



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
DE COMPUTAÇÃO



# **Sistema para auxílio em instalação e manutenção de redes industriais sem fio voltado para aplicação de controle**

**Anderson Costa Silva dos Santos**

Orientador: Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto (DCA/UFRN)

**Tese de Doutorado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Engenharia de Computação) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de ordem PPgEEC: D266  
Natal, RN, dezembro de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Santos, Anderson Costa Silva dos.

Sistema para auxílio em instalação e manutenção de redes industriais sem fio voltado para aplicação de controle / Anderson Costa Silva Dos Santos. - 2019.

74f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2020.

Orientador: Dr. Adrião Duarte Dória Neto.

1. Redes industriais sem fio - Tese. 2. WirelessHART - Tese. 3. ISA100.11a - Tese. 4. Algoritmo genético multiobjetivo - Tese. 5. Controle - Tese. I. Dória Neto, Adrião Duarte. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 004.725.5

# **Sistema para auxílio em instalação e manutenção de redes industriais sem fio voltado para aplicação de controle**

**Anderson Costa Silva dos Santos**

Tese de Doutorado aprovada em 27 de dezembro de 2019 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto (orientador) ..... DCA/UFRN

---

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli ..... DCA/UFRN

---

Prof. Dr. Jorge Dantas de Melo ..... DCA/UFRN

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Danielle Simone da Silva Casillo ..... UFRSA

---

Dr. Daniel Lopes Martins ..... LAMP/UFRN



*Aos meus pais que sempre estiveram  
preocupados com minha formação e  
me deram apoio e carinho em todos  
os momentos de minha vida.*



---

# Agradecimentos

---

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelo dom da vida e por sempre iluminar meus caminhos.

Aos meus pais que me ensinaram a viver com dignidade, além de terem se doado inteiramente e renunciado aos seus sonhos para que eu realizasse os meus e por tudo que têm feito para tornar minha vida melhor a cada dia.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio em todas as situações independentemente das dificuldades.

A todos os meus colegas do Laboratório de Automação em Petróleo e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, que de alguma maneira me ajudaram a solucionar os problemas encontrados nessa trajetória.

A todos os professores e colegas, que estão na pós-graduação, pelo conhecimento repassado e pela cobrança para que minha formação acadêmica tivesse uma base cada vez mais sólida. Em especial a Adrião Duarte, Daniel Lopes e Heitor Florêncio, que colaboraram diretamente no desenvolvimento desta tese.

E a todos que de uma forma ou de outra colaboraram para que eu conseguisse chegar até esta fase, o meu muito obrigado!



---

# Resumo

---

Nos dias atuais, a comunicação sem fio tem despertado interesse e está se tornando uma tendência nos ambientes industriais. Em parte, esse interesse se deve às facilidades de implantação e manutenção desse tipo de rede, que dispensam projetos sofisticados e execução de obras de implantação de cabos, que em ambiente industrial muitas vezes têm custos proibitivos, além de permitir a criação de aplicações que não eram possíveis com as tecnologias legadas. Apesar dos benefícios diretos, desafios técnicos (confiabilidade, autonomia de recursos energéticos, interferência do ambiente) e culturais se apresentam como os principais pontos negativos para a implantação de redes industriais sem fio em larga escala na indústria. Pensando em diminuir esses problemas, esta tese vem apresentar um sistema com modelagem multiobjetivo para auxílio em instalação e manutenção (em tempo real) de dispositivos - tanto sensores quanto atuadores - em redes industriais sem fio, possibilitando a utilização de controladores nessas redes com troca de pacotes dentro do tempo especificado para amostragem, com ênfase especialmente nos padrões WirelessHART e ISA100.11a, que se apresentam como os mais promissores para solução de redes industriais sem fio.

**Palavras-chave:** Redes Industriais Sem Fio, WirelessHART, ISA100.11a, Algoritmo Genético Multiobjetivo, Controle.



---

# Abstract

---

Nowadays, wireless communication has aroused interest and is a tendency in industry environments. In part this interest is due to the ease of deployment and maintenance of this network, which dispenses sophisticated designs and execution of works of deploying cables, which in industrial environment often prohibitively expensive, and enabling the addition of new applications when compared to their wired counterparts. Despite its high degree of applicability, a wireless network faces some technical (reliability, energy consumption, environment interference) and cultural challenges present as the main negative points for the deployment of large-scale industrial wireless networks in the industry. To reduce some these problems, this work presents a system with multiobjective modeling to aid installation and maintenance (real time) of devices - sensors and actuators - in industrial wireless networks, allowing the use of controllers in these networks whose packet exchange within the sampling time, with emphasis on WirelessHART and ISA100.11a standards, which presents themselves as the most promising solution for industrial wireless networks.

**Keywords:** Industrial Wireless Networks, WirelessHART, ISA100.11a, Multi-objective Genetic Algorithm, Control.



---

# Sumário

---

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Sumário</b>                                               | <b>i</b>   |
| <b>Lista de Figuras</b>                                      | <b>iii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                      | <b>v</b>   |
| <b>1 Introdução</b>                                          | <b>1</b>   |
| 1.1 Redes Industriais Sem Fio . . . . .                      | 1          |
| 1.1.1 Primeiras Tecnologias . . . . .                        | 2          |
| 1.1.2 Ethernet Industrial . . . . .                          | 3          |
| 1.1.3 O Surgimento de Protocolos Sem Fio . . . . .           | 4          |
| 1.2 Motivação . . . . .                                      | 5          |
| 1.3 Objetivo . . . . .                                       | 6          |
| 1.4 Contribuições . . . . .                                  | 7          |
| 1.5 Organização da Tese . . . . .                            | 7          |
| <b>2 Estado da Arte</b>                                      | <b>9</b>   |
| 2.1 Protocolos de Comunicação . . . . .                      | 9          |
| 2.1.1 HART . . . . .                                         | 9          |
| 2.1.2 WirelessHART . . . . .                                 | 12         |
| 2.1.3 ISA100.11a . . . . .                                   | 16         |
| 2.1.4 Comparação entre os Padrões . . . . .                  | 18         |
| 2.2 Otimização Multiobjetivo . . . . .                       | 20         |
| 2.2.1 Conceitos sobre Otimização Multiobjetivo . . . . .     | 20         |
| 2.2.2 Algoritmos Genéticos . . . . .                         | 21         |
| 2.3 Algoritmos Genéticos Multiobjetivo . . . . .             | 24         |
| 2.4 Trabalhos Relacionados . . . . .                         | 26         |
| <b>3 Modelo de otimização para redes industriais sem fio</b> | <b>33</b>  |
| 3.1 Padronização da Rede Industrial Sem Fio . . . . .        | 33         |
| 3.2 Modelo de Propagação . . . . .                           | 35         |
| 3.3 Rotas Disjuntas . . . . .                                | 36         |
| 3.4 Rotas Disjuntas entre Vizinhos . . . . .                 | 37         |
| 3.5 Média da Potência de Recepção . . . . .                  | 38         |
| 3.6 Modelo Matemático Multiobjetivo . . . . .                | 38         |

|          |                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>Metodologia dos Experimentos e Resultados</b> | <b>45</b> |
| 4.1      | Metodologia dos Experimentos . . . . .           | 45        |
| 4.2      | BR-WirelessExpert 2.0 . . . . .                  | 46        |
| 4.3      | Resultados . . . . .                             | 49        |
| 4.3.1    | Primeiro Cenário . . . . .                       | 49        |
| 4.3.2    | Segundo Cenário . . . . .                        | 57        |
| 4.3.3    | Terceiro Cenário . . . . .                       | 64        |
| <b>5</b> | <b>Conclusão</b>                                 | <b>67</b> |
| 5.1      | Trabalhos Futuros . . . . .                      | 68        |
|          | <b>Referências bibliográficas</b>                | <b>70</b> |

---

# Lista de Figuras

---

|      |                                                                                                                       |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Evolução das redes de chão-de-fábrica. . . . .                                                                        | 2  |
| 1.2  | Pirâmide da automação - modelo hierárquico representando os diversos níveis da automação industrial. . . . .          | 3  |
| 2.1  | Chaveamento por Deslocamento de Frequência (FSK). . . . .                                                             | 10 |
| 2.2  | Dois canais de comunicação. . . . .                                                                                   | 11 |
| 2.3  | Mestres primários e secundários. . . . .                                                                              | 11 |
| 2.4  | Dispositivos WirelessHART. . . . .                                                                                    | 13 |
| 2.5  | Uma típica rede ISA100.11a. . . . .                                                                                   | 16 |
| 2.6  | Representação do conceito de dominância no espaço dos objetivos. . . . .                                              | 21 |
| 2.7  | Estrutura de funcionamento de um algoritmo genético tradicional. . . . .                                              | 23 |
| 2.8  | Fronteiras com <i>rank</i> e distância de aglomeração do NSGA-II. . . . .                                             | 26 |
| 2.9  | Algoritmo <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> (NSGA-II). . . . .                                        | 27 |
| 3.1  | Rotas disjuntas. . . . .                                                                                              | 36 |
| 3.2  | Rotas disjuntas entre instrumentos. . . . .                                                                           | 37 |
| 3.3  | Fluxograma do sistema desenvolvido. . . . .                                                                           | 42 |
| 4.1  | Topologia da rede. . . . .                                                                                            | 48 |
| 4.2  | Lista de dispositivos. . . . .                                                                                        | 48 |
| 4.3  | Links da rede. . . . .                                                                                                | 49 |
| 4.4  | Estado inicial da rede no primeiro cenário. . . . .                                                                   | 50 |
| 4.5  | Topologia da rede para o primeiro cenário. . . . .                                                                    | 54 |
| 4.6  | Fronteira de Pareto para o primeiro cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas por instrumento. . . . .    | 55 |
| 4.7  | Fronteira de Pareto para o primeiro cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos. . . . . | 55 |
| 4.8  | Fronteira de Pareto para o primeiro cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas por instrumento. . . . .     | 56 |
| 4.9  | Fronteira de Pareto para o primeiro cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos. . . . .  | 56 |
| 4.10 | Estado inicial da rede no segundo cenário. . . . .                                                                    | 57 |
| 4.11 | Localização dos dispositivos na rede no segundo cenário. . . . .                                                      | 61 |
| 4.12 | Fronteira de Pareto para o segundo cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas por instrumento. . . . .     | 62 |
| 4.13 | Fronteira de Pareto para o segundo cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos. . . . .  | 62 |

|      |                                                                                                                     |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.14 | Fronteira de Pareto para o segundo cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas por instrumento. . . . .    | 63 |
| 4.15 | Fronteira de Pareto para o segundo cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos. . . . . | 64 |
| 4.16 | Topologia após adição do roteador R73. . . . .                                                                      | 65 |
| 4.17 | Topologia após R39 ter baixo nível de sinal recebido. . . . .                                                       | 66 |

---

# Lista de Tabelas

---

|     |                                                                                             |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Comparações entre os padrões de comunicação industriais. . . . .                            | 19 |
| 4.1 | Parâmetros utilizados nos testes. . . . .                                                   | 47 |
| 4.2 | Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo proposto para o primeiro cenário. . . . .      | 51 |
| 4.3 | Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo de comparação para o primeiro cenário. . . . . | 52 |
| 4.4 | Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo proposto para o segundo cenário. . . . .       | 58 |
| 4.5 | Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo de comparação para o segundo cenário. . . . .  | 59 |



---

# Capítulo 1

## Introdução

---

As redes industriais, também chamadas de redes de chão-de-fábrica, foram especificamente desenvolvidas para automação industrial, sendo portanto, bastante diferentes das redes de computadores tradicionais em relação a dados, padrões de tráfegos, confiabilidade das aplicações, exigências temporais, entre outros fatores (Sauter 2005). Historicamente, as redes industriais foram desenvolvidas a partir de redes de barramento, porém, atualmente existem diversas pesquisas relacionadas à inserção do *Ethernet* e redes sem fio para ambientes industriais.

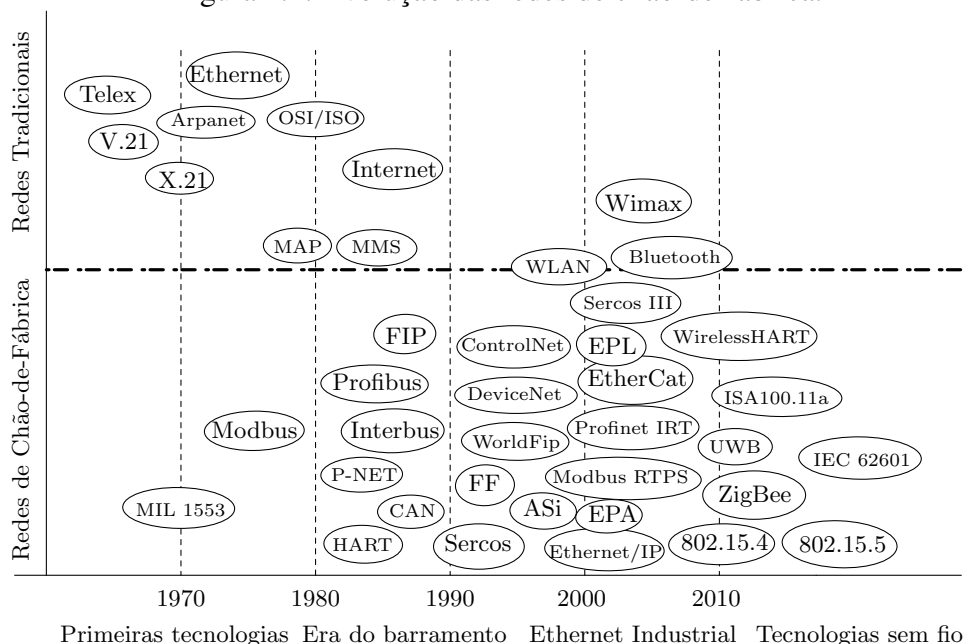
O objetivo desse capítulo é descrever os principais desafios das tecnologias de comunicação sem fio quando inseridas em ambientes industriais. Ao final do capítulo serão descritos a motivação e os objetivos deste trabalho, além da organização do respectivo documento.

### 1.1 Redes Industriais Sem Fio

As redes de chão-de-fábrica são redes que operam no nível das plantas industriais, fornecendo a comunicação entre os dispositivos mais básicos (sensores, atuadores) e os dispositivos de alto nível (controladores lógicos programáveis e computadores de supervisão). Quando comparadas com as redes de computadores tradicionais, as redes de chão-de-fábrica apresentam diferenças principalmente associadas aos dados transmitidos, padrão de tráfego, confiabilidade das aplicações e exigências rígidas de tempo real (Gungor & Lambert 2006).

A diferença entre as redes de chão-de-fábrica e as redes tradicionais são motivadas principalmente pela limitação das tecnologias utilizadas e dos requisitos das aplicações. Entretanto, o avanço tecnológico tem criado uma estrutura adequada para estender as redes originalmente projetadas para serem instaladas em escritórios (*Ethernet* e soluções sem fio) em ambientes industriais. Para compreender melhor esse contexto é necessário observar toda a evolução das redes de chão-de-fábrica, desde as tecnologias mais primitivas até a utilização das redes sem fio. A Figura 1.1 é um exemplo de tal abordagem, onde as diferentes tecnologias de comunicação para redes de chão-de-fábrica são organizadas cronologicamente de acordo com essa evolução.

Figura 1.1: Evolução das redes de chão-de-fábrica.



(Sauter 2010)

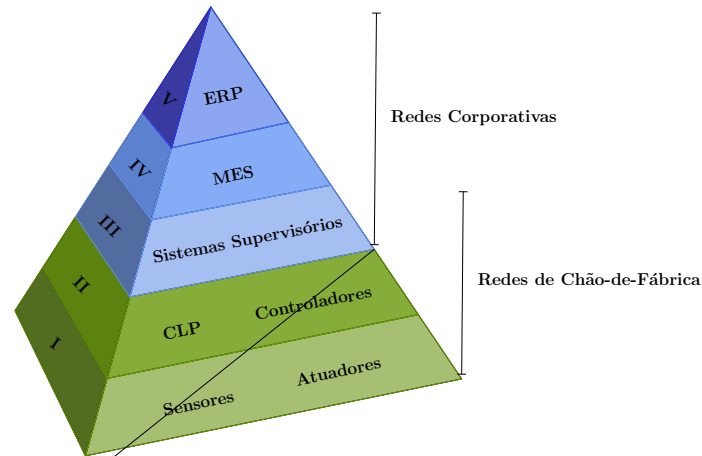
### 1.1.1 Primeiras Tecnologias

Embora a origem das redes de chão-de-fábrica datam de 30 anos atrás, os conceitos por trás dessas redes são muito mais antigos e remontam às redes Telex e às primeiras tecnologias usadas nas redes de telecomunicações (V.21 e X.21) (Sauter 2005). As redes de chão-de-fábrica foram criadas com a finalidade de disponibilizar as informações presentes no mais baixo nível das plantas industriais para toda a companhia. Essa demanda resultou em um modelo hierárquico representado pela pirâmide da automação, como descrito na Figura 1.2. Nesse modelo, as camadas inferiores são interligadas pelas redes de chão-de-fábrica, enquanto que as camadas superiores estão sob influência das redes corporativas. A comunicação entre as redes de chão-de-fábrica e as redes corporativas são geralmente realizadas nas camadas intermediárias através de dispositivos específicos para essa finalidade.

Durante as décadas de 80 e 90, diversas soluções proprietárias para redes de chão-de-fábrica foram desenvolvidas. Essas soluções eram dedicadas a aplicações específicas e redes de diferentes fabricantes eram incompatíveis. Se analisarmos a evolução dessas redes do ponto de vista da padronização, é possível perceber a influência direta do modelo OSI/ISO (Open System Interconnection/International Organization for Standardization ou Interconexão de Sistemas Abertos/Organização Internacional para Padronização). Esse modelo serviu de base para que protocolos fossem desenvolvidos com a finalidade de realizar a comunicação entre redes de diferentes fabricantes.

No geral, a tentativa de criar um protocolo universal para as redes de chão-de-fábrica

Figura 1.2: Pirâmide da automação - modelo hierárquico representando os diversos níveis da automação industrial.



fracassou. Essa busca tecnológica durou aproximadamente 16 anos (1986-2002) (Felser & Sauter 2002). Inicialmente, França (FIP) e Alemanha (PROFIBUS) disputaram a escolha da solução universal para as redes de chão-de-fábrica. Entretanto, o FIP e o PROFIBUS propuseram padrões que se complementavam. Algumas tentativas foram feitas com o objetivo de incrementar o PROFIBUS com as funcionalidades propostas pelo FIP e vice-versa (ISP, WorldFIP). Em 1995, diversas empresas, na sua grande maioria empresas americanas, decidiram não esperar por uma solução universal oriunda da combinação entre o FIP e PROFIBUS, criando a definição de um novo protocolo, o Foundation Fieldbus. No final, o objetivo de criar um protocolo universal para as redes de chão-de-fábrica foi abandonado com o surgimento dos padrões IEC (International Electrotechnical Commission) 61158 e IEC (International Electrotechnical Commission) 61784, os quais acomodavam todos protocolos de redes de chão-de-fábrica existentes (Felser 2002).

### 1.1.2 Ethernet Industrial

Baseado na pirâmide da automação, descrita na Figura 1.2, verifica-se que os dispositivos de chão-de-fábrica (sensores e atuadores) e as aplicações de alto nível são interligados por diferentes redes. Se um mesmo tipo de rede fosse utilizado para essa finalidade, a pirâmide da automação seria muito mais simples, eliminando a necessidade de equipamentos adicionais (pontes) para converter diferentes protocolos. Uma escolha natural para simplificar a comunicação dos equipamentos seria utilizar a própria rede corporativa da companhia. O motivo dessa solução é decorrente do fato que as redes corporativas já estão conectadas com as aplicações de alto nível, dessa forma o acesso às informações de chão-de-fábrica poderia ser realizado de uma maneira mais flexível. Adicionalmente, as redes corporativas, que por sua vez são baseadas no protocolo *Ethernet*, já alcançaram um nível de maturidade considerável em relação à confiabilidade dos equipamentos desenvolvidos. Em aplicações industriais a confiabilidade é uma exigência fundamental, haja vista que falhas nos equipamentos podem provocar danos ao meio ambiente e expor operadores a situações de risco (Rahimi et al. 2011).

O padrão *Ethernet*, desde sua criação, tem atraído potencial interesse de pesquisadores com o objetivo de adaptar o referido protocolo para ambientes industriais (Potter 1999, Montague 2001, Vitturi 2001, Felser & Sauter 2004, Urli & Murgia 2011). No início, ainda na década de 80, as empresas tinham uma certa resistência em adotar o *Ethernet* em suas aplicações industriais devido ao protocolo não apresentar características de tempo real. A saber, se duas estações estão esperando uma terceira estação liberar o meio de transmissão, é impossível estimar de forma determinística qual estação irá transmitir. Uma contribuição para mudar esse cenário ocorreu em 1997, quando o *Ethernet Full Duplex* foi criado (IEEE-802.3x 1997). A padronização do *Ethernet Full Duplex* permitiu a criação de um novo equipamento, o *Switch Ethernet*. Esse equipamento eliminou as colisões na rede e trouxe benefícios para inserção do *Ethernet* em ambientes industriais.

### 1.1.3 O Surgimento de Protocolos Sem Fio

O surgimento das tecnologias de redes industriais sem fio foi uma evolução natural das primeiras tecnologias de comunicação industrial desenvolvidas, que usavam cabos como meio de transmissão. A proposta de eliminar o cabeamento e utilizar um novo paradigma na transmissão dos dados em ambientes industriais não é recente, por exemplo, Lessard & Gerla (1988) desenvolveram um dos primeiros trabalhos nessa área na tentativa de comunicar dispositivos industriais por infravermelho. Entretanto, apenas nos últimos anos a demanda por tecnologias sem fio na industrial tem se intensificado.

O uso de tecnologias de comunicação sem fio em ambientes industriais sempre foi visto com grande ceticismo por parte das companhias. Esse cenário foi criado principalmente pela baixa confiabilidade do canal de comunicação, uma vez que os equipamentos são instalados em áreas sujeitas à influência de agentes externos (ruídos, interferências, clima adverso, obstáculos naturais), que podem provocar erros em taxas superiores aos das tecnologias cabeadas (Bai & Atiquzzaman 2003).

Outro desafio a ser observado está relacionado com a coexistência de diferentes tecnologias no mesmo ambiente. Devido ao meio de transmissão das tecnologias de comunicação sem fio ser aberto, poderá existir situações onde tecnologias diferentes compartilhem a mesma faixa de frequência. Assim, é importante que mesmo coexistindo num mesmo ambiente, diferentes tecnologias possam operar sem que uma não interfira na outra. Essa característica é fundamental para garantir o dinamismo das aplicações.

Apesar de todos esses desafios, com a evolução das tecnologias de comunicação, novos mecanismos foram desenvolvidos para garantir a confiabilidade das redes sem fio (modulação e codificação, escalonamento determinístico, saltos de frequências e topologias redundantes), tornando sua utilização acessível aos ambientes industriais (Gungor & Hancke 2009, Han et al. 2011).

Uma vantagem imediata em utilizar uma tecnologia de comunicação sem fio para ambientes industriais está na eliminação do cabeamento. Segundo Colpo & Mols (2011), o uso de equipamentos sem fio podem reduzir os custos de instalação entre 50-90%, quando comparados com cenários onde dispositivos cabeados são utilizados.

## 1.2 Motivação

Nos dias atuais a comunicação sem fio é uma tendência nos ambientes industriais, reduzindo custos e permitindo a criação de aplicações que não eram possíveis com as tecnologias legadas. Nesse contexto, as especificações WirelessHART e ISA100.11a estão emergindo como soluções padrão. Apesar dos benefícios diretos, essas redes apresentam uma série de desafios técnicos (confiabilidade, consumo de energia, interferência do ambiente) e culturais que dificultam a utilização de controladores nesse tipo de redes. Sendo assim, a demanda para o desenvolvimento de ferramentas para avaliar e garantir a confiabilidade em malhas de controle torna-se iminente.

Um dos objetivos desse novo paradigma de comunicação é reduzir os custos relacionados com instalação, peso (plataformas *offshore*), manutenção e escalabilidade das aplicações, além de permitir o monitoramento de novos processos que antes era inviável com a tecnologia de comunicação tradicional. Outro benefício é a flexibilização de testes, os quais podem ser realizados mais rapidamente, reduzindo os custos operacionais (operadores, parada da planta, permanência em áreas de risco).

Por outro lado, as tecnologias de comunicação sem fio adaptadas para o ambiente industrial apresentam uma série de desafios como, por exemplo, a confiabilidade. Devido ao meio de transmissão das tecnologias de comunicação sem fio ser o ar, problemas como diminuição na qualidade do sinal transmitido, múltiplos caminhos e interferência podem ocorrer. Técnicas de diversidade de frequência, lista negra de canais, roteamento em múltiplos caminhos e topologias *mesh* são adotadas pelos padrões na tentativa de mitigar esses problemas. Um desafio iminente é que os controles de processos necessitam de grande confiabilidade na entrega dos pacotes e da disponibilidade das rotas usadas (e seus *links*) para tráfego dos pacotes com dados de controle dentro do tempo requisitado no projeto do controlador. Caso a perda de pacotes em um determinado *link* esteja alta ou o nível do sinal de recepção de um determinado dispositivo esteja abaixo do limiar aceitável, haverá perda de pacotes durante a transmissão, ocasionando a retransmissão e um aumento no tempo de tráfego dos pacotes.

Portanto, torna-se fundamental a análise desses aspectos, já que os ambientes industriais são repletos de processos a serem controlados, impedindo que as redes industriais sem fio sejam utilizadas apenas para monitoramento de processos, mas sim, permitindo o aumento na confiabilidade da comunicação e do uso de controladores nessas redes, avaliando dados estatísticos da chegada de pacotes, mudanças na topologia e identificação de pontos críticos que podem nortear importantes métricas na rede (Silva et al. 2012).

Baseado no contexto descrito anteriormente, o uso de uma ferramenta para monitorar os efeitos de instabilidade durante trocas de pacotes dentro de uma rede industrial sem fio com sensores e atuadores possibilitará tomar decisões importantes nas fases de projeto, instalação e manutenção dos dispositivos de forma ágil, permitindo readequar a topologia e o desempenho das redes de acordo com as necessidades dos controladores em plantas industriais. Exemplos de decisões poderiam ser a indicação da melhor localização de dispositivos roteadores de acordo com cada projeto (a topologia pode ser forçada baseada no tipo do dispositivo no instante de comissionamento), criticalidade dos dispositivos (informações estatísticas sobre a entrega de pacotes e nível de sinal de recepção ou da bateria

podem indicar problemas), níveis de redundância (verificar se múltiplos caminhos estão sendo utilizados e a necessidade de inserir dispositivos roteadores) e robustez (garantia de disponibilidade dos *links*, ligações lógicas entre dois dispositivos que permite a troca de pacotes entre eles, da rede e entrega de pacotes de controle de processos). Dependendo da topologia a ser adotada, enlaces de comunicação alternativos podem ser criados entre os dispositivos visando aumentar a confiabilidade da rede e o tempo de vida dos dispositivos. Adicionalmente, se uma análise de fatores que influenciam na qualidade da comunicação - entrega de pacotes e sinal de recepção - é suportada, dispositivos ou *links* críticos podem ser previamente identificados e decisões sobre a melhor estratégia de formação da rede podem ser tomadas desde o início do projeto industrial ou, inclusive, durante o funcionamento da própria rede de forma a garantir que os pacotes com dados de controle sejam trafegados pela rede dentro do tempo estipulado para cada controlador.

### 1.3 Objetivo

Considerando-se a iminente adoção em larga escala das tecnologias de comunicação sem fio em ambientes industriais vinculados a requisitos rígidos de confiabilidade, consumo de energia (já que a maioria dos dispositivos são alimentados por baterias) e interferência do ambiente, esta tese vem apresentar a definição de uma ferramenta (sistema) automatizada baseada em otimização multiobjetivo para auxílio na alocação dos instrumentos de uma rede industrial de sensores e atuadores sem fio desde seu projeto, passando pela sua instalação, até sua manutenção voltada para aplicações de controle. O intuito é prover opções para a otimização da localização de roteadores na rede de forma a aumentar a quantidade de trocas de pacotes com dados de controle em plantas industriais de forma bem sucedida, aumentando também a confiabilidade do uso de controladores nessas redes.

Diante da sua ampla utilização na indústria, os protocolos de comunicação WirelessHART e ISA100.11a serão usados como prova de conceito para validação da ferramenta. Analisando as regras e os procedimentos - definidos pela *HART Communication Foundation* (HCF) a serem adotados pelas empresas durante o processo de instalação dos instrumentos WirelessHART - que têm como objetivo aumentar o grau de redundância de rotas de comunicação na rede e evitar a perda de pacotes de comunicação, percebe-se que os mesmos não foram elaborados visando a otimização das redes em que se precisa aplicar processos de controle. Para esse caso, a HCF não define regras e, no mercado, é indicada a contratação de engenheiros qualificados para análise da implementação dos controladores em redes WirelessHART (Emerson 2016).

Como observado, não há uma solução padrão no mercado para auxiliar na formação e manutenção das redes industriais sem fio quando se necessita aplicar processos de controle nas plantas industriais. E visando diminuir esse problema, o sistema aqui apresentado fornecerá, na etapa de projeto, a topologia da rede adequada para realizar os controles desejados na indústria, além de, na etapa de execução/funcionamento, monitorar a confiabilidade de comunicação entre os dispositivos da rede industrial e definir a necessidade de mudança na topologia em tempo real, instalando novos instrumentos roteadores na rede, ou seja, criando novas rotas de tráfego de dados, de modo a aumentar a

robustez da comunicação.

Assim sendo, o principal objetivo é determinar a quantidade e a localização dos instrumentos roteadores, aumentando a quantidade de rotas para comunicação e sua confiabilidade, sob restrições como locais possíveis de instalação, mínima distância entre o gerenciador da rede e os dispositivos sensores/atuadores, alta disponibilidade para recepção de pacotes, quantidade mínima de rotas disjuntas para um mesmo instrumento e quantidade mínima de rotas disjuntas entre instrumentos e maiores níveis de potência entre os instrumentos de uma rota, sempre utilizando a menor quantidade de instrumentos possível.

## 1.4 Contribuições

Em resumo, as contribuições dessa tese são:

- Modelagem para priorizar as rotas nas quais trafegam os pacotes com os dados para controle das plantas industriais, escolhendo a melhor localização do gerente da rede a fim de criar o máximo de rotas diretas (*link*) entre sensores/atuadores e o gerente da rede e diminuir ao máximo o comprimento dessas rotas, quando for uma rota indireta.
- Modelagem da restrição de comprimento máximo de rota, respeitando o tempo máximo para transmissão e recepção dos pacotes com os dados para controle.
- Modelagem da restrição de disponibilidade das rotas (perda de pacotes e nível do sinal de recepção) para poder criar novas rotas quando houver instabilidade na rede.
- Remodelagem das restrições sobre as combinações de rotas disjuntas propostas em (Martins 2017), possibilitando a criação de novas rotas, quando a comunicação instável (abaixo dos limiares estabelecidos para perda de pacotes e nível do sinal de recepção).
- Atualização de driver com os métodos para comunicação síncrona, através do protocolo IP (Internet Protocol), com dispositivos HART/WirelessHART a fim de obter os dados referentes à perda de pacote nos *links* da rede e nível de sinal de recepção em cada dispositivo, quando a rede está em funcionamento.
- Atualização de driver com os métodos para comunicação síncrona, através do protocolo IP (Internet Protocol), com dispositivos ISA100.11a a fim de obter os dados referentes à perda de pacote nos *links* da rede e nível de sinal de recepção em cada dispositivo, quando a rede está em funcionamento.
- Atualização da topologia da rede em tempo real baseado em dados coletados diretamente da rede, sempre respeitando as restrições de tempo de amostragem dos controladores e a confiabilidade na troca de pacotes na rede.

## 1.5 Organização da Tese

Os capítulos seguintes desse trabalho estão organizados como segue: no capítulo 2 é apresentado o estado da arte com uma descrição teórica sobre os protocolos de comuni-

cação industrial associados ao trabalho e a teoria sobre problemas de otimização multiobjetivo e algoritmos genéticos utilizados para solucionar esses problemas, além de expor alguns trabalhos encontrados na literatura e que são relacionados ao tema dessa tese; o sistema para auxílio em instalação e manutenção de redes industriais sem fio com foco em controle é descrito no capítulo 3; já no capítulo 4 são apresentados os experimentos e os resultados obtidos; por fim, no capítulo 5 é apresentada a conclusão e os trabalhos futuros relacionados ao tema dessa tese.

---

# Capítulo 2

## Estado da Arte

---

Neste capítulo é apresentado o estado da arte referente aos temas abordados nessa tese, sendo eles: os protocolos de comunicação, otimização multiobjetivo e os trabalhos relacionados.

### 2.1 Protocolos de Comunicação

A fundamentação teórica sobre os principais protocolos de comunicação industrial sem fio existentes - nos quais o modelo matemático baseado em otimização multiobjetivo proposto nesse trabalho pode ser aplicado - é apresentada nessa seção.

#### 2.1.1 HART

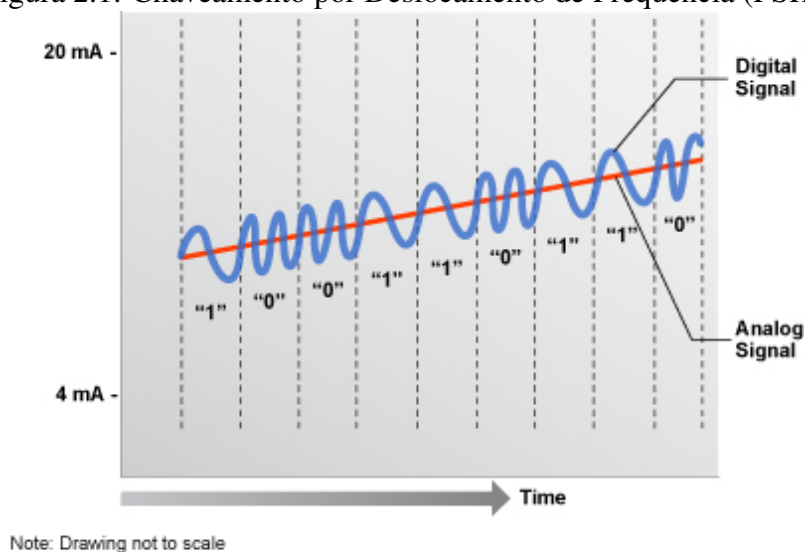
O protocolo HART foi desenvolvido em meados da década de 1980 pela Rosemount Inc. O objetivo principal era desenvolver uma tecnologia que permitisse instrumentos de medição inteligente. HART é a sigla em inglês para *Highway Addressable Remote Transducer* (Via de Dados Endereçável por Transdutor Remoto).

A transmissão de dados é baseada no padrão Bell 202 por FSK (Frequency Shift Keying ou Chaveamento por Deslocamento de Frequência) para sobrepor os sinais de comunicação digital sobre o sinal de 4-20 mA, conforme mostrado na Figura 2.1 (HCF 2013). Isso permite a comunicação de campo bilateral e possibilita que informações adicionais, além da variável normal de processo, sejam comunicadas de/para um instrumento de campo inteligente.

O protocolo HART comunica-se a 1200 bps sem interromper o sinal de 4-20 mA e permite que o aplicativo *host* (mestre) obtenha duas ou mais atualizações digitais por segundo a partir de um dispositivo de campo inteligente. Uma vez que o sinal digital de FSK é de fase contínua, não há interferência com o sinal de 4-20 mA.

A tecnologia HART é um protocolo mestre/escravo, ou seja, o dispositivo de campo inteligente (escravo) somente se manifesta caso solicitado pelo mestre. O protocolo HART pode ser utilizado em vários modos, tais como ponto a ponto ou multiponto, para transmitir informações entre instrumentos de campo inteligentes e sistemas centrais de monitoramento ou controle (Seixas 2013).

Figura 2.1: Chaveamento por Deslocamento de Frequência (FSK).



**Digital over Analog**

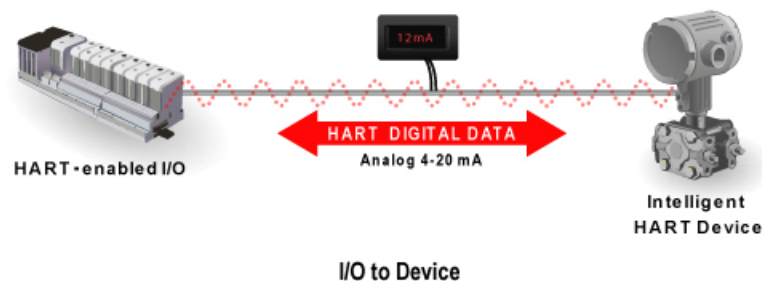
(HCF 2013)

A comunicação HART ocorre entre dois dispositivos habilitados para HART, geralmente um dispositivo de campo inteligente e um sistema de monitoramento ou controle. A comunicação ocorre por meio de cabos de instrumentação padrão, utilizando práticas padrão de fiação e terminação.

O protocolo HART fornece dois canais de comunicação simultâneos: o sinal analógico de 4-20 mA e um sinal digital. O sinal de 4-20 mA transmite o valor primário medido (no caso de um instrumento de campo) utilizando uma malha de corrente de 4-20 mA. As informações adicionais do dispositivo são transmitidas por meio de um sinal digital sobreposto ao sinal analógico. Esse sinal digital contém as informações do dispositivo, tais como status, diagnósticos, valores adicionais medidos ou calculados, etc. Juntos, os dois canais de comunicação oferecem uma solução de comunicação de campo sólida, de fácil utilização e configuração (HCF 2013). A comunicação entre dois dispositivos HART utilizando os dois canais de comunicação pode ser observada na Figura 2.2.

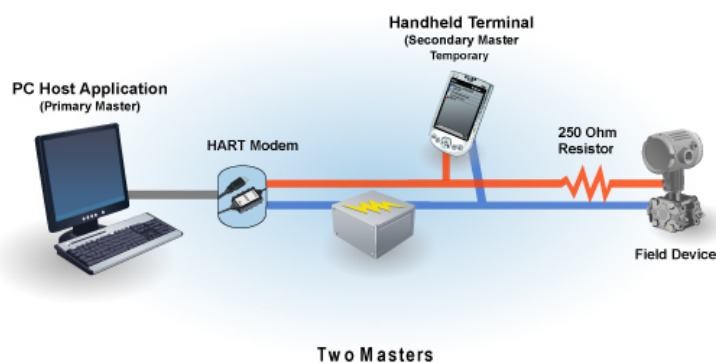
O HART também aceita até dois mestres (primário e secundário). Isto permite que mestres secundários, tais como comunicadores portáteis, sejam utilizados sem interferir nas comunicações recebidas/enviadas pelo mestre primário, ou seja, o sistema de monitoramento/controle. Um exemplo pode ser observado na Figura 2.3, onde a comunicação em azul representa a comunicação entre o mestre primário e o dispositivo de campo e a comunicação em vermelho representa a comunicação entre o mestre secundário e o dispositivo.

Figura 2.2: Dois canais de comunicação.



(HCF 2013)

Figura 2.3: Mestres primários e secundários.



(HCF 2013)

### Benefícios do HART

A tecnologia HART pode ajudar a:

- Alavancar a capacidade de uma série de dados de dispositivos inteligentes para obter melhorias operacionais;
- Receber avisos antecipados sobre as variações de desempenho de dispositivos, produtos e processos;
- Acelerar o tempo despendido entre a identificação e a resolução de problemas;
- Proporcionar a validação contínua da integridade de malhas e estratégias de sistemas de automação/controle;
- Aumentar a produtividade de ativos e a disponibilidade de sistemas;

Aumentar a disponibilidade das instalações:

- Integrar dispositivos e sistemas para a detecção de problemas anteriormente não detectáveis;
- Detectar problemas de conexão de processos e/ou dispositivos em tempo real;
- Minimizar o impacto de desvios graças ao recebimento de alertas novos e antecipados;
- Evitar os altos custos de paradas ou de interrupções não programadas de processos;

Reduzir os custos de manutenção:

- Verificar e validar com rapidez as configurações de dispositivos e malhas de controle;
- Utilizar diagnósticos remotos para reduzir verificações de campo desnecessárias;
- Capturar dados de tendência de desempenho para diagnósticos de manutenção preventiva;
- Reduzir custos de inventários de sobressalentes e de gerenciamento de dispositivos;

Aumentar a conformidade normativa:

- Permitir o registro automatizado de dados de conformidade;
- Facilitar testes automatizados de paradas de segurança;
- Elevar o nível de integridade de segurança com diagnósticos avançados;
- Tirar proveito de dispositivos multivariáveis inteligentes para maior precisão e detalhamento de relatórios.

Os anos de sucesso no aproveitamento dessas vantagens explicam por que a tecnologia HART é uma das principais entre todos os protocolos de comunicação, instalado em mais de 30 milhões de dispositivos em todo o mundo (HCF 2013).

### 2.1.2 WirelessHART

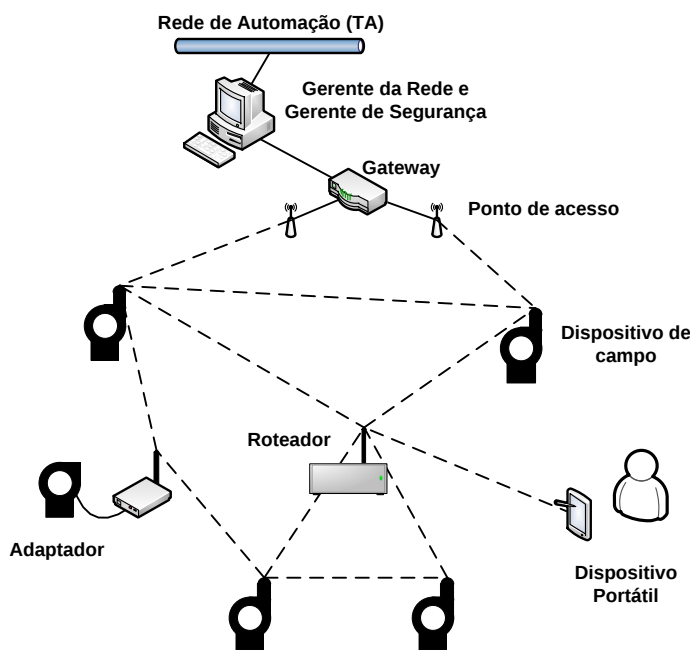
WirelessHART é um padrão de comunicação sem fio desenvolvido pela *HART Communication Foundation* (HCF) com o objetivo de transmitir mensagens HART sem a necessidade de utilizar os meios clássicos de transmissão (4-20 mA ou RS484). Um dispositivo WirelessHART implementa a mesma estrutura de comandos usada por um dispositivo clássico HART RS484. As mesmas aplicações utilizadas no padrão HART são compatíveis com o padrão WirelessHART.

Em setembro de 2008, a especificação WirelessHART (HART 7.1) foi aprovada publicamente pela IEC 62591 (*International Electrotechnical Commission* ou Comissão Eletrotécnica Internacional). WirelessHART foi a primeira tecnologia de comunicação sem fio a obter esse nível de reconhecimento internacional (Song et al. 2008). A versão final da especificação foi concluída no início de 2010 (IEC 2010).

A especificação WirelessHART define 8 tipos de dispositivos como descrito na Figura 2.4: gerente da rede, gerente de segurança, *gateway*, ponto de acesso, dispositivo de campo, adaptador, roteador e dispositivo portátil. Todos os dispositivos são conectados para a rede e implementam mecanismos para suportar a formação, manutenção,

roteamento, segurança e confiabilidade da rede. Entre todos os dispositivos suportados, o gerente da rede é considerado o principal. Instalado fisicamente no *gateway*, o gerente da rede é responsável por controlar todos os eventos na rede (roteamento, escalonamento, alarmes, etc).

Figura 2.4: Dispositivos WirelessHART.



Os dispositivos de campo são os dispositivos WirelessHART mais básicos. Eles estão diretamente conectados aos processos da planta industrial os quais transmitem, recebem e encaminham dados monitorados para outros dispositivos. Eles também podem fazer o roteamento das mensagens.

Roteadores são utilizados para o encaminhamento das mensagens. O uso de roteadores pode criar caminhos redundantes para o *gateway*, além de evitar que dispositivos de campo sejam usados para o roteamento das mensagens e consequentemente maximizando o consumo de energia.

O gerente de segurança é a entidade responsável por assegurar a segurança em toda rede. Ele fornece chaves de comunicação para todos os dispositivos. Essas chaves são usadas para autenticar o dispositivo e criptografar os dados transmitidos.

O gerente da rede tem suas responsabilidades relacionadas ao escalonamento, gerenciamento da lista de dispositivos, roteamento, coletar informações estatísticas sobre o desempenho, detecção de falhas e formação da rede.

### Modelo de Camadas

Uma rede WirelessHART utiliza uma arquitetura baseada na versão simplificada do modelo OSI com apenas 5 camadas. As próximas seções descrevem as principais carac-

terísticas de cada camada.

**Camada Física:** A camada física da especificação WirelessHART é baseada no padrão IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 802.15.4. Dessa forma, um rádio WirelessHART apresenta as mesmas taxas de transmissão, técnicas de modulação e alcance de um rádio IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 802.15.4 com a limitação que apenas 15 canais (11 - 25) são utilizados. O canal 26 não é utilizado por questões regulatórias de alguns países.

**Camada de Enlace:** Uma das tarefas mais importantes da camada de enlace é definir o controle de acesso ao meio e consequentemente o escalonamento dos pacotes a serem enviados. Esse procedimento é realizado através do TDMA (*Time Division Multiple Access* ou Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo) combinado com um mecanismo de saltos de frequência. No TDMA, o tempo é dividido igualmente em janelas de 10 ms chamadas *slots* de tempo. Um conjunto de *slots* de tempo forma um *superframe*. Cada transmissão entre dois dispositivos vizinhos na rede, incluindo o pacote com o dado transmitido e o pacote de confirmação - enviado pelo destinatário, deverá ocorrer dentro de um *slot* de tempo utilizando um dos 15 canais disponíveis. Teoricamente 15 dispositivos podem transmitir ao mesmo tempo.

Com o objetivo de minimizar a influência de interferências (ruídos) na rede e permitir a coexistência com outros padrões (IEEE 802.11, Bluetooth, ZigBee), foi adicionado ao TDMA um mecanismo de saltos de frequência. Cada transmissão na rede utiliza uma frequência diferente (canal), diminuindo assim a probabilidade de escolher um canal ruidoso.

**Camadas de Rede e Transporte:** A camada de rede definida na especificação WirelessHART é o ponto de convergência com a especificação HART. As principais funções dessa camada estão relacionadas ao roteamento (suporte a topologias *mesh*), endereçamento e segurança fim a fim. Por outro lado, a camada de transporte foi definida de uma maneira mais simples que a camada de rede onde o objetivo principal é a transmissão dos dados com confiabilidade fim a fim.

**Camada de Aplicação:** A camada de aplicação tradicionalmente, de acordo com o modelo OSI, fornece uma interface de alto nível para os usuários poderem acessar informações da rede. Adicionalmente, na especificação WirelessHART a camada de aplicação também é responsável pela fragmentação dos dados além de herdar as características da tecnologia legada (HART), onde todos os procedimentos são orientados a comandos.

### Aspectos de Roteamento

Uma rede WirelessHART tem suporte para topologias *mesh*, com o objetivo de se poder criar caminhos redundantes entre os dispositivos e o *gateway*. Nesse sentido, a especificação WirelessHART define quatro tipos de roteamento: roteamento na origem, roteamento em grafo, roteamento baseado no superframe e roteamento de *proxy*. Todos

esses tipos de roteamento utilizam como base informações coletadas pelos dispositivos e passadas para o gerente da rede.

O roteamento é criado pelo gerente da rede e os dispositivos apenas utilizam as configurações que lhe foram atribuídas (Silva et al. 2012). Os dispositivos de campo não apresentam liberdade para escolher a melhor rota em tempo real. Essa é a razão pela qual os dispositivos de campo enviam periodicamente informações da rede para o gerente. Sempre que possível o gerente da rede configura cada transmissão com pelo menos duas opções de roteamento (rota principal e secundária) com o intuito de aumentar a confiabilidade na entrega da informação.

### Formação da Rede

O gerenciador da rede é quem inicia o processo de formação de uma rede WirelessHART criando um canal seguro e confiável de comunicação com o *gateway*. O provisionamento inicial do ponto de acesso será realizado através desse canal, e consiste na passagem das seguintes informações:

- *superframe* de gerenciamento que garante banda mínima para a execução das funções básicas de monitoramento e manutenção da rede;
- grafo de rede para tráfego *upstream*, ou seja, em direção ao gerenciador da rede;
- *superframe* e *links* de *join*, que possibilitarão a entrada de novos dispositivos na rede;
- *links* dedicados e compartilhados (tanto de transmissão quanto de recepção) para o gerenciamento de dispositivos, tráfego de *health reports* (indicadores estatísticos de desempenho sobre cada dispositivo na rede) e comunicação de alarmes (*link* perdido, por exemplo).

O processo de formação da rede pode ser dividido em três etapas: *advertisement*, *join* e negociação de parâmetros. O *advertisement* é realizado por dispositivos de campo que já passaram pelo processo de *join*, e sua função é informar a presença da rede e possibilitar a incorporação de novos dispositivos que estejam ao seu alcance de sinal. O pacote de anúncio deve conter as informações de *network ID* e ASN (Absolute Slot Number), além dos *links* e *superframe* de *join*. Tal pacote é esperado por dispositivos passíveis de *join*, cuja resposta será em forma de um pedido para o dispositivo em questão juntar-se à rede, ou seja, um *join request*.

Assim que um novo dispositivo for agregado à rede, tanto o *gateway* quanto o dispositivo farão requisições de banda ao gerente da rede. O *gateway* necessitará da banda para suportar o tráfego de requisições/respostas, enquanto o dispositivo fará uso da banda para publicar informações sobre a variável de processo, por exemplo. O gerente da rede estimará a banda necessária através dessas requisições de serviço, de modo a otimizar a gerência da rede. Caso exista banda suficiente, o gerente alocará *superframes* e *links* de acordo com as requisições. Caso contrário, o gerente pode alocar menos banda do que o dispositivo requisitou, ou até mesmo recusar totalmente o pedido (Rech 2012).

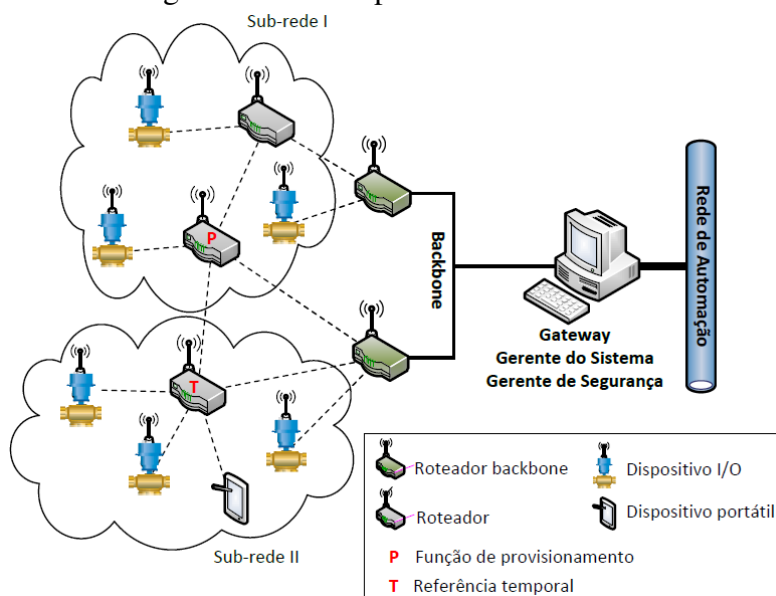
### 2.1.3 ISA100.11a

O padrão ISA100.11a foi aprovado em 2009 pela Sociedade Internacional de Automação (International Society of Automation - ISA) como um novo padrão de comunicação sem fio voltado para aplicações industriais de monitoramento e controle. Esse padrão foi nomeado ISA100.11a. Após sua revisão final em 2011, foi iniciado ainda no mesmo ano a tentativa de tornar o padrão publicamente disponível na Comissão Eletrotécnica Internacional.

Diferentemente do padrão WirelessHART, que foi concebido com base nas exigências de um padrão específico (HART), o padrão ISA100.11a foi criado baseado nas exigências dos usuários finais. Um dos objetivos do padrão é fornecer uma comunicação sem fio confiável e segura para as aplicações com latência de até 100 ms. Essas aplicações são típicas de monitoramento e controle industriais. Adicionalmente, foi criado um mecanismo chamado de tunelamento, no qual diversos padrões industriais de comunicação (HART, WirelessHART, Foundation Fieldbus, Profibus, Modbus, entre outros) podem ser utilizados de forma transparente em uma rede ISA100.11a.

Uma rede ISA100.11a típica é descrita na Figura 2.5. Todos os dispositivos na rede são caracterizados por papéis bem definidos que controlam suas funcionalidades. Em geral os dispositivos podem assumir as seguintes regras: gerente do sistema, gerente de segurança, *gateway*, roteador *backbone*, roteador, dispositivo I/O, dispositivo portátil, função de provisionamento e referência temporal.

Figura 2.5: Uma típica rede ISA100.11a.



O roteamento na rede é realizado por dois dispositivos, o roteador e o roteador *backbone*. O primeiro atua como um *proxy*, encaminhando os dados em direção ao *gateway* e estendendo o alcance da rede. Ele também é responsável por propagar a noção de tempo e comissionar novos dispositivos. Adicionalmente, o padrão ISA100.11a introduziu um novo conceito, o roteador *backbone*. Esse dispositivo é responsável por um roteamento

de alto nível na rede. Também pode ser utilizado para aumentar a vazão de tráfego na medida que sub-redes são criadas. O tráfego entre *backbones* utiliza uma versão compactada do IPV6, o 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks ou IPV6 sobre rede pessoal de baixa potência), a qual é otimizada para as redes de sensores sem fio (Neves & Rodrigues 2010). O tunelamento, uma das principais características do padrão ISA100.11a, também é de responsabilidade dos roteadores *backbones*.

### Modelo de Camadas

Uma rede ISA100.11a também utiliza uma arquitetura baseada na versão simplificada do modelo OSI com apenas 5 camadas. Nas próximas seções serão descritas as principais características de cada camada.

**Camada Física:** Similarmente ao padrão WirelessHART, a camada física do padrão ISA100.11a é baseada no IEEE 802.15.4. As camadas físicas desses padrões são bastante similares, entretanto, o ISA100.11a adiciona algumas peculiaridades. Diferentemente do padrão WirelessHART, um rádio ISA100.11a suporta todos os níveis de avaliação da portadora, inclusive, apresentando suporte para desabilitar a função se necessário.

Adicionalmente, o padrão ISA100.11a permite o controle da potência de transmissão com o intuito de economizar energia. Porém nenhum algoritmo é especificado no padrão. Ambos ISA100.11a e WirelessHART devem limitar o alcance do rádio às leis regulamentadoras específicas, dessa forma, espera-se que esses padrões tenham rádios com alcances similares.

**Camada de Enlace:** A camada de enlace definida no padrão ISA100.11a tem como responsabilidade controlar o acesso dos dispositivos ao meio de transmissão. Essa é uma característica básica de toda camada de enlace baseada no modelo OSI. Entretanto, o padrão ISA100.11a difere um pouco dos modelos clássicos de arquiteturas de redes, pois define roteamento no nível da camada de enlace.

O controle de acesso ao meio é baseado em um TDMA configurado com um mecanismo de saltos de frequência. Diferentemente do padrão WirelessHART, onde apenas um perfil de saltos de frequência é suportado, no padrão ISA100.11a são definidos 3 perfis de saltos de frequência (*slotted*, lento, híbrido). No primeiro perfil, cada comunicação ocorre em uma frequência diferente seguindo 5 padrões pré-definidos. A ordem dos canais a ser seguida foi definida com a finalidade de otimizar a coexistência com redes IEEE 802.11 e WirelessHART. Existe também a possibilidade de configurar os dispositivos para escolherem os canais de comunicação seguindo uma sequência específica. Por outro lado, no perfil de saltos de frequência lento, os dispositivos modificam o canal de comunicação apenas em intervalos específicos (100 ms a 400 ms). Esse mecanismo é utilizado por dispositivos que perderam a sincronização com a rede ou estão sendo comissionados pelo *gateway*. Por questões de coexistência com outros padrões, recomenda-se utilizar os canais 15, 20 e 25 no perfil de saltos de frequência lento. A desvantagem desse perfil está relacionada com o aumento no consumo de energia. Durante o período em que um canal de comunicação é utilizado, os dispositivos precisam manter seus rádios ligados. Por

fim, um perfil de saltos de frequência híbrido utilizando ambas características dos perfis anteriores pode ser utilizado para otimizar o envio de alarmes e retransmissões.

Independente do perfil de saltos de frequência utilizado, a comunicação entre os dispositivos ocorre dentro de um *slot* de tempo com duração de 10 ms ou 12 ms. Diferentemente do padrão WirelessHART, o *slot* de tempo estendido (12 ms) foi adicionado ao padrão ISA100.11a para suportar a recepção em sequência de múltiplas mensagens de resposta (*duocast*), priorização de mensagens e permitir a comunicação entre dispositivos cuja referência temporal esteja atrasada em até 2 ms (Silva et al. 2012).

**Camadas de Rede e Transporte:** A camada de rede tem como objetivo principal prover o mecanismo de roteamento no nível dos *backbones*. No nível da camada de enlace, o roteamento é limitado às sub-redes. Por outro lado, quando uma mensagem alcança um roteador *backbone*, o roteamento a partir daquele ponto é de responsabilidade da camada de rede.

Em relação ao endereçamento dos dispositivos, no nível da camada de enlace cada dispositivo utiliza um endereço de 16 *bits*, enquanto que no nível da camada de rede o endereçamento é de 128 *bits* (6LoWPAN). A camada de rede é responsável por traduzir os endereços de 16 *bits* para os endereços de 128 *bits*. Outra funcionalidade da camada de rede é a fragmentação de dados. Caso uma mensagem tenha um tamanho superior a carga útil da camada de enlace o dispositivo é programado para fragmentar a mensagem em partes menores. Em relação à camada de transporte, as principais funções suportadas estão relacionadas com a comunicação fim a fim baseada em serviços sem conexão.

**Camada de Aplicação:** A camada de aplicação definida no padrão ISA100.11a é estruturada na orientação de objetos. Nesse paradigma, um dispositivo real, por exemplo uma entrada analógica, é modelado em um objeto de *software*. A camada de aplicação é responsável pela comunicação entre objetos definindo os modos de iteração e interoperabilidade com tecnologias legadas. A forma como a camada de aplicação foi definida permite a utilização de tunelamento, onde aplicações legadas (HART, Foundation Fieldbus, Profbus) podem acessar os dispositivos de uma rede ISA100.11a.

#### 2.1.4 Comparação entre os Padrões

Esta seção tem como objetivo descrever de forma sucinta as principais diferenças existentes entre os padrões de comunicação industriais descritos anteriormente. Os principais pontos de discussão estão descritos na Tabela 2.1.

Os padrões de comunicação sem fio utilizam um controle de acesso ao meio baseado em TDMA. O ponto crítico em utilizar uma técnica de TDMA é a sincronização da rede. Os padrões WirelessHART e ISA100.11a adotam um mecanismo simples e eficiente (informações temporais são enviadas nas mensagens *advertise* e de resposta) para tal propósito. Enquanto que o HART em utilização normal, um dispositivo de campo somente responde quando solicitado e as regras de temporização definem quando cada mestre pode iniciar a transação de comunicação, caso existam dois mestres.

Tabela 2.1: Comparações entre os padrões de comunicação industriais.

| Propriedades         | HART                                                | WirelessHART                                                | ISA100.11a                                                                                                          |
|----------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Camada de enlace     | Padrão Bell 202 com FSK                             | <i>Slots</i> de 10 ms, saltos de frequência (3 tipos), TDMA | <i>Slots</i> de 10-12 ms, saltos de frequência (3 tipos), TDMA/CSMA, roteamento a nível da subrede (grafo e origem) |
| Camada de rede       | Roteamento, segurança de ponto a ponto e transporte | Roteamento (grafo e origem)                                 | Fragmentação, roteamento a nível de roteadores <i>backbones</i> (6LoWPAN)                                           |
| Camada de transporte | ACK fim a fim                                       | Serviços com/sem conexão, ACK fim a fim                     | Serviços UDP sem conexão                                                                                            |
| Camada de aplicação  | HART                                                | Fragmentação, HART                                          | Genérica orientada a objetos                                                                                        |
| Topologia            | Ponto a ponto ou multiponto (até 15 instrumentos)   | <i>Mesh</i>                                                 | <i>Mesh</i>                                                                                                         |

Outro ponto de grande importância é o roteamento. Os padrões WirelessHART e ISA100.11a empregam um mecanismo de múltiplos caminhos na tentativa de maximizar a confiabilidade da rede. Esse mecanismo é combinado com um suporte a topologias *mesh*. Dois algoritmos são utilizados, o roteamento em grafo e origem. Adicionalmente, o padrão ISA100.11a apresenta suporte à Internet através do padrão 6LoWPAN. Entretanto, essa funcionalidade é apenas suportada na comunicação entre roteadores *backbones*. Inclusive essa característica adiciona um ponto adicional de falha na medida que fragmentação é exigida nos roteadores *backbones*. No padrão WirelessHART a fragmentação ocorre apenas no *gateway*.

Por fim, no que se refere aos fabricantes de *hardware*, o HART tem mais de 30 milhões de instrumentos instalados pelo mundo e o padrão WirelessHART apresenta algumas vantagens em relação à interoperabilidade, comparado ao ISA100.11a, principalmente por ser uma extensão do padrão HART (já consolidado na indústria). O padrão ISA100.11a apresenta várias configurações opcionais as quais podem contribuir para problemas de interoperabilidade entre diferentes fabricantes.

## 2.2 Otimização Multiobjetivo

A maior parte dos problemas reais encontrados na área de otimização envolve a obtenção de diversas metas que devem ser atingidas simultaneamente. Elas geralmente são conflitantes, ou seja, não existe uma solução única que otimize todas ao mesmo tempo. Para tal classe de problemas deve-se buscar um conjunto de soluções eficientes (Ticona 2008).

Problemas matemáticos dessa natureza são chamados de problemas de otimização multiobjetivo, por envolverem minimização ou maximização simultânea de um conjunto de objetivos satisfazendo a um conjunto de restrições, e sua solução consiste de um conjunto de variáveis que satisfaça essas restrições e otimize uma função constituída por diversas funções objetivo. Neste capítulo, será abordada a teoria sobre otimização multiobjetivo e os algoritmos genéticos utilizados na literatura para encontrar as soluções ótimas para problemas com esse tipo de otimização.

### 2.2.1 Conceitos sobre Otimização Multiobjetivo

O problema de otimização multiobjetivo com  $r$  objetivos pode ser definido da seguinte forma: dado um vetor de variáveis de decisão com dimensão  $n$ ,  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$  no espaço de busca  $X$ , queremos encontrar um vetor  $x^* \in X$  que minimiza simultaneamente as  $r$  funções objetivo  $f(x^*) = \{f_1(x^*), \dots, f_r(x^*)\}$ . O modelo geral de um problema de otimização multiobjetivo, no formato de minimização, é escrito como:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \{f_1(x), \dots, f_r(x)\} \\ \text{s.a. } x &\in X \end{aligned}$$

Onde  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $i \geq 2$ . Em geral,  $X$  é definido por uma série de restrições e limites de especificação para as variáveis de decisão.

Considerando que todas as funções objetivo são de minimização, pode-se descrever as soluções de Pareto formalmente de acordo com as definições apresentadas nas seções a seguir.

#### Dominância

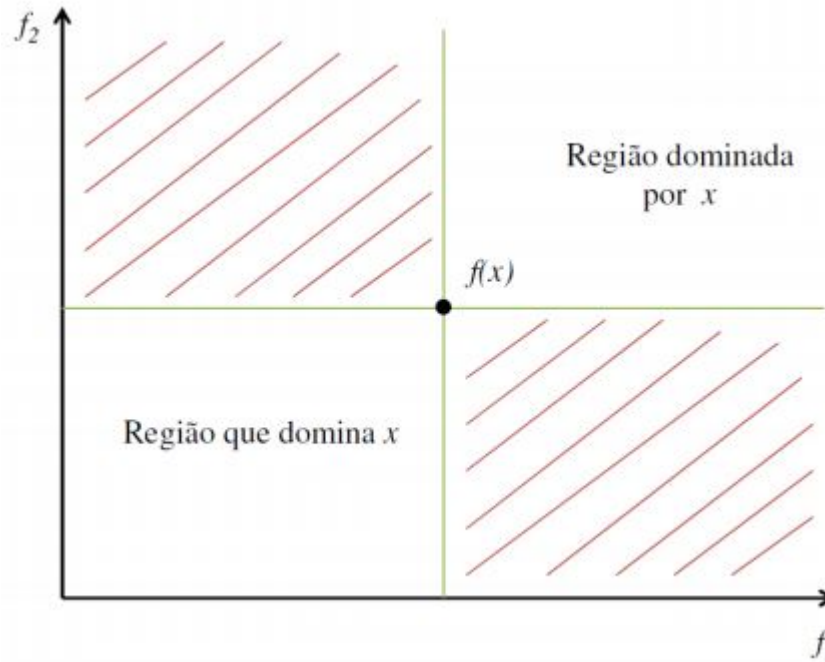
Uma solução viável  $x$  diz-se dominar outra solução viável  $y$  se e somente se  $f_i(x) \leq f_i(y)$  para  $i = 1, \dots, r$  e  $f_j(x) < f_j(y)$  para pelo menos uma função objetivo  $j$ .

Na Figura 2.6 é representada no espaço dos objetivos a região dominada por uma solução  $x$ , na qual tem valores superiores a  $f(x)$ ; a região que domina esta solução, na qual tem valores inferiores a  $f(x)$ ; e a região que não é comparável a  $x$  para um problema com dois objetivos - área hachurada.

#### Solução de Pareto, Não-dominada ou Eficiente

Uma solução viável é dita Pareto ou não-dominada ou eficiente, se não for dominada por nenhuma outra solução viável no espaço de busca  $X$ . Uma solução de Pareto não pode ser melhorada em relação a qualquer objetivo sem que exista piora para pelo menos algum

Figura 2.6: Representação do conceito de dominância no espaço dos objetivos.



outro objetivo. Então, o problema é encontrar uma solução eficiente, ou seja, um vetor  $x^* \in X$  tal que:

$$\nexists y \in X \text{ tal que } f_i(y) \leq f_i(x^*) \text{ para todo } i = 1, \dots, r \\ \text{e } f_j(y) < f_j(x^*) \text{ para algum } j = 1, \dots, r$$

O conjunto das soluções não-dominadas em  $X$  é chamado de conjunto Pareto, e a imagem de um determinado conjunto Pareto, no espaço dos valores dos objetivos, é chamada de fronteira de Pareto (Fonseca & Fleming 1993).

Nesta tese, a busca pelo conjunto Pareto será feita pela utilização de algoritmos genéticos multiobjetivos que são explicados nas seções posteriores.

### 2.2.2 Algoritmos Genéticos

Na natureza os indivíduos competem entre si por recursos como comida, água e refúgio. Adicionalmente, entre os animais de uma mesma espécie, aqueles que não obtêm êxito tendem provavelmente a ter um número reduzido de descendentes, tendo portanto menor probabilidade de seus genes serem propagados ao longo de sucessivas gerações, seguindo o princípio da seleção natural. A combinação entre os genes dos indivíduos que perduram na espécie, podem produzir um novo indivíduo muito melhor adaptado às características de seu meio ambiente.

Os algoritmos genéticos utilizam conceitos provenientes do princípio da seleção natural e da genética para abordar uma ampla série de problemas, utilizando uma analogia direta com essa teoria da evolução na natureza, onde cada indivíduo representa uma

possível solução para um problema dado. A cada indivíduo se atribui uma pontuação de adaptação, dependendo da resposta dada ao problema por este indivíduo. Aos mais adaptados é dada a oportunidade de reproduzir-se mediante cruzamentos com outros indivíduos da população, produzindo descendentes com características de ambas as partes. A tendência é que a população (conjunto de possíveis respostas) convirja para uma solução ótima do problema proposto. Os processos que mais contribuem para a evolução são o *crossover* e a adaptação baseada na seleção/reprodução. A mutação também tem um papel significativo, no entanto, seu grau de importância continua sendo assunto de debate (Lanza-Gutierrez & Gomez-Pulido 2016).

Esses algoritmos são robustos e facilmente adaptáveis, consistindo de uma técnica amplamente estudada e utilizada em diversas áreas, um dos casos mais utilizados é na otimização de sistemas, empregando uma estratégia de busca paralela e estruturada, porém aleatória, que é voltada a encontrar soluções de alta aptidão, ou seja, resultados que minimizem a função a ser minimizada ou que a maximize, caso o objetivo seja obter o valor máximo da função.

Apesar de aleatórios, os algoritmos genéticos não são caminhadas aleatórias sem direção, pois exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada iteração é chamada de geração.

Basicamente, o que um algoritmo genético faz é criar uma população de possíveis soluções (inicialização) para o problema a ser tratado para depois submetê-la ao processo de evolução, constituído pelas seguintes etapas:

- avaliação: avalia-se a aptidão das soluções (indivíduos da população), fazendo uma análise para que se estabeleça quão bem elas respondem ao problema proposto;
- seleção: indivíduos são selecionados para a reprodução. A probabilidade de uma dada solução  $i$  ser selecionada é proporcional à sua aptidão;
- cruzamento: características das soluções escolhidas são recombinadas, gerando novos indivíduos;
- mutação: características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução são alteradas, acrescentando assim variedade à população;
- atualização: os indivíduos criados nesta geração são inseridos na população;
- finalização: verifica se alguma das condições de encerramento da evolução foi atingida, retornando para a etapa de avaliação em caso negativo, e encerrando a execução em caso positivo.

O fluxograma do algoritmo genético tradicional pode ser visto na Figura 2.7.

Durante cada iteração, os princípios de seleção e cruzamento são aplicados a uma população de candidatos que pode variar, dependendo da complexidade do problema e dos recursos computacionais disponíveis. Através da seleção, determina-se quais indivíduos conseguirão se reproduzir, gerando um número determinado de descendentes para a próxima geração, com uma probabilidade determinada pelo seu índice de aptidão. Em outras palavras, os indivíduos com maior adaptação relativa têm maiores chances de se reproduzir. A maioria dos métodos de seleção são projetados para escolher preferencialmente indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a

Figura 2.7: Estrutura de funcionamento de um algoritmo genético tradicional.



diversidade da população. Um método de seleção muito utilizado é o método da roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta. Outro método bastante utilizado é o método do torneio, no qual é definido o tamanho da tabela de competição e são escolhidos da população, aleatoriamente, os indivíduos que irão preencher a tabela de disputa. A disputa é realizada pela comparação das aptidões e vence aquele de maior aptidão.

Após a definição dos indivíduos que serão os pais, é realizado o processo de cruzamento. Nesse processo, os genes de cada indivíduo são combinados para formar um novo indivíduo. Aqui também entram algumas técnicas para a escolha dos genes a serem compartilhados com o filho. No caso, pode-se fazer uma divisão simples, dupla ou combinações (utilizadas em determinados tipos de problemas). A divisão simples é gerada através da escolha de um número aleatório que determina a posição onde irá ocorrer a permuta dos genes dentro da cadeia genética. Dessa forma, o filho receberá uma cópia da cadeia genética do primeiro pai até esse ponto e uma cópia da cadeia genética do segundo pai a partir desse ponto. Na divisão dupla, dois pontos são escolhidos e o filho recebe a cadeia genética de um pai fora do intervalo desses dois pontos e do segundo pai dentro do intervalo. O processo de cruzamento pode ser realizado até se obter uma nova população de mesmo tamanho da anterior ou do tamanho da metade da população anterior (Martins 2017).

Realizado o cruzamento, efetua-se o processo de mutação. Nesse processo, cada indivíduo sofre uma mutação em sua cadeia genética. É escolhido aleatoriamente um gene do filho gerado e o seu valor é alterado. No caso de uma representação binária, o gene é apenas invertido (de 0 para 1 ou vice-versa). A mutação tem como principal objetivo

gerar indivíduos que saíam do padrão adotado pela população. Após diversas gerações, a tendência da população é convergir para um padrão (um mínimo ou máximo local) de solução. Com a mutação, essa convergência sempre é perturbada, possibilitando a descoberta de soluções mais aptas que as encontradas até o momento.

Finalmente, realiza-se a união das populações. Dependendo da escolha realizada, se a população da nova geração for a metade da população antiga, pode-se substituir metade da população antiga pela nova geração. Caso tenha sido gerada uma nova população de tamanho igual a anterior, pode-se substituir toda a população ou mesclar as duas e realizar uma nova ordenação, descartando-se a metade da população no final (lembrando-se de manter os indivíduos selecionados no processo de elitismo). Todo o processo é repetido até que a população não esteja mais evoluindo (convergência) ou já se tenha atingindo o objetivo (a solução do problema) ou tenha atingido a quantidade máxima de gerações desejada.

## 2.3 Algoritmos Genéticos Multiobjetivo

No caso dos algoritmos genéticos multiobjetivo, a função de aptidão é formada por várias funções objetivo (um vetor de aptidões). Cada função tenta minimizar ou maximizar um dado do problema e alguns ou até mesmo todos os objetivos podem ser opostos e competirem entre si. Diferentemente de ter uma função objetivo, onde se encontra apenas uma possível solução, as funções multiobjetivos permitem encontrar diferentes soluções para o problema ao mesmo tempo. Existem aquelas soluções em que uma determinada variável não pode ser minimizada sem que prejudique o valor de outra dentro da mesma solução. A esse conjunto de soluções é chamado de fronteira de Pareto.

Tendo em vista que os algoritmos genéticos são as mais difundidas e estudadas técnicas de Computação Evolucionária, a dificuldade de obtenção de soluções ótimas pelos métodos convencionais de otimização faz dos algoritmos genéticos uma das técnicas mais eficientes para otimização multiobjetivo. Entretanto, a tomada de decisão implica num processo que consiste em vários fatores, com o objetivo de encontrar a melhor solução. Em um algoritmo genético multiobjetivo, a solução final é a fronteira de Pareto, um conjunto de soluções onde cada uma das soluções é melhor que uma outra solução em uma de suas funções objetivo.

A comparação entre as soluções é realizada pelo operador de dominância e o objetivo do algoritmo reside em encontrar a fronteira de Pareto. A fronteira de Pareto é o conjunto de soluções que não são dominadas por qualquer outra solução.

A relação de dominância define uma fronteira onde as soluções competem entre si, o que leva a ideia de casos conflitantes e opostos, não existindo uma solução em que se melhorando um objetivo, não piore outro. Dessa forma, a melhor solução (a fronteira de Pareto) é aquela que possui a maior quantidade de soluções e a mais diversificada possível.

Nas últimas décadas, um bom número de algoritmos evolucionários multiobjetivos apareceu na literatura, dentre eles podem ser citados: VEGA (1984), WBGA (1992), MOGA (1993), NSGA (1993), NPGA (1993), TGA (1996), SPEA (1998), PPES (1998),

MicroGA (2001), NSGA-II (2002), etc. Todos com grande habilidade de encontrar várias soluções ótimas e vasta aplicação real.

Como a otimização multiobjetivo busca a otimização de objetivos que podem ser conflitantes, onde cada um deles corresponde a uma solução ótima, isso faz com que esses problemas apresentem várias soluções ótimas, e sejam preferencialmente resolvidos por métodos capazes de gerar um conjunto de soluções ótimas de uma só vez. Isso faz com que os algoritmos genéticos multiobjetivo sejam bastante recomendados ao tentar obter soluções para a proposta aqui apresentada.

Para este trabalho, o algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), proposto por (Lanza-Gutierrez & Gomez-Pulido 2015) foi escolhido dentre os pesquisados pela sua eficiência e simplicidade de implementação. Sua implementação é tão simples que se tornou um dos primeiros algoritmos genéticos multiobjetivo a ter uma versão implementada com paralelismo, isso faz com que seu processamento seja bem mais rápido em relação aos outros.

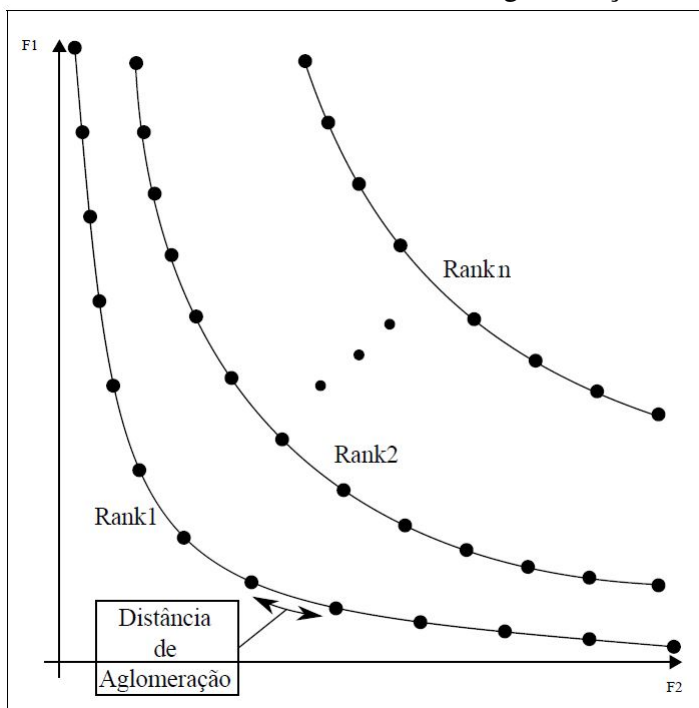
O NSGA-II trabalha com a ordenação por não dominância das fronteiras de Pareto e, para manter a diversidade de soluções, utiliza a distância de aglomeração como mostrado na Figura 2.8. A ordenação pela não dominância consiste em ordenar a população através de *ranks* respectivos às fronteiras de Pareto. Todos os indivíduos da fronteira de  $rank_1$  dominam os indivíduos das fronteiras  $rank_2$  até  $n$ . Os indivíduos da fronteira de  $rank_2$  dominam todos os indivíduos das fronteiras de  $rank_3$  até  $n$  e assim sucessivamente até a fronteira de  $rank_n$  que tem seus indivíduos dominados por todos os outros. Já a distância de aglomeração se refere ao cálculo da distância entre os vizinhos de um determinado indivíduo da fronteira. Dessa forma, quanto mais distantes os indivíduos vizinhos forem uns dos outros, melhor será a distribuição sobre a fronteira de Pareto, evitando uma aglomeração de soluções em uma região da fronteira.

Introduz-se também um novo operador de comparação sobre os indivíduos, levando-se em consideração esses dois pontos, que é o operador de similaridade de aglomeração ( $\preceq_n$ ). Essa nova relação de dominância populacional entre dois indivíduos (soluções)  $x$  e  $y$  é definido como:

$$x \preceq_n y \text{ se } (rank(x) < rank(y)) \text{ ou } ((rank(x) = rank(y)) \text{ e } (distance(x) > distance(y)))$$

O algoritmo NSGA-II é bem semelhante ao algoritmo genético comum, mas com um pré-processamento para a geração do *rank* e da distância de aglomeração. O algoritmo inicia pela criação da população inicial gerada de forma aleatória. Além da geração da população inicial é gerado também o conjunto da população de filhos (inicialmente vazio). Nesse ponto o programa começa a execução em repetição até se alcançar a condição de parada (a falta de evolução da fronteira de Pareto ou a quantidade de gerações). A partir da união dos dois conjuntos (a população inicial e a população de filhos) é gerada a população geral. Sobre a população geral é realizado o processo de classificação (o cálculo dos *ranks*), gerando as fronteiras de Pareto.

Sobre cada fronteira de Pareto é gerado o cálculo de distância de aglomeração. Antes de realizar o processo normal de um algoritmo genético, a população geral é reduzida ao tamanho da população inicial, através da eliminação dos indivíduos de *rank* mais baixo

Figura 2.8: Fronteiras com *rank* e distância de aglomeração do NSGA-II.

ou de distância de aglomeração menor. A ordenação das fronteiras é realizada de forma automática pela não dominância, mas para o último *rank* a ser inserido na população de tamanho igual ao da inicial, é realizada a ordenação pela distância de aglomeração. Isso se repete em cada geração e quando o algoritmo está convergindo, a fronteira de Pareto já possui boa parte dos indivíduos espaçados de maneira equidistante.

Com a população ordenada pelo *rank* e pela distância de aglomeração (armazenada como a população para o próximo ciclo), é realizado o processo normal de um algoritmo genético para preencher o conjunto dos filhos de igual tamanho ao da população inicial. Os processos de seleção, cruzamento e mutação são os mesmos descritos anteriormente para o algoritmo genético comum, apenas com a diferença que a comparação entre os indivíduos é realizada através da relação de dominância populacional.

Terminado esse processo, o algoritmo reinicia a repetição, voltando ao passo onde a população da próxima geração é combinada com os seus filhos para reiniciar o processo do algoritmo até que a condição de parada seja alcançada.

O algoritmo descrito pode ser resumido nos passos descritos na Figura2.9:

## 2.4 Trabalhos Relacionados

Devido à importância de se gerenciar todos os processos que envolvem os dispositivos em redes industriais e ao crescente uso de redes sem fio nos ambientes industriais, a avaliação do seu desempenho em diversas aplicações, incluindo o controle de processos, e alteração do comportamento da rede de modo a evitar possíveis falhas ou melhorar o

Figura 2.9: Algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II).

1. Criar pais  $|P_0| = N$  (aleatoriamente)
2. Criar população de filhos  $Q_0 = \emptyset$  (vazia)
3. De  $t = 0$  até quantidadeMaximaGeracoes
4.  $R_t = P_t \cup Q_t$
5.  $F = \text{geracaoRanks}(R_t)$
6.  $P_{t+1} = \emptyset$  e
7. De  $i = 0$  até  $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$
8.     Calcula a distanciaAgglomeracao( $F_i$ )
9.      $P_{t+1} = P_{t+1} + F_i$
10.     $i = i + 1$
11.  $P_{t+1} = \text{ordenarPorDominancia}(F_i)$  (ordem decrescente)
12. De  $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1:(N - |P_{t+1}|)]$  até  $|Q_{t+1}| \leq N$
13.     selecao(pais de  $P_{t+1}$ )
14.     cruzamento( $f_1$  e  $f_2 \rightarrow s_1$  e  $s_2$ )
15.     mutacao(sobre  $s_1$  e  $s_2$ )
16.      $Q_{t+1} = Q_{t+1} \cup s_1 \cup s_2$

seu desempenho de acordo com uma especificação inicial torna-se fundamental.

Esta seção apresenta alguns dos trabalhos relacionados ao estudo de alocação de dispositivos em redes de sensores sem fio, a maioria não é industrial, pois foram encontrados poucos trabalhos nessa área quando nos referimos à localização dos dispositivos ou topologia em redes industriais sem fio.

Como apresentado na literatura, realizar a alocação de dispositivos em uma rede de sensores sem fio limitada a diversas restrições é um problema *NP-Hard* e diferentes metaheurísticas podem ser utilizadas para achar uma solução ótima. Os algoritmos evolutivos, como os algoritmos genéticos, e a otimização - utilizando o algoritmo Enxame de Partículas - são utilizados há anos de forma bem sucedida para encontrar as soluções para os problemas de alocação de sensores e em outras áreas de comunicação sem fio (Wang et al. 2011).

Um levantamento de diferentes técnicas e estratégias para locação de sensores sem fio foi realizado, separando-as em alocações estáticas ou dinâmicas, objetivos a serem minimizados ou maximizados e tipos de sensores, além de mostrar os algoritmos para a resolução dos problemas que ainda não possuem solução definida (Younis & Akkaya 2008).

Em Hussain et al. (2007) propõe um algoritmo, nomeado por Hierarchical Cluster-based Routing (HCR), no qual cria *clusters* de comunicação em uma rede de sensores sem fio, utilizando um algoritmo genético e comparando os resultados com o protocolo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), que se baseia na auto organização de *clusters* para aplicações de monitoramento. De forma a economizar no consumo de energia pela rede com retransmissões de vários pequenos pacotes, um nó *cluster* concentra a informação de seus vizinhos para então enviar para a estação base.

Pesquisas sobre a determinação da quantidade de nós *cluster-head* e de sua localização a fim de diminuir a distância entre os nós dentro de uma rede de sensores sem fio foram desenvolvidas, como em (Heidari & Movaghar 2009). Nesse trabalho foi utilizada a alocação de nós *cluster-head* de forma estratégica a fim de concentrar os dados antes de enviá-los para o nó *sink* e foram avaliados os seguintes critérios na otimização do problema: a distância total de transmissão de cada nó para o nó *sink*; a distância do *cluster* (soma das distâncias de transmissão de cada nó para o *cluster-head* e do *cluster-head* para o nó *sink*); e a transferência de energia (o total da energia consumida por cada nó para transmitir seus dados para o *cluster-head* juntamente à energia utilizada na recepção desses dados pelo *cluster-head* com a energia gasta para ele transmitir o conjunto de dados para o nó *sink*). Ao final, o resultado foi comparado com o algoritmo LEACH, onde foi observado que o algoritmo proposto obteve um aumento na longevidade dos sensores, tendo uma economia de energia na casa dos 18%.

Outro trabalho em que houve a utilização de algoritmos genéticos para determinar o posicionamento de sensores sem fio foi o de Romoozi & Ebrahimpour-Komleh (2010). A função a ser otimizada tem dois fatores como foco, sendo eles: a energia de transmissão e a cobertura da rede. A cobertura da rede é calculada utilizando o diagrama de Voronoi, no qual o centro de cada polígono de Voronoi deve ser os nós *cluster-head*. O algoritmo K-means foi utilizado para agrupar os sensores e o sensor que tem a menor distância para todos os outros é escolhido como *cluster-head*. Os resultados obtidos nos experimentos

também foram comparados com o algoritmo LEACH, mostrando que o tempo de vida de uma rede formada através do método proposto é maior que ao utilizar o LEACH, tendo em vista que o consumo de energia do algoritmo proposto possui um decaimento mais suave.

O trabalho de Kulandaivel et al. (2012) tem com diferença debater o problema de alocação de atuadores sem fio em uma rede de sensores sem fio, pois dado que o nó atuador possui uma bateria melhor, nos experimentos, essa vantagem foi utilizada para aumentar a duração da vida da rede. Além disso, também se utilizou uma função objetivo com 6 restrições e um algoritmo genético para encontrar as soluções. Neste trabalho, foram apresentados vários resultados experimentais para o problema de alocação automática de atuadores. As principais restrições são a relação de entrega de pacotes, consumo de energia, perda de pacotes e atraso de fim a fim. A principal contribuição deste trabalho é otimizar a alocação de atuadores na rede, mas as posições disponíveis para alocação são limitadas a pontos dentro de uma área retangular especificada para a rede, não permitindo uma maior flexibilidade de alocação dos dispositivos.

Uma revisão sobre as técnicas mais utilizadas na literatura para encontrar soluções ótimas para problemas de cobertura e conectividade de rede foi o trabalho de Ghosha & Dasb (2008). Nesse trabalho são abordados de forma detalhada alguns dos tipos de sensores e redes, peculiaridades dos diversos problemas de cobertura e conectividade encontrados na literatura, inclusive discussões sobre problemas que ainda não possuem soluções definidas, e sobre os modelos de comunicação.

Um dos trabalhos com rede industrial sem fio é o Wang et al. (2011), no qual é proposto um algoritmo para encontrar um ótimo posicionamento dos nós na rede. O algoritmo proposto foi desenvolvido com base no algoritmo Enxame de Partículas, fazendo uma mutação probabilística e adaptativa binária. Além disso, a função objetivo e as restrições foram definidas pensando na confiabilidade da rede, observando a quantidade de vizinhos de cada nó e a capacidade de comunicação em um *cluster-head*, além de fatores como custo da implantação de nós *cluster-head*. Na sua metodologia de avaliação, incluindo os fatores anteriormente citados, há também penalidades aplicadas à função caso alguma das restrições seja violada. A comparação dos resultados obtidos pelo algoritmo proposto foi feita contra os resultados de um algoritmo genético padrão e uma versão discreta e binária do algoritmo Enxame de Partículas, e com essa comparação pode-se perceber que o algoritmo proposto se mostrou mais rápido e com baixo custo e comunicações bem distribuídas pela rede.

Um dos trabalhos que fez uso de otimização multiobjetivo para encontrar as soluções ótimas foi o de Liu & Auckenthaler (2014), no qual utilizou-se o NSGA-II para otimizar dois objetivos conflitantes, a saber, maximizar a probabilidade de detecção de um evento e minimizar a sobreposição do intervalo do tempo de detecção dos eventos. O objetivo principal era otimizar a alocação de sensores sem fio para identificação e detecção de eventos de ataque a sistemas de distribuição de água.

Outro trabalho que fez uma pesquisa sobre alocação de sensores de roteamento (*relay nodes*) em redes de sensores sem fio tradicionais, mostrando diversos algoritmos utilizados na literatura, os objetivos a serem otimizados, a heurística utilizada e sobre quais tipos de rede os algoritmos foram aplicados, foi o Lanza-Gutierrez & Gomez-Pulido (2015).

Nele também se utilizou otimização multiobjetivo na busca de variáveis na vizinhança.

A fim de analisar o comportamento de uma rede WirelessHART em processos de controle foram desenvolvidos diversos trabalhos com simuladores e alguns poucos com redes reais. Em um dos trabalhos com redes reais avaliou-se o desempenho de um controlador para o nível de água em sistemas de tanques acoplados em uma rede WirelessHART (Santos et al. 2015). Neste trabalho, os autores propõem utilizar componentes comerciais com o objetivo de desmistificar a utilização de tecnologias sem fio em malhas de controle industrial. Os resultados do trabalho mostram laços de controle estáveis para intervalos de amostragem entre 1 e 8 segundos, revelando que é possível fazer um sistema de controle com equipamentos industriais sem fio, embora com limitações referentes à pequena quantidade de dispositivos na rede.

Uma análise do uso do protocolo WirelessHART para a implementação de sistemas de controle em malha fechada também foi desenvolvida (Soto 2016). Neste trabalho são discutidas possíveis arquiteturas de implementação de malhas de controle. Para a realização deste trabalho, foram apresentados dois estudos de caso: o controle de uma válvula comumente utilizada na indústria de petróleo mediante um controlador clássico PID digital, que utiliza o método de aproximação de Tustin, que não leva em conta os atrasos; e um processo simulado, que considera um controlador baseado em eventos, onde o sinal de controle é calculado de acordo com os tempos de comunicação permitidos pela rede entre o controlador e o processo. Os resultados obtidos mostram que é possível efetuar controle apesar dos atrasos ocasionados pela rede, desde que sejam levados em conta estes atrasos no cálculo do sinal de controle. Este trabalho também se limita à análise de controle em redes com poucos dispositivos.

Já em Hassan et al. (2016) foi desenvolvido uma aplicação de controle em tempo real em redes WirelessHART. Neste artigo foi analisada a formação de redes WirelessHART direcionadas para aplicações de controle, usando um *kit* de avaliação de rede em escala de laboratório. Um dos principais pontos observados foi o efeito da distância no momento de entrada na rede dos dispositivos, ou seja, a criação dos *link* de comunicação entre os dispositivos. Esse trabalho analisa o efeito da distância no alcance do sinal, o que também foi verificado no trabalho apresentado nesta tese, mas com a diferença que aqui as referências foram tiradas de dispositivos industriais reais.

Enquanto que em Benoit et al. (2018), foi analisado como a topologia da rede afeta várias métricas de desempenho, incluindo latência, confiabilidade na troca de pacotes em redes WirelessHART. Neste artigo, duas topologias foram estudadas e analisadas com base em suas latências e confiabilidade. Uma delas é a rede em malha (*mesh*) padrão que requer vários dispositivos vizinhos formando várias rotas para um único sensor, e a outra é a de caminho único, onde cada sensor possui apenas um único vizinho, que é o pior caso das topologias. Em sua conclusão foi obtido que a confiabilidade foi alta durante um experimento de 4 dias mesmo usando a pior topologia. As redes WirelessHART foram formadas utilizando um *kit* de avaliação de rede em escala de laboratório também e a análise da influência das topologias é bem útil, pois ela também é um dos fatores mais importantes no modelo apresentado nesta tese.

Já Costa (2011) descreve o desenvolvimento de uma ferramenta para otimização do posicionamento de nós roteadores em redes sem fio, aplicados em automação industrial,

determinando a menor quantidade de dispositivos a serem utilizados, e a melhor coordenada geográfica para cada um. A metodologia leva em conta critérios de otimização da menor quantidade de nós roteadores necessários à rede e otimização do comprimento das rotas de transmissão. Este trabalho utiliza o algoritmo genético para otimizar a sua função objetivo, que consiste em encontrar a topologia que conecta todos os sensores ao gerente da rede com a menor quantidade de roteadores. Os seus resultados mostram que quanto mais distante o dispositivo está do *gateway* menos vizinhos ele terá, o que torna a proposta econômica, mas não apresenta confiabilidade quando se observa com foco baseado em aplicações de controle nas redes industriais sem fio.

O trabalho de Martins (2017), que consiste na busca - através de algoritmo genético multiobjetivo - das soluções ótimas para as funções objetivo do modelo matemático proposto, visa determinar as posições dos instrumentos roteadores de forma que as redes industriais de sensores sem fio possam se tornar mais robustas, solucionando alguns problemas que são fundamentais para a escolha de rotas e viabilidade econômica do projeto, como a quantidade de roteadores, sua localização, distância entre eles e uso de rotas disjuntas entre os instrumentos da rede. Este trabalho apesar de ser generalista ao se preocupar apenas com os sensores das redes industriais sem fio e ser aplicado apenas na etapa de projeto das redes, apresenta uma grande vantagem em relação aos outros trabalhos que é o uso de rotas disjuntas entre os instrumentos de modo a garantir maior confiabilidade na troca de pacotes pela rede, por isso o seu modelo matemático multiobjetivo foi escolhido como base para o trabalho apresentado nesta tese.

Visando aumentar a confiabilidade no uso de controladores nas redes industriais de sensores e atuadores sem fio, nesta tese, ao contrário dos trabalhos anteriormente descritos, apresenta-se um sistema com modelo matemático multiobjetivo para auxílio na definição da topologia dessas redes tanto na etapa de projeto (instalação) quanto na etapa em que a rede está ativa (em funcionamento). Ao encontrar, como solução para o modelo, um conjunto de soluções na fronteira de Pareto, tem-se a vantagem de facilitar a manutenção dos dispositivos em tempo real, evitando paradas dos processos durante tal operação, podendo trocar a topologia da rede de forma ágil para outra que também atende os requisitos dos controladores sem precisar buscar uma nova solução. Percebe-se que o foco do modelo proposto neste trabalho é garantir o funcionamento adequado dos controladores nessas redes de acordo com sua especificação inicial, ou seja, sua prioridade é determinar, de forma rápida e satisfatória, a posição dos instrumentos roteadores e suas rotas, maximizando a confiabilidade na troca de pacotes com dados de controle na rede e minimizando problemas como perda de sinal ou de pacotes.



---

## Capítulo 3

# Modelo de otimização para redes industriais sem fio

---

Neste capítulo é apresentado o modelo desenvolvido nesta tese, que tem como principal contribuição o desenvolvimento de um sistema com modelagem multiobjetivo para auxílio em instalação e manutenção de dispositivos - tanto sensores quanto atuadores - em redes industriais sem fio. O modelo desenvolvido tem por finalidade encontrar a melhor configuração para os dispositivos da rede industrial sem fio e suas rotas de comunicação com o *gateway*, aumentando a confiabilidade nos *links* de comunicação pelos quais trafegarão os pacotes de dados de controle e a previsibilidade do tempo máximo para troca de pacotes na rede de acordo com a especificação dos controladores a fim de efetuar controle com o menor custo de instalação e manutenção da rede.

Esta proposta parte da base de pesquisa e dos seus resultados obtidos nos últimos anos, como em Santos et al. (2015) em que foi utilizada uma rede WirelessHART simples (apenas o *gateway*, um sensor e um atuador) para aplicação de controle em um sistema de tanques acoplados e, embora a rede tenha sido formada em uma área pequena no laboratório, foi observado que para realizar o controle com uma taxa de amostragem de 1 segundo foi preciso habilitar a função *fastpipe*, que utiliza o salto de frequência de forma lenta, reservando um canal de comunicação para o dispositivo desejado; e no trabalho desenvolvido para otimização da alocação de dispositivos roteadores em redes industriais com somente sensores sem fio (sem atuadores), Martins (2017), pois no mesmo foi desenvolvido um modelo otimizado com propagação de pacotes através de rotas disjuntas, o que possibilita uma maior confiabilidade na comunicação na rede.

### 3.1 Padronização da Rede Industrial Sem Fio

Dado que os protocolos WirelessHART e ISA100.11a, apesar de apresentarem várias similaridades, os mesmos também expõem diferenças e oferecem possibilidades de que haja diferenças tecnológicas nos dispositivos e nas redes, inclusive, possibilitando que os fabricantes criem seus diferenciais de modo a explorar as características não mandatárias dos protocolos ou mesmo as características não abordadas pelas normas com o intuito de serem competitivos no mercado. Diante disso é preciso definir critérios em comum a fim de definir um padrão único de rede industrial sem fio para os protocolos WirelessHART

e ISA100.11a:

- O conjunto de dispositivos que formam uma rede industrial sem fio é: roteadores, sensores e atuadores, um *gateway*, um ponto de acesso e um gerenciador da rede. Como a maioria das fábricas desses dispositivos fabricam o *gateway*, o ponto de acesso e o gerenciador de rede como um único equipamento chamado genericamente de *gateway*, neste capítulo será utilizada a mesma nomenclatura para identificar o equipamento gerenciador da rede.
- Como o *gateway* é o equipamento centralizador de acordo com os protocolos aqui usados, as informações capturadas pelos dispositivos (roteadores, sensores e atuadores, a saber: quantidade e quem são os vizinhos, níveis de sinal para cada vizinho, status de funcionamento e bateria, medição da variável de processo) são encaminhadas para o próprio *gateway*. Esses dados podem ser acessados na rede de automação através dos protocolos adequados, como HART, GSAP, MODBUS ou OPC, permitindo avaliar o desempenho dos dispositivos e da rede, formar a topologia, entre outros detalhes.
- Todas as informações do controlador para atuação nas plantas industriais são encaminhadas para o respectivo atuador.
- Como referido pelos protocolos, cada instrumento deve possuir uma rota primária e uma secundária escolhidas pelo algoritmo de roteamento presente no *gateway*. Os protocolos definem dessa forma de modo a aumentar a confiabilidade na rede, pois caso haja falha na rota primária, o instrumento automaticamente utiliza a rota secundária, informando ao *gateway* tal falha para que ele realize o ajuste de rotas. Inclusive, o *gateway* pode adotar a rota secundária como a nova primária e escolher uma nova rota secundária para o instrumento, caso a rota primária não se reestabeleça.
- O *gateway* possui limitações quanto à quantidade de equipamentos que ele pode gerenciar em uma rede de acordo com seu fabricante. Como as limitações encontradas em algumas empresas são de 100 até 500 instrumentos por *gateway*, será assumido que a limitação para toda rede, nesse trabalho, é de 100 instrumentos para facilitar a padronização dos testes entre equipamentos de fabricantes diferentes.
- Como no protocolo ISA100.11a, os instrumentos desempenham papéis, ou seja, um equipamento pode ter apenas o papel de roteador, não necessitando da parte do sensor, mas no WirelessHART, os sensores são tanto sensores quanto roteadores de informação, foi assumido que todos os instrumentos que realizam medições possuem ambas as funcionalidades para que a modelagem possa ser generalista em ambos os protocolos. Porém, por este trabalho ter como foco redes com aplicações de controle, os dispositivos sensores e atuadores usados no sistema de controle não poderão rotear informações de outros dispositivos, sendo utilizados como dispositivos de início ou fim de rota obrigatoriamente a fim de economizar sua energia para transmissão de pacotes com dados de controle.
- Já no caso dos instrumentos roteadores, caso possuam as informações de sensor, essas informações serão desconsideradas para que esses equipamentos não sejam avaliados como sensores.
- A topologia da rede pode ser de algum dos tipos definidos nos protocolos, determinando-

a de acordo com o alcance de comunicação dos instrumentos. Para determinar esse alcance, leva-se em consideração a potência de transmissão  $P_{Tx}$ , que não pode ultrapassar os 10 dBm de acordo com a norma, e o limiar de recepção  $P_{Rx_{lim}}$ , que será assumido o valor de -85 dBm para o RSSI (*Received Signal Strength Indication*) *threshold*, seguindo o padrão IEEE 802.15.4, onde abaixo desse limiar, o instrumento não consegue se comunicar.

- O controlador ficará em um computador conectado ao *gateway* através da rede de automação, pois não se considerará *gateways* com capacidade de implementar controladores internamente. Esse é um modelo já utilizado na indústria, de tal modo, que o atraso nessa comunicação não influencia nas aplicações de controle.
- A posição do *gateway* dentro do ambiente industrial sempre será a melhor para que se formem o máximo de rotas diretas (sem necessidade de roteadores) com os sensores e atuadores ou, caso precisem de roteadores, que as rotas tenham o menor comprimento (quantidade de roteadores) possível.
- O tempo do *superframe* deve ser menor ou igual ao tempo de amostragem do controlador.
- A disponibilidade dos *links* da rede será avaliada pela taxa de pacotes com erro - PER (*Packet Error Rate*) -, pois é uma informação obtida ao solicitar a estatística da comunicação na rede ao *gateway*, e poderá influenciar na topologia da rede após sua instalação no ambiente industrial. O limiar de perda de pacotes (*PER threshold*) será considerado 15% nos experimentos realizados.

## 3.2 Modelo de Propagação

A potência de transmissão é definida pela norma de cada protocolo de comunicação e não deve ultrapassar os 10 dBm. Para saber o alcance de um instrumento ou se ele consegue se comunicar com um determinado instrumento é necessário calcular o nível de recepção. Para obter o nível de recepção em cada instrumento da rede, utilizar-se-á o modelo empírico - mais simples para perda de propagação em ambientes fechados ou espaços livres - da distância logarítmica descrito pela equação 3.1.

$$PL = PL_0 + 10 * n * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (3.1)$$

Onde:

- $PL$  é a perda do caminho;
- $PL_0$  é a perda do caminho a uma distância padrão. Pode ser obtido pelo modelo de propagação no espaço livre que é igual a  $10 * n * \log_{10}(4 * \pi * d_0 / \lambda)$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda;
- $n$  é o expoente da perda do caminho; aqui ele é igual a 2;
- $d_0$  é a distância padrão; sendo utilizado 1 metro como padrão;
- $X$  é a variável aleatória normal ou gaussiana com média zero referente à atenuação por desvanecimento do sinal.

Para encontrar a perda do caminho a uma distância padrão ( $PL_0$ ), pode-se calcular pelo modelo de propagação no espaço livre para a distância padrão de 1 metro ou através de medições realizadas com essa distância (Chan et al. 2007). Sendo assim, pode-se obter a potência recebida a uma certa distância  $d$  utilizando a equação 3.2.

$$P_{Rx_{dBm}} = P_{Tx_{dBm}} - PL \quad (3.2)$$

Para um modelo mais exato, à distância padrão de 1 metro, o valor de perda de 49 dBm vai ser utilizado, baseando-se nos testes realizados em (Martins 2017).

### 3.3 Rotas Disjuntas

Uma rota de comunicação é definida como o meio por onde ocorre a comunicação entre os dispositivos (seja roteador, sensor ou atuador) e o *gateway*, podendo ser direta, isto é, quando o instrumento sensor ou atuador e o *gateway* estão dentro do raio de alcance um do outro, ou indireta, ou seja, com os pacotes de comunicação passando por instrumentos roteadores.

Enquanto que uma rota disjunta é definida como um caminho de comunicação entre dispositivos que não compartilha instrumentos com outras rotas.

E uma rede é dita  $k$  vértices disjunta, para  $k \geq 2$ , se para cada par de instrumentos funcionais (sensores, atuadores e *gateways*), existem  $k$  rotas disjuntas. Diante disso, uma rede  $k$  vértices disjunta não terá perdas de comunicação entre instrumentos mesmo que haja falha de uma quantidade menor que  $k$  instrumentos (Han. et al. 2010, Lanza-Gutierrez & Gomez-Pulido 2015).

A Figura 3.1 exemplifica as rotas disjuntas numa rede, onde F1 possui 3 rotas disjuntas entre si (F1-R1-G, F1-R2-G e F1-R3-G) e algumas rotas não disjuntas (como F1-R1-R2-G que possui R2 em comum com a rota F1-R2-G).

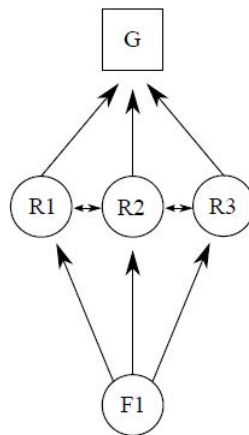


Figura 3.1: Rotas disjuntas.

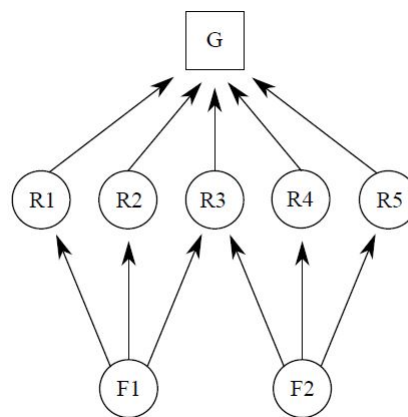
(Martins 2017)

No caso das redes industriais sem fio, cada instrumento deve possuir ao menos 2 rotas, uma primária e uma secundária, de acordo com os protocolos. Porém, a quantidade de rotas disjuntas nesse modelo será variável de acordo com a necessidade da rede em cada uma de suas etapas, e só serão consideradas rotas disjuntas com *links* de comunicação estáveis, isto é, com PER (*Packet Error Rate*) abaixo do limiar aceitável pela rede. Na etapa de projeto, será adicionada uma rota extra para que mesmo que haja a falha de uma das rotas, o instrumento possa escolher uma nova rota secundária. Com isso, a rede deve possuir 3 rotas disjuntas para cada par de instrumentos inicialmente, seguindo o padrão proposto para projeto por Martins (2017). E quando a rede estiver em operação (funcionamento), a quantidade de rotas disjuntas poderá ser diferente de acordo com o monitoramento da rede e a necessidade de aumentar a confiabilidade na troca de pacotes, por exemplo, caso uma rota, de um determinado dispositivo, esteja com a disponibilidade para comunicação baixa, isto é, alta perda de pacotes (identificada pela razão entre a quantidade de pacotes perdidos e a quantidade de pacotes enviados), será adicionada uma nova rota para o determinado dispositivo a fim de aumentar a confiabilidade na entrega dos seus pacotes de dados.

### 3.4 Rotas Disjuntas entre Vizinhos

Define-se rotas disjuntas entre vizinhos como as rotas de dispositivos diferentes que não compartilham instrumentos até o *gateway*. A Figura 3.2 exemplifica essa ideia, onde dado dois instrumentos, F1 e F2, eles possuem 2 rotas disjuntas caso existam dois caminhos entre F1 e o *gateway* e entre F2 e o *gateway* que não possuem instrumentos em comum (Martins 2017).

Figura 3.2: Rotas disjuntas entre instrumentos.



(Martins 2017)

Neste caso, F1 e F2 possuem ao menos 2 rotas disjuntas entre si (F1-R1-G, F1-R2-G e F2-R4-G, F2-R5-G) e uma rota compartilhada entre ambos (F1-R3-G e F2-R3-G).

Percebe-se que quanto maior a quantidade de roteadores, maiores são as chances de gerar rotas disjuntas entre instrumentos vizinhos. Isso aumenta a diversidade de rotas e a confiabilidade na entrega dos pacotes, pois caso haja falha de um instrumento, as rotas das quais esse instrumento não faça parte não serão afetadas por sua falha, permitindo caminhos alternativos para comunicação na rede.

### 3.5 Média da Potência de Recepção

Devido ao meio utilizado para transmissão ser o ar, fatores como interferências e até obstruções, influenciam na variação dos níveis de sinal de recepção. E para calcular a potência média de recepção entre esses os instrumentos pode-se utilizar a equação 3.3, onde  $P_{Rx_{i \rightarrow i-1}}$  é a potência de recepção quando o instrumento  $i$  envia um pacote para o instrumento  $i - 1$  e  $P_{Rx_{i-1 \rightarrow i}}$  é o envio de pacote no sentido contrário.

$$mean P_{Rx_{1n}} = \frac{\sum_{i=2}^n P_{Rx_{i \rightarrow i-1}} + P_{Rx_{i-1 \rightarrow i}}}{2 * (|n| - 1)} \quad (3.3)$$

Onde  $n$  é o  $n$ -ésimo instrumento e  $|n|$  é a quantidade de instrumentos na rota partindo do instrumento 1 até o  $n$ -ésimo instrumento.

### 3.6 Modelo Matemático Multiobjetivo

Um dos fatores mais importante para aumentar a confiabilidade da comunicação em redes industriais sem fio é obter uma disponibilidade maior para troca de pacotes entre os próprios instrumentos, pois caso várias rotas de um instrumento sensor/atuador passem pelo mesmo instrumento roteador, quando houver uma falha ou perda de comunicação com esse instrumento roteador, mais de uma rota do instrumento sensor/atuador terá sua comunicação afetada.

Assim como para o caso em que um instrumento tenha várias rotas que incluem um mesmo roteador, ou seja, uma sobreposição de rotas, ao perder a comunicação com esse roteador, as rotas dos instrumentos vão ser prejudicadas, caso vários instrumentos utilizem um mesmo roteador em suas rotas e haja falha ou perda de comunicação com esse roteador, vários instrumentos perderão rotas.

Outro ponto a ser observado é o comprimento das rotas, pois quanto mais roteadores existirem em uma rota, maior será o atraso na propagação da informação. E sabe-se que o tempo é muito importante nos processos de controle, por isso o comprimento máximo das rotas será limitado pela quantidade de *slots* de transmissão dentro do *superframe*, dado que uma comunicação entre dispositivos, inclusive com a recepção do pacote de resposta (ACK - *acknowledgement*) deve ocorrer dentro de um único *slot* de tempo.

Além disso, uma grande quantidade de rotas não é garantia de que os pacotes com dados referentes ao controle vão partir do sensor da planta, passando pelo controlador e chegar até o atuador com tempo inferior ou igual ao especificado no projeto da rede. É preciso analisar a disponibilidade de comunicação dos *links* por onde os pacotes de controle vão trafegar a fim de verificar se a taxa de perda de pacotes, PER (*Packet Error Rate*), está acima do limiar aceitável para a rede, *PER threshold*.

A potência de sinal usada no momento da troca de pacotes (transmissão e recepção) também é um item importante, pois dado os problemas de obstáculos, interferências e posicionamento dos instrumentos, pode haver uma diminuição da potência média da rede, dificultando a comunicação na mesma. Dessa forma, é imprescindível que a potência média da rede se mantenha a mais alta possível, melhorando a recepção e diminuindo a possibilidade de falhas de comunicação.

Além disso, o nível de potência do sinal de recepção de cada dispositivo deve ser analisado a fim de identificar possíveis dispositivos causadores de falha nas transmissões de pacotes pela rede com seu RSSI (*Received Signal Strength Indication*) abaixo do limiar aceitável para a rede, *RSSI threshold*.

Por último, devido ao seu alto custo aquisitivo, a quantidade de roteadores inseridos na rede será um fator importante, até por que é preciso aumentar a quantidade de roteadores para que a maior quantidade de rotas possa ser alcançada.

Após observar os pontos aqui levantados, percebe-se que eles devem ser analisados pelo modelo matemático multiobjetivo proposto, onde cada um deles será uma função objetivo a ser otimizada ou uma restrição a ser respeitada.

Como a topologia da rede pode ser configurada de várias formas sem perder sua generalidade, para encontrar a média do comprimento das rotas de toda a rede será utilizada a expressão de  $M_{LR}$  definida de forma generalista por Martins (2017) na equação 3.4.

$$M_{LR} = \frac{\sum_i \frac{\sum_{R_i} SR_{ir}}{|R_i|}}{|I|} \quad (3.4)$$

Na equação 3.4, temos que  $I$  é o conjunto de todos os instrumentos sensores/atuadores da rede,  $R_i$  constitui o conjunto das rotas de um determinado instrumento sensor/atuador,  $SR_{ir}$  representa a quantidade de instrumentos que compõem a rota  $r$  do instrumento  $i$  (comprimento da rota) e  $|I|$  denota o tamanho do conjunto.

Apesar desse trabalho utilizar o conceito de rotas disjuntas, que é o principal diferencial do trabalho de Martins (2017), aqui ao contrário do trabalho citado, as rotas disjuntas serão selecionadas, se e somente se, todos os seus *links* tiverem alta disponibilidade para comunicação na rede, ou seja, baixa taxa de perda de pacotes transmitidos. Sendo assim, as rotas disjuntas disponíveis (*DRD*) serão selecionadas de acordo com seu nível de disponibilidade para comunicação na rede de acordo com a equação 3.5 definida nesta tese.

$$DRD = \prod_{CDRL} Disp_l, \text{ caso } DRD > 0 \quad (3.5)$$

E como a disponibilidade de uma rota para comunicação na rede depende do nível de disponibilidade para comunicação de todos os seus *links*, sendo calculada de acordo com sua taxa de perda de pacotes (*PER* - *Packet Error Rate*), utiliza-se a equação 3.6 para definir se um determinado *link*  $l$  está disponível para comunicação respeitando os requisitos das aplicações de controle.

$$Disp_l = \begin{cases} 1, & \text{se } PER \text{ do link } l \leq PER \text{ threshold} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.6)$$

Após limitar a escolha das rotas disjuntas a apenas aquelas que estão disponíveis para comunicação respeitando os requisitos do controlador, utiliza-se a lógica definida por

Martins (2017) para verificar as combinações das rotas disjuntas existentes na rede.

A quantidade mínima de combinações de rotas disjuntas de todos os instrumentos da rede é definida como  $mDR$ , podendo ser expressa pela equação 3.7 de Martins (2017).

$$mDR = \min(DRQ_i, \forall i \in I) \quad (3.7)$$

Já  $DRQ_i$  é a quantidade de combinações de 3 das rotas do instrumento  $i$  que não possuem instrumentos em comum (excluindo-se o instrumento sensor/atuador e o *gateway*), isto é, cada instrumento precisa ter pelo menos 3 rotas disjuntas até o *gateway*, aumentando a confiabilidade nas trocas de pacotes na rede, e esta é expressa pela equação 3.8 de Martins (2017).

$$DRQ_i = \sum_{C_i} Comb_c \quad (3.8)$$

O conjunto  $C_i$  é o conjunto das combinações das rotas do instrumento  $i$  e  $Comb_c$  é a função que realiza a verificação da não existência de rotas em comum, ou seja, verifica se existem rotas disjuntas, definida pela equação 3.9 de Martins (2017).

$$Comb_c = \begin{cases} 1, & \text{se } \bigcap_3 C_{R_r} = \emptyset \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.9)$$

Onde  $R_r$  é o conjunto de instrumentos da rota  $r$  da combinação  $c$ .

Do ponto de vista de instrumentos diferentes também é preciso utilizar uma lógica semelhante para ter uma rede onde cada instrumento possua  $n$  rotas disjuntas de todos os outros instrumentos da rede, ou seja, cada um possua  $n$  rotas que não sejam compartilhadas com nenhum outro instrumento, cuja combinação é realizada com todas as rotas de todos os instrumentos da rede ao mesmo tempo. E a quantidade de combinações de rotas disjuntas da rede é dada pela equação 3.10 de Martins (2017).

$$DRNQ = \sum_{CN} Comb_n \quad (3.10)$$

O conjunto  $CN$  é o conjunto das combinações das rotas de cada instrumento da rede com as rotas dos outros instrumentos e  $Comb_n$  é a função definida pela equação 3.11 de Martins (2017).

$$Comb_n = \begin{cases} 1, & \text{se } \bigcap_{|n|} n_{R_i} = \emptyset \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.11)$$

Onde  $|n|$  é o tamanho do conjunto da combinação  $n$  das rotas dos instrumentos da rede e  $n_{R_i}$  é o conjunto dos instrumentos da rota  $i$  da combinação  $n$ .

Diante da análise matemática apresentada, pode-se definir o problema de otimização multiobjetivo tendo como funções objetivo 3.12.

$$f_1 = M_{LR}, f_2 = mDR, f_3 = DRNQ, f_4 = |RI|, f_5 = meanP_{Rx_{1n}} \quad (3.12)$$

Onde  $M_{LR}$  é a média do comprimento das rotas,  $mDR$  é a quantidade mínima de combinações de rotas disjuntas de todos os instrumentos da rede,  $DRNQ$  é quantidade de combinações de rotas disjuntas da rede,  $RI$  é o conjunto dos instrumentos roteadores e

$meanP_{Rx_{1n}}$  é a potência média definida pela equação 3.3 e tem-se como objetivo encontrar uma solução ótima para o modelo 3.13:

$$\min(f_1), \max(f_2), \max(f_3), \min(f_4), \max(f_5) \quad (3.13)$$

sujeito às restrições 3.14.

$$SR_{ir} \leq QS, |R_i| \geq IDR_i, \forall i \in I, mDR > 1, DRQN > 1, P_{Rx_{i \rightarrow i-1}} \geq RL \quad (3.14)$$

Com o comprimento máximo de  $SR_{ir}$  (cada rota  $r$  do instrumento  $i$ ) respeitando o limite da quantidade total de *slots* de 10 ms ( $QS$ ) dentro do tempo total de um *superframe*. Sendo  $IDR_i$  a quantidade de rotas disjuntas para um determinado instrumento  $i$ , que na etapa de projeto iniciará com valor igual a 3, mas após a instalação da rede, pode variar de acordo com o monitoramento de informações estatísticas de desempenho da rede, como o RSSI e o PER, e a necessidade de aumentar a confiabilidade da mesma. A quantidade mínima de combinações de rotas disjuntas de todos os instrumentos da rede deve ser maior que 1. A quantidade de combinações de rotas disjuntas da rede deve ser maior que 1 também. E o  $RL$  é o limiar mínimo para recepção de sinal, *RSSI threshold*.

Para o processamento do algoritmo genético multiobjetivo, a codificação utilizada na cadeia genética dos indivíduos foi a binária, como forma de simplificar a busca pelos roteadores. Cada roteador é representado por um *bit*, que se ativo, indica que o roteador está ativo e pode ser utilizado para o roteamento das informações dos outros instrumentos. O conjunto de *bits* formam o cromossomo de um indivíduo que determina a configuração dos instrumentos.

Cada instrumento é alocado em uma posição aleatória, fixa e de forma uniforme. Sendo assim, a busca do algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II deve ser pelo indivíduo (configuração de roteadores) que atende a função multiobjetivo (modelo 3.13) sujeita às restrições 3.14.

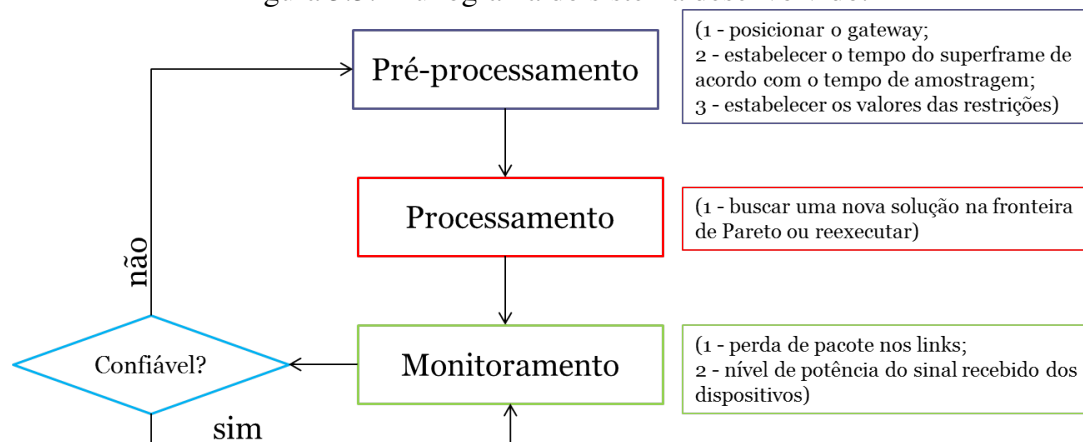
A escolha de utilizar esse modelo foi baseada na dificuldade que seria implementar um cromossomo com números inteiros ou decimais para definir as posições dos instrumentos e essas posições serem alteradas na casa de unidade ou décimos de unidade até ser encontrada as melhores posições. Isso também traria outro nível de dificuldade ao problema, pois os instrumentos não podem ser alocados em qualquer lugar (não podem ultrapassar os limites de alocação, definidos pelas características da planta, ou sobrepor outros instrumentos), devendo, a cada movimento de cada instrumento, avaliar se não estava transpondo mais essa restrição.

Definido o problema e a proposta de solução, implementou-se o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II para a realização dos testes com tais definições em foco. Lembrando que este algoritmo foi escolhido dentre os pesquisados pela sua eficiência e simplicidade de implementação, que ele se tornou um dos primeiros algoritmos genéticos multiobjetivo a ter uma versão implementada com paralelismo, fazendo com que seu processamento fosse bem mais rápido em relação aos outros.

O fluxograma apresentado na Figura 3.3 resume o sistema aqui desenvolvido. Nele é possível observar as três etapas de operação do sistema, sendo elas:

- Pré-processamento: Inicialmente, o sistema identifica os dispositivos (sensores e atuadores) que fazem parte dos sistemas a serem controlados e posiciona o *gateway*

Figura 3.3: Fluxograma do sistema desenvolvido.



dentro do ambiente industrial de forma estratégica, onde se forme o máximo de rotas diretas entre esses dispositivos e o *gateway* ou, caso precisem de roteadores, que as rotas tenham o menor comprimento (quantidade de roteadores) possível. Dessa forma, o sistema prioriza a comunicação do *gateway* com os instrumentos que participam dos processos de controle. Além disso, o tempo total do *superframe* é estabelecido como menor ou igual ao tempo de amostragem necessário para aplicações de controle nos processos industriais. E, por último, define-se também os valores das restrições 3.14.

- **Processamento:** É responsável por aplicar o algoritmo genético para otimização multiobjetivo NSGA-II, encontrando a fronteira de Pareto, com o conjunto de soluções ótimas para as funções objetivo do modelo 3.13 e que atendem todas as restrições 3.14. Caso o algoritmo já tenha sido executado, implicando em já ter encontrado uma fronteira de Pareto, e o pré-processamento tenha alterado alguma das variáveis do modelo matemático, há uma busca dentro da fronteira de Pareto armazenada a fim de encontrar uma solução que atenda os novos requisitos, sem que precise executar o algoritmo novamente. Caso nenhuma das soluções dentro da fronteira de Pareto atenda os novos requisitos, o algoritmo NSGA-II é executado novamente para encontrar uma nova fronteira de Pareto. O NSGA-II ordena as soluções aplicando o conceito de dominância entre elas e calculando a distância de aglomeração, como sendo o módulo entre os valores encontrados para cada função objetivo.
- **Monitoramento:** Essa etapa é realizada pelo BR-WirelessExpert, que coleta as informações da rede em tempo real a fim de analisar o desempenho dos dispositivos e a confiabilidade na troca de pacotes nos *links* da rede. Para o WirelessHART, usa-se os comandos 779 (para saber a quantidade de pacotes gerados e perdidos pelo próprio dispositivo) e 780 (para saber a quantidade de pacotes enviados e perdidos pelo seu vizinho) através do *driver* HART; já para o ISA100.11a, utiliza-se o comando *Objeto AlertPolicy* que ativa um alerta que indica se a quantidade de pacotes perdidos ultrapassou o limiar estabelecido (*NeiErrThresh*). Diante dessas informações, é possível analisar se a rede continua confiável para controle ou se é preciso fazer um

novo processamento para encontrar um novo estado confiável da rede para realizar aplicações de controle através da rede industrial sem fio.



---

## Capítulo 4

# Metodologia dos Experimentos e Resultados

---

Neste capítulo é descrita a metodologia dos experimentos e os resultados alcançados pelo modelo proposto nesta tese. Como prova de conceito, foram simuladas redes industriais de sensores e atuadores sem fio com as ferramentas apresentadas a seguir.

Em seguida foram realizadas as configurações para execução dos testes com simulações: primeiro, a área com os instrumentos fixos (sensores/atuadores das plantas com controle industrial) e o gerenciador da rede, seguido pela configuração do algoritmo genético com os parâmetros de treinamento e as restrições, além da parametrização da quantidade de testes, para, posteriormente, buscar as alocações aleatórias dos roteadores.

### 4.1 Metodologia dos Experimentos

A fim de obter as melhores localizações dos dispositivos industriais na rede de acordo com as restrições de controle, foram simulados alguns cenários de teste, os quais permitem avaliar os resultados do modelo proposto. Para validar a proposta foi utilizada uma área de dispersão dos instrumentos retangular bidimensional, que possui uma largura de 1590,75 metros por 1228,50 metros de comprimento, e a quantidade máxima de instrumentos que podem ser alocados (somando os instrumentos fixos, o gerenciador da rede e os roteadores) foi limitada a 100 instrumentos (limite imposto pelo *hardware* da maioria dos fabricantes atualmente), como explicado anteriormente.

Para cada teste, os roteadores podem ser alocados até a quantidade de dispositivos suportados pela rede (100 menos a quantidade de dispositivos fixos) aleatoriamente dentro do raio de alcance de comunicação dos dispositivos fixos, a saber, uma área de dispersão circular ao redor de cada sensor ou atuador.

Já o algoritmo NSGA-II foi configurado em todos os cenários de teste com os parâmetros escolhidos a seguir: 50 indivíduos para o tamanho da população; 4000, como a quantidade máxima de gerações para a população, e, no mínimo, 50% de melhorias na população são as condições de parada utilizadas; a seleção dos pais é feita pelo torneio do entre 3 indivíduos; 95%, como a probabilidade de cruzamento; e 1%, como a probabilidade de mutação.

As outras configurações usadas para o problema são as limitações de no mínimo 1

combinação de 3 ou mais rotas disjuntas, dependendo da disponibilidade dos *links* na rede, para cada instrumento até o *gateway* e 1 combinação de 1 rota disjunta para a rede, ou seja, no mínimo 1 rota disjunta entre os vizinhos (todos os dispositivos da rede).

Foram realizados 3 testes com alocações diferentes, a saber, no teste do primeiro cenário foram alocados 8 instrumentos sensores/atuadores fixos e o *gateway*, permitindo a alocação de até 91 instrumentos roteadores, totalizando até 100 instrumentos na rede. Já no teste do segundo cenário foram utilizados 16 instrumentos sensores/atuadores fixos permitindo a alocação de até 83 instrumentos roteadores. Cada configuração inicial tentou abordar um cenário onde a dispersão dos instrumentos fixos não permitia a obtenção da configuração ideal, 3 rotas para cada instrumento, de forma direta. E no terceiro cenário, que na verdade, é o primeiro cenário com a rede na etapa de execução, após a sua instalação, será verificado a influência do nível de potência do sinal recebido e a taxa de perda de pacotes na formação de novas rotas após o projeto ter sido finalizado e executado.

Os parâmetros dos testes estão organizados na Tabela 4.1.

A ferramenta, que executa o cálculo do modelo para os experimentos propostos, foi desenvolvida como uma biblioteca na linguagem Java e incorporada ao sistema de gestão de redes industriais sem fio, BR-WirelessExpert, que coleta e monitora os dados de redes reais WirelessHART e ISA100.11a (Santos et al. 2017). E para coletar os dados do *PER threshold* e *RSSI threshold* foi preciso adicionar os devidos comandos de cada protocolo aos *drivers* de comunicação (HART e GSAP sobre IP) com os *gateways* industriais.

A fim de permitir a comparação de resultados, mesmo sabendo que não é possível realizar tal feito com todos os descritos na Seção 2.4, pois apesar de todos utilizarem técnicas semelhantes, os problemas são diferentes na maioria dos casos, onde as redes utilizadas são redes de sensores sem fio comuns (Ad hoc, sem restrições de latência, caminhos redundantes entre outros aspectos). Dessa forma, o trabalho desta tese restringirá suas comparações ao trabalho desenvolvido por Martins (2017).

A saber, essa metodologia já foi utilizada para obter a melhor localização dos dispositivos em uma rede industrial sem fio com dispositivos reais em laboratório (Santos et al. 2018), forçando inclusive a atenuação do sinal recebido, mas como o laboratório dispõe de poucos instrumentos físicos, com uma área pequena e o foco dessa tese é mostrar que a ferramenta é genérica, os testes foram feitos através de simulação em uma área maior e também com uma quantidade maior de instrumentos.

## 4.2 BR-WirelessExpert 2.0

Nomeado de BR-WirelessExpert, que em sua segunda versão passou a contar com os *drivers* HART e GSAP, o seu principal objetivo é fornecer informações valiosas sobre redes industriais sem fio tanto para operadores quanto para projetistas, permitindo o desenvolvimento de aplicações industriais tolerantes a falhas e manutenção do sistema de forma mais eficiente.

Uma das funcionalidades da ferramenta é a capacidade de formar a topologia real da rede analisada como exibido na Figura 4.1. Para exemplificar tal funcionalidade, foi requisitado ao gerente da rede que informasse todos os dispositivos que faziam parte da

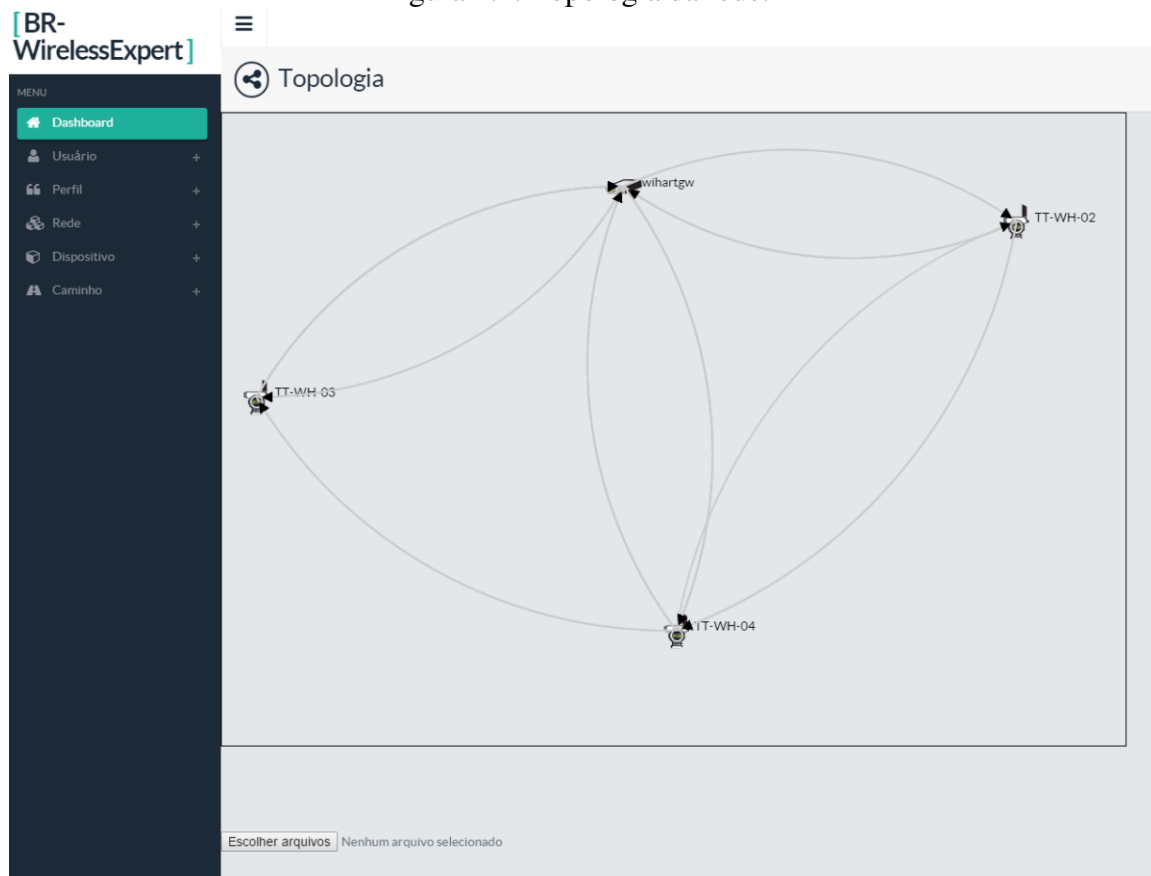
Tabela 4.1: Parâmetros utilizados nos testes.

| Parâmetro                                            | Valor     |
|------------------------------------------------------|-----------|
| Largura da área                                      | 1590,75 m |
| Comprimento da área                                  | 1228,50 m |
| Quantidade máximo de instrumentos                    | 100       |
| Quantidade de instrumentos fixos                     | 8, 16     |
| Tamanho da População                                 | 50        |
| Quantidade máxima de gerações                        | 4000      |
| Quantidade de gerações sem melhoria da solução       | 50%       |
| Probabilidade de Cruzamento                          | 95%       |
| Probabilidade de mutação                             | 1%        |
| Tamanho da tabela do torneio                         | 3         |
| Quantidade mínima de rotas disjuntas por instrumento | 3         |
| Quantidade mínima de rotas disjuntas entre vizinhos  | 1         |

rede junto com os *links* de comunicação existentes. Na Figura 4.1 é possível ver uma rede simples (sem rotas disjuntas) com o gateway e 3 dispositivos sensores de campo.

O sistema também permite que seja realizado o acompanhamento em tempo real das variáveis dos dispositivos (primária - PV, secundária - SV, terciária - TV e quaternária - QV), entre elas estão o nome da *tag* do dispositivo, suas variáveis monitoradas nos processos, a quantidade de dias restantes da carga da bateria, a potência de transmissão em dBm e o nível do sinal recebido por cada dispositivo em dBm, como mostrado na Figura 4.2. Na quarta linha da Figura 4.2 tem-se o dispositivo com *tag* TT-WH-04; valores das variáveis (primária, secundária, terciária e quaternária), respectivamente, 271,72,

Figura 4.1: Topologia da rede.



688,31, 913,00, e 496,94; enquanto a bateria tem uma estimativa de duração de 2553 dias; potência de transmissão de 10 dBm; e nível de sinal recebido a -85 dBm.

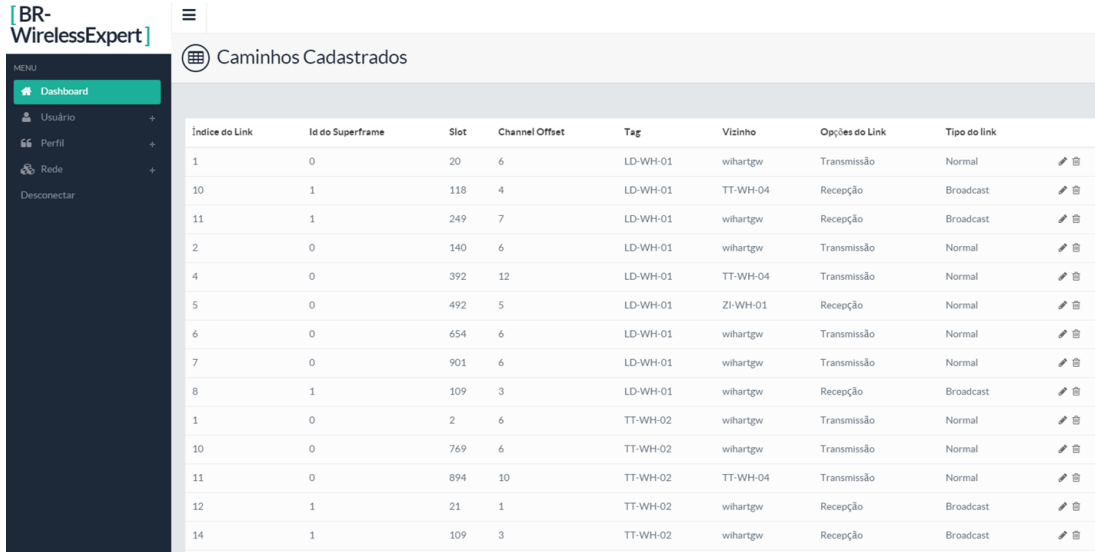
Figura 4.2: Lista de dispositivos.

| Tag      | PV        | SV       | TV        | QV        | Bateria(dias) | Potencia de transmissao | Nivel recebido |  |
|----------|-----------|----------|-----------|-----------|---------------|-------------------------|----------------|--|
| wihartgw | 3.0       | 3.0      | 32.0      | 37.0      | -1.0          | 0                       | 0              |  |
| TT-WH-03 | 36.37973  | NaN      | 27.0      | 7.161802  | 3815.0        | 10                      | -85            |  |
| TT-WH-02 | 343.27155 | NaN      | 26.75     | 7.2458515 | 3950.0        | 10                      | -85            |  |
| TT-WH-04 | 271.72308 | 688.3091 | 913.00024 | 496.94806 | 2553.0        | 10                      | -85            |  |

[Novo](#)

As informações sobre os *links* entre os dispositivos, formando os canais de comunicação dentro da rede, também podem ser monitorados. Na Figura 4.3 são exibidas as informações dos *links*, como o índice do *link* dentro da lista de *links* conectados ao dispositivo de origem, o identificador do *superframe* usado pelo link, o número do *slot* no *superframe*, o canal, o nome das *tags* dos dispositivos de origem e destino (vizinho), as opções do *link* indicam a direção (se é transmissão ou recepção) e o tipo do *link* indica se é normal (para um único dispositivo) ou usado para *broadcast*.

Figura 4.3: Links da rede.



| Índice do Link | Id do Superframe | Slot | Channel Offset | Tag      | Vizinho  | Opções do Link | Tipo do link |
|----------------|------------------|------|----------------|----------|----------|----------------|--------------|
| 1              | 0                | 20   | 6              | LD-WH-01 | wihartgw | Transmissão    | Normal       |
| 10             | 1                | 118  | 4              | LD-WH-01 | TT-WH-04 | Recepção       | Broadcast    |
| 11             | 1                | 249  | 7              | LD-WH-01 | wihartgw | Recepção       | Broadcast    |
| 2              | 0                | 140  | 6              | LD-WH-01 | wihartgw | Transmissão    | Normal       |
| 4              | 0                | 392  | 12             | LD-WH-01 | TT-WH-04 | Transmissão    | Normal       |
| 5              | 0                | 492  | 5              | LD-WH-01 | Zi-WH-01 | Recepção       | Normal       |
| 6              | 0                | 654  | 6              | LD-WH-01 | wihartgw | Transmissão    | Normal       |
| 7              | 0                | 901  | 6              | LD-WH-01 | wihartgw | Transmissão    | Normal       |
| 8              | 1                | 109  | 3              | LD-WH-01 | wihartgw | Recepção       | Broadcast    |
| 1              | 0                | 2    | 6              | TT-WH-02 | wihartgw | Transmissão    | Normal       |
| 10             | 0                | 769  | 6              | TT-WH-02 | wihartgw | Transmissão    | Normal       |
| 11             | 0                | 894  | 10             | TT-WH-02 | TT-WH-04 | Transmissão    | Normal       |
| 12             | 1                | 21   | 1              | TT-WH-02 | wihartgw | Recepção       | Broadcast    |
| 14             | 1                | 109  | 3              | TT-WH-02 | wihartgw | Recepção       | Broadcast    |

Ao observar a última linha da Figura 4.3, tem-se que o dispositivo de origem (*Tag*) é o TT-WH-02; o índice do *link* é o 10 na tabela de *links* do dispositivo de origem; o identificador (id) do *superframe* é o 0; o *slot* é o 769 dentro do *textitsuperframe* 0; o canal de comunicação é o 6; o vizinho desse *link* de comunicação é o *gateway*, com *Tag* wihartgw; a opção do *link* é de transmissão - no sentido origem para vizinho; e o tipo do *link* é o normal, ou seja, comunicação 1 (origem) para 1 (vizinho).

## 4.3 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados para os testes realizados nos diversos cenários simulados. Considerando a seguinte rota de dados para controle em todas as situações:  $Planta_i -> Sensor_{ci} -> Gateway -> Controlador_i -> Gateway -> Atuador_{ci} -> Planta_i$  (lembrando que os controladores, identificados por  $ci$ , ficam na rede de automação conectada ao *gateway* da rede industrial sem fio). Resumindo, os dados da planta industrial a ser controlada são coletados pelos sensores e repassados para o controlador através do *gateway*; da mesma forma que a ação de controle gerada pelo controlador é repassada para os atuadores da planta também através do *gateway*, que é o instrumento centralizador da rede. Outro detalhe a ser lembrado é que as rotas entre sensor/atuator e *gateway* pode conter roteadores, caso seja necessário.

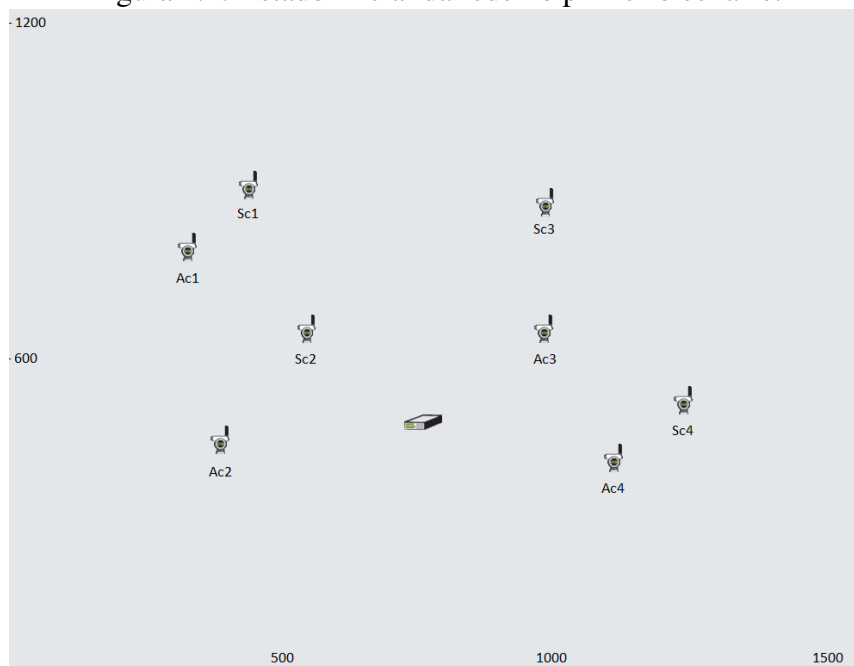
### 4.3.1 Primeiro Cenário

Para o primeiro cenário foram gerados os resultados do algoritmo proposto nessa tese, para redes industriais sem fio com ênfase em aplicação de controle, e do algoritmo desenvolvido em (Martins 2017), para redes industriais de sensores sem fio, a fim de realizar a comparação de seus resultados, já que o primeiro é focado em um tipo de aplicação e o segundo é generalista.

Lembrando que o algoritmo aqui desenvolvido altera a posição do *gateway* de forma a aproximá-lo dos dispositivos sensores e atuadores da malha de controle de forma a priorizar suas rotas e diminuir o comprimento das mesmas, ao contrário do algoritmo de (Martins 2017). Diante disso, as posições finais de alguns instrumentos tendem a ser diferentes; E também não se permite que os dispositivos fixos possam fazer a função de roteadores a fim de economizar suas baterias e dar preferência para transmissão dos dados referentes ao controle, fazendo com que o modelo aqui proposto tenda a adicionar mais dispositivos roteadores e rotas ao final.

A Figura 4.4 ilustra o estado inicial da disposição dos instrumentos (*gateway*, sensores e atuadores) no ambiente industrial. Caso o sensor/atuador faça parte de uma malha de controle, terá o índice *ci* para indicar o controlador. Isso acontece com todos os sensores e atuadores desse cenário.

Figura 4.4: Estado inicial da rede no primeiro cenário.



Os roteadores foram alocados sempre dentro da área definida pela largura e pelo comprimento e respeitando a distância de, pelo menos, 1 metro para os outros dispositivos, inclusive para o *gateway*.

Para o primeiro cenário, o resultado obtido (fronteira de Pareto com população de tamanho 50) para o algoritmo proposto neste trabalho é exibido na Tabela 4.2, onde:

- TI é o total de instrumentos da rede;
- MS é a média de saltos (dispositivos) das rotas;
- RDP é quantidade de combinações de 3 rotas disjuntas por instrumento;
- TR é o total de roteadores;
- MP é a média de potência dos instrumentos;
- RDE é a quantidade de combinações de 1 rota disjunta entre instrumentos.

Tabela 4.2: Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo proposto para o primeiro cenário.

| <b>TI</b> | <b>MS</b> | <b>RDP</b> | <b>TR</b> | <b>MP</b> | <b>RDE</b> |
|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 17        | 3,18      | 1          | 8         | -50,82    | 8          |
| 18        | 3,16      | 1          | 9         | -51,64    | 15         |
| 19        | 3,34      | 1          | 10        | -50,12    | 29         |
| 19        | 3,26      | 1          | 10        | -49,29    | 10         |
| 20        | 3,28      | 1          | 11        | -51,47    | 24         |
| 20        | 3,34      | 1          | 11        | -50,15    | 40         |
| 21        | 3,36      | 1          | 12        | -48,12    | 38         |
| 22        | 3,33      | 2          | 13        | -47,66    | 34         |
| 23        | 3,41      | 1          | 14        | -48,03    | 52         |
| 23        | 3,38      | 4          | 14        | -47,46    | 58         |
| 24        | 3,47      | 1          | 15        | -45,33    | 70         |
| 25        | 3,66      | 1          | 16        | -51,54    | 43         |
| 26        | 3,55      | 8          | 17        | -48,18    | 354        |
| 27        | 3,62      | 1          | 18        | -51,21    | 286        |
| 27        | 3,66      | 1          | 18        | -46,08    | 161        |
| 28        | 3,69      | 15         | 19        | -46,71    | 653        |
| 29        | 3,52      | 1          | 20        | -47,13    | 324        |
| 29        | 3,63      | 2          | 20        | -46,05    | 644        |
| 30        | 3,71      | 1          | 21        | -46,12    | 530        |
| 31        | 3,72      | 1          | 22        | -46,32    | 769        |
| 31        | 3,72      | 1          | 22        | -51,33    | 102        |
| 32        | 3,68      | 1          | 23        | -48,04    | 952        |
| 32        | 3,62      | 6          | 23        | -47,18    | 843        |
| 33        | 3,58      | 28         | 24        | -48,01    | 1023       |
| 33        | 3,70      | 1          | 24        | -45,08    | 998        |
| 34        | 3,44      | 1          | 25        | -45,02    | 821        |
| 35        | 3,54      | 1          | 26        | -46,36    | 998        |
| 36        | 3,48      | 23         | 27        | -49,14    | 912        |
| 36        | 3,54      | 16         | 27        | -45,64    | 926        |
| 37        | 3,43      | 8          | 28        | -51,28    | 605        |
| 38        | 3,42      | 6          | 29        | -51,29    | 578        |
| 39        | 3,40      | 1          | 30        | -48,24    | 911        |
| 40        | 3,38      | 1          | 31        | -48,89    | 889        |
| 41        | 3,71      | 33         | 32        | -46,97    | 906        |
| 42        | 3,73      | 62         | 33        | -48,02    | 956        |
| 43        | 3,65      | 1          | 34        | -47,61    | 842        |
| 44        | 3,81      | 89         | 35        | -46,17    | 1003       |
| 45        | 3,63      | 8          | 36        | -50,12    | 1058       |
| 46        | 3,76      | 22         | 37        | -21,03    | 1046       |

|    |      |     |    |        |      |
|----|------|-----|----|--------|------|
| 46 | 3,59 | 62  | 37 | -50,81 | 983  |
| 47 | 3,66 | 81  | 38 | -51,52 | 983  |
| 48 | 3,78 | 92  | 39 | -51,24 | 928  |
| 49 | 3,92 | 73  | 40 | -50,89 | 926  |
| 49 | 3,92 | 98  | 40 | -48,42 | 1024 |
| 50 | 3,98 | 182 | 41 | -47,96 | 1018 |
| 51 | 4,02 | 246 | 42 | -49,78 | 1064 |
| 52 | 4,08 | 263 | 43 | -48,46 | 1051 |
| 53 | 4,01 | 216 | 44 | -49,58 | 1068 |
| 54 | 4,22 | 226 | 45 | -49,22 | 1012 |
| 55 | 4,26 | 226 | 46 | -49,16 | 1034 |

Como o espaço da solução contém 6 dimensões, a sua visualização de forma gráfica não é possível de ser realizada neste documento, mas pode-se observar a dominância entre as linhas da tabela, onde por exemplo, o resultado da primeira contém menos instrumentos (TI), a saber 17, em relação à segunda linha, que contém 18, mas em compensação, a segunda linha contém mais combinações de 1 rota disjunta entre os instrumentos (RDE), a saber 15, em comparação à primeira linha, que contém apenas 8.

Enquanto que para o algoritmo desenvolvido por Martins (2017), o resultado obtido (fronteira de Pareto com população de tamanho 50) pode ser visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo de comparação para o primeiro cenário.

| <b>TI</b> | <b>MS</b> | <b>RDP</b> | <b>TR</b> | <b>MP</b> | <b>RDE</b> |
|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 16        | 3,07      | 1          | 7         | -51,16    | 4          |
| 17        | 3,02      | 1          | 8         | -51,14    | 8          |
| 17        | 3,14      | 1          | 8         | -49,96    | 18         |
| 18        | 3,22      | 1          | 9         | -48,65    | 2          |
| 19        | 3,08      | 1          | 10        | -51,13    | 2          |
| 19        | 3,15      | 1          | 10        | -49,94    | 32         |
| 20        | 3,25      | 1          | 11        | -48,79    | 26         |
| 20        | 3,25      | 1          | 11        | -48,79    | 26         |
| 21        | 3,36      | 1          | 12        | -47,25    | 15         |
| 22        | 3,27      | 1          | 13        | -48,89    | 34         |
| 23        | 3,45      | 1          | 14        | -44,12    | 61         |
| 23        | 3,52      | 1          | 14        | -42,04    | 20         |
| 24        | 3,18      | 1          | 15        | -47,69    | 260        |
| 24        | 3,43      | 1          | 15        | -42,77    | 182        |
| 25        | 3,36      | 1          | 16        | -46,61    | 30         |
| 25        | 3,39      | 1          | 16        | -46,85    | 446        |

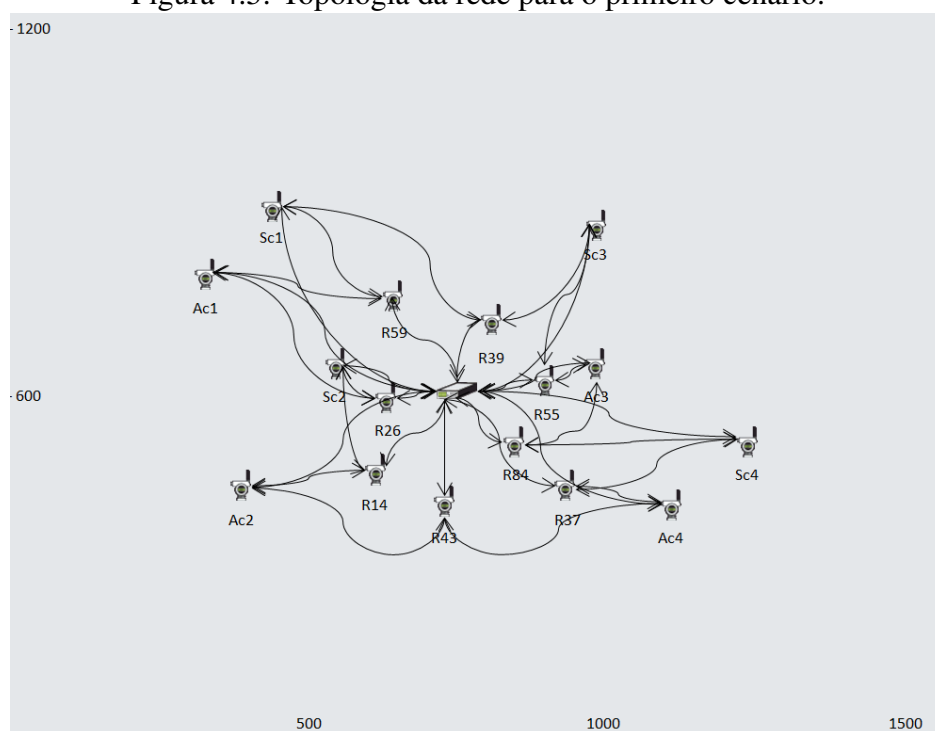
|    |      |     |    |        |     |
|----|------|-----|----|--------|-----|
| 26 | 3,26 | 1   | 17 | -45,04 | 101 |
| 27 | 3,62 | 6   | 18 | -45,97 | 853 |
| 28 | 3,50 | 1   | 19 | -45,59 | 817 |
| 28 | 3,60 | 4   | 19 | -46,32 | 827 |
| 30 | 3,08 | 1   | 21 | -50,71 | 72  |
| 30 | 3,40 | 4   | 21 | -47,96 | 839 |
| 31 | 3,31 | 1   | 22 | -48,02 | 461 |
| 31 | 3,50 | 1   | 22 | -46,33 | 868 |
| 32 | 3,64 | 35  | 23 | -45,57 | 901 |
| 33 | 3,20 | 1   | 24 | -47,57 | 428 |
| 33 | 3,54 | 1   | 24 | -46,04 | 846 |
| 34 | 3,32 | 1   | 25 | -48,01 | 829 |
| 34 | 3,65 | 28  | 25 | -46,45 | 938 |
| 35 | 3,09 | 1   | 26 | -50,96 | 341 |
| 35 | 3,09 | 1   | 26 | -50,96 | 341 |
| 36 | 3,54 | 1   | 27 | -47,18 | 871 |
| 37 | 3,21 | 1   | 28 | -48,32 | 506 |
| 38 | 3,44 | 1   | 29 | -47,27 | 872 |
| 38 | 3,44 | 1   | 29 | -47,27 | 872 |
| 39 | 3,43 | 1   | 30 | -47,44 | 556 |
| 39 | 3,67 | 120 | 30 | -45,88 | 955 |
| 41 | 3,33 | 1   | 32 | -49,86 | 965 |
| 42 | 3,34 | 1   | 33 | -49,85 | 965 |
| 44 | 3,34 | 1   | 35 | -49,97 | 970 |
| 45 | 3,46 | 10  | 36 | -49,49 | 970 |
| 47 | 3,23 | 1   | 38 | -50,13 | 965 |
| 47 | 3,46 | 20  | 38 | -49,63 | 974 |
| 47 | 3,57 | 84  | 38 | -49,06 | 959 |
| 49 | 3,69 | 165 | 40 | -48,02 | 941 |
| 50 | 3,58 | 120 | 41 | -49,26 | 961 |
| 50 | 3,69 | 220 | 41 | -48,03 | 927 |
| 52 | 3,59 | 165 | 43 | -49,36 | 954 |
| 52 | 3,59 | 165 | 43 | -49,36 | 954 |
| 53 | 3,58 | 165 | 44 | -49,07 | 964 |

Como a primeira linha das Tabelas 4.2 e 4.3 atende os requisitos da aplicação de controle e contém a menor quantidade de dispositivos (indicando o menor custo de implementação), verifica-se que o algoritmo proposto nesse trabalho adicionaria 8 dispositivos roteadores contra 7 do outro, caso o interesse maior seja a redução de custos com aquisição de instrumentos, que é um dos objetivos conflitantes. Essa diferença já era esperada tendo em vista que esse utiliza os instrumentos fixos como roteadores também, enquanto aquele não faz uso de tal função nesses instrumentos.

Comparando, mais uma vez, a primeira linha das Tabelas 4.2 e 4.3, percebe-se que apesar do algoritmo proposto adicionar mais roteadores (8 contra 7), a confiabilidade da rede proposta pelo mesmo tende a ser maior, pois ela tem uma quantidade maior de combinações de rotas disjuntas entre os instrumentos (8 contra 4).

A topologia encontrada pelo algoritmo proposto nesse trabalho é exibida na Figura 4.5 de forma simplificada. Observa-se que a topologia é em malha (*mesh*), onde a posição do *gateway* foi alterada, de forma estratégica, para formar mais rotas diretas com os dispositivos pertencentes às malhas de controle e cada um deles possui 3 rotas disjuntas até o *gateway*.

Figura 4.5: Topologia da rede para o primeiro cenário.



Como a fronteira de Pareto para este problema é multidimensional, o que impossibilita sua visualização com todas as suas dimensões, pode-se avaliar a fronteira de Pareto utilizando até três dimensões individualmente. De forma a facilitar a visualização, a Figura 4.6 representa a fronteira de Pareto com 2 dimensões apenas (quantidade de roteadores e quantidade de combinações de rotas disjuntas por instrumento, dados da Tabela 4.2) e a Figura 4.7 apresenta a fronteira de Pareto com 2 dimensões (dados da Tabela 4.2) também, a saber, a quantidade de roteadores e a quantidade de combinações de rotas disjuntas entre instrumentos vizinhos.

De modo geral, comparando os resultados, através das Tabelas 4.2 e 4.3 e das Figuras 4.8 e 4.9, observa-se que o algoritmo proposto tende a adicionar mais roteadores que o algoritmo usado na comparação, mas em compensação, é visto que a quantidade de rotas disjuntas para cada instrumento ou entre instrumentos vizinhos é maior, na maioria dos casos, indicando maior confiabilidade na troca de pacotes pela rede.

Figura 4.6: Fronteira de Pareto para o primeiro cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas por instrumento.

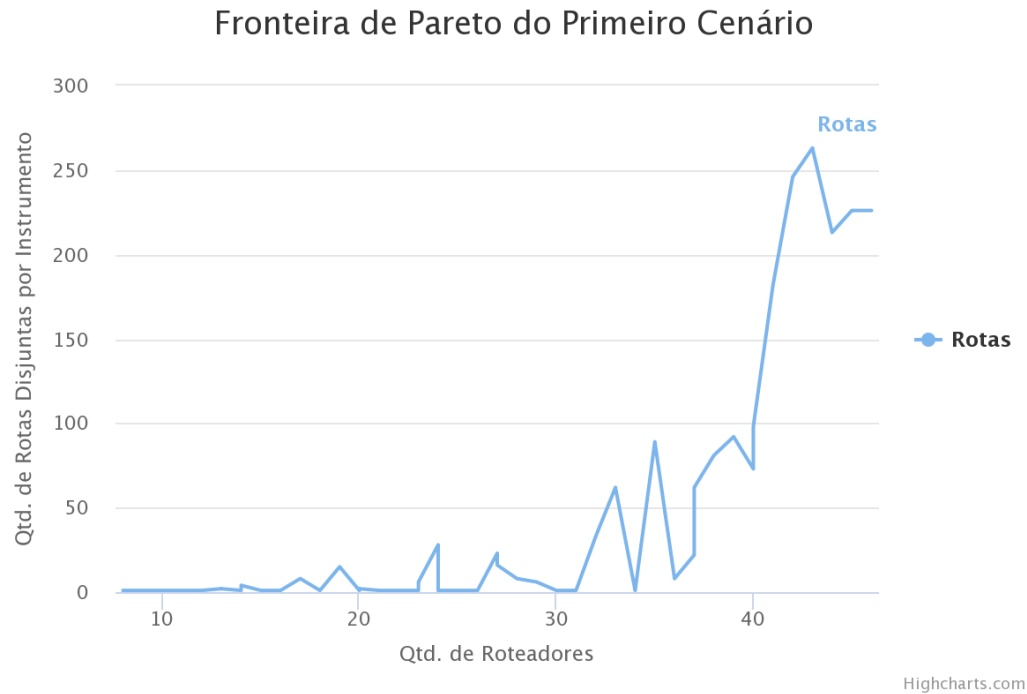


Figura 4.7: Fronteira de Pareto para o primeiro cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos.

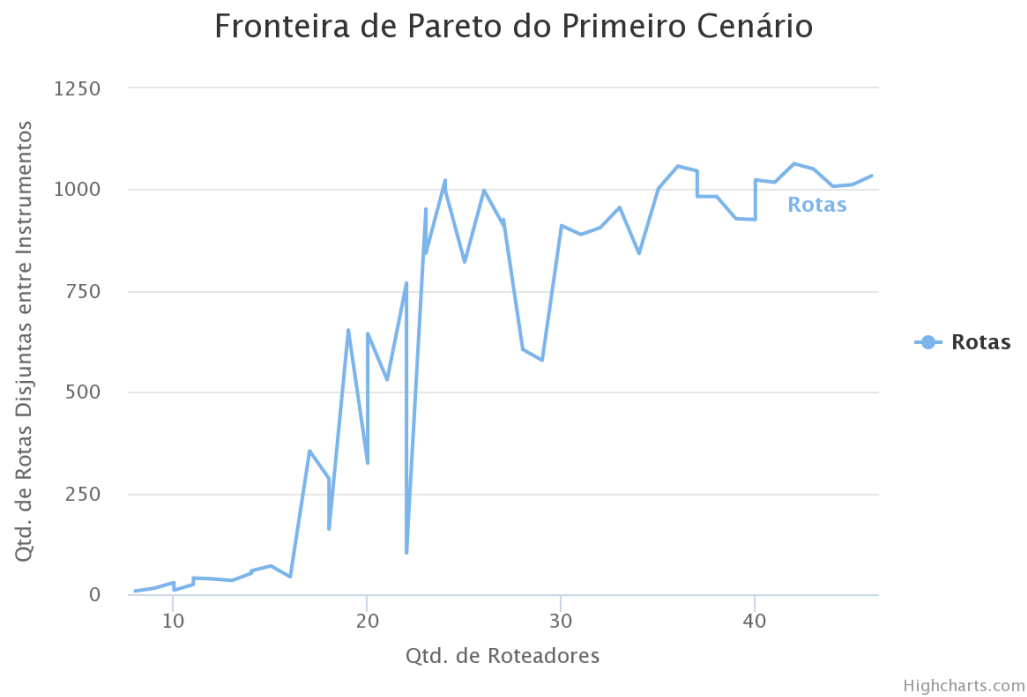


Figura 4.8: Fronteira de Pareto para o primeiro cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas por instrumento.

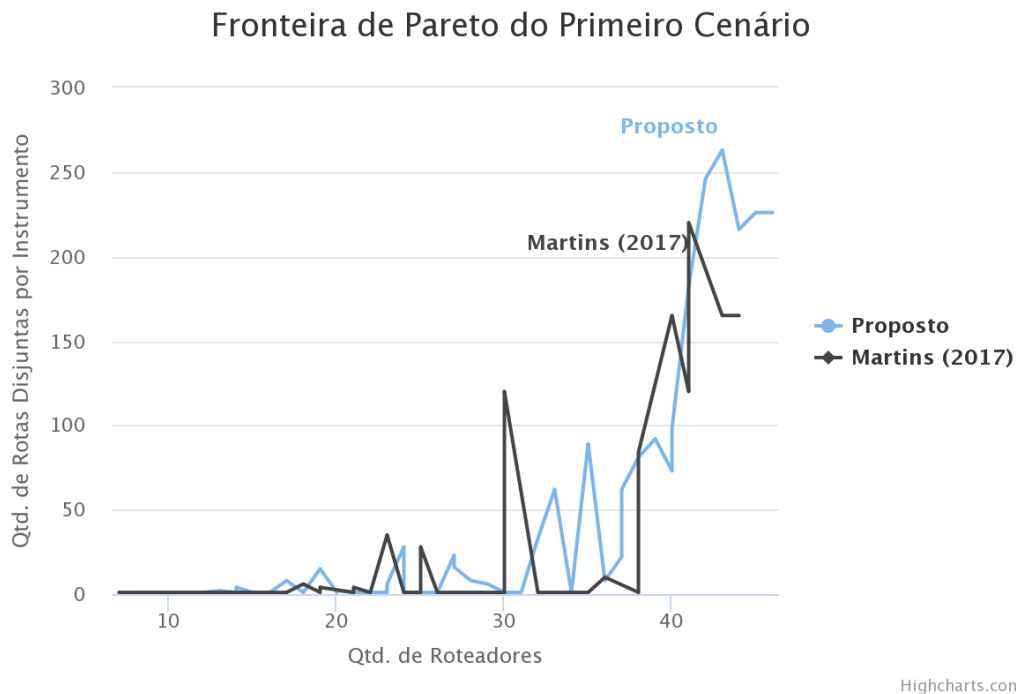
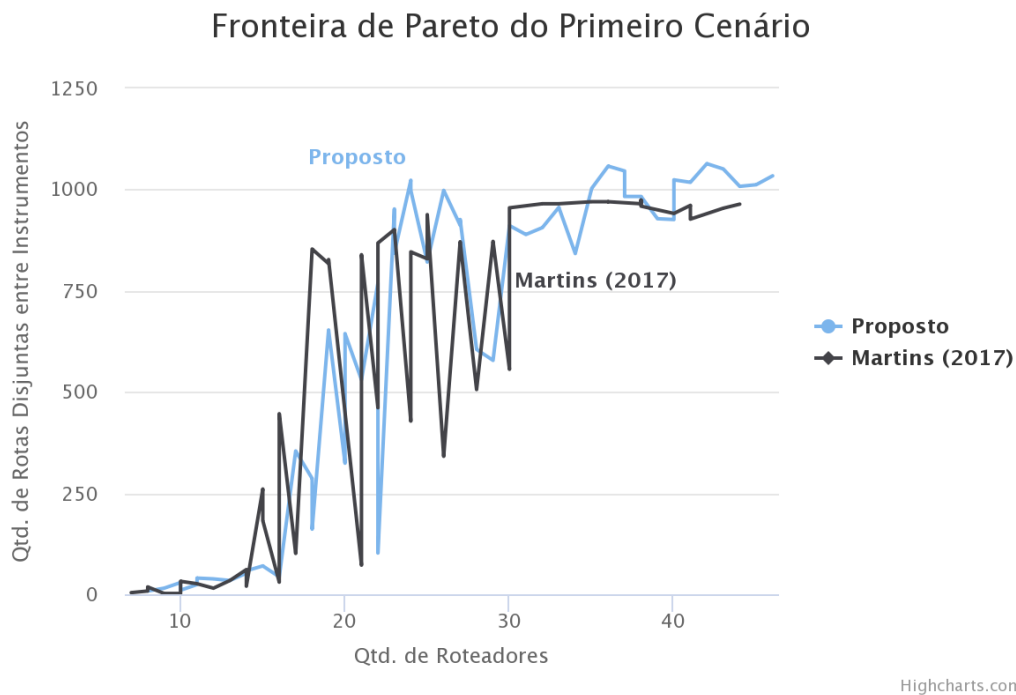


Figura 4.9: Fronteira de Pareto para o primeiro cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos.



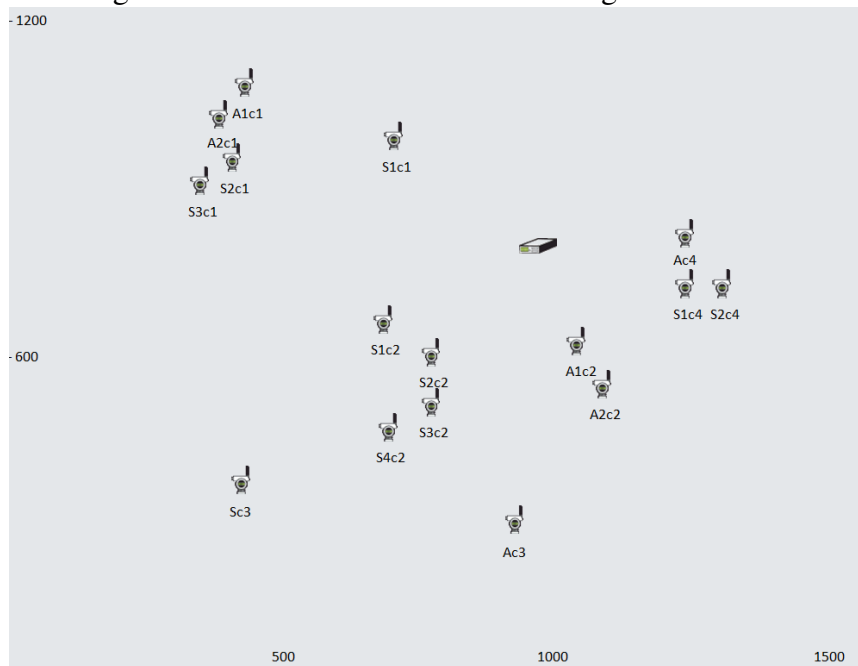
As variações bruscas no eixo y das Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e, 4.9 podem ser vistas, pois são exibidas apenas 2 dimensões da Fronteira de Pareto, caso fosse exibida a superfície com as 6 dimensões da Fronteira de Pareto, seria possível ver uma transição suave de um ponto para outro na superfície da solução.

### 4.3.2 Segundo Cenário

Para o segundo cenário também foram gerados os resultados do algoritmo proposto nessa tese, para redes industriais sem fio com ênfase em aplicação de controle, e do algoritmo desenvolvido em (Martins 2017), para redes industriais de sensores sem fio, a fim de realizar a comparação de seus resultados, já que o primeiro é focado em um tipo de aplicação e o segundo é generalista.

A Figura 4.10 exibe o estado inicial da disposição dos instrumentos (*gateway*, sensores e atuadores) no ambiente industrial. Lembrando que Caso o sensor/atuador faça parte de uma malha de controle, terá o índice  $ci$  para indicar o controlador. Isso acontece com todos os sensores e atuadores desse cenário.

Figura 4.10: Estado inicial da rede no segundo cenário.



Nesse cenário, os instrumentos roteadores também foram alocados sempre dentro da área definida pela largura e pelo comprimento e respeitando a distância de, pelo menos, 1 metro para os outros dispositivos, inclusive para o *gateway*.

Para o segundo cenário, o resultado obtido (fronteira de Pareto com população de tamanho 50) para o algoritmo proposto neste trabalho é exibido na Tabela 4.4, lembrando que:

- TI é o total de instrumentos da rede;

- MS é a média de saltos (dispositivos) das rotas;
- RDP é quantidade de combinações de 3 rotas disjuntas por instrumento;
- TR é o total de roteadores;
- MP é a média de potência dos instrumentos;
- RDE é a quantidade de combinações de 1 rota disjunta entre instrumentos.

Tabela 4.4: Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo proposto para o segundo cenário.

| TI | MS   | RDP | TR | MP     | RDE  |
|----|------|-----|----|--------|------|
| 33 | 3,20 | 1   | 16 | -49,24 | 16   |
| 34 | 3,20 | 1   | 16 | -47,26 | 16   |
| 34 | 3,26 | 1   | 17 | -48,27 | 19   |
| 35 | 3,22 | 2   | 18 | -50,06 | 20   |
| 36 | 3,28 | 6   | 19 | -49,12 | 28   |
| 36 | 3,44 | 1   | 19 | -48,13 | 16   |
| 37 | 3,32 | 2   | 20 | -48,75 | 18   |
| 37 | 3,34 | 8   | 20 | -47,57 | 12   |
| 38 | 3,27 | 2   | 21 | -48,15 | 43   |
| 38 | 3,69 | 6   | 21 | -49,62 | 21   |
| 39 | 3,54 | 1   | 22 | -47,87 | 27   |
| 40 | 3,77 | 8   | 23 | -49,84 | 62   |
| 41 | 3,67 | 1   | 24 | -49,27 | 113  |
| 42 | 3,47 | 1   | 25 | -49,73 | 87   |
| 43 | 3,19 | 2   | 26 | -49,27 | 356  |
| 44 | 3,67 | 1   | 27 | -48,07 | 543  |
| 44 | 3,87 | 18  | 27 | -49,64 | 45   |
| 45 | 3,53 | 16  | 28 | -49,26 | 956  |
| 45 | 3,38 | 2   | 28 | -49,55 | 741  |
| 46 | 3,19 | 6   | 29 | -47,67 | 898  |
| 46 | 3,37 | 8   | 29 | -48,19 | 980  |
| 47 | 3,26 | 22  | 30 | -50,72 | 968  |
| 47 | 3,47 | 18  | 30 | -50,39 | 1003 |
| 48 | 3,86 | 27  | 31 | -50,47 | 387  |
| 48 | 3,79 | 13  | 31 | -48,84 | 356  |
| 49 | 3,44 | 1   | 32 | -48,67 | 1078 |
| 50 | 3,44 | 1   | 33 | -49,12 | 537  |
| 50 | 3,44 | 1   | 33 | -48,12 | 948  |
| 51 | 3,44 | 2   | 34 | -48,89 | 819  |
| 51 | 3,70 | 39  | 34 | -50,48 | 943  |
| 52 | 3,64 | 17  | 35 | -50,19 | 1147 |
| 52 | 3,65 | 8   | 35 | -50,37 | 1096 |
| 53 | 3,67 | 60  | 36 | -50,28 | 1013 |

|    |      |    |    |        |      |
|----|------|----|----|--------|------|
| 53 | 3,72 | 43 | 36 | -48,88 | 1042 |
| 54 | 3,62 | 28 | 37 | -48,99 | 1029 |
| 54 | 3,64 | 13 | 37 | -48,42 | 1029 |
| 55 | 3,70 | 1  | 38 | -48,47 | 681  |
| 55 | 3,77 | 1  | 38 | -50,67 | 917  |
| 55 | 3,77 | 6  | 38 | -50,81 | 917  |
| 56 | 3,62 | 64 | 39 | -50,91 | 1027 |
| 57 | 3,88 | 52 | 40 | -48,28 | 628  |
| 57 | 4,06 | 38 | 40 | -48,46 | 1068 |
| 58 | 4,01 | 20 | 41 | -51,02 | 1112 |
| 58 | 3,95 | 8  | 41 | -49,89 | 1025 |
| 58 | 4,07 | 51 | 41 | -49,97 | 1157 |
| 59 | 4,20 | 68 | 42 | -48,67 | 1189 |
| 60 | 4,18 | 72 | 43 | -49,29 | 1164 |
| 61 | 4,35 | 80 | 44 | -49,12 | 1122 |
| 62 | 4,66 | 84 | 45 | -49,28 | 1133 |
| 62 | 4,84 | 84 | 45 | -49,33 | 1133 |

Como o espaço da solução, mais uma vez, contém 6 dimensões, a sua visualização de forma gráfica não é possível de ser realizada neste documento, mas pode-se observar a dominância entre as linhas da tabela, onde por exemplo, o resultado da primeira contém menos instrumentos (TI), a saber 33, em relação à segunda linha, que contém 34, mas em compensação, a segunda linha contém a potência média (MP) da rede maior, a saber -47,26 dBm, em comparação à primeira linha, que contém apenas -49,24 dBm.

Enquanto que para o algoritmo desenvolvido por Martins (2017), o resultado obtido (fronteira de Pareto com população de tamanho 50) pode ser visto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultado (fronteira de Pareto) do algoritmo de comparação para o segundo cenário.

| TI | MS   | RDP | TR | MP     | RDE |
|----|------|-----|----|--------|-----|
| 31 | 3,18 | 1   | 14 | -48,81 | 2   |
| 31 | 3,18 | 1   | 14 | -48,81 | 2   |
| 32 | 3,17 | 1   | 15 | -49,58 | 2   |
| 32 | 3,17 | 1   | 15 | -49,58 | 2   |
| 33 | 3,18 | 1   | 16 | -48,83 | 24  |
| 33 | 3,30 | 4   | 16 | -48,58 | 13  |
| 34 | 3,18 | 1   | 17 | -49,14 | 8   |
| 34 | 3,29 | 1   | 17 | -48,80 | 5   |
| 34 | 3,31 | 4   | 17 | -48,65 | 52  |
| 35 | 3,18 | 1   | 18 | -49,07 | 2   |

|    |      |    |    |        |     |
|----|------|----|----|--------|-----|
| 35 | 3,30 | 1  | 18 | -48,40 | 7   |
| 36 | 3,19 | 1  | 19 | -49,05 | 322 |
| 36 | 3,30 | 1  | 19 | -48,52 | 31  |
| 37 | 3,19 | 1  | 20 | -49,53 | 40  |
| 37 | 3,31 | 4  | 20 | -48,77 | 243 |
| 38 | 3,32 | 4  | 21 | -48,90 | 460 |
| 39 | 3,32 | 10 | 22 | -49,30 | 623 |
| 39 | 3,32 | 4  | 22 | -49,04 | 723 |
| 40 | 3,19 | 1  | 23 | -50,27 | 488 |
| 40 | 3,32 | 4  | 23 | -48,93 | 683 |
| 41 | 3,18 | 1  | 24 | -49,62 | 32  |
| 41 | 3,32 | 10 | 24 | -49,43 | 720 |
| 42 | 3,33 | 4  | 25 | -49,16 | 811 |
| 42 | 3,33 | 4  | 25 | -49,16 | 811 |
| 43 | 3,20 | 1  | 26 | -49,60 | 668 |
| 43 | 3,32 | 4  | 26 | -49,06 | 808 |
| 44 | 3,20 | 1  | 27 | -48,95 | 400 |
| 44 | 3,20 | 1  | 27 | -48,95 | 400 |
| 45 | 3,20 | 1  | 28 | -49,44 | 669 |
| 45 | 3,33 | 10 | 28 | -49,36 | 776 |
| 46 | 3,32 | 4  | 29 | -49,07 | 815 |
| 46 | 3,32 | 4  | 29 | -49,00 | 852 |
| 47 | 3,21 | 1  | 30 | -49,39 | 805 |
| 47 | 3,33 | 10 | 30 | -49,13 | 814 |
| 48 | 3,21 | 1  | 31 | -49,48 | 859 |
| 48 | 3,21 | 1  | 31 | -49,48 | 859 |
| 48 | 3,33 | 10 | 31 | -49,22 | 856 |
| 49 | 3,20 | 1  | 32 | -50,18 | 738 |
| 49 | 3,20 | 1  | 32 | -50,18 | 738 |
| 50 | 3,33 | 10 | 33 | -49,24 | 838 |
| 51 | 3,33 | 10 | 34 | -49,10 | 856 |
| 51 | 3,33 | 10 | 34 | -49,20 | 859 |
| 53 | 3,32 | 1  | 36 | -48,93 | 859 |
| 53 | 3,32 | 1  | 36 | -48,93 | 859 |
| 53 | 3,33 | 10 | 36 | -49,21 | 857 |
| 54 | 3,32 | 1  | 37 | -48,75 | 850 |
| 55 | 3,21 | 1  | 38 | -49,42 | 855 |
| 56 | 3,32 | 1  | 39 | -48,77 | 852 |
| 58 | 3,21 | 1  | 41 | -49,59 | 839 |
| 58 | 3,21 | 1  | 41 | -49,59 | 839 |



Figura 4.12: Fronteira de Pareto para o segundo cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas por instrumento.

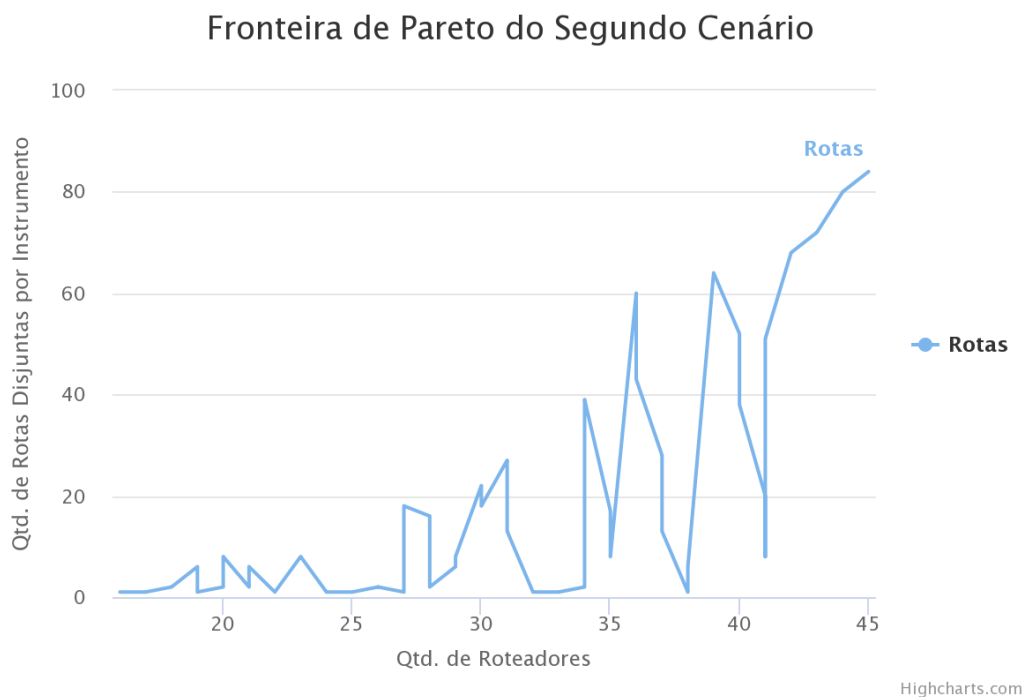
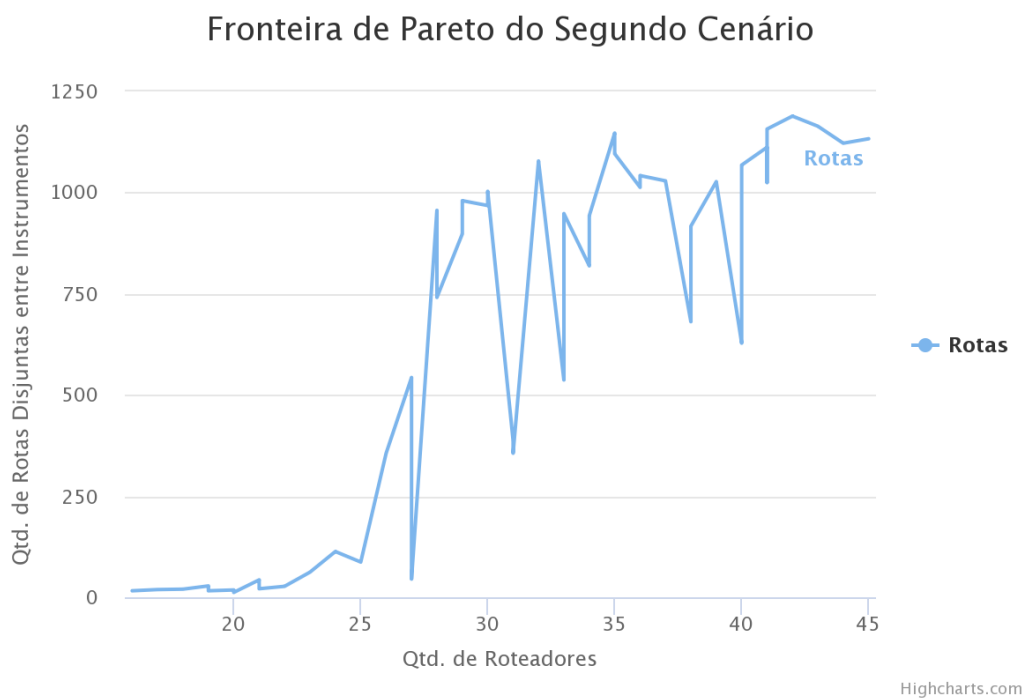
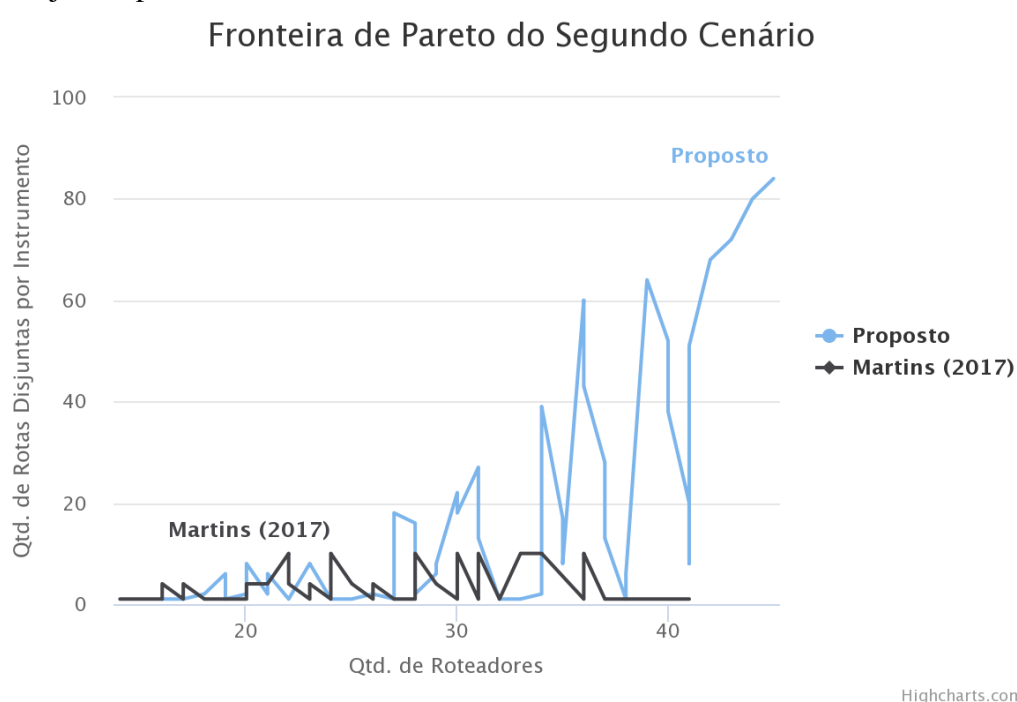


Figura 4.13: Fronteira de Pareto para o segundo cenário com 2 dimensões: roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos.



De modo geral, assim como no primeiro cenário, comparando os resultados, através das Tabelas 4.4 e 4.5 e das Figuras 4.14 e 4.15, observa-se que o algoritmo proposto tende a adicionar mais roteadores que o algoritmo usado na comparação, mas em compensação, é visto que a quantidade de rotas disjuntas para cada instrumento ou entre instrumentos vizinhos é maior, na maioria dos casos, indicando maior confiabilidade na troca de pacotes pela rede.

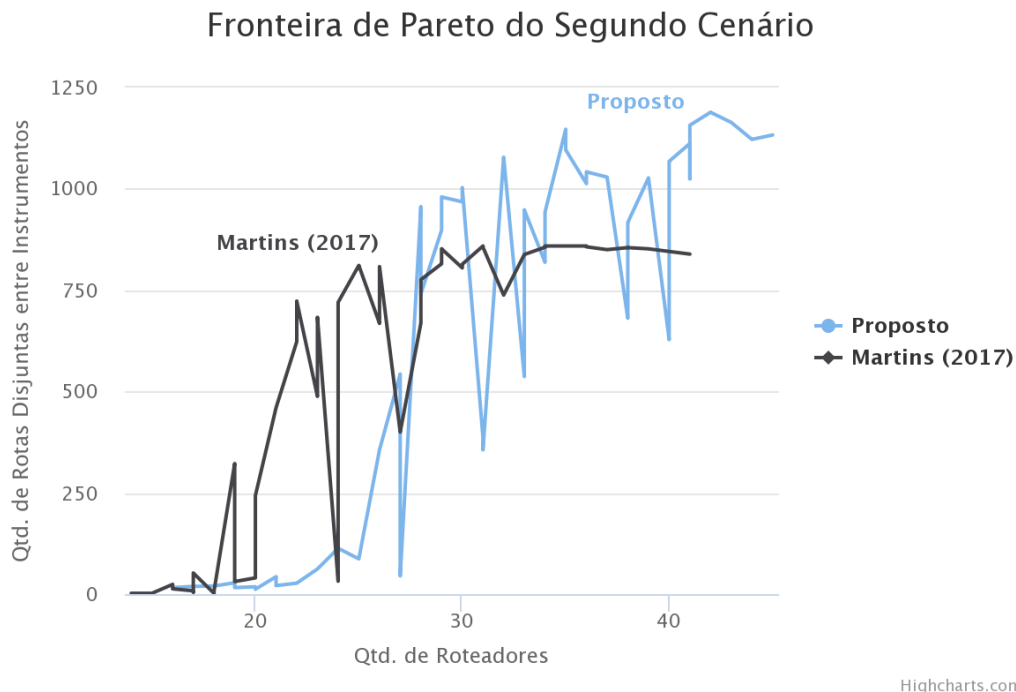
Figura 4.14: Fronteira de Pareto para o segundo cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas por instrumento.



Como o sistema desenvolvido sempre visa otimizar todos os parâmetros da função multiobjetivo, este tem a seu favor - em relação aos sistemas de otimização com um único objetivo - fornecer aos operadores de redes industriais uma gama de soluções ao mesmo tempo, diante das quais o usuário pode escolher aquela que melhor atenda suas necessidades para a resolução do seu problema de forma específica.

Considerando os trabalhos encontrados nas pesquisas realizadas durante a elaboração dessa tese e que nenhuma solução descrita apresenta um sistema que proponha alterações na topologia da rede em tempo real, o sistema desenvolvido nessa tese ao se integrar à ferramenta BR-WirelessExpert (já utilizada e validada em redes industriais sem fio reais), aumentando a confiabilidade das trocas de pacotes na rede a partir do monitoramento dos limiares de perda de pacote (*PER threshold*) e de nível de sinal recebido (*RSSI threshold*), contribui de forma significativa para a área possibilitando facilidades na manutenção e reduzindo os custos operacionais com operadores, parada da planta e permanência em áreas de risco.

Figura 4.15: Fronteira de Pareto para o segundo cenário - comparação de roteadores x rotas disjuntas entre instrumentos.



### 4.3.3 Terceiro Cenário

Nesse cenário, será abordada a função do sistema proposto para a etapa pós-instalação, aquela em que a rede passa ao *status* de ativa e fica em operação/funcionamento. Para isso, levou-se em consideração a topologia formada no primeiro cenário mostrada na Figura 4.5.

A formação da topologia da rede na etapa de projeto é feita considerando que a perda de sinal durante sua propagação diminui apenas em relação à distância, mas não se verifica outros fatores que podem influenciar na taxa de perda de pacotes (PER - *Packet Error Rate*), ou no próprio RSSI (*Received Signal Strength Indication*).

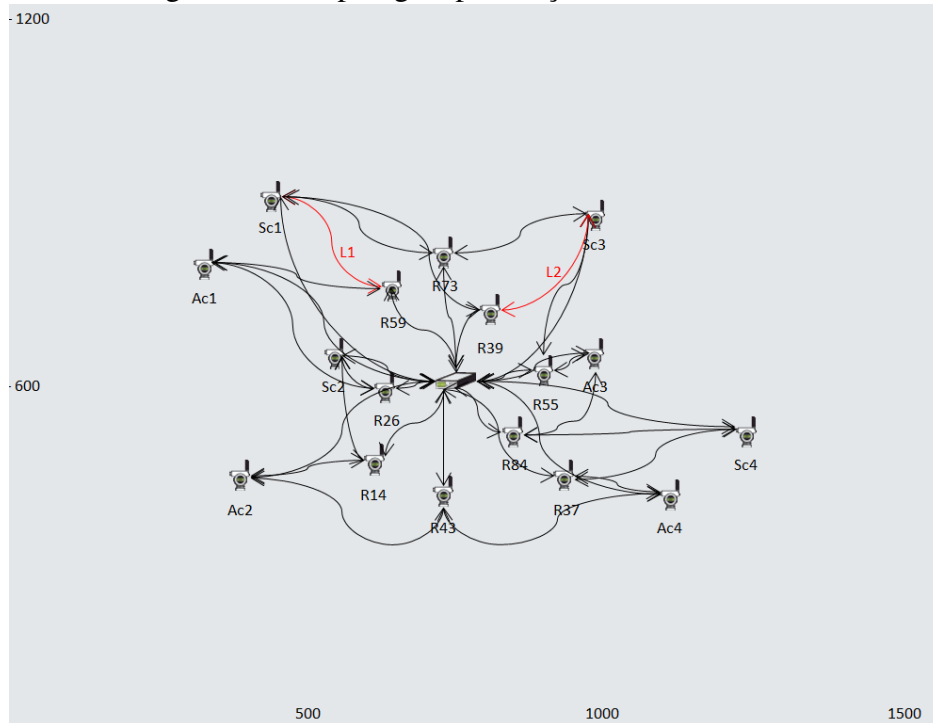
Com a avaliação da rede em tempo real pelo sistema desenvolvido, este pode propor melhorias na topologia da rede de modo a aumentar a confiabilidade sempre que algum dispositivo ou *link* de comunicação desrespeita os limiares que são importantes para a confiabilidade da rede (características fundamentais para permitir tráfego de dados de processos de controle na rede de forma confiável).

Diante da topologia obtida no primeiro cenário, simula-se que a perda de pacotes nos *links* L1 e L2 esteja acima do limiar aceitável, ou seja, superior aos 15% definido para o *PER threshold*, de acordo com a informação coletada do *gateway* da rede (usando os comandos 779 e 780 para o WirelessHART ou o comando *Object AlertPolicy* para o ISA100.11a). Nessa situação, o modelo proposto nessa tese é executado mais uma vez, alterando o valor limitante de restrição  $IDR_i$ , que representa a quantidade de rotas disjuntas necessárias para um determinado instrumento ter sua comunicação confiável na rede, de 3 para 4, nos dispositivos que fazem uso de rotas que passam pelos *links* L1 e L2,

isto é,  $S_{c1}$  e  $S_{c3}$ , aumentando a quantidade mínima de rotas disjuntas entre eles e o *gateway* para 4, já que pelo menos uma de suas rotas disjuntas passou a possuir *link(s)* acima do *PER threshold* aceitável e o *gateway* não exclui os *link(s)* de forma rápida, forçando o aumento de rotas para os determinados instrumentos.

O resultado da nova topologia pode ser observado na Figura 4.16, após adição do roteador R73. Com essa alteração na topologia, os dispositivos  $S_{c1}$  e  $S_{c3}$  voltaram a ter sua disponibilidade para comunicação na rede aceitável e a rede continua com a mesma confiabilidade da topologia inicial, fazendo com que o sistema pare as alterações e volte para a etapa de monitoramento da rede.

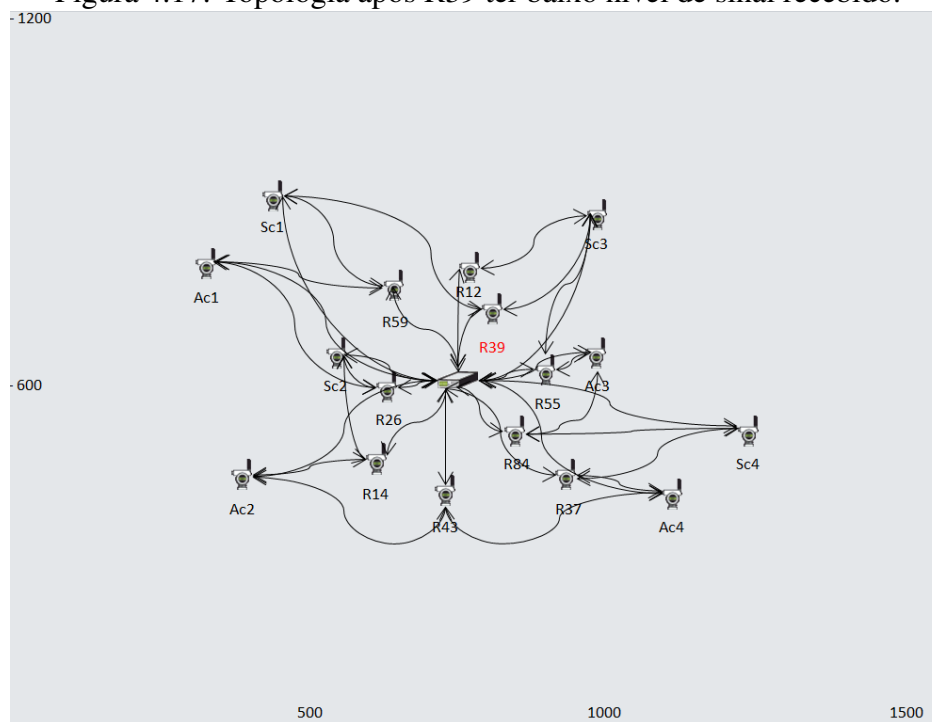
Figura 4.16: Topologia após adição do roteador R73.



Uma situação semelhante a anterior acontece caso seja detectado que um dispositivo roteador esteja com sinal de recepção abaixo do limiar especificado pelo *gateway* da rede, ou seja, sinal abaixo do *RSSI threshold* de -85 dBm. Para esse exemplo, considerou-se que o roteador R39 esteja com problemas na comunicação, então o modelo desconsidera esse dispositivo no seu processamento e procura, mais uma vez, uma nova solução a fim de reestabelecer as rotas mínimas necessárias para os instrumentos fixos da rede, que se comunicavam diretamente com o roteador R39, no caso é o sensor  $S_{c3}$  do controlador 3. Ao final do processamento, é mostrada a nova topologia da rede na Figura 4.17, com a adição do roteador R12 par aumentar a confiabilidade na comunicação do sensor  $S_{c3}$ , já que o *gateway* não remove um instrumento da rede de forma ágil a partir dos dados de diagnóstico, e o sistema volta para a etapa de monitoramento da rede.

Embora nem todos os requisitos que influenciam a taxa de transmissão de pacotes na rede tenham sido analisados, como o algoritmo de roteamento dos pacotes, por exemplo,

Figura 4.17: Topologia após R39 ter baixo nível de sinal recebido.



os resultados desse trabalho mostram que é possível aumentar a confiabilidade de redes industriais sem fio, monitorando seus dados em tempo real a fim de encontrar dispositivos ou *links* com alta perda de pacotes (identificada pela razão entre a quantidade de pacotes perdidos e a quantidade de pacotes enviados ou pela baixa potência no sinal de recepção) e baseando-se em requisitos de aplicações de controle, como por exemplo, tráfego dos pacotes pela malha de controle dentro do tempo de amostragem especificado no projeto do controlador. Requisitos como esse influenciam em propriedades da rede, como o tempo do *superframe* (limitando o tempo de comunicação) e a topologia da mesma (que deve ter as rotas confiáveis para evitar perdas e retransmissões de pacotes).

---

## Capítulo 5

### Conclusão

---

Com o objetivo de auxiliar na formação e manutenção de redes industriais sem fio voltadas para aplicação de controle foi desenvolvido neste trabalho um sistema com modelagem multiobjetivo para analisar e propor a melhor localização dos dispositivos roteadores e as rotas mais confiáveis para tráfego dos pacotes de controle em tais redes industriais. A metodologia é baseada em otimização multiobjetivo cujos objetivos são aumentar a confiabilidade nas rotas de comunicação pelas quais trafegarão os pacotes com dados de controle e, também, a previsibilidade do tempo máximo para troca de pacotes na rede, respeitando o tempo de amostragem definido pelos controladores. Dessa forma, é possível efetuar o controle com o menor custo de instalação e manutenção da rede.

Para atingir os resultados esperados, foi preciso definir os seguintes objetivos, que são conflitantes entre si: minimizar o comprimento médio das rotas e a quantidade de instrumentos industriais (reduzindo custos) e maximizar a quantidade de rotas disjuntas e a potência média de recepção de sinal na rede (aumentando a confiabilidade na troca de pacotes), sempre respeitando os requisitos necessários para realizar aplicações de controle na rede. Devido à generalidade da metodologia, qualquer topologia (estrela, linha, *mesh* ou outras combinações) de redes industriais sem fio pode ser utilizada.

Na prática, projetistas e operadores podem utilizar a metodologia para monitorar se os requisitos de confiabilidade das aplicações de controle nas redes industriais sem fio estão sendo respeitados. Sempre que preciso, pode-se configurar diferentes topologias para possibilitar operações de controle nas citadas redes. Uma topologia pode ser ajustada com a introdução de novos dispositivos com funções de roteamento, melhorando as propriedades de confiabilidade na medida que novas rotas são criadas entre os dispositivos e o *gateway*, principalmente, quando as rotas são disjuntas. Outra forma de maximizar a confiabilidade na rede para aplicações de controle é através da inserção de dispositivos mais confiáveis ou uso de redundância na comunicação entre as rotas. Todos esses procedimentos podem ser avaliados na metodologia proposta.

E como mostram os resultados apresentados com a utilização do sistema desenvolvido no Capítulo 4, observa-se que essa metodologia com otimização multiobjetivo para funções com objetivos conflitantes é eficaz para solucionar o problema de escolha da melhor topologia para redes industriais sem fio (seus dispositivos e *links* de comunicação) voltada para aplicações de controle, seja no momento do projeto ou no momento de sua execução. Também foi possível avaliar a integração desse sistema com uma ferramenta de monitoramento e diagnóstico (passivo e ativo) para redes WirelessHART e ISA100.11a baseadas

em *drivers* de comunicação via protocolos HART e GSAP sobre IP, denominada BR-WirelessExpert, apresentando flexibilidade na integração futura com outras aplicações já instaladas em plantas industriais.

Além disso, ao observar os resultados dos experimentos, percebe-se que a ferramenta desenvolvida foi capaz de encontrar a localização adequada para os roteadores na rede a fim de possibilitar o uso de aplicações de controle no ambiente industrial sem fio. Além disso, a topologia proposta como resultado sempre tende a ser ótima, pois visa atender objetivos importantes no momento de criação e manutenção dessas redes, como minimização da quantidade de instrumentos a serem utilizados, maximização da quantidade de rotas disjuntas, maximização da potência de transmissão e, a principal diferença encontrada em relação a outros trabalhos, monitoramento da rede em tempo real.

As contribuições da respectiva tese são listadas a seguir:

- Metodologia para análise da confiabilidade das trocas de pacotes em redes industriais sem fio em tempo real ou no momento do projeto.
- Geração de um conjunto de várias soluções para a localização dos dispositivos, permitindo alterações na topologia da rede de forma ágil, evitando paradas e perdas financeiras.
- Análise da confiabilidade de redes industriais sem fio, considerando falhas de comunicação dos dispositivos.
- Avaliação das melhores localizações para roteadores de acordo com o projeto de controladores para redes industriais sem fio.
- Procedimento para avaliar a aquisição de instrumentos mais confiáveis ou adição de roteadores em topologias típicas de ambientes industriais sem fio.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, pretende-se utilizar o sistema de diagnóstico para identificar as melhores topologias das redes a serem utilizadas por aplicações específicas de forma a otimizar a gestão de seus ativos. Para tanto, estudos sobre modelos de consumo de energia (durante ciclos de trabalho, transmissões e retransmissões), latência (congestionamento, falhas), formas de roteamento (*graph*, *source*, *superframe*, *proxy*) e outros parâmetros relacionados à confiabilidade precisam ser realizados.

As próximas atividades propostas estão listadas a seguir:

- Alteração do modelo de otimização multiobjetivo para incluir obstáculos no ambiente industrial, influenciando na atenuação do sinal de transmissão e no nível de potência médio nas rotas.
- Coleta e análise dos tempos gastos e consumo de energia por dispositivos WirelessHART e ISA100.11a em diversas circunstâncias: durante a inicialização, durante o processo de join, durante a transmissão de pacotes de diversos tamanhos, durante a perda de conexão e durante o modo *sleep*.
- Análise da estimativa da vida útil da bateria dos dispositivos.

- Alteração do modelo de otimização multiobjetivo para incluir parâmetros referentes ao consumo de bateria dos dispositivos, influenciando na alteração de rotas e possibilitando uma programação adequada para manutenção dos dispositivos.
- Análise das formas de roteamento nos equipamentos industriais WirelessHART e ISA100.11a.
- Comparação de desempenho entre os controladores para redes WirelessHART e ISA100.11a.



---

## Referências Bibliográficas

---

- Bai, H. & M. Atiquzzaman (2003), 'Error modeling schemes for fading channels in wireless communications: A survey', *Communications Surveys Tutorials, IEEE* **5**(2), 2–9.
- Benoit, Joshua, Aiping Yao, Luke Saladis & Yi Zheng (2018), 'Performance evaluations of multi-hop wireless network and 6lowpan using different topologies', *Global Smart Industry Conference*.
- Chan, T. M., K. F. Man, K. S. Tang & S. Kwong (2007), 'A jumping-genes paradigm for optimizing factory wlan network', *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **3**(1), 33–43.
- Colpo, J. & D. Mols (2011), 'No strings attached', *Hydrocarbon Engineering* **16**(11), 47–52.
- Costa, Márcio Sebastião (2011), Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio, aplicadas em automação industrial, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Emerson, Process Management (2016), 'System engineering guidelines iec 62591 wireless', *System Engineering Guide for WirelessHART* pp. 1–90.
- Felser, M. (2002), The fieldbus standards: History and structures, Relatório técnico, MICROSWISS Technology Leadership.
- Felser, M. & T. Sauter (2002), The fieldbus war: history or short break between battles?, em 'Factory Communication Systems, 2002. 4th IEEE International Workshop on', pp. 73 – 80.
- Felser, M. & T. Sauter (2004), Standardization of industrial ethernet - the next battlefield?, em 'Factory Communication Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Workshop on', pp. 413 – 420.
- Fonseca, Carlos M. & Peter J. Fleming (1993), 'Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization', *Proceedings of the Fifth International Conference* (30), 1–8.
- Ghosh, Amitabha & Sajal K. Das (2008), 'Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey', *Pervasive and Mobile Computing* pp. 303–334.

- Gungor, V. C. & F. C. Lambert (2006), 'A survey on communication networks for electric system automation', *Comput. Netw.* **50**(7), 877–897.
- Gungor, V.C. & G.P. Hancke (2009), 'Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches', *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **56**(10), 4258–4265.
- Han, Song, Xiuming Zhu, A.K. Mok, Deji Chen & M. Nixon (2011), Reliable and real-time communication in industrial wireless mesh networks, *em* 'Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), 2011 17th IEEE', pp. 3–12.
- Han., X, X. Cao, E. L. Lloyd & C. C. Shen (2010), 'Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks', *IEEE Transactions on Mobile Computing* **9**(5), 643–656.
- Hassan, Sabo Miya, Rosdiazli Ibrahim, Nordin Saad, Vijanth Sagayan Asirvadam & Tran Duc Chung (2016), 'Implementation of real-time wireless hART network for control application', *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*.
- HCF (2013), *HART TECHNOLOGY DETAIL*.  
**URL:** <https://fieldcommgroup.org/technologies/hart/hart-technology-detail>
- Heidari, E. & A. Movaghar (2009), 'Intelligent clustering in wireless sensor networks', *Networks and Communications* pp. 303–334.
- Hussain, Sajid, AbdulW. Matin & Obidul Islam (2007), 'Genetic algorithm for energy efficient clusters in wireless sensor networks', *IEEE Computer Society, International Conference on Information Technology* pp. 303–334.
- IEC (2010), *IEC 62591: Industrial communication networks - Wireless communication network and communications profiles - WirelessHART*.
- IEEE-802.3x (1997), *IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Supplements to Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Specification for 802.3 Full Duplex Operation and Physical Layer Specification for 100 Mb/s Operation on Two Pairs of Category 3 or Better Balanced Twisted Pair Cable (100BASE-T2)*, IEEE Std 802.3x-1997<sup>a</sup> edição, IEEE Computer Society.
- Kulandaivel, Ramya, S. Periyannayagi & S. Susikala (2012), 'Performance comparison of wsn & wsan using genetic algorithm', *Procedia Engineering* **30**(1), 107–112.
- Lanza-Gutierrez, Jose M. & Juan A. Gomez-Pulido (2015), 'Assuming multiobjective metaheuristics to solve a three-objective optimisation problem for relay node deployment in wireless sensor networks', *Soft Computing* **30**(1), 675–687.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494615000721>

- Lanza-Gutierrez, Jose M. & Juan A. Gomez-Pulido (2016), 'Studying the multiobjective variable neighbourhood search algorithm when solving the relay node placement problem in wireless sensor networks', *Soft Computing* **20**(1).
- Lessard, A. & M. Gerla (1988), 'Wireless communications in the automated factory environment', *Network, IEEE* **2**(3), 64–69.
- Liu, Shuming & Pierre Auckenthaler (2014), 'Optimal sensor placement for event detection and source identification in water distribution networks', *Journal of Water Supply: Research and Technology* **63**(1), 51–57.  
**URL:** <http://aqua.iwaponline.com/content/63/1/51>
- Martins, Daniel Lopes (2017), Sistema Inteligente para Auxilio no Projeto e Instalação de uma Rede Industrial de Sensores Sem Fio, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, UFRN, Natal, RN.
- Montague, J. (2001), 'What's left to say about industrial ethernet?', *Control Engineering* **48**(5), 72–80.
- Neves, P. A. C. S. & J. J. P. C. Rodrigues (2010), 'Internet protocol over wireless sensor networks, from myth to reality', *Journal of Communications* **5**(3), 189–196.
- Potter, D. (1999), Using ethernet for industrial i/o and data acquisition, *em* 'Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE', Vol. 3, pp. 1492–1496.
- Rahimi, M., M. Rausand & Shaomin Wu (2011), Reliability prediction of offshore oil and gas equipment for use in an arctic environment, *em* 'Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2011 International Conference on', pp. 81–86.
- Rech, Jônatas Romani (2012), Desenvolvimento de um gerente de rede wireless, Dissertação de mestrado, Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Romoozi, Mojtaba & Hossein Ebrahimpour-Komleh (2010), 'A positioning method in wireless sensor networks using genetic algorithms', *JDCTA* **4**(9), 174–179.
- Santos, Anderson, Dainel Martins, Heitor Florencio, Jorge Melo & Adrião Neto (2018), Optimal placement of routers in industrial wireless networks based on multi-objectives, *em* E. P. Godoy, ed., 'Networked Control Systems: Research Challenges and Advances for Application', Nova Science Publishers, capítulo 4, pp. 85–116.
- Santos, Anderson, Daniel Lopes, Ivanovitch Silva, Júlio César, Layon Luciano, Adrião Neto & Luiz Affonso Guedes (2015), 'Avaliação de redes wireless em malhas de controle', *Revista Controle & Instrumentação* **188**(204), 46–52.

- Santos, Anderson, Guilherme Bertelli, Ivanovitch Silva, Renato Fernandes, Dennis Branda, Ivan Muller, Joao Netto, Jean Winter & Carlos Eduardo Pereira (2017), 'Research activities on industrial wireless instrumentation: Brazilian perspective', *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* **20**, 21–30.
- Sauter, T. (2005), Fieldbus systems - history and evolution, *em* R.Zurawski, ed., 'The Industrial Communication Technology Handbook', CRC Press, capítulo 7.
- Sauter, T. (2010), 'The three generations of field-level networks - evolution and compatibility issues', *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **57**(11), 3585–3595.
- Sauter, Thilo (2005), Linking factory floor and the internet, *em* R.Zurawski, ed., 'The Industrial Information Technology Handbook', CRC Press, capítulo 24.
- Seixas, Constatino Filho (2013), *Introdução ao Protocolo HART*.
- Silva, Ivanovitch, Luiz Affonso Guedes, Paulo Portugal & Francisco Vasques (2012), 'Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications', *Sensors* **12**(1), 806–838.
- Song, Jianping, Song Han, A.K. Mok, Deji Chen, M. Lucas & M. Nixon (2008), WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control, *em* 'Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2008. RTAS '08. IEEE', pp. 377–386.
- Soto, Viyils Sangregorio (2016), Análise do impacto da comunicação em redes wirelessHART no desempenho de sistemas de controle, Dissertação de mestrado, Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Ticona, Waldo Gonzalo Cancino (2008), Algoritmos evolutivos multi-objetivo para a reconstrução de árvores filogenéticas, Tese de doutorado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, USP, São Carlos, SP.
- Urli, L. & S. Murgia (2011), Use of ethernet communications for real-time control systems in the metals industry, *em* 'Automation Science and Engineering (CASE), 2011 IEEE Conference on', pp. 6–11.
- Vitturi, S. (2001), 'On the use of ethernet at low level of factory communication systems', *Comput. Stand. Interfaces* **23**, 267–278.
- Wang, Ling, Xiping Fu, Jiating Fang, Haikuan Wang & Minrui Fei (2011), 'Optimal node placement in industrial wireless sensor networks using adaptive mutation probability binary particle swarm optimization algorithm', *Natural Computation* pp. 2199–2203.
- Younis, Mohamed & Kemal Akkaya (2008), 'Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey', *Ad Hoc Networks* (6), 621–655.