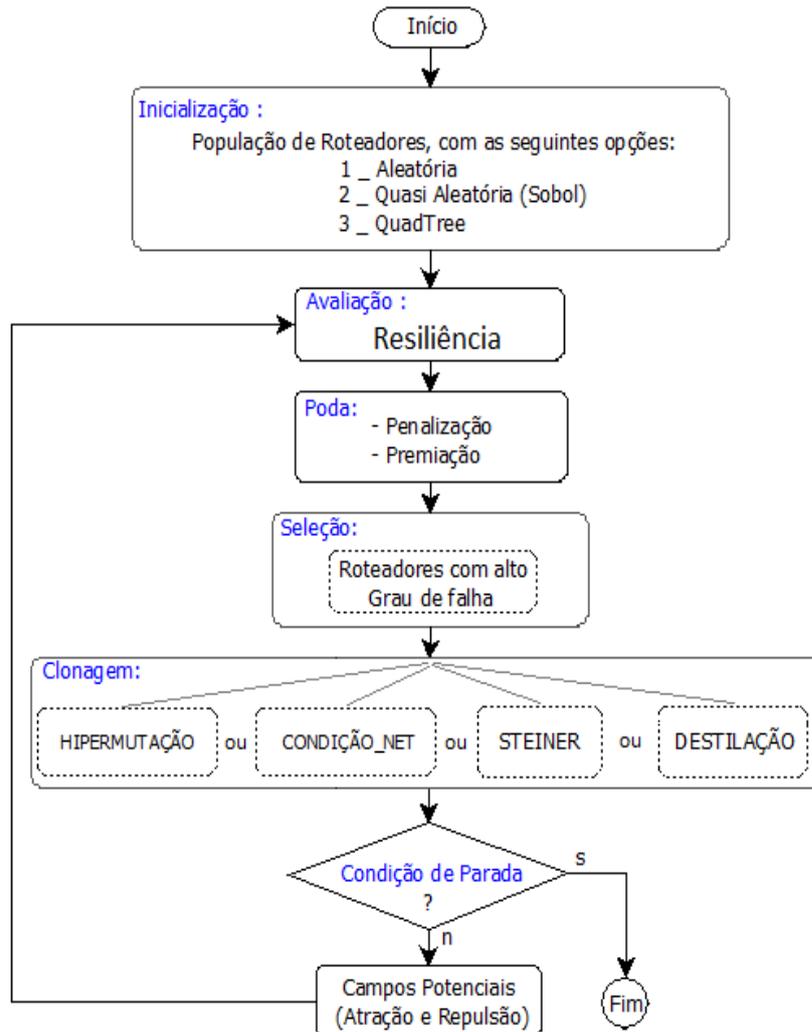


Figura 19 - Modelo proposto para o POSIMNET-R

### 3.4.1 Inicialização

Inicialmente, é sintetizado um conjunto de células B para formar uma rede. E este trabalho apresenta 3 métodos para obter roteadores candidatos para formação inicial da rede. São eles:

- (a) RAND: gera números pseudo-aleatórios uniformemente distribuídos;
- (b) SOBOL: Introduzida pela primeira vez por Sobol' (1967), representa uma sequência de números quasi-aleatórios com baixa discrepância. Isto significa que os números são gerados sequencialmente a fim de preencher as maiores “lacunas” dos números “pseudo-aleatórios”. Na literatura, podemos verificar diversos trabalhos demonstrando sua eficiência através de algoritmos e suas aplicações, tais como Niederreiter (1978), Bratley e Fox (1988) e Filho (2000).
- (c) *QuadTree*: O objetivo da Inicialização através do procedimento *QuadTree* é gerar conjuntos de roteadores populando regiões onde se identifica maior incidência da presença de sensores e/ou obstáculos. Isso se faz necessário para que seja criado uma diversidade de caminhos alternativos entre os sensores e o nó central. Na literatura, verifica-se algumas de suas aplicações, tais como apresentada por Hunter e Steiglitz (1979) e Amaral (2006).

Seu princípio básico de funcionamento é:

- (c.1) posicionar no plano cartesiano, sensores e pontos referentes aos obstáculos da planta em questão, que aqui é denominado como  $P_n$ ;
- (c.2) normalizar as dimensões desta planta, definindo-a como um hipercubo. No caso de duas dimensões, um quadrado;
- (c.3) circunscrever o(s) novo(s) quadrado(s);
- (c.4) posicionar o suposto candidato a nó roteador no centro do novo quadrante;
- (c.5) avaliar se existe algum  $P_n$  no raio do círculo traçado;
- (c.6) dividir a(s) área(s) analisada(s) que for(em) identificado(s) a presença de um ou mais  $P_n$  nos 4 novos quadrantes;
- (c.7) repetir o procedimento a partir do item (c.3) até o nível de granularidade equivalente ao raio de alcance estabelecido pelos fabricantes para que haja comunicação entre os componentes da rede.

A Figura 20 representa uma *QuadTree* em forma de árvore e a Figura 21 representa uma inicialização através do *QuadTree*, para o cenário da refinaria do Texas, onde os círculos vermelhos com uma cruz preta no centro representam de forma hipotética os

seguintes nós: nó central, nós sensores da refinaria, bem como a presença de obstáculos, seja em forma de círculo ou um polígono. Já os pontos com uma cruz verde, representam os possíveis candidatos à função de nó roteador. E, este cenário está sob a perspectiva de um plano cartesiano. Ainda neste cenário, exposto pela Figura 21, observa-se que nas regiões com menos sensores ou obstáculos, a presença de candidatos à função de roteamento é menor.

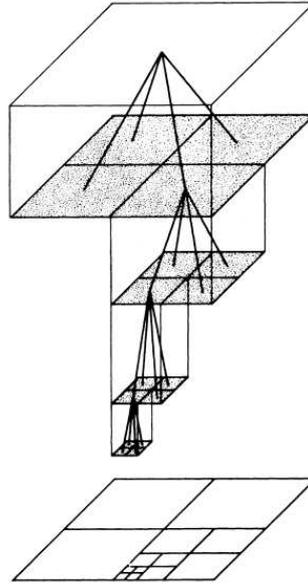


Figura 20 - Uma figura e seu *QuadTree* [Hunter; Steiglitz (1979)].

### 3.4.2 Avaliação

Além dos algoritmos existentes no POSIMNET, que avaliam os objetivos descritos na subseção 3.3, foram desenvolvidos mais 2 (dois) algoritmos para compor a função objetivo contida na Avaliação do POSIMNET-R, visando obter o menor número de *hops* possível e a menor probabilidade de ocorrer desconexão das subredes existentes, utilizando teorema de MinCut da teoria de Grafos em simulações que variam de 1 a “*n*” roteadores com falha, suportado por uma ferramenta de otimização de funções submodulares, desenvolvida por Krause (2010). Entretanto, nos estudos de caso, se optou por desenvolver redes com a menor probabilidade de desconexão, a fim de comparar com o Grau de Falhas existente no POSIMNET.

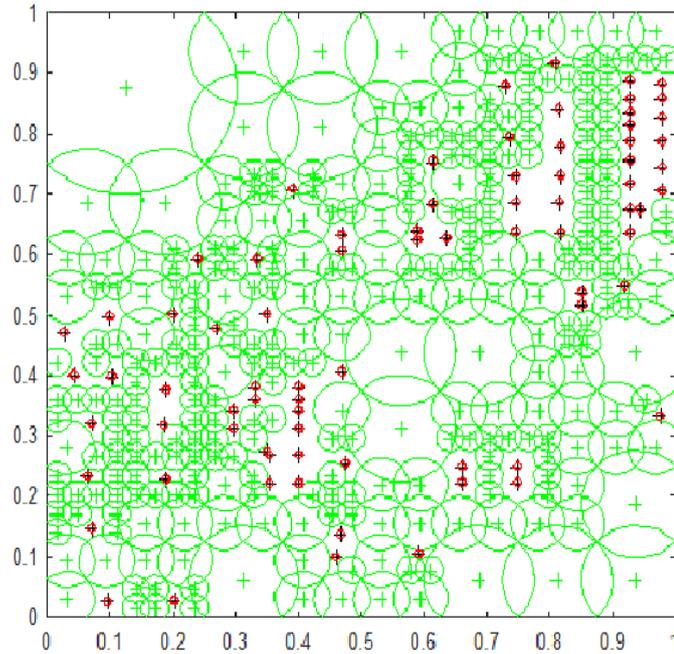


Figura 21 - Inicialização *QuadTree* para o cenário referente à refinaria do Texas

#### 3.4.2.1 Razão entre o Número de *hops* ideal e o obtido

O grau do número de *hops* é a razão entre o número de *hops* ideal, considerando a distância do nó sensor ao nó central, e o número de *hops* obtido pelo algoritmo. Esta avaliação é necessária a fim de possibilitar aos projetistas, o cálculo do tempo de latência, uma vez que esta variável é de vital importância para o desempenho de algumas lógicas de controle. A Figura 22 representa a relação entre o caminho ideal e o caminho real obtido e a equação (3) demonstra a forma de cálculo aplicada no Grau do Número de *hops*.

$$GrauHops = \frac{NumIdealDeHops}{NumDeHopsObtidos} \quad (3)$$

#### 3.4.2.2 Probabilidade de Falha (MinCut)

A probabilidade de Falhas é calculada utilizando um dos teoremas da Teoria de Grafos denominado MinCut, apoiado em uma ferramenta de otimização por funções sub-modulares. O procedimento se encontra descrito a seguir:

- (a) A Rede é dividida em *clusters* (subredes) em função do número de sensores existentes;

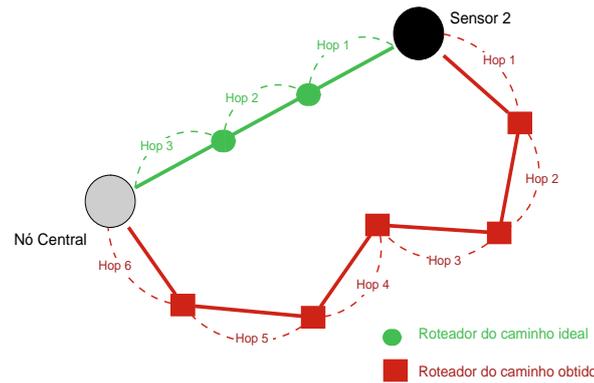


Figura 22 - Número ideal de Hops x Número de Hops Obtidos

- (b) Para cada subrede, calcula-se a cardinalidade de corte mínimo “ $i$ ”, utilizando o teorema de MinCut, suportado pela ferramenta de otimização de funções submodulares, desenvolvida por Krause (2010). A cardinalidade do corte mínimo entre dois nós ( $s$  e  $t$ ) representa a menor soma da capacidade de todas as arestas entre os cortes  $s - t$ .
- (c) Identifica-se as arestas que foram cortadas.
- (d) O número de conjuntos de corte mínimo  $M_i$  da referida cardinalidade “ $i$ ” é calculado através da equação (4), publicada por Ball e Provan (1983), onde  $e(G_s)$  é o número de arestas da subrede, o “ $i$ ” é a cardinalidade do número mínimo de arestas cortadas que desconecta a subrede.

$$M_i = \binom{e(G_s)}{i}, \quad (4)$$

- (e) A probabilidade da subrede se desconectar é calculada através da equação (5), publicada por Ball e Provan (1983), supondo que a probabilidade de falha em cada aresta seja  $\rho$ .

$$P(G, \rho) = \sum_{k=i}^{e(G_s)} M_i \rho^k (1 - \rho)^{e(G_s) - k} \quad (5)$$

- (f) A probabilidade de falha de cada subrede mencionada acima é distribuída por entre seus respectivos roteadores.
- (g) Ocorrendo a participação de um roteador em mais de uma subrede, optou-se em

atribuir a este a maior probabilidade de falha entre as subredes.

### 3.4.3 Poda

A Poda tem como objetivo gerenciar os Recursos de cada roteador, penalizando ou premiando-o a cada geração em função desse estar sendo utilizado ou não. O Recurso atribuído inicialmente é igual a 10 e ocorre subtração de 1 (uma) unidade de recurso se o mesmo for penalizado ou, ocorre a adição de 1 (uma) unidade de recurso, em situação oposta, ou seja, se o mesmo for premiado. O roteador será penalizado se possuir Afinidade igual a 0 (zero) ou será premiado se o mesmo possuir Afinidade superior a 0 (zero), situação que caracteriza a sua utilização na rede.

### 3.4.4 Seleção

Nesse processo, foram realizadas algumas melhorias em relação ao POSIMNET, no sentido de evitar que um nó roteador ao ser selecionado para gerar seus clones, não entre na fila do próximo processo de seleção, que ocorre na geração seguinte.

O processo Seleção ocorre a partir da escolha aleatória dentre as Células B mais estimuladas, ou seja, com maior Afinidade, para serem Clonadas. A equação 6 foi utilizada para gerar a curva da função de distribuição de probabilidade exponencial, dando maiores chances aos roteadores mal avaliados através da Afinidade ( $x$ ) e o parâmetro médio  $\mu$ . A Figura 23 representa um processo de seleção.

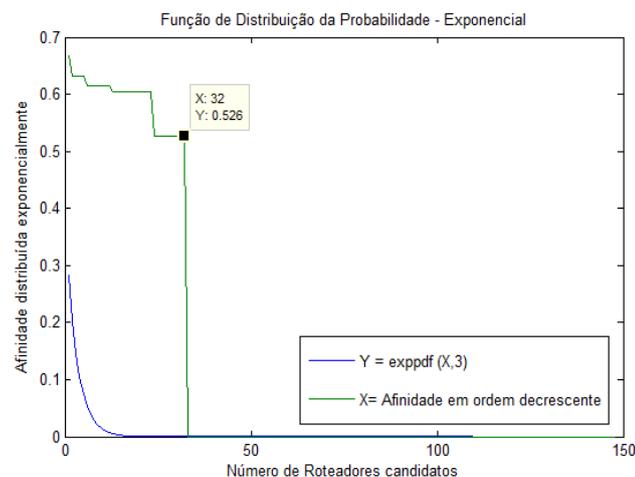


Figura 23 - Representação do processo de seleção aleatória

$$y = f(x|\mu) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}} \quad (6)$$

### 3.4.5 Operadores

Nesse trabalho foram desenvolvidos dois operadores de Clonagem, baseados em alguns conceitos encontrados na literatura. São eles: (i) Mutação *Steiner* e (ii) Mutação por Destilação. A título de comparação, foram aplicados também os operadores “*Clona Hyper*” e “Condição Net” utilizados por Barreira (2013).

#### 3.4.5.1 Mutação *Steiner*

Neste processo, o nó *Steiner*   calculado através da obtenção do incentro de cada triângulo formado por 3 nós, a partir da triangulação de Delaunay (1934), permitindo assim criar uma árvore de caminho mais curto, aplicando uma das propriedades *Steiner*, apresentadas por Gilbert e Pollak (1968), que diz que o ponto *Steiner* forma um ângulo de 120  com cada dois pontos do respectivo triângulo. No exemplo da Figura 24 podemos observar a representação dos pontos *Steiner* calculados a partir de um grafo qualquer, onde o caminho “1-10-11-12-2” poderia ser reduzido para “1-10-22-2”, ou seja, de 4 para 3 saltos.

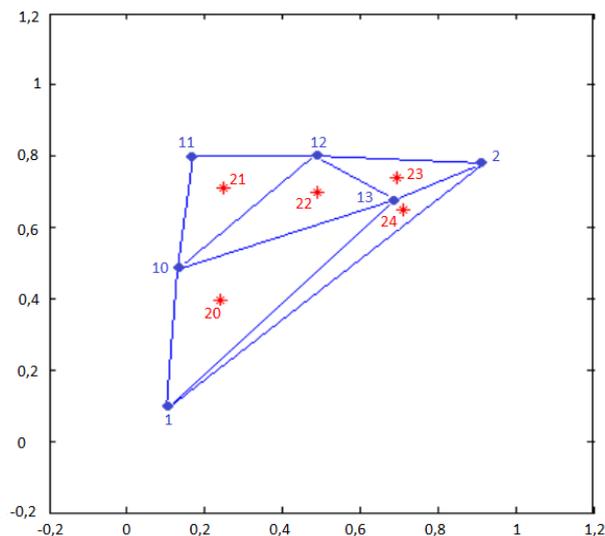


Figura 24 - Incentros (pontos em vermelho) calculados a partir da triangulação de Delaunay

No Apêndice E, observa-se um processo de evolução das 11 primeiras gerações, representadas da Figura 67 à Figura 70, aplicando o operador de mutação *Steiner*, com raio de alcance igual a 0,2, a partir de uma inicialização aleatória de candidatos à população de roteadores.

#### 3.4.5.2 Mutação por Destilação

Segundo Wang e Zhang (1997), a Destilação é um processo de subdivisão de arestas, de forma que seja possível inserir um vértice de grau 2 em uma aresta de  $G$ . E, Teixeira (2008) demonstra que uma subdivisão uniforme (ou destilação uniforme) de aresta em  $G$  é a subdivisão de todas as arestas desse grafo. Ou seja, se “ $e = (v, w)$ ” é uma aresta de um grafo  $G$ ,  $G'$  é o grafo obtido de  $G$  quando “ $e$ ” é substituída por um par de arestas  $(v, u)$  e  $(u, w)$  em  $G$ . Logo, a aresta “ $e$ ” foi subdividida e haverá subdivisão uniforme em  $G$  quando a mesma operação for realizada em todas as arestas de  $G$ . Analogamente, duas subdivisões uniformes inserem dois vértices de grau 2 em todas as arestas do grafo  $G$ .

Um grafo purificado consiste em um processo inverso ao da Destilação, onde um grafo é obtido por sucessivas contrações de vértices de grau 2 com seus vizinhos, operações essas que aglutinam 2 vértices, eliminando a aresta que os interligava.

Wang e Zhang (1997) constroem um grafo purificado a partir da substituição das arestas de cada caminho disjunto por uma única aresta, onde os vértices terminais têm grau no mínimo 3 e cada vértice intermediário tem grau 2.

Neste modelo, também se desenvolveu o operador denominado como Mutação por Destilação Elíptica, onde um ou mais arcos elípticos são traçados entre o nó roteador de maior Afinidade e o nó sensor crítico, com o número de nós intermediários (roteadores) necessários para atender o raio de alcance mínimo estabelecido pelo projetista da rede, a fim de garantir o enlace de comunicação, conforme exemplo representado na Figura 25. A partir do momento que não há mais “nós críticos”, os arcos elípticos passam a ser traçados entre o nó roteador de maior Afinidade e o Nó Central.

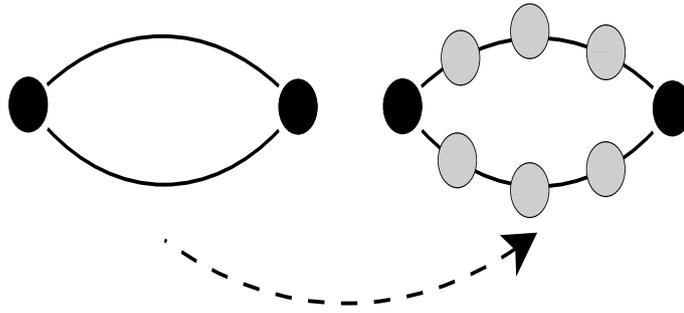


Figura 25 - Destilação de Grafos

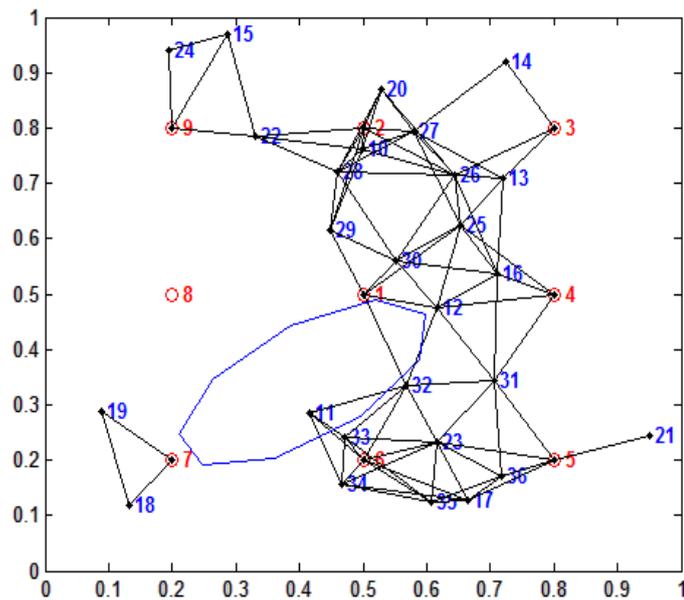


Figura 26 - Mutação por Destilação entre o nó Sensor 7 e o nó Roteador 12

O processo de Mutação por Destilação ocorre à cada geração, com base na seleção aleatória de um ou mais roteadores bem avaliados. A quantidade de roteadores a sofrer mutação é definida pelo projetista em função de sua necessidade. A destilação gera de 1 à “ $n$ ” arcos elípticos entre o(s) roteador(es) com boa Afinidade e o sensor que se encontrar na condição de criticidade, ou seja, sensor que não estiver com os “ $n$ ” caminhos definidos pelo projetista, conforme representado na Figura 26, onde o sensor 7 é interligado ao roteador 12, abrindo a possibilidade de conexão com o nó central (Nó 1). Neste exemplo, 2 caminhos estavam pré-definidos pelo projetista para cada nó sensor (ou seja,  $K_{path}=2$ ) e os nós sensores 7 e 8 se encontravam desconectados da rede, porém só o nó sensor 7 estava sendo atendido pelo processo de Mutação. Se na próxima geração, o nó sensor 8

não se conectar, seja pelas forças potenciais, seja pelos próprios novos caminhos criados no atual processo de mutação, então, a Mutação por destilação será aplicada. Caso o usuário desejar mais de 2 caminhos, bastará passar essa informação para o modelo, que o mesmo traçará tantos arcos elípticos quantos forem necessários. Por exemplo, a quantidade de arcos é igual a  $kpath$  dividido por 2. Se o número de  $Kpath$  solicitado for ímpar, será traçada a quantidade de arcos igual a metade de  $Kpath$  mais 1.

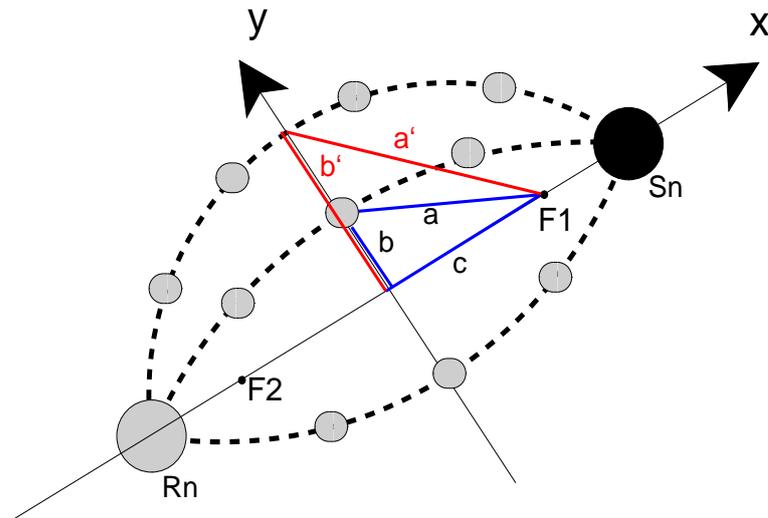


Figura 27 - Excentricidade da Elipse

A Figura 27 representa o procedimento para traçar 3 caminhos que ocorrem dentro do processo de Mutação por Destilação. Os caminhos estão relacionados à excentricidade da elipse que é dada por:  $0 \leq \frac{c}{a} \leq 1$ . Quanto maior o valor da relação  $\frac{c}{a}$ , mais achatada será a elipse. Se o raio de alcance for definido como “0,2”, então tem-se  $b = 0,1$ . Aplicando-se a equação reduzida da elipse  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ , calcula-se o valor de “a”. Daí, por Pitágoras chega-se ao valor de “c”.

### 3.4.6 Balanceamento de Cargas

A fim de garantir o balanceamento de cargas, foi disponibilizado para o projetista a opção de só utilizar um roteador por subrede (arestas e nós disjuntos totais), porém foi aberta a opção de se utilizar apenas um roteador na subrede, dando a este roteador oportunidade de participar de outras subredes (caminhos e nós Disjuntos parciais). No modelo anterior ao POSIMNET-R, existia a opção “Caminhos Disjuntos”, ou seja, Arestas

Disjuntas. Entenda-se por subrede, os caminhos formados entre o sensor e o nó central. Desta forma, haverá sempre tantas subredes quantos forem o número de sensores existentes no projeto da rede.

## 4 ESTUDO DE CASOS

Neste Estudo de Casos, serão apresentados 16 dos 96 estudos de caso, que se encontram no Apêndice C para o cenário POSB, e será escolhida uma dessas configurações para desenvolver uma rede para cada um dos cenários das Refinarias do Texas e de New Jersey.

### 4.1 Descrição dos Estudos de Caso

Os testes no POSIMNET-R foram simulados em um cenário de área quadrada, normalizado de  $1 \times 1$ , com o objetivo de ser adaptável a diversos cenários. o  $\eta$  aplicado foi de 80% e o  $K$ repulsão igual a 1, a fim de estabelecer que quando um nó roteador se afasta de um nó sensor crítico, 80% do raio de alcance entre as forças de repulsão e atração estejam em equilíbrio. Contudo, para o cálculo da aceleração dos nós roteadores foram adotados os valores de massa igual a 1 e “ $v$ ” igual a  $0,5 \text{ N.s/m}^2$ , para que não houvesse oscilação do sistema.

Como parâmetro de clonagem foi definido que apenas o roteador com maior afinidade fosse selecionado para produzir clones a cada geração. O Recurso inicial atribuído a cada roteador foi igual a 10 e em cada geração se adotou como penalização, a subtração de uma unidade e, como premiação, a adição de uma unidade, dentro do limite de 0 a 10.

Para avaliar este trabalho, foram comparados os resultados obtidos pelos operadores de mutação desenvolvidos com os resultados do modelo anterior no cenário POSB (vide Figura 28), complementando-o com as métricas apresentadas nesta dissertação. Também serão analisadas as redes com simulações de falhas simples e múltiplas (aleatórias e independentes), apresentando gráficos comparativos a partir dos operadores de mutação, bem como entre os dois modelos. Além disso, a partir da melhor configuração observada dos estudos de caso do cenário POSB, será projetada uma rede para cada um dos seguintes cenários reais: Refinaria do Texas (Figura 29) e Refinaria de New Jersey (Figura 30).

Na Figura 28, o nó central é representado pelo nó 1 e os sensores estão representados pelos nós de 2 à 9. Portanto, esse seria um cenário necessitando de um projeto de rede, para posicionar os nós roteadores a fim de atender as necessidades de um processo hipotético, com a distância máxima (raio de alcance), entre os nós, igual a 0,1.

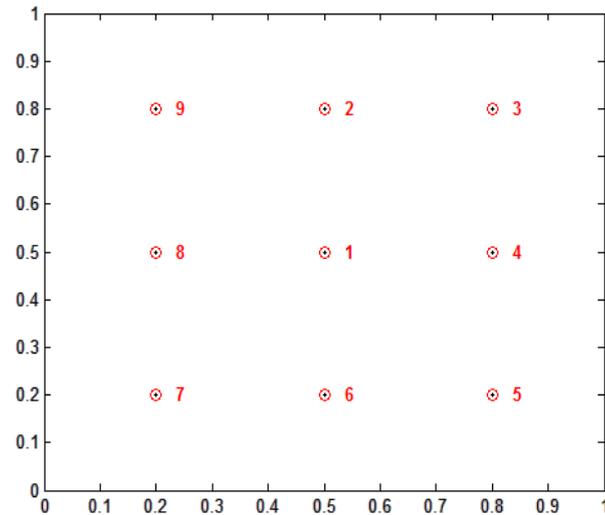
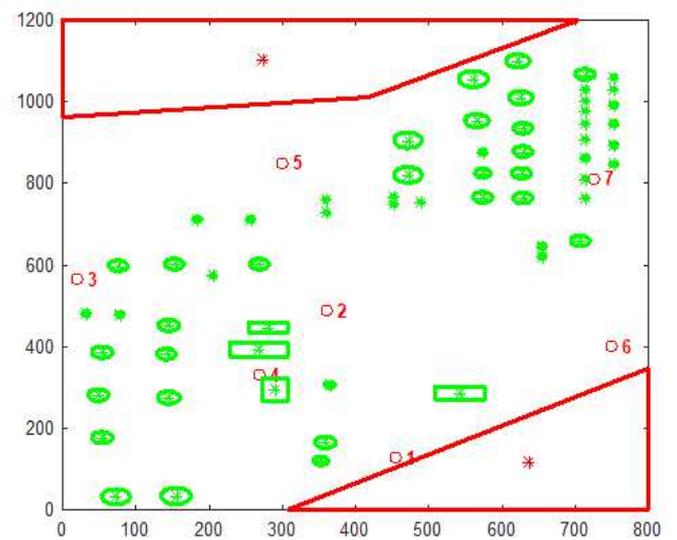


Figura 28 - Cenário POSB (Nó central=1 e os sensores = de 2 à 9)

A Figura 29(a) representa a Refinaria do Texas extraída do “*Google Earth*” e a Figura 29(b) representa o cenário preparado para o POSIMNET-R da referida Refinaria, destacando os pontos da rede necessários para o respectivo processo, onde o nó central é o nó de número 1 e os demais representam os sensores que monitoram o processo.



(a)



(b)

Figura 29 - (a): Cenário Refinaria do Texas - (imagem extraída do “*Google Earth*”) e (b): Cenário Texas preparado para o POSIMNET-R (Nó central=1 e os sensores = de 2 à 7)

A Figura 30(a) representa a Refinaria de New Jersey extraída do “*Google Earth*” e a Figura 30(b) representa o cenário preparado para o POSIMNET-R da referida Refinaria, destacando os pontos da rede necessários para o respectivo processo, onde o nó central é o nó de número 1 e os demais representam os sensores que monitoram o processo.

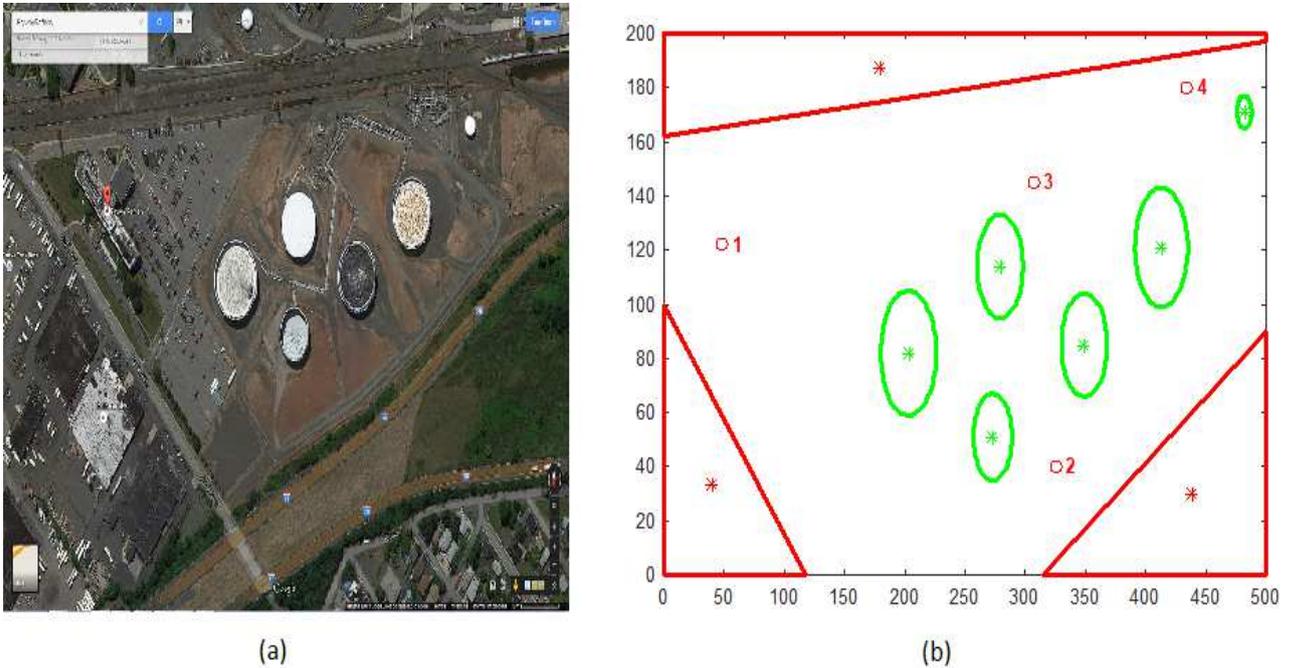


Figura 30 - (a): Cenário Refinaria de New Jersey - (imagem extraída do “*Google Earth*”) e (b): Cenário New Jersey preparado para o POSIMNET-R (nó central = 1 e os sensores = de 2 à 4)

Foram realizados 96 Estudos de Caso, adotando o cenário POSB utilizado no modelo POSIMNET e, parametrizados conforme Tabela 3. Além disso, para cada Estudo de Caso foram realizados 10 experimentos. A Tabela 4 apresenta as 96 combinações planejadas para os Estudos de Caso submetidas ao modelo POSIMNET-R.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados nos 96 Estudos de caso

PARÂMETROS	VALORES
Cenário	POSB
Número de Gerações	300
Número Inicial de Roteadores	47
Recurso inicial fornecido	10
Número Máximo de Roteadores	550
Número de caminhos redundantes	2
Raio de Alcance	0,1
Afinidade	Resiliência
Operadores de Mutação	Clona Hyper Condição NET Steiner Destilação

Tabela 4 - Planejamento dos Estudos de Caso

Raio de Alcance = 0,1					Raio de Alcance = 0,2				
Inicialização	ALEATÓRIA	SOBOL	QUADTREE	Operadores	Inicialização	ALEATÓRIA	SOBOL	QUADTREE	Operadores
Caminhos	Estudos de CASO			CLONA Hyper Condição NET Steiner Destilação	Caminhos	Estudos de CASO			CLONA Hyper Condição NET Steiner Destilação
Quaisquer	1	17	33		49	65	81		
	2	18	34		50	66	82		
	3	19	35		51	67	83		
	4	20	36		52	68	84		
Disjuntos Arestas	5	21	37		53	69	85		
	6	22	38		54	70	86		
	7	23	39		55	71	87		
	8	24	40		56	72	88		
Disjuntos Arestas +	9	25	41		57	73	89		
	10	26	42		58	74	90		
	11	27	43		59	75	91		
	12	28	44		60	76	92		
Nós Parciais Disjuntos Arestas +	13	29	45		61	77	93		
	14	30	46		62	78	94		
	15	31	47		63	79	95		
	16	32	48	64	80	96			
Nós Totais				Nós Totais					

#### 4.2 Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Quaisquer

Dentre os 96 estudos de caso que se encontram nas tabelas do Apêndice C, foram escolhidos para análise os que possuem as seguintes características: Raios de Alcance igual a 0,1; Inicialização Aleatória; Caminhos QUAISQUER. Desta forma, foram selecionados os Estudos de Caso 1, 2, 3 e 4 da Tabela 9 do Apêndice C, que correspondem aos Operadores de Mutação : *Clona Hyper*, *CondiçãoNET*, *Steiner* e *Destilação*. Todas as tabelas,

que apresentam os Estudos de Caso, possuem os melhores resultados destacados na cor azul.

Tabela 5 - Resultados dos Estudos de Casos - de 1 a 4

	Cenário : POS B Kpath : 2 Raio de Alcance: 0,1 Inicialização : Aleatório Caminhos : QUAISQUER											
	POSIMNET Grau de Tolerância a Falhas				POSIMNET-R Probabilidade de Falhas (via Teorema de MinCut)							
	ClonaHyper CASO_01		CondiçãoNET CASO_02		ClonaHyper CASO_01		CondiçãoNET CASO_02		Steiner CASO_03		Destilação CASO_04	
	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
Número de Nós	52	2	52	4	49	3	49	3	56	2	56	3
Número de Roteadores Usados	43	2	43	4	40	3	40	3	47	2	47	3
Número de Sensores Críticos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo Grau de Falha	13	0	13	0	19	9	19	7	14	4	14	4
Número de Roteadores com Máximo Grau de Falhas	3	1	4	1	6	4	5	3	3	2	6	4
Tamanho máximo dos Caminhos	8	1	8	1	7	0	8	1	6	0	6	1
Número de Nós com Tamanho máximo	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	1
Número máximo de vezes que o Roteador é usado	7	1	7	2	6	1	5	1	4	1	4	1
Número de Roteadores que são mais usados	1	0	1	1	2	1	2	1	3	3	2	1
Grau de Hops médio dos Roteadores usados	77,12	4,52	75,95	5,37	80,53	3,16	77,33	4,73	89,63	5,73	83,91	2,85
Probabilidade de Falhas (MinCut) média dos Roteadores usados	33,06	2,54	31,79	2,41	24,56	1,04	24,99	1,41	20,54	1,48	22,32	1,27
<b>Resiliência média dos Roteadores usados</b>	<b>66,51</b>	<b>2,72</b>	<b>67,82</b>	<b>2,40</b>	<b>75,24</b>	<b>1,05</b>	<b>75,02</b>	<b>1,52</b>	<b>79,49</b>	<b>1,39</b>	<b>77,71</b>	<b>1,23</b>
Melhor Geração	172	65	163	67	182	83	158	65	153	83	137	74
Geração da Primeira Convergência	31	9	32	8	27	7	24	10	3	1	8	1
Tempo da Primeira Convergência (segundos)	22,71	13,84	21,08	8,73	20,44	7,26	19,71	9,33	20,76	10,17	9,62	1,76
Média do Número de HOPS de todos os Sensores	5,6	0,3	5,7	0,4	5,4	0,2	5,6	0,3	4,9	0,2	5,2	0,2
Número de Experimentos que não convergiram	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

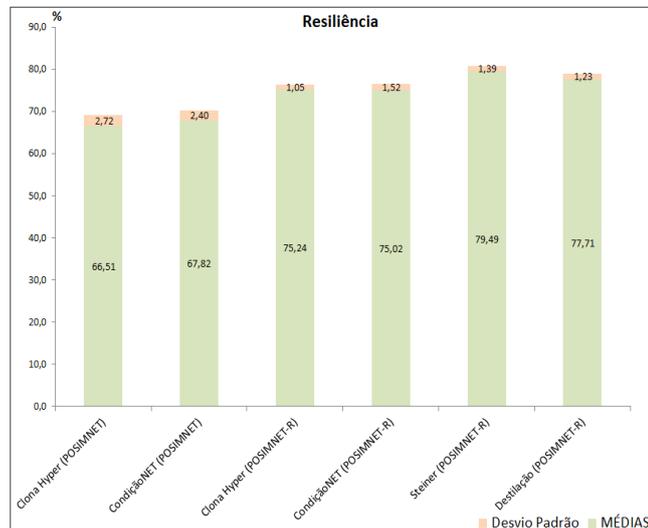


Figura 31 - Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 1 a 4

Nesta simulação o objetivo para o POSIMNET-R é obter 4 redes com 2 caminhos quaisquer para cada sensor transmitir os dados monitorados para o nó central, com raio de alcance de 0,1 no cenário POSB. Para tal, cada uma das 4 redes foi desenvolvida a partir dos 4 operadores *Clona Hyper*, *Condição NET*, *Steiner* e *Destilação*. A função

Afinidade tratou apenas a probabilidade de Falhas dos nós roteadores, portanto com peso 1 para este objetivo, avaliando as redes através do teorema MinCut. Após a realização de 10 experimentos, a melhor configuração de rede resiliente que se obteve para cada um dos operadores de mutação se encontram demonstradas da Figura 32 à Figura 35, cujos resultados são consolidados na Tabela 5.

O gráfico demonstrado na Figura 31 apresenta a Resiliência obtida pelos operadores de mutação e, correspondem a média e o desvio padrão de 10 experimentos, apresentados na Tabela 5, onde também se observa, que a maior quantidade de pontos positivos em destaque na cor azul, vieram do operador de mutação *Steiner*, dentre os quais pode-se destacar: (i) Menor probabilidade de falhas, de 20,54%; (ii) Maior avaliação quanto ao Grau de *hops*, de 89,63%; (iii) Menor tamanho máximo dos caminhos, de 6 *hops*; (iv) Menor geração na obtenção da Primeira Convergência, de “2,6”, apesar de ter sido o operador mais lento no tempo da primeira convergência, de 20,76s. (v) Menor Média do Número de *hops* entre todos os sensores, para a informação chegar ao nó central. (vi) no trace da Figura 34 observa-se boa estabilidade pelo baixo desvio padrão quanto à maior média da resiliência e do Grau de *hops*, bem como boa recuperação, a partir do surgimento de Sensores críticos. Como ponto negativo, observa-se um alto número de roteadores adicionados, 47 roteadores, perdendo para o operador de mutação *Clona Hyper*, que utilizou 40 roteadores.

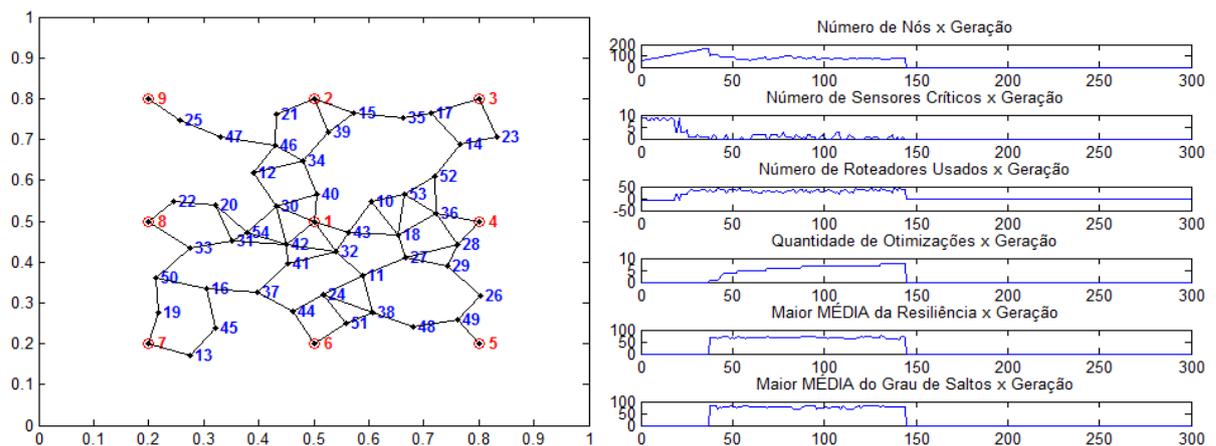


Figura 32 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 1 - *Clona Hyper*

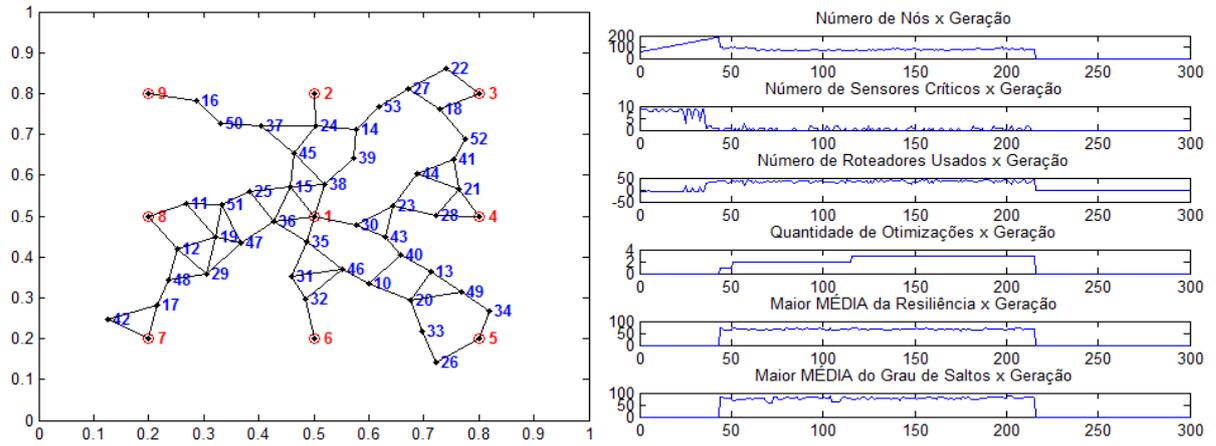


Figura 33 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 2 - Condição NET

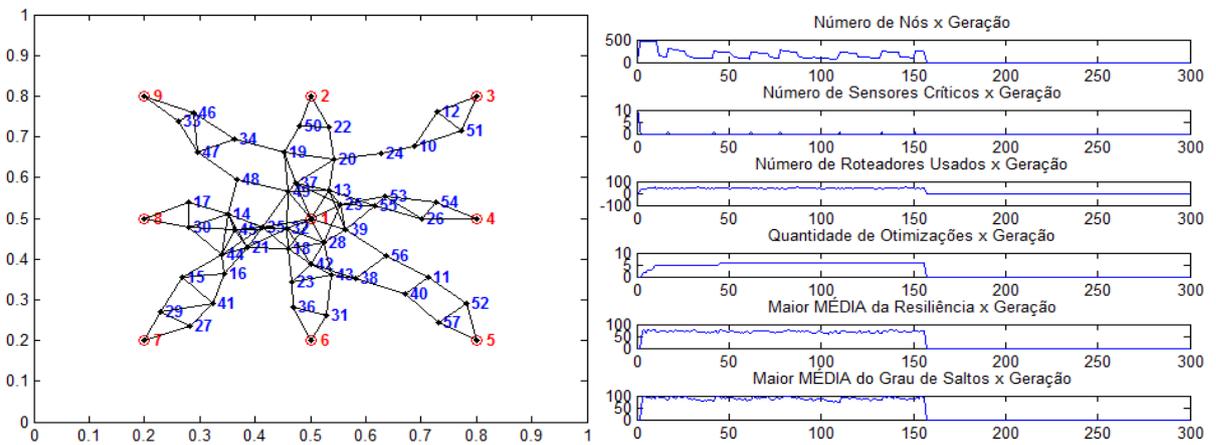


Figura 34 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 3 - Steiner

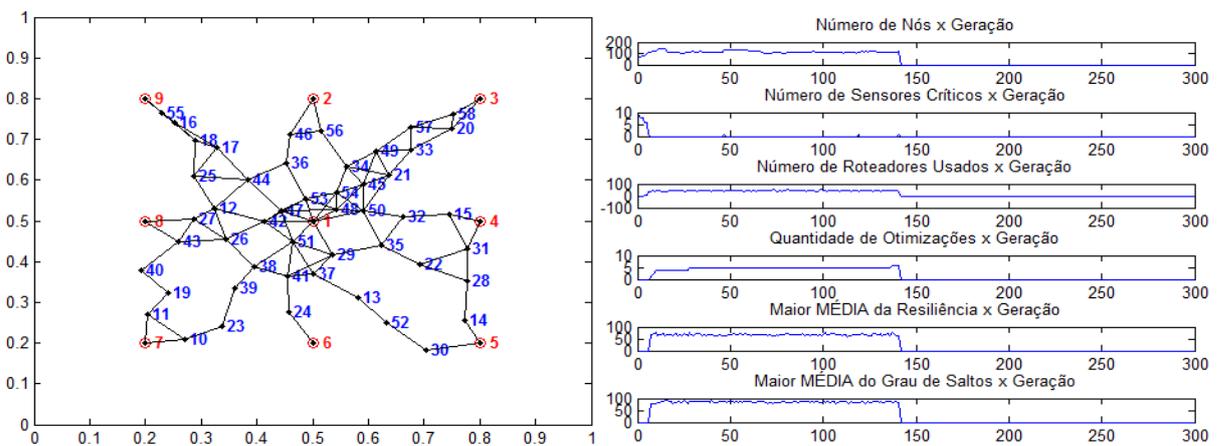


Figura 35 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 4 - Destilação

### 4.3 Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Disjuntos (Arestas)

Dentre os 96 estudos de caso que se encontram nas tabelas do Apêndice C, foram escolhidos para análise os que possuem as seguintes características: Raios de Alcance igual a 0,1; Inicialização Aleatória; Caminhos Disjuntos Arestas. Desta forma, foram selecionados os Estudos de Caso 5, 6, 7 e 8 da Tabela 9 do Apêndice C, que correspondem aos Operadores de Mutação: *Clona Hyper*, *CondiçãoNET*, *Steiner* e *Destilação*. Todas as tabelas, que apresentam os Estudos de Caso, possuem os melhores resultados destacados na cor azul.

Tabela 6 - Resultados dos Estudos de Casos - de 5 a 8

	Cenário : POS B											
	Kpath : 2											
	Raio de Alcance : 0,1											
	Inicialização : Aleatório											
Caminhos : Disjuntos ARESTAS												
	POSIMNET				POSIMNET-R							
	Grau de Tolerância a Falhas				Probabilidade de Falhas (via Teorema de MinCut)							
	ClonaHyper		CondiçãoNET		ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
	CASO_05	CASO_06	CASO_05	CASO_06	CASO_05	CASO_06	CASO_05	CASO_06	CASO_07	CASO_08	CASO_07	CASO_08
	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
Número de Nós	60	2	60	2	58	2	56	2	62	1	64	2
Número de Roteadores Usados	51	2	51	2	49	2	47	2	53	1	55	2
Número de Sensores Críticos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo Grau de Falha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de Roteadores com Máximo Grau de Falhas	9	12	11	12	6	8	5	5	19	15	10	13
Tamanho máximo dos Caminhos	9	1	10	2	9	1	9	1	6	0	7	1
Número de Nós com Tamanho máximo	1	1	2	2	1	0	2	1	3	1	2	1
Número máximo de vezes que o Roteador é usado	6	1	5	1	5	1	5	1	3	1	3	1
Número de Roteadores que são mais usados	2	1	2	1	2	1	2	1	3	3	2	2
Grau de Hops médio dos Roteadores usados	63,56	5,36	62,04	3,48	68,74	6,74	69,53	4,27	93,38	2,17	81,37	4,02
Probabilidade de Falhas (MinCut) média dos Roteadores usados	26,48	6,18	25,02	5,08	16,14	2,27	15,49	1,76	13,43	0,84	14,82	1,00
Resiliência média dos Roteadores usados	73,02	6,36	74,51	5,27	83,68	2,32	84,29	1,81	86,50	0,86	85,09	1,02
Melhor Geração	173	52	167	87	163	94	147	63	132	93	189	77
Geração da Primeira Convergência	40	13	39	9	34	9	35	9	3	0	12	3
Tempo da Primeira Convergência (segundos)	4,65	2,00	4,44	2,57	39,61	91,43	15,49	31,62	2,69	3,09	3,16	2,07
Média do Número de HOPS de todos os Sensores	6,24	0,40	6,44	0,46	5,91	0,43	5,88	0,32	4,68	0,07	5,21	0,14
Número de Experimentos que não convergiram	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nesta simulação o objetivo para o POSIMNET-R é obter 4 redes com 2 caminhos disjuntos de Arestas para cada sensor transmitir os dados monitorados para o nó central, com raio de alcance de 0,1 no cenário POSB. Para tal, cada uma das 4 redes foi desenvolvida a partir dos 4 operadores *Clona Hyper*, *Condição NET*, *Steiner* e *Destilação*. A função Afinidade tratou apenas a probabilidade de Falhas dos nós roteadores, portanto com peso 1 para este objetivo, avaliando as redes através do teorema MinCut. Após a realização de 10 experimentos, a melhor configuração de rede resiliente que se obteve para cada um dos operadores de mutação se encontram demonstradas da Figura 37 à Figura 40, cujos resultados são consolidados na Tabela 5.

O gráfico demonstrado na Figura 36 apresenta a Resiliência obtida pelos operadores

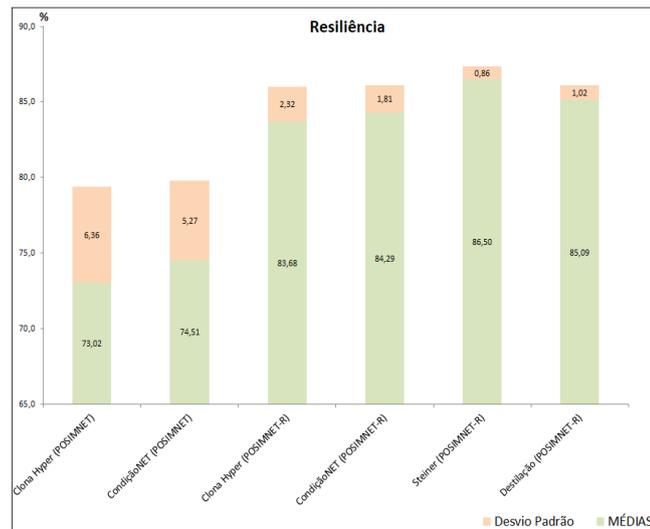


Figura 36 - Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 5 a 8

de mutação e, correspondem a média e o desvio padrão de 10 experimentos, apresentados na Tabela 6, onde também se observa que, a maior quantidade de pontos positivos em destaque na cor azul, vieram do operador de mutação *Steiner*, dentre os quais pode-se destacar: (i) Menor probabilidade de falhas, de 13,43%; (ii) Maior avaliação quanto ao Grau de *hops*, de 93,38%; (iii) Menor tamanho máximo dos caminhos, de 6 *hops*; (iv) Menor geração na obtenção da Primeira Convergência, de 6; (v) Menor tempo obtido para a primeira convergência, de 2,69 s. (vi) Menor Média do Número de *hops* entre todos os sensores, de 4,68 *hops*, para a informação chegar ao nó central. (vii) no trace da Figura 39 observa-se boa estabilidade pelo baixo desvio padrão quanto à maior média da resiliência e do Grau de *hops*, bem como boa recuperação, a partir do surgimento de Sensores críticos. Como ponto negativo, observa-se um alto número de roteadores adicionados, 53 roteadores, perdendo para o operador de mutação Condição NET, que utilizou 47 roteadores.

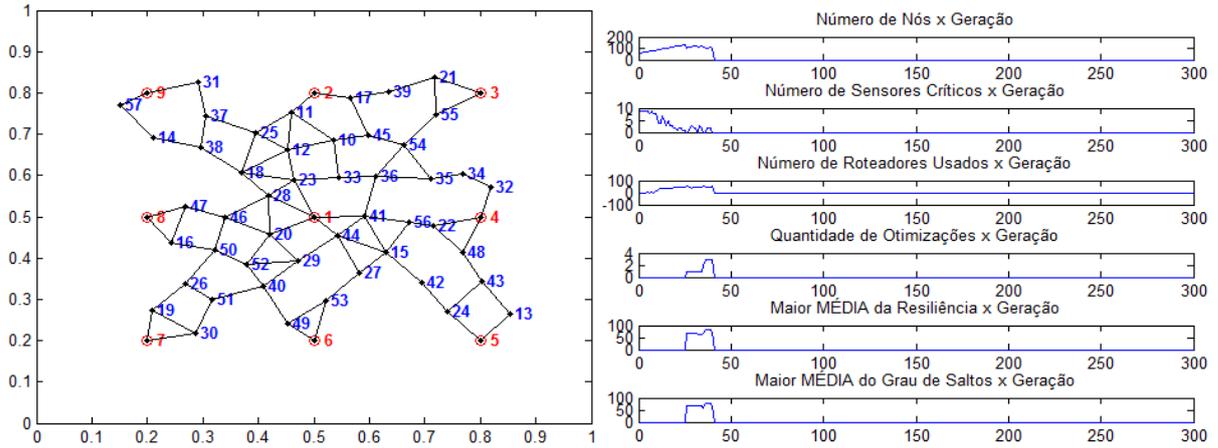


Figura 37 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 5 - *Clona Hyper*

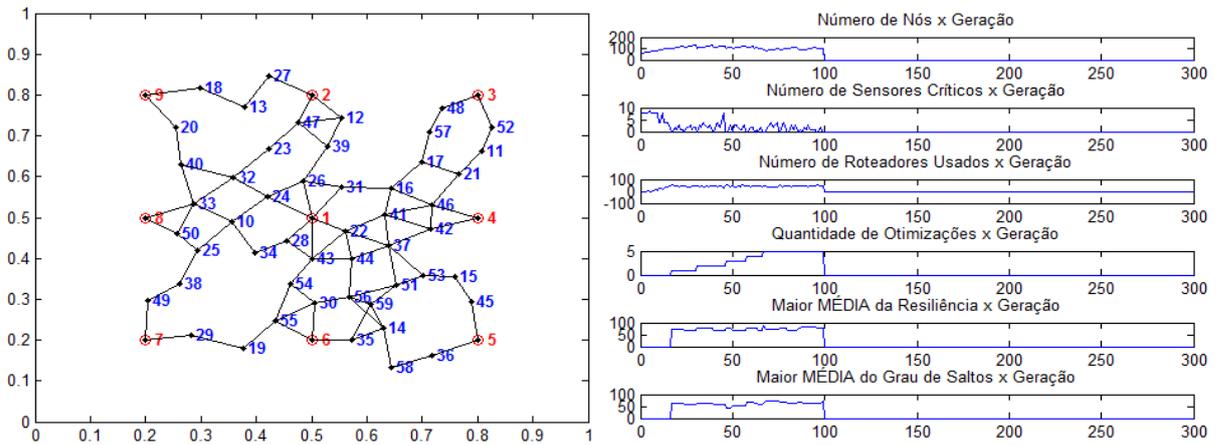


Figura 38 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 6 - Condição NET

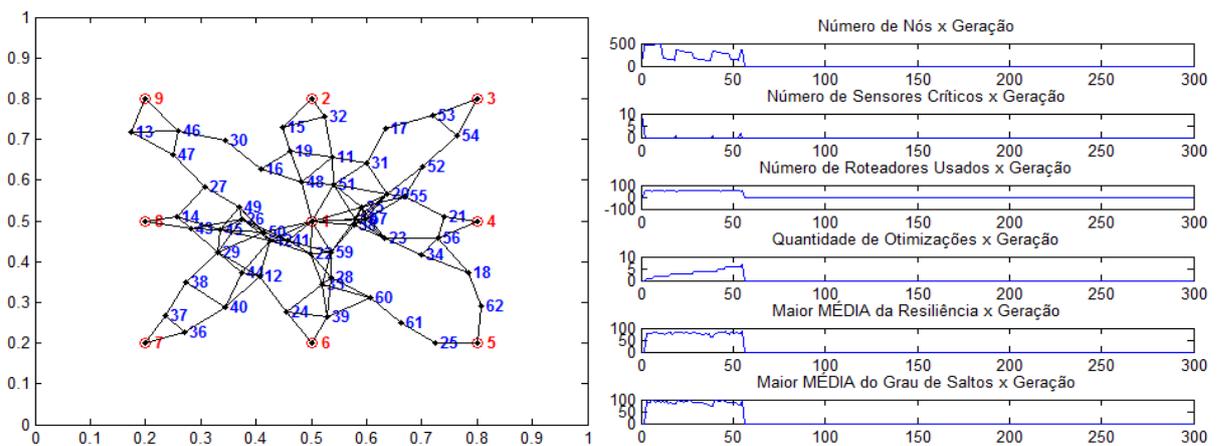


Figura 39 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 7 - *Steiner*

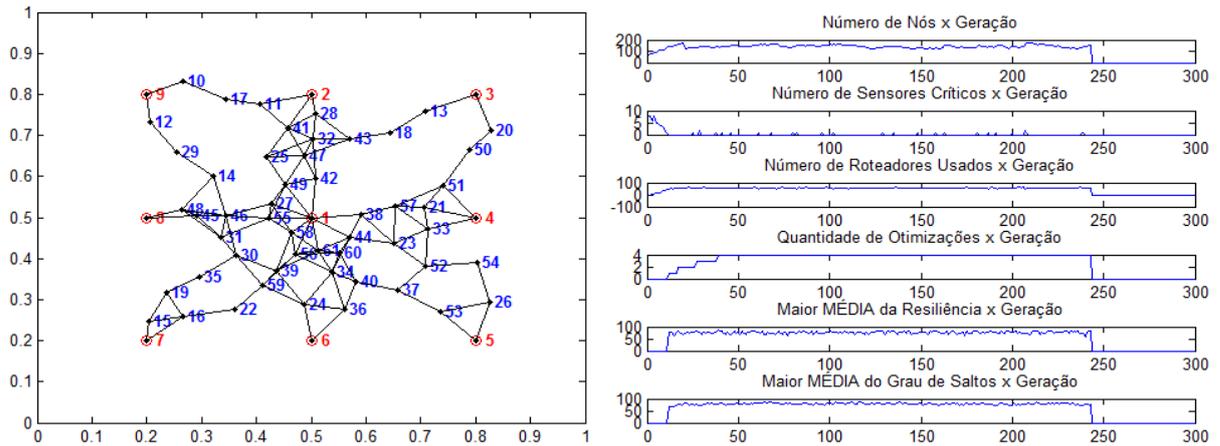


Figura 40 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 8 - Destilação

#### 4.4 Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Disjuntos (Arestas e Nós parciais)

Dentre os 96 estudos de caso que se encontram nas tabelas do Apêndice C, foram escolhidos para análise os que possuem as seguintes características: Raios de Alcance igual a 0,1; Inicialização Aleatória; Caminhos Disjuntos (Arestas e Nós parciais). Desta forma, foram selecionados os Estudos de Caso 9, 10, 11 e 12 da Tabela 9 do Apêndice C, que correspondem aos Operadores de Mutação: *Clona Hyper*, *CondiçãoNET*, *Steiner* e *Destilação*. Todas as tabelas, que apresentam os Estudos de Caso, possuem os melhores resultados destacados na cor azul.

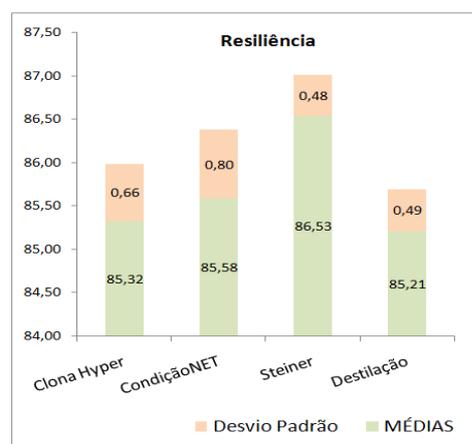


Figura 41 - Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 9 a 12

Tabela 7 - Resultados dos Estudos de Casos - de 9 a 12

	Cenário :POS B Kpath : 2 Raio de Alcance : 0,1 Inicialização : Aleatório Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais									
	POSIMNET-R									
	Probabilidade de Falhas (via Teorema de MinCut)									
	ClonaHyper CASO_09		CondiçãoNET CASO_10		Steiner CASO_11		Destilação CASO_12			
	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
Número de Nós	57	4	58	3	63	2	66	2		
Número de Roteadores Usados	48	4	49	3	54	2	57	2		
Número de Sensores Críticos	0	0	0	0	0	0	0	0		
Máximo Grau de Falha	0	0	0	0	0	0	0	0		
Número de Roteadores com Máximo Grau de Falhas	3	3	6	8	17	16	3	3		
Tamanho máximo dos Caminhos	9	1	9	1	6	0	7	0		
Número de Nós com Tamanho máximo	2	1	2	1	3	1	2	1		
Número máximo de vezes que o Roteador é usado	5	1	5	1	2	0	3	1		
Número de Roteadores que são mais usados	2	1	2	2	4	2	5	4		
Grau de Hops médio dos Roteadores usados	65,76	3,56	66,37	3,64	94,17	3,57	81,17	3,51		
Probabilidade de Falhas (MinCut) média dos Roteadores usados	14,57	0,65	14,27	0,83	13,40	0,48	14,72	0,47		
Resiliência média dos Roteadores usados	85,32	0,66	85,58	0,80	86,53	0,48	85,21	0,49		
Melhor Geração	139	99	177	75	145	98	152	82		
Geração da Primeira Convergência	40	7	37	10	3	0	12	2		
Tempo da Primeira Convergência (segundos)	11,76	11,63	15,07	28,99	2,90	0,40	5,94	4,51		
Média do Número de HOPS de todos os Sensores	6,02	0,23	6,03	0,28	4,68	0,12	5,22	0,15		
Número de Experimentos que não convergiram	0	0	0	0	0	0	0	0		

Nesta simulação o objetivo para o POSIMNET-R é obter 4 redes com 2 caminhos disjuntos de Arestas e Nós parciais para cada sensor transmitir os dados monitorados para o nó central, com raio de alcance de 0,1 no cenário POSB. Para tal, cada uma das 4 redes foi desenvolvida a partir dos 4 operadores *Clona Hyper*, *Condição NET*, *Steiner* e *Destilação*. A função Afinidade tratou apenas a probabilidade de Falhas dos nós roteadores, portanto com peso 1 para este objetivo, avaliando as redes através do teorema MinCut. Após a realização de 10 experimentos, a melhor configuração de rede resiliente que se obteve para cada um dos operadores de mutação se encontram demonstradas da Figura 42 à Figura 45, cujos resultados são consolidados na Tabela 7.

O gráfico demonstrado na Figura 41 apresenta a Resiliência obtida pelos operadores de mutação e, correspondem a média e o desvio padrão de 10 experimentos, apresentados na Tabela 7, onde também se observa que, a maior quantidade de pontos positivos em destaque na cor azul, vieram do operador de mutação *Steiner*, dentre os quais pode-se destacar: (i) Menor probabilidade de falhas, de 13,43%; (ii) Maior avaliação quanto ao Grau de hops, de 94,17%; (iii) Menor tamanho máximo dos caminhos, de 6 hops; (iv) Menor geração na obtenção da Primeira Convergência, de 3; (v) Menor tempo obtido para a primeira convergência, de 2,9 s. (vi) Menor Média do Número de hops entre todos os sensores, de 4,68 hops, para a informação chegar ao nó central. (vii) no trace da Figura 44 observa-se boa estabilidade pelo baixo desvio padrão quanto à maior média da resiliência

e do Grau de *hops*, bem como boa recuperação, a partir do surgimento de Sensores críticos. Como ponto negativo, observa-se um alto número de roteadores adicionados, 54 roteadores, perdendo para o operador de mutação *Clona Hyper*, que utilizou 48 roteadores.

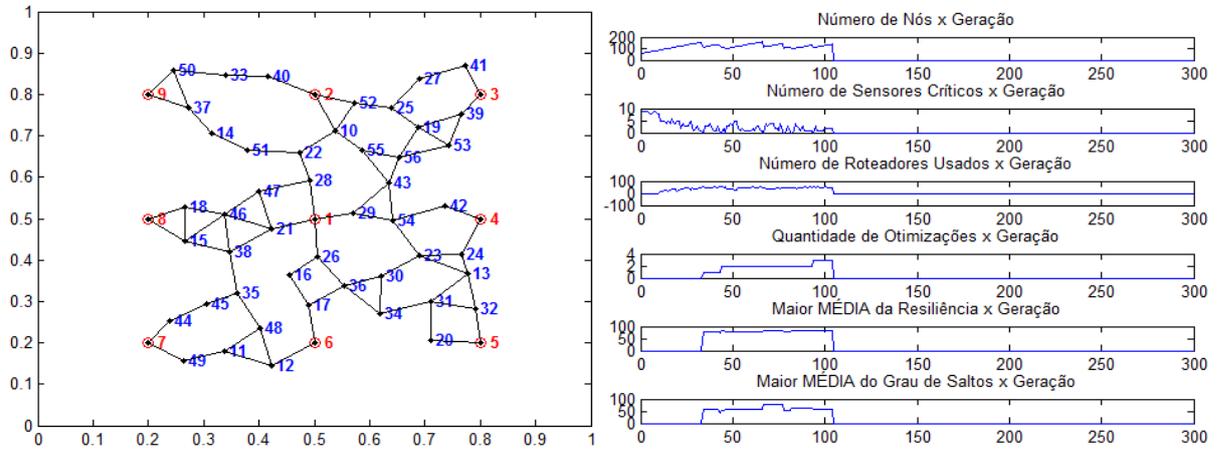


Figura 42 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 9 - *Clona Hyper*

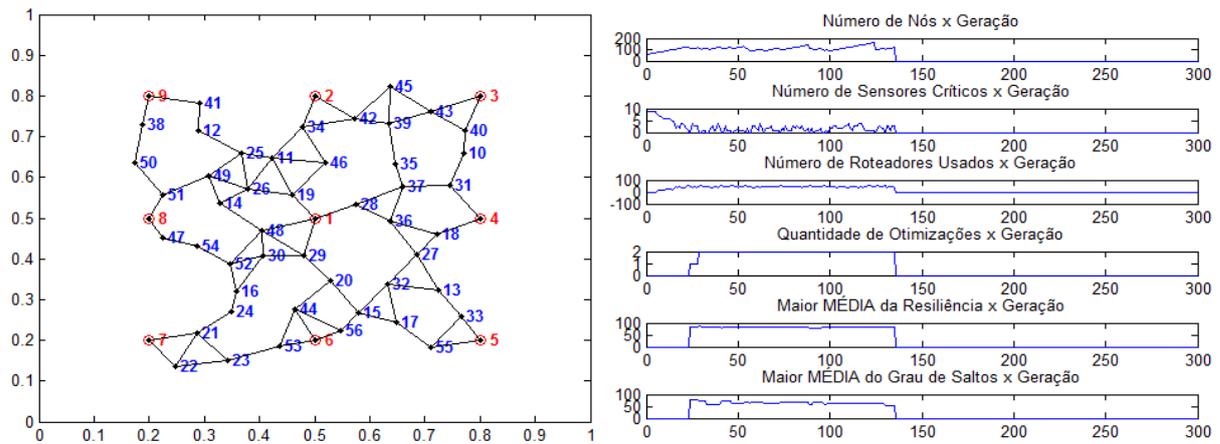


Figura 43 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 10 - Condição NET

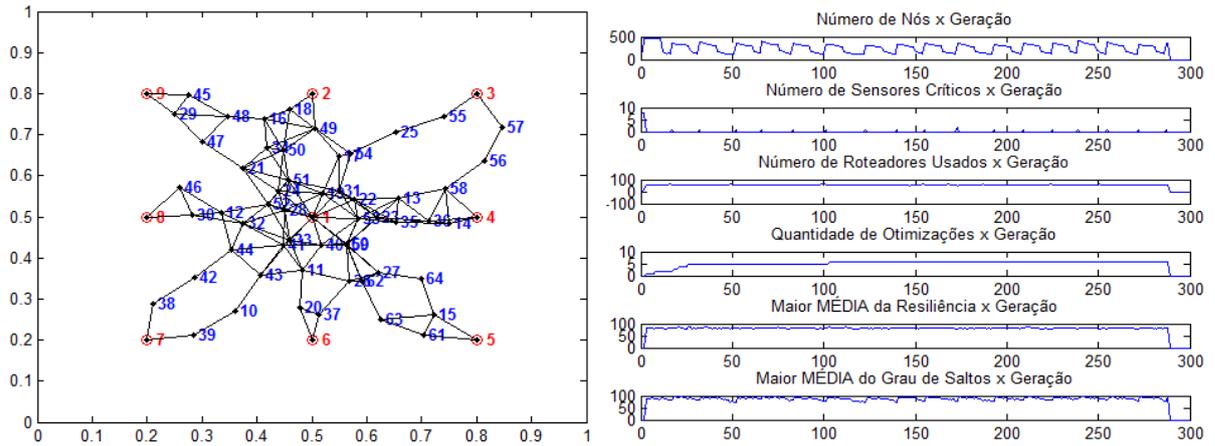


Figura 44 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 11 - *Steiner*

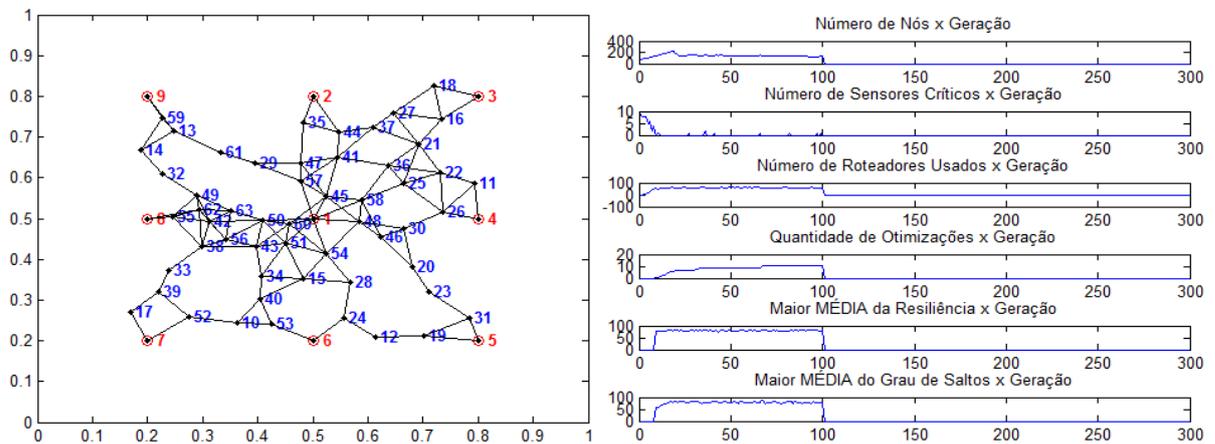


Figura 45 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 12 - *Destilação*

#### 4.5 Estudo de Casos para o cenário POSB - Caminhos Disjuntos (Arestas e Nós totais)

Dentre os 96 estudos de caso que se encontram nas tabelas do Apêndice C, foram escolhidos para análise os que possuem as seguintes características: Raios de Alcance igual a 0,1; Inicialização Aleatória; Caminhos Disjuntos (arestas e nós totais). Desta forma, foram selecionados os Estudos de Caso 13, 14, 15 e 16 da Tabela 10 do Apêndice C, que correspondem aos Operadores de Mutação: *Clona Hyper*, *Condição NET*, *Steiner* e *Destilação*. Todas as tabelas, que apresentam os Estudos de Caso, possuem os melhores resultados destacados na cor azul.

Tabela 8 - Resultados dos Estudos de Casos - de 13 a 16

	Cenário : POS B Kpath : 2 Raio de Alcance : 0,1 Inicialização : Aleatório Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
	POSIMNET-R Probabilidade de Falhas (via Teorema de MinCut)							
	ClonaHyper CASO_13		CondiçãoNET CASO_14		Steiner CASO_15		Destilação CASO_16	
	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
Número de Nós	75	4	75	3	67	1	72	2
Número de Roteadores Usados	66	4	66	3	58	1	63	2
Número de Sensores Críticos	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo Grau de Falha	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de Roteadores com Máximo Grau de Falhas	10	13	9	10	11	10	9	14
Tamanho máximo dos Caminhos	8	2	7	1	6	0	7	1
Número de Nós com Tamanho máximo	2	1	2	1	2	1	2	1
Número máximo de vezes que o Roteador é usado	1	0	1	0	1	0	1	0
Número de Roteadores que são mais usados	66	4	66	3	58	1	63	2
Grau de Hops médio dos Roteadores usados	82,78	5,11	83,50	3,78	95,30	2,83	86,67	3,75
Probabilidade de Falhas (MinCut) média dos Roteadores usados	18,79	1,89	18,00	1,27	13,41	0,50	15,02	0,80
<b>Resiliência média dos Roteadores usados</b>	<b>81,09</b>	<b>1,91</b>	<b>81,92</b>	<b>1,29</b>	<b>86,56</b>	<b>0,51</b>	<b>84,91</b>	<b>0,81</b>
Melhor Geração	162	11	189	59	130	55	155	66
Geração da Primeira Convergência	162	11	161	7	3	0	45	9
Tempo da Primeira Convergência (segundos)	14,83	2,38	15,06	1,86	3,19	0,87	4,71	1,08
Média do Número de HOPS de todos os Sensores	5,12	0,22	5,10	0,20	4,64	0,08	4,96	0,15
Número de Experimentos que não convergiram	0	0	0	0	0	0	0	0

Nesta simulação o objetivo para o POSIMNET-R é obter 4 redes com 2 caminhos disjuntos (de aresta e nós totais) para cada sensor transmitir os dados monitorados para o nó central, com raio de alcance de 0,1 no cenário POSB. Para tal, cada uma das 4 redes foi desenvolvida a partir dos 4 operadores *Clona Hyper*, *Condição NET*, *Steiner* e *Destilação*. A função Afinidade tratou apenas a probabilidade de Falhas dos nós roteadores, portanto com peso 1 para este objetivo, avaliando as redes através do teorema MinCut. Após a realização de 10 experimentos, a melhor configuração de rede resiliente que se obteve para cada um dos operadores de mutação se encontram demonstradas da Figura 47 à Figura

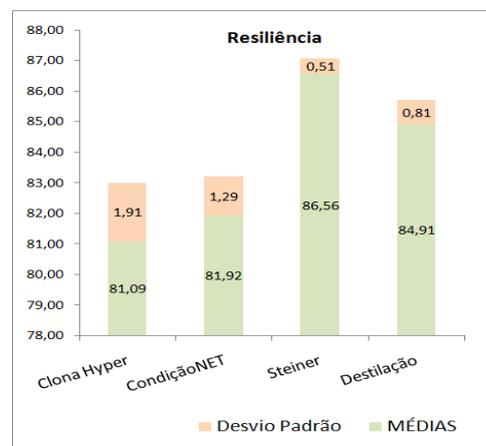


Figura 46 - Representação Gráfica da Resiliência dos Estudos de Casos - de 13 a 16

50, cujos resultados são consolidados na Tabela 8.

O gráfico demonstrado na Figura 46 apresenta a Resiliência obtida pelos operadores de mutação e, correspondem a média e o desvio padrão de 10 experimentos, apresentados na Tabela 8, onde também se observa que, a maior quantidade de pontos positivos em destaque na cor azul, vieram do operador de mutação *Steiner*, dentre os quais pode-se destacar: (i) Menor probabilidade de falhas, de 13,41%; (ii) Maior avaliação quanto ao Grau de *hops*, de 95,3%; (iii) Menor tamanho máximo dos caminhos, de 6 *hops*; (iv) Menor geração na obtenção da Primeira Convergência, de 3,3; (v) Menor tempo obtido para a primeira convergência, de 3,19 s. (vi) Menor Média do Número de *hops* entre todos os sensores, de 4,64 *hops*, para a informação chegar ao nó central. (vii) no trace da Figura 45 observa-se boa estabilidade pelo baixo desvio padrão quanto à maior média da resiliência e do Grau de *hops*, bem como boa recuperação, a partir do surgimento de Sensores críticos. (viii) Menor número de roteadores adicionados, 58 roteadores.

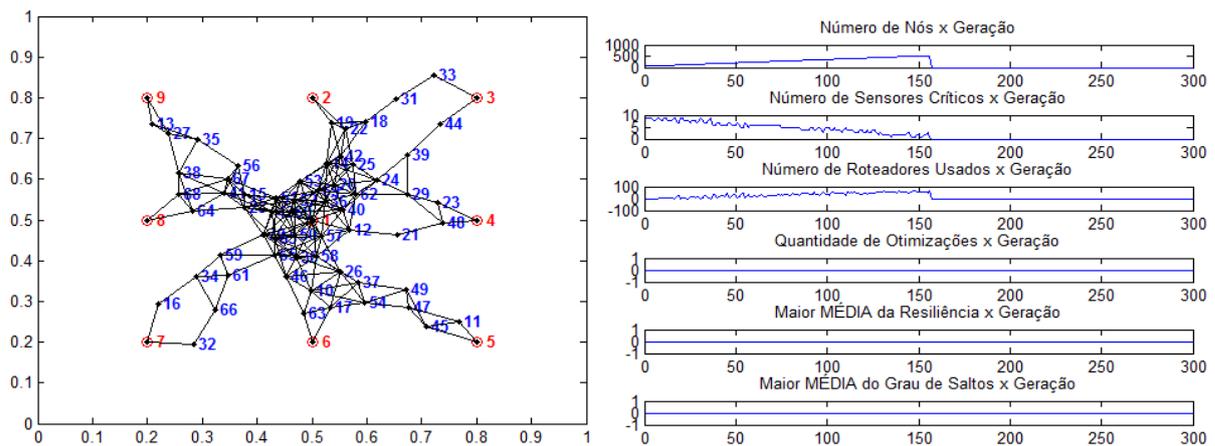


Figura 47 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 13 - *Clona Hyper*

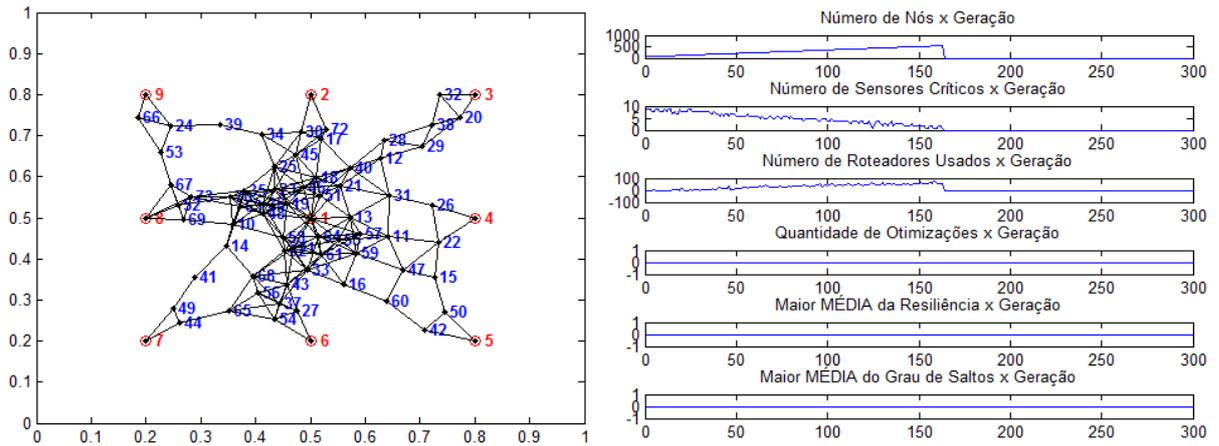


Figura 48 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 14 - Condição NET

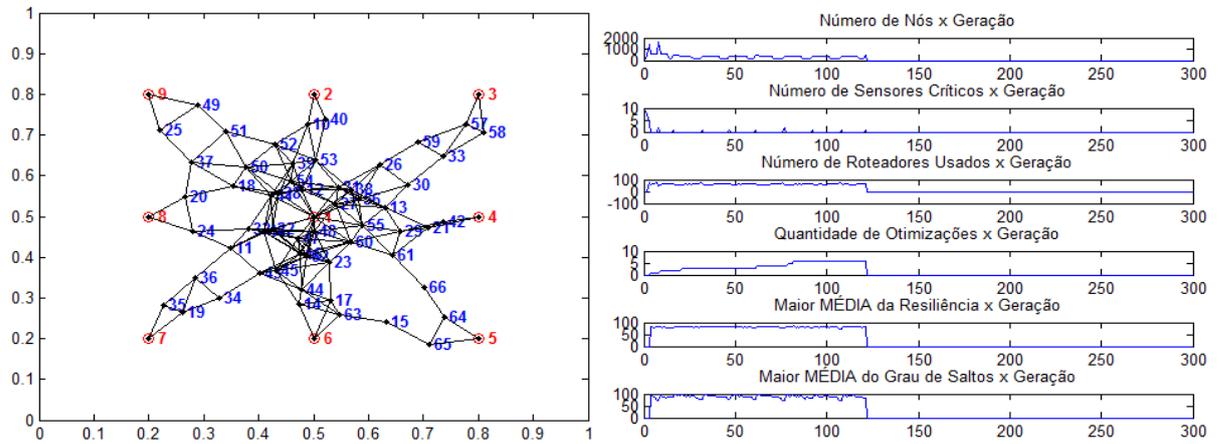


Figura 49 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 15 - Steiner

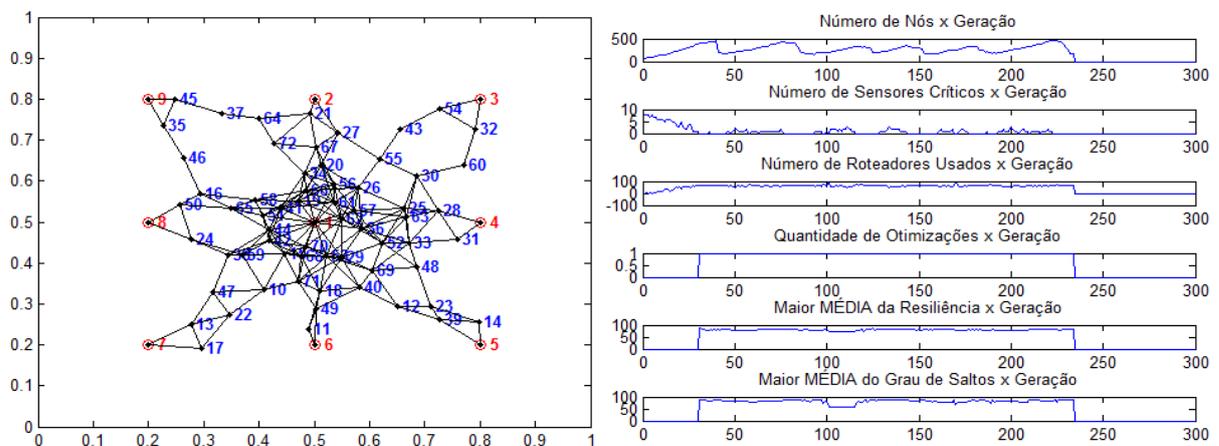


Figura 50 - Rede e o Trace do Estudo de Caso 16 - Destilação

## 4.6 Estudo da Aceleração de Convergência

Nesta simulação o objetivo para o POSIMNET-R é avaliar o tempo da primeira convergência, ou seja, em quanto tempo a rede se apresenta conectada. Foram realizados 10 experimentos para cada caso, que se encontram no Apêndice D e observa-se que a Inicialização pelo método *QuadTree* foi mais eficiente na maioria dos casos, sobretudo para as redes cujo Raio de alcance é igual a 0,2. A segunda melhor inicialização foi a que aplicou o método SOBOL. A seguir, o número de vezes que cada Inicialização convergiu mais rápido: *QuadTree*=19; SOBOL = 8 e o Aleatório = 2.

Um outro aspecto observado foi a condição de contorno que a inicialização *QuadTree* oferece para os casos em que há obstáculos. Utilizou-se o *QuadTree* para contornar os obstáculos existentes na planta, foi atribuído um ponto no espaço para cada situação em que no caminho havia uma suposta necessidade de contorno. Por exemplo, para os Tanques, foi atribuído um ponto no centro do círculo. E, para os prédios foi atribuído um ponto para cada vértice do polígono. Na Figura 51, verifica-se em (a) A foto da refinaria do Texas extraída do “*Google Earth*”; (b) Inicialização via *QuadTree*; (c) A primeira geração com 4 sensores críticos, ou seja, não totalmente conectados e em (d) Uma rede formada na segunda geração, utilizando o operador *Steiner*, que foi abordado no item 3.4.5.1.

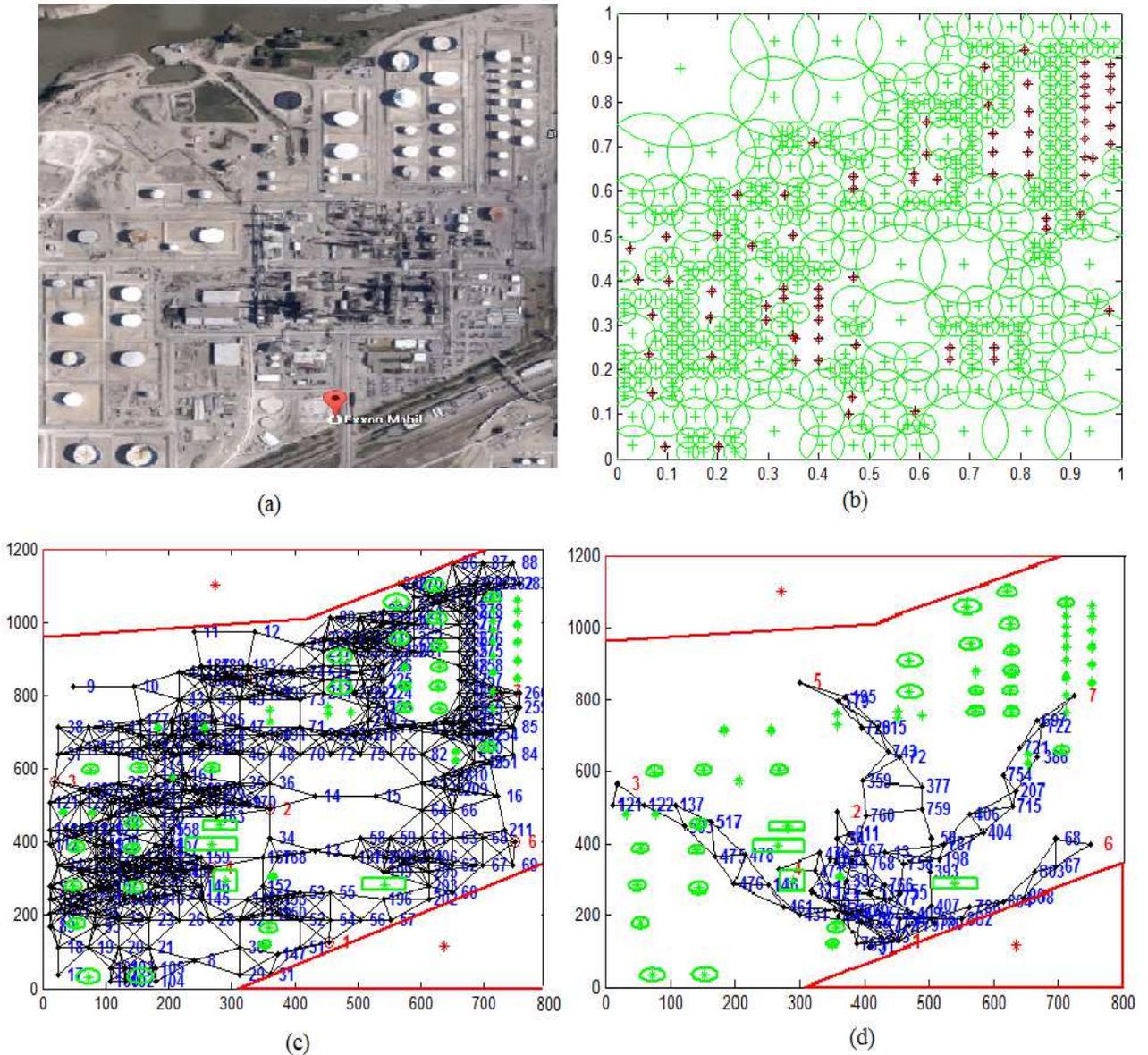


Figura 51 - (a): Foto da refinaria do Texas extraída do “*Google Earth*”; (b): Inicialização através do *QuadTree*; (c): primeira geração com 4 sensores e (d): uma rede totalmente conectada, a partir da segunda geração

#### 4.7 Casos reais

A partir dos 96 estudos de caso apresentados no Apêndice C, foi selecionada uma configuração de parâmetros mais complexa e que obteve bons resultados para o cenário POSB, para desenvolver um projeto de rede para a Refinaria do Texas, visto na Figura

52. Para essa rede, foram utilizados 66 roteadores a fim de comunicar as informações de processo dos 6 sensores (do nó 2 ao 7) para o nó central (nó 1). Os sensores e o nó central se encontram na cor vermelho e, os roteadores na cor azul. A probabilidade de falha mínima obtida para essa rede foi de 26,15%, adotando 2 caminhos disjuntos de arestas e nós totais.

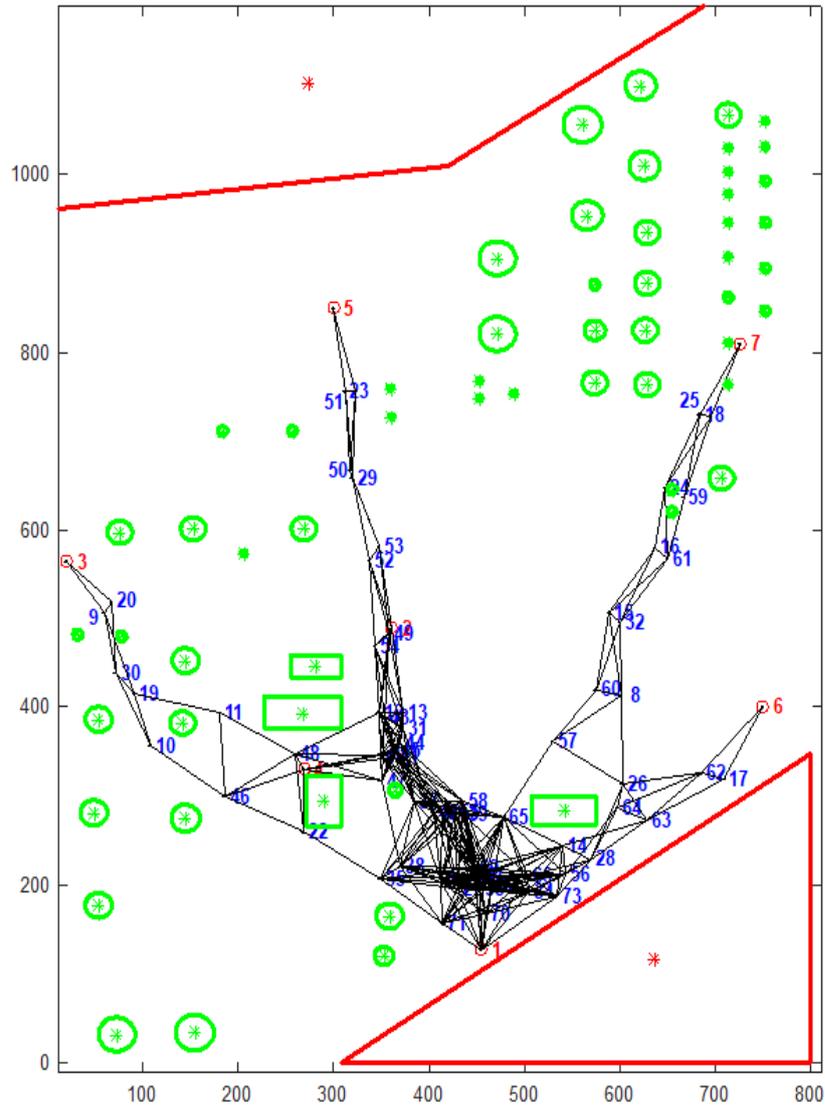


Figura 52 - Resultado do POSIMNET-R para a Refinaria do TEXAS

Da mesma forma, foi utilizada a configuração do POSB supracitada, para desenvolver um projeto de rede para a Refinaria de New Jersey, visto na Figura 53. Para essa rede, foram utilizados 19 roteadores a fim de comunicar as informações de processo dos 3 sensores (do nó 2 ao 4) para o nó central (nó 1). Os sensores e o nó central se encontram na cor vermelho e, os roteadores na cor azul. A probabilidade de falha mínima obtida

para essa rede foi de 14,19%, adotando 2 caminhos disjuntos de arestas e nós totais.

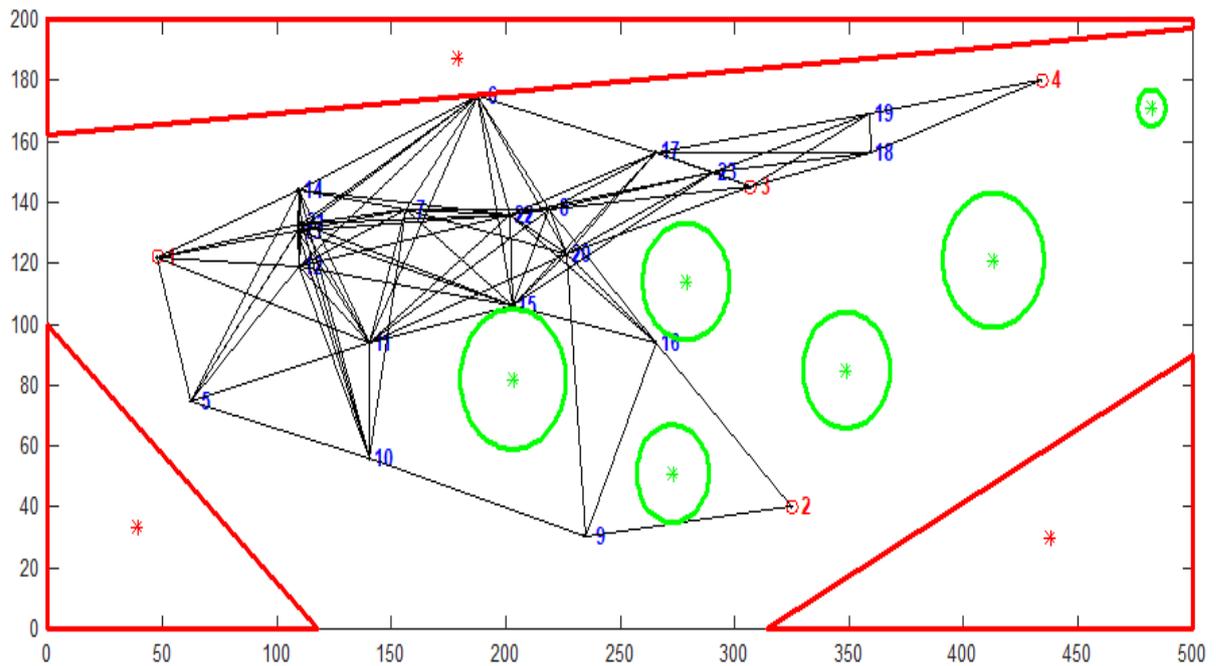


Figura 53 - Resultado do POSIMNET-R para a Refinaria de New Jersey

#### 4.8 Estudo de Múltiplas falhas aleatórias e independentes

Dos estudos de caso, que se encontram no Apêndice C, foi selecionada a melhor rede produzida dentre os 10 experimentos do Caso 2 do POSIMNET e do Caso 2 do POSIMNET-R. Esses estudos de caso se basearam em uma Avaliação do Grau de Falha do POSIMNET e da Probabilidade de Falhas do POSIMNET-R, produzidas a partir do operador de mutação Condição NET.

Para cada uma das duas redes selecionadas, foram realizadas 30 experimentos para realizar a Análise de Múltiplas Falhas simuladas de forma aleatória e independente e os resultados estão demonstrados na Figura 54 e na Figura 55.

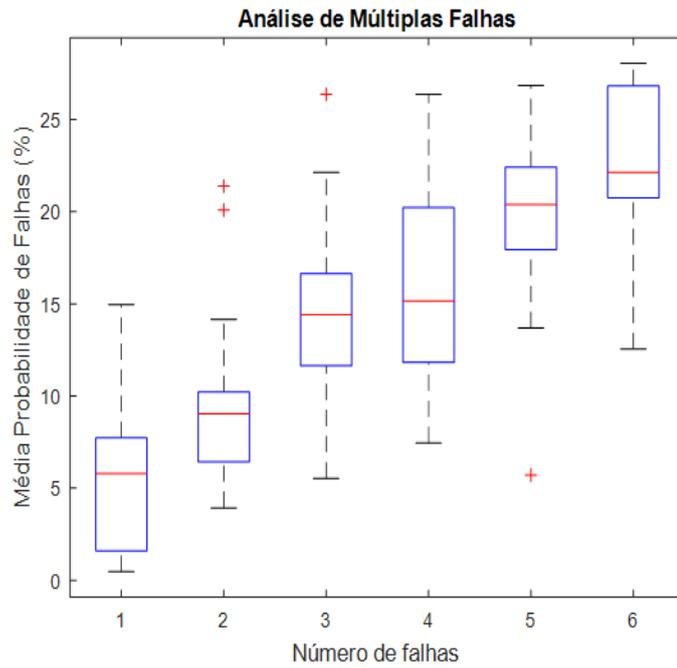


Figura 54 - Caso 02 do POSIMNET (Condição NET), caminhos Quaisquer

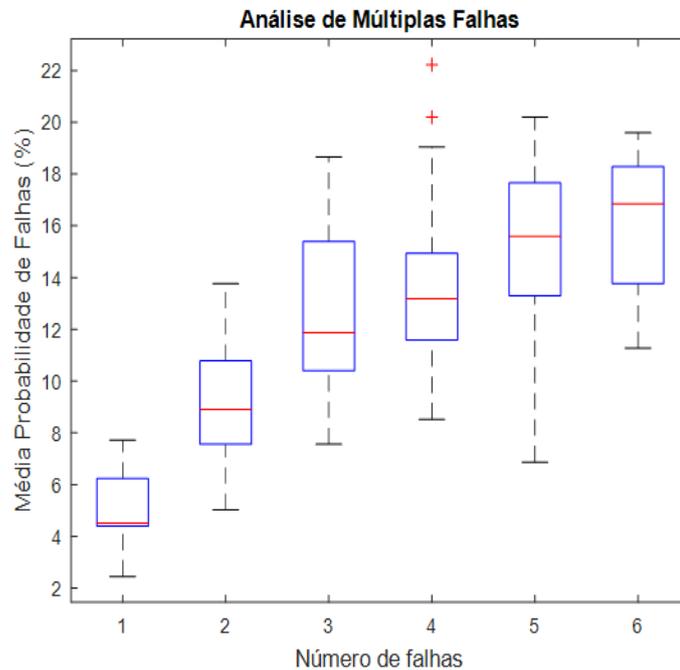


Figura 55 - Caso 02 do POSIMNET-R (Condição NET), caminhos Quaisquer

A Figura 56 apresenta o resultado da média dos 30 experimentos, a fim de realizar uma análise de Múltiplas Falhas simuladas de forma aleatória e independente de quatro

redes produzidas pelos operadores de mutação *Clona Hyper*, *Condição NET*, *Steiner* e *Destilação*. Como se pode observar, o operador *Steiner* obteve redes mais resilientes.

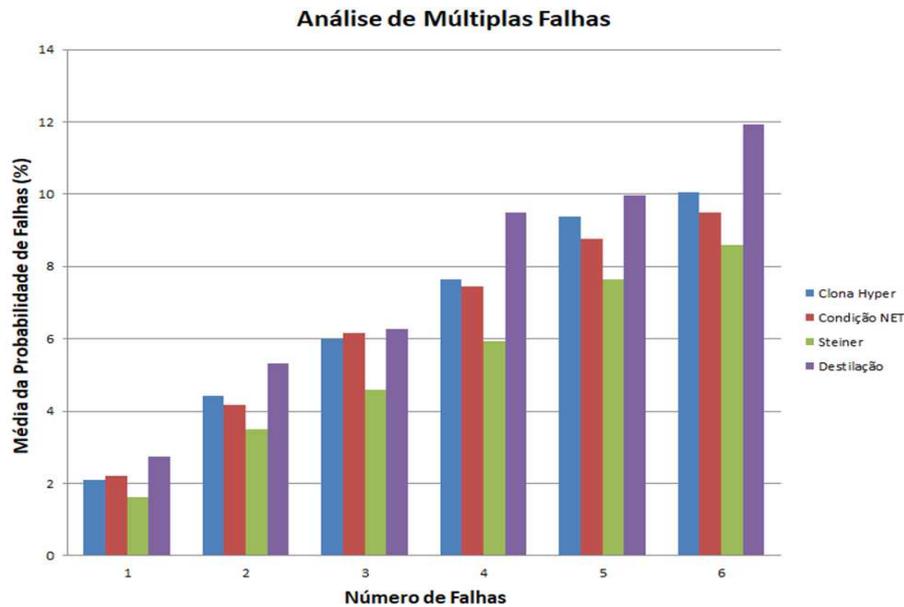


Figura 56 - Análise de Múltiplas Falhas dos Estudos de casos 13, 14, 15 e 16 do Apêndice C

A Figura 57 apresenta o resultado da média dos 30 experimentos para realizar uma análise de Múltiplas Falhas simuladas de forma aleatória e independente de três redes. Uma delas, com a barra na cor azul, refere-se à melhor rede obtida pelo POSIMNET e foi desenvolvida pelo operador de mutação “Condição NET” aplicando caminhos Disjuntos de Arestas. As demais, com as barras nas cores verde e vermelho, referem-se às melhores redes obtidas pelo POSIMNET-R e foram desenvolvidas pelos operadores de mutação “Condição NET” (barra verde) e “*Steiner*” (barra vermelha).

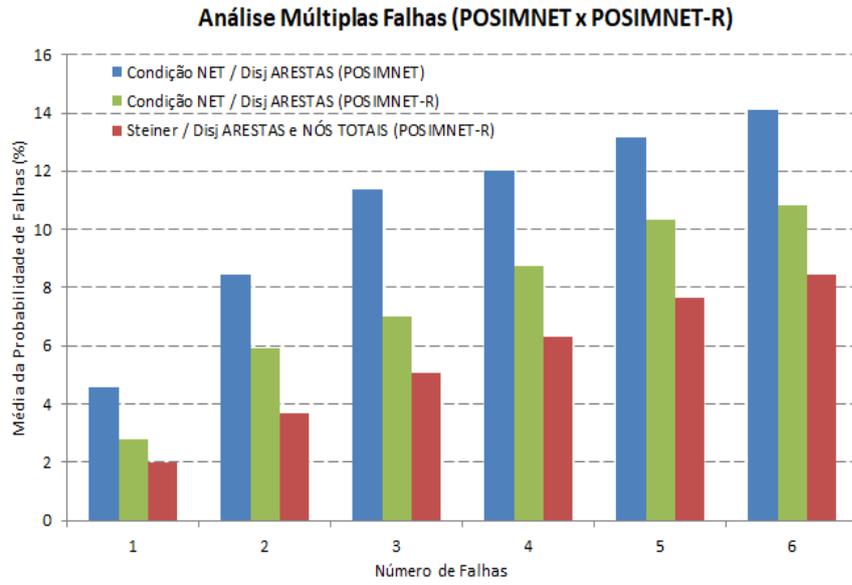


Figura 57 - Análise Múltiplas Falhas (POSIMNET x POSIMNET-R)

## CONCLUSÃO

A utilização das RSSFs na área de automação industrial já é uma realidade, consolidando a tendência prevista há alguns anos, devido as vantagens, tais como: redução de tempo de instalação de dispositivos, inexistência de estrutura de cabeamento, economia no custo de projetos, economia em infraestrutura, flexibilidade de configuração de dispositivos, economia no custo de montagem, flexibilidade na alteração de arquiteturas existentes, possibilidade de instalação de sensores em locais de difícil acesso. Nessa área, a segurança, confiabilidade, disponibilidade, robustez e desempenho da rede na realização do monitoramento e controle do processo, face ao advento da Indústria 4.0, são extremamente primordiais, para que não haja qualquer tipo de acidente. Por esse motivo, os nós roteadores de uma RSSF têm que ser muito bem posicionados para que as informações enviadas pelos nós sensores tenham caminhos redundantes para chegarem ao nó central.

### Resultados obtidos:

Neste trabalho, foram desenvolvidos novos recursos e ampliados alguns que já existiam no POSIMNET, realizando assim um *upgrade* na ferramenta de apoio à projetos de RSSFs, que busca posicionar os nós roteadores na rede. A nova ferramenta, denominada como POSIMNET-R propõe criar redes resilientes, aumentando a Qualidade de Serviços, de forma a minimizar o número de saltos e a probabilidade de falhas da rede, criando caminhos redundantes para que os dados coletados pelos sensores sejam enviados de/para o nó central através de dois ou mais caminhos quaisquer ou disjuntos (de arestas e de nós).

O algoritmo, conforme seu predecessor, continua permitindo que cada critério seja habilitado por vez ou que eles sejam combinados com pesos iguais ou diferentes para cada um, porém a partir da análise de resultados foram desenvolvidas redes resilientes e por isso, a afinidade foi estimulada a partir do cálculo da Probabilidade Falhas, utilizando como ferramenta de avaliação da rede, o teorema de MinCut da Teoria de Grafos.

Nos estudos de casos apresentados no Capítulo 4, se pode constatar que a ferramenta POSIMNET-R foi capaz de analisar quatro tipos de operadores de mutação (*Clona Hyper*, Condição NET, *Steiner* e Destilação), a partir do critério de avaliação da probabilidade de falhas, utilizando o cenário POSB como plataforma de teste. Foram realizados

96 estudos de caso, conforme demonstrado no Apêndice C, utilizando como meta obter uma rede redundante de 2 caminhos, com raio de alcance de 0,1 e 0,2 entre os elementos da rede.

O POSIMNET-R manteve os recursos de desenvolver redes com mais de 2 caminhos para os novos operadores de mutação desenvolvidos (*Steiner* e Destilação), porém optamos por não fazer simulações com mais de 2 caminhos nesse momento por entender ser mais comum a utilização de redes com 2 caminhos redundantes.

Foram desenvolvidas duas redes para cenários reais, com a configuração mais complexa utilizada no cenário POSB e que obtiveram bons resultados, para desenvolver as redes das Refinarias do Texas e de New Jersey. Em todos os estudos de casos, as configurações de rede geradas não possuíam sensores críticos indicando que o algoritmo foi capaz de atender a especificação do número de caminhos necessários.

Também foi observado que conforme o grau de dificuldade foi aumentando, o número de roteadores adicionais foram necessariamente aumentados. Além disso, foi percebido que para se ter uma rede resiliente, as vezes paga-se um preço mais alto tendo que instalar mais roteadores e nesse caso, os projetistas terão sempre que avaliar o custo benefício a ser obtido em cada processo.

Um ganho que foi obtido com o POSIMNET-R está relacionado ao operador de mutação *Steiner*, pois reduziu ao máximo possível o número de Hops, aplicando uma das propriedades de *Steiner*. Outro fato não menos importante, está relacionado ao balanceamento de cargas, pois com o POSIMNET-R se conseguiu aplicar os caminhos disjuntos para arestas e nós (parciais e totais), trazendo grandes benefícios.

Também foram realizadas simulações com inicialização de candidatos a nó roteador, utilizando o métodos Quasi-aleatório e *Quadtree*, o que se constata uma excelente performance do *Quadtree*, pois além de garantir uma convergência mais rápida nos resultados, permitiu contornar situações de obstáculos em cenários reais.

E para finalizar, o POSIMNET-R passou a ter recurso para analisar redes, a partir de simulações de múltiplas falhas aleatórias e independentes.

### **Trabalhos Futuros:**

Para trabalhos futuros, pode-se citar:

- (i) a possibilidade do aprimoramento desta ferramenta, aumentando seus recursos

afim de ter condições de gerar e analisar redes resilientes contra ataques cibernéticos, assim como estudado por Rainger e McGettrick (2017) onde se abordou inúmeros tipos de grafos com o objetivo de agrupamento de subgrafos (páginas 54 e 55). Também é apresentada uma análise de perturbação da rede FRC (*Fibroblastic Reticular Cells*) usando um ataque sequencial e simultâneo em quatro tipos de medidas de centralidade: centralidade de graus (*DC-Degree Centrality*), centralidade de interação (*BC-Betweenness Centrality*), centralidade de proximidade (*CC-Closeness Centrality*) e centralidade do autovetor (*EC-Eigenvector Centrality*) e remoção aleatória de nó (R).

(ii) Outro possível trabalho futuro é utilizar este problema de posicionamento para testar e desenvolver algoritmos de otimização multiobjetivo, em particular algoritmos que sejam capazes de tratar um grande número de objetivos, uma vez que os algoritmos multiobjetivo tradicionais perdem desempenho quando o número de objetivos aumenta.

## REFERÊNCIAS

- BARREIRA, L. F. de A. *Determinação de posicionamento de nós roteadores em redes sem fio utilizando redes imunológicas*. 2013.
- IEC, I. 62591: Industrial communication networks - wireless communication network and communication profiles - wirelesshart. *IEC: Geneva, Switzerland*, 2009.
- BARTODZIEJ, C. J. The concept industry 4.0. In: *The Concept Industry 4.0*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 27–50.
- STERBENZ, J. P. G. et al. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, n. vol. 54 and Edition 8, p. 1245–1265, June 2010.
- ANDERSON, R. W.; NEUMANN, A. U.; PERELSON, A. S. A cayley tree immune network model with antibody dynamics. *Bulletin of mathematical biology*, Elsevier, v. 55, n. 6, p. 1091–1131, 1993.
- YOUNIS, M. et al. Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, n. 58, p. 254–283, 2014.
- CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. Artificial immune systems: Part i–basic theory and applications. *Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de, Tech. Rep*, v. 210, n. 1, 1999.
- CASTRO, L. N. de. Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais. *Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP*, 2001.
- ABBAS, A. K. *Cellular and Molecular Immunology*. 6. ed. [S.l.]: W.B. Saunders Company, 2007. ISBN 0808923587,9780808923589.
- HUNTER, G. M.; STEIGLITZ, K. Operations on images using quad trees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, n. 2, p. 145–153, 1979.
- BILMES, J. *Submodular Functions, Optimization, and Applications to Machine Learning*. 2016. Disponível em: (<http://melodi.ee.washington.edu/~bilmes>). Acesso em: 2016-11-30.
- AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. *Wireless Sensor Networks*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2010.
- LI, X. et al. A review of industrial wireless networks in the context of industry 4.0. *Wireless Networks*, n. vol. 23, p. 23–41, January 2017.
- WILLIG, A.; MATHEUS, K.; WOLISZ, A. Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 93, n. 6, p. 1130–1151, 2005.
- WILLIG, A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on industrial informatics*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 102–124, 2008.

- GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 56, n. 10, p. 4258–4265, 2009.
- HESPANHA, J. P.; NAGHSHTABRIZI, P.; XU, Y. A survey of recent results in networked control systems. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 95, n. 1, p. 138–162, 2007.
- SANTOS, S. T. dos. *Redes de Sensores Sem Fio em Monitoramento e Controle*. 2007.
- COSTA, M. S.; AMARAL, J. L. M. do. Uma ferramenta para análise do posicionamento de nós em redes sem fio aplicadas a automação industrial. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito*, p. 1521–1527, 2010.
- HOFFERT, J.; KLUES, K.; ORJIH, O. Configuring the IEEE 802.15.4 MAC Layer for Single-sink Wireless Sensor Network Applications. *Washington University in St. Louis*, 2005.
- COSTA, M. S. *Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio, aplicadas em automação industrial*. 2011.
- GOLDBERG, D. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *New York, Addison-Wesley.*, 1989.
- MICHALEWICZ, Z. Evolution strategies and other methods. In: *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. [S.l.]: Springer, 1996. p. 159–177.
- COSTA, M. S.; AMARAL, J. L. M. do. Análise de redes sem fio industriais ISA100 x WirelessHart. *Intech*, n. vol. 140, p. p. 61–67, March 2012.
- SOARES, C. A. R.; COSTA, M. S.; AMARAL, J. L. M. *A Review of Wireless Industrial Automation Standards: Main Features, Open Issues and New Trends*. [S.l.]: Nova Science Pub Inc, 2018. ISBN 9781536126051.
- SC65C, I. Iec 62734 ed1. 0: Industrial networks-wireless communication network and communication profiles-isa 100.11 a. *IEC, Oct*, 2014.
- PAS, I. Iec 62601: Industrial networks-wireless communication network and communication profiles-wia-pa. *International Electrotechnical Commission (IEC) Std*, 2015.
- RAZA, S. et al. Security considerations for the wirelesshart protocol. In: IEEE. *Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*. [S.l.], 2009. p. 1–8.
- BHATTACHARYA, A. et al. Qos constrained optimal sink and relay placement in planned wireless sensor networks. In: IEEE. *Signal Processing and Communications (SPCOM), 2014 International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 1–5.
- LEE, S.; YOUNIS, M. Qos-aware relay node placement for connecting disjoint segments in wireless sensor networks. In: IEEE. *Distributed Computing in Sensor Systems Workshops (DCOSSW), 2010 6th IEEE International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6.

- AZHARUDDIN, M.; JANA, P. K. A ga-based approach for fault tolerant relay node placement in wireless sensor networks. In: IEEE. *Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), 2015 Third International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1–6.
- GUPTA, S. K.; KUILA, P.; JANA, P. K. Genetic algorithm for k-connected relay node placement in wireless sensor networks. In: SPRINGER. *Proceedings of the Second International Conference on Computer and Communication Technologies*. [S.l.], 2016. p. 721–729.
- COELHO, P. H. G. et al. Router nodes placement using artificial immune systems for wireless sensor industrial networks. In: SPRINGER. *International Conference on Enterprise Information Systems*. [S.l.], 2016. p. 155–172.
- WANG, T. et al. Robust collaborative mesh networking with large-scale distributed wireless heterogeneous terminals in industrial cyber-physical systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 13, n. 9, p. 1550147717729640, 2017.
- LEE, S.; YOUNIS, M. Optimized relay node placement for connecting disjoint wireless sensor networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 56, n. 12, p. 2788–2804, 2012.
- WANG, L. et al. Optimal node placement in industrial wireless sensor networks using adaptive mutation probability binary particle swarm optimization algorithm. In: IEEE. *Natural Computation (ICNC), 2011 Seventh International Conference on*. [S.l.], 2011. v. 4, p. 2199–2203.
- WANG, X.; ZHANG, S. Research on efficient coverage problem of node in wireless sensor networks. In: IEEE. *Electronic Commerce and Security, 2009. ISECS'09. Second International Symposium on*. [S.l.], 2009. v. 2, p. 532–536.
- WANG, J.; MEDIDI, S.; MEDIDI, M. Energy-efficient k-coverage for wireless sensor networks with variable sensing radii. In: IEEE. *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- MO, Y. et al. A novel swarm intelligence algorithm and its application in solving wireless sensor networks coverage problems. *JNW*, v. 7, n. 12, p. 2037–2043, 2012.
- YOUSSEF, W.; YOUNIS, M. Intelligent gateways placement for reduced data latency in wireless sensor networks. In: IEEE. *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 3805–3810.
- XU, K. et al. Relay node deployment strategies in heterogeneous wireless sensor networks: single-hop communication case. In: IEEE. *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM'05. IEEE*. [S.l.], 2005. v. 1, p. 5–pp.
- BREDIN, J. L. et al. Deploying sensor networks with guaranteed capacity and fault tolerance. In: ACM. *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. [S.l.], 2005. p. 309–319.
- TOUMPIS, S.; TASSIULAS, L. Packetostatics: Deployment of massively dense sensor networks as an electrostatics problem. In: IEEE. *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint*

*Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE.* [S.l.], 2005. v. 4, p. 2290–2301.

LLOYD, E. L.; XUE, G. Relay node placement in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, IEEE, v. 56, n. 1, p. 134–138, 2007.

ZHANG, W.; XUE, G.; MISRA, S. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: Problems and algorithms. In: IEEE. *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE.* [S.l.], 2007. p. 1649–1657.

AURÉLIO. *Resiliência*. 2018. Disponível em: <https://dicionariodoaurelio.com/resiliencia>. Acesso em: 2018-01-12.

AGGELOU, G. *Wireless Mesh Networking*. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2008.

DOULIGERIS, C.; MITROKOSTA, A. Ddos attacks and defense mechanisms: classification and state-of-the-art. *Netw.*, n. 44, p. 643–666, 2004.

LIU, S. Surviving distributed denial-of-service attacks. *IT Prof.*, n. 11, p. 51–53, 2009.

GUTFRAIND, A. Optimizing topological cascade resilience based on the structure of terrorist networks. *PLoS ONE*, n. 5, p. 1–20, 2010.

LAPRIE, J. C. Dependability: basic concepts and terminology. *Draft, IFIP Working Group 10.4 "Dependable Computing and Fault Tolerance"*, 1994.

STEINDER, M.; SETHI, A. A survey of fault localization techniques in computer networks. *Science of Computer Programming*, n. 53 (2), p. 165–194, 2004.

STANDARD, F. 1037c. telecommunications: Glossary of telecommunication terms. *Institute for Telecommunications Sciences*, v. 7, 1996.

ATIS, T. W. G. Atis telecom glossary 2000, american national standard for telecommunications t1.523-2001. *Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS)*, 2001.

ATIS, T. W. G. Reliability-related metrics and terminology for network elements in evolving communications networks, american national standard for telecommunications t1.tr.524- 2004. *Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS)*, 2004.

AVIZIENIS, A. et al. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing, transactions on dependable and secure computing. p. 11–33, March 2004.

NAJJAR, W.; GAUDIOT, J. L. Network resilience: a measure of network fault tolerance. *IEEE Trans. Comput.*, n. 39, p. 174–181, 1990.

CALLAWAY, D. et al. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. *Phys.*, n. 85, p. 5568–5471, 2000.

COHEN, R. et al. Resilience of the internet to random breakdowns. *Phys.*, n. 85, p. 4626–46285, 2000.

- LIU, G.; JI, C. Scalability of network-failure resilience: analysis using multi-layer probabilistic graphical models. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, n. 17, p. 319–331, 2009.
- MENTH, M. et al. Resilience analysis of packet-switched communication networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, n. 17, p. 1950–1963, 2009.
- DEKKER, A. H.; COLBERT, B. D. Network robustness and graph topology. *Proc. 27th Australasian Conf. Computer Science, Dunedin, New Zealand*, p. 359–368, January 2004.
- ANNIBALE, A.; COOLEN, A. C. C.; BIANCONI, G. Network resilience against intelligent attacks constrained by degree-dependent node removal cost. *J. Phys. A: Math. Theor.*, n. 43, p. 1–25, 2010.
- BEYGELZIMER, A. et al. Improving network robustness by edge modification. *Comput. Commun.*, n. 29, p. 251–262, 2005.
- HAN, G. et al. Analysis of energy-efficient connected target coverage algorithms for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 13, n. 1, p. 135–143, 2017.
- XU, Y.-H. et al. Variable-dimension swarm meta-heuristic for the optimal placement of relay nodes in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 13, n. 3, p. 1550147717700895, 2017.
- KARL, H.; WILLIG, A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. *Wiley - United Kingdom*, 2005.
- ROMER, K.; MATTERN, F. The design space of wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, n. 11, 6 2004.
- LIMA, L. S. de. *Vulnerabilidade de redes em grafos de Harary*. 2006.
- MELO, R.; NOGUEIRA, M.; SANTOS, A. Sistema indicador de resiliência na conectividade de redes heterogêneas sem fio. *XIV Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*, 2014.
- YOUNIS, M.; AKKAYA, K. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 621–655, 2008.
- DEB, B.; BHATNAGAR, S.; NATH, B. Stream: Sensor topology retrieval at multiple resolutions. *Telecommunication Systems*, Springer, v. 26, n. 2, p. 285–320, 2004.
- CERPA, A.; ESTRIN, D. Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE transactions on mobile computing*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 272–285, 2004.
- GODFREY, P.; RATAJCZAK, D. Naps: scalable, robust topology management in wireless ad hoc networks. In: ACM. *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*. [S.l.], 2004. p. 443–451.
- SCHURGERS, C. et al. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space. *IEEE Transactions on mobile computing*, IEEE, v. 99, n. 1, p. 70–80, 2002.

- XU, Y.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: ACM. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2001. p. 70–84.
- ABBASI, A. A.; YOUNIS, M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer communications*, Elsevier, v. 30, n. 14, p. 2826–2841, 2007.
- LAI, Y.; CHEN, H. Energy-efficient fault-tolerant mechanism for clustered wireless sensor networks. In: IEEE. *Computer communications and networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th international conference on*. [S.l.], 2007. p. 272–277.
- GUPTA, G.; YOUNIS, M. Fault-tolerant clustering of wireless sensor networks. In: IEEE. *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*. [S.l.], 2003. v. 3, p. 1579–1584.
- BAGHERI, T. Dfmc: decentralized fault management mechanism for cluster based wireless sensor networks. In: IEEE. *Digital Information and Communication Technology and it's Applications (DICTAP), 2012 Second International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 67–71.
- CORREIA, L. H. et al. Transmission power control techniques for wireless sensor networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 51, n. 17, p. 4765–4779, 2007.
- LIN, S. et al. Atpc: adaptive transmission power control for wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*. [S.l.], 2006. p. 223–236.
- JEONG, J.; CULLER, D.; OH, J.-H. Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks. In: IEEE. *Networked Sensing Systems, 2007. INSS'07. Fourth International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 27–34.
- LUO, J.; HUBAUX, J.-P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. In: IEEE. *INFOCOM 2005. 24th annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. Proceedings IEEE*. [S.l.], 2005. v. 3, p. 1735–1746.
- WANG, Z. M. et al. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. In: IEEE. *System Sciences, 2005. HICSS'05. Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on*. [S.l.], 2005. p. 287a–287a.
- CHATZIGIANNAKIS, I.; KINALIS, A.; NIKOLETSEAS, S. Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*. [S.l.], 2006. p. 52–59.
- ALSALIH, W.; AKL, S.; HASSANEIN, H. Placement of multiple mobile base stations in wireless sensor networks. In: IEEE. *Signal Processing and Information Technology, 2007 IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2007. p. 229–233.
- AKKAYA, K.; YOUNIS, M.; BANGAD, M. Sink repositioning for enhanced performance in wireless sensor networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 49, n. 4, p. 512–534, 2005.

- YOUSSEF, W.; YOUNIS, M.; AKKAYA, K. An intelligent safety-aware gateway relocation scheme for wireless sensor networks. In: IEEE. *Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2006. v. 8, p. 3396–3401.
- WANG, W.; SRINIVASAN, V.; CHUA, K.-C. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2005. p. 270–283.
- JUN, H. et al. Trading latency for energy in densely deployed wireless ad hoc networks using message ferrying. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 5, n. 4, p. 444–461, 2007.
- ZHAO, W.; AMMAR, M.; ZEGURA, E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In: ACM. *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. [S.l.], 2004. p. 187–198.
- ALMASAEID, H. M. *Data delivery in fragmented wireless sensor networks using mobile agents*. [S.l.]: Iowa State University, 2007.
- ALMASAEID, H. M.; KAMAL, A. E. Modeling mobility-assisted data collection in wireless sensor networks. In: IEEE. *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- LI, N.; HOU, J. C. Flss: a fault-tolerant topology control algorithm for wireless networks. In: ACM. *Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2004. p. 275–286.
- GHOSH, A.; BOYD, S. Growing well-connected graphs. In: IEEE. *Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on*. [S.l.], 2006. p. 6605–6611.
- HAN, X. et al. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 9, n. 5, p. 643–656, 2010.
- AL-TURJMAN, F. M. et al. Optimized relay placement for wireless sensor networks federation in environmental applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Wiley Online Library, v. 11, n. 12, p. 1677–1688, 2011.
- CARPENTER, G. *Design and analysis of fault tolerant digital systems: Johnson, BW Addison - Wesley, USA (1989)*. [S.l.]: Elsevier, 1991.
- VAIDYA, K.; YOUNIS, M. Efficient failure recovery in wireless sensor networks through active, spare designation. In: IEEE. *Distributed Computing in Sensor Systems Workshops (DCOSSW), 2010 6th IEEE International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- IMRAN, M. et al. Partitioning detection and connectivity restoration algorithm for wireless sensor and actor networks. In: IEEE. *Embedded and ubiquitous computing (EUC), 2010 IEEE/IFIP 8th international conference on*. [S.l.], 2010. p. 200–207.
- COELHO, P. H. G. et al. Node positioning for industrial wireless networks using artificial immune systems. In: IEEE. *Computing and Automation for Offshore Shipbuilding (NAVCOMP), 2013 Symposium on*. [S.l.], 2013. p. 7–10.
- DASGUPTA, D. *Artificial immune systems and their applications*. Springer-Verlag New York, Inc., 1998.

- SILVA, G. C.; DASGUPTA, D. A survey of recent works in artificial immune systems. In: *HANDBOOK ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE: Volume 2: Evolutionary Computation, Hybrid Systems, and Applications*. [S.l.]: World Scientific, 2016. p. 547–586.
- GREENSMITH, J. *The dendritic cell algorithm*. Tese (Doutorado) — Citeseer, 2007.
- SILVA, G. C.; DÂNGELO, M. F.; CAMINHAS, W. M. Detecção de falhas em sistemas dinâmicos: Abordagens imuno-inspiradas baseadas no reconhecimento antigênico nebuloso. 2017.
- JERNE, N. K. Towards a network theory of the immune system. *Ann. Immunol.*, v. 125, p. 373–389, 1974.
- BURNET, S. F. M. et al. The clonal selection theory of acquired immunity. Vanderbilt University Press Nashville, 1959.
- CASTRO, L. N. D.; TIMMIS, J. *Artificial immune systems: a new computational intelligence approach*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2002.
- HOWARD, A.; MATARIC', M. J.; SUKHATME, G. S. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem. *Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS02) Fukuoka, Japan*, p. 25–27, June 2002.
- SOBOL', I. M. On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, Russian Academy of Sciences, Branch of Mathematical Sciences, v. 7, n. 4, p. 784–802, 1967.
- NIEDERREITER, H. Quasi-monte carlo methods and pseudo-random numbers. *Bulletin of the American Mathematical Society*, v. 84, n. 6, p. 957–1041, 1978.
- BRATLEY, P.; FOX, B. L. Algorithm 659: Implementing sobol's quasirandom sequence generator. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, ACM, v. 14, n. 1, p. 88–100, 1988.
- FILHO, A. A. D. A simulação de variáveis aleatórias e os métodos monte carlo e quase-monte carlo na quadratura multidimensional. 2000.
- AMARAL, J. L. M. do. *Sistemas imunológicos artificiais aplicados à detecção de falhas*. Tese (Doutorado) — Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- KRAUSE, A. Sfo: A toolbox for submodular function optimization. *Journal of Machine Learning Research*, n. 11, p. 1141–1144, 2010.
- BALL, M. O.; PROVAN, J. S. Calculating bounds on reachability and connectedness in stochastic networks. *Networks - An International Journal*, n. Vol.13 Ed.2, p. 253–278, June 1983.
- DELAUNAY, B. Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, v. 7, n. 793-800, p. 1–2, 1934.

- GILBERT, E.; POLLAK, H. O. Steiner minimal trees. *SIAM J. Appl. Math.*, n. Vol 16, No 1, p. 1–29, 1968.
- WANG, G.; ZHANG, L. The structure of  $\max\lambda - \min m_\lambda + 1$  graphs used in the design of reliable networks. *Networks*, n. v. 30, p. 231–242, 1997.
- TEIXEIRA, L. da S. *Grafos que modelam redes confiáveis*. 2008.
- RAINER, G. E.; MCGETTRICK, H. M. *T-Cell Trafficking: Methods and Protocols*. 2. ed. [S.l.]: Humana Press, 2017. (Methods in Molecular Biology 1591). ISBN 978-1-4939-6929-6, 978-1-4939-6931-9.
- STROGATZ, S. H. Exploring complex networks. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 410, n. 6825, p. 268–276, 2001.
- NEWMAN, M. E. The structure and function of complex networks. *SIAM review*, SIAM, v. 45, n. 2, p. 167–256, 2003.
- JEONG, H. et al. The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 407, n. 6804, p. 651–654, 2000.
- IDEKER, T. et al. Integrated genomic and proteomic analyses of a systematically perturbed metabolic network. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 292, n. 5518, p. 929–934, 2001.
- RUAL, J.-F. et al. Towards a proteome-scale map of the human protein–protein interaction network. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 437, n. 7062, p. 1173–1178, 2005.
- SPORNS, O. et al. Organization, development and function of complex brain networks. *Trends in cognitive sciences*, Elsevier, v. 8, n. 9, p. 418–425, 2004.
- BASSETT, D. S.; BULLMORE, E. Small-world brain networks. *The neuroscientist*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 12, n. 6, p. 512–523, 2006.
- BULLMORE, E.; SPORNS, O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience*, Nature Publishing Group, v. 10, n. 3, p. 186–198, 2009.
- ERDOS, P.; RÉNYI, A. On the evolution of random graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.*, v. 5, n. 1, p. 17–60, 1960.
- BARABÁSI, A.-L.; ALBERT, R. Emergence of scaling in random networks. *science*, American Association for the Advancement of Science, v. 286, n. 5439, p. 509–512, 1999.
- COHEN, R.; HAVLIN, S. Scale-free networks are ultrasmall. *Physical review letters*, APS, v. 90, n. 5, p. 058701, 2003.
- WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of “small-world” networks. *nature*, Nature Publishing Group, v. 393, n. 6684, p. 440–442, 1998.
- KITANO, H. Systems biology: a brief overview. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 295, n. 5560, p. 1662–1664, 2002.

- BARABASI, A.-L.; OLTVAI, Z. N. Network biology: understanding the cell's functional organization. *Nature reviews genetics*, Nature Publishing Group, v. 5, n. 2, p. 101–113, 2004.
- ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A.-L. Error and attack tolerance of complex networks. *nature*, Nature Publishing Group, v. 406, n. 6794, p. 378–382, 2000.
- IYER, S. et al. Attack robustness and centrality of complex networks. *PloS one*, Public Library of Science, v. 8, n. 4, p. e59613, 2013.
- SIMÃO, J. B. *Minimização de funções submodulares*. 2009.
- ORLIN, J. B. A faster strongly polynomial time algorithm for submodular function minimization. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, n. LNCS 4513, p. 240–251, 2007.
- BACHEM, A.; GRÖTSCHEL, M.; KORTE, B. *Mathematical Programming The State of the Art: Bonn 1982*. [S.l.]: Springer, 1983.
- FORD, L. R.; FULKERSON, D. R. Maximal flow through a network. *Canadian Journal of Mathematics*, n. 8, p. 399–404, 1956.
- DINIC, E. A. Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Sov. Math. Dokl*, n. 11, p. 1277–1280, 1970.
- EDMONDS, J.; KARP, R. Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *Journal of the Association for Computing Machinery*, n. 19, p. 248–264, 1972.
- GOLDBERG, A. V.; TARJAN, R. E. A new approach to the maximum flow problem. *Journal of ACM*, n. 35, p. 921–940, 1988.

## A - TEORIA DE GRAFOS

A teoria dos grafos tem sido utilizada em muitos campos de pesquisa para estudar as propriedades topológicas das redes, como apontam Strogatz (2001) e Newman (2003). E, tem sido crucial na dissecação da topologia das redes biológicas, como as redes metabólicas, de Jeong et al. (2000) e Ideker et al. (2001), as interações proteína-proteína de Rual et al. (2005), e a conectividade cerebral neuronal de Sporns et al. (2004), Bassett, Bullmore (2006) e Bullmore e Sporns (2009).

As redes são definidas como estruturas que consistem em objetos (nós) que formam conexões (arestas) entre si. Diferentes classes de redes podem então ser definidas com base na distribuição de arestas e topologia de rede geral, ou seja, redes aleatórias de Erdos-Renyi (1960), sem escala de Barabasi e Albert (1999) e Cohen e Havlin (2003) e redes de pequeno porte, apresentadas por Watts e Strogatz (1998).

Uma característica importante das redes é a sua robustez à perturbação, que decorre dos princípios organizacionais subjacentes da rede, como investigado por Kitano (2002) e Barabasi e Oltvai (2004). Além disso, Albert, Jeong e Barabási (2000) e Iyer et al. (2013) apresentaram a robustez topológica servindo como uma medida estimada da funcionalidade da rede e oferecendo informações sobre o comportamento global da rede quando está sujeita a falhas ou ataques. A seguir, alguns conceitos da teoria de grafos, bem como o teorema de MinCut.

### A.1 Conceitos Básicos

Um grafo é uma estrutura  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é o conjunto discreto cujos elementos são denominados de vértices ou nós e  $E$ , é o conjunto de arestas de  $G$ , as quais representam os enlaces entre os vértices. O grafo  $G$  é denominado orientado, se existe uma orientação indicando o sentido da aresta, caso contrário é denominado não-orientado. Se existirem duas ou mais arestas conectando o mesmo par de vértices, diz-se que essas arestas são paralelas e se uma aresta envolve um único vértice, essa aresta é denominada laço. Um grafo não-orientado sem laços e sem arestas paralelas é denominado grafo simples e quando um grafo possui pelo menos duas arestas paralelas é denominado multigrafo. O número de vértices do grafo é indicado  $n = |V|$  e o número de arestas por  $m = |E|$ . Dois vértices  $v_i$  e  $v_j$  são adjacentes se existe a aresta  $(v_i, v_j) \in E$ . Uma aresta é adja-

cente a outra quando compartilham um mesmo vértice. Um percurso é um conjunto de arestas sucessivamente adjacentes e este é denominado fechado quando a última aresta da sequência for adjacente à primeira e, caso contrário, é denominado aberto.

Um caminho é uma sequência de arestas que conectam uma sequência de vértices distintos, exceto possivelmente o primeiro e o último. Um ciclo é um caminho que começa e termina no mesmo vértice.

O grau de um vértice  $v_i \in V$ , denotado por  $d(v_i)$  é o número de arestas ligadas diretamente a ele. Um grafo é dito  $k$ -regular se todos os seus vértices possuem grau  $k$ , ou seja  $d(v_i) = k$ , para  $1 \leq i \leq n$ . E, quando  $d(v_i) = n - 1$ ,  $\forall 1 \leq i \leq n$ , o grafo é denominado completo e denotado por  $K_n$ .

A matriz de adjacência de um grafo é uma matriz quadrada de ordem  $n$ , cujas entradas são iguais a 1 (*um*) se os vértices são adjacentes e 0 (*zero*), caso contrário. Dessa forma,  $A_{i,j} = 1$  se os vértices  $v_i$  e  $v_j$  são adjacentes e  $A_{i,j} = 0$  se os mesmos não possuem ligação direta por uma aresta.

## A.2 Teorema de MinCut

Para um dado grafo  $G = (V, E)$ , um corte é uma partição  $(S, \bar{S})$  de  $V$  em dois subconjuntos não vazios  $S$  e  $\bar{S}$ . Um corte  $(S, \bar{S})$  é um corte  $s - t$ , para  $s, t \in V$ , se  $s \in S$  e  $t \in \bar{S}$ . A capacidade de um corte  $(S, \bar{S})$  é definida como a soma das capacidades das arestas com origem em  $S$  e destino em  $\bar{S}$ . Um corte  $s - t$  mínimo é um corte  $s - t$  cuja soma da capacidade de todas as arestas entre os cortes  $s - t$  é mínima.

## B - FUNÇÕES SUBMODULARES

Seja  $S$  um conjunto finito e  $f$  uma função das partes de  $S$  nos  $\mathfrak{R}$ . A função “ $f$ ” é submodular se:

$$f(T) + f(U) \geq f(T \cap U) + f(T \cup U) \quad (7)$$

para quaisquer partes de  $T$  e  $U$  de  $S$ . Similarmente,  $f$  é uma função supermodular se na equação (7) substituirmos  $\geq$  por  $\leq$  ou ainda,  $f$  é modular se na equação (7) trocarmos  $\geq$  por  $=$ .

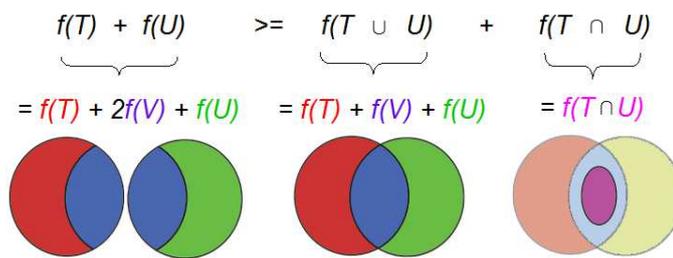


Figura 58 - Venn e a arte da Submodularidade. Adaptada de Bilmes (2016)

A Figura 58 representa graficamente o exposto na equação (7). Se  $f$  é uma função submodular,  $-f$  será uma função supermodular. E,  $f$  só será modular, se e somente se, ela for submodular e supermodular simultaneamente.

Diz-se que  $f$  é uma função submodular sobre  $S$ , a fim de representar que “ $f$ ” é uma função submodular definida sobre as partes de  $S$ . O mesmo vale para as demais funções, supermodular e modular. Uma função “ $f$ ” sobre as partes de  $S$  é não-decrescente se  $f(T) \leq f(U)$ , sempre que  $T \subseteq U$ , e é não-decrescente se  $f(T) \geq f(U)$ , sempre que  $T \subseteq U$ . Além disso, se “ $f$ ” é não-decrescente ou não-crescente, então diz-se que  $f$  é uma função monótona.

As funções modulares ficam completamente determinadas se forem especificados um parâmetro  $u$  e um valor associado a cada elemento de  $S$ . Ou seja, uma função  $f$  sobre as partes de  $S$  é modular se, e somente se, existem um vetor real  $w$  indexado por  $S$  e um número real  $u$  tais que

$$f(U) = w(U) + \mu, \quad \text{para todo } U \subseteq S.$$

Assim, se pode afirmar que funções modulares são estruturalmente iguais a vetores indexados por  $S$ . Já as funções submodulares e supermodulares são um pouco mais complexas. A proposição a seguir, é uma caracterização alternativa para funções submodulares, podendo estas serem utilizadas como uma ferramenta para avaliar se uma função é submodular ou não. Se a função “ $f$ ” for definida sobre as partes de  $S$ , se poderá representar a função  $f_s$  da seguinte forma, para cada  $s$  em  $S$ :

$$f_s(U) := f(U \cup \{s\}) - f(U), \quad \text{para cada } U \subseteq S \setminus \{s\}.$$

**Proposição:** Uma função  $f$  sobre as partes de  $S$  é submodular se, e somente se  $f_s$  for uma função não-crescente, para todo  $s$  em  $S$ .

**Demonstração:** Seja  $f$  uma função submodular. Fixe  $s$  em  $S$  e partes  $T$  e  $U$  de  $S \setminus \{s\}$ , tais que  $T \subseteq U$ . Pela submodularidade de  $f$ , vale que

$$f(T \cup \{s\}) + f(U) \geq f(T) + f(U \cup \{s\}),$$

o que se conclui que  $f_s(T) = f(T \cup \{s\}) - f(T) \geq f(U \cup \{s\}) - f(U) = f_s(U)$ . Desta forma,  $f_s$  é uma função não-crescente, para todo  $s$  em  $S$ .

Agora, suponha que  $f_s$  seja uma função não-crescente, para todo  $s$  em  $S$ . Sejam  $T$  e  $U$  partes quaisquer de  $S$ . Se  $f$  satisfaz a proposição acima para  $T$  e  $U$ . Então, por indução em  $|T \Delta U|$ , em que  $T \Delta U$  representa a diferença simétrica  $(T \setminus U) \cup (U \setminus T)$  entre  $T$  e  $U$ .

Se  $T \subseteq U$  ou  $U \subseteq T$ , o resultado é trivial. Supondo que exista  $t$  em  $T \setminus U$  e  $u$  em  $U \setminus T$ . Se  $|T \Delta U| = 2$ , então, como em particular  $f_t$  é não-crescente, vale que

$$\begin{aligned} f(T) - f(T \cap U) &= f((T \cap U) \cup \{t\}) - f(T \cap U) \\ &= f_t(T \cap U) \\ &\geq f_t((T \cap U) \cup \{u\}) \\ &= f((T \cap U) \cup \{t, u\}) - f((T \cap U) \cup \{u\}) \\ &= f(T \cup U) - f(U), \end{aligned}$$

de onde segue o resultado.

Suponha então que  $|T \Delta U| \geq 3$ . Por simetria, se supõe que  $|T \setminus U| \geq 2$ . Seja  $t$

em  $T \setminus U$ . Como  $|T \setminus \{t\} \Delta U| < |T \Delta U|$  e  $|T \Delta (T \cup U) \setminus \{t\}| < |T \Delta U|$ , então pela hipótese de indução, temos

$$f(U) - f(T \cap U) \geq f((T \cup U) \setminus \{t\}) - f(T \setminus \{t\}),$$

como também que

$$f((T \cup U) \setminus \{t\}) - f(T \setminus \{t\}) \geq f(T \cup U) - f(T),$$

Das duas desigualdades acima, segue a validade da equação (7) para  $T$  e  $U$ .

Desta forma, a proposição da equação (7) permite a Simão (2009) concluir que funções submodulares modelam retornos marginais decrescentes, desempenhando um papel análogo ao desempenhado pelas funções côncava em modelos econômicos, conforme observou Orlins (2007). Por outro lado, Bachem, Grötschel e Korte (1983) mostraram que funções submodulares têm um comportamento algorítmico mais próximo ao das funções convexas.

## B.1 Aplicações das funções submodulares

Simão (2009) apresenta alguns exemplos, onde existem inúmeras funções submodulares relacionadas a matemática discreta e otimização combinatória, bem como problemas que podem ser formulados para minimizar uma função submodular, tais como: Posto de Submatrizes, Componentes e subflorestas maximais, Matróides, Vizinhanças em grafos bipartidos, Diâmetro em subárvores, Probabilidade e Capacidade de Cortes. Este último, será descrito a seguir, pois foi aplicado no POSIMNET-R.

## B.2 Capacidade de Cortes

Seja  $(V, E)$  um grafo e seja  $U$  uma parte de  $V$ . Indique por  $\delta(U)$  o conjunto das arestas com uma ponta em  $U$  e a outra em  $V \setminus U$ . O conjunto  $\delta(U)$  é dito um corte. Defina  $d(U) := |\delta(U)|$ . A função  $d$  é submodular. Um simples contador pode verificar essa afirmação. Além disso, é possível considerar uma função capacidade  $c$  que associa um número real não-negativo  $c(e)$  a cada aresta  $e$  do grafo. Nesse caso, tem-se que a função  $f$ , definida por  $f(U) := c(\delta(U)) := \sum_{e \in \delta(U)} c(e)$ , para cada  $U \subseteq V$ , também é submodular.

Da mesma forma, se  $(V, A)$  é um grafo orientado, indica-se respectivamente por  $\delta^{in}(U)$  e  $\delta^{out}(U)$  o conjunto de arestas que entram e saem de  $U$ , para cada  $U \subseteq V$ . Tem-se também que  $d^{in}(U) := |\delta^{in}(U)|$  e  $d^{out}(U) := |\delta^{out}(U)|$  são submodulares. Além disso, se  $c$  é uma função capacidade sobre as arestas em  $A$ , então  $c(\delta^{in}(U))$  e  $c(\delta^{out}(U))$  também são submodulares.

Sejam dois vértices distintos  $s$  e  $t$  em  $V$ , define-se também a função  $f(U) := c(\delta^{out}(U \cup \{s\}))$ , para todo  $U \subseteq V \setminus \{s, t\}$ . A função  $f$ , além de ser submodular, representa a **capacidade dos  $st$ -cortes** no grafo orientado. Ford e Fulkerson (1956) mostraram que a intensidade de um  $st$ -fluxo máximo que respeite as capacidade  $c$  é dada justamente pela capacidade mínima de um  $st$ -corte, representada por  $\min \{f(U) : U \subseteq V \setminus \{s, t\}\}$ .

Algoritmos que solucionam os problemas do  $st$ -fluxo máximo, apresentado por Dinic (1970), Edmonds e Karp (1972) e Goldberg e Tarjan (1988), também resolvem o problema de minimização de funções submodulares em casos particulares.

Uma das ferramentas utilizadas nesse trabalho é a *toolbox* de Krause (2010), aplicando o teorema de MinCut da Teoria de Grafos, através da funções submodulares

## C - ESTUDOS DE CASO PARA O CENÁRIO POSB

Nesse apêndice constam as médias dos resultados de 10 experimentos para cada estudo de caso e, tais resultados estão relacionados à 96 estudos de caso do cenário POSB referente ao modelo POSIMNET-R e 12 estudos de caso do cenário POSB referente ao modelo POSIMNET. As tabelas são apresentadas de forma que os resultados de cada modelo possam ser comparados facilmente, tendo destaque do melhor resultado nas células de cor azul.

No POSIMNET, as redes foram obtidas a partir do Grau de Falhas da função de Avaliação e no POSIMNET-R, as redes foram obtidas a partir da Probabilidade de Falhas, extraída do teorema de MinCut da Teoria de Grafos. Destaques na cor rosa para os resultados do POSIMNET e na cor verde para os do POSIMNET-R. As células que se encontrarem vazias justificam-se pelo fato do POSIMNET não ter recursos para gerar resultados para comparação.

Da Tabela 9 à Tabela 16 são apresentados os resultados dos 96 estudos de caso do POSIMNET-R e dos 12 estudos de caso do POSIMNET.

















## D - ESTUDO DE CASOS DAS INICIALIZAÇÕES

Tabela 17 - Inicialização: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,1

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização ALEATÓRIO							
Caminhos : Quaisquer							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_1		CASO_2		CASO_3		CASO_4	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
20,44	7,26	19,71	9,33	20,76	10,17	9,62	1,76
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização SOBOL							
Caminhos : Quaisquer							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_17		CASO_18		CASO_19		CASO_20	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
13,17	4,60	13,40	2,71	12,22	0,96	9,94	1,15
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização QuadTREE							
Caminhos : Quaisquer							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_33		CASO_34		CASO_35		CASO_36	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
64,22	12,94	71,67	9,32	20,35	1,87	10,97	1,08
13,17		13,40		12,22		9,62	

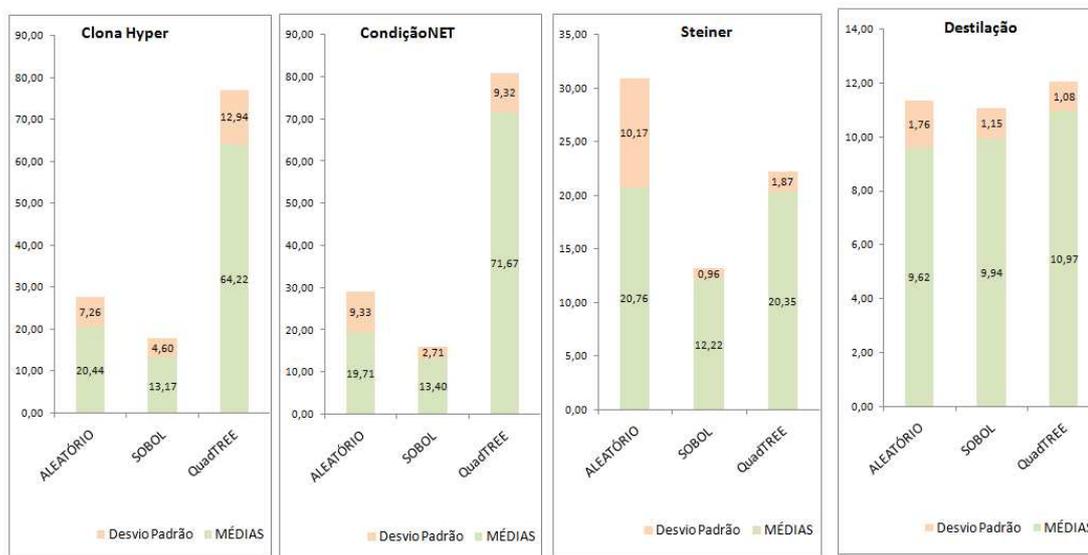


Figura 59 - Gráficos: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,1

Tabela 18 - Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,1

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização : ALEATÓRIO							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_5		CASO_6		CASO_7		CASO_8	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
39,61	91,43	15,49	31,62	2,69	3,09	3,16	2,07
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização : SOBOL							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_21		CASO_22		CASO_23		CASO_24	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
2,96	0,74	3,34	0,88	8,33	0,13	2,54	0,59
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização : QuadTREE							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_37		CASO_38		CASO_39		CASO_40	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
3,78	0,85	3,54	0,63	1,91	0,09	2,31	0,37
2,96		3,34		1,91		2,31	

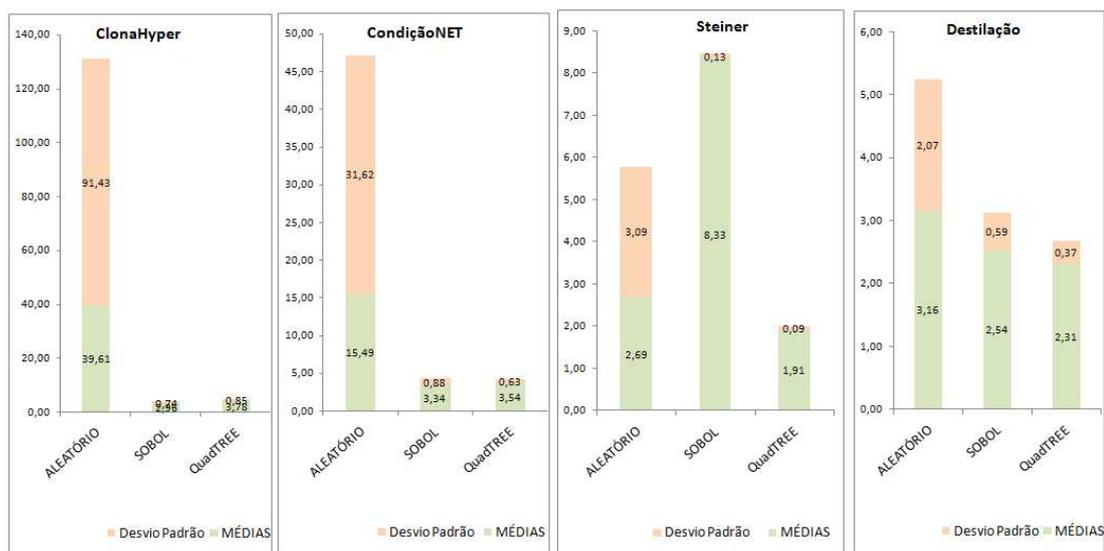


Figura 60 - Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,1

Tabela 19 - Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais - Raio = 0,1

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização : ALEATÓRIO							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_9		CASO_10		CASO_11		CASO_12	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
11,76	11,63	15,07	28,99	2,90	0,40	5,94	4,51
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização : SOBOL							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_25		CASO_26		CASO_27		CASO_28	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
7,37	5,88	7,41	4,08	2,66	0,06	4,72	1,87
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,1							
Inicialização : QuadTREE							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_41		CASO_42		CASO_43		CASO_44	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
4,72	0,67	4,40	0,46	2,25	0,06	3,74	0,86
4,72		4,40		2,25		3,74	

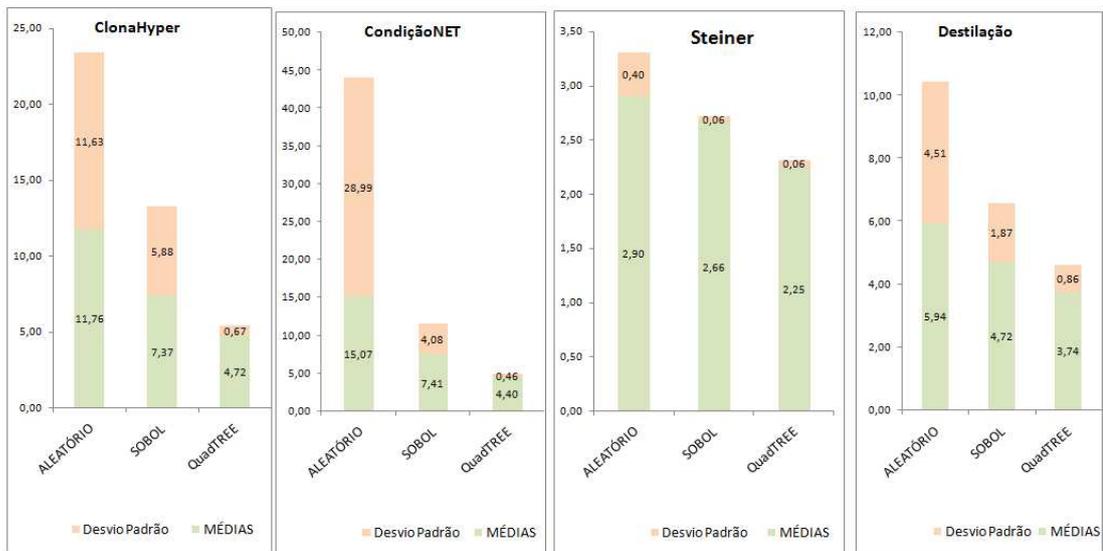


Figura 61 - Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais- Raio = 0,1

Tabela 20 - Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais - Raio = 0,1

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath :2							
Raio de Alcance :0,1							
Inicialização :ALEATÓRIO							
Caminhos :Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_13		CASO_14		CASO_15		CASO_16	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
14,83	2,38	15,06	1,86	3,19	0,87	4,71	1,08
Cenário :POS B							
Kpath :2							
Raio de Alcance :0,1							
Inicialização :SOBOL							
Caminhos :Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_29		CASO_30		CASO_31		CASO_32	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
13,63	3,30	12,86	3,04	3,78	0,09	4,19	1,10
Cenário :POS B							
Kpath :2							
Raio de Alcance :0,1							
Inicialização :QuadTREE							
Caminhos :Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_45		CASO_46		CASO_47		CASO_48	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
18,40	3,35	16,97	1,96	3,33	0,10	11,79	1,11
13,63		12,86		3,19		4,19	



Figura 62 - Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais- Raio = 0,1

Tabela 21 - Inicialização: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,2

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização ALEATÓRIO							
Caminhos : Quaisquer							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_49		CASO_50		CASO_51		CASO_52	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,40	0,42	1,85	0,76	1,54	0,38	1,54	0,45
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização SOBOL							
Caminhos : Quaisquer							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_65		CASO_66		CASO_67		CASO_68	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,34	0,19	1,60	0,08	1,58	0,06	1,55	0,04
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização QuadTREE							
Caminhos : Quaisquer							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_81		CASO_82		CASO_83		CASO_84	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,23	0,13	1,35	0,03	1,32	0,03	1,32	0,02
1,23		1,35		1,32		1,32	

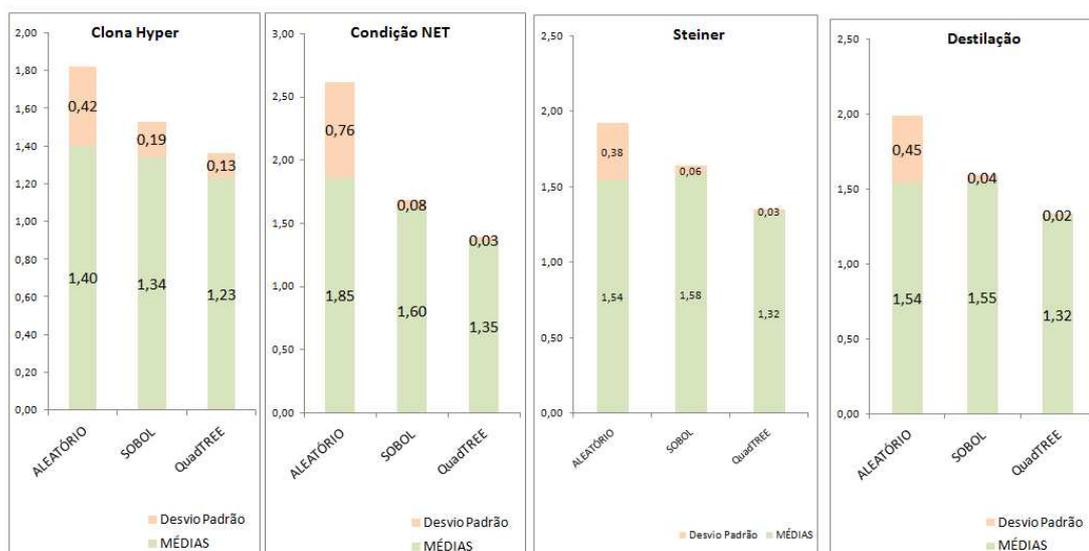


Figura 63 - Gráficos: Caminhos Quaisquer - Raio = 0,2

Tabela 22 - Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,2

Tempo da Primeira Convergência (segundos)								
Cenário :POS B								
Kpath : 2								
Raio de Alcance : 0,2								
Inicialização : ALEATÓRIO								
Caminhos : Disjuntos ARESTAS								
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação		
CASO_53		CASO_54		CASO_55		CASO_56		
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	
1,07	0,94	1,88	1,60	1,00	0,65	1,05	0,78	
Cenário :POS B								
Kpath : 2								
Raio de Alcance : 0,2								
Inicialização : SOBOL								
Caminhos : Disjuntos ARESTAS								
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação		
CASO_69		CASO_70		CASO_71		CASO_72		
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	
0,78	0,03	0,79	0,02	0,79	0,02	0,78	0,02	
Cenário :POS B								
Kpath : 2								
Raio de Alcance : 0,2								
Inicialização : QuadTREE								
Caminhos : Disjuntos ARESTAS								
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação		
CASO_85		CASO_86		CASO_87		CASO_88		
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	
0,68	0,02	0,67	0,02	0,69	0,01	0,68	0,02	

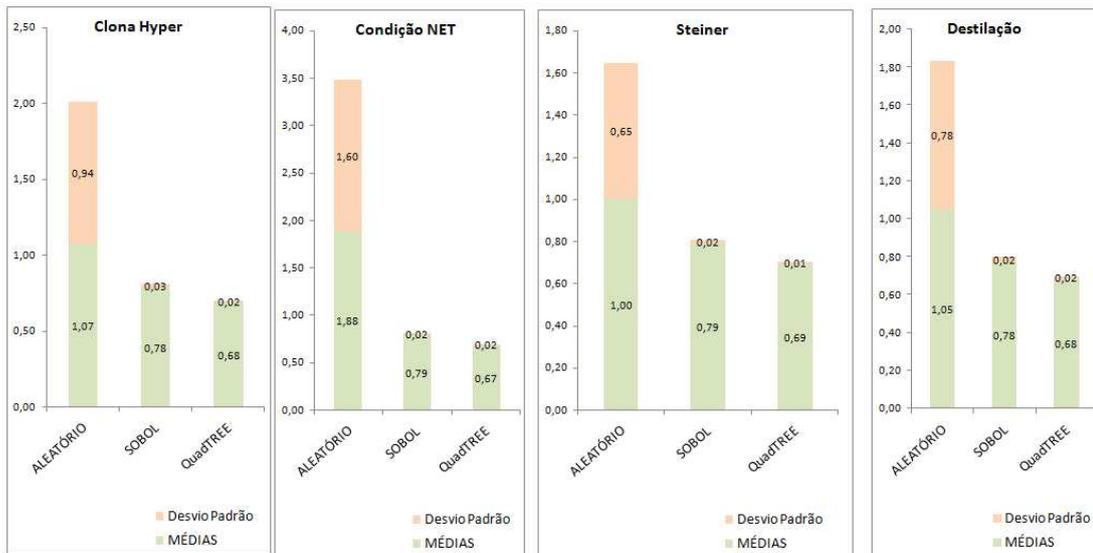


Figura 64 - Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas - Raio = 0,2

Tabela 23 - Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais - Raio = 0,2

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização : ALEATÓRIO							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_57		CASO_58		CASO_59		CASO_60	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,15	0,52	0,93	0,22	0,69	0,17	2,43	3,01
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização : SOBOL							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_73		CASO_74		CASO_75		CASO_76	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,03	0,01	1,02	0,02	1,04	0,02	1,04	0,05
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização : QuadTREE							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Parciais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_89		CASO_90		CASO_91		CASO_92	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
0,69	0,02	0,70	0,04	0,69	0,02	0,70	0,04
0,69		0,70		0,69		0,70	

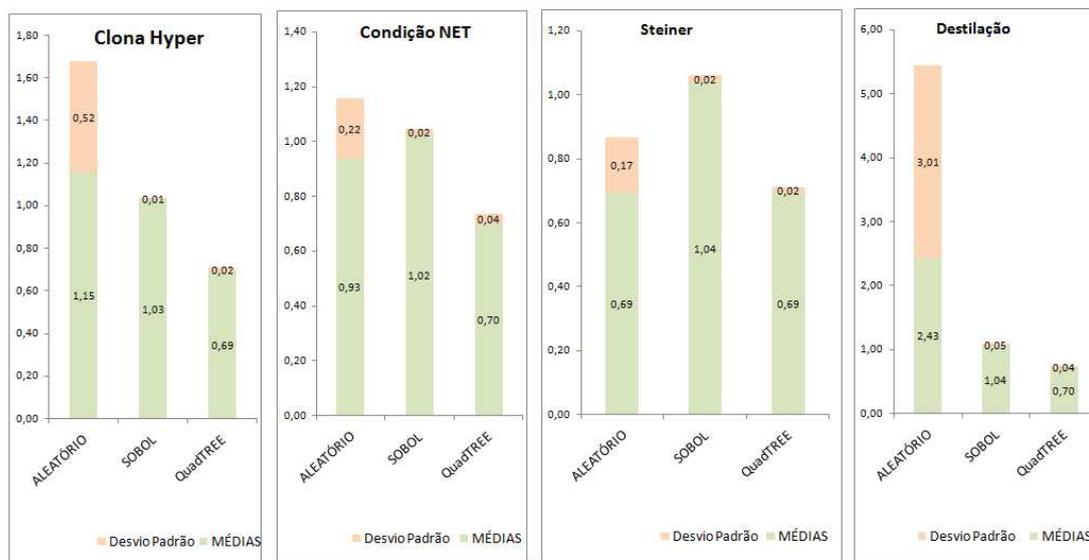


Figura 65 - Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Parciais- Raio = 0,2

Tabela 24 - Inicialização: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais - Raio = 0,2

Tempo da Primeira Convergência (segundos)							
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização : ALEATÓRIO							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_61		CASO_62		CASO_63		CASO_64	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,39	0,27	1,40	0,21	0,98	0,21	0,90	0,14
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização : SOBOL							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_77		CASO_78		CASO_79		CASO_80	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,29	0,27	1,17	0,22	1,09	0,04	0,84	0,09
Cenário :POS B							
Kpath : 2							
Raio de Alcance : 0,2							
Inicialização : QuadTREE							
Caminhos : Disjuntos ARESTAS e NÓS Totais							
ClonaHyper		CondiçãoNET		Steiner		Destilação	
CASO_93		CASO_94		CASO_95		CASO_96	
MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
1,44	0,16	1,50	0,14	0,82	0,04	1,34	0,18
1,29		1,17		0,82		0,84	

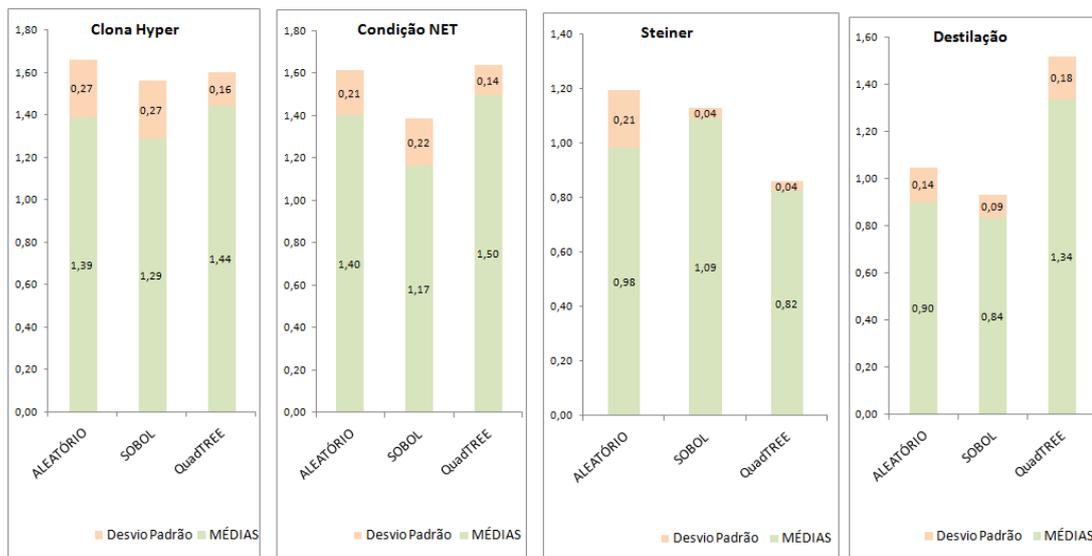


Figura 66 - Gráficos: Caminhos Disjuntos Arestas e Nós Totais- Raio = 0,2

## E - 11 PRIMEIRAS GERAÇÕES DO CENÁRIO POSB, OPERADOR DE MUTAÇÃO *STEINER*

Este apêndice apresenta um processo de desenvolvimentos das 11 primeiras gerações no cenário POSB, Raio de alcance igual 0.2, Operador de mutação *Steiner*, com inicialização Aleatório.

Da Figura 67 à Figura 70, encontra-se a representação do desenvolvimento de uma rede, evoluindo da geração 1 à 11.

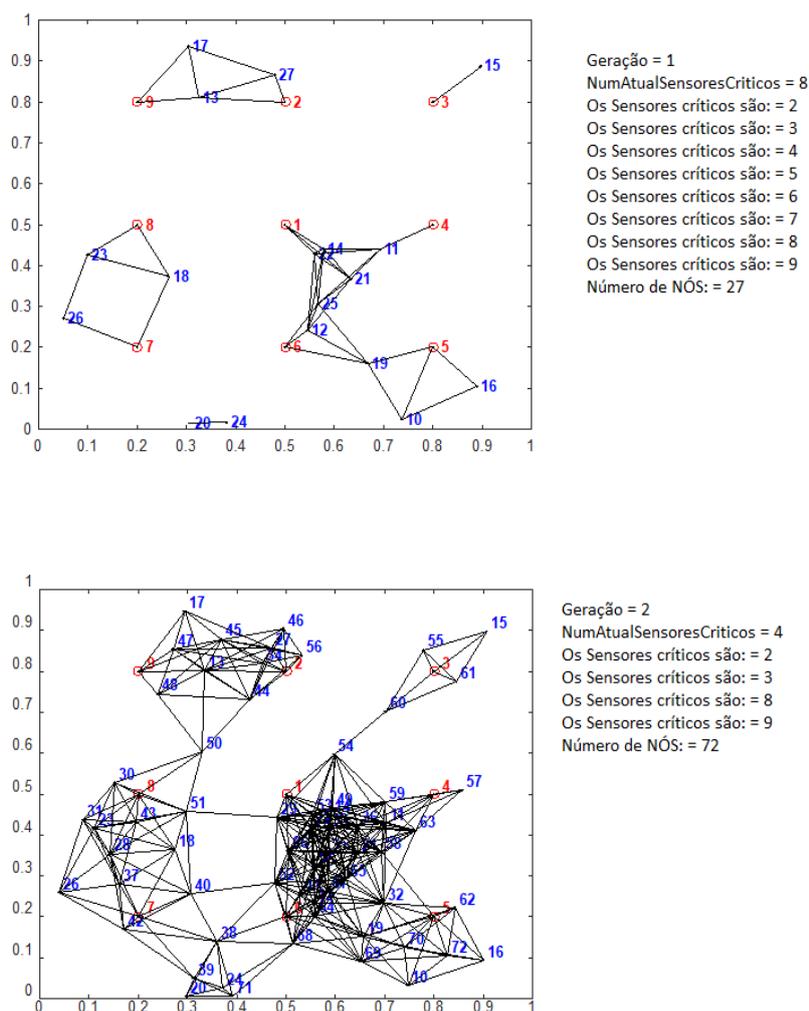


Figura 67 - Redes produzidas nas Gerações 1 e 2

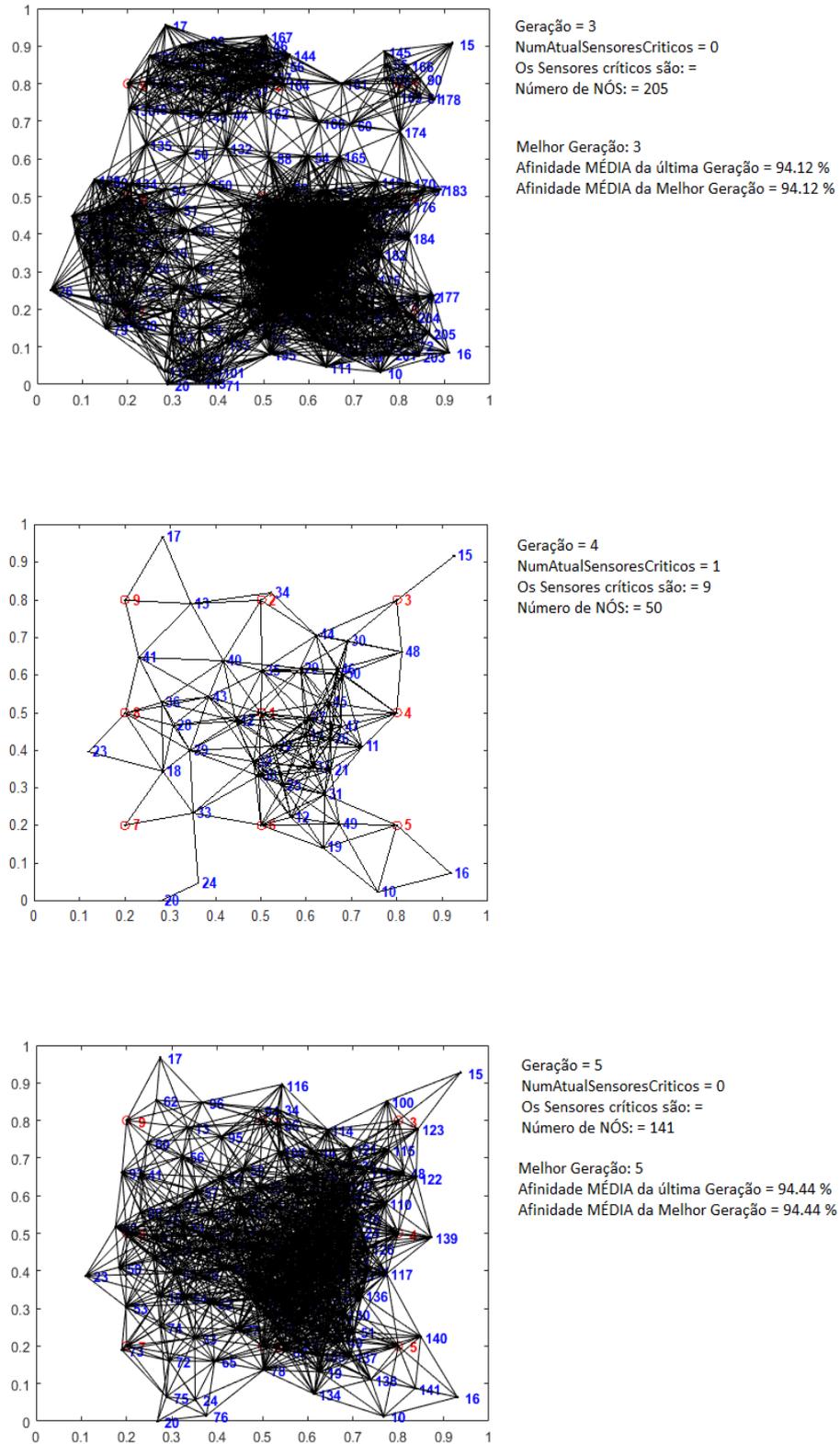


Figura 68 - Redes produzidas nas Gerações 3, 4 e 5

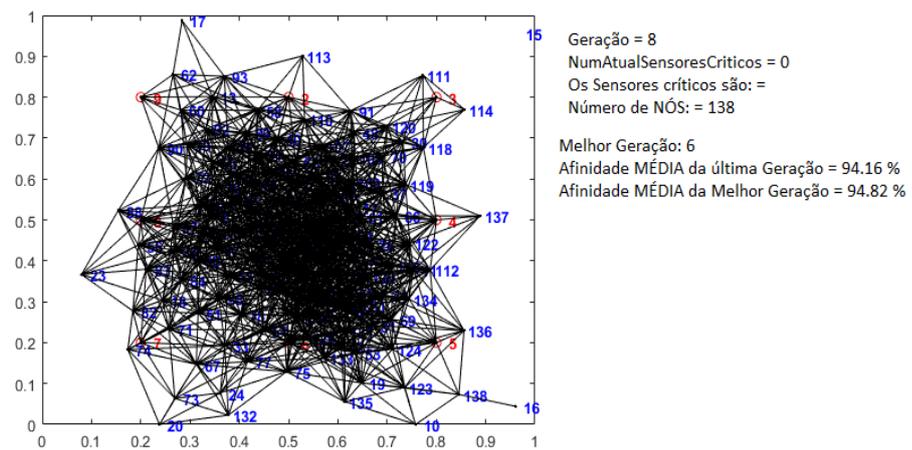
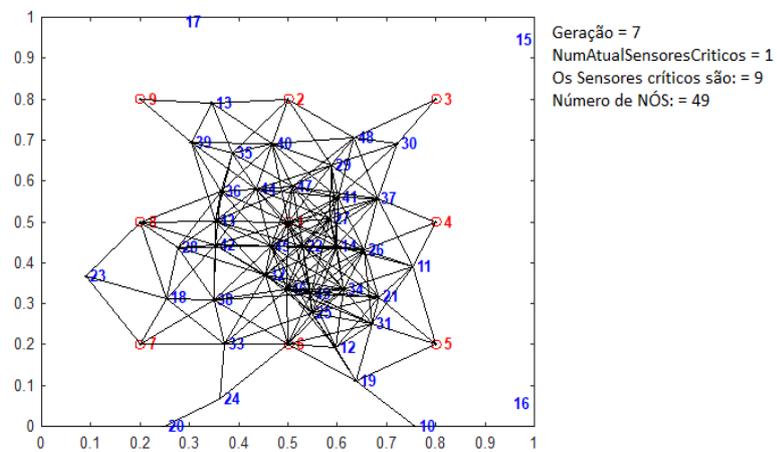
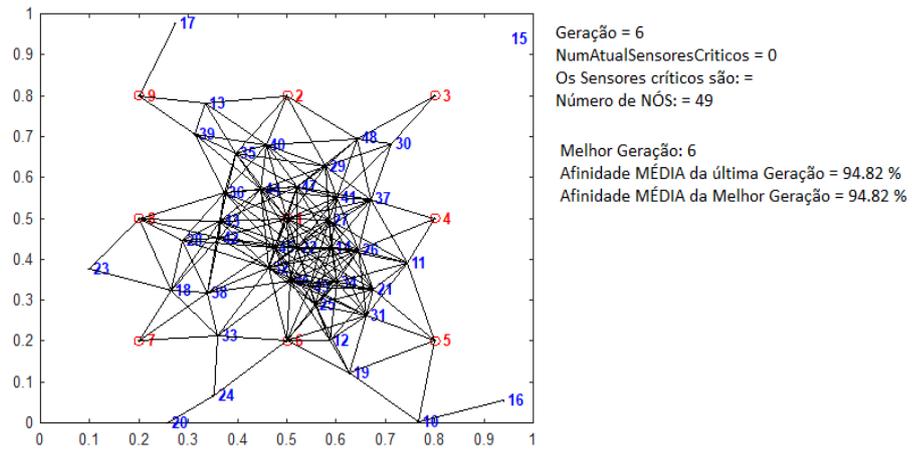


Figura 69 - Redes produzidas nas Gerações 6, 7 e 8

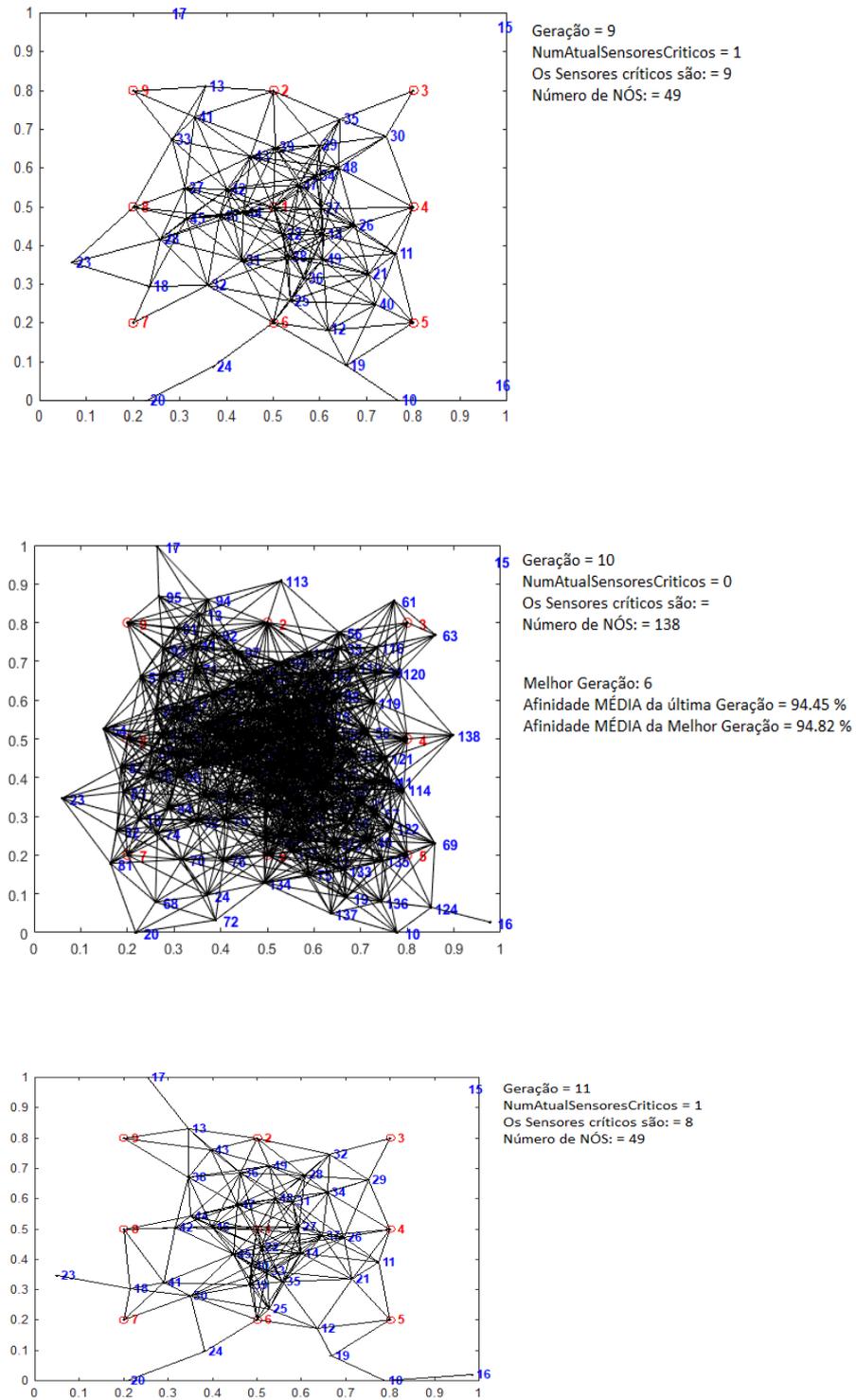


Figura 70 - Redes produzidas nas Gerações 9, 10 e 11