

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DYLAN MIELKE TIMM**

**ESCALABILIDADE UPLINK DE REDES  
INDUSTRIAIS SEM FIO COM  
TÉCNICAS DE CENTRALIDADE**

Porto Alegre  
2022

**DYLAN MIELKE TIMM**

**ESCALABILIDADE UPLINK DE REDES  
INDUSTRIAIS SEM FIO COM  
TÉCNICAS DE CENTRALIDADE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ivan Müller

Porto Alegre  
2022

**DYLAN MIELKE TIMM**

**ESCALABILIDADE UPLINK DE REDES  
INDUSTRIAIS SEM FIO COM  
TÉCNICAS DE CENTRALIDADE**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul –  
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas, UFRGS

Doutor pela Universidade de Halmstad - Halmstad, Suécia

Prof. Dr. Flávio Morais de Assis Silva, UFBA

Doutor pela Universidade Técnica de Berlim - Berlim, Alemanha

Prof. Dr. João Cesar Netto, UFRGS

Doutor pela Universidade Católica de Lovaina - Lovaina, Bélgica

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner

Porto Alegre, setembro de 2022.

## RESUMO

Redes industriais sem fio apresentam diversas vantagens com relação a seus contrapontos cabeados, especialmente o menor custo gasto em infraestrutura e maior flexibilidade. Por outro lado, seu desempenho é desafiado por problemas relacionados à propagação de ondas eletromagnéticas, tais como interferências, coexistência e necessidade de baixo consumo de energia. Em redes de alta escala, definidas como compostas por cem a mil nodos, esses desafios se agravam, especialmente em operações como o *convergecast*, onde muitos dispositivos visam enviar dados ao mesmo nodo, gerando gargalos de tráfego ao redor do destinatário final. Em redes sem fio centralizadas, como o WirelessHART, o *convergecast* é frequente, pois um único gerenciador de rede administra seu funcionamento e rotineiramente precisa coletar informações de todos os dispositivos através de rotas *uplink* com destino a seus pontos de acesso. Este trabalho analisa a correlação entre desempenho e escala de uma rede WirelessHART e propõe técnicas para a definição de quantidades e melhores distribuições espaciais de nodos em redes com grandes quantidades de dispositivos, visando aumentar sua escalabilidade em termos de confiabilidade na entrega de pacotes. São empregadas técnicas de análise de redes sociais, em particular centralidades de grau, proximidade e intermediação, como métricas para correlação de desempenho. Os resultados do trabalho mostram que há um padrão entre as métricas de centralidade e a identificação de quais cadeias *uplink* de dispositivos apresentam maior probabilidade de perda de pacotes de dados. Usa-se esse conceito para propor uma técnica de redistribuição de cadeias através da relocação de pontos de acesso como um método preventivo para otimização de desempenho para algoritmos de roteamento, obtendo resultados de até 10% de incremento de confiabilidade.

**Palavras-chave:** Redes sem fio industriais, Centralidade, Escalabilidade, Pontos de Acesso, Uplink.

## ABSTRACT

Wireless industrial networks present several advantages over their cabled counterparts, especially the lower cost spent on infrastructure and greater flexibility. On the other hand, its performance is challenged by problems related to the propagation of electromagnetic fields, such as interferences, coexistence and need for lower energy consumption. In networks of greater scale, defined as composed of a hundred to a thousand nodes, these challenges are exacerbated, specially in operations such as convergecast, where several devices aim to send data to the same node, generating traffic bottlenecks around its final receiver. In centralized wireless networks, such as WirelessHART, convergecast is frequent, because a sole network manager runs its operation and frequently has to collect information from every device through uplink routes destined to its access points. This work analyzes the correlation between performance and scale of a WirelessHART network and proposes techniques for the definition of minimum quantities and better spatial distributions of nodes in networks with large device counts, aiming to increase its scalability in terms of reliability on packet delivery. Social network analysis techniques are applied, particularly centralities such as degree, proximity and betweenness, as metrics for performance correlation. The results show there is a pattern between the centrality metrics and the identification of which device uplink chain present greater probability of data packet loss. This concept is used to propose a technique of chain redistribution through access points relocation as a preventive method for performance optimization in routing algorithms, obtaining results of up to 10% in reliability increase.

**Keywords:** Industrial wireless networks, Routing, Scalability, Access Points, Convergecast.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura nº 1- Modelo OSI do protocolo WirelessHART . . . . .	16
Figura nº 2- Rede de dispositivos WirelessHART . . . . .	17
Figura nº 3- Ilustração de um <i>superframe</i> de 100 <i>slots</i> com salto de canais . . . . .	19
Figura nº 4- Tipos de roteamento relevantes . . . . .	20
Figura nº 5- Densidade probabilística em função da média $\mu$ e do desvio padrão $\sigma$ .	25
Figura nº 6- Modelo de Friis . . . . .	27
Figura nº 7- Fluxograma geral de simulação. . . . .	35
Figura nº 8- Redes simuladas. . . . .	38
Figura nº 9- Ilustração do algoritmo RPL. . . . .	41
Figura nº 10- Ilustração de redundância de rotas nas simulações. . . . .	43
Figura nº 11- Perdas por <i>buffer</i> cheio e obsolescência . . . . .	46
Figura nº 12- Exemplificação de centralidades em uma grafo de nodos . . . . .	51
Figura nº 13- Escalabilidade da média de confiabilidade das redes simuladas . . . . .	55
Figura nº 14- Diagrama de caixa da escalabilidade das redes simuladas . . . . .	56
Figura nº 15- Distribuição de CG e CI por quantidade de dispositivos faltosos . . . . .	58
Figura nº 16- Distribuição de CP por quantidade de dispositivos faltosos . . . . .	59
Figura nº 17- Ilustração da análise de centralidade dos dispositivos faltosos . . . . .	61
Figura nº 18- Cadeias de <i>uplink</i> em crescentes quantidades de pontos de acesso . . . . .	64
Figura nº 19- Gradiente de distância de saltos e ETX . . . . .	65
Figura nº 20- Divisão da região da rede em zonas . . . . .	67
Figura nº 21- Determinação de ETX entre zonas . . . . .	68
Figura nº 22- Determinação da classificação $R$ por zona . . . . .	69
Figura nº 23- Gradiente resultante da minimização de $\Sigma R$ . . . . .	70
Figura nº 24- Rede simulada com e sem otimização . . . . .	71
Figura nº 25- Comparação de desempenho com e sem otimização . . . . .	72
Figura nº 26- Ganho médio em confiabilidade com otimização . . . . .	73
Figura nº 27- Comando 780 ( <i>Report Neighbor Health List</i> ) . . . . .	76
Figura nº 28- Comando 787 ( <i>Report Neighbor Signal Levels</i> ) . . . . .	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela nº 1- Densidade probabilística em função da quantidade de desvios padrões	26
Tabela nº 2- Estimativa de perdas pelo ambiente na expansão do modelo de Friis .	27
Tabela nº 3- Resumo dos trabalhos relacionados . . . . .	33
Tabela nº 4- Comparações de desempenho em média de confiabilidade percentual .	74
Tabela nº 5- Comparações de desempenho em média de confiabilidade sigma . . .	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ASN	<i>Absolute Slot Number</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CG	Centralidade de Grau
CI	Centralidade de Intermediação
CP	Centralidade de Proximidade
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PDP	<i>Packet Delivery Probability</i>
PDR	<i>Packet Delivery Rate</i>
RPL	<i>IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TSCH	<i>Time Slotted Channel Hopping</i>
TTL	<i>Time To Live</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivos	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	15
2.1	IEEE 802.15.4	15
2.2	WirelessHART	16
2.2.1	Tipos de Dispositivos	17
2.2.2	Camada de Enlace	18
2.3	Tipos de Roteamento	20
2.3.1	<i>Unicast</i>	20
2.3.2	<i>Broadcast</i>	21
2.3.3	<i>Convergecast</i>	21
2.4	Centralidade	21
2.4.1	Centralidade de Grau	22
2.4.2	Centralidade de Proximidade	22
2.4.3	Centralidade de Intermediação	23
2.5	Confiabilidade e Determinismo	23
2.6	Modelo de Transmissão de Friis	26
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	29
3.1	Escalabilidade e Confiabilidade	29
3.2	Centralidades	31
3.3	Comparação entre referências	33
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	34
4.1	Metodologia de Simulação	34
4.2	Algoritmo de Roteamento	38
4.2.1	Probabilidade de Entrega de Pacotes	39
4.2.2	RPL	40
4.3	Redundância e Escalonamento	42
4.4	Perda de Pacotes Fim-a-Fim	45
4.4.1	Perda por <i>Buffer</i> Cheio	45
4.4.2	Perda por Obsolescência de <i>Time To Live</i>	48
4.5	Centralidades	49
4.5.1	Centralidade de Grau	50
4.5.2	Centralidade de Proximidade	52

4.5.3	Centralidade de Intermediação . . . . .	52
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Escalabilidade . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>5.2</b>	<b>Análises de Centralidades . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>5.3</b>	<b>Impacto dos Parâmetros em Desempenho . . . . .</b>	<b>60</b>
5.3.1	<i>Time to Live</i> . . . . .	61
5.3.2	Tamanho de <i>Buffer</i> . . . . .	62
<b>5.4</b>	<b>Técnica de Otimização . . . . .</b>	<b>63</b>
5.4.1	Gradientes de ETX . . . . .	64
5.4.2	Minimização de ETX por Zoneamento . . . . .	67
5.4.3	Impacto em Escalabilidade . . . . .	72
5.4.4	Aplicabilidade . . . . .	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>86</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Redes industriais sem fio têm sido alvo de contínuo estudo e apresentado crescente presença de mercado nas últimas décadas (SISINNI *et al.*, 2018). No ambiente contemporâneo, onde fábricas e indústrias buscam cada vez mais implementar os conceitos de *Internet of Things* (Internet das Coisas) e Indústria 4.0, como instrumentação, monitoramento e tomadas de decisão autônomas em tempo real, novas soluções baratas e flexíveis de automação industrial são continuamente apresentadas (LI, 2015).

Redes industriais sem fio são apresentadas perante o mercado de automação industrial como uma alternativa atrativa às versões cabeadas, apresentando em geral menor custo estrutural e maior flexibilidade (LUVISOTTO; PANG; DZUNG, 2017). A possibilidade de realizar a instalação de um sistema de rede com menor demanda de infraestrutura e maior facilidade de relocação e adaptação de dispositivos são alguns de suas principais vantagens. Redes sem fio minimizam a necessidade de novas linhas físicas de comunicação e alimentações de potência, e mitigam a ação do tempo sobre sua desempenho e sobre o custo de manutenção ao eliminar fatores como a deterioração de cabos e conexões (SONG, 2008).

Entretanto, a comunicação *wireless* traz consigo seus próprios desafios. Comunicações em radiofrequência precisam disputar o uso do meio com interferências eletromagnéticas, ruídos e coexistência com outras redes, fatores que tendem diminuir a confiabilidade do sistema (aumentando a perda de pacotes) e a aumentar o consumo de energia com a necessidade de repetidas tentativas de comunicação pós-falha (XU; HE; LI, 2014), desafios estes que se agravam quanto maior o tamanho e a complexidade da rede.

Nas últimas décadas, diversos protocolos de comunicação sem fio tornaram-se populares, tais como WirelessHART, WiFi, ZigBee e Bluetooth, utilizando a chamada faixa de frequências ISM (*Industrial, Scientific, Medical*). O WirelessHART (WH) é um proto-

colo criado em 2007 e certificado pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) em 2010 como o primeiro protocolo de comunicação sem fio para controle de processos industriais (GALLOWAY; HANCKE, 2013). Uma rede WH emprega gerenciamento centralizado e redes do tipo *mesh* (malha), onde os nodos são conectados dinamicamente e sem hierarquia pré-estabelecida (todos são roteadores).

No ambiente de redes industriais, escalabilidade é a característica que descreve a capacidade de uma rede de permitir a variação da quantidade e da diversidade de nodos, roteamentos, topologias e aplicações enquanto se mantêm níveis aceitáveis de critérios de desempenho (SINGH; RISHIWAL, 2017). A presença de maiores quantidades de dispositivos em uma mesma rede, especialmente em aplicações com critério de confiabilidade rigoroso, tende a inviabilizar a aplicação de protocolos com maior escalabilidade. O aumento da escala impacta em desempenho através da maior ocupação da limitada banda disponível e através de aumento de potenciais interferências, pois há mais dispositivos na mesma faixa de frequências, o que pode gerar interferências do tipo co-canal ou canal adjacente mesmo em protocolos com técnicas de acesso ao meio como TDMA (*Time Division Multiple Access*) ou TSCH (*Time Slotted Channel Hopping*).

O fenômeno de impacto em desempenho por escala é particularmente notado em roteamentos *convergecast*, quando muitos nodos da rede precisam encaminhar mensagens a um mesmo ponto de acesso (*sink*), como por exemplo, nodos de uma rede WH buscando atualizar dados enviando-os ao gateway da rede e encaminhando suas mensagens ao ponto de acesso mais próximo através de rotas *uplink*. Maiores quantidade e densidade de nodos tendem à formação de gargalos de comunicação ao redor dos pontos de acesso, e conseqüentemente maiores perdas de pacotes em cadeias sobrecarregadas (PISTER *et al.*, 2011).

Este trabalho busca avaliar o impacto da variação das quantidades, disposições e distribuições de carga de pontos de acesso em redes de grande escala, adaptando funcionalidades do WH como protocolo de simulação para os estudos de caso e avaliando critérios de centralidade como potenciais métricas de otimização para garantia de melhor desempenho. Centralidades são conceitos de análise de redes sociais (GAITAN *et al.*, 2021) costumeiramente empregados em bibliografia para análise de desempenho de redes *ad hoc*, que avaliam a relevância relativa de nodos em um conjunto. Neste trabalho, empregam-se os conceitos centralidades de grau, proximidade e intermediação para correlacionar

os impactos da disposição e distribuição espacial de dispositivos de campo e pontos de acesso em uma rede WH contra o desempenho de redes de larga escala, em termos de confiabilidade na entrega de pacotes fim-a-fim em rotas *uplink*, ou seja, em rotas com destino a pontos de acesso. Os resultados do trabalho mostram que as cadeias *uplink* de dispositivos com maior tendência a apresentarem perda de pacotes não são aquelas cujos dispositivos necessariamente estejam mais distantes fisicamente ou em maior quantidade de saltos até os pontos de acesso, mas sim aquelas cadeias com maior propensão à formação de gargalos por dependerem de um número menor de nodos em saltos mais próximos dos destinatários finais. Como consequência, estes nodos agravam o impacto da perda de pacotes ponto-a-ponto por necessitarem de retransmissões por atrasarem uma quantidade consideravelmente maior de pacotes.

Em função do que foi observado nas simulações, propõe-se uma técnica a ser utilizada pelo gerenciador de rede para que identifiquem de forma preventiva os posicionamentos ideais dos pontos de acesso, visando otimizar o fluxo de dados em rotas *uplink* e mitigar os impactos em perda de pacotes oriundos do aumento de escala. Os resultados simulados indicam um incremento de até 10% na confiabilidade resultante de redes quando comparadas à posicionamentos aleatórios. Por fim, são propostos métodos para se replicar a técnica empregando comandos existentes do protocolo WH em uma rede real.

## 1.1 Motivação

Redes industriais sem fio centralizadas como o WH apresentam desafios de escalabilidade devido à constante necessidade de convergir fluxo de informação para os *sinks*, a exemplo do *convergecast* em pontos de acesso citado anteriormente. Quando os critérios de desempenho (especialmente taxa de atualização e confiabilidade) são mais criteriosos, a aplicação de protocolos com baixa escalabilidade para redes maiores pode resultar em desempenho abaixo do esperado ou até mesmo, a inviabilização do projeto (PISTER *et al.*, 2011). Em casos como estes, a topologia da rede, a distribuição espacial de dispositivos e a quantidade de pontos de acesso, podem contribuir significativamente para mitigar gargalos de tráfego de dados e diminuir a probabilidade de perda de pacotes (PILLAI; JAIN, 2019). Por outro lado, a instalação excessiva de pontos de acesso e técnicas de redundância pode incrementar significativamente o custo do projeto de automação e limitar as máximas taxas de atualização. Desta forma, uma técnica para determinação das

quantidades e distribuições de dispositivos, tem o potencial de ajudar a garantir o mínimo desempenho desejado enquanto se minimizam também os gastos de implementação.

A definição do WH como protocolo de escolha para estudo e simulações é motivada pelo fato de ser um dos protocolos mais difundidos no mercado de automação industrial, que contempla uma rede determinística, em malha e centralizado, ou seja, redes em que todos os nodos podem receber e transmitir pacotes, mas também em que todos esses nodos são regidos por um dispositivo centralizador (gerenciador de rede), o que requer recorrentes rotas de *convergecast* através de comunicação *uplink* dos nodos para os pontos de acesso. Dessa forma, o WH é um protocolo cujas redes tendem a apresentar impactos de escalabilidade analisados neste trabalho, e serve como estudo de caso para redes em malha centralizadas de forma geral.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor, analisar e simular técnicas de distribuição de pontos de acesso em uma rede industrial sem fio centralizada que permitam otimizar a topologia da rede enquanto se garantem desempenhos pré-estabelecidos com base em critérios de confiabilidade. Busca-se analisar métricas propostas em análise de redes sociais e parametrizar o impacto de centralidade e escala em redes simuladas variando-se as quantidades e densidades de dispositivos. O trabalho usa como estudo de caso redes simuladas WH empregando scripts MATLAB que simulam o gerenciador de rede em redes submetidas a variados parâmetros de operação.

Os objetivos específicos são:

- Simular redes WH variando-se quantidade e densidade de nodos, quantidades e disposições de pontos de acesso, avaliando-se cada nodo através de centralidades de grau, intermediação e proximidade;
- Correlacionar métricas de disposição espacial e de roteamento (centralidades) com critérios de desempenho (confiabilidade), identificando-se padrões em cadeias *uplink* com maior tendência a apresentarem perdas de pacotes fim-a-fim;
- Propor técnica de distribuição de pontos de acesso em redes industriais sem fio centralizadas que busque otimizar a escalabilidade da rede através da avaliação preventiva de cadeias *uplink* e proposição de novas cadeias e novas disposições de

pontos de acesso, de modo a mitigar potenciais perdas de pacotes fim-a-fim.

O trabalho está organizado segundo os seguintes capítulos: no capítulo 2, são apresentados os fundamentos de redes industriais sem fio e escalabilidade; o capítulo 3 apresenta a análise de referências bibliográficas relevantes ao estudo e a avaliação do estado-da-arte; o capítulo 4 descreve procedimentos e ferramentas adotados para a avaliação e posterior simulação de estudos de caso; o capítulo 5 mostra quais os resultados obtidos a partir das simulações, introduz a técnica de otimização proposta e qual seu impacto em desempenho; e o capítulo 6 conclui o estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a definição dos principais conceitos de redes industriais sem fio a serem abordados ao longo do trabalho: inicia-se na seção 2.1 com as normas gerais adotadas pelos protocolos de camada física IEEE 802.15.4; a seção 2.2 apresenta o protocolo adotado para a simulação dos estudos de caso desse trabalho, o WH, detalhando tipos de dispositivos e camada de enlace; segue-se com a definição das técnicas de roteamento na seção 2.3; definem-se os conceitos e técnicas de centralidade aplicados nas simulações na seção 2.4; definem-se os conceitos de confiabilidade e determinismo (seção 2.5), que servem como critérios de desempenho do trabalho; e finaliza-se apresentando o modelo de transmissão de Friis na seção 2.6.

### 2.1 IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4, estabelecida em 2003, descreve os parâmetros de operação em camada física para o protocolo de comunicação adotado nos estudos de caso deste trabalho, o WH. A norma descreve uma camada física de operação desenvolvida primariamente para atender aplicações de baixa taxa de transmissão de dados e consequente baixo consumo de energia (ZAND, 2012). Vários protocolos bem difundidos comercialmente, como o Zigbee, o ISA100.11a e o 6LoWPAN também o empregam como sua camada física, além da camada de enlace (não utilizada no WH).

O IEEE 802.15.4 atua na faixa de frequência 2,4 GHz, nas bandas reservadas internacionalmente pela ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) para aplicações médicas, científicas e industriais. Apresenta 16 canais, cada um com largura de 2 MHz e espaçados entre si por 5 MHz, sendo que um dos canais tem seu uso restringido por definição (efetivamente disponibilizando 15 canais para uso no WH, do 11 ao 25). Sua potência de

transmissão deve ser ajustável, pelo menos, de -10 dBm a +10 dBm (CHEN; NIXON; MOK, 2010).

Dispositivos que empregam o IEEE 802.15.4 precisam apresentar sensibilidade de pelo menos -85 dBm e uma taxa máxima de dados de 250 kbits/s. Em geral, dispositivos WH possuem uma capacidade de enlace de até 300 metros em ambientes externos (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009a).

## 2.2 WirelessHART

O WH foi criado em 2007 e reconhecido em 2010 pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) como o primeiro protocolo de comunicação sem fio para aplicações de automação industrial. A Figura 1 apresenta o WH de acordo com o modelo OSI (*Open System Interconnection*).

Figura 1 - Modelo OSI do protocolo WirelessHART

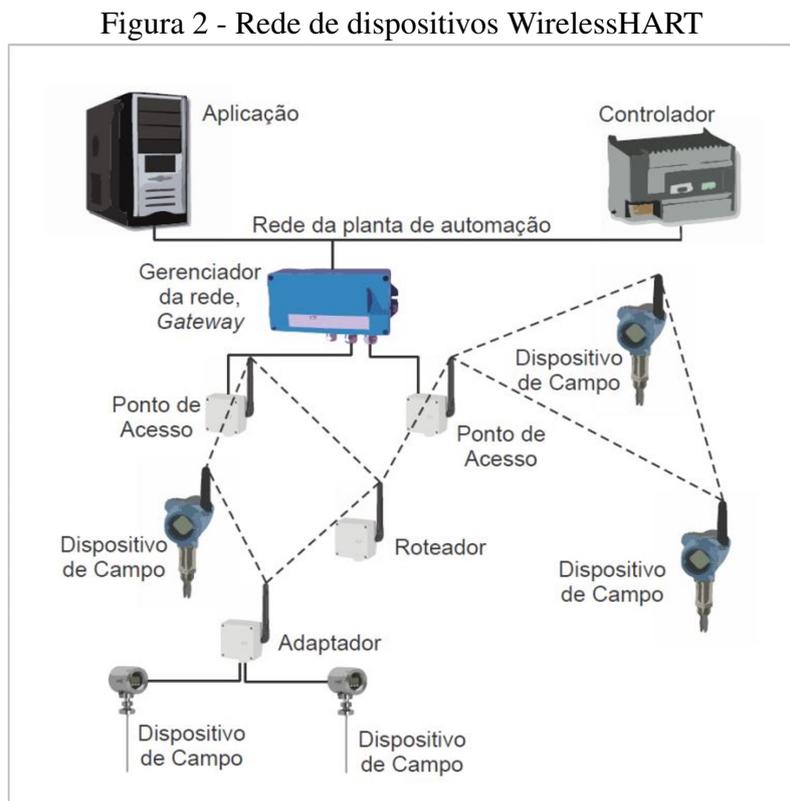
Camada OSI	Características
Aplicação	Orientada a comandos Tipos de dados pré definidos
Apresentação	n/a
Sessão	n/a
Transporte	Auto segmentação Fluxo confiável
Rede	Rede em malha Redundância de caminhos
Enlace	Sincronização Temporal Segurança e confiabilidade
Física	IEEE 802.15.4 2,4 GHz (ISM)

Fonte: (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009a)

A principal aplicação do protocolo é automação de processos industriais com redes de baixa taxa de transmissão de dados. Permite monitoramento e controle de processos em malha aberta (requerendo *input* do usuário) ou malha fechada para processos de baixa criticidade, visto que não foi projetado para baixa latência (GUNGOR; LU; HANCKE, 2010).

### 2.2.1 Tipos de Dispositivos

Os principais tipos de dispositivos (vide Figura 2) encontrados em uma rede típica WH são descritos abaixo (CHEN; NIXON; MOK, 2010), assim como suas principais utilidades e características:



Fonte: (CHEN; NIXON; MOK, 2010)

- *Dispositivo de campo*: o dispositivo de campo atua na instrumentação e incorpora o protocolo em sua aplicação no chão de fábrica. Todo sensor e atuador é um dispositivo de campo na rede industrial. Uma das características importantes do WH é que, por ser uma rede de topologia em malha, todo dispositivo de campo pode atuar como roteador, recebendo e repassando mensagens cujo destino final não é ele próprio e, assim, potencialmente ajudando a mitigar a perda de pacotes em casos onde a comunicação ponto-a-ponto pode estar comprometida. Dispositivos de campo são em geral compostos por um microcontrolador, uma fonte de energia (bateria, em geral), um transceptor de rádio-frequência e um elemento sensor ou atuador. Os transceptores implementam técnicas de espalhamento espectral a fim de reduzir o consumo de energia e aumentar a robustez de enlace, reduzindo perdas

de dados. Comercialmente, recomenda-se que uma rede WH tenha no máximo 100 dispositivos.

- *Ponto de acesso*: O ponto de acesso é o dispositivo que provê conexão direta ou indireta a qualquer dispositivo de campo da rede WH. Toda comunicação entre o *gateway* e a rede em si deve passar por pelo menos um ponto de acesso. Uma rede em inicialização é considerada efetivamente ativa quando o ponto de acesso passa a encaminhar mensagens dos dispositivos de campo ao *gateway*.
- *Gateway*: é o dispositivo que conecta o gerenciador de rede ao ponto de acesso e, conseqüentemente, aos dispositivos de campo, usualmente por uma conexão física direta. Ele também realiza a tradução de um protocolo de comunicação para outro, em casos onde há integração mista de protocolos. Ainda, o gateway na rede WH é responsável por fornecer o *clock* (relógio) principal da rede, e garantir que o(s) ponto(s) de acesso e dispositivos de campo mantenham sincronia.
- *Gerenciador de rede*: é o dispositivo que cria e recebe todas as informações do desempenho da rede e com isso, estabelece enlaces, gera grafos para rotas, escreve tabelas de vizinhos e de prioridade, e efetiva em geral a gestão da rede. Como o WH é uma rede centralizada, os dispositivos de campo não tem qualquer autonomia sobre a decisão de quando e para quem encaminhar seus pacotes, ficando toda essa responsabilidade sobre o gerenciador, o que garante o determinismo e aprimora a confiabilidade do sistema.

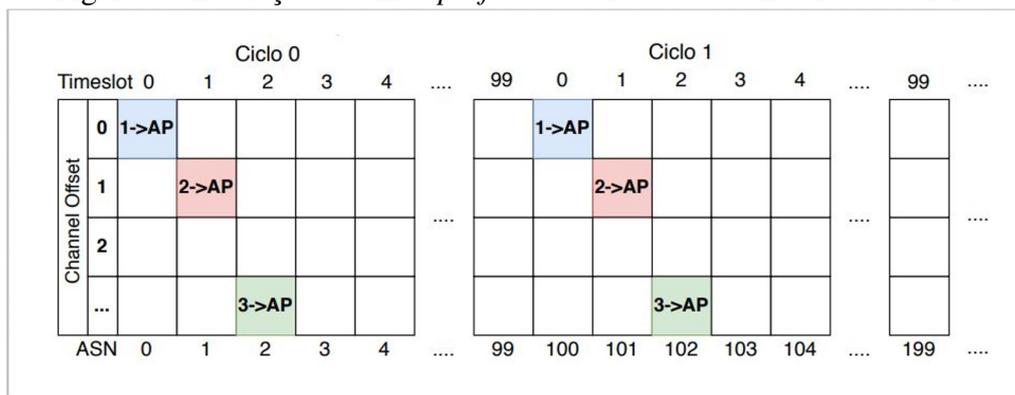
### 2.2.2 Camada de Enlace

A camada de enlace do protocolo WH é responsável pelo MAC (*Medium Access Control*, controle de acesso ao meio) da rede. São implementadas duas metodologias (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009a): uma determinista e pré-alocada (TDMA) e outra aleatória e com disputa (CSMA-CA).

O TDMA (*Time Division Multiple Access*) é o principal método de controle de acesso ao meio, onde se divide o tempo em *slots* (intervalos) de 10 ms. Em cada *slot*, um ou mais pares de dispositivos são liberados para comunicação, sendo pré-estabelecido para cada par qual dispositivo é o emissor e qual é o receptor. Após cada *slot* e conseqüente tentativa de comunicação, os pares de dispositivos alteram a frequência de sua comunicação para

outro canal usando a técnica de TSCH (*Time Synchronized Channel Hopping*, ou salto de canais sincronizado no tempo) de modo a maximizar as chances de que o par encontre canais sem interferência. Os *slots* de 10 ms são ordenados, agrupados e então executados repetidamente em um conjunto chamado *slotframe* (quadro de intervalos) ou também *superframe*, como ilustrado na figura 3.

Figura 3 - Ilustração de um *superframe* de 100 *slots* com salto de canais



Fonte: (CAINELLI, 2020)

É comum que uma rede possua vários *superframes* com variadas aplicações, pares de dispositivos e quantidades de *slots*. Nestes casos, frequentemente há sobreposição de dois ou mais *slots* de diferentes *superframes* em um mesmo instante de tempo. Previne-se que haja colisão de dados dos pacotes concomitantes garantindo-se que as comunicações sejam suficientemente afastadas em frequência e/ou em distância física, de modo que não haja interferência entre os sinais dos dispositivos emissores ou entre a percepção do meio dos dispositivos receptores.

Cada *slot* é associado a um ASN (*Absolute Slot Number*), um número armazenado em 5 bytes que corresponde à instância temporal daquele período. O ASN é usado como o contador de tempo dos pacotes e é referenciado nos controles de latência e *errorproofing* (medidas de prevenção de erros) em camadas superiores do protocolo (vide subseção 4.4).

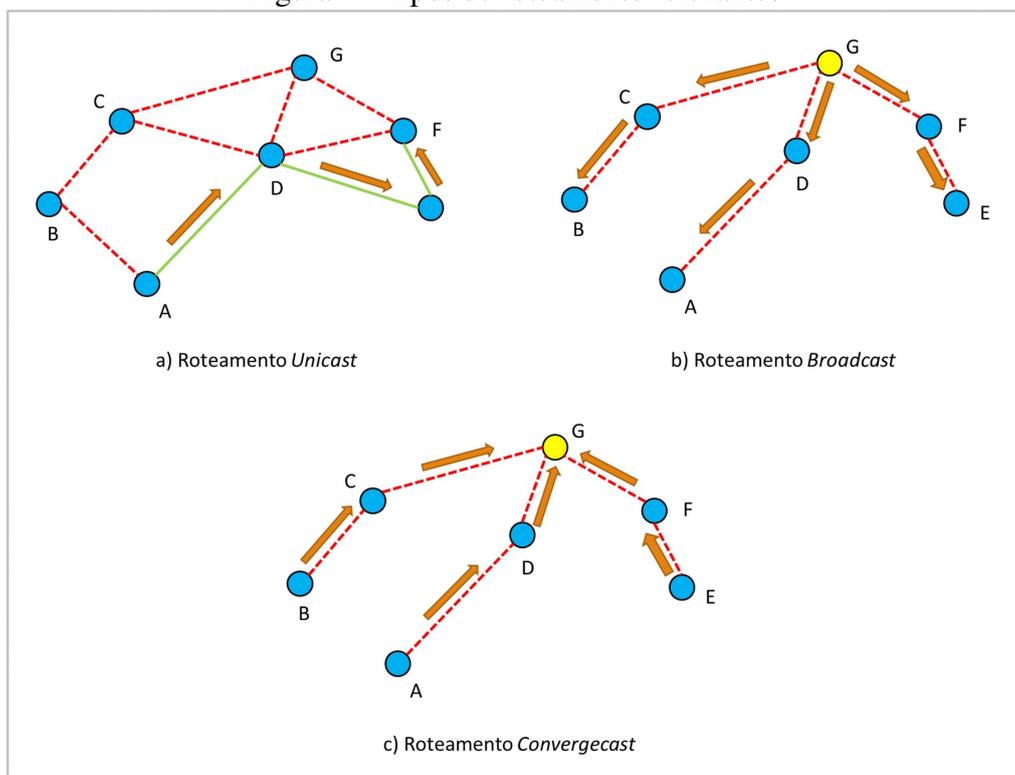
Por outro lado, o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) permite que em determinado período, quaisquer dispositivos que tenham necessidade de comunicação o façam, caso identifiquem que o meio não está ocupado naquele instante (vide CCA na subseção 4.4). Esse método não inibe a possibilidade de colisões de pacotes, que tende a aumentar conforme a escala da rede, e por isso, busca mitigar esse impacto através do *Collision Avoidance*, uma medida de anti-colisões sucessivas,

onde, identificada falha de comunicação, cada emissor aguarda um período aleatório para retransmitir.

## 2.3 Tipos de Roteamento

Dentre as principais categorias de roteamento quanto ao fluxo empregadas em redes industriais sem fio, estão o *unicast*, *broadcast* e *convergecast* (Figura 4) (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009a). Para este trabalho, rotas do tipo *convergecast* são de notável importância, dado o impacto esperado no desempenho na situação de aumento de escala significativo.

Figura 4 - Tipos de roteamento relevantes



Fonte: do autor

### 2.3.1 Unicast

Rotas do tipo *unicast* (Figura 4.a) representam mensagens originadas de um único nodo com destino final a somente outro nodo. Comandos do gerenciador direcionados a sensores e atuadores específicos são exemplo deste tipo de roteamento. Roteamentos *unicast* podem ser de várias formas, como (i) rotas *source*, onde o nodo emissor descreve exatamente qual o caminho ponto-a-ponto a ser seguido por cada nodo intermediário, (ii)

rotas de grafo, onde o nodo emissor declara qual o destinatário fim-a-fim no seu pacote de dados e cada intermediário tem a tarefa de selecionar qual o próximo destinatário ponto-a-ponto, dentro de grafos pré-estabelecidos pelo gerenciador e de acordo com o desempenho instantâneo da rede, (iii) e rotas *proxy*, especificamente empregadas no processo de *join* (agregação) de novos dispositivos à rede.

### 2.3.2 *Broadcast*

Rotas do tipo *broadcast* (Figura 4.b) são costumeiramente empregadas pelo gerenciador de rede e pelo *gateway*. Nelas, trafegam mensagens de um único nodo emissor com destino a múltiplos dispositivos da rede. Em geral são aplicadas quando há necessidade de atualização de dados em larga escala, i.e. quando há adição ou exclusão de um nodo na rede e se faz necessário, por ordem do gerenciador, atualizar as tabelas de vizinhos e grafos de cada nodo ativo.

### 2.3.3 *Convergecast*

Rotas do tipo *convergecast* (Figura 4.c) são utilizadas comumente em protocolos de comunicação centralizados. É o evento em que múltiplos nodos da rede precisam encaminhar pacotes com destino a um único dispositivo como, no exemplo do WH, um único gerenciador de rede é responsável por toda a gestão e configuração da rede, e todos os dispositivos devem frequentemente reportar status a ele encaminhando seus pacotes para algum ponto de acesso presente na topologia através de *uplink*. O mesmo ocorrem em eventos de monitoramento, onde dados de sensores são encaminhados ao gateway da rede. Em redes de alta escala, uma quantidade baixa e/ou ineficiente distribuição espacial de pontos de acesso pode agravar situações de perdas de pacotes, visto que a disponibilidade do ponto de acesso é limitada, ocasionando gargalos de tráfego de informação em seus arredores (PISTER *et al.*, 2011).

## 2.4 Centralidade

Centralidade é um conceito de Teoria de Grafos e análise de redes sociais que busca parametrizar o grau de relevância de cada vértice (ou nodo) com relação à rede como um todo (BONACICH, 1987). É um conceito amplamente empregado em teorias de redes sociais, transmissão e proliferação de doenças, redes neurais, entre outros, com o intuito

de identificar e classificar os indivíduos mais importantes na rede (BORGATTI, 2005).

Este trabalho avalia a aplicação de conceitos de centralidade na distribuição espacial, de *links* e de carga dos pontos de acesso buscando melhoria de desempenho. Vale ressaltar que análises de centralidade retornam valores efetivos para comparações relativas dentro daquele cenário, como por exemplo, determinar se um dispositivo é mais central a outro naquela rede específica. Os valores absolutos de centralidade, por si só, não apresentam significância para análise (GAITAN *et al.*, 2021).

A seguir, descrevem-se as três variantes de centralidade avaliadas neste trabalho, de acordo com as definições descritas em (BONACICH, 1987), (BORGATTI, 2005) e (GAITAN *et al.*, 2021).

#### 2.4.1 Centralidade de Grau

Centralidade de Grau (CG) é considerada uma das centralidades mais simples (GAITAN *et al.*, 2021). Sua definição envolve a determinação de quantos *links* diretos o nodo possui com relação à total quantidade de *links* que poderia ter (se estivesse conectado a todos os dispositivos na rede, por exemplo). A equação 1 abaixo explicita o cálculo da centralidade de grau para um nodo  $i$ , onde  $N$  é o número de nodos da rede e  $grau(i)$  indica a quantidade de *links* que o dispositivo  $i$  possui.

$$CG_i = \frac{grau(i)}{N - 1} \quad (1)$$

Durante os estudos de caso, busca-se avaliar se o quanto a CG impacta o emprego de disponibilidade dos pontos de acesso e dos dispositivos ao seu redor, estando diretamente relacionada à quantidade de vizinhos diretos desses dispositivos e na formação de gargalos de comunicação.

#### 2.4.2 Centralidade de Proximidade

Centralidade de Proximidade (CP) avalia o quão perto um dispositivo está com relação a todos os demais. A proximidade é definida como o inverso de distância geodésica do dispositivo com relação aos demais, como mostra a equação 2, onde  $a \in V$  representa qualquer nodo  $a$  pertencente ao grafo  $V$ , que contém a totalidade da rede, e  $dist(i, a)$  representa a distância geodésica entre os nodos  $i$  e  $a$ .

$$CP_i = \frac{1}{\sum_{a \in V} dist(i, a)} \quad (2)$$

Neste trabalho, substitui-se distância física pela distância relativa entre nodos com relação às probabilidade de perda de pacotes, onde uma maior probabilidade de perdas é dita equivalente a maiores distâncias relativas (mais detalhes na subseção 4.2). Durante os estudos de caso, busca-se avaliar o quanto a CP de cada ponto de acesso impacta nos critérios de perda de pacotes ponto-a-ponto, estando diretamente atrelada às ramificações nas cadeias de *uplink*.

### 2.4.3 Centralidade de Intermediação

Centralidade de Intermediação (CI) avalia o quão relevante é um nodo enquanto servindo como ponte entre dois ou mais outros nodos ou conjuntos de nodos. Em outras palavras, pode-se descrever a CI como a proporção de vezes em que um dispositivo se encontra na rota primária determinada pelo algoritmo de roteamento. A equação 3 mostra como calcular a CI de um dispositivo  $i$ , sendo  $rotas_i(p, q)$  uma rota entre os nodos  $p$  e  $q$  que tem  $i$  como um intermediário, e  $rotas(p, q)$  representando qualquer rota entre esses nodos.

$$CI_i = \sum_{p \neq q} \frac{rotas_i(p, q)}{rotas(p, q)} \quad (3)$$

Durante os estudos de caso, a CI representa o principal critério para determinação de potenciais nodos gargalos na rede. Dispositivos que frequentemente servem de intermediários em rotas se tornam mais críticos para a taxa de sucesso na rede, e quaisquer eventos de perdas acentuadas de pacotes acabam impactando a entrega de outros dispositivos, gerando potenciais efeitos cascata de atraso de entrega e acúmulo de *buffers*.

## 2.5 Confiabilidade e Determinismo

A confiabilidade em redes industriais sem fio pode ser definida como a taxa de pacotes entregues de forma bem sucedida a seus destinatários fim-a-fim com relação ao total de pacotes gerados pela rede (PISTER *et al.*, 2011), conforme indicado pela equação 4, onde  $\theta$  é a confiabilidade,  $p_{per}$  é o total de pacotes perdidos, e  $p_{suc}$  é o total de pacotes bem

sucedidos. É uma das principais métricas avaliadas por estudos de desempenho, principalmente nos que lidam com roteamento (CORTEZ, 2021), escalonamento (CAINELLI, 2020) e eficiência energética (LEE; EXARCHAKOS; GROOT, 2019).

$$\theta = \frac{p_{suc}}{p_{per} + p_{suc}} \quad (4)$$

Em uma rede WH, após a tentativa de transmissão de dados, o nodo emissor precisa receber do receptor uma confirmação na forma de ACK (*acknowledge*) para ter a garantia de que o pacote foi recebido, assim, assume-se que toda vez que um ACK não foi recebido (ou está corrompido), houve falha na transmissão ponto-a-ponto.

Redes como o WH, entretanto, não assumem um pacote perdido de forma definitiva após uma falha de transmissão ponto-a-ponto. Essas redes possuem meios de redundância de transmissão, que pode ser (dentre outras) redundância de enlace, onde há mais de um enlace disponível no *superframe* para tentativa de transmissão de dados entre aquele par de dispositivos; ou redundância de rotas, onde o nodo emissor tenta utilizar outra rota que possua o mesmo destino fim-a-fim. Neste trabalho, há duas formas de se perder pacotes de forma definitiva, de tal forma a deteriorar confiabilidade: obsolescência de pacotes por *Time to Live* e *buffer* cheio. Esses conceitos são abordados detalhadamente no capítulo 4.

A confiabilidade da rede é uma métrica de grande importância para a garantia do determinismo da rede. O determinismo pode ser definido como a garantia de que um sistema operará com um esperado nível de desempenho se estiver dentro dos limites de operação determinados (CHEN *et al.*, 2014); e, no caso de redes, pode ser definido como a garantia de que uma rede entregará informação (baixa perda de pacotes) no momento devido (latência pouco variável, baixo *jitter*) com a frequência esperada (taxa de atualização). Redes não-determinísticas como redes *ad hoc* são alternativas viáveis para aplicações com baixo critério de confiabilidade (PISTER *et al.*, 2011), mas não estão no escopo deste trabalho.

Confiabilidade de redes é comumente descrita em função de  $\sigma$  (*sigma*) conforme a metodologia de melhoria de processo chamada *Six-Sigma* ou Seis-Sigma, descrita em (SMITH, 1993). O Seis-Sigma é um conjunto de técnicas que visa otimizar a qualidade de um processo de manufatura de modo a atingir os menores níveis possíveis de DPMO (defeitos por milhões de oportunidades).

A base da metodologia Seis-Sigma vem do conceito de distribuições normais. Se-

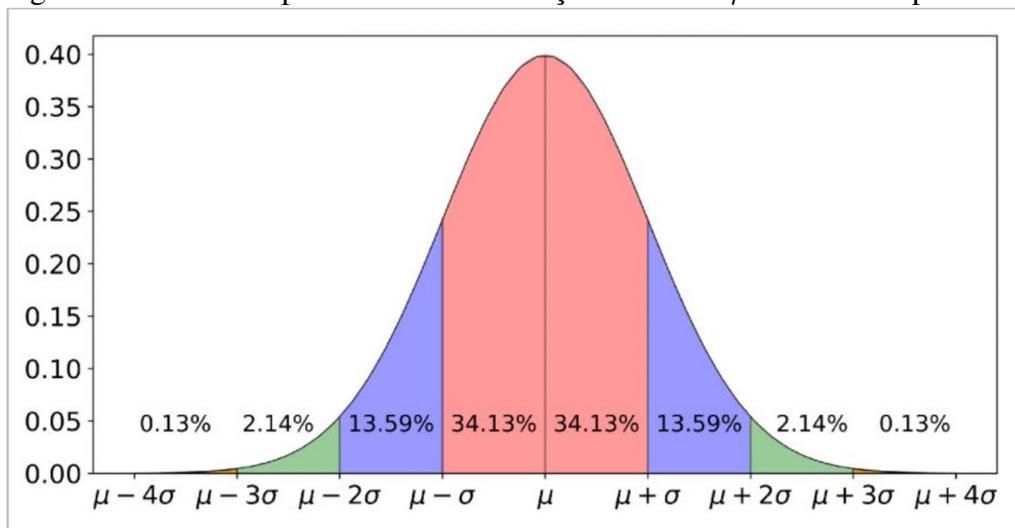
gundo o teorema do limite central (LYON, 2014), a soma de processos independentes e aleatórios se aproxima do comportamento de uma distribuição normal quanto maior a quantidade de processos agregados. Com isso, ao se avaliar, por exemplo, a qualidade de um processo de manufatura ou o desempenho de uma rede industrial, onde ambos apresentam diversos fatores interferentes possíveis (inclusive erros de medição), pode-se assumir que seu comportamento tenderá a ser uma distribuição normal se realizadas relativamente grandes quantidades de amostragens.

Um fenômeno  $f(x)$  que apresente distribuição normal pode ter sua densidade probabilística de resultados amostrados modelada conforme a equação 5 (PAPOULIS, 1984), onde  $\sigma$  é o desvio padrão da função e  $\mu$  é a média da função.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

A curva de densidade probabilística, também chamada curva normal, pode ser demonstrada em função da média  $\mu$  e do desvio padrão  $\sigma$  como mostra o gráfico da figura 5. A partir deste gráfico, infere-se que um fenômeno normal tende a atingir valores até um desvio padrão acima ou abaixo da média em aproximadamente 68,26% das vezes, até dois desvios padrões em 95,44% das vezes, e assim por diante. As densidades probabilísticas encontradas variando-se de um a seis desvios padrões para cima ou para baixo são mostrados na tabela 1.

Figura 5 - Densidade probabilística em função da média  $\mu$  e do desvio padrão  $\sigma$



Fonte: (TENNANT, 2001)

Tabela 1 - Densidade probabilística em função da quantidade de desvios padrões

Desvios padrões $\sigma$	Densidade probabilística
$\pm 1\sigma$	68,26%
$\pm 2\sigma$	95,44%
$\pm 3\sigma$	99,72%
$\pm 4\sigma$	99,98%
$\pm 5\sigma$	99,99994%
$\pm 6\sigma$	99,9999998%

Fonte: adaptado de (TENNANT, 2001)

Tomando como exemplo a qualidade resultante de um processo de manufatura, conforme inicialmente proposto em (SMITH, 1993), um processo com desempenho de 4-sigma teria uma taxa de sucesso de produção de aproximadamente 99,98% peças, ou seja, 200 DPMO (defeitos por milhões de oportunidades). No ambiente de redes industriais, pode-se dizer que uma rede de confiabilidade 4-sigma garante que seus pacotes sejam entregues a seus destinatários fim-a-fim em 99,98% das vezes, perdendo aproximadamente duzentos pacotes a cada milhão de pacotes gerados.

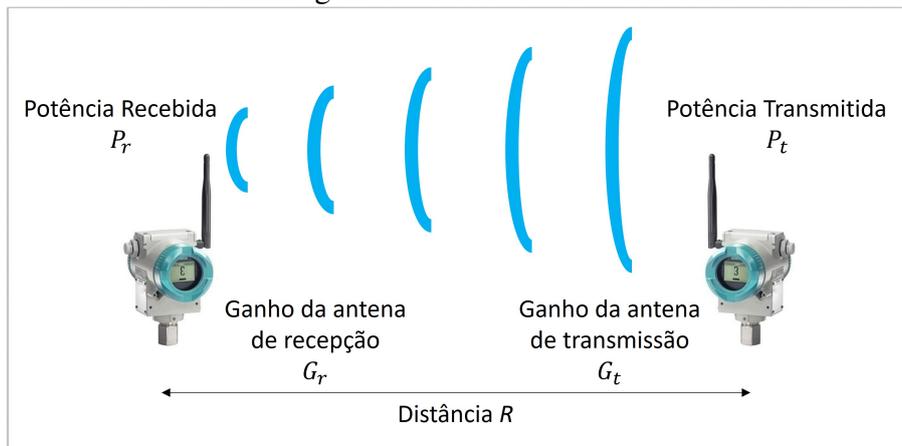
## 2.6 Modelo de Transmissão de Friis

O modelo de transmissão de Friis foi inicialmente proposto em (FRIIS, 1946) pelo engenheiro eletrônico Harald T. Friis. Seu propósito é equacionar a potência percebida por uma antena receptora em função da potência de transmissão, dos ganhos das antenas, da frequência do sinal e da distância entre transmissor e receptor (Figura 6).

O modelo inicial, mostrado na equação 6, considera um ambiente ideal com mesma polarização de onda, alinhamento entre antenas permitindo máxima radiação, e ausência de perdas por obstáculos, obstruções ou reflexões em superfícies. Na equação,  $P_t$  e  $P_r$  são as potências de transmissão e de recepção, respectivamente;  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas de transmissão e de recepção, respectivamente;  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal emitido; e  $R$  é a distância entre as antenas de transmissão e recepção.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (6)$$

Figura 6 - Modelo de Friis



Fonte: do autor

A equação 7 (SAUNDERS; ARAGON-ZAVALA, 2007) expande o modelo de Friis para incluir estimativas referentes a perdas sistêmicas de sinal como ineficiências das antenas, atenuações de linhas de transmissão, filtros, entre outros (termo  $L$ ) e a perda de sinal em função de obstruções no meio (termo  $n$ ). Na equação,  $L$  é o termo que representa as perdas sistêmicas, indicando maiores perdas quanto maior for  $L$  e perdas nulas com  $L = 1$ ; enquanto  $n$  é o termo que estima a perda de sinal em função do ambiente, inserido no equacionamento como um expoente da distância  $R$ . Seus valores usuais são mostrados na tabela 2.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R^n} \right)^2 \frac{1}{L} \quad (7)$$

Tabela 2 - Estimativa de perdas pelo ambiente na expansão do modelo de Friis

Ambiente	$n$
Ambiente livre	2
Área urbana	2,7 a 5
Edifício (com linha-de-visada)	1,6 a 1,8
Edifício (com obstrução)	4 a 6
Fábrica (com obstrução)	2 a 3

Fonte: adaptado de (VISWANATHAN, 2008)

A equação 7 pode ser transformada para a forma logarítmica de modo a apresentar os valores de potência em decibéis (SAUNDERS; ARAGON-ZAVALA, 2007), resultando no novo equacionamento 8.

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi R^n}\right) - 10\log_{10}(L) \quad (8)$$

A partir do modelo de Friis, usa-se a equação 8 neste estudo para se estimar qual o sinal percebido entre um par de dispositivos WH sabendo-se a distância entre eles na rede simulada e a potência de emissão igual a 10 dBm. Empregam-se valores de perdas de ambiente variados e de sistema, assim como perdas aleatórias para simular interferências físicas e eletromagnéticas. Mais detalhes são explicitados no capítulo 4.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta as principais referências bibliográficas empregadas para a elaboração deste trabalho. Os trabalhos são divididos em dois grupos, apresentados em ordem cronológica: os relacionados à escalabilidade e confiabilidade, na seção 3.1; e os relacionados à análise de redes sociais em contextos de redes de comunicação, particularmente referentes a métricas de centralidades, na seção 3.2. Por fim, a seção 3.3 apresenta a correlação entre os principais trabalhos citados e a proposta deste trabalho.

#### 3.1 Escalabilidade e Confiabilidade

Nesta seção, são descritos os principais trabalhos relacionados à análise de escalabilidade e otimização de confiabilidade em redes industriais sem fio. Prioriza-se estudos no escopo de redes centralizadas, preferencialmente com emprego de técnicas de acesso ao meio TSCH (*Time Slotted Channel Hopping*), em virtude da semelhança ao escopo da proposta deste trabalho, mas revisa-se também estudos de descentralização para captura de boas práticas. Os tópicos mais comumente abordados em bibliografia na categoria de desempenho e escalabilidade, que se mostram relevantes para este trabalho são: disposição espacial, balanceamento de carga de nodos coletores e otimização de direcionamento de fluxo de comunicação.

O trabalho de (PISTER *et al.*, 2011) é considerado um dos artigos seminais para a proposta deste trabalho. Foi publicado em 2011, durante os primeiros anos de desenvolvimento do TSCH e amadurecimento do padrão IEEE 802.15.4, seguindo os primeiros anos após a aprovação do WH pela IEC (*International Electrotechnical Commission*). Seus principais objetivos eram: a avaliação da escalonabilidade versus escalabilidade do TSCH, buscando analisar a viabilidade de se estabelecer um escalonamento com mais de

99,9% de confiabilidade em uma rede WH de alta escala (10.000 nodos em 0,1 km<sup>2</sup>); e, em caso positivo, quantos pontos de acesso seriam necessários para drenar os pacotes que essa rede geraria.

O estudo de (PISTER *et al.*, 2011) emprega simulações para gerar nodos distribuídos homogeneamente num espaço designado. Empregam-se algoritmos de roteamento e escalonamento, focando-se na distribuição homogênea de disposição espacial e carga dos pontos de acesso. Operam-se as redes com variadas quantidades de pontos de acesso, concluindo-se que, com os parâmetros empregados, a mínima proporção para viabilizar a meta de confiabilidade é seguindo um rateio de um ponto de acesso para cada cinquenta nodos.

Os autores seguem com outras análises, como latência fim-a-fim e otimização de consumo energético, mas os principais pontos de relevância que os autores apresentam, são a metodologia para análise de escalabilidade em protocolos TSCH e as conclusões sobre o impacto em desempenho da distribuição espacial de pontos de acesso, especialmente em roteamento *uplink*. Os autores inferem que a distribuição espacial dos pontos de acesso é crítica para o desempenho da rede, mas, diferentemente da proposta apresentada nesta dissertação, optam por não abordar esse desafio e mitigam seu impacto através da distribuição homogênea destes dispositivos.

Após 2011, o padrão IEEE 802.15.4e e particularmente a técnica TSCH ganharam crescente relevância no âmbito acadêmico e comercial. O trabalho de (MUNICIO; LATRE, 2016), por exemplo, demonstra quanto o incremento do número de nodos impacta o desempenho de redes WSN (*Wireless Sensor Network*) e propõe técnicas de escalonamento descentralizado baseado em *broadcast* para superar estes desafios. O desenvolvimento de técnicas de descentralização em redes TSCH é recorrente na bibliografia pesquisada, como nos trabalhos de (MULLER *et al.*, 2013), (WANG; HWANG, 2015) e (MODEKURTHY; SAIFULLAH; MADRIA, 2019). Apesar de o foco da proposta deste trabalho ser primariamente em redes centralizadas como o WH, pode-se obter informações importantes a partir de estudos sobre descentralização, como o consumo exponencial de recursos ao se aumentar graus de redundâncias em redes de maior escala e a criticidade da disposição espacial de nodos coletores (pontos de acesso) em cenários de banda limitada, i.e. redes com alta densidade de nodos.

Ainda na linha de redes WSN, há recorrência de trabalhos como o de (SINGH; RISHIWAL,

2017) que abordam a escalabilidade com base em algoritmos de clusterização. Apesar de fugirem do escopo de redes centralizadas TSCH, estudos de clusterização trazem relevantes percepções sobre a importância do foco em *convergecast* e rotas de *uplink* em avaliações de escalabilidade. O trabalho citado avalia diversos protocolos de clusterização em WSN, como o LEACH e o TEEN, e conclui que o de melhor desempenho (em termos de formação de *cluster*, *cluster head* e taxa de entrega de pacotes) é o protocolo FAIR, por distribuir mais eficientemente a carga dos nodos de forma balanceada e conseqüentemente minimizar o consumo de energia e a formação de gargalos.

Também abordando balanceamento de carga e fluxo de comunicação, os mais recentes trabalhos de (KHARB; SINGHROVA, 2018) e (ARSHAD *et al.*, 2019) trazem diferentes soluções para o desafio de escalabilidade. O primeiro estudo compara o desempenho de redes industriais sem fio TSCH em diferentes tipos de topologia e propõe uma solução para escalabilidade e diferenciação de tráfego através de uma hibridização de topologias focada em hierarquização, analisando métricas de confiabilidade, tempo de vida de baterias, latência, interferência de enlaces e colisões. O segundo estudo, por outro lado, trata diretamente do impacto no desempenho referente à disposição espacial de dispositivos, propondo uma solução embasada em roteamento geográfico para minimizar a latência de comunicação em diferentes cenários de densidade de nodos. Ambos os trabalhos trazem *inputs* relevantes para a proposta deste trabalho no que tange o impacto da crescente demanda de comunicação, causada por acréscimo de quantidade e densidade de nodos e como abordar a distribuição do fluxo de pacotes (o primeiro por topologia, o segundo por geografia), para otimizar desempenho em escalabilidade.

## 3.2 Centralidades

Esta seção apresenta o contexto da aplicação de análise de redes sociais dentro do escopo de redes de comunicação, assim como a descrição de alguns dos estudos considerados mais relevantes para a proposta deste trabalho, no que tange centralidades em análises de desempenho de redes industriais sem fio. Centralidades são primariamente métricas para a determinação da relevância de nodos com relação ao restante da rede, e os principais tópicos abordados em bibliografia nessa categoria de estudos que se mostram relevantes para este trabalho são: análise de distâncias geodésicas, vazão de dados e escalonabilidade.

Segundo (FREEMAN, 2004), os primeiros conceitos de análise de redes sociais foram introduzidos no começo do século XX e ganharam crescente relevância ao longo do século, como nos trabalhos de (BONACICH, 1987) e (WASSERMAN; FAUST, 1994). As primeiras correlações entre conceitos de redes sociais e redes de comunicação se deram no começo do século XXI, em trabalhos como o de (KREBS, 2000), onde se comparava a interrelação social com a vazão de dados de comunicação. A partir de então, em trabalhos como o de (KAUFMANN; LEHMANN, 2003), a análise de redes sociais, e em particular as métricas de centralidades, começaram a ser gradativamente mais empregadas em bibliografia para a parametrização da relevância de nodos em comunicação industrial.

A maioria considerável de estudos envolvendo conceitos de centralidade concentra-se no ambiente de redes WSN. O trabalho de (AHMAD *et al.*, 2020), por exemplo, emprega centralidades de proximidade para desenvolver técnicas de geolocalização de nodos clusterizados em redes WSN através de trilateração. O estudo apresenta correlações entre centralidade e potência de sinais de RF entre dispositivos vizinhos (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) e, conseqüentemente, probabilidade de perda de pacotes.

O trabalho, de (PAL *et al.*, 2021) busca otimização de conservação de energia empregando conceitos de centralidade para determinação de *cluster heads* temporários, particularmente relevante em aplicações IoT (*Internet of Things*). O estudo demonstra que centralidades podem ser empregadas de forma confiável para redirecionar a vazão de dados e, conseqüentemente, incrementar a vida útil da bateria de sensores e diminuir a incidência de gargalos em fluxos de comunicação, aumentando também a taxa de entrega de pacotes.

O recente estudo de (GAITAN *et al.*, 2021) é outro considerado de elevada importância para a proposta deste trabalho. Nele, empregam-se conceitos clássicos de centralidade para analisar seus impactos no desempenho de redes TSCH durante a designação de nodos coletores. O estudo propõe, analisa e simula a definição de *gateways* a partir de "medidas quantitativas sobre o quão importante é cada nodo em relação aos demais". Considerando quatro tipos de centralidade (grau, proximidade, intermediação e autovetor), (GAITAN *et al.*, 2021) conclui que priorizar a definição de nodos coletores através de centralidades pode melhorar em até 45% a escalonabilidade da rede quando comparado à definição aleatória. Este estudo traz levantamentos relevantes, demonstrando os benefícios do emprego de análise de redes sociais quando aplicados na otimização de fluxo de dados em roteamentos *uplink* e reforçando a lacuna bibliográfica em técnicas de designação de no-

dos coletores (como *cluster heads* e pontos de acesso), principalmente no contexto de aplicações em tempo real.

### 3.3 Comparação entre referências

Após avaliação das referências bibliográficas, identifica-se a oportunidade de trabalho na correlação dos conceitos de análise de redes sociais, em particular métricas de centralidades, na análise de escalabilidade e confiabilidade de redes centralizadas TSCH, dado que a maioria dos estudos aplica este tipo de técnica a redes *ad hoc* buscando otimização de algoritmos de clusterização. A tabela 3 mostra a comparação entre os principais trabalhos citados e a proposta deste trabalho, correlacionando os conceitos abordados em cada um.

Tabela 3 - Resumo dos trabalhos relacionados

Trabalho	Redes Centralizadas	TSCH	Centralidade	Convergecast	Escalabilidade	Confiabilidade
(PISTER <i>et al.</i> , 2011)	✓	✓		✓	✓	✓
(MUNICIO; LATRE, 2016)		✓			✓	✓
(SINGH; RISHIWAL, 2017)				✓	✓	✓
(KHARB; SINGHROVA, 2018)	✓	✓			✓	✓
(ARSHAD <i>et al.</i> , 2019)					✓	✓
(AHMAD <i>et al.</i> , 2020)			✓	✓		
(PAL <i>et al.</i> , 2021)			✓	✓		
(GAITAN <i>et al.</i> , 2021)	✓	✓	✓	✓		
Proposta	✓	✓	✓	✓	✓	✓

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o desempenho de redes industriais sem fio sob influência de aumento de escala, este trabalho emprega simulações implementando características das camadas física, de enlace e de rede do protocolo WH. Este capítulo descreve os métodos e materiais empregados para simular e avaliar o funcionamento das redes em estudos de caso.

A seção 4.1 apresenta o fluxograma geral do software de simulação desenvolvido em script MATLAB, quais os principais parâmetros e regimes de simulação, e como os resultados extraídos são compilados para embasar as análises feitas; a seção 4.2 descreve a adaptação do algoritmo escolhido para o roteamento *uplink* da rede; a seção 4.3 apresenta como o software determina o escalonamento da rede e o provisionamento de enlaces para os pares de dispositivos vizinhos; a seção 4.4 descreve como a rede interage com a perda de pacotes ponto-a-ponto e fim-a-fim, e efetivamente como se contabilizam impactos em confiabilidade; a seção 4.5 descreve como as equações de centralidade definidas no capítulo 2 são implementadas no programa.

A proposta de técnica de otimização é apresentada após a exposição e análise dos resultados no capítulo 5.

### 4.1 Metodologia de Simulação

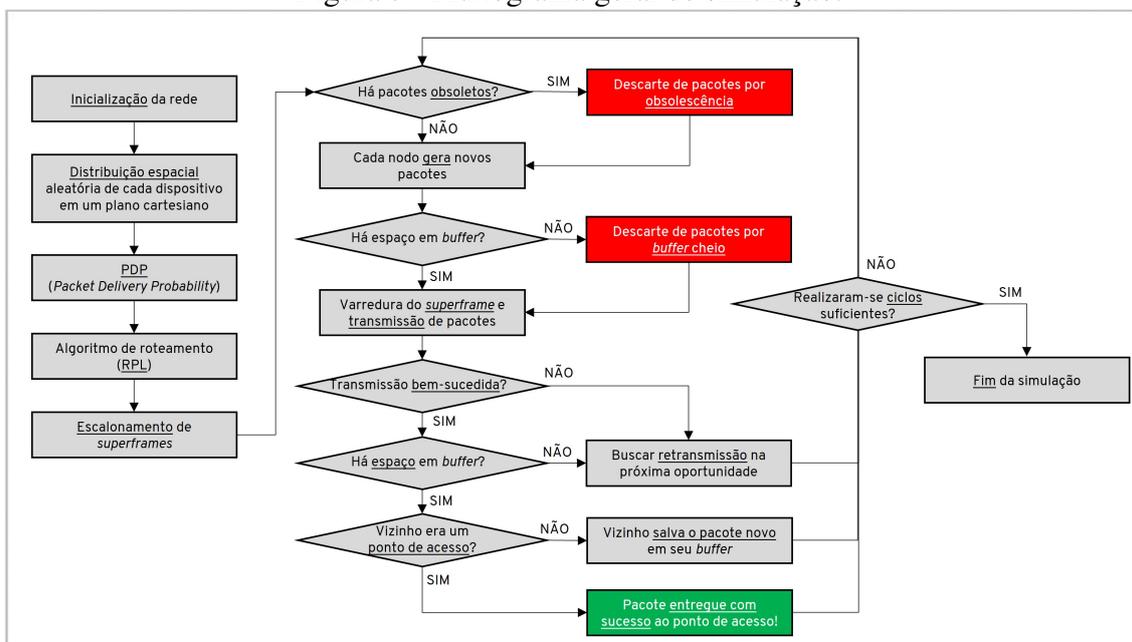
O software de simulação desenvolvido para os estudos de caso possui um conjunto de variáveis definidas por usuário e outras definidas aleatoriamente. Para fins de esclarecimento, essas variáveis são descritas na ordem em que são apresentadas neste trabalho, e não necessariamente na ordem com que são coletadas do usuário ou geradas intrinsecamente pelo programa.

Com o intuito de correlacionar escalabilidade de redes WH a diferentes distribuições

espaciais de nodos, os primeiros parâmetros necessários para o funcionamento do código são a quantidade de dispositivos de campo e de pontos de acesso. No modelo proposto, os únicos elementos de rede existentes são estes dois, visto que o desempenho da rede é avaliada com relação à perda de pacotes entre nodos. Abstrai-se que pacotes entregues a um ponto de acesso são garantida e instantaneamente entregues com sucesso ao *gateway* e gerenciador de rede.

A figura 7 expõe o fluxograma simplificado da simulação desenvolvida em *script* MATLAB. A etapa de definição de parâmetros, incluso os citados acima, é realizada na etapa primária de *Inicialização da rede*.

Figura 7 - Fluxograma geral de simulação.



Fonte: do autor

Uma vez determinadas as quantidades de nodos, seguindo o fluxograma da figura 7, estes nodos são atrelados a posições aleatórias em uma área de dimensões pré-estabelecidas pelo usuário. Cada nodo, seja dispositivo de campo ou ponto de acesso, é direcionado a coordenadas aleatórias em um plano cartesiano bidimensional. Dois ou mais dispositivos são impedidos de compartilharem a mesma posição no plano. Em análises posteriores, mostradas no capítulo 5, mostra-se que é possível customizar a posição de nodos pelo usuário, o que faz parte da proposta de técnica de otimização e está mais de acordo com o uso prático das redes.

Uma vez distribuídos no plano, o software varre cada combinação de pares de dispo-

sitivos e estima a potência de sinal percebido entre eles usando o modelo de transmissão de Friis apresentado na seção 2.6, durante a etapa denominada PDP (*Packet Delivery Probability* na figura 7. Além disso, o software arbitra aleatoriamente interferências externas de sinal entre cada par de dispositivos na forma de decréscimos na potência de sinal percebido, buscando simular um ambiente fabril que apresenta obstáculos físicos e eletromagnéticos interagindo com a transmissão em rádio-frequência.

Uma vez estabelecidas as estimativas de potência de sinal percebido entre cada par de nodos, o software estima o PDP, um parâmetro desenvolvido para este trabalho com o intuito de ser o equivalente virtual do existente PDR (*Packet Delivery Rate*, ou Taxa de Entrega de Pacotes). O PDP, por sua vez, durante a etapa denominada Algoritmo de roteamento (RPL) da figura 7, é retroalimentado na adaptação do algoritmo *upstream* de roteamento RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*) para se determinar quais são as rotas primárias de comunicação *uplink* de cada dispositivo de campo até algum ponto de acesso. Mais detalhes sobre todo esse processo são apresentados na seção 4.2.

Redes como o WH precisam provisionar *superframes* e *slots* para diversas operações de gestão interna da rede, como coleta e divulgação de dados de desempenho, listas de vizinhos e rotas, roteamentos *proxy* para o *join* (agregação) de novos dispositivos à rede, entre outros; e estas operações tendem a ocupar canais e consumir banda disponível da rede, potencialmente deteriorando ainda mais seu desempenho. Entretanto, como o enfoque deste trabalho é o impacto da escalabilidade, essas operações de regime transiente da rede foram desconsideradas da simulação. Assume-se para fins desta análise, que a rede simulada já se encontra em um regime estável onde todos os dispositivos foram identificados e devidamente incluídos à rede, e todos os dispositivos já possuem suas listas de vizinhos e roteamentos. O escalonamento de *slots* no *superframe* primário de operação, durante a etapa de Escalonamento de Superframes da figura 7, é realizado de forma proporcional à quantidade de nodos abaixo de si que cada nodo possui na rota de *uplink*, representando diretamente a demanda de taxa de atualização da rede. Mais detalhes sobre esse processo são apresentados na seção 4.3.

Tendo agora dispositivos, distribuições espaciais, roteamento e escalonamento, a rede opera uma quantidade de ciclos de *superframe* pré-determinada pelo usuário. A cada ciclo de operação, cada dispositivo de campo gera um novo pacote que precisa ser encaminhado

por sua cadeia de roteamento *uplink* até o seu ponto de acesso primário. Varre-se os *slots* do *superframe*, cada um contendo a indicação de um par de dispositivos (um emissor, um receptor) para comunicação, de acordo com o escalonamento da rede. A cada *slot*, gera-se um número aleatório, que por sua vez é comparado ao PDP de cada par, visando simular a probabilidade de um pacote ser entregue com sucesso. Em caso de sucesso, o pacote é deletado do *buffer* do nodo emissor e salvo no *buffer* do nodo receptor. Em caso de falha, o pacote permanece no *buffer* do nodo emissor, aguardando uma nova oportunidade de transmissão segundo os critérios pré-estabelecidos de redundância de enlace e de rotas. Pacotes só são efetivamente descartados da rede quando os nodos se deparam com limitação de espaço em *buffer* ou obsolescência de pacotes considerados demasiadamente atrasados para terem valia à operação. Mais detalhes sobre esse processo são apresentados na seção 4.4.

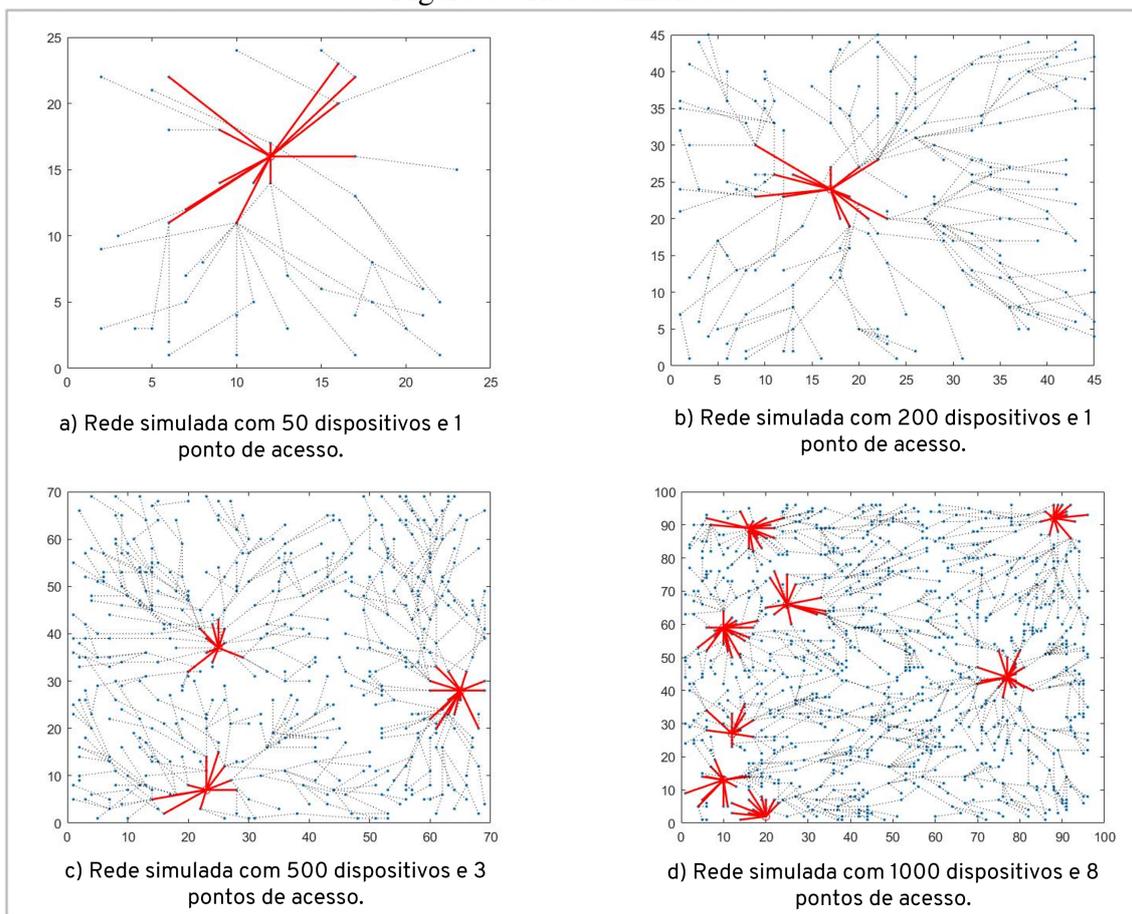
Rotas de comunicação que não sejam de *uplink* com destino aos pontos de acesso são desconsideradas do ambiente de simulação, visto que o objetivo é a análise da formação de gargalos de *uplink* ao redor de nodos coletores e como as métricas de centralidade podem auxiliar na identificação desses gargalos de forma preventiva. Cita-se, na seção de trabalhos futuros (seção 6.2), a possibilidade de se trabalhar na implementação da totalidade operacional de uma rede WH visando a análise do impacto em desempenho dos gargalos em variados tipos de roteamento, ou mesmo incluindo os regimes transientes de operação (i.e. processos de *join* de novos dispositivos).

Uma vez que a rede opere a quantidade de ciclos de *superframe* pré-determinados, gerando pacotes e buscando transmissão por roteamento *uplink*, a rede salva parâmetros para posterior análise. As centralidades de grau, intermediação e proximidade, por exemplo, já podem ser determinadas desde as etapas de distribuição espacial e roteamento da rede (mais detalhes na seção 4.5). As quantidades de pacotes entregues e perdidos são salvas e correlacionadas a cada dispositivo, para embasarem as análises descritas no capítulo 5.

As redes simuladas, por sua vez, podem ser plotadas para representação visual. A figura 8 mostra exemplos de redes com: 50 dispositivos de campo e 1 ponto de acesso (figura 8.a); 200 dispositivos e 1 ponto de acesso (figura 8.b); 500 dispositivos e 3 pontos de acesso (figura 8.c); e 1000 dispositivos e 8 pontos de acesso (figura 8.d). Cada ponto nas figuras representa um dispositivo de campo, e cada linha tracejada representa uma rota de comunicação *uplink* entre nodos. As linhas vermelhas são rotas que interligam

dispositivos de campo a pontos de acesso, e o ponto onde cada conjunto de linhas vermelhas converge indica a localização espacial de um ponto de acesso. Os eixos de abscissa e ordenada são os eixos do plano cartesiano, indicando a posição espacial de cada nodo na área pré-estabelecida, representada em metros.

Figura 8 - Redes simuladas.



Fonte: do autor

Embora o simulador desenvolvido não tenha sido validado formalmente, está baseado em expressões analíticas bem conhecidas como o modelo de transmissão de Friis, o modelo euclidiano espacial e a operação de roteamento e escalonamento WH segundo a norma.

## 4.2 Algoritmo de Roteamento

A técnica de roteamento empregada para as simulações deste trabalho é baseada no algoritmo de RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*) formalmente descrito em (WINTER *et al.*, 2012) mas já adaptado para análise de cargas de

pontos de acesso em (PISTER *et al.*, 2011). Uma de suas principais variáveis é o PDR, ou Taxa de Entrega de Pacotes, mas este trabalho implementa uma variação virtual desta variável chamada PDP, ou Probabilidade de Entrega de Pacotes. A subseção 4.2.1 inicia apresentando como se arbitra a PDP com base no modelo de Friis do capítulo 2, e a subseção 4.2.2 apresenta a adaptação do algoritmo de roteamento em si.

#### 4.2.1 Probabilidade de Entrega de Pacotes

Conforme revisado na seção 2.6, o modelo de transmissão de Friis correlaciona um conjunto de parâmetros entre dois transceptores de rádio e estima um nível de potência de sinal recebido. Para este trabalho, emprega-se o modelo expandido de Friis em decibéis (equação 8). Após simulações com parâmetros variados para os termos  $L$  e  $n$ , arbitra-se o emprego de, respectivamente, 0,5 e 2,5 para representar um ambiente fabril com perdas sistêmicas. A alteração desses parâmetros foi verificada em simulação e implica em maiores ou menores médias de PDP, mas não alteram significativamente a proporção com que o aumento de escala deteriora confiabilidade nos resultados expressados no capítulo 5. Dessa forma, a variação desses parâmetros não é alvo do escopo deste trabalho.

Além da deterioração de sinal em função da distância entre o par de dispositivos (termo  $R$  na equação 8), a simulação insere uma interferência aleatória que diminui a potência resultante do modelo de Friis entre 0 e 20 dBm, visando simular a interferência de objetos físicos e sinais eletromagnéticos de variados maquinários e equipamentos costumeiramente encontrados em ambientes fabris. A amplitude dessa interferência, assim como os valores de  $L$  e  $n$ , implicam somente em médias de PDP maiores ou menores, representando na prática um ambiente com mais ou menos interferências externas. Visto que não há relevância para a análise de escalabilidade, atribuem-se, então, essas interferências apenas para fins de verossimilhança da simulação para com a realidade industrial.

O termo PDP criado para este trabalho representa a probabilidade percentual de um par de dispositivos  $a$  e  $b$  ser bem sucedida em transmitir pacotes entre si. Para fins de objetividade, este trabalho assume que o único critério relevante para o sucesso ou fracasso na tentativa de transmissão de pacotes é o nível de sinal percebido entre um par de dispositivos, e a cada tentativa, gera-se um número percentual aleatório para ser comparado com a probabilidade pré-determinada. A equação 9 descreve como a potência percebida é transformada em probabilidade de sucesso de transmissão, sendo  $P_{r(a,b)}$  a potência de

sinal percebida (em dBm) entre os nodos  $a$  e  $b$  conforme o modelo expandido de Friis e as interferências aleatórias; e  $Lim_{inf}$  e  $Lim_{sup}$ , respectivamente, os limites inferiores e superiores adotados neste trabalho para simular potências nas quais um par de dispositivos tem, respectivamente, 0,1% e 99,9% de chance de ser bem sucedido em transmitir pacotes entre si.

$$PDP_{(a,b)} = \frac{P_{r(a,b)} - Lim_{inf}}{Lim_{sup} - Lim_{inf}} \quad (9)$$

A padrão IEEE 802.15.4 determina que os transceptores de rádio adotados pelo WH devem ser capazes de emitir sinais até 10 dBm e ter sensibilidade de recepção até -85 dBm. Com base nisso, arbitram-se os valores de -30 dBm e -100 dBm para os parâmetros de  $Lim_{sup}$  e  $Lim_{inf}$ , respectivamente. A variação desses parâmetros em simulação impacta somente o quanto a distância entre dispositivos acarreta em mais ou menos perdas de pacotes, e por não possuir influência nas conclusões obtidas nas análises do capítulo 5, não será alvo do escopo deste trabalho.

#### 4.2.2 RPL

O algoritmo RPL, em especial sua versão *upstream* (dos dispositivos de campo em direção ao ponto de acesso), é um algoritmo de minimização que atribui custos para cada *link* entre dispositivos de forma iterativa e determina a rota otimizada como a com a menor soma de custos desde o emissor até o destinatário final. No algoritmo, custo (equação 10) está associado à probabilidade de perda de pacotes e à distância em saltos do dispositivo a um ponto de acesso, assim como a um termo proposto em (PISTER *et al.*, 2011) que realiza o balanceamento entre as cargas de pontos de acesso de modo a buscar uma distribuição otimizada de suas disponibilidades.

$$Custo_{link} = Custo_{vizinho} + ETX_{vizinho} + \lambda * Carga_{PA} \quad (10)$$

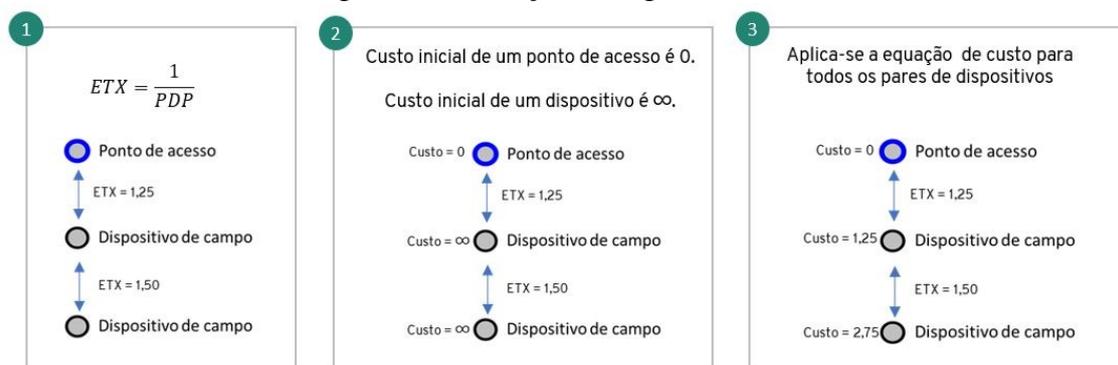
Primariamente, precisa-se de um termo percentual que represente a taxa de entrega entre cada par de dispositivos. Esse valor pode ser estimado inicialmente ou empregado a partir de valores reais do histórico da rede, caso já estivesse em operação. Para este trabalho, adota-se o PDP descrito anteriormente, um valor percentual que descreve a pro-

porção média de pacotes entregues de forma bem-sucedida entre cada par de dispositivos ponto-a-ponto; ou seja, um par de dispositivos com PDP 80% perde, em média, um pacote a cada cinco tentativas.

A partir do PDP, estima-se o ETX (*Expected Transmission Count*, ou Contagem Esperada de Transmissões). O ETX é definido simplesmente como o inverso do PDP: um par de dispositivos com PDP de 80% possui um ETX de 1,25; ou seja, são necessárias 1,25 tentativas de transmissão para que se concretize uma transmissão bem-sucedida.

No início do algoritmo, tendo o ETX entre cada par de dispositivos, atribui-se uma classificação de custo inicial para cada nodo presente na rede: zero para os pontos de acesso e arbitrariamente alto para cada dispositivo de campo (igual para todos). Cada dispositivo, então, varre os potenciais *links* com seus vizinhos e atribui um custo a cada *link* igual à classificação do vizinho mais o ETX entre eles (termos  $Custo_{vizinho}$  e  $ETX_{vizinho}$  na equação 10). O dispositivo, então, determina o *link* com menor custo e atualiza sua própria classificação como igual a esse custo. A atualização da classificação de um dispositivo causa a atualização em cadeia da classificação de todos os dispositivos conectados direta ou indiretamente a ele, e assim, toda a rede atualiza seus custos iterativamente e busca melhores vizinhos até que todos os dispositivos estejam conectados (direta ou indiretamente) a um ponto de acesso e o algoritmo atinja um regime permanente (novas iterações não provoquem atualizações de *links* e classificações). A figura 9 ilustra com exemplos a evolução das classificações de nodos no algoritmo.

Figura 9 - Ilustração do algoritmo RPL.



Fonte: do autor

O termo  $Carga_{PA}$  é uma proporção de quantos dispositivos estão conectados no ponto de acesso de uma determinada cadeia de dispositivos com relação ao total de dispositivos. Por exemplo, uma cadeia de 50 dispositivos conectados no mesmo ponto de

acesso, em uma rede com 200 dispositivos de campo ao todo, teria uma carga adicional de  $Carga_{PA} = 50/200 = 0,25$  no ponto de acesso e, por conseguinte, em cada dispositivo da cadeia. Multiplica-se o termo  $Carga_{PA}$  por uma constante  $\lambda$  cuja finalidade é ponderar a relevância do balanceamento de pontos de acesso dentro do algoritmo RPL. Assim como no estudo de (PISTER *et al.*, 2011), arbitra-se  $\lambda$  como a média de custos dos nodos da rede sem balanceamento de carga, para buscar que o balanceamento não seja excessivamente ou insuficientemente ponderado para a otimização.

O termo  $\lambda * Carga_{PA}$  faz com que cadeias cujos pontos de acesso já possuem cargas mais elevadas tornem-se menos atrativas a outros dispositivos em busca pelo *link* de menor custo. Esse fator é relevante para evitar que haja concentração excessiva de *links* com nodos melhor posicionados. Além disso, como este trabalho busca determinar as quantidades e disposições mínimas dos pontos de acesso para garantia de critérios de desempenho, a garantia de balanceamento nas cargas dos pontos de acesso se faz de relevância significativa para os estudos de caso.

### 4.3 Redundância e Escalonamento

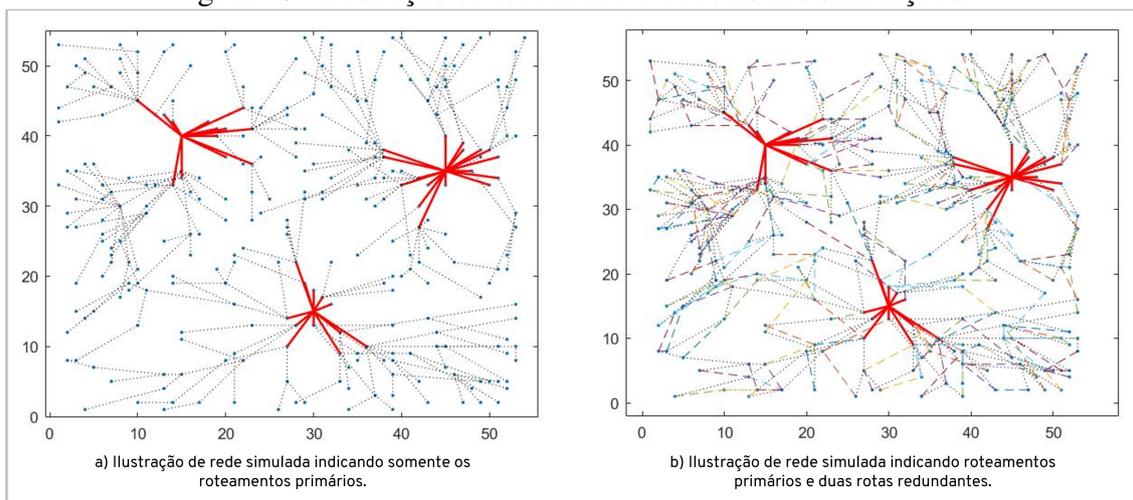
A perda de pacotes é uma das maiores desvantagens das redes industriais sem fio quando comparadas às redes cabeadas. Por vezes, interferências externas como uma rede coexistente ou mesmo um obstáculo físico podem provocar excesso de perda de pacotes entre nodos vizinhos. Por isso, o gerenciamento de redes com topologia em malha, como no WH, costumeiramente busca aplicar redundância em seu escalonamento visando mitigar as inevitáveis perdas de dados.

Redundância é o conceito definido pela presença de mais de um recurso para a completude da tarefa. Em redes de malha, a redundância de enlaces representa a quantidade de *slots* redundantes em um mesmo *superframe* onde um par de dispositivos possui a oportunidade de buscar retransmissão em caso de perda prévia de pacotes. Por outro lado, a redundância em rotas refere-se a ter mais de um roteamento possível que leve o pacote ao seu destinatário final, caso a rede identifique que a rota primariamente escolhida possa estar demasiadamente comprometida.

Para este trabalho, adota-se como padrão que todos os enlaces possuem redundância de enlace quádrupla, i.e. cada par de dispositivos apresenta quatro *slots* para buscar retransmissão, enquanto cada rota apresenta redundância dupla, de forma que todo dispo-

sitivo possui duas rotas de *uplink* alternativas caso sua rota principal (também chamada de rota primária) apresente falhas consecutivas. A figura 10 ilustra graficamente as rotas primárias e rotas redundantes em uma rede exemplificada. Em todas as ilustrações de redes simuladas ao longo deste trabalho, omitem-se as redes redundantes para fins de melhor visualização das figuras.

Figura 10 - Ilustração de redundância de rotas nas simulações.



Fonte: do autor

A redundância é uma das principais características que permitem que redes industriais sem fio em topologia de malha atinjam critérios mais altos de confiabilidade e, assim, obtenham desempenhos que possam competir com suas alternativas cabeadas. Entretanto, vale ressaltar que maiores redundâncias implicam em potencial maior desperdício de banda, visto que alocam-se recursos (provisionamento de *slots* durante a etapa de escalonamento) reservados para o caso de erro, mas em caso de sucesso, podem ser inutilizados. Em geral, as métricas mais impactadas pelo excesso de redundância são a taxa de atualização e o consumo de energia.

Neste trabalho, o software de simulação considera tanto redundância de enlaces quanto redundância de rotas em seu provisionamento. O escalonamento de *slots* e a organização dos *superframes* de operação se dão de forma simplificada: como o objetivo é a análise do fluxo de convergência de pacotes e abstraem-se todas as formas de comunicação salvo rotas de *uplink*, organiza-se apenas um *superframe* primário que contempla todos os *slots* de *uplink* da rede.

Uma das principais considerações a serem tomadas com essa versão simplificada de escalonamento é garantir que a alocação de *slots* para cada nodo seja proporcional não

somente às definições de redundância de enlace e de rotas, mas também à quantidade de nodos abaixo de si na cadeia de *uplink*. Caso um nodo  $i$  esteja a, por exemplo, três saltos de distância do ponto de acesso, o software garante que a quantidade de *slots* destinados para  $i$  seja proporcional à quantidade de nodos que dependem de  $i$  em sua rota primária, ou seja, os nodos com quatro ou mais saltos de distância do mesmo ponto de acesso e que contemplem  $i$  em sua rota de *uplink*. Essa estratégia garante a possibilidade de que, em um único ciclo de *superframe*, todos os pacotes sejam capazes de alcançar seus destinos finais (pontos de acesso).

A interpretação de um escalonamento contendo apenas um *superframe* primário, mostra-se pouco verossímil com uma condição real de operação. Em uma rede WH real, têm-se múltiplos *superframes*, potencialmente vários para cada ponto de acesso e para diferentes aplicações. Entretanto, tendo em vista o objetivo de analisar o fluxo de convergência de dados e formação de gargalos, essa abstração não apresenta qualquer impacto sobre os resultados obtidos. Pode-se interpretar a varredura do único *superframe* como na verdade a varredura de dois ou mais *superframes* que, juntos, compõem a totalidade da rede, sendo paralelos por distância física ou mesmo canais alternados. O que se perde ao simplificar essa rotina de operação é a análise criteriosa de taxa de atualização e consequentes latência e *jitter* da rede, variáveis que estão fora do escopo deste projeto. Como trabalhos futuros, na seção 6.2, cita-se a possibilidade de se implementar uma simulação com mais funções operacionais do WH, incluindo outras formas de roteamento e outras ferramentas de operação. Inclui-se nesse contexto a elaboração de um escalonamento mais detalhado para que a expansão da análise contemple o estudo criterioso de latência e *jitter*.

É durante a fase de provisionamento de *slots* do *software* que se identifica o impacto significativo do aumento de escala em consumo de recursos da rede. O provisionamento de redundâncias por si só já tende a consumir o dobro ou mais de *slots* de comunicação, mas em um cenário de alta escala, quando as cadeias de *uplink* tendem a apresentar dispositivos com cada vez mais saltos de distância de qualquer ponto de acesso, exponencialmente mais *slots* precisam ser dedicados aos nodos posicionados em pontos de bifurcação e mais próximos do nodo coletor. Esse fenômeno, como descrito no capítulo 5, está intrinsecamente relacionado ao desafio de escalabilidade e contempla a causa-raiz para a formação de gargalos no fluxo de comunicação.

## 4.4 Perda de Pacotes Fim-a-Fim

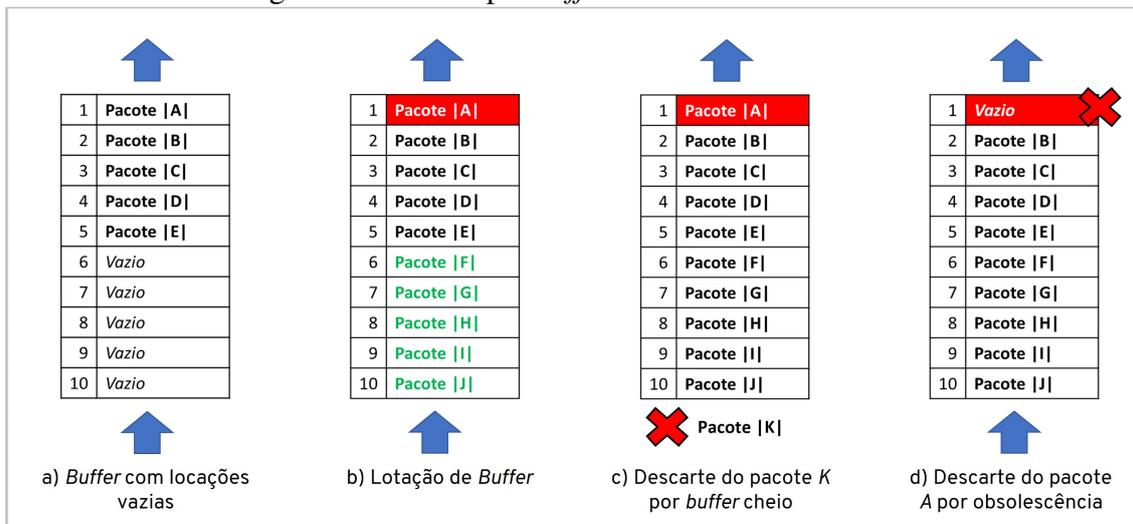
O foco deste trabalho é analisar o impacto de escalabilidade em métricas de desempenho, e todas as métricas são direta ou indiretamente deterioradas pelo mesmo fenômeno básico, perdas de pacotes. Em geral, a maioria das trocas de pacotes entre nodos vizinhos ponto-a-ponto se faz não somente pelo encaminhamento de dados por parte do nodo de origem, mas também por uma curta resposta por parte do destinatário na forma de uma mensagem padronizada ACK (seção 2.5) reconhecendo o recebimento e entendimento do pacote. A perda de pacotes em redes WH pode ser descrita como a não-identificação de uma resposta ACK por parte do destinatário como resposta a um envio de dados por um nodo de origem (mas há exceções, como os casos de mensagens que não requerem ACK, que não estão no escopo deste trabalho).

O ACK é usado como uma garantia por parte do transmissor de que seu pacote foi entregue sem extravios ou alterações, e é contabilizado pelas camadas superiores para a formação das métricas mais simples de comunicação ponto-a-ponto como PDR e métricas de gestão da rede como confiabilidade. O ACK é esperado dentro do mesmo *slot* de comunicação da mensagem original, previsto dentro do intervalo de tempo designado para aquele par de dispositivos. Para este trabalho, a distinção entre perda de pacotes por falha de transmissão do pacote enviado ou por perda da ACK em si indifere para a análise proposta. Com isso, assume-se que o PDP (subseção 4.2.1) contempla os dois modos de falha na perda de pacotes ponto-a-ponto.

A perda de pacotes ponto-a-ponto em uma rede como o WH não implica necessariamente em um impacto de confiabilidade. Como descrito na subseção 4.3, redes costumam aplicar redundâncias como de enlaces e de rotas para buscar retransmissão de pacotes perdidos pontualmente, em detrimento de disponibilidade de banda - visto que a retransmissão de um pacote ocupa o *slot* em que um novo pacote poderia estar sendo transmitido. Dessa forma, para o âmbito de simulação desenvolvido neste trabalho, focam-se em dois modos de falha (figura 11) para perda definitiva de pacotes fim-a-fim: perda por *buffer* cheio (subseção 4.4.1) e perda por obsolescência (subseção 4.4.2).

### 4.4.1 Perda por *Buffer* Cheio

Cada dispositivo de campo possui memória embarcada destinada a armazenar seu *firmware* de operação e os pacotes a serem recebidos e enviados entre seus vizinhos ponto-

Figura 11 - Perdas por *buffer* cheio e obsolescência

Fonte: do autor

a-ponto. A quantidade de memória reservada para armazenamento de pacotes forma o que pode ser descrito como *buffer*: uma fila de espaços destinados a serem ocupados por novos pacotes, cujo tamanho depende da quantidade de memória empregada e do tamanho dos pacotes em si. Para fins de simulação deste trabalho, não se faz necessário trabalhar com a unidade de medida da memória dos dispositivos como bytes, adotando-se a convenção de que todos os pacotes ocupam uma quantidade fixa de memória e, assim, tratando a memória dos dispositivos em unidades de pacotes armazenáveis.

A figura 11 ilustra o comportamento de um *buffer* de dispositivo de campo arbitrado para possuir dez locações para pacotes. Na figura, não importa se os pacotes armazenados são oriundos do próprio dispositivo ou se foram recebidos de vizinhos. A priorização de pacotes não é alvo de estudo desse projeto, dessa forma, o envio de pacotes em cada dispositivo de campo segue a ordenação de FIFO (*First In, First Out*), ou seja, o primeiro pacote a ser gerado/recebido é o primeiro que deve ser encaminhado adiante. Na figura 11, tem-se que o próximo pacote que deve ser encaminhado adiante é o Pacote |A|.

No instante de tempo descrito no detalhe 11.a da figura em questão, tem-se que 50% das posições do *buffer* estão vazias; portanto, o nodo ainda pode receber ou gerar cinco novos pacotes sem ocasionar problemas de armazenamento. Durante seu próximo *slot* como emissor no *superframe*, o nodo buscará transmitir o Pacote |A| para seu vizinho na rota de *uplink*, e em caso de sucesso, o Pacote |A| será eliminado de seu *buffer* e escrito na primeira posição vazia do *buffer* do vizinho. Dessa forma, o Pacote |B| do nodo

transmissor torna-se o próximo na FIFO, subindo para a ordem de primeira prioridade na lista que agora conteria seis locações vazias disponíveis.

Alternativamente, como a simulação contempla perdas de pacotes, caso a probabilidade de entrega (descrita pela variável PDP) arbitre que o *Pacote* |A| não seja transmitido com sucesso naquele *slot*, o pacote permanece no *buffer* do emissor para buscar retransmissão em um novo *slot* que contemple suas redundâncias de enlace ou de rota. Com essa lógica implementada, um pacote perdido ponto-a-ponto poderia permanecer indefinidamente no *buffer* enquanto se busca a retransmissão continuamente até o sucesso.

Entretanto, manter o pacote em *buffer* pode acarretar em dois problemas distintos: a obsolescência do pacote e a falta de espaço em *buffer*. Como mostrado na figura 11.b, a perda repetida do *Pacote* |A| pode causar um gargalo na vazão de pacotes do *buffer* daquele dispositivo, e novos pacotes se acumulam na memória (sendo oriundos de vizinhos ou do próprio nodo). Dessa forma, o dispositivo não apresenta mais disponibilidade de receber ou gerar pacotes, e caso ocorra um evento de novo pacote enquanto não há posições disponíveis (como mostrado no detalhe 11.c da figura, com o *Pacote* |K|), o novo pacote é automaticamente descartado.

Caso o pacote descartado por *buffer* cheio (*Pacote* |K| da figura 11.c) seja de uma transmissão recebida de um nodo vizinho, a perda configurada é apenas ponto-a-ponto: a tentativa de transmissão de um pacote a um nodo receptor com *buffer* cheio configura uma falha automática, e portanto, o vizinho mantém o pacote armazenado para buscar retransmissão. Entretanto, se o novo pacote é oriundo do próprio dispositivo de *buffer* cheio, não há alternativas salvo descartar algum pacote de forma definitiva e deteriorar a confiabilidade da rede, configurando efetivamente uma perda de confiabilidade por *buffer* cheio.

Ressalta-se a criticidade do impacto no desempenho da rede na presença de falhas de transmissão recorrentes. A perda de vazão não impacta somente o *buffer* do nodo em falha, mas também o *buffer* de todos os nodos abaixo dele na cadeia de *uplink*, visto que mesmo que os vizinhos do nodo falho apresentem desempenho suficiente com relação aos seus PDP, o *buffer* cheio inibe o sucesso nas transmissões, que conseqüentemente acaba por deteriorar os *buffers* desses vizinhos e a formar um efeito cascata no desempenho de transmissão. Conforme apresentado no capítulo 5, esse efeito cascata se mostra significativamente mais nocivo ao desempenho de confiabilidade quando impactando nodos mais

próximos aos pontos de acesso e, conseqüentemente, dos quais muitos outros nodos são dependentes para o *convergecast*.

Como o provisionamento de *slots* de cada nodo durante a etapa de escalonamento da simulação feita neste trabalho leva em consideração a quantidade de dispositivos abaixo do nodo em questão na rota primária de *uplink*, por objetividade arbitra-se um tamanho fixo de *buffer* de 10 pacotes para cada nodo durante as simulações implementadas. O impacto da variação desse parâmetro é discutido no capítulo 5.

#### 4.4.2 Perda por Obsolescência de *Time To Live*

Seguindo o exemplo da figura 11, caso um pacote sofra repetidas falhas de transmissão (ou, por vezes, algum outro pacote acabe por congestionar o *buffer* e atrase todos os demais), a informação contida neste pacote pode ser considerada obsoleta para a aplicação da rede. Tomando como exemplo um dispositivo sensor coletando dados de processo e periodicamente encaminhando-os à aplicação, caso a transmissão de um pacote com os dados de processo falhe por repetidas vezes ao longo da rota antes de chegar ao nodo coletor, é possível que um novo dado já esteja sendo gerado e transmitido, de forma que a informação do pacote anterior se tornou obsoleta. Uma rede como essas pode tomar a decisão de que provisionar *slots* para a retransmissão do pacote obsoleto não seria eficiente e, portanto, o pacote pode ser descartado em caráter definitivo.

No modo de falha de *buffer* cheio, descrito na subseção 4.4.1, o descarte de pacotes obsoletos se apresenta como uma alternativa para mitigar perdas possivelmente mais significativas na ocorrência de acúmulo de pacotes em *buffers*. Como descrito anteriormente, o enchimento de *buffers* impacta não somente a confiabilidade do nodo em questão, mas de todos os nodos abaixo dele na cadeia de *uplink*. Dessa forma, optar por descartar pacotes obsoletos é uma perda de confiabilidade que busca inibir perdas ainda maiores por *buffer* cheio e acúmulos nas cadeias da rede.

A parametrização para descarte de pacotes obsoletos depende diretamente da aplicação da rede, e há aplicações onde não se permite qualquer descarte de pacotes, mesmo que ocorram atrasos e gargalos de transmissão. Neste trabalho, adota-se o critério de obsolescência como um modo de falha para perda de pacotes fim-a-fim.

Um dos critérios que ajuda uma rede a determinar se o dado de um pacote é obsoleto o suficiente para poder ser descartado é o TTL (*Time to Live*, do inglês "tempo para viver").

Cada pacote gerado pela rede possui uma estampa temporal chamada ASN (subseção 2.2.2) que indica em qual *slot* esse pacote foi gerado. Com essa informação e sabendo qual o ASN atual, dispositivos são capazes de calcular a idade em *slots* de um pacote salvo em seu *buffer*. O TTL é uma informação associada a cada pacote que indica qual a idade máxima em que um pacote ainda será considerado não-obsoleto. Comparando a idade atual do pacote contra seu TTL, dispositivos podem tomar a decisão de descartar pacotes de forma a poupar recursos.

O TTL é transmitido dentro do pacote de dados e seus valores variam conforme o tipo de mensagem presente no pacote e os critérios de desempenho demandados pela aplicação. Uma rede que requeira uma taxa de atualização maior pode apresentar TTL menores, visto que, nesse caso, dados de processo se tornam obsoletos mais rapidamente.

Para este trabalho, adota-se o TTL como o critério de descarte de pacotes obsoletos, arbitrado de acordo com parâmetro do usuário. A cada ciclo de *superframe*, cada nodo varre seu *buffer* verificando a idade em *slots* de seus pacotes e, caso encontre algum cuja idade supere o TTL, o pacote é descartado. Ressalta-se que a lógica implementa também uma análise preventiva de obsolescência: caso o pacote se encontre a uma distância de, por exemplo, três saltos do destinatário final (ponto-de-acesso) e o TTL do pacote declara que ele só é válido para os próximos dois saltos, é impossível que o pacote seja entregue com validade ao destinatário final e, portanto, também pode-se efetuar o descarte por obsolescência.

Para fins de simulação neste trabalho, arbitra-se que o TTL de cada pacote gerado equivalha aleatoriamente entre 100% e 300% da distância de saltos do nodo gerador até o ponto de acesso de sua respectiva rota primária de *uplink*. Com isso, busca-se simular diferentes cenários espaçados entre dois extremos críticos: um pacote que se torna obsoleto após apresentar uma falha de transmissão sequer (TTL igual a 100% da distância em saltos); e um pacote que continua com validade à aplicação mesmo que falhe, em média, em duas transmissões a cada três durante toda a sua rota de *uplink* (TTL igual a 300% da distância em saltos). O impacto da variação desse parâmetro é discutido no capítulo 5.

## 4.5 Centralidades

Os conceitos de centralidades, embasados em análise de redes sociais e apresentados na seção 2.4, servem neste trabalho como as principais métricas da rede a fim de corre-

lação com o impacto da escalabilidade em desempenho. Nesta seção, descreve-se como a ferramenta de simulação desenvolvida calcula as três variáveis empregadas e como os dados são empregados para posterior análise.

Ressalta-se que as três centralidades são métricas que independem do desempenho da rede em si, levando em consideração somente o roteamento da rede, ou seja, já podem ser calculadas na etapa Algoritmo de Roteamento (RPL) do fluxograma indicado na figura 7 e descrito na seção 4.2.2. Essa característica permite que as conclusões obtidas de sua análise possam ser retroalimentadas em medidas preventivas de melhoria de desempenho, como proposto e apresentado no capítulo 5.

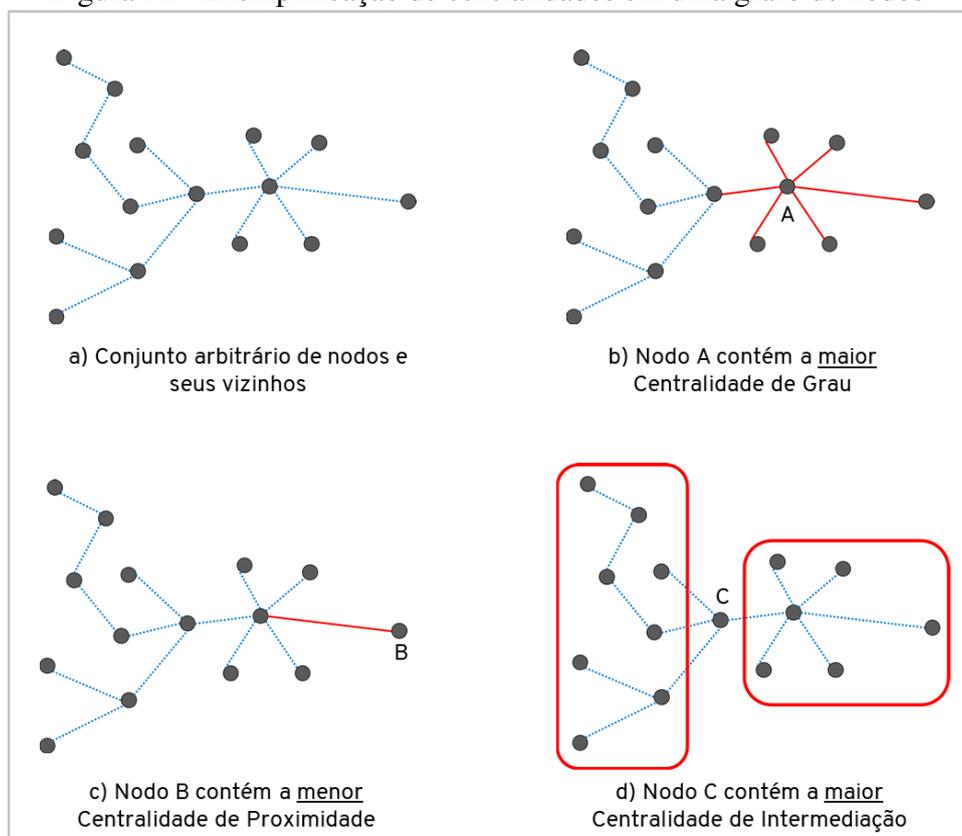
#### 4.5.1 Centralidade de Grau

A centralidade de grau, como apresentada na equação 1, é uma medida relativa de quantos vizinhos diretos o nodo em questão possui nos roteamentos primários de *uplink* com relação ao total de roteamentos que ele poderia possuir (ou seja, com relação ao total de outros dispositivos na rede). Como mostra a figura 12, dado um conjunto arbitrário de nodos indicados no detalhe 12.a, o nodo com maior centralidade de grau é o nodo A, indicado no detalhe 12.b, visto que nenhum outro nodo no grafo possui tantas conexões diretas quanto este nodo.

Para que a simulação calcule as centralidades de grau de cada nodo, uma vez completa a etapa de algoritmo de roteamento RPL, varre-se cada dispositivo da rede em busca de qual seu vizinho direto na rota de *uplink*, ou seja, qual nodo possui o menor custo de ETX segundo a equação 10. Em seguida, retroalimenta-se na equação 1 como  $grau(i)$  a quantidade de vezes em que o nodo  $i$  consta como o nodo de preferência nas cadeias de *uplink*.

A centralidade de grau é uma das mais simples centralidades a serem estimadas, mas expõe resultados relevantes para análise. Como os nodos com melhores ETX tendem a ser os mais escolhidos como vizinhos diretos para *uplink*, os nodos com maiores centralidades de grau são os que possuem mais nodos conectados e, conseqüentemente, mais ramificações dependendo dele para a vazão de seus dados. Quando cruzada a centralidade de grau com a de intermediação, tem-se a avaliação de quais os nodos atuam como principais gargalos de fluxo de comunicação, tanto de forma direta (grau) quanto de forma acumulada (intermediação).

Figura 12 - Exemplificação de centralidades em uma grafo de nodos



Fonte: do autor

### 4.5.2 Centralidade de Proximidade

A centralidade de proximidade, conforme proposta originalmente e mostrada na equação 2, representa o quão próximo um nodo está dos demais, trazendo uma medida relativa ao inverso da distância geodésica. No exemplo ilustrado na figura 12, dado um conjunto arbitrário de nodos indicados no detalhe 12.a, o nodo com menor centralidade de proximidade é o nodo B, indicado no detalhe 12.c, visto que nenhum nodo está tão relativamente distante da maioria dos demais.

Para o contexto de redes industriais sem fio e particularmente para o trabalho proposto, considerar simplesmente a distância física entre os nodos seria uma possibilidade, visto que a distância entre antenas é um dos fatores aos quais as potências de sinal são diretamente proporcionais segundo o modelo de Friis (equação 8); entretanto, como alternativa, adotou-se neste trabalho a própria referência de ETX como o elemento de distância no cálculo da centralidade. O ETX, sendo o inverso do PDP, representa quantas tentativas, em média, são necessárias para se conseguir transmitir um pacote de forma bem-sucedida entre um par de nodos. Ele representa, portanto, uma medida direta de viabilidade de conexão entre dois pontos, sendo inclusive adotado pelo roteamento como fator primário na equação de custo para minimização; e, assim como distância física, apresenta uma relação de "quanto maior, pior" entre os nodos.

Com isso, a centralidade de proximidade da simulação, ao empregar ETX como medida de  $dist(i, a)$  na equação 2, levanta uma medida relativa à quantidade média de transmissões que um pacote requer para se comunicar de forma bem-sucedida com cada vizinho de sua cadeia. Menores valores de centralidade de proximidade indicam que são maiores as probabilidades cumulativas de que um pacote falhe em algum ponto da cadeia e que necessite de uma ou mais retransmissões. Dessa forma, a centralidade de proximidade pode ser interpretada como um indicativo de em qual cadeia de *uplink* há maiores probabilidades de se apresentar múltiplas perdas ponto-a-ponto, e qual o impacto do nodo em questão para o desempenho de toda a cadeia.

### 4.5.3 Centralidade de Intermediação

A centralidade de intermediação, como apresentada na equação 3, indica uma medida relativa de o quanto o nodo em questão atua como ponte entre dois ou mais nodos ou cadeias, uma medida do quanto este nodo interliga uma parcela do grafo a outra. No

exemplo ilustrado na figura 12, dado um conjunto arbitrário de nodos indicados no detalhe 12.a, o nodo com maior centralidade de intermediação é o nodo C, indicado no detalhe 12.d, visto que a maior quantidade de nodos depende deste dispositivo para intermediar sua conexão de *uplink* com o restante da rede, agindo como ponte entre os dois subconjuntos de nodos indicados na ilustração.

Como apresentado na subseção 2.4.3, essa centralidade é originalmente proposta como a quantidade de rotas entre dois nodos quaisquer que contempla o nodo em questão, em relação à totalidade de rotas existentes possíveis entre esses nodos. Para este trabalho, a definição empregada é adotada tal qual a descrita originalmente. Conforme a equação 3, para cada nodo presente na rede, varrem-se as cadeias de roteamento *uplink*. Dentre todas as rotas  $rotas(p, q)$  possíveis entre dois nodos quaisquer  $p$  e  $q$ , calcula-se quantas dependem do nodo  $i$  avaliado em questão e o incluem em sua cadeia de *uplink*, indicadas como  $rotas_i(p, q)$ .

Essa forma de avaliação expõe uma medida relativa a quanto um nodo atua como potencial gargalo no fluxo de comunicação nas rotas de *uplink* da rede. Quanto maior a centralidade de intermediação, maior a quantidade de rotas que dependem deste nodo para que seus pacotes sejam escoados com sucesso ao destino final, os pontos de acesso. Dessa forma, a centralidade de intermediação indica diretamente quais os nodos críticos para que a vazão de dados não seja deteriorada e ocorram as perdas de confiabilidade em função de *buffer* cheio e obsolescência de pacotes, oriundos do fenômeno de acúmulo de retransmissões ponto-a-ponto. Além disso, como descrito anteriormente, a análise conjunta dessa centralidade junto à centralidade de grau permite identificar quais são os nodos que mais possuem vizinhos diretos além de serem os principais afluentes de ramificações, tornando-os nodos críticos para a rede.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo descreve os resultados obtidos a partir das simulações descritas no capítulo 4. A seção 5.1 traz as avaliações sobre o quanto a variação de escala da rede trouxe impactos ao desempenho de confiabilidade; a seção 5.2 descreve como as métricas de centralidades se comportam perante os parâmetros de simulação; a seção 5.3 avalia como os resultados se refletem em indicadores de desempenho como TTL (*Time to Live*) e tamanho de *buffer*; e a seção 5.4 detalha a técnica de otimização proposta a partir das análises de centralidades buscando otimizar o desempenho de redes em variadas escalas, incluindo os resultados comparados com redes aleatórias e propostas de aplicabilidade da técnica em uma rede WH real.

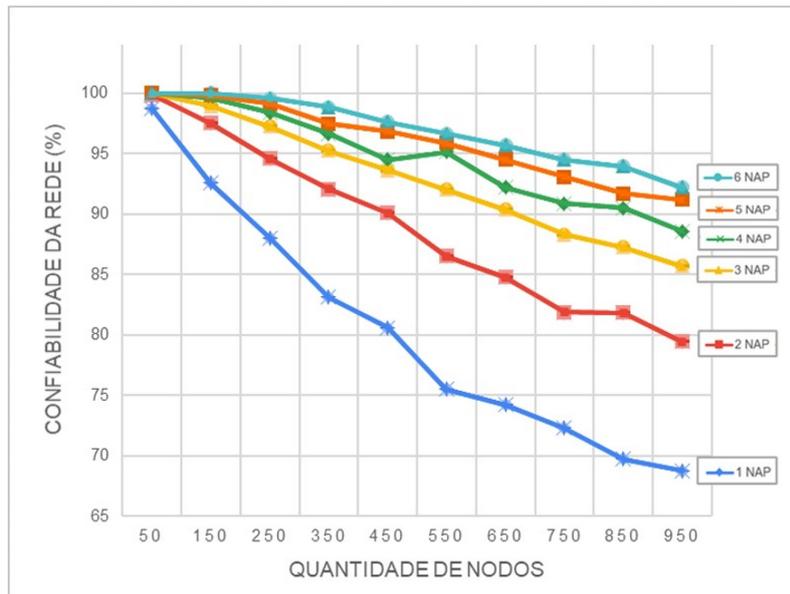
### 5.1 Escalabilidade

Para a avaliação do impacto em escalabilidade da quantidade e distribuição espacial de pontos de acesso, um conjunto de simulações com variados parâmetros de operação foram realizados seguindo a metodologia descrita no capítulo 4. Para cada combinação de quantidades de pontos de acesso (variando-se de 1 a 6) e quantidades de dispositivos de campo (variando-se de 50 a 950, em intervalos de 100), foram realizadas 100 simulações.

A cada nova simulação, a distribuição espacial tanto dos pontos de acesso quanto dos dispositivos de campo é refeita de forma aleatória, assim como a determinação das interferências externas entre pares de dispositivos (proporcionais às distâncias entre nodos). Conseqüentemente, a cada nova simulação, novos roteamentos e escalonamentos são configurados em prol da formação de grafos que otimizem a função de custo do algoritmo RPL *upstream* apresentado, minimizando a expectativa de tentativas de transmissão por pacote (variável ETX) e balanceando as cargas dos pontos de acesso (termo  $Carga_{PA}$ ).

Todos os demais parâmetros (como tamanho de *buffer*, TTL, provisionamentos e afins) são mantidos constantes por todo o regime de simulações.

Figura 13 - Escalabilidade da média de confiabilidade das redes simuladas

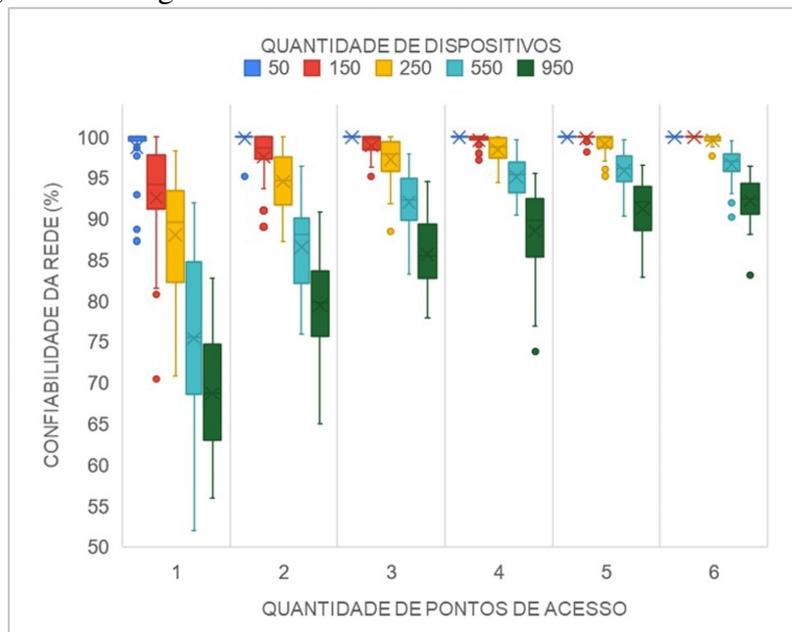


Fonte: do autor

A figura 13 indica graficamente a média das 100 simulações para cada combinação entre quantidade de dispositivos e quantidade de pontos de acesso. Pode-se observar a redução significativa da média de confiabilidade conforme se incrementa a quantidade de dispositivos de campo para todas as quantidades de pontos de acesso, sendo menos acentuada quanto maior a quantidade de pontos de acesso. Esse gráfico permite inferir que o aumento da escala da rede, em termos de volume de dispositivos, apresenta impacto significativo sobre a taxa de perda de pacotes, e que maiores densidades de pontos de acesso distribuídos pela rede podem mitigar esse efeito nocivo ao desempenho.

Complementarmente, a figura 14 mostra o diagrama de caixa das confiabilidades nas mesmas simulações. Neste gráfico, pode-se observar o mesmo efeito de decréscimo da média de confiabilidade conforme se incrementa a quantidade de dispositivos de campo, mas não somente isso. Percebe-se que, dentro de uma mesma combinação de quantidade de nós (cada caixa), há uma notável variabilidade nas confiabilidades resultantes. Como todos os parâmetros iniciais de simulação foram mantidos constantes dentro de cada combinação com exceção da distribuição espacial aleatória dos nós e suas consequentes interferências de sinal, pode-se inferir que o posicionamento dos nós (e consequentemente o impacto em potência percebida por distância e interferências) pode apresentar

Figura 14 - Diagrama de caixa da escalabilidade das redes simuladas



Fonte: do autor

relevância significativa para as taxas de perdas de pacotes das redes simuladas, mesmo em cenários com as mesmas quantidades de dispositivos.

Observa-se que a confiabilidade resultante de uma simulação pode ter influência de fatores aleatórios, visto que o sucesso de cada transmissão depende da comparação de um valor percentual aleatório contra a PDP do par de dispositivos em questão (transmissão e receptor daquele *slot*). Para avaliar esse impacto, são feitas 100 novas simulações repetidas para uma mesma rede (diferentemente da simulação anterior, agora com as mesmas disposições espaciais de dispositivos). Como resultado, a variação de confiabilidade de uma mesma rede atinge valores máximos de 0,4% (presente em redes de 950 dispositivos e 1 ponto de acesso) e valores mínimos de 0,0% (em redes consistentemente atingindo 100% de confiabilidade). Dessa forma, o efeito da aleatoriedade em PDP é desconsiderada para o escopo de análise do trabalho.

Estes resultados permitem inferir que, para redes industriais sujeitas a condições semelhantes às simuladas, a escalabilidade se mostra significativamente impactada pela quantidade de dispositivos, como pressuposto, mas que também a disposição espacial dos dispositivos pode ser um fator crítico para o resultado. Como no exemplo de redes com 550 dispositivos e 1 ponto de acesso da figura 14, as confiabilidades resultantes oscilam entre aproximadamente 90% e 55%, tendo a metade de seus valores oscilando entre

85% e 70%, e sua média em aproximadamente 75%. Conforme se incrementam as quantidades de pontos de acesso, a variação dos resultados de confiabilidade tende a diminuir, mas não zera para redes com 250 dispositivos ou mais.

Visto que, dependendo do cenário de aplicação, uma confiabilidade de rede de  $3\sigma$  (ou 99,72%), por exemplo, pode ser insuficiente para atender os critérios de projeto, mensurar o quanto a disposição espacial otimizada de pontos de acesso pode incrementar a confiabilidade pode significar um ganho significativo para o projeto de redes industriais sem fio, mesmo que representem valores relativos percentualmente pequenos.

## 5.2 Análises de Centralidades

O diagrama de caixa da figura 14 e a análise da seção 5.1 permitem inferir que há impacto significativo do posicionamento espacial dos dispositivos de campo e pontos de acesso das redes simuladas nas confiabilidades resultantes dessas redes. Como forma de avaliar quantitativamente o quanto a disposição espacial impacta a taxa de perda de pacotes e a confiabilidade, para as mesmas simulações descritas na seção anterior, calculam-se as centralidades de intermediação (CI), proximidade (CP) e grau (CG) de cada nodo presente nas simulações.

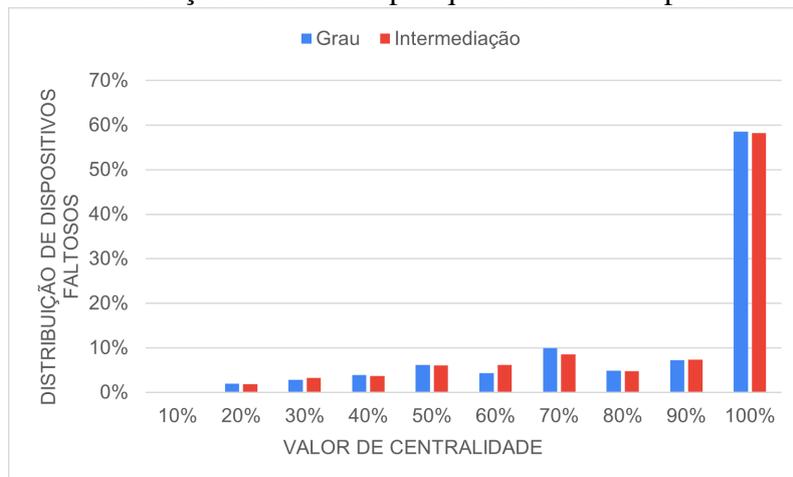
Para a avaliação das três centralidades, não são analisados valores absolutos. Como visto na seção 2.4, os valores absolutos não apresentam relevância por si só, mas a diferença entre os valores dos nodos indicam quais apresentam maior relevância no critério avaliado. Dessa forma, são mostrados os valores de centralidade modulados pelo maior da rede, e indicado em percentual. Por exemplo, a maior centralidade de grau de uma rede será indicada como 100%, e todas as outras são percentuais desse valor entre 0% e 100%.

Adicionalmente, para as análises desta seção, classificam-se como "dispositivos faltosos" todos aqueles dispositivos que geram algum pacote que acaba sendo perdido de forma definitiva (fim-a-fim). Particularmente, o dispositivo faltoso é aquele que gera o pacote, não necessariamente o dispositivo onde o pacote foi efetivamente perdido ou descartado. Essa distinção é de relevância à análise pois gargalos presentes na rede podem gerar ineficiências no fluxo de transmissão de dados mas acabar por conseguir enviar pacotes adiante, mesmo que para serem perdidos logo em seguida por uma única falha pontual de transmissão ponto-a-ponto, por exemplo. Dessa forma, avaliar os dispositivos

que tinham o pacote salvo em seus *buffers* no momento da perda definitiva é possível, mas menos relevante, pois estes dispositivos podem ter somente recebido pacotes prestes a expirar TTL devido aos atrasos nos gargalos antes de si.

O gráfico da figura 15 mostra a distribuição percentual das incidências de impacto em confiabilidade (perda de pacote de forma definitiva, sendo por obsolescência TTL ou *buffer* cheio) com relação às centralidades de grau e intermediação da maior CG ou CP encontrada na cadeia de *uplink* do dispositivo faltoso, como por exemplo, o nodo A um dispositivo de campo que tem o nodo B em sua cadeia de *uplink*. Sendo o nodo B o com a maior centralidade de grau (55% da maior CG da rede) da cadeia de *uplink* de A (entre A e o ponto de acesso) e o nodo A acabe gerando três pacotes que acabaram perdidos e impactando confiabilidade, são contabilizadas três instâncias de perda na distribuição de valores de centralidade do gráfico na coluna 60%, que representa a faixa de valores de centralidade entre 50% e 60%.

Figura 15 - Distribuição de CG e CI por quantidade de dispositivos faltosos



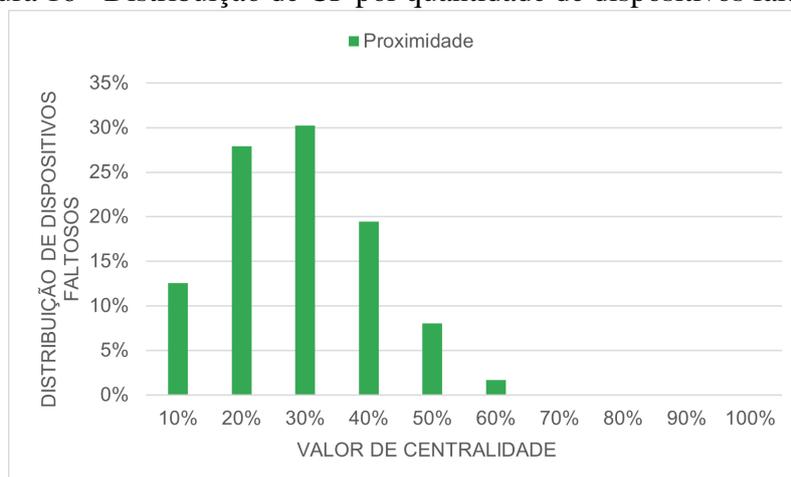
Fonte: do autor

Como mostra o gráfico da figura 15, quase 60% de todos os pacotes perdidos e com impacto à confiabilidade resultante daquela rede se dão em cadeias cujo dispositivo de campo com maiores centralidades de grau e intermediação apresentam valores entre 90% e 100% dos maiores valores presentes em toda a rede, superando significativamente os outros valores de distribuição. Esse resultado implica que a maior reincidência de pacotes perdidos nas simulações se dá em cadeias que apresentam algum nodo com as maiores quantidades de vizinhos diretos (representado pela CG) e também do qual muitos outros nodos dependem para sua rota primária de *uplink* (representado pela CI). A semelhança

da forma entre as distribuições de CG e CI, apresentados em conjunto no gráfico superior da figura 15, também está correlacionada a este fenômeno: frequentemente um nodo da cadeia faltosa apresenta simultaneamente tanto os maiores valores de CG quanto os maiores valores de CI de toda a rede.

Como complemento, o gráfico da figura 16 mostra a distribuição dos valores de centralidade de proximidade dos dispositivos faltosos. Diferentemente do gráfico de CG e CI (figura 15), que indica os valores de centralidade do maior nodo presente naquela cadeia, este gráfico expressa a reincidência de falhas com relação à CP do próprio nodo que originou o pacote perdido.

Figura 16 - Distribuição de CP por quantidade de dispositivos faltosos



Fonte: do autor

A centralidade de proximidade é um indicador de o quão próximo um nodo está dos demais, e neste estudo, essa distância é adotada como o ETX do nodo em questão com relação a todos os outros nodos na sua cadeia de *uplink*. Infere-se pela figura 16 que não necessariamente os nodos com maiores distância ETX de si até seu ponto de acesso (indicados no gráfico como aqueles com as menores CP, entre 0 e 10%), ou seja, os nodos cujos pacotes em média necessitam de mais tentativas de transmissão até alcançar o destinatário final (ponto de acesso), são aqueles que mais reincidentemente geram pacotes que acabam perdidos. Não somente isso, mas os nodos com CP entre 0% e 10% do valor máximo são somente a quarta maior categoria de dispositivos a gerarem pacotes perdidos, sendo superados, em ordem crescente, pelas categorias entre 30-40%, 10-20% e 20-30%.

Este resultado pode parecer contraintuitivo quando avaliado isoladamente, mas dentro do contexto das redes industriais sem fio simuladas e especialmente em conjunto com a

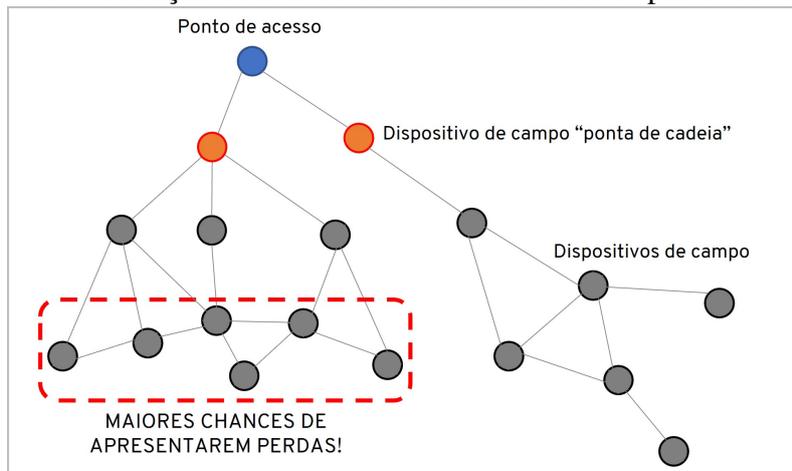
figura 15, se mostra um fenômeno de significativa relevância à análise. Os nodos com menores centralidades de proximidade são confirmadamente aqueles que geram pacotes que apresentam maiores perdas ponto-a-ponto a cada salto de dispositivos, e consequentemente precisam de mais tentativas de transmissão (ETX) para chegarem ao seu destino final. Entretanto, a perda ponto-a-ponto, por mais que apresente impacto à capacidade de resposta da rede, não impacta diretamente a confiabilidade resultante, visto que perdas pontuais são previstas pela rede, sendo mitigadas pelos recursos de redundância e reguladas pelos parâmetros de TTL e tamanho de *buffer*. Dessa forma, por mais que um pacote apresente as maiores probabilidades de causar perdas ponto-a-ponto em toda a rede, não necessariamente serão seus nodos transmissores os maiores gargalos da rede.

Cruzando os resultados das figuras 15 e 16, pode-se inferir o fenômeno ilustrado na figura 17. O que os resultados de centralidade de grau e intermediação expõem é que há um impacto significativo ao fluxo de transmissão de pacotes quando nodos acabam se tornando confluente de muitos outros nodos. Complementarmente, por mais que 90% de todos os dispositivos faltosos sejam aqueles que apresentam CP inferiores a 40% do valor máximo, não são necessariamente os dispositivos com as menores proximidades da rede que geram pacotes faltosos, mas sim aqueles dispositivos simultaneamente com as menores CP e presentes nas cadeias que possuem as maiores CG e/ou CI. A distância de saltos e a probabilidade de perda ponto-a-ponto são fatores que contribuem inegavelmente à deterioração do desempenho da rede, mas essa deterioração se concentra em cadeias que acabam por tentar escoar mais fluxo de pacotes do que seus nodos mais centrais tendem a conseguir dar vazão.

### 5.3 Impacto dos Parâmetros em Desempenho

Esta seção descreve como os principais parâmetros de simulação apresentam impacto no desempenho de confiabilidade das redes simuladas, e como esse impacto se refletiria em uma rede industrial sem fio real. Como são feitas abstrações de características de redes WH que estão fora do escopo do trabalho, há impactos que são somente inferidos mediante os demais resultados obtidos e posteriormente descritos como oportunidades de trabalhos futuros.

Figura 17 - Ilustração da análise de centralidade dos dispositivos faltosos



Fonte: do autor

### 5.3.1 *Time to Live*

O *Time to Live*, sendo o parâmetro que gere a obsolescência de pacotes, é uma das principais formas de se apresentar deterioração de confiabilidade, e portanto apresenta impacto direto no desempenho da rede. Em uma aplicação real de redes industriais sem fio, sua função primária é eliminar pacotes que já não possuem validade e, assim, liberar disponibilidade de banda para pacotes mais recentes. Dessa forma, o estabelecimento de um TTL com valor excessivamente alto pode acarretar numa rede que nunca elimina pacotes obsoletos. O efeito simulado que decorre ao se considerar um TTL ilimitado enquanto se mantém tamanho de *buffer* limitado é o de acúmulo de pacotes nos gargalos das cadeias de transmissão. Sem eliminar pacotes obsoletos, nodos de convergência (de CG e CI alta, no qual muitos outros nodos confluem) rapidamente têm seus *buffers* lotados, e o acúmulo causa um efeito cascata de perdas por *buffer* cheio e cada vez mais *buffers* acumulados, do ponto de gargalo para baixo (considerando para cima a direção *uplink*, mais próximo do ponto de acesso). Em cenários críticos, têm-se redes onde todos os nodos abaixo do dispositivo gargalo estão com *buffer* cheio enquanto os nodos acima do gargalo apresentam ritmo de operação normal.

A forma de operação com TTL ilimitado se mostra uma ferramenta de análise com inesperado valor: a identificação de gargalos. O primeiro nodo consistentemente a atingir *buffer* cheio em uma rede sem obsolescência de pacotes tende a ser o nodo com maior CG e/ou CI, e os pacotes que tendem a mais se acumularem ao longo do efeito cascata de *buffers* cheios são os pacotes gerados pelos maiores nodos faltosos, de maior CP naquela

cadeia. Para fins práticos, a possibilidade de simulação prévia de redes sem TTL operando com demandas mais altas de taxas de pacotes apresenta valor para evidenciar as cadeias com maiores oportunidades de rearranjo espacial e/ou novo roteamento.

Durante as simulações, o incremento moderado do TTL tende a apresentar impactos positivos na rede, podendo aumentar a confiabilidade resultante. Isso se dá pois a obsolescência é, assim como o tamanho de *buffer*, um fator de limitação, e caso a obsolescência seja o critério que mais esteja causando perda de confiabilidade na rede simulada, seu aumento tende a, até certo ponto, aumentar a confiabilidade da rede. Esse cenário, entretanto, não é explorado neste trabalho pois, como descrito na seção 4.4.2, já está sendo usada uma tolerância a obsolescência de até 300%, representando uma rede que tolera uma taxa de entrega de pacotes de 33% (cada pacote necessitando três vezes a quantidade de saltos mínima esperada, implicando em uma rede que perde um pacote a cada três tentativas de transmissão). Visto que a aplicabilidade de uma rede com esses critérios tende a ser mais restritiva, a oportunidade de empregar TTLs ainda maiores foi descartada.

Por outro lado, minimizar a faixa de TTL estabelece limites mais rígidos para a perda de pacotes, representando redes onde os requisitos de taxa de entrega e taxa de atualização sejam mais acentuados. Via de regra, a limitação de TTL tende a somente diminuir a confiabilidade resultante das redes simuladas, sendo uma solução relevante a redes dimensionadas para menor tráfego de dados, como redes com menos dispositivos de campo (N) e mais pontos de acesso (NAP).

### 5.3.2 Tamanho de *Buffer*

O tamanho de *buffer* é a outra principal ferramenta para impacto em confiabilidade das redes simuladas, além do *Time to Live*. O tamanho de *buffer* representa a alocação de memória embarcada em dispositivos de campo para o armazenamento de pacotes em aguardo para encaminhamento ao próximo vizinho na cadeia de *uplink*, originados tanto dos vizinhos abaixo do nodo em questão na cadeia quanto do próprio nodo em si.

É importante ressaltar que o tamanho de *buffer* não busca representar apenas a limitação de disponibilidade de memória embarcada em dispositivos de redes industriais sem fio (que tem sido um desafio gradativamente menor com os avanços tecnológicos em *hardware*); mas também a limitação de capacidade de resposta de uma aplicação que almeja critérios de desempenho como taxa de atualização, *jitter* e afins. Um nodo que cria

uma fila demasiadamente excessiva de pacotes aguardando *slots* de *uplink* é um nodo que atrasa o fluxo de dados de todos os dispositivos abaixo de si, dados estes que poderiam já estar sendo entregues caso tivessem sido direcionados a outro nodo menos sobrecarregado.

Como visto em simulação, o estabelecimento de tamanho de *buffer* gradativamente maior tende a, assim como nos casos do TTL, aumentar a confiabilidade resultante das redes até certo ponto, mas em detrimento do realismo da rede simulada. Uma rede que necessita de *buffers* de grandes proporções para operar com confiabilidade se trata de uma rede desbalanceada e subotimizada ou de uma rede destinada a aplicações mais específicas, que terá nodos projetados para tal. Além disso, mesmo que a capacidade de memória não seja uma limitação de custo ou técnica, poderiam ser empregados recursos como este em melhores ferramentas para a rede, como sistemas computacionais mais complexos ou mais rápidos. Por fim, vale ressaltar que mais capacidade de *hardware* tende a estar diretamente atrelada a maiores consumos de energia, o que vai em contraponto a um dos desafios significativos das redes sem fio industriais: eficiência energética.

Assim como no caso do TTL, uma maior restrição de tamanho de *buffer* tende a deteriorar a confiabilidade resultante das redes simuladas, em virtude do aumento de perdas por *buffer* cheio, e está mais relacionado a redes de alto desempenho em taxa de entrega de pacotes ou a redes de baixa taxa de transmissão.

## 5.4 Técnica de Otimização

Como avaliado na seção 5.1, dentro dos regimes de simulação propostos, o posicionamento espacial dos nodos traz impacto significativo ao desempenho da rede. Dado que as probabilidades de perda de pacote tendem a aumentar uma vez que as potências de sinal percebidas entre vizinhos diminuem, fenômeno que ocorre com o aumento de distância entre nodos dado o modelo de transmissão de Friis e interferências externas, propõe-se nessa seção uma metodologia que aplique os conceitos inferidos pelas análises de centralidade para buscar o incremento do desempenho de confiabilidade das redes simuladas a partir da otimização do posicionamento de pontos de acesso e de nodos.

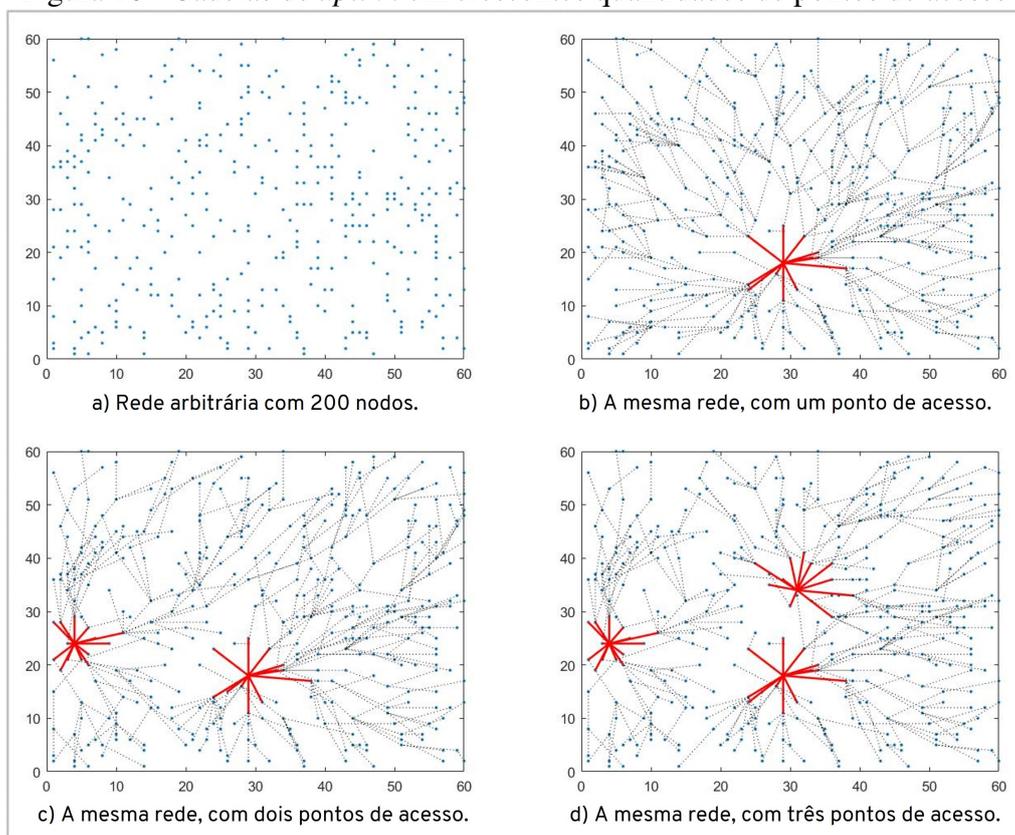
A seguir, a subseção 5.4.1 traz as observações que embasam a técnica proposta, enquanto a subseção 5.4.2 detalha o algoritmo da técnica em si. A subseção 5.4.3 compara os resultados de escalabilidade levantados em 5.1 com as mesmas simulações empregando

a técnica de otimização, e a subseção 5.4.4 encerra o capítulo descrevendo como essa técnica poderia ser implementada na prática em uma solução para o ambiente industrial de protocolos de comunicação sem fio.

### 5.4.1 Gradientes de ETX

Toma-se como estudo de caso uma rede arbitrária de 200 nodos, simulada com variadas quantidades de pontos de acesso, conforme ilustrado na figura 18. O detalhe 18.a indica o posicionamento dos nodos em todos os cenários simulados, mantendo constantes os níveis de sinal percebidos entre nodos em cada um. Nos detalhes 18.b, 18.c e 18.d, tem-se, respectivamente, um, dois e três pontos de acesso na mesma rede. Percebe-se, observando as linhas indicativas de conexões diretas (vizinhos ponto-a-ponto) entre nodos, que o posicionamento dos pontos de acesso influencia diretamente no roteamento, visto que a presença de um novo ponto de acesso potencialmente faz com que outros vizinhos se tornem mais atrativos para *uplink* considerando sua proximidade em ETX a esse novo nodo coletor.

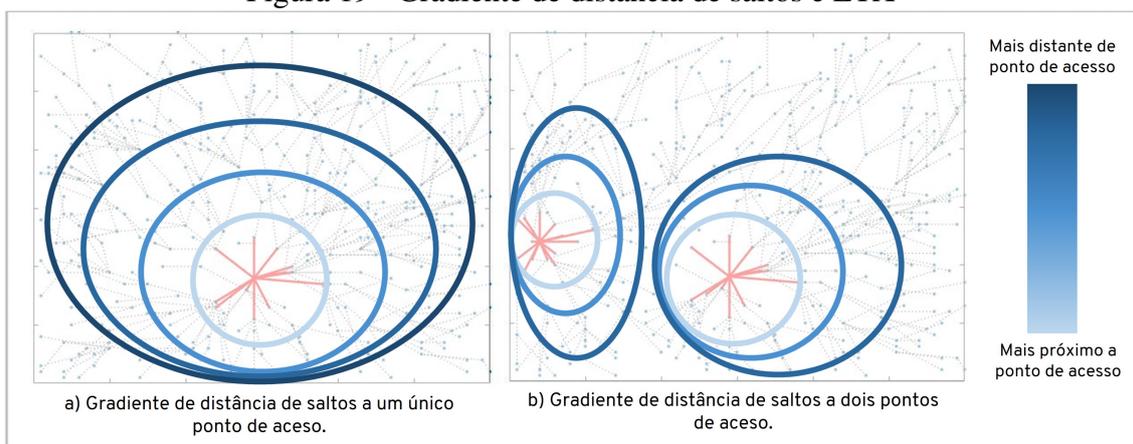
Figura 18 - Cadeias de *uplink* em crescentes quantidades de pontos de acesso



Fonte: do autor

O que se pode perceber, ao observar a distribuição das linhas de vizinhos diretos em cada ilustração das simulações, é que a distância de saltos dos dispositivos com relação ao ponto de acesso parece se distribuir de forma radial conforme esses dispositivos se afastam do ponto de acesso mais próximo. Conforme ilustrado na figura 19, formam-se zonas gradientes aparentes cujos nodos englobados por cada uma tendem a apresentar, em média, a mesma distância de saltos do ponto de acesso no centro daquele gradiente.

Figura 19 - Gradiente de distância de saltos e ETX



Fonte: do autor

Este fenômeno é esperado. A probabilidade de entrega de pacotes (PDP) entre cada par de dispositivos e seu consequente ETX são influenciados, como descrito na seção 4.2.1, pela distância física e por interferências aleatórias, representando a perda de potência de sinal percebido entre nodos em um ambiente fabril. Desta forma, conforme orientado pelo algoritmo de roteamento RPL, dispositivos mais distantes de pontos de acesso tendem a preferir encaminhar pacotes a um vizinho intermediador mais próximo, que apresente melhor ETX para com o nodo em questão, ao invés de arriscar uma tentativa de transmissão diretamente ao ponto de acesso e que apresente maiores chances de perda.

Esta metodologia de roteamento busca incrementar as chances de sucesso de transmissão fim-a-fim e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade resultante do sistema. O que se sucede, entretanto, é que, uma vez que muitos nodos interpretem um mesmo determinado nodo  $i$  como um intermediador atrativo, qualquer perda de pacotes do nodo  $i$  para cima na cadeia de *uplink* tende a forçar o acúmulo de pacotes nos *buffers* dos nodos abaixo de  $i$ , formando gargalos no fluxo de dados. Conforme observado na seção 5.2, o nodo  $i$  tende a possuir uma das maiores centralidades de intermediação da rede, enquanto

os nodos com maiores acúmulos de *buffer* tendem a ser os nodos na cadeia de *i* com as maiores centralidades de grau, e os pacotes mais frequentemente perdidos em caráter definitivo, seja por *buffer* cheio ou por obsolescência de TTL, são aqueles gerados pelos nodos na cadeia de *i* com as menores centralidades de proximidade.

Busca-se, portanto, uma técnica de otimização de posicionamento que identifique quais disposições de pontos de acesso que mitiguem a presença de nodos com centralidades de intermediação e de grau expoentes, e minimize a quantidade de nodos com menor centralidade de proximidade. Um método potencial seria simular a operação dessa rede em cada possível combinação de posições para todos os pontos de acesso, verificando as cadeias de *uplink* resultantes destes posicionamentos e observando em quais redes têm-se a menor presença de nodos potencialmente gargalos, com as características de centralidades citadas. Entretanto, operacionalizar uma simulação deste porte se torna gradualmente mais complexa ao se levar em consideração escalabilidade, visto que a gama de posições possíveis para os pontos de acesso é considerável, dada por uma combinação simples de  $k$  pontos de acesso e  $n$  posições possíveis conforme a equação 11. Considerando, por exemplo, uma região de 2500 metros quadrados ( $n$ ) e 3 pontos de acesso ( $k$ ), considerando que se pode posicionar um ponto de acesso a cada metro quadrado, tem-se que a gama de posições possíveis supera  $2,6 \times 10^9$  possibilidades.

$$C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (11)$$

Por outro lado, como observado anteriormente na figura 19, o comportamento do roteamento em função do posicionamento dos pontos de acesso tende à formação de gradientes com ETX semelhantes e distâncias de saltos entre seus nodos para com seu ponto de acesso. Dessa forma, identifica-se uma oportunidade de simplificação do método descrito anteriormente, buscando operacionalizar a simulação dos posicionamentos de pontos de acesso possíveis através da criação de zonas de nodos com características semelhantes, efetivamente restringindo o valor de  $n$  na equação 11 e eliminando a necessidade de se calcular cada cadeia de *uplink*, limitando consideravelmente o esforço computacional sem detrimento do resultado.

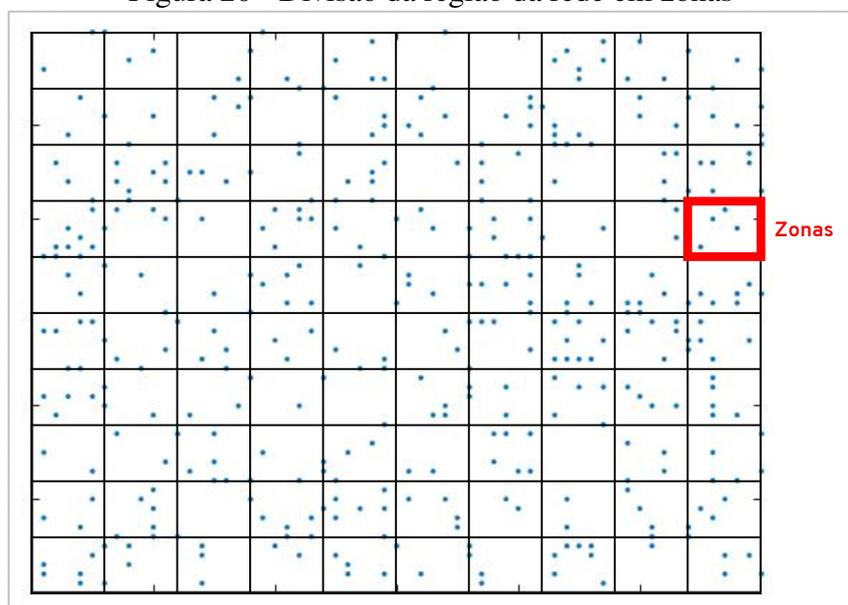
A seguir, na subseção 5.4.2, descreve-se a técnica de otimização proposta, que determina o posicionamento de pontos de acesso através da minimização de ETX total por

zoneamento.

#### 5.4.2 Minimização de ETX por Zoneamento

A partir da rede que se busca otimizar, divide-se a região na qual os nodos estão distribuídos em zonas de áreas equivalentes, conforme ilustrado na figura 20. A quantidade de zonas é inversamente proporcional ao tamanho escolhido para elas, sendo que quanto mais zonas, maior o termo  $n$  da equação 11 e conseqüentemente maior o custo de processamento computacional resultante, mas também maior é o nível de detalhamento da técnica.

Figura 20 - Divisão da região da rede em zonas



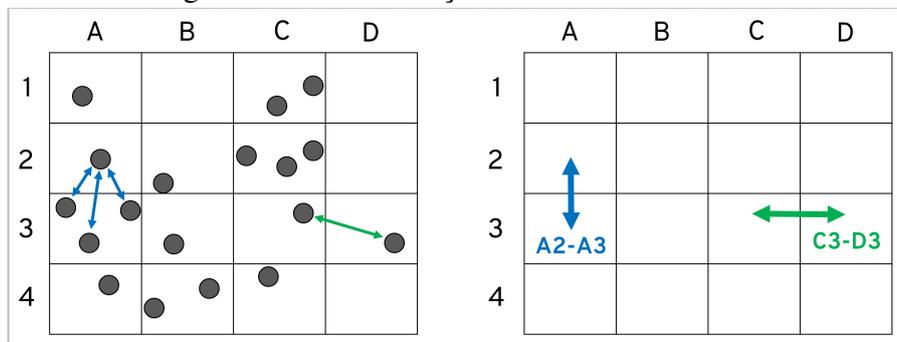
Fonte: do autor

Levando em consideração as análises da seção 5.4.1, pode-se estimar que um nodo presente em uma zona tenderá a ter comportamento semelhante a outro nodo na mesma zona, visto que ambos tendem a possuir ETX semelhantes por estarem a distâncias similares dos outros nodos e por estarem sujeitos às mesmas interferências externas. Dessa forma, a técnica assume que cada grupo de nodos em uma mesma zona possui características similares e simplifica seu comportamento como idêntico, efetivamente tomando cada zona como um único nodo composto pelo melhor ETX dentre seus nodos para com cada outra zona.

Assim, a partir da delimitação das zonas, busca-se estimar o ETX entre cada par de zonas. Esta etapa interpreta que o ETX entre um determinado par de zonas equivale

ao melhor ETX entre nodos presentes em cada uma. Como ilustra a figura 21, a zona representada pelo quadrante A3 possui três nodos em seu interior, enquanto o quadrante A2 possui somente um nodo. Dessa forma, o ETX entre A2 e A3 equivale ao melhor ETX entre quaisquer dos três nodos de A3 com o nodo de A2. Da mesma forma, como as zonas C3 e D3 possuem somente um nodo cada, o ETX entre elas equivale ao ETX entre esses nodos. Uma zona sem nodos apresenta ETX infinito com relação a todas as demais, visto que não há como uma tentativa de transmissão de pacotes para aquela zona ser bem sucedida.

Figura 21 - Determinação de ETX entre zonas



Fonte: do autor

Uma vez possuindo o ETX entre cada par de zonas, as posições possíveis para cada ponto de acesso são simuladas. Arbitra-se que as posições elegíveis para um ponto de acesso equivalem aos centros de cada zona, fazendo com que as  $C_k^n$  posições possíveis para pontos de acesso usem  $k$  como a quantidade de pontos de acesso e  $n$  como a quantidade de zonas delimitadas.

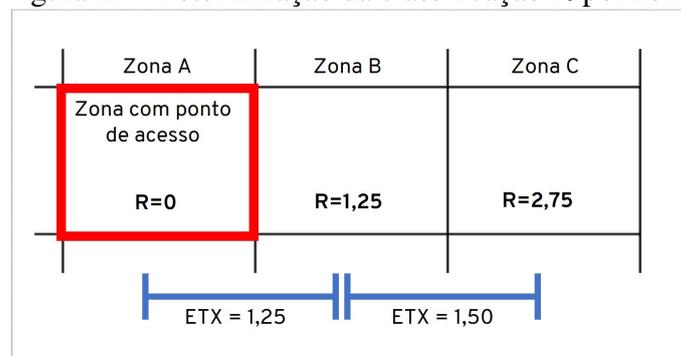
Ao se simular cada  $C_k^n$  possível combinação de posições dos pontos de acesso, tem-se como objetivo identificar qual maximiza a confiabilidade através da minimização de nodos com centralidades de intermediação, grau e proximidade expoentes. Para tal, seria necessário o cálculo de roteamento RPL para cada nodo da rede a cada combinação, entretanto, visando reduzir significativamente o esforço computacional, a técnica adota apenas uma adaptação do RPL. Assumindo novamente que cada zona contempla nodos com comportamentos e desempenhos semelhantes, adapta-se o roteamento RPL criando-se uma classificação  $R$  similar ao termo  $custo_{link}$  da equação 10 descrita em 4.2.2. A classificação  $R$  atribui para cada zona um custo em ETX referente à estimativa da quantidade de tentativas de transmissão necessárias para se completar a cadeia de *uplink*, caso

esta zona seja escolhida como vizinha. Como mostra a equação 12, a classificação  $R_i$  de uma zona  $i$  equivale à classificação  $R_j$  da sua zona vizinha mais atrativa  $j$  mais o ETX entre essas zonas. Como se está abstraindo a quantidade de nodos em cada zona, o termo  $\lambda$  de balanceamento de carga de pontos de acesso é desconsiderado também.

$$R_i = R_j + ETX_{(i,j)} \quad (12)$$

Usando a equação 12, segue-se a mesma lógica do algoritmo RPL. Uma zona com ponto de acesso possui classificação  $R$  igual a zero, enquanto cada zona subsequente  $i$  varre todas as zonas vizinhas em busca da zona  $j$  que apresente o menor custo somado de  $R_j$  e de  $ETX_{(i,j)}$ . Como ilustra o exemplo da figura 22, a Zona A apresenta um ponto de acesso e conseqüente  $R_A = 0$ , enquanto a Zona B identifica A como seu vizinho ótimo, e calcula seu  $R_B$  como  $R_A + ETX_{(A,B)} = 1,25$ . Por outro lado, a Zona C, mais distante de A, identifica que é preferível transmitir pacotes primeiro para B para que sejam então encaminhados ao ponto de acesso, de forma que  $R_C$  se torna  $R_B + ETX_{(B,C)} = 2,75$ .

Figura 22 - Determinação da classificação  $R$  por zona



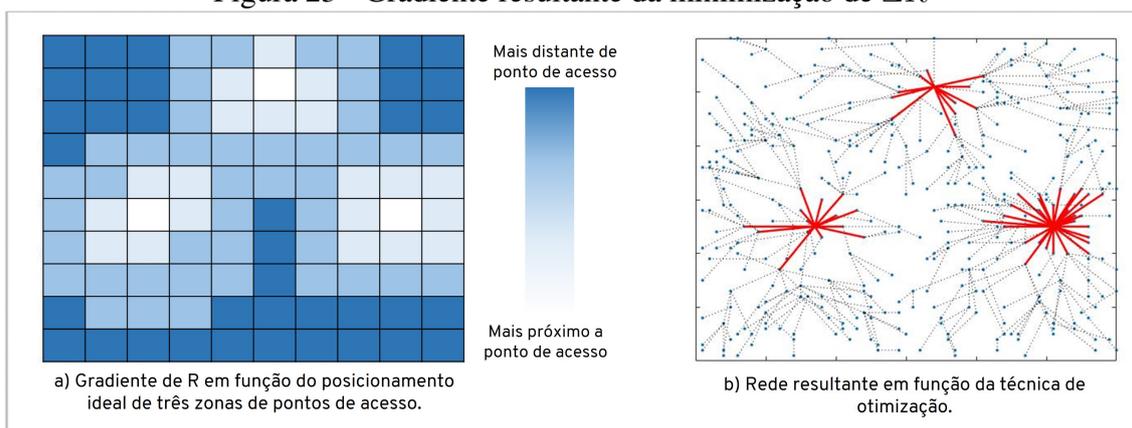
Fonte: do autor

Ao final do cálculo de  $R$  para cada zona daquela combinação de posicionamentos dos pontos de acesso, soma-se o  $R$  de todas as zonas, resultando em  $\Sigma R$ . Sendo, então, a quantidade de zonas  $n$  e a quantidade de pontos de acesso  $k$  conforme a equação 11, repete-se o cálculo de  $\Sigma R$  para todas as  $C_k^n$  possíveis posições de pontos de acesso. Visando maximizar a probabilidade de entrega de pacotes, assume-se que o ótimo posicionamento para os pontos de acesso é aquele indicado pela simulação que apresente o menor  $\Sigma R$  dentre todos os  $C_k^n \Sigma R$  calculados.

Seguindo o estudo de caso descrito anteriormente na figura 18.d, considerando três

pontos de acesso, tem-se que o menor  $\Sigma R$  apresenta-se na combinação de posições indicadas na figura 23. O detalhe 23.a mostra o zoneamento estipulado para esta simulação e classifica cada zona com um código de cor equivalente ao valor de  $R$ , sendo que as zonas no centro dos gradientes de  $R$  apresentam  $R = 0$  e conseqüentemente possuem um ponto de acesso em seu centro. Como mostra o detalhe 23.b, identifica-se que o posicionamento ótimo gerado pela técnica apresenta uma distribuição geograficamente homogênea dos pontos de acesso através da região da rede, o que é coerente, visto que os nodos estão distribuídos de forma aleatória e que pontos de acesso distribuídos proporcionalmente tendem a otimizar a quantidade de nodos capturados em gradientes de baixos ETX, o que aumenta a probabilidade de entrega de pacotes da rede como um todo e tende a minimizar os gargalos de tráfegos de comunicação.

Figura 23 - Gradiente resultante da minimização de  $\Sigma R$

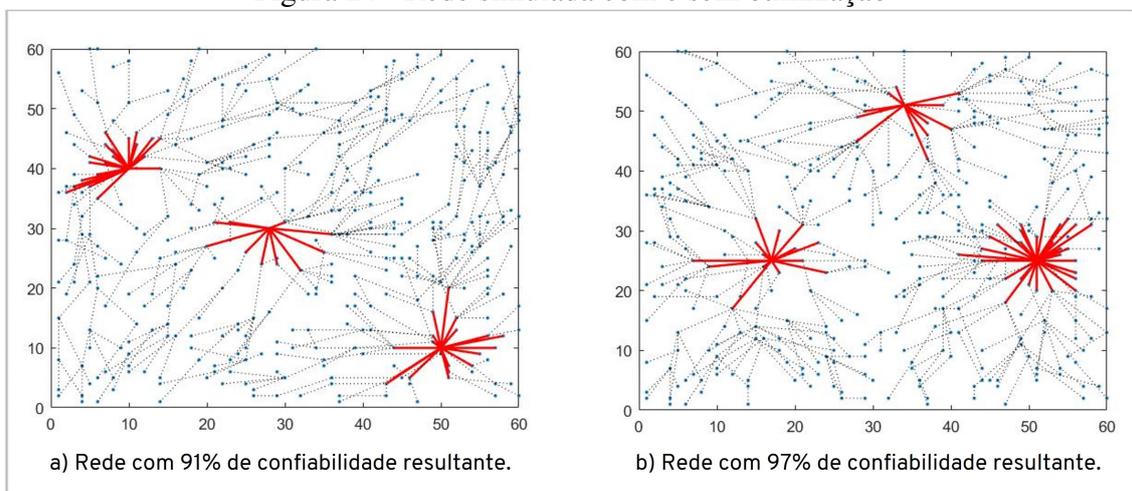


Fonte: do autor

Quando comparada à rede exemplificada em cenários com e sem otimização para a mesma quantidade de pontos de acesso, como mostra a figura 24, pode-se observar algumas características notáveis de posicionamento e roteamento. A rede sem otimização, indicada pelo detalhe 24.a, apresenta 91% de confiabilidade resultante, enquanto a rede com otimização (detalhe 24.b) apresenta 97% de confiabilidade resultante. É perceptível, mesmo visualmente, que a distância de saltos dos nodos nos quadrantes superior direito e inferior esquerdo da rede 24.a se eleva consideravelmente, ao passo que a distância de saltos da rede 24.b limita-se a quantidades aproximadamente constantes. Além disso, percebe-se que os pontos de acesso da rede 24.a, mesmo possuindo quantidades relativamente altas de vizinhos diretos, possuem muitas cadeias relativamente curtas quando comparadas às da rede 24.b, o que faz com que estas cadeias de *uplink* apresentem capa-

cidade de banda subutilizada ao passo que sobrecarregam as demais.

Figura 24 - Rede simulada com e sem otimização



Fonte: do autor

Reforça-se que a técnica, ao buscar minimizar  $\Sigma R$  de cada combinação de posicionamentos, atua diretamente para limitar valores expoentes de centralidades. O  $R$  de cada zona calculada tende a ser uma aproximação do ETX dos nodos presentes nela, e ao se buscar minimizar  $\Sigma R$ , está se buscando ao mesmo tempo maximizar as centralidades de proximidade, visto que se adota ETX como referência de distância geodésica em seu cálculo. Além disso, a minimização de  $\Sigma R$  tende a direcionar pontos de acesso para áreas de maior densidade de nodos, visto que maior presença de nodos em uma zona aumenta a chance desta zona possuir atrativos ETX para com as demais e, conseqüentemente, posicionar um ponto de acesso nela tende a diminuir o  $R$  das zonas vizinhas. Com muitos nodos próximos a um ponto de acesso, aumenta-se a quantidade de diferentes cadeias de *uplink* e se dilui o fluxo de dados. Essa diluição tende a minimizar as centralidades de grau e intermediação, visto que menos nodos acabam se tornando recorrentemente visados como vizinhos ótimos para *uplink*, dado que há mais opções.

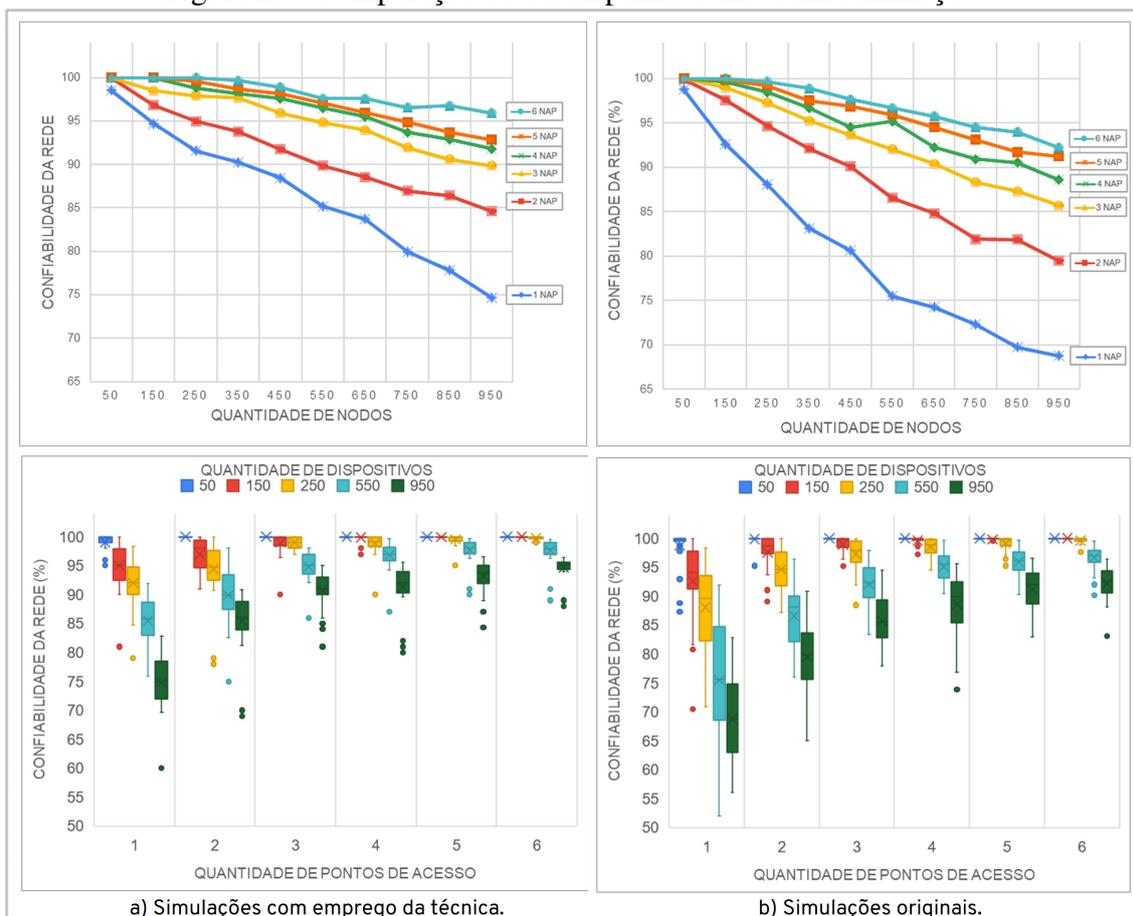
A técnica de otimização, entretanto, apresenta claras limitações. Como no exemplo citado na figura 24, mesmo aumentando a confiabilidade da rede em 6%, a rede está limitada pela quantidade de pontos de acesso presentes. Percebe-se que ainda há nodos que apresentam relativamente alta centralidade de intermediação, e conseqüentemente os nodos com maiores centralidade de grau apresentarão acúmulo de *buffer* e forçarão o descarte de pacotes gerados pelos nodos com menores centralidades de proximidade. Dessa forma, o que a técnica propõe é o aumento da escalabilidade de redes através da

indicação preventiva de posicionamentos otimizados para pontos de acesso, dentro da quantidade estipulada.

### 5.4.3 Impacto em Escalabilidade

Com o intuito de avaliar o impacto em escalabilidade da técnica desenvolvida, repete-se o regime de simulações abordado na seção 5.1. São simuladas redes com posicionamentos aleatórios de dispositivos de campo, sujeitos a interferências externas com impacto em potência percebida de sinal, e com quantidades de pontos de acesso variando de 1 a 6, e de dispositivos de campo variando de 50 a 950, em intervalos de 100. Para cada combinação de quantidades, são simuladas 100 redes aleatórias. Os resultados com e sem o emprego da técnica de otimização são comparados na figura 25.

Figura 25 - Comparação de desempenho com e sem otimização



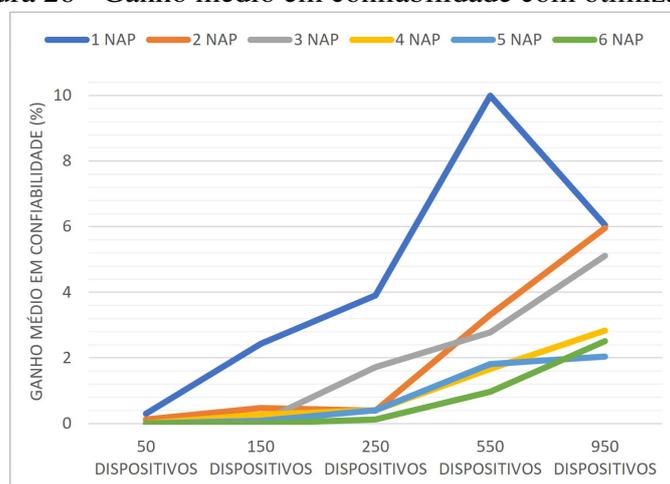
Fonte: do autor

Na figura 25, os gráficos superior e inferior esquerdos (detalhe 25.a) mostram, respectivamente, as médias de confiabilidade e os diagramas de caixa das simulações com o emprego da técnica de otimização; enquanto os gráficos da direita (detalhe 25.b) repetem

os resultados da seção 5.1.

Primariamente, ao se comparar os gráficos de média de confiabilidade (gráficos superiores da figura 25), nota-se um incremento significativo em desempenho para todas as combinações de quantidades que não estavam a 100% de confiabilidade previamente. A figura 26 compara estritamente a diferença média de confiabilidade para algumas combinações, e mostra que os ganhos mais acentuados se concentram em combinações com baixas quantidades de pontos de acesso. O resultado é coerente, visto que cenários com maior quantidade de pontos de acesso tendem a possuir melhor confiabilidade média em geral e formam mais cadeias de *uplink* potenciais para absorver os fluxos de dados.

Figura 26 - Ganho médio em confiabilidade com otimização



Fonte: do autor

Ainda na figura 26, o resultado para um único ponto de acesso é particularmente relevante, que apresenta um ganho maior ao se aplicar a técnica de otimização no cenário com 550 dispositivos (acima de 10%) do que o ganho com 950 dispositivos (cerca de 6%). Esse resultado indica que a técnica de otimização é limitada pela densidade de pontos de acesso na rede e que cenários de densidade demasiadamente baixa tendem a apresentar impacto em desempenho independente do posicionamento dos pontos de acesso, pois a demanda de taxa de transmissão da rede excede significativamente sua capacidade de lidar vazão.

Complementarmente, ao se considerar os gráficos inferiores da figura 25, compare-se os diagramas de caixa dos cenários com e sem otimização. Os ganhos em média de confiabilidade são os mesmos já discutidos anteriormente, mas se nota que a variabilidade de resultados diminui consideravelmente. Observa-se no detalhe 25.b que, em cenários

de pontos de acesso com posicionamentos aleatoriamente, é possível de se efetuar, por exemplo, uma rede de 550 dispositivos e um ponto de acesso com menos de 55% de confiabilidade, enquanto o menor valor atingido nas simulações otimizadas foi de cerca de 76% e a grande maioria de resultados se apresenta em torno de 85%.

As tabelas 4 e 5 mostram os incrementos de confiabilidade em, respectivamente, percentual e sigma, para os conjuntos de simulação com e sem o emprego da técnica de otimização. Identificam-se melhorias significativas, como a alteração de confiabilidade em simulações com 50 dispositivos e 2 pontos de acesso de  $3\sigma$  para  $6\sigma$ . Em geral, como a confiabilidade média dos resultados simulados está intrinsicamente relacionado às parametrizações de simulação, como tamanho de *buffer*, TTL, redundâncias ou mesmo algoritmos de roteamento, as melhorias em desempenho com o emprego prático da técnica dependem significativamente da aplicação proposta.

Tabela 4 - Comparações de desempenho em média de confiabilidade percentual

	1 NAP	2 NAP	3 NAP	4 NAP	5 NAP	6 NAP
50 disp.	98,7% → 99,7%	99,9% → 100%	100% → 100%	100% → 100%	100% → 100%	100% → 100%
150 disp.	92,6% → 95,6%	97,5% → 98,0%	98,7% → 99,8%	98,9% → 99,9%	99,8% → 99,9%	100% → 100%
250 disp.	88,1% → 92,1%	94,6% → 96,0%	97,3% → 99,1%	97,8% → 99,4%	99,1% → 99,6%	99,6% → 99,7%
550 disp.	75,5% → 85,5%	86,5% → 89,9%	92,2% → 94,6%	92,2% → 94,8%	95,3% → 97,6%	96,7% → 97,7%
950 disp.	68,8% → 74,8%	79,5% → 85,4%	85,6% → 90,6%	85,7% → 90,8%	91,2% → 93,3%	92,2% → 94,7%

Fonte: do autor

Tabela 5 - Comparações de desempenho em média de confiabilidade sigma

	1 NAP	2 NAP	3 NAP	4 NAP	5 NAP	6 NAP
50 disp.	$2\sigma \rightarrow 3\sigma$	$3\sigma \rightarrow 6\sigma$	$6\sigma \rightarrow 6\sigma$	$6\sigma \rightarrow 6\sigma$	$6\sigma \rightarrow 6\sigma$	$6\sigma \rightarrow 6\sigma$
150 disp.	$1\sigma \rightarrow 2\sigma$	$2\sigma \rightarrow 2\sigma$	$2\sigma \rightarrow 3\sigma$	$2\sigma \rightarrow 3\sigma$	$3\sigma \rightarrow 4\sigma$	$6\sigma \rightarrow 6\sigma$
250 disp.	$1\sigma \rightarrow 1\sigma$	$1\sigma \rightarrow 2\sigma$	$2\sigma \rightarrow 2\sigma$	$2\sigma \rightarrow 2\sigma$	$2\sigma \rightarrow 2\sigma$	$3\sigma \rightarrow 4\sigma$
550 disp.	$1\sigma \rightarrow 1\sigma$	$1\sigma \rightarrow 1\sigma$	$1\sigma \rightarrow 1\sigma$	$1\sigma \rightarrow 1\sigma$	$1\sigma \rightarrow 2\sigma$	$2\sigma \rightarrow 2\sigma$
950 disp.	$1\sigma \rightarrow 1\sigma$					

Fonte: do autor

Nota-se, por outro lado, que os valores máximos para as confiabilidades nas simulações originais não foram significativamente alterados pelo emprego da técnica de otimização. Este resultado é coerente, visto que, pela gama de simulações em cada cenário, é provável que algumas redes apresentem condições favoráveis de operação, incluindo posicionamento adequado para os pontos de acesso. Vale ressaltar que as redes simuladas nos cenários com e sem simulação não são as mesmas, visto que são sempre geradas aleatoriamente.

Em conclusão, pode-se identificar que o emprego da técnica de otimização proposta tende a aumentar em até 10% a média de confiabilidade de redes industriais sem fio em operação similar às propostas pela simulação, ainda que limitada por densidades demasiadamente baixas de pontos de acesso.

#### 5.4.4 Aplicabilidade

Esta seção apresenta uma proposta de aplicação da técnica de otimização em uma rede real, empregando variáveis e comandos existentes nas redes WH. Como descrito no capítulo 4, o WH foi adotado como estudo de caso para o desenvolvimento das simulações por sua ampla gama de utilização no mercado em demandas de redes *mesh* centralizadas, mas os resultados adotados aqui podem ser replicados em variáveis e comandos equivalentes em protocolos de comunicação com características semelhantes e que operem em condições similares às simuladas.

Como descrito na seção 4.2.1, as simulações deste trabalho adotam o conceito de PDP como a probabilidade de entrega de pacotes entre pares de dispositivos. Assim como descrito originalmente no algoritmo RPL, poderia se empregar em uma rede já funcional, o próprio PDR com o mesmo objetivo, alterando-se apenas se a técnica atuará em uma rede já operante e com histórico (PDR) ou em uma rede ainda sem histórico de operação (PDP). Efetivamente, ambas as métricas servem a mesma funcionalidade, i.e. indicar taxas de entrega de pacotes em percentual, e sua diferença única se faz no conceito de seus dados serem embasados em um histórico real de operação (PDR) ou de uma estimativa de futuro desempenho (PDP).

Para aplicar a técnica de otimização através do PDR, é empregado o comando 780 (*Report Neighbor Health List*), detalhado na figura 27. Esse comando é enviado pelo gerenciador de rede a cada dispositivo de campo e cuja resposta consiste em uma lista de todos os vizinhos diretos atualmente conectados com o dispositivo em questão. Como mostra a figura, além de reportar o RSL (*Receive Signal Level*, ou nível de sinal recebido, em dBm) do vizinho no byte 6, a resposta ao comando também reporta a quantidade de pacotes enviados com sucesso ao vizinho (bytes 7 e 8), a quantidade de pacotes perdidos (cujo recebimento do ACK não foi confirmado) nos bytes 9 e 10, e a quantidade de pacotes efetivamente recebidos deste vizinho (bytes 11 e 12). Com essas informações, a determinação do PDR entre pares de dispositivos se faz como indicada na equação 13,

onde  $Pacotes_{enviados}$  é a informação dos bytes 7-8 e  $Pacotes_{falhados}$  é a informação dos bytes 9-10.

Figura 27 - Comando 780 (*Report Neighbor Health List*)

Request Data Bytes		
Byte	Format	Description
0	Unsigned-8	Neighbor table index
1	Unsigned-8	Number of Neighbor entries read
Response Data Bytes		
Byte	Format	Description
0	Unsigned-8	Neighbor table index
1	Unsigned-8	Number of Neighbor entries read
2	Unsigned-8	Total number of neighbors
3-4	Unsigned-16	Nickname of neighbor
5	Bit-8	Neighbor Flags (See Common Table 59)
6	Signed-8	Mean RSL (Receive Signal Level in dBm) since last report
7-8	Unsigned-16	Packets transmitted to this neighbor since last report
9-10	Unsigned-16	Failed transmits - number of packets expecting an ACK and none was received since last report
11-12	Unsigned-16	Packets received from this neighbor since last report
13- ...		Number of entries based on response byte 1

Fonte: adaptado de (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009b)

$$PDR = \frac{Pacotes_{entregues}}{Pacotes_{entregues} + Pacotes_{falhados}} \quad (13)$$

A vantagem de se usar o PDR e conseqüentemente um histórico efetivo das métricas da rede para o emprego da técnica é que se tem uma base de dados prática sobre o desempenho de comunicação entre pares de dispositivos, ao invés de apenas uma estimativa como no emprego do PDP apresentado neste trabalho. Por outro lado, possuir um histórico prévio da rede indica que a rede já está em operação, potencialmente com posicionamentos não otimizados para os pontos de acesso, e requer que recursos sejam gastos com uma operação inicial da rede para formação dos dados para histórico. Empregar o histórico de PDR é factível em um cenário onde a técnica de otimização proposta serve como prática de melhoria contínua para incrementar o desempenho de redes já existentes, ou então para redimensionar redes existentes com a inclusão de mais pontos de acesso ou dispositivos de campo.

O emprego do PDP, por outro lado, utiliza somente uma estimativa da taxa de entrega de pacotes, atuando preventivamente com relação à operação da rede e permitindo posicionamento otimizado dos pontos de acesso desde o princípio de operação. Para o

emprego do PDP na prática, pode-se empregar recursos de simulação (e.g. a metodologia deste trabalho, introduzida na seção 4.2.1 e descrita na equação 9) ou empregar os níveis de potência percebida identificados entre pares de dispositivos sem a rede estar em operação. Para isso, visto que a rede não possui ainda roteamento e não foi completamente inicializada, empregar o comando 780 descrito acima se faz impraticável. Como alternativa, propõe-se o emprego do comando 787 (*Report Neighbor Signal Levels*). Segundo o detalhamento mostrado na figura 28, o comando 787 é um comando do gerenciador de rede para cada dispositivo de campo cuja resposta contempla a lista dos vizinhos identificados pelo dispositivo em questão, mas não necessariamente com conexão ponto-a-ponto estabelecida. Dessa forma, não se faz possível o emprego de dados como quantidade de pacotes entregues ou perdidos, mas se pode coletar o RSL de cada vizinho e empregar uma técnica como a apresentada neste trabalho (equação 9) para pressupor probabilidades de sucesso em transmissão.

Figura 28 - Comando 787 (*Report Neighbor Signal Levels*)

Request Data Bytes		
Byte	Format	Description
0	Unsigned-8	Neighbor table index
1	Unsigned-8	Number of Neighbor entries to read
Response Data Bytes		
Byte	Format	Description
0	Unsigned-8	Neighbor table index
1	Unsigned-8	Number of Neighbor entries read
2	Unsigned-8	Total number of neighbors
3-4	Unsigned-16	Nickname of neighbor
5	Signed-8	RSL of neighbor in dB
6-8		Repeats (as needed) based on response byte 1

Fonte: adaptado de (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009b)

O emprego do PDP, quando comparado às bases históricas de PDR, traz vantagens e desvantagens. Algumas de suas vantagens são a possibilidade de se atuar preventivamente na rede, junto à etapa de inicialização da rede no gerenciador ou mesmo em um ambiente puramente simulado, para permitir o projeto de posicionamento de nodos otimizado sem gasto de recursos ou riscos à operação. Alguns contrapontos, entretanto, são a menor robustez da análise em virtude do emprego de dados prováveis e não reais, tendo o resultado da técnica dependente da assertividade da metodologia para transformar potência de sinal em provável taxa de entrega de dados.

Em ambos os casos, a metodologia descrita pela técnica proposta trabalha assumindo

regimes permanentes de operação, com nodos estacionários e desempenhos tendendo ao regime estático, sem variações em potências de sinal percebidos e presença de novas interferências imprevistas pelo modelo inicial. A metodologia, como proposta neste trabalho, requereria um novo ciclo de simulação uma vez que o cenário de potências de sinais percebidos entre pares de dispositivos se alterasse, tanto no modelo simulado com PDP quanto no modelo com histórico de PDR.

## 6 CONCLUSÕES

Neste capítulo, concluem-se os resultados a partir das análises e simulações na seção 6.1 e se discutem propostas para trabalhos futuros na seção 6.2.

### 6.1 Considerações Finais

Neste trabalho, buscou-se analisar o desempenho em confiabilidade de redes industriais sem fio do tipo malha com gerenciamento centralizado, em particular adotando o protocolo WH como estudo de caso, em cenários de variadas quantidades e disposições espaciais de nodos, a fim de avaliar o impacto desses parâmetros em escalabilidade. Como critério de desempenho foi empregada confiabilidade na entrega de pacotes fim-a-fim com destino aos pontos de acesso, sendo levados em consideração somente os roteamentos *uplink* dos dispositivos de campo com destino aos pontos de acesso. Foram aplicadas métricas de centralidade, em particular centralidades de grau, de intermediação e de proximidade, a fim de correlacionar avaliações de análise de redes sociais contra a variabilidade de desempenho em confiabilidade das redes em crescente escala. Com base nos resultados simulados, foi desenvolvida uma proposta de técnica de otimização para o posicionamento espacial de pontos de acesso visando maximizar a entrega de pacotes em rotas *uplink* através da mitigação de perdas por formação de gargalos em fluxo de dados, obtendo-se incrementos em confiabilidade média de redes simuladas de até 10% quando comparadas a posicionamentos aleatórios.

A modelagem das redes simuladas se mostrou satisfatória perante as propostas do estudo. Considerando redes com alta demanda de comunicação (um novo pacote por nodo a cada ciclo de *superframe*), as abstrações das camadas física, de enlace e de rede do protocolo WH permitiram simular roteamentos *uplink* de redes com dispositivos de campo

e pontos de acesso distribuídos aleatoriamente em um plano cartesiano. O modelo de transmissão de Friis viabilizou a estimativa de potência de sinal percebido entre pares de nodos, que por sua vez retroalimentam o cálculo de PDP (Probabilidade de Entrega de Pacotes) e ETX (Contagem Esperada de Transmissões) entre cada par adotando valores sugeridos pela norma WH como limites mínimos e máximos de captação de sinal esperada para dispositivos de campo. Ainda, a determinação de escalonamento com um *superframe* único também se mostrou suficiente para as análises empregadas, visto que a camada física abstrai os efeitos de interferências externas e de coexistências através de reduções na potência de sinal percebido pelo modelo de Friis; e, por fim, o emprego de outras redundâncias de enlace e de rota além das adotadas neste trabalho (arbitradas respectivamente como quádrupla e dupla) trazem somente um deslocamento das médias de confiabilidade em todas as combinações de simulação para cima ou para baixo, de modo que não impactam os resultados obtidos.

Assumiu-se nesse trabalho que a perda de pacotes ponto-a-ponto em uma tentativa de transmissão entre pares de nodos não causa necessariamente uma perda definitiva de dados à confiabilidade da rede, visto que o protocolo WH assume que perdas pontuais podem ser contornadas com práticas como redundâncias e retransmissões. Como critério para o descarte definitivo de pacotes, foram empregadas as práticas de obsolescência por TTL (*Time to Live*) nos pacotes e enchimento de *buffer* de memória nos dispositivos de campo. A variação dos parâmetros de TTL e *buffer*, arbitrados homogeneamente em todas as simulações como, respectivamente, 100% a 300% da distância de saltos total e 10 pacotes por nodo, não traz alteração significativa nos resultados, visto que, assim como a variação dos parâmetros de redundância, apenas faz a rede simulada se tornar mais ou menos robusta perante perda de pacotes, ainda que em detrimento da capacidade de resposta em termos de taxa de transmissão. Entretanto, como a taxa de transmissão foi abstraída das análises por não ser o enfoque, os parâmetros adotados se mostraram satisfatórios.

A partir destes critérios de modelagem, foram realizados conjuntos de simulação para diferentes combinações de quantidades de pontos de acesso e de dispositivos de campo, variando, respectivamente, de 1 a 6 e de 50 a 950 (em intervalos de 100). Para cada combinação, foram realizadas 100 simulações, sendo aleatorizadas as posições dos nodos em cada nova rede. Os resultados obtidos indicam que, para redes simuladas com os pa-

râmetros descritos, a quantidade de pontos de acesso apresenta significativo impacto na confiabilidade média e consequente escalabilidade das redes, mas também que o posicionamento dos pontos de acesso, e consequentemente as distâncias médias de salto e ETX para cada cadeia de *uplink*, traz significativa variabilidade para esse desempenho.

Para correlacionar desempenho com os impactos da disposição espacial e consequente formação de cadeias *uplink*, foram aplicados conceitos de análise de redes sociais, mais especificamente centralidades, em todos os nodos de cada rede, especialmente nodos faltosos (nodos que efetivamente descartaram pacotes em caráter definitivo) e nodos que geraram os pacotes perdidos. Foi identificado que a centralidade de intermediação tende a apontar quais cadeias são os principais gargalos para fluxo de dados, mais especificamente em quais nodos demasiadas outras cadeias confluem e consequentemente se formam gargalos. Nessas cadeias, a centralidade de grau tende a apontar os nodos que mais recebem pacotes de vizinhos e consequentemente são os primeiros a apresentar *buffer* cheios, enquanto a centralidade de proximidade aponta quais nodos nas cadeias gargalo geraram maior quantidade de pacotes perdidos.

Por mais que os valores calculados com centralidades não possam ser tomados de forma absoluta, tendo valia somente em relação à rede específica, identificou-se que valores expoentes de centralidades tendem a apontar cadeias gargalo regularmente. De modo geral, centralidades se mostram métricas eficazes para a parametrização quantitativa do impacto de escalabilidade *uplink* na taxa de perda de pacotes, e, com base nos padrões de perdas oriundos da formação de gargalos de comunicação, foi desenvolvida uma proposta de técnica de otimização para o posicionamento de pontos de acesso.

A técnica proposta leva em consideração que nodos fisicamente próximos, tendo comportamentos homogêneos nos regimes simulados, tendem a ter probabilidade de entrega de pacotes semelhantes com relação a nodos mais distantes, e frequentemente adotam as mesmas cadeias de *uplink* e dependem dos mesmos vizinhos. Além disso, identifica-se, como indicado pelas centralidades, que a distância média de saltos e ETX entre nodos tende a irradiar em caráter gradiente ao redor dos pontos de acesso. Dessa forma, propôs-se um algoritmo que determina zonas possíveis para a alocação de pontos de acesso ponderando as prováveis médias de ETX entre conjuntos de nodos próximos, e também indica as zonas mais apropriadas para alocação da quantidade disponível de pontos de acesso visando minimizar o ETX total da rede e, consequentemente, minimizar distância de saltos,

perda de pacotes e enfim incrementar confiabilidade resultante. Como arbitrou-se que pares de zonas apresentam o provável ETX equivalente ao melhor par de nodos entre elas, maior quantidade de nodos tende a aumentar a probabilidade de que aquelas sejam zonas adequadas para pontos de acesso, o que influencia diretamente nos resultados de centralidade de proximidade. Além disso, pontos de acesso com maior quantidade de vizinhos próximos tende a aumentar a quantidade de cadeias disponíveis para maiores quantidades de nodos, de forma que se mitiga a presença de gargalos com maiores centralidades de intermediação e de grau.

Os resultados obtidos com o emprego da técnica, ao se repetir o regime de simulações adotados anteriormente com posicionamento randômico para pontos de acesso, indicam que o posicionamento otimizado de pontos de acesso pode incrementar em até 10% a confiabilidade média da simulação. Identificou-se que, para redes com alta densidade de pontos de acesso com relação a dispositivos de campo, os ganhos em confiabilidade eram menores, aumentando conforme se diminuía a densidade para então chegar a um ponto de inflexão, onde a quantidade de pontos de acesso não suportava o fluxo de transmissão de dados para aquela quantidade de dispositivos de campo com menor dependência de seu posicionamento. Ainda, arbitrar zonas menores para o algoritmo tende a indicar posicionamentos ainda mais detalhados para os pontos de acesso, mas tendendo a aumentar significativamente o esforço computacional como consequência.

Foram propostas duas alternativas para aplicação da técnica de otimização em redes WH reais, adotando os comandos 780 e 787 do gerenciador de rede para coleta de dados de comunicação entre nodos vizinhos para substituir as arbitrações aplicadas neste trabalho. Os comandos 780 e 787 poderiam ser indicados, respectivamente, para uma técnica preventiva de alocação de pontos de acesso ou para técnicas de melhoria de redes existentes.

Vale ressaltar que o impacto em escalabilidade indicado pelas simulações deste trabalho é mais realçado quando em conjunto com uma demanda estrita da banda disponível, ou seja, em cenários onde a taxa de atualização demandada pela aplicação força os limites de disponibilidade dos pontos de acesso (como adotado neste trabalho). Comercialmente, redes IEEE 802.15.4 já são indicadas para soluções de baixa taxa de transmissão de dados, mas técnicas como a apresentada neste trabalho podem auxiliar a quebrar paradigmas e trazer soluções de baixo custo para demandas de mercado de maior criteriosidade.

Por fim, identifica-se no estado-da-arte em que análise de redes sociais tem sido majoritariamente empregada para soluções orientadas a redes *ad hoc*, focadas primariamente na indicação de nodos *cluster heads* como nodos coletores nessa categoria de rede. Conclui-se, entretanto, que o emprego de métricas como centralidades em redes centralizadas e de malha pode ser uma ferramenta valiosa para determinação de cadeias de *uplink* gargalos e atuação em práticas que otimizem roteamentos, especialmente de *convergecast*.

## 6.2 Trabalhos futuros

As abstrações para a simulação das redes WH foram selecionadas com o intuito de minimizar esforço computacional enquanto mantendo foco no objetivo de análise de escalabilidade de redes e desempenho em confiabilidade. Entretanto, identifica-se como oportunidades para trabalhos futuros um conjunto de expansões sobre a modelagem do WH para viabilizar avaliações diferenciadas sobre o comportamento das redes.

Uma das oportunidades seria a implementação do regime transiente da rede, como em inicialização, em variações de interferências externas e em dispositivos de campo entrando ou saindo da rede. A modelagem como proposta implementa os dispositivos em regime estático, estando todos conectados e com inteferências externas constantes ao longo do regime de operação. A realidade de uma rede industrial tende a apresentar variações ao longo de seu funcionamento, portanto, a implementação de regime transiente poderia alavancar a robustez das análises, assim como detalhar processos diferentes como o processo de *join* (agregação) de novos dispositivos.

Outra abstração com oportunidade de melhoria seria completar a rede WH com rotas dos tipos *broadcast* e *unicast*. Como a proposta deste trabalho era o enfoque em operações de *convergecast*, mais especificamente roteamento *uplink*, os outros tipos de roteamento não foram implementados, mas uma avaliação de desempenho completa de redes em malha como o WH requereria a implementação destes outros métodos de comunicação entre dispositivos. Essa implementação permitiria a avaliação de outras operações relevantes à redes centralizadas em malha, como os anúncios de *join*, as mensagens de *keep alive* e a aplicação de dispositivos de campo *hand-held*.

Uma rede prática WH permite com que diversos *superframes* sejam utilizados de forma simultânea, sendo defasados em frequência e canal ou meramente por distancia-

mento físico entre os nodos que utilizam seu slots. Para este trabalho, essa distinção não se mostra relevante, de forma que foi construído o escalonamento como um único *super-frame* principal, mas essa abstração faz com que avaliações de capacidade de resposta da rede, como taxas de transmissão, latência e *jitter*, sejam inviabilizadas. Entende-se também como oportunidade a construção de um escalonamento mais verossímil para atender esses pontos.

Nas redes simuladas, todos os nodos e pacotes possuíam características homogêneas (e.g. tamanho de *buffer*, TTL, demanda de novos pacotes), assim como todo enlace e rota possuía os mesmos critérios de redundância. Ainda, os pontos de acesso foram considerados homogêneos, com os mesmos balanceamentos de carga no equacionamento de custo do roteamento, e modelados como sem limitação de processamento e vazão uma vez que um pacote lhe era entregue. Identifica-se como oportunidade para incremento de semelhança da modelagem, a personalização do comportamento desses elementos de simulação.

Além das oportunidades de aprofundamento na modelagem do WH, identifica-se como potencial trabalho futuro a inclusão de outras métricas de centralidade, como a centralidade de autovetor. Além disso, centralidades se enquadram na categoria de distribuições de análise de redes sociais, mas o emprego de métricas de outras categorias, como conexões (e.g. propinquidade) e segmentações (e.g. coeficiente de agrupamento) se apresenta como outra oportunidade futura. Como levantado por (GAITAN *et al.*, 2021), a análise de redes sociais possui ferramentas fortes para o desenvolvimento de soluções no âmbito de redes de comunicação. Potencialmente, outros conceitos desenvolvidos para redes sociais podem ser aplicados em avaliações de desempenho e escalabilidade.

Por fim, identifica-se a oportunidade de se aplicar um modelo matemático para o algoritmo de otimização para se obter pontos de posicionamento de pontos de acesso de forma mais eficiente e com menor esforço computacional. Ainda, não foram consideradas neste trabalho questões de validação estatística para a quantidade de experimentos proposta, de modo que um modelo matemático de simulação poderia trazer maior profundidade ao embasamento estatístico proposto.

Todo o *script* desenvolvido em MatLab para as simulações, tanto para ciclo de operação das redes quanto o algoritmo de otimização, estão disponibilizados em:

<https://github.com/nnalydd/Escalabilidade-Uplink.git>.



## REFERÊNCIAS

AHMAD, T. *et al.* Social Network Analysis Based Localization Technique with Clustered Closeness Centrality for 3D Wireless Sensor Networks. **Electronics** **2020**, [S.l.], 2020.

ARSHAD, A. *et al.* Performance Evaluation of the Geographic Routing Protocols Scalability. **2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)**, [S.l.], 2019.

BONACICH, P. Power and Centrality: a family of measures. **American Journal of Sociology**, [S.l.], v. 92, n. 5, p. 1170–1182, 1987.

BORGATTI, S. P. Centrality and Network Flow. **Social Networks**, [S.l.], v. 27, p. 55–71, 2005.

CAINELLI, G. P. Proposta de algoritmo de escalonamento de mensagens para redes sem fio aplicadas à automação de fábrica. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, [S.l.], 2020.

CHEN, D.; NIXON, M.; MOK, A. WirelessHart, Real-Time mesh network for industrial automation. **Springer**, Austin, TX-USA, p. 276, 2010.

CHEN, D. *et al.* WirelessHART and IEEE 802.15.4e. **2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, [S.l.], p. 760–765, 2014.

CORTEZ, V. A. S. Algoritmo de roteamento de mensagens confiável com controle de energia aplicado às redes sem fio industriais. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, [S.l.], 2021.

FREEMAN, L. C. The development of social network analysis: a study in the sociology of science. **Vancouver, BC: Empirical Press**, [S.l.], 2004.

FRIIS, H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. **Proceedings of the IRE**, [S.l.], v. 34, 1946.

GAITAN, M. G. *et al.* Impact of network centrality on the gateway designation of real-time TSCH networks. **2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)**, [S.l.], 2021.

GALLOWAY, B.; HANCKE, G. P. Introduction to industrial control networks. **Communications Surveys Tutorials, IEE 1502**, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 860–880, 2013.

GUNGOR, V. C.; LU, B.; HANCKE, G. P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S.l.], v. 57, n. 10, p. 3557–3564, 2010.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF SPEC-085 - Network Management Specification**, [S.l.], 2009.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF SPEC-115 - Wireless Command Specification**, [S.l.], 2009.

KAUFMANN, M.; LEHMANN, K. Decentralized algorithms for evaluating centrality in complex networks. **Universitätsbibliothek Tübingen**, [S.l.], 2003.

KHARB, S.; SINGHROVA, A. Performance Evaluation of TSCH in Industrial WSN. **2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)**, [S.l.], 2018.

KREBS, V. E. The Social Life of Routers. **International Journal of Internet Protocol Technology**, [S.l.], v. 3, n. 4, p. 14–26, 2000.

LEE, T.; EXARCHAKOS, G.; GROOT, S. H. Swarm-Based Energy Efficient Scheduling for Wireless Sensor Networks. **2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)**, [S.l.], 2019.

LI, X. Wireless Networks. **A review of industrial wireless networks in the context of industry 4.0**, [S.l.], v. 23, 2015.

LUVISOTTO, M.; PANG, Z.; DZUNG, D. Ultra high performance wireless control for critical applications: challenges and directions. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], v. 13, p. 1448–1459, 2017.

LYON, A. Why are Normal Distributions Normal? **The British Journal for the Philosophy of Science**, [S.l.], v. 65, n. 3, p. 621–649, 2014.

MODEKURTHY, V. P.; SAIFULLAH, A.; MADRIA, S. DistributedHART: a distributed real-time scheduling system for wirelesshart networks. **2019 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)**, [S.l.], 2019.

MULLER, I. *et al.* WirelessHART Fast Collect: a decentralized approach for intermittent field devices. **2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**, [S.l.], 2013.

MUNICIO, E.; LATRE, S. Decentralized broadcast-based scheduling for dense multi-hop TSCH networks. **Proceedings of the Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture**, [S.l.], p. Pages 19–24, 2016.

PAL, T. *et al.* Design and Implementation of Centrality Approach-Based Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Network. **Advances in Intelligent Systems and Computing book series**, [S.l.], v. 1406, 2021.

PAPOULIS, A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. **McGraw-Hill**, [S.l.], p. 100–101, 1984.

PILLAI, M. R.; JAIN, R. B. On Stability and Scalability Enhancement in WSN. **2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering**, [S.l.], 2019.

PISTER, K. J. *et al.* Scalability of time synchronized wireless sensor networking. **IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, [S.l.], 2011.

PISTER, K. *et al.* A decentralized scheduling algorithm for time synchronized channel hopping. **ICST Transactions on Mobile Communications and Applications**, [S.l.], 2011.

- SAUNDERS, S.; ARAGON-ZAVALA, A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. **Eds. Wiley**, [S.l.], 2007.
- SINGH, O.; RISHIWAL, V. On the scalability of routing protocols in WSN. **2017 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication and Automation**), [S.l.], 2017.
- SISINNI, E. *et al.* Industrial internet of things: challenges, opportunities, and directions. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], v. 14, p. 4724–4734, 2018.
- SMITH, B. Six-sigma design (quality control). **IEEE Spectrum**, [S.l.], v. 30, 1993.
- SONG, J. WirelessHART: applying wireless technology in real-time industrial process control. **IEEE REAL-TIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SYMPOSIUM, 2008, St. Louis**, [S.l.], p. 377–386, 2008.
- TENNANT, G. SIX SIGMA: spc and tqm in manufacturing and services. **Gower Publishing, Ltd.**, [S.l.], 2001.
- VISWANATHAN, M. Wireless Communication Systems in Matlab. **Independently published**, [S.l.], 2008.
- WANG, W.; HWANG, R. A Distributed Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4e Networks. **2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity)**, [S.l.], 2015.
- WASSERMAN, S.; FAUST, K. Social Network Analysis: methods and applications. **Cambridge University Press**, [S.l.], p. 177–192, 1994.
- WINTER, T. *et al.* IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks. **IETF RFC 6550**, [S.l.], 2012.
- XU, L. D.; HE, W.; LI, S. Internet of things in industries: a survey. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 2233–2243, 2014.
- ZAND, P. Wireless industrial monitoring and control networks: the journey so far and the road ahead. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 123–152, 2012.