

POSIMNET-R: UMA FERRAMENTA DE APOIO A PROJETO DE REDES SEM FIO RESILIENTES PARA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

CARLOS A. R. SOARES¹ E JORGE L.M. AMARAL²

²*Departamento de Eletrônica e Telecomunicações (DETEL), ¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica (PEL), Laboratório de Redes Industriais e Sistemas de Automação (LARISA), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)*

Rua Fonseca Teles, no. 121,5º. Andar, São Cristóvão – RJ

E-mails: caugusto.rio@gmail.com, jamaral@uerj.br

Abstract— The increasing demand imposed by Industry 4.0 has increased the interest in applications of Wireless Sensor Networks (WSN) in industrial automation. Among its advantages we can mention: ease of installation and maintenance, reduction of installation time, reduction of cabling, savings in the cost of projects and infrastructure, flexibility of configuration and to change existing architectures. However, for the industrial automation area, it is necessary to emphasize the need for network reliability, since loss of control due to lack of feedback can have catastrophic results. This work proposes a POSIMNET-R (POSITIONING IMMUNE NETWORK RESILIENT) tool, capable of developing a reliable network, from the positioning of routing nodes, meeting the following criteria: low failure degree; path redundancy; fewer hop numbers and fewer routers. In addition, it also has conditions to simulate the probability of multiple faults.

Keywords— Positioning; Industrial Automation; Resilience; Industry 4.0; Steiner; Artificial Immune Systems (AIS).

Resumo— 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 citamos: facilidade de instalação e manutenção, redução de tempo de instalação, redução de cabeamento, economia no custo de projetos e de infraestrutura, flexibilidade de configuração e para alteração de arquiteturas existentes. Entretanto, para a área de automação industrial é necessário enfatizar a necessidade de confiabilidade da rede, pois a perda de controle pela falta de realimentação pode ter resultados catastróficos. Esse trabalho propõe uma ferramenta, denominada POSIMNET-R (*POSITIONING IMMUNE NETWORK RESILIENT*), capaz de desenvolver uma rede confiável, a partir do posicionamento de nós roteadores, atendendo os critérios: de baixo grau de falha; redundância de caminhos; menor número de saltos e a menor quantidade de roteadores. Além disso, possui também condições de simular a probabilidade de múltiplas falhas.

Palavras-chave— Posicionamento; Automação Industrial; Resiliência; Indústria 4.0; Steiner; Sistemas Imunológicos Artificiais.

1 Introdução

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é uma rede autônoma e dinâmica de dispositivos 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 a aos sensores ou roteadores mais próximos, direcionando-a ao *gateway*.

Elas 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 (Akyildiz e Vuran, 2010), (Younis et al., 2014) e (Costa e Amaral, 2012). Naturalmente que, para um conjunto de aplicações tão diverso, é de se esperar que, para cada situação, exista uma diferença nos requisitos que estas redes devem atender. Especificamente no caso da 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. Embora, os protocolos de RSSF industriais mais populares, tais como WirelessHart, ISA 100.11 e WIA-PA já estejam bem consolidados, ainda existem questões em aberto que precisam ser tratadas, tais como o desenvolvimento de ferramentas para o projeto destas redes dentro de um ambiente de automação (Soares, Costa e Amaral, 2018).

Em particular, um dos aspectos mais importantes do projeto de uma rede para a automação é o posicionamento dos nós roteadores da rede. Ele 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, a posição dos nós sensores é pré-definida pelo fenômeno físico próximo ao processo a ser monitorado e algumas vezes controlado. O *gateway*, assim como os nós sensores, em geral, tem sua posição fixa próximo Centro de Controle Operacional (CCO). Já a posição dos nós roteadores, que são responsáveis pelo encaminhamento dos dados gerados pelos sensores da rede até o *gateway*

possui certa complexidade e deve ser realizada de forma a garantir aspectos, tais como: tolerância à falha, latência, consumo de energia, conectividade, cobertura da rede, redundância, menor número de saltos (*Hops*), entre outros.

Este trabalho propõe uma ferramenta chamada POSIMNET-R (Soares, 2018) e trata-se da segunda fase de um trabalho iniciado por (Barreira, 2013), baseada em sistemas imunológicos artificiais, que analisa o posicionamento dos nós de uma rede sem fio para automação industrial com topologia em malha e determina uma proposta de solução a partir de um cenário definido pelo projetista, auxiliando-o a encontrar as melhores posições para os nós roteadores, enfatizando aspectos de resiliência supracitados. A seção 2 descreve o problema do posicionamento, a seção 3 apresenta, de forma sucinta, o Sistema Imunológico Artificial, a seção 4 descreve o Modelo Proposto e por fim a seção 5 apresenta os resultados através de Estudos de Caso realizados.

2 O problema do Posicionamento

Um dos aspectos fundamentais a ser observado quando se realiza posicionamento dos nós roteadores é garantir que a RSSF tenha o maior grau de Resiliência possível e, ela é definida como: “(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). E, em (Sterbenz et al., 2010), resiliência é apresentada como o conjunto de várias disciplinas relevantes que servem como base para a robustez da rede. O POSIMNET-R aborda três dessas disciplinas: Latência, Energia e Conectividade.

Em uma RSSF, é importante garantir os requisitos temporais para alguns controles de processo, bem como evitar que apareçam “nós críticos”, isto é, nós que funcionando em condições inadequadas possam ocasionar falhas de conexão, comprometendo a resiliência da rede.

A Figura 1 apresenta alguns possíveis problemas que ocorrem nas RSSFs e apenas um benefício (item iii), tais como: (i) - Os sensores 3 e 4 estão conectados entre si, porém sem conectividade direta ou indireta com o *gateway*; (ii) - Os sensores 1 e 2 apresentam conectividade indireta com o *gateway*, 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 *gateway*; (v) - O roteador 3 também é um nó crítico, pois em caso de falha, o sensor 1 só terá um caminho ao *gateway* 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.

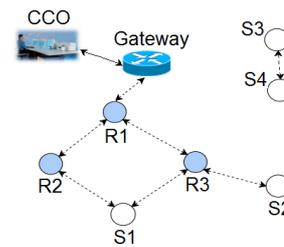


Figura 1 – Exemplos de alguns problemas em RSSF

Alguns trabalhos, tais como (Costa e Amaral, 2010), (Zuo et al., 2013), (Shahi et al., 2016) e (Han et al., 2017), quando abordam as questões relacionadas ao posicionamento dos nós roteadores, tratam os seguintes aspectos: latência, tempo de vida da rede sob a ótica do consumo de energia, conectividade, número mínimo de roteadores à serem adicionados na rede a fim de garantir conectividade e por fim, a tolerância à falhas. Este trabalho utiliza metodologia de Sistema Imunológico Artificial, para estudar alguns aspectos de posicionamento, minimizando a probabilidade de falha de cada subrede contendo um sensor, roteadores e o *gateway*, com o objetivo de aumentar a Resiliência da rede, para que as informações dos sensores alcancem o *gateway* através do menor número de *Hops* possível e um consumo de energia balanceado.

3 Sistema Imunológico Artificial

De acordo com (Dasgupta, 1998), os sistemas imunológicos artificiais são compostos por metodologias inteligentes, inspiradas no sistema imunológico biológico, para a solução de problemas do 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 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 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 idiotopo. 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.

4 Modelo Proposto

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 (Neal, 2002) e no SSAIS (Castro e Von Zuben, 1999), 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 pela Probabilidade de Falha. Ela é utilizada 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.

Caso o objetivo não seja atingido, os roteadores são submetidos aos campos potenciais e uma nova rede é formada, fazendo com que o algoritmo repita o processo até que a condição de parada seja satisfeita.

A Figura 2 representa um fluxograma do modelo proposto (POSIMNET-R), que será descrito a seguir.

5.1 Inicialização

Inicialmente, é sintetizado um conjunto de células B para formar uma rede, para obter roteadores candidatos para formação inicial da rede.

5.2 Avaliação

No modelo da Fase 1, a avaliação ocorre a partir do Grau de Falhas, que é o percentual obtido com a simulação de falhas simples do roteador através de busca exaustiva. Na Fase 2, a avaliação é calculada através da probabilidade de Falhas utilizando um dos teoremas da Teoria de Grafos denominado MinCut, apoiado em uma ferramenta de otimização por funções submodulares. O procedimento se encontra descrito a seguir:

- A Rede é dividida em clusters (subredes) em função do número de sensores existentes;
- Para cada subrede, calcula-se a cardinalidade de corte mínimo “i”, utilizando o teorema de MinCut através da ferramenta de otimização por funções submodulares (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”.
- Identificar as arestas que foram cortadas.
- O número de conjuntos de corte mínimo “ M_i ” da referida cardinalidade “i” é calculado através da equação (1), 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.

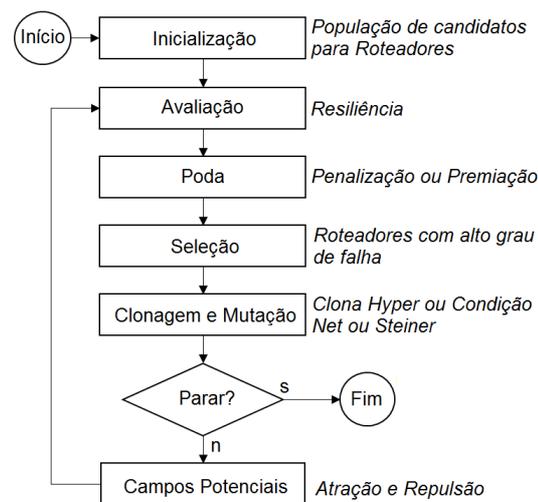


Figura 2 – Modelo do POSIMNET-R

- A probabilidade da subrede se desconectar é calculada através da equação (2), publicada em (Ball e Provan, 1983), supondo que a probabilidade de falha em cada aresta seja “p”.
- A probabilidade de falha de cada subrede mencionada acima é distribuída por entre seus respectivos roteadores.
- 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.

$$M_i = \binom{e(G_s)}{i} \quad (1)$$

$$P(G, \rho) = \sum_{k=i}^{e(G_i)} M_i \rho^k (1 - \rho)^{e(G_i) - k} \quad (2)$$

5.3 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.

5.4 Seleção

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 (3) foi utilizada para gerar a curva da função de distribuição de probabilidade exponencial, dando maiores chances aos roteadores mal avaliados através da Afinidade “x”.

$$y = f(x|3) = \frac{1}{3} e^{-\frac{x}{3}} \quad (3)$$

5.5 Operador de Mutação Steiner

O processo de mutação ocorre em conjunto com o processo de clonagem, isto é, clone sofre mutação para ser diferente da célula B que gerou. E, assim como na Fase 1, onde se desenvolveu dois operadores de mutação denominados Hipermutação e Condição NET (Barreira, 2013), na Fase 2 foi desenvolvido um operador de mutação baseado no conceito de nó Steiner. Neste processo, o novo nó é 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 em (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 3, se observa 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 Hops.

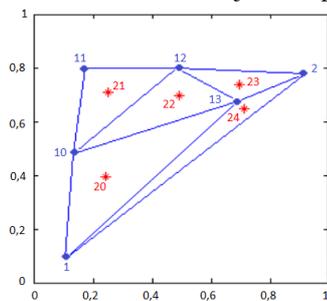


Figura 3 – Incentros (pontos em vermelho) calculados a partir da triangulação de Delaunay

5.6 Campos Potenciais

Conforme apresentado em (Howard, Mataric e Sukhatme, 2002), o posicionamento dos roteadores é influenciado pela ação dos campos potenciais. A ação dos campos potenciais emula os efeitos de estimulação e supressão presentes nas redes imunológicas. Consequentemente, os roteadores são atraídos por sensores críticos, isto é, sensores que não têm o número desejado de caminhos necessários para alcançar o gateway e são repelidos por outros nós roteadores, bem como obstáculos da planta industrial. Cada roteador estará sujeito à ação de forças definidas pelo campo potencial, que são inversamente proporcionais à distância euclidiana entre os roteadores e os demais elementos da rede.

5 Estudos de Caso

Foram realizados 06 Estudos de Caso, a fim de comparar POSIMNET com POSIMNET-R. E os parâmetros adotados, tanto para os cenários POSA (artificial) quanto o de Caso Real, estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros avaliados

Parâmetros	POSIMNET-R (Fase 1)	POSIMNET-R (Fase 2)	
	POSA	POSA	Caso Real
Cenário	POSA	POSA	Caso Real
Número de Experimentos	30	30	30
Número de Gerações	300	300	300
Número inicial de Roteadores	58	58	58
Número inicial de Recursos	10	10	10
Número de Caminhos redundantes	2	2	2
Número Máximo de Roteadores	Adaptável ao Cenário	Adaptável ao Cenário	Adaptável ao Cenário
Raio de alcance	0,1	0,1	80 metros
Tipo de Caminho	Arestas disjuntas	Arestas disjuntas	Arestas disjuntas
Afinidade	Grau de Falha	Probabilidade de Falha	Probabilidade de Falha
Operador de Mutação	- Clona Hyper - Condição NET	- Clona Hyper - Condição NET - Steiner	- Steiner



Figura 4 – Desempenho dos Operadores de mutação em cada modelo

Dos estudos de caso realizados, tanto no POSIMNET onde a avaliação foi obtida a partir do Grau de falhas através de buscas exaustivas simulando falhas simples quanto no POSIMNET-R onde a

Probabilidade de falhas foi obtida a partir do teorema de MinCut da teoria de grafos utilizando a ferramenta de otimização por funções submodulares, pode-se observar no gráfico da Figura 4 que o POSIMNET-R obteve resultados melhores a partir da média e o desvio padrão dos 30 experimentos. E, através da Tabela 2 observa-se que o operador de Mutação *Steiner* se destaca, com o menor número de *Hops*, tendo sido competitivo quanto à Resiliência utilizando o menor número de nós roteadores.

Para complementar, como já mencionado, o POSIMNET-R adquiriu o recurso para analisar múltiplas falhas aleatórias e independentes, representado no gráfico da Figura 5, que compara as redes desenvolvidas pelos operadores de mutação que obtiveram a melhor performance a partir de cada modelo. São eles: Condição NET (POSIMNET) e *Steiner* (POSIMNET-R).

Tabela 2 - Resultados obtidos do POSA

Resultados	POSIMNET-R (Fase 1)		POSIMNET-R (Fase 2)		
	Clona Hyper	Condição NET	Clona Hyper	Condição NET	STEINER
NN	32,30(1,66)	32,77(1,65)	30,00(1,44)	30,20(1,45)	29,73(2,07)
NR	27,30(1,66)	27,77(1,65)	25,00(1,44)	25,20(1,45)	24,73(2,07)
SC	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
MGFR	14,58(4,74)	14,17(4,32)	22,50(5,09)	21,25(5,83)	20,83(5,99)
NRMGF	13,60(5,90)	14,87(5,67)	5,47(7,94)	7,43(9,25)	8,00(9,76)
NMRReTx	2,07(0,58)	2,17(0,53)	2,07(0,25)	2,07(0,25)	1,87(0,35)
NMRReTx	4,43(8,14)	2,60(4,52)	2,83(1,18)	3,00(1,26)	5,47(8,46)
MGHops	80,29(8,15)	78,22(6,75)	83,69(4,49)	82,44(5,03)	88,53(6,78)
MPFR	17,71(4,62)	17,65(4,09)	9,42(0,56)	9,23(0,54)	9,50(0,47)
RESIL	82,23(4,69)	82,30(4,14)	90,56(0,56)	90,75(0,54)	90,48(0,47)
NHops	5(0)	5(0)	5(0)	5(0)	4(0)

Obs.: As siglas referentes aos Resultados da Tabela 2 significam: NN (Número de Nós); NR (Número de Roteadores); SC (Sensores Críticos); MGFR (Média do Grau de Falha da Rede); NRMGF (Número de Roteadores com Máximo Grau de Falha); NMRReTx (Número Máximo de Retransmissões); NMRReTx (Número Máximo de Roteadores que Retransmitem); MGHops (Média do Grau de *Hops*); MPFR (Média da Probabilidade de Falha da Rede, via MinCut); RESIL (Resiliência da Rede = $(1 - MPFR)$) e NHops (Número de *Hops*).

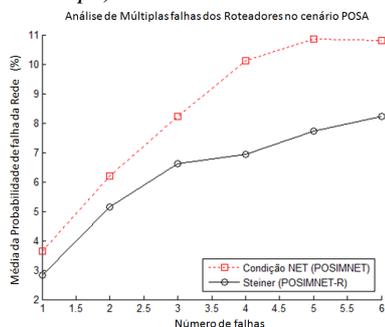


Figura 5 – Análise de Múltiplas falhas das Redes desenvolvidas no cenário POSA pelos melhores operadores de cada uma das duas fases.

As Figuras 6 e 7 representam duas RSSFs desenvolvidas dentro do cenário POSA, pelos operadores de mutação que tiveram o melhor desempenho no

POSIMNET (Barreira, 2013) e no POSIMNET-R, onde o *Gateway* é o nó 1, os Sensores são representados pelos nós de 2 à 5 e os Roteadores, pelos demais nós. A seguir, os resultados de cada RSSF: POSIMNET utilizando o operador Condição NET projetou uma rede com o Número de Roteadores = 29, Resiliência = 87,13% e Grau de *Hops* = 73,69%. POSIMNET-R utilizando o operador *Steiner* projetou uma rede com o Número de Roteadores = 20, Resiliência = 90,58% e Grau de *Hops* = 100%.

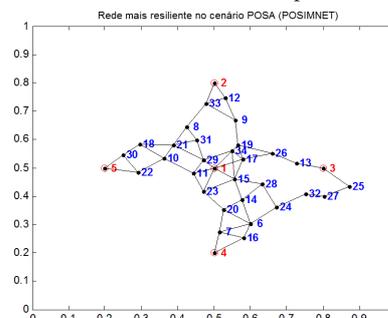


Figura 6 – RSSF desenvolvida no POSIMNET (Condição NET)

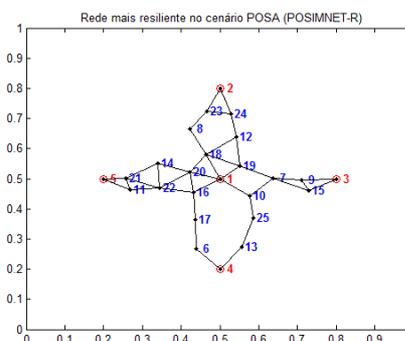


Figura 7 – RSSF desenvolvida no POSIMNET-R (*Steiner*)

A Figura 8 representa foto de um cenário real, extraída através do *Google Earth* de uma suposta Refinaria e à sua direita uma RSSF projetada para ela, a partir do operador de mutação *Steiner* do POSIMNET-R, onde o *Gateway* é o nó 1, os Sensores são representados pelos nós de 2 ao 7 e os Roteadores pelos demais nós. A conectividade foi obtida com 77 roteadores, com uma resiliência de 78,52% e média de Grau de *Hops* de 87,73%.

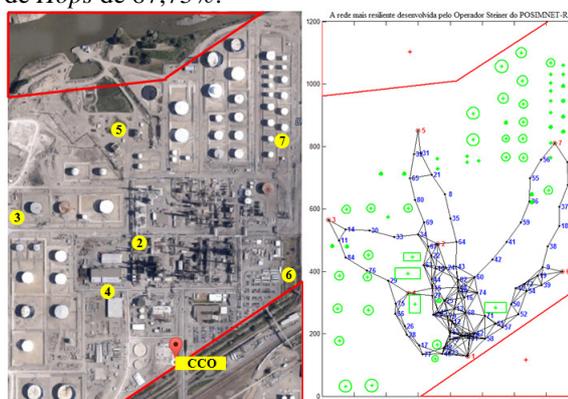


Figura 8 – Foto de um suposta Refinaria (extraída do Google Earth), juntamente com sua RSSF desenvolvida.

6 Conclusão

O advento da Indústria 4.0 e o uso dos conceitos de *Internet of Everything* (IoE) em ambientes industriais exigem a interação entre sensores sem fio distribuídos, atuadores e controladores, que formam uma RSSF. Nesse contexto, novas tecnologias precisam ser desenvolvidas para lidar com os principais aspectos, como segurança, confiabilidade, disponibilidade, robustez e desempenho dessas RSSFs.

Este trabalho apresenta uma abordagem inspirada no Sistema Imunológico Artificial que vem sendo desenvolvida nos últimos anos por nossa equipe com o objetivo de criar redes resilientes. Os resultados demonstraram a capacidade de gerar projetos de rede com: maior Qualidade de Serviço, baixo número de roteadores e baixa probabilidade de falha de rede. Os experimentos mostraram que o POSIMNET-R com o operador de mutação de *Steiner* obteve os melhores projetos de rede. Além disso, as simulações de múltiplas falhas aleatórias e independentes permitem que o projetista avalie o desempenho da rede sob condições de falha pesada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao InovUERJ pelo apoio financeiro dado através do Projeto QUALITEC.

Referências Bibliográficas

- Akyildiz, I. F.; Vuran, M. C. (2010). *Wireless Sensor Networks*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons.
- Aurélio. (2018). Resiliência. Disponível em: <<https://dicionarioaurelio.com/resiliencia>>. Acesso em: 2018-01-12.
- Ball, M. O., & Provan, J. S. (1983). Calculating bounds on reachability and connectedness in stochastic networks. *Networks*, 13(2), 253-278.
- Barreira, L. F. de A. (2013). Determinação de posicionamento de nós roteadores em redes sem fio utilizando redes imunológicas.
- Costa, M. S.; Amaral, J. L. M.. (2010), Uma Ferramenta para Análise do Posicionamento de Nós de Redes sem Fio Aplicadas em Automação Industrial. In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010. p. 1521-1527.
- Costa, M. S.; Amaral, J. L. M. do. (2012). Análise de redes sem fio industriais ISA100 x WirelessHart. *Intech*, n. vol. 140, p. p. 61-67.
- De Castro, L. N., & Von Zuben, F. J. (1999). Artificial immune systems: Part I—basic theory and applications. *Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de*, Tech. Rep, 210(1).
- Delaunay, B. (1934). Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, 7(793-800), 1-2.
- Gilbert, E. N., & Pollak, H. O. (1968). Steiner minimal trees. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 16(1), 1-29.
- Han, G., Liu, L., Jiang, J., Shu, L., & Hancke, G. (2017). Analysis of energy-efficient connected target coverage algorithms for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(1), 135-143.
- Howard, A., Matarić, M. J., & Sukhatme, G. S. (2002). Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem. In *Distributed Autonomous Robotic Systems 5* (pp. 299-308). Springer, Tokyo.
- Krause, A., (2010). SFO: A toolbox for submodular function optimization. *Journal of Machine Learning Research*, n. 11, p. 1141-1144.
- Neal, M. (2002, September). An artificial immune system for continuous analysis of time-varying data. In *1st International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS)*, University of Kent at Canterbury, UK.
- Shahi, B., Dahal, S., Mishra, A., Kumar, S. V., & Kumar, C. P. (2016). A Review Over Genetic Algorithm and Application of Wireless Network Systems. *Procedia Computer Science*, 78, 431-438.
- Soares, C. A. R.; Costa, M. S.; Amaral, J. L. M., (2018). A Review of Wireless Industrial Automation Standards: Main Features, Open Issues and New Trends. [S.l.]: Nova Science Pub Inc. ISBN 9781536126051.
- Soares, Carlos A. R. (2018). POSIMNET-R: Uma ferramenta de apoio a projeto de redes sem fio resilientes para automação industrial. (Dissertação de mestrado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ).
- Sterbenz, J. P., Hutchison, D., Çetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J. P., Schöller, M., & Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, 54(8), 1245-1265.
- Younis, M.; Senturk, I.F.; Akkaya, K.; Lee, S. and Senel, F. (2014). Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, n. 58, p. 254-283.
- Zuo, Y., Ling, Z., & Yuan, Y. (2013). A hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013(1), 82.