

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

**GUSTAVO KUNZEL**

**AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE  
ROTEAMENTO PARA REDES WIRELESSHART**

Porto Alegre

2012

**GUSTAVO KUNZEL**

**AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE  
ROTEAMENTO PARA REDES WIRELESSHART**

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. Carlos Eduardo Pereira**

Porto Alegre

2012

GUSTAVO KUNZEL

## **AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO PARA REDES WIRELESSHART**

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. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universität Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Dennis Brandão

Doutor pela Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

Prof. Dr. João César Netto,

Doutor pela Universite Catholique de Louvain – Louvain-la-Neuve, Bélgica

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Júnior

Doutor pela Universite Paul Sabatier – Toulouse, França

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

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Júnior

Porto Alegre, novembro de 2012.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Carlos Eduardo Pereira, por prover a oportunidade de trabalho na área de pesquisa e pela confiança depositada nesta realização.

Ao professor Ronaldo Husemann, pelos conselhos fornecidos e pelo apoio na decisão de fazer o mestrado.

Aos colegas Jean Michel Winter, Ivan Müller e ao professor João César Netto, pelo auxílio nas tarefas e pesquisas desenvolvidas durante este período.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS, pela assistência durante o período do mestrado.

À CAPES, pela provisão da bolsa.

Por fim, aos meus pais, pelo apoio incondicional e auxílio durante toda esta jornada.

## RESUMO

Nos últimos anos tem sido observado um aumento na utilização de redes sem fio em ambientes industriais, em função de diversas vantagens relacionadas à redução de custos de cabeamento, mobilidade e facilidade de inserção, instalação e configuração de novos dispositivos. Entretanto, a aplicação de redes sem fio em sistemas de automação apresenta requisitos mais rígidos no que diz respeito à confiabilidade, segurança e garantias de entrega de mensagens. O protocolo WirelessHART é um padrão aberto de comunicação sem fio que busca atender a estes requisitos. Neste protocolo, um dispositivo conhecido como gerenciador de rede é responsável pela configuração, definição das rotas e alocação de recursos para a comunicação entre os dispositivos da rede. A definição de rotas consiste em um processo complexo, em função das características das redes sem fio, dos recursos restritos dos dispositivos e dos requisitos da aplicação. O ambiente desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo permitir a avaliação das rotas determinadas por diferentes algoritmos de roteamento, auxiliando no desenvolvimento, comparação, ajuste de parâmetros e na identificação de problemas. O ambiente também tem como objetivo permitir a monitoração de redes WirelessHART operacionais, através da captura do tráfego na camada física, obtendo informações sobre as condições reais de operação, onde anomalias e problemas na topologia e nas rotas utilizadas na rede podem ser identificados. A ferramenta proposta foi validada com alguns estudos de estudos de caso, que também são apresentados neste trabalho. Os estudos envolveram a análise e ajuste de parâmetros de um algoritmo de definição de rotas estado da arte modificado, e a obtenção de topologias e rotas utilizadas em uma rede WirelessHART operacional.

**Palavras-chave: WirelessHART, Redes sem fio industriais, Roteamento**

## **ABSTRACT**

In the last years the use of wireless networks in industrial environments has been observed, due to several advantages related to the reduction of cabling costs, mobility and ease of integration, installation and configuration of new devices. However, the implementation of wireless networks in automation systems introduces stringent requirements regarding reliability, security and message delivery guarantees. The WirelessHART protocol is an open standard for wireless communication that aims to meet these requirements. In this protocol, a device known as network manager is responsible for the configuration, routes definition, and resource allocation for communication between network devices. The route definition consists of a complex process, due to the wireless networks characteristics, limited resources of devices and application requirements. The environment developed in this work has as objective to enable the evaluation of the routes determined by different routing algorithms, helping in the development, comparison, tuning of parameters and in the identification of possible design problems. The environment also has as objective to allow the monitoring of operational WirelessHART networks, by capturing packets at the physical layer, obtaining information of operating conditions, where anomalies and problems in network topology and routes can be identified. The developed tool has been experimentally validated via some case studies, which are also described in this work. The study cases involved the analysis and tuning of parameters of a state-of-art modified route definition algorithm, and the capture of the current topology and routes of an operational WirelessHART network.

**Keywords: WirelessHART, Industrial wireless networks, Routing**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
2	CONCEITUAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	DEFINIÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS SOBRE GRAFOS.....	18
2.1.1	Classificação de grafos.....	18
2.1.2	Elementos de um grafo.....	19
2.1.3	Características estruturais.....	20
2.2	DEFINIÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS SOBRE REDES SEM FIO DO TIPO MESH.....	20
3	ANÁLISE DE ESTADO DA ARTE.....	22
3.1	MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE REDES SEM FIO.....	22
3.1.1	Trabalhos acadêmicos relacionados à monitoração passiva de redes sem fio.....	23
3.1.2	Soluções comerciais relacionadas à monitoração passiva de redes sem fio.....	25
3.2	TRABALHOS RELACIONADOS AO ROTEAMENTO CONFIÁVEL PARA REDES SEM FIO.....	26
4	O PADRÃO WIRELESSHART.....	29
4.1	DOCUMENTAÇÃO DA NORMA HART 7.....	29
4.2	TIPOS DE DISPOSITIVOS.....	30
4.3	CAMADAS DO PROTOCOLO WIRELESSHART.....	32
4.3.1	Camada física.....	33
4.3.2	Camada de enlace.....	33
4.3.3	Camada de rede.....	37
4.3.4	Camada de transporte.....	42
4.3.5	Camada de aplicação.....	42
4.3.6	Segurança nas comunicações do protocolo.....	43
5	PROPOSTA DE AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO PARA REDES WIRELESSHART.....	45
5.1	INTRODUÇÃO.....	45
5.2	AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO.....	47
5.2.1	Criação de topologias.....	48
5.2.2	Obtenção de topologias e rotas através da monitoração de uma rede WirelessHART operacional.....	49
5.2.3	Aplicação de algoritmos de roteamento.....	55
5.2.4	Análise e visualização.....	55
5.3	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS E DEFINIÇÃO DE MÉTRICAS DE ANÁLISE.....	58
5.3.1	Primeiro experimento.....	58
5.3.2	Segundo experimento.....	65
5.3.3	Métricas para avaliação e comparação dos grafos.....	66
6	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS.....	68
6.1	DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO.....	68
6.1.1	Classe Grafo.....	68
6.1.2	Módulo de criação de topologias.....	68

6.1.3	Módulo de captura de topologias .....	71
6.1.4	Aplicação de algoritmos .....	73
6.1.5	Módulo de análise de grafos construídos .....	74
6.2	PRIMEIRO EXPERIMENTO: MODIFICAÇÃO DE ALGORITMOS DE ROTEAMENTO .....	75
6.2.1	Avaliação do algoritmo de <i>broadcast</i> .....	75
6.2.2	Avaliação do algoritmo de <i>uplink</i> .....	79
6.3	SEGUNDO EXPERIMENTO: CAPTURA DE INFORMAÇÕES DE UMA REDE WIRELESSHART OPERACIONAL.....	82
7	CONCLUSÃO.....	89
	REFERÊNCIAS .....	92



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Topologia de uma rede representada por grafos .....	18
Figura 2 Topologia típica de uma rede WirelessHART .....	30
Figura 3 Camadas do protocolo WirelessHART .....	33
Figura 4 Representação de um <i>superframe</i> .....	34
Figura 5 Tipos de grafos de roteamento .....	38
Figura 6 Exemplo de roteamento por <i>superframe</i> .....	39
Figura 7 Blocos principais do ambiente proposto .....	48
Figura 8 Captura passiva de pacotes de uma rede WirelessHART operacional .....	49
Figura 9 Etapas do processo de captura e obtenção de grafos.....	50
Figura 10 Representação das etapas de decodificação de um pacote.....	53
Figura 11 Formas de visualização de resultados de análise .....	56
Figura 12 Aplicação de algoritmos e análise de rotas geradas no ambiente .....	57
Figura 13 Interface para implementação de modelos de conectividade.....	69
Figura 14 Interface para criação de topologias.....	70
Figura 15 Exemplos de topologias geradas .....	70
Figura 16 Interface de implementação de captura de pacotes .....	71
Figura 17 Interface de captura de topologias .....	72
Figura 18 Interface para implementação de algoritmos de roteamento.....	73
Figura 19 Interface de escolha de algoritmo .....	73
Figura 20 Interface de análise de grafos construídos .....	74
Figura 21 Topologia gerada para o primeiro experimento .....	76
Figura 22 Nodos e arestas com restrição de energia nos conjuntos de parâmetros A, B e C... 78	
Figura 23 Nodos distantes para os conjuntos A, B e C .....	78
Figura 24 Nodos e arestas com restrição de energia nos conjuntos de parâmetros A, B e E... 81	
Figura 25 Nodos roteadores nos conjuntos de parâmetros A, B e E .....	81
Figura 26 Nodos distantes (número de saltos maior que 4) .....	82
Figura 27 Protótipos compatíveis com o protocolo (a) e <i>sniffer</i> (b).....	82
Figura 28 <i>Gateway</i> Emerson 1420A .....	83
Figura 29 Topologia da rede WirelessHART do experimento.....	84
Figura 30 Informações obtidas do dispositivo “1013 – ufrgs” .....	85
Figura 31 Grafos contidos nos <i>superframes</i> 0 e 1 .....	86
Figura 32 Lista de links do <i>superframe</i> 4.....	86
Figura 33 Nodos roteadores e gradiente de vizinhos do grafo de <i>uplink</i> .....	87
Figura 34 Nodos confiáveis do grafo de <i>uplink</i> .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Requisitos mínimos de memória para as tabelas da camada de enlace .....	36
Tabela 2	Comparativo entre os métodos de roteamento previstos no padrão WirelessHART	41
Tabela 3	Requisitos mínimos de memória para as tabelas da camada de rede .....	42
Tabela 4	Comandos relacionados à definição de rotas.....	43
Tabela 5	Parâmetros do experimento .....	75
Tabela 6	Conjunto de parâmetros para avaliação do algoritmo de <i>broadcast</i> modificado .....	76
Tabela 7	Comparação dos resultados para o grafo de <i>broadcast</i> modificado .....	77
Tabela 8	Conjunto de parâmetros para avaliação do algoritmo de <i>uplink</i> .....	79
Tabela 9	Comparação dos resultados para diferentes conjuntos de parâmetros.....	80

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AP: Access Point

ASN: Absolute Slot Number

DLPDU: Data-Link Protocol Data Unit

HCF: HART Communication Foundation

ISM: Industrial, Scientific and Medical

LLC: Logical Link Control

MAC: Medium Access Control

MIC: Message Integrity Code

NM: Network Manager

NPDU: Network Protocol Data Unit

RR: Registro da Rede

RSL: Received Signal Level

TDMA: Time Division Multiple Access

TTL: Time-To-Live

WMN: Wireless Mesh Network

## 1 INTRODUÇÃO

Os recentes avanços na eletrônica e nas tecnologias de comunicação sem fio têm permitido o desenvolvimento de diversos dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia e com capacidade de comunicação sem fio. Estes dispositivos, que possuem em seu circuito componentes para sensoriamento e atuação, comunicação via rádio e processamento de dados, podem apresentar comportamento autônomo, capacidade de formar redes e cooperar de acordo com diferentes modelos e arquiteturas (ARAMPATZIS; LYGEROS; MANESIS, 2005).

Estas redes sem fio, compostas por diversos dispositivos distribuídos em um espaço físico, podem possuir características como organização, configuração, recuperação e diagnóstico automáticos, que trazem robustez a este tipo de rede, permitindo grande flexibilidade de instalação e utilização em uma diversa gama de aplicações (WANG; ZHANG; WANG, 2006). Como exemplos do uso recentes destas redes sem fio recebem destaque aplicações militares (vigilância, reconhecimento), aplicações na área da saúde (monitoração de pacientes), aplicações ambientais (monitoração climática, agricultura de precisão, irrigação) e aplicações comerciais e industriais (alarmes, monitoração de máquinas, controle de processos) (AKYILDIZ et al., 2002; WANG; ZHANG; WANG, 2006).

Nos últimos anos ocorreu um grande interesse na utilização de redes sem fio em aplicações industriais. Como principais vantagens do uso deste tipo de rede na indústria estão a redução dos custos com cabeamento, a inserção simples e confiável de novos dispositivos de medição e controle nos sistemas, a realização de medições que antes eram proibitivas em termos de custos, a instalação de dispositivos em locais de difícil acesso e a mobilidade dos dispositivos dentro da planta (MULLER; NETTO; PEREIRA, 2011; CHEN; NIXON; MOK, 2010).

Segundo Han et al. (2010), existem três grupos de aplicações em execução em uma planta industrial: aplicações classe C envolvem monitoração; aplicações de classe B envolvem o controle de processos; e aplicações de classe A envolvem aplicações intrinsecamente seguras. O esforço atual é de permitir às aplicações de classe C e B que possam utilizar tecnologias sem fio, e no futuro s aplicações de classe A.

As aplicações de classe B podem ser divididas em controle supervisão, controle em malha aberta e controle em malha fechada. No entanto, para esta classe de aplicações, existem aspectos importantes a serem observados quando da utilização de redes sem fio: a confiabilidade da rede se faz importante a fim de garantir a entrega de informações dentro dos requisitos temporais e em situações onde há interferência, bloqueios de sinal e coexistência com outras redes; a segurança da rede e dos dados trafegados também é importante, a fim de evitar invasões e vazamento de informações; a velocidade de transferência de dados deve ser levada em conta, pois define os tempos de transmissão e atrasos na entrega dos dados; outra questão é a necessidade de baixo consumo de energia, já que muitos dispositivos utilizam baterias cuja substituição frequente pode envolver um custo significativo; por fim, é necessária a existência de um protocolo de comunicação aberto e padronizado, que permita que dispositivos de diversos fabricantes possam ser utilizados, o que reduz custos e riscos tanto para fabricantes como para usuários (MULLER et al., 2012; HAN et al., 2010).

Em 2007, a HART Communication Foundation lançou a norma HART 7, que conta com seções relativas ao WirelessHART, sendo este o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio para automação de processos industriais (CHEN; NIXON; MOK, 2010). O protocolo WirelessHART busca atender as necessidades para aplicações de classe C e B, e utiliza diversas técnicas que buscam aumentar a confiabilidade e a segurança das comunicações sem fio (MULLER, NETTO; PEREIRA, 2011). Centralmente a uma rede WirelessHART, encontra-se o *Network Manager* (NM), que é responsável pelo gerenciamento global da rede,

controle da admissão de novos dispositivos e alocação das comunicações de acordo com as necessidades dos dispositivos e da aplicação. O gerenciador ainda adapta dinamicamente a rede, de acordo com mudanças nas condições de operação.

Dentre as diversas funções atribuídas ao NM, tem destaque o roteamento. O roteamento é o processo de determinar caminhos para o tráfego de dados entre um dispositivo de origem e um dispositivo de destino presentes em uma rede (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). A rede WirelessHART é do tipo *mesh*, onde todos os dispositivos têm a capacidade de serem roteadores de mensagens. Periodicamente, os dispositivos informam ao NM suas condições de operação, suas listas de vizinhos e as estatísticas das comunicações realizadas. Com base nestas informações, o gerenciador mantém um registro atualizado da topologia global da rede, e pode definir quais rotas serão utilizadas para as comunicações.

O roteamento consiste em um componente crítico do sistema, já que deve prover meios de definir caminhos adequados para as comunicações e aperfeiçoar, junto com o escalonador, a utilização de recursos (LI et al., 2011). A utilização de rotas com redundância de caminhos, de modo que cada dispositivo possua diversos vizinhos pelos quais o mesmo pode enviar e receber suas mensagens, é uma das técnicas utilizadas para aumentar a confiabilidade das comunicações do protocolo (CHEN; NIXON; MOK, 2010).

O roteamento para redes sem fio tem sido objeto de pesquisa por diversos grupos, já que este tipo de rede possui diversos aspectos a serem considerados na definição das rotas, que trazem complexidade ao problema (PARISSIDIS et al, 2009). Conforme comentado anteriormente, estas redes sem fio são compostas por diversos dispositivos de baixo custo, que possuem diferentes restrições no que diz respeito à sua capacidade de processamento, memória e fonte de energia. Estas características dos dispositivos devem ser levadas em conta na definição das rotas (SAPUTRO; AKKAYA; ULUDAG, 2012). As características das comunicações sem fio também devem ser consideradas, já que estas redes estão mais

propensas a falhas de comunicação do que as redes cabeadas, em decorrência da mobilidade dos dispositivos, alterações na propagação do meio físico e interferências (WANG; SEAH; KONG, 2007; HAN et al., 2011). Características que dependem da aplicação podem também ser relevantes na definição das rotas: latência, confiabilidade, taxa de transferência de dados, escalabilidade da rede, adaptabilidade, utilização de recursos, consumo de energia, entre outros (KUMAR; CHAUHAN, 2011).

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

As características das comunicações sem fio e dos dispositivos, bem como a combinação de diferentes objetivos de definição e os diversos requisitos a serem atendidos nas aplicações trazem complexidade ao problema do roteamento. São necessárias diversas análises por parte do projetista de redes industriais de comunicação durante o processo de desenvolvimento de equipamentos e de algoritmos e na utilização dos mesmos em aplicações reais. Um ambiente para avaliação dos algoritmos e monitoração da rede operacional pode auxiliar neste processo.

Os algoritmos de roteamento com redundância de rotas propostos na literatura (SRINIVAS; MODIANO, 2005; WANG; SEAH; KONG, 2007; ENYEDI; RÉTVÁRI, 2009; CHEN et al., 2011; MA et al., 2012) são avaliados em diferentes simuladores e cenários, dificultando a comparação e análise dos mesmos. Além disto, alguns destes algoritmos não podem ser aplicados diretamente às redes WirelessHART, em função dos requisitos mais restritos de confiabilidade exigidos nas comunicações do protocolo (HAN et al., 2011).

Os gerenciadores de rede comerciais e os ambientes para monitoração de redes sem fio apresentam limitações na apresentação de informações sobre as estratégias de roteamento utilizadas e sobre as condições atuais da rede em operação sendo monitorada, dificultando a identificação e resolução de problemas relacionados à instalação e operação da rede (CHEN et

al., 2008). As ferramentas de monitoração (RINGWALD, RÖMER, VITALETTI; 2007; CHEN et al., 2008; KRÄTZIG et al., 2009; FERRARI et al., 2009; HAN et al., 2009; YU, 2010) buscam capturar os pacotes trafegados na rede com o objetivo de descobrir informações sobre a mesma, mas não abordam a obtenção de informações contidas nos pacotes de redes com protocolos que possuem encriptação, como no caso do protocolo WirelessHART. Isto impossibilita a descoberta das informações sobre as condições de operação da rede.

A proposta da presente dissertação é desenvolver um ambiente integrado para avaliação de estratégias de roteamento para redes WirelessHART, que possibilite tanto a análise de rotas sendo utilizadas em uma rede real em funcionamento, bem como a análise de rotas construídas a partir de diferentes topologias de rede por algoritmos de roteamento sendo analisados e estudados no ambiente.

## 1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos do ambiente proposto são os seguintes:

- a) Auxiliar no desenvolvimento, ajuste e comparação de algoritmos para definição de rotas em redes WirelessHART, permitindo a identificação de problemas e dos melhores ajustes dos algoritmos para determinadas topologias e aplicações;
- b) Auxiliar no processo de instalação e diagnóstico de redes WirelessHART em operação, identificando aspectos problemáticos relacionados aos dispositivos, à topologia da rede, à conectividade e às rotas sendo utilizadas para comunicação dos dados.

Esta dissertação é dividida da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a conceituação teórica sobre grafos e redes sem fio do tipo *mesh*; o capítulo 3 apresenta uma análise de



estado da arte sobre ferramentas de monitoração e algoritmos confiáveis de roteamento para redes sem fio; o capítulo 4 apresenta um detalhamento do protocolo WirelessHART com enfoque no roteamento; o capítulo 5 apresenta a proposta do ambiente desenvolvido, dos experimentos realizados e das métricas propostas para a avaliação das rotas; o capítulo 6 apresenta a implementação do ambiente e os resultados obtidos com alguns estudos de caso e o capítulo 7 apresenta as conclusões da dissertação e propostas de trabalhos futuros.

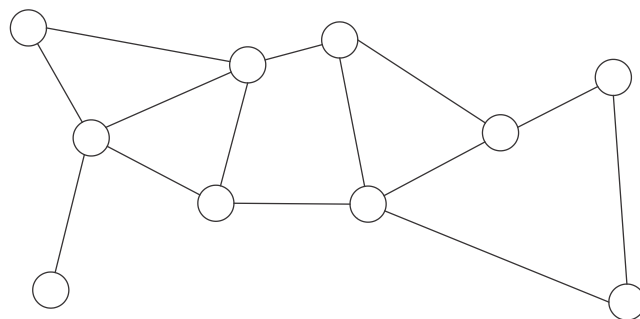
## 2 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma conceituação teórica sobre grafos, utilizada ao longo do trabalho. Uma definição sobre redes sem fio do tipo *mesh* também é apresentada.

### 2.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS SOBRE GRAFOS

Dentre os diferentes modelos que são comumente utilizados para a modelagem de redes de comunicação visando permitir uma melhor análise das características das mesmas, o formalismo de grafos é provavelmente o mais utilizado, uma vez que permite um mapeamento natural e intuitivo das redes de comunicação. Redes sem fio também podem ser modeladas usando grafos.

Formalmente, um grafo  $G = (V, E)$  é uma estrutura composta por vértices  $V$  e por arestas  $E$ . Os vértices  $V$  representam os dispositivos ou nodos presentes na rede, enquanto que as arestas  $E$  representam o conjunto de ligações ou *links* entre os dispositivos. Uma aresta só existe no grafo se os dois dispositivos são capazes de se comunicar um com o outro. A Figura 1 apresenta a topologia de uma rede representada por grafos.



**Figura 1** Topologia de uma rede representada por grafos

#### 2.1.1 Classificação de grafos

Duas maneiras de classificação de grafos são utilizadas neste trabalho:

- a) Quanto à orientação: Os grafos podem ser classificados em dirigidos ou não dirigidos. São dirigidos quando suas arestas têm um sentido definido, ou seja, um vértice definido como extremidade inicial (origem) e o outro vértice de extremidade final (destino). As arestas orientadas são representadas por uma seta indicando o sentido das mesmas. Nos grafos não dirigidos não existe esta noção de sentido único;
- b) Quanto à escala ou valor: Os grafos podem ser valorados ou não. Nos grafos valorados os vértices e arestas podem receber valores, que representam pesos ou custos associados.

### 2.1.2 Elementos de um grafo

Os seguintes conceitos de grafos são utilizados neste trabalho:

- a) Vértice adjacente, ou vizinho: dois vértices são considerados adjacentes, ou vizinhos, se os mesmos possuem uma aresta que os une no grafo;
- b) Aresta ou vértice incidente: Uma aresta ou vértice é incidente a outro vértice quando este último é destino ou origem da aresta. Sendo o nodo de origem representado como  $i$  e o nodo de destino é representado como  $j$ , a aresta é representada como  $e_{i,j}$ ;
- c) Cadeia: corresponde a uma sequência de arestas de um grafo (dirigido ou não), tal que cada aresta tem um vértice em comum com a aresta antecedente (à exceção do primeiro) e outro vértice em comum com a aresta subsequente (à exceção do último);
- d) Caminho ou rota: corresponde a uma cadeia na qual todas as arestas possuem o mesmo sentido, sendo então, orientado;
- e) Ciclo: É uma cadeia na qual o nó inicial e o nó final se confundem.

### 2.1.3 Características estruturais

As seguintes características estruturais de grafos são utilizadas neste trabalho:

- a) Um grafo é conexo quando todo par de vértices do grafo pode ser ligado por uma cadeia;
- b) Uma árvore é um grafo direcionado que não possui ciclos;

## 2.2 DEFINIÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS SOBRE REDES SEM FIO DO TIPO MESH

Redes sem fio do tipo *mesh*, também conhecidas como *Wireless Mesh Networks* (WMN), consistem em um tipo de rede sem fio onde todos os dispositivos presentes na rede possuem a capacidade de atuarem como roteadores de mensagens, ou seja, são capazes de receber pacotes originados por outros dispositivos da rede e propagá-los em direção ao destinatário dos mesmos. Em sua maioria, estas redes possuem capacidade de auto-organização e de autoconfiguração dinâmicas, onde os nodos estabelecem de maneira automática as suas conexões com os vizinhos. Tais características trazem vantagens como fácil manutenção da rede, fácil inserção de novos nodos, robustez e confiabilidade (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).

Segundo Waharte et al. (2006), nas WMN o tráfego de dados flui, em geral, dos nodos em direção ao *gateway* e vice-versa. Li et al. (2011) complementa que em WMN muitos dos dispositivos estão ligados à uma fonte contínua de energia (à rede elétrica, por exemplo) e formam uma infraestrutura fixa de comunicação.

Dois mecanismos de entrega de mensagens são tipicamente utilizados nas WMN:

- a) *Unicast*: quanto um nodo envia uma mensagem para um nodo destinatário em específico;
- b) *Broadcast*: quando um nodo envia uma mensagem que tem como destino todos os nodos presentes na rede.

Três tipos de grafos de roteamento são comumente utilizados em redes *mesh* que possuem um *gateway*:

- a) Grafo de *broadcast*: É um grafo que conecta o *gateway* em direção a todos os dispositivos. É utilizado para disseminar configurações comuns e mensagens de controle para toda a rede;
- b) Grafo de *uplink*: É um grafo que conecta todos os dispositivos em direção ao *gateway*, e é utilizado pelos nodos para envio de repostas de comandos de configuração, requisições e dados de processo ao *gateway*.
- c) Grafo de *downlink*: É um grafo que conecta o *gateway* em direção a um dispositivo específico, e é utilizado pelo *gateway* para enviar configurações, comandos e valores de ajuste aos nodos atuadores.

### 3 ANÁLISE DE ESTADO DA ARTE

A definição do estado da arte relacionada com esta dissertação passa pela análise de trabalhos desenvolvidos nos campos de monitoração e análise de redes sem fio, bem como de trabalhos acadêmicos relacionados a algoritmos de roteamento confiáveis para redes sem fio.

#### 3.1 MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE REDES SEM FIO

A instalação e configuração de redes sem fio em aplicações reais é uma tarefa complexa, em função de diversos problemas presentes em redes sem fio (interferências nas comunicações, alterações na propagação do meio físico, coexistência) e em função das características e problemas dos dispositivos da rede (fonte de energia, características de *hardware*, *bugs* no *software*) (RINGWALD, RÖMER, VITALETTI, 2007). Estes problemas desencadeiam uma série de falhas que podem afetar o desempenho da rede.

Para diagnosticar e identificar problemas, é necessário inspecionar o comportamento da rede e dos dispositivos durante sua operação real. O acesso às informações sobre o estado da rede durante a aplicação real é restrito, e é dificultado em grande parte pela falta de ferramentas que forneçam as informações relevantes à análise (CHEN et al., 2008).

Dois métodos de monitoração de redes sem fio são propostos na literatura, com o intuito de facilitar a obtenção de informações para análise e diagnóstico. Estes métodos, conhecidos como ativo e passivo, envolvem a coleta de dados durante a operação da rede, para análise *online* (durante a operação da rede) e *offline* (posterior à operação, a partir de arquivos com os dados coletados). Em geral, os dados coletados recebem uma estampa temporal, que indica o instante em que foram gerados pelos dispositivos ou recebidos pelo sistema de monitoração.

O método ativo consiste na instrumentação dos dispositivos com o software de monitoração. Os dados de diagnóstico são enviados pelos dispositivos ao sistema de

monitoração utilizando o mesmo canal de comunicação ou um canal de comunicação secundário. Este método de monitoração apresenta diversas limitações: Problemas na rede, como perdas de mensagens e partições afetam o resultado da monitoração; Recursos limitados de energia, memória e capacidade de processamento dos dispositivos restringem a capacidade de inspeção; A instrumentação dos dispositivos altera o comportamento da rede, assim como a utilização do mesmo canal de comunicação para o envio dos diagnósticos; Por fim, a existência de um canal secundário de comunicação pode não estar disponível nos dispositivos (YU, 2010; CHEN et al., 2008).

O método passivo utiliza um dispositivo conhecido como *sniffer*, que é instalado na área de cobertura da rede com a função de capturar o tráfego de pacotes da camada física. Os pacotes capturados são utilizados para se construir uma visão geral da rede e das suas condições de operação. Este método de monitoração não interfere no comportamento e não utiliza recursos da rede. O método possui como limitações a perda de pacotes, causada pelas características da rede sem fio e pela área de cobertura do *sniffer*. A utilização de múltiplos *sniffers* pode melhorar a qualidade e a área de cobertura da captura, mas impõe a necessidade um mecanismo de sincronização de relógios, para que as estampas temporais aplicadas aos pacotes tenham a mesma base de tempo (YU, 2010).

### **3.1.1 Trabalhos acadêmicos relacionados à monitoração passiva de redes sem fio**

A necessidade de inspeção e monitoração de redes sem fio têm levado as comunidades científicas e industriais ao desenvolvimento de diversos trabalhos que visam avaliar as condições de operação destas redes de maneira passiva, já que o método tem a vantagem de não alterar o comportamento da rede sendo monitorada. Os trabalhos encontrados envolvem o desenvolvimento de equipamentos para a captura passiva de pacotes e o desenvolvimento de ferramentas para avaliação, que extraem informações relevantes a partir dos pacotes

capturados. A seguir são apresentados diversos trabalhos acadêmicos, que caracterizam o estado da arte na área de monitoração passiva de redes sem fio. Foi dado enfoque a trabalhos relacionados a redes que utilizam a camada física da IEEE 802.15.4 (IEEE, 2009), mesma camada utilizada pelo protocolo WirelessHART.

O artigo de Ringwald, Römer e Vitaletti (2007) apresenta uma ferramenta para detecção e identificação de problemas em redes sem fio do tipo Bluetooth. A captura das informações é feita através de múltiplos *sniffers* que possuem dois rádios, sendo um utilizado para a captura dos pacotes trafegados na rede e outro para transmissão dos pacotes coletados ao sistema de monitoração através de um canal de comunicação secundário. Uma arquitetura é descrita para a captura dos pacotes, decodificação e detecção de problemas nos dispositivos e na topologia da rede. Uma árvore de decisão é utilizada para a identificação das possíveis causas para os problemas. Por fim, as condições de operação da rede são apresentadas em uma interface gráfica através de um grafo que representa a topologia da rede, onde as cores dos dispositivos representam as suas condições de operação.

O trabalho de Chen et al. (2008) descreve uma arquitetura de *software* para a monitoração passiva de redes sem fio. A arquitetura aborda a fusão das capturas de múltiplos *sniffers* em uma captura global, organizada temporalmente. A partir desta captura global, diferentes análises de alto nível são realizadas através da filtragem das mensagens. O trabalho aborda em detalhes a questão do sincronismo temporal necessário pelos *sniffers* e um método para a fusão dos pacotes na captura global, de modo a remover os pacotes repetidos que foram capturados por mais de um *sniffer*.

Um dispositivo para a captura passiva de pacotes da IEEE 802.15.4 é proposto por Krätzig et al. (2009). O dispositivo é capaz de monitorar simultaneamente os 16 canais disponíveis na camada física. Os pacotes capturados são transferidos via interface Ethernet para um sistema de monitoração em operação em um computador, e armazenados em um



arquivo em formato de planilha. Uma interface gráfica é disponibilizada para a visualização do tráfego de dados de cada canal em função do tempo.

O artigo de Ferrari et al. (2009) também apresenta um dispositivo para a captura passiva de pacotes da IEEE 802.15.4, capaz de monitorar simultaneamente os 16 canais disponíveis. Um mecanismo de sincronismo de relógio é adicionado ao sistema para permitir que múltiplos *sniffers* sejam utilizados em uma análise. Cada *sniffer* possui uma interface de comunicação Ethernet pela qual os pacotes capturados são transferidos para um computador. O trabalho aborda exclusivamente o desenvolvimento do dispositivo e não propõe uma solução para análise e visualização dos dados capturados.

O artigo de Han et al. (2009) descreve o processo para certificação de dispositivos WirelessHART, realizado através de uma ferramenta desenvolvida pela HART Communication Foundation (HCF). A ferramenta é composta por um equipamento que se comunica com o dispositivo sobre teste, realizando configurações e diagnósticos. Um *sniffer* desenvolvido pela HCF é utilizado para a coleta dos pacotes trafegados durante os testes para uma análise mais aprofundada.

Yu (2010) apresenta uma arquitetura flexível de *software* para diagnóstico e análise passiva para diversos tipos de redes sem fio. A arquitetura aborda a recepção e fusão dos dados, decodificação, filtragem, detecção de eventos, classificação e apresentação visual dos pacotes. Uma linguagem de definição é proposta para descrição da estrutura dos pacotes da rede, filtragem de pacotes e de eventos e para classificação dos dados.

### **3.1.2 Soluções comerciais relacionadas à monitoração passiva de redes sem fio**

Os trabalhos apresentados anteriormente exibem o estado da arte do ponto de vista acadêmico. Uma vez que diversos protocolos de redes sem fio utilizam a camada física da norma IEEE 802.15.4, não é desprezível o número de soluções comerciais disponíveis para

análise passiva destas redes. Dentre as principais ferramentas, destacam-se três: Sensor Network Analyser, Mesh Decoder e Wi-Analys (DAINTREE NETWORKS, 2009; FRONTLINE, 2011; CHEN; NIXON; MOK, 2010).

A ferramenta Sensor Network Analyser, da empresa Daintree Networks, consiste em uma plataforma que contém um *sniffer* e um programa de computador que provê meios para visualização e verificação de conformidade para equipamentos que utilizam o protocolo ZigBee. Através de um mecanismo flexível de decodificação, é possível utilizar a ferramenta para a análise de outros protocolos que utilizam o meio físico da IEEE 802.15.4.

De maneira similar, a empresa Frontline fornece a ferramenta Mesh Decoder, que consiste em um *sniffer* e um software de computador que permitem a análise e visualização de pacotes capturados em uma rede que utiliza o meio físico IEEE 802.15.4. A ferramenta possui mecanismos específicos para decodificar pacotes do protocolo ZigBee.

A ferramenta Wi-Analys é comercializada pela HCF para desenvolvedores de equipamentos compatíveis com o padrão WirelessHART. A ferramenta, composta por um *sniffer* e por um software de coleta, permite a captura do tráfego nos 16 canais da IEEE 802.15.4 e a exibição dos mesmos em formato de planilha, onde o conteúdo dos pacotes WirelessHART pode ser analisado.

### **3.2 TRABALHOS RELACIONADOS AO ROTEAMENTO CONFIÁVEL PARA REDES SEM FIO**

O roteamento confiável utilizado em redes sem fio consiste essencialmente em um tipo de roteamento multicaminho, onde cada nodo possui dois ou mais vizinhos pelos quais ele encaminha pacotes em direção ao destinatário ou recebe pacotes de um nodo de origem. Segundo Srinivas e Modiano (2005), a confiabilidade das comunicações aumenta com esta redundância de caminhos.

A determinação de rotas confiáveis para redes sem fio é abordada em diversos trabalhos acadêmicos. A seguir são apresentados os trabalhos que caracterizam o estado da arte na definição de rotas confiáveis para redes sem fio.

O artigo de Srinivas e Modiano (2005) apresenta um algoritmo para encontrar duas rotas simples com mínimo consumo de energia para redes sem fio. Para cada aresta da topologia da rede é atribuído um custo de energia que serve de base para definição das rotas. As rotas são definidas de modo que as arestas utilizadas na primeira rota não sejam utilizadas na segunda.

O trabalho de Wang, Seah e Kong (2007) aborda a construção de um escalonamento para redes sem fio que está relacionado à confiabilidade das rotas. O trabalho define que cada nodo deve possuir dois vizinhos para encaminhar o pacote em direção ao destinatário. Um modelo de decisão é utilizado para determinar um vizinho principal a ser utilizado, a partir de informações das condições atuais da rede e dos caminhos disponíveis. O vizinho secundário é utilizado se o caminho principal falhar. Em seguida é gerado o escalonamento das comunicações. Os resultados obtidos indicam que a confiabilidade fim a fim aumenta significativamente com a escolha de um vizinho principal.

O trabalho de Enyedi e Rétvári (2009) apresenta um algoritmo para a construção de duas árvores redundantes utilizando como critério de escolha para as rotas o número de saltos, que corresponde à distância, em número de enlaces, entre dois dispositivos. As duas árvores são definidas de modo que as mesmas não possuam arestas em comum.

Em (CHEN et al., 2011) é proposta a utilização de duas métricas para avaliar a confiabilidade de diferentes rotas, de modo a auxiliar na instalação e disposição dos nodos em aplicações reais de redes sem fio. A primeira métrica estima a probabilidade de entrega fim a fim de pacotes em mensagens do tipo *broadcast*. A segunda métrica estima a mesma probabilidade em mensagens do tipo *unicast*. Tendo como base a segunda métrica, é proposto

um algoritmo para criação de um grafo direcionado acíclico, com redundância de rotas, para o envio de pacotes ao destinatário. Os resultados obtidos no trabalho indicam que as métricas definidas aumentam a confiabilidade fim a fim na entrega de pacotes em relação à métrica de menor número de saltos.

O trabalho de Han et al. (2011) aborda a construção de grafos de *broadcast*, *uplink* e *downlink* com redundância para redes sem fio. A métrica utilizada para construção dos grafos busca diminuir o número de saltos entre o *gateway* e os dispositivos. O grafo de *broadcast* é construído de modo que cada nodo possa receber as mensagens através de dois vizinhos. O grafo de *uplink* é construído de modo que cada nodo possa enviar suas informações em direção ao *gateway* através de dois vizinhos. O grafo de *downlink* é específico para cada dispositivo receber mensagens do *gateway*, e também é construído de modo que cada nodo intermediário possa rotear os pacotes por dois vizinhos. Um ciclo é permitido no grafo de *downlink* entre os dois vizinhos que se comunicam com o dispositivo final, de modo proporcionar a estes últimos vizinhos caminhos redundantes. O trabalho propõe uma extensão à norma WirelessHART de modo a reduzir a configuração necessária nos grafos de *downlink*. Um escalonador que busca diminuir a configuração necessária dos dispositivos também é proposto.

Por fim, o trabalho de Ma et al. (2012) propõe a adição de rotas redundantes em redes sem fio que utilizam a estrutura do tipo árvore. Neste tipo de topologia, a falha de um nodo roteador (intermediário à árvore) compromete as comunicações dos nodos sucessores com o nodo raiz da rede. Para resolver o problema, todos os nodos definem um vizinho como roteador principal e outro utilizado como roteador alternativo. A escolha do vizinho principal e secundário é realizada de acordo com o valor do *Received Signal Level* (RSL), ou nível de sinal recebido dos dispositivos.

## 4 O PADRÃO WIRELESSHART

Este capítulo apresenta uma breve descrição das características principais do protocolo WirelessHART, dando enfoque nas questões relacionadas ao roteamento.

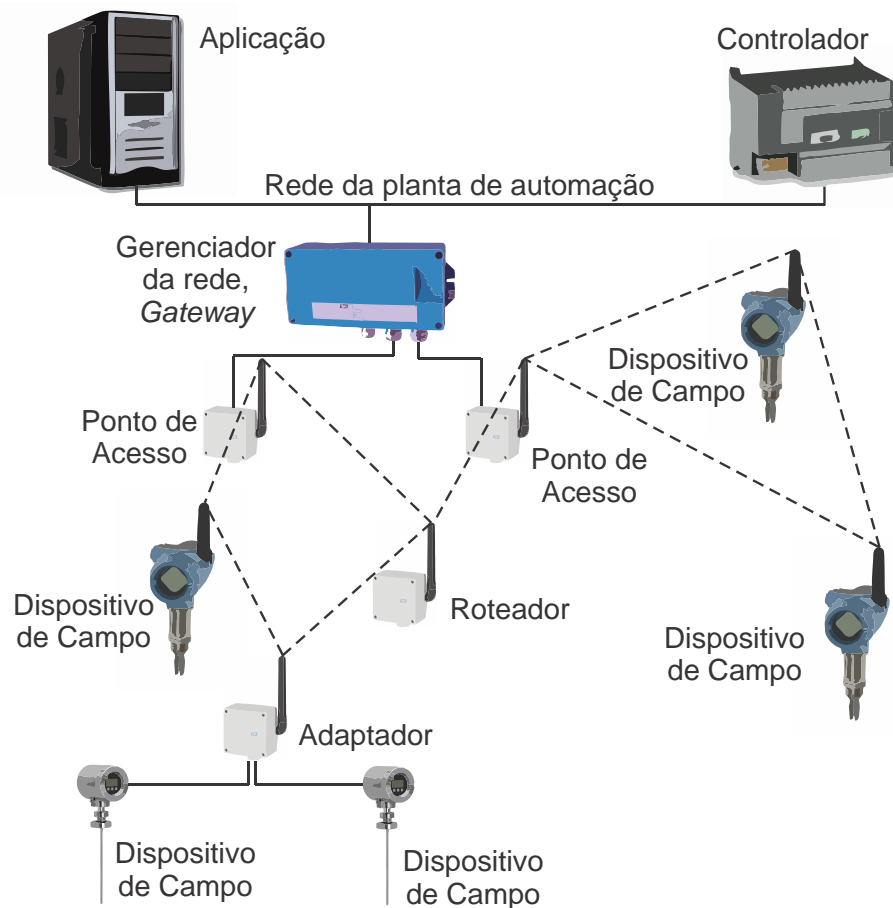
### 4.1 DOCUMENTAÇÃO DA NORMA HART 7

A versão 7 do padrão HART foi lançada em 2007, e adicionou a capacidade de comunicação sem fio, através da introdução do padrão WirelessHART. Os documentos da norma que especificam as comunicações sem fio do protocolo são:

- a) HCF\_SPEC-65 – 2.4 GHz DSSS O-QPSK *Physical Layer Specification*: Especifica características da camada física (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007);
- b) HCF\_SPEC-75 – TDMA *Data-Link Layer Specification*: Especifica características da camada de enlace (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007a);
- c) HCF\_SPEC-85 – *Network Management Specification*: Especifica as características da camada de rede, de transporte e de aplicação (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009);
- d) HCF\_SPEC-155 – *Wireless Command Specification*: Define os comandos da camada de aplicação relacionados às comunicações sem fio (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008b).
- e) HCF\_SPEC-290 - *WirelessHART Device Specification*: Define as características de funcionamento dos diferentes tipos de dispositivos, do ponto de vista de comandos que devem ser suportados e das funcionalidades (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008c).

## 4.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS

Esta seção apresenta uma breve descrição dos dispositivos presentes em uma rede WirelessHART, especificados pela norma (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008c). Uma representação de uma rede WirelessHART ligada à rede da planta de automação é apresentada na Figura 2.



**Figura 2** Topologia típica de uma rede WirelessHART

Os dispositivos de campo são dispositivos diretamente ligados à planta, possuindo sensores ou atuadores. É um produtor ou consumidor de pacotes. Já os adaptadores tem como função interligar os dispositivos HART convencionais (cabeados) à rede WirelessHART.

O *Access Point* (AP), ou ponto de acesso, é um tipo de dispositivo que conecta fisicamente a rede sem fio ao *gateway*. O *gateway* é o dispositivo que conecta a rede WirelessHART à rede da planta de automação industrial, permitindo o fluxo de dados entre as

duas redes, e tem a função de converter as informações de um protocolo de comunicação para outro (ou seja, do protocolo sem fio para o protocolo da rede cabeada da planta de automação e vice versa). O *gateway* provê às aplicações da planta de automação acesso aos dados dos dispositivos da rede sem fio. Suas principais características são:

- a) Possuir um ou mais pontos de acesso, já que o *gateway* não possui ligação direta com a rede sem fio;
- b) Ser o ponto de origem e destino para o tráfego de dados da rede WirelessHART;
- c) Conectar a rede da planta de automação à rede sem fio;
- d) Possuir uma conexão com o NM;
- e) Encaminhar comandos gerados e direcionados ao NM, contendo notificações, comandos de diagnóstico e gerenciamento da rede;
- f) Armazenar localmente notificações, alarmes e as variáveis de processo;
- g) Ser a fonte de sincronização de relógio da rede;
- h) Suportar os adaptadores WirelessHART.

Os roteadores são dispositivos que têm a função de encaminhar pacotes de um dispositivo da rede para outro. Em geral não são necessários, já que todos os dispositivos de campo possuem a capacidade de roteamento. Porém, podem ser benéficos para expandir o tamanho da rede e reduzir o consumo de energia e a utilização de recursos dos dispositivos de campo.

O *handheld* é o dispositivo utilizado para parametrização, monitoração e manutenção dos dispositivos da rede.

Por fim, o NM é o dispositivo responsável pelo gerenciamento da rede WirelessHART e pela configuração dos dispositivos presentes na mesma. O gerenciamento é realizado através

de diversos comandos enviados e recebidos dos dispositivos presentes na rede. Suas principais funções são:

- a) Inicializar a rede e prover meios para que os dispositivos se juntem à rede;
- b) Gerenciar a topologia da rede e as rotas utilizadas para troca de informações entre os dispositivos da rede, com base em informações de diagnóstico enviadas pelos dispositivos;
- c) Gerenciar recursos de comunicação para que o tráfego de dados de gerenciamento e de dados de processo possa ser realizado, de acordo com as demandas;
- d) Obter informações sobre as condições de operação da rede e as estatísticas sobre as comunicações, pelas quais o NM pode realizar modificações no roteamento e escalonamento;
- e) Fornecer meios para que o usuário possa obter dados em tempo de execução sobre a rede e realizar modificações nas configurações do NM;
- f) Possuir uma conexão direta com o *gateway* que o habilita a enviar e receber mensagens dos dispositivos da rede;
- g) Estabelecer conexões seguras entre os dispositivos, fornecendo chaves de segurança utilizadas da encriptação das informações trocadas entre NM, *gateway* e dispositivos.

### **4.3 CAMADAS DO PROTOCOLO WIRELESSHART**

A Figura 3 apresenta a arquitetura do protocolo WirelessHART de acordo com o modelo ISO/OSI. O protocolo inclui cinco camadas do modelo: camada física, camada de enlace, camada de rede, camada de transporte e camada de aplicação (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007).



Camada OSI	Função	WirelessHART
Aplicação	Provê ao usuário aplicações que utilizam a rede	Orientado a comandos. Tipos de dados pré-definidos e procedimentos de aplicação
Apresentação	Converte dados de aplicação entre formatos locais e de rede	
Sessão	Gerenciamento de serviços de conexão para aplicações	
Transporte	Provê transferência transparente de mensagens	Auto-segmentação de dados, transporte confiável, tamanho de segmentos negociável
Rede	Roteamento fim a fim de pacotes. Resolução de endereços de rede	Otimização de energia, rotas redundantes, rede <i>mesh</i> com recuperação automática
Enlace	Estabelece estrutura dos pacotes, detecção de erros, arbitração de barramento	Segurança e confiabilidade, TDMA/CSMA sincronizado, <i>channel hopping</i> , confirmação de recebimento
Física	Conexões mecânicas e elétricas Transmissão de bits	2,4 Ghz <i>wireless</i> , rádios baseados na 802.15.4, potência transmissão 10 dBm

**Figura 3** Camadas do protocolo WirelessHART

### 4.3.1 Camada física

A camada física do protocolo é baseada na camada física do protocolo IEEE 802.15.4 (IEEE, 2009). Esta camada define as características do rádio, como intensidade de sinal e sensibilidade dos dispositivos. O protocolo opera sobre a banda de frequências *Industrial, Scientific, Medical* (ISM) na faixa de 2.400 a 2.483,5 MHz a uma taxa de 250 kbps. Os canais utilizados são numerados de 11 a 25, com uma diferença de 5 MHz entre cada canal. O canal 26, disponível na IEEE 802.15.4, não é utilizado por não ser permitido em alguns países. Todos dispositivos devem possuir uma potência de transmissão mínima de 10 dBm e uma sensibilidade mínima de -85 dBm (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007).

### 4.3.2 Camada de enlace

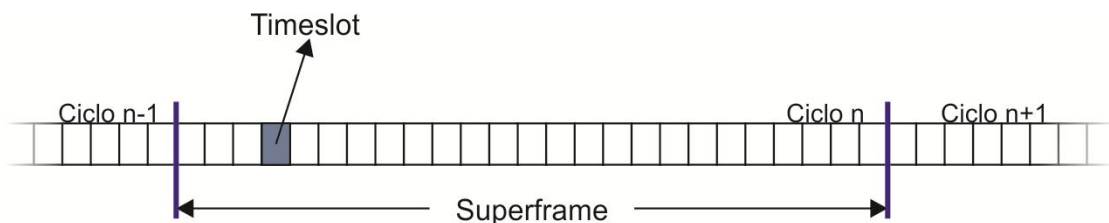
Esta camada define meios confiáveis para a transmissão de pacotes entre dois dispositivos da rede, detectando erros de transmissão que podem ocorrer na camada física (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008a). Pode ser dividida em duas subcamadas:

- a) Camada *Logical Link Control* (LLC): controla o formato dos quadros, a estrutura dos endereços dos dispositivos e serviços de segurança para garantir a integridade das mensagens e detecção de erros;

- b) Camada *Medium Access Control* (MAC): Coordena os instantes nos quais o dispositivo pode transmitir mensagens.

A camada de enlace utiliza o método de acesso ao meio *Time Division Multiple Access* (TDMA) de modo a prover comunicação determinística e livre de colisões. Os canais de comunicação são divididos em segmentos de tempo (*timeslots*) de 10 ms nos quais são realizadas as comunicações entre os dispositivos. A camada mantém uma contagem do número absoluto de *timeslots* que já ocorreram desde a inicialização da rede. Este número é conhecido como *Absolute Slot Number* (ASN). O padrão utiliza o conceito de *channel hopping*, no qual saltos de canais são realizados a cada *timeslot*, de modo a reduzir os efeitos das interferências.

O conceito de *superframe*, comum em protocolos que utilizam TDMA, descreve uma sequência de *timeslots* consecutivos que se repetem periodicamente. O período de um *superframe* é determinado pelo seu comprimento em número de *timeslots*. Os *superframes* iniciam a partir do ASN 0 (no momento em que a rede é criada). Diferentes *superframes* com diferentes comprimentos podem ser configurados nos dispositivos. A Figura 4 ilustra um exemplo de *superframe* com comprimento de 25 *timeslots*, se repetindo periodicamente. O período do ciclo é, portanto, de 250 ms.



**Figura 4** Representação de um *superframe*

Os *timeslots* disponíveis no *superframe* são alocados para a comunicação entre os dispositivos de acordo com suas demandas. Quando dois nodos possuem um mesmo *timeslot* configurado para se comunicarem um com o outro, diz-se que os mesmos possuem um *link*.

Cada *timeslot*, ou *link*, pode ser descrito por um vetor que consiste nos seguintes itens:

- a) *Superframe id*: identificador do *superframe* ao qual o *timeslot* pertence;
- b) Índice: define o número do *timeslot* dentro do *superframe*;
- c) Tipo: define qual é o tipo de *slot* para cada dispositivo (se é usado para transmissão ou recepção de dados, ou é inativo);
- d) Origem e destino: identifica qual o dispositivo transmissor dentro do *timeslot* e o dispositivo receptor;
- e) *Offset* de canal: provê o canal lógico a ser utilizado na comunicação.

Dentro do período do *timeslot*, estão previstos o envio de um pacote pelo dispositivo de origem, e a confirmação do recebimento pelo destinatário. Com a confirmação, é possível detectar falhas nas transmissões. Se o nodo que envia a mensagem não recebe a confirmação do nodo destinatário, o mesmo pode reenviar o pacote no próximo *link* disponível com o destinatário.

Os *links* ainda podem ser do tipo compartilhado, onde diversos dispositivos competem pela transmissão a um dispositivo receptor. Neste caso, se dois dispositivos transmitirem simultaneamente no *link* compartilhado, irá ocorrer uma colisão que invalidará o conteúdo do pacote recebido no dispositivo receptor. O receptor não irá enviar a confirmação de recebimento e os transmissores deverão retransmitir o pacote no próximo *link* disponível.

Um *link* do tipo *broadcast* possui um nodo transmissor e múltiplos nodos receptores. Quando o endereço de destino de um pacote é do tipo *broadcast*, os dispositivos receptores não enviam a confirmação de recebimento dentro do *timeslot*.

O padrão utiliza o conceito de *channel blacklisting*, no qual os canais afetados por interferências podem ser desabilitados pelo operador. Em função do *blacklisting*, cada nodo possui uma tabela contendo os canais ativos da rede. Tendo de base esta tabela de canais ativos e o *offset* de canal do *timeslot*, o nodo pode determinar o canal físico a ser utilizado na sua comunicação.

#### 4.3.2.1 Tabelas de comunicação

Os dispositivos mantêm uma série de tabelas na camada de enlace: tabelas de *links* e *superframes*, que indicam os instantes onde são permitidas as comunicações do dispositivo; tabelas de vizinhos, que fornecem estatísticas sobre as transmissões e indicam potenciais nodos para comunicação; e a tabela de grafos, que contém configurações de roteamento de mensagens. O tamanho mínimo destas tabelas, especificado na norma, é mostrado na Tabela 1, e especifica o número mínimo de estruturas de dados de cada tipo que um dispositivo deve ser capaz de suportar.

**Tabela 1 Requisitos mínimos de memória para as tabelas da camada de enlace**

Descrição	Número mínimo
Vizinhos	32
<i>Superframes</i>	16
Número total de <i>links</i>	64
Grafos	32
Pares de grafos-vizinhos	128
<i>Buffer</i> de pacotes	16

Fonte: HART COMMUNICATION FOUNDATION (2008a, p. 47).

#### 4.3.2.2 Tipos de pacotes

O pacote da camada de enlace é conhecido como *Data-Link Protocol Data Unit* (DLPDU). Diversos tipos de pacotes DLPDU são especificados na norma: *Advertise*, utilizado para divulgação de informações a dispositivos que querem entrar na rede; *Acknowledge*, utilizado para confirmação de recebimento de pacotes; *Data*, utilizado para envio de informações da camada de aplicação; *Keep-Alive*, utilizado para os dispositivos

verificarem as condições da conexão com seus vizinhos; *Disconnect*, que indica quando um dispositivo está saindo da rede.

### 4.3.3 Camada de rede

A camada de rede provê funcionalidades para comunicações fim a fim confiáveis entre os dispositivos da rede. Como a rede é do tipo *mesh*, todos dispositivos devem ser capazes de encaminhar pacotes em nome de outros dispositivos. A norma define quatro tipos de roteamento, mas não especifica algoritmos para construção das rotas utilizadas no encaminhamento de mensagens.

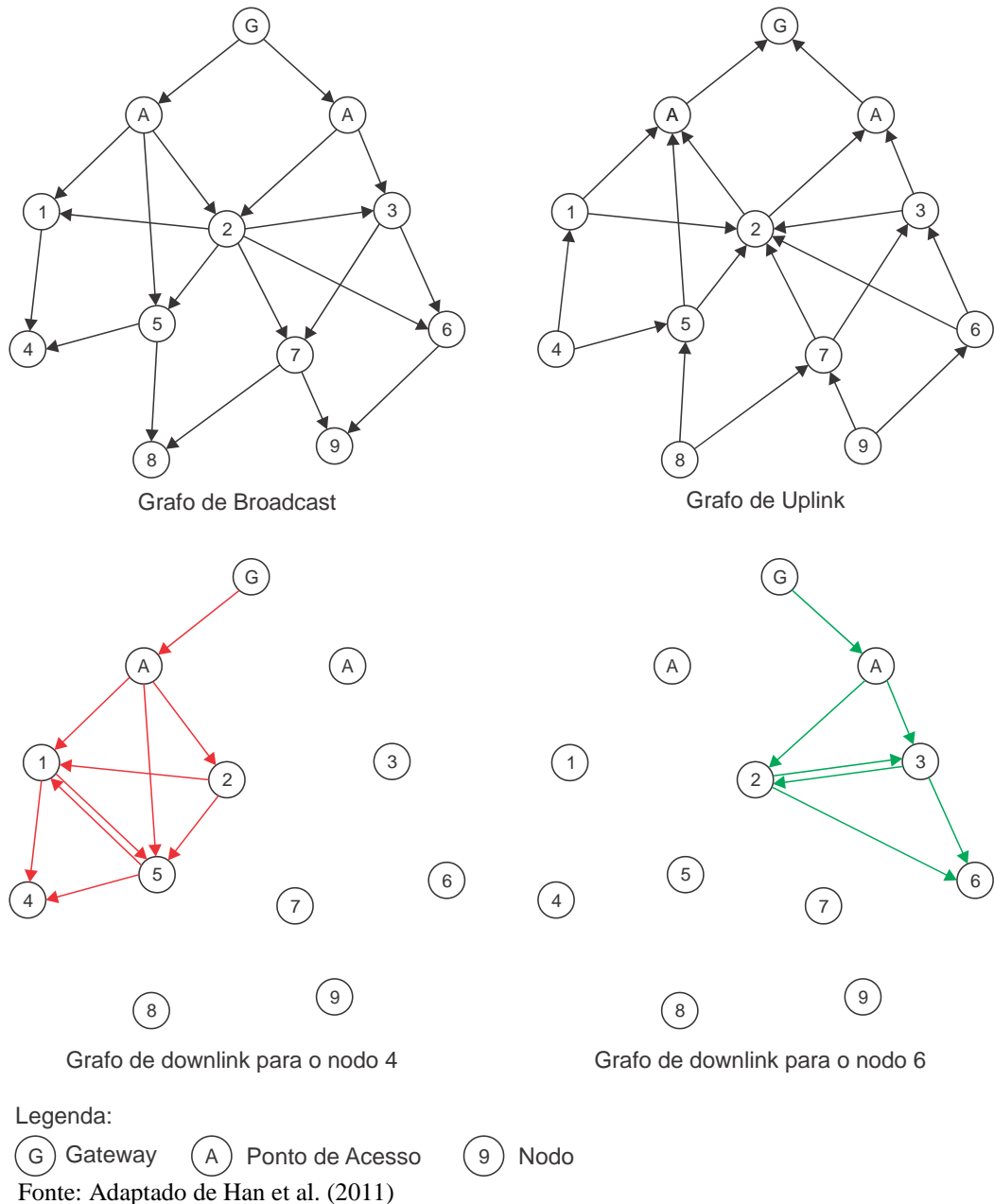
#### 4.3.3.1 Roteamento por grafos

Os grafos consistem em uma coleção de caminhos que podem ser utilizados para rotear um pacote da sua origem até o destinatário. Para enviar um pacote, o nodo de origem informa no cabeçalho da mensagem o identificador do grafo, ou *graph id*, a ser utilizado. Os dispositivos no caminho do destino devem ser configurados antecipadamente com informações que especificam os vizinhos para qual o pacote deve ser encaminhado quando o grafo com determinado indicador for utilizado.

Este tipo de grafo permite redundância, já que mais de um vizinho pode ser configurado para o encaminhamento da mensagem. Em caso de falha de comunicação em um dos vizinhos, o dispositivo pode utilizar outro vizinho. *Links* devem ser disponibilizados nos *superframes* para as comunicações com estes vizinhos.

Uma representação dos tipos de grafos utilizados, contendo redundância, é apresentada na Figura 5. Nestes grafos, a redundância é feita de modo a cada dispositivo receber suas mensagens através de dois ou mais caminhos (grafos de *broadcast* e *downlink*), ou enviar seus pacotes através de dois ou mais caminhos (grafo de *uplink*). A ligação entre os APs e o *gateway* é considerada confiável e não necessita de redundância.

Neste tipo de roteamento, os dispositivos intermediários encaminham os pacotes utilizando o primeiro *link* de transmissão disponível com qualquer um dos próximos vizinhos, em qualquer um dos *superframes*.



**Figura 5 Tipos de grafos de roteamento**

#### 4.3.3.2 Roteamento por *source*

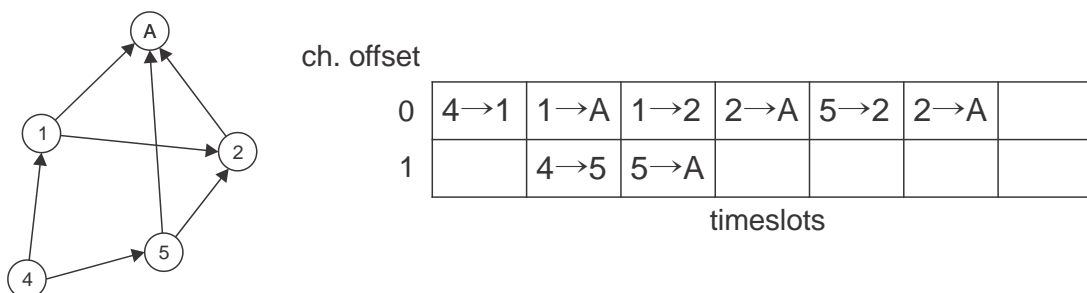
Neste tipo de roteamento, o dispositivo de origem adiciona ao cabeçalho da mensagem uma lista ordenada de até oito nodos pelos quais o pacote deve ser encaminhado. O

roteamento por *source* provê um caminho sem redundâncias para o envio da mensagem. Se uma das conexões entre os vizinhos da lista não estiver mais disponível (em funções de problemas na rede sem fio, interferências, bloqueios, entre outros) a mensagem é perdida. Este tipo de roteamento é utilizado principalmente pelo NM e pelo *gateway*, que conhecem a topologia completa da rede, para envio de comandos com requisição de resposta. No caso de não se obter uma resposta dentro de um período de tempo, outro caminho pode ser utilizado para envio da requisição. Para um dispositivo de campo utilizar este tipo de roteamento o mesmo deve ser configurado antecipadamente pelo NM.

Assim como o roteamento por grafos, o roteamento por *source* utiliza o primeiro *link* disponível em qualquer um dos *superframes*.

#### 4.3.3.3 Roteamento por *superframes*

O roteamento por *superframes* é um caso especial de roteamento por grafos. Os pacotes são designados a serem enviados pelo dispositivo em qualquer *link* disponível dentro de um *superframe* específico. Desta forma, todos os *links* existentes em um *superframe* devem formar um caminho que chega a um destinatário final. Na Figura 6, é apresentado um exemplo de grafo de *uplink* do nodo 4 até o AP e um exemplo de *superframe* com os *links* configurados.



**Figura 6** Exemplo de roteamento por *superframe*

Neste tipo de roteamento os nodos intermediários não precisam ser pré-configurados com informações das rotas, apenas com os *links* necessários com os vizinhos dentro do

*superframe*. O protocolo ainda permite a combinação do roteamento por *source* com o roteamento por *superframe*. Neste caso, são utilizados os *links* dentro do *superframe* para envio sequencial conforme a lista de dispositivos fornecida pelo *source*.

#### 4.3.3.4 Comparação entre os métodos de roteamento

Nesta seção é feita uma comparação dos métodos de roteamento. Quatro critérios são utilizados para comparação, que são a isolação de tráfego, a previsibilidade da latência, a redundância de caminhos e a utilização de recursos.

Conforme comentado anteriormente, a diferença principal dos métodos de roteamento por grafos, por *source* e por *superframe* é que no primeiro e segundo métodos os pacotes irão competir por qualquer *link* disponível no dispositivo transmissor com o vizinho, enquanto que no último método isto não ocorre. O roteamento por *superframe* pode ser então utilizado para isolar o tráfego de mensagens de gerenciamento e de variáveis de processo criando, por exemplo, um *superframe* para o escoamento das mensagens dos dispositivos para o *gateway* (leituras de sensores) e outro para o NM (respostas de comandos de configuração e de gerenciamento da rede). O mesmo conceito pode ser utilizado para o escoamento da comunicação do *gateway* em direção aos dispositivos (comandos aos atuadores) e outro para o NM (comandos de configuração e de gerenciamento da rede). Com base neste fato, a latência esperada nas comunicações é mais previsível no roteamento por *superframe*, já que o tráfego de dados de processo pode ser isolado em um *superframe* que contém *links* dedicados (CHEN; NIXON; MOK, 2010).

A redundância é maior no roteamento por grafos e por *superframes*, já que diversos vizinhos podem ser configurados para encaminhamento de mensagens, enquanto que no roteamento por *source* apenas um vizinho é utilizado.

Chen, Nixon e Mok (2010) analisam a utilização de recursos de memória dos dispositivos em cada método de roteamento, com relação aos dados das Tabela 1 e Tabela 3.



A utilização de recursos é maior no roteamento por *superframes*, tendo em vista que os dispositivos possuem um número limitado de entradas de *superframe* em sua memória e neste método mais *links* devem ser alocados para as comunicações. No roteamento por grafo esta utilização é menor, já que os nodos possuem mais entradas para grafos e para pares de vizinhos em sua memória, e um número menor de *links* necessita ser configurado. Por fim, o roteamento por *source* tem a menor utilização de recursos, pois apenas os *links* entre a lista de nodos no caminho devem ser configurados. A Tabela 2 apresenta o comparativo entre os métodos de roteamento.

**Tabela 2 Comparativo entre os métodos de roteamento previstos no padrão WirelessHART**

Método de roteamento	Isolação de tráfego	Previsibilidade da latência	Redundância	Utilização de recursos
Grafo	Menor	Menor	Maior	Média
<i>Source</i>	Menor	Menor	Menor	Menor
<i>Superframe</i>	Maior	Maior	Maior	Maior

#### 4.3.3.5 Roteamento por *proxy*

Este tipo de roteamento é utilizado apenas quando um dispositivo está ingressando na rede. Um dispositivo já presente na rede é denominado de *proxy*, e tem a função de fazer o intermédio das comunicações do NM com o novo dispositivo.

#### 4.3.3.6 Tempo de vida dos pacotes

As mensagens possuem um campo no quadro da camada de rede conhecido como *Time-to-Live* (TTL), que especifica o tempo de vida da mesma. A cada salto que a mensagem realiza entre os dispositivos, o TTL é decrementado. Ao chegar em 0, a mensagem é descartada. Desta forma, evita-se que mensagens circulem indefinidamente na rede. Este campo é útil no caso da existência de ciclos nos grafos, que podem eventualmente existir para aumentar a redundância, como apresentado nos grafos de *downlink* da Figura 5. A existência de ciclos não é proibida na norma, mas implica o risco de mensagens não atingirem o seu destinatário.

#### 4.3.3.7 Tabelas de rede

Os dispositivos mantêm uma série de tabelas na camada de rede, que também são utilizadas na camada de transporte: tabelas de sessão, que gerenciam a segurança das comunicações com o destinatário; tabelas de transporte, que permitem a confirmação de entrega de pacotes ao destinatário; tabela de rotas, que indica as rotas a serem utilizadas para a comunicação com o destinatário; tabela de *sources*, que indicam a lista de nodos intermediários que devem ser usados quando o roteamento por *source* é utilizado; e a tabela de serviços, que indica as rotas associadas para o envio de dados, como variáveis de processo. O tamanho mínimo destas tabelas, especificado na norma, é mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3 Requisitos mínimos de memória para as tabelas da camada de rede**

Descrição	Número mínimo
Sessões	8
Transporte	2 por sessão
Rotas	8
Rotas do tipo <i>source</i>	2
Serviços	16

Fonte: HART COMMUNICATION FOUNDATION (2009, p. 66).

#### 4.3.4 Camada de transporte

A camada de transporte tem a função de assegurar que pacotes são encaminhados com sucesso entre os nodos de origem e destino, através de um mecanismo de requisição de resposta. Nem todos os comandos utilizam o serviço. Segundo a norma, os serviços com confirmação de entrega são utilizados em mensagens de gerenciamento. Os pacotes com dados de processo são gerados periodicamente e não necessitam de confirmação de entrega, segundo a norma.

#### 4.3.5 Camada de aplicação

Esta camada é responsável por gerar, interpretar e responder a comandos trocados entre os dispositivos, bem como reportar o estado de funcionamento do dispositivo. Diversos

comandos definidos no protocolo são relevantes para a configuração e otimização das rotas. A Tabela 4 apresenta os comandos principais relacionados à definição das rotas, com uma descrição das informações relevantes contidas no comando. Os comandos podem ser classificados de duas maneiras: dinâmicos, quando são enviados periodicamente ao NM e mudam com o tempo, ou estáticos, quando não se alteram (características do dispositivo, por exemplo).

**Tabela 4 Comandos relacionados à definição de rotas**

Número - Nome	Característica	Descrição	Informações contidas
777 – <i>Read Wireless Device Capabilities</i>	Estático	Características do dispositivo	Fonte de energia, RSL mínimo, número máximo de vizinhos
778 – <i>Read Battery Life</i>	Dinâmico	Nível da bateria	Nível restante da bateria em dias
779 – <i>Report Device Health</i>	Dinâmico	Estado do dispositivo	Estado da fonte de energia, número de pacotes gerados e recebidos com sucesso e com falhas
780 – <i>Report Neighbor Health List</i>	Dinâmico	Estado dos vizinhos que têm <i>link</i> com o dispositivo	RSL do vizinho, número de pacotes transmitidos e recebidos com sucesso e com falhas
787 – <i>Report Neighbor Signal Levels</i>	Dinâmico	Intensidade de sinal de todos os vizinhos descobertos	RSL dos vizinhos
788 – <i>Alarm Path Down</i>	Dinâmico	Indica que a comunicação com um vizinho não está mais disponível	Vizinho
789 – <i>Alarm Source Route Failed</i>	Dinâmico	Indica que o roteamento por <i>source</i> falhou	Vizinho
790 – <i>Alarm Graph Route Failed</i>	Dinâmico	Indica que o roteamento por grafo falhou	<i>Graph id</i>

Fonte: HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008b

#### 4.3.6 Segurança nas comunicações do protocolo

O protocolo possui mecanismos para detecção de erros nos pacotes e autenticação e encriptação de mensagens. A verificação por CRC-16 (SIMPSON, 2012) é utilizada para

detecção de erros, e o mecanismo AES-CCM\* (DWORKIN, 2007) é utilizado para autenticação e encriptação do conteúdo dos pacotes.

Na camada de enlace, é utilizado o mecanismo de verificação de erros CRC-16 e a autenticação AES-CCM\*. Para a autenticação AES-CCM\* nesta camada, duas chaves podem ser utilizadas: *Well-known key*, que corresponde a uma chave bem conhecida do protocolo WirelessHART que é utilizada quando os dispositivos estão ingressando na rede; e a *Network key*, ou chave da rede, que é utilizada por dispositivos que já se fazem presentes na mesma. O contador utilizado na autenticação combina o ASN da rede com o endereço do dispositivo originador da mensagem.

Na camada de rede é realizada a autenticação e encriptação do conteúdo da camada de transporte utilizando o AES-CCM\*. Duas chaves são utilizadas para autenticação e encriptação: chave de *join*, que é utilizada em mensagens quando os dispositivos estão ingressando na rede; e as chaves de sessão, que são configuradas pelo NM para comunicações específicas entre dois pares de dispositivos da rede. O contador utilizado na autenticação e decifração combina os contadores específicos da sessão com o endereço do dispositivo originador da mensagem.

## **5 PROPOSTA DE AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO PARA REDES WIRELESSHART**

Esta seção apresenta a descrição do ambiente proposto, que permite o estudo e avaliação de diferentes estratégias de roteamento para redes WirelessHART.

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Conforme já discutido anteriormente, o roteamento para redes sem fio tem sido um tema de pesquisa bastante popular nos últimos anos, já que este tipo de rede possui diversos aspectos a serem considerados na definição das rotas, que trazem complexidade ao problema (PARISSIDIS et al, 2009). Esta complexidade ocorre em função de restrições de recursos e de energia nos dispositivos e em função das características das comunicações sem fio, que estão mais propensas a falhas de comunicação do que as redes cabeadas, em decorrência da mobilidade dos dispositivos, alterações na propagação do meio físico e interferências (WANG; SEAH; KONG, 2007; HAN et al., 2011).

Uma grande variedade de métricas têm sido propostas para a definição de rotas em função destes diversos aspectos a serem considerados (TOH, 2001; PARISSIDIS et al, 2009). As métricas que possuem maior destaque na literatura buscam definir rotas com base nas seguintes premissas: menor número de saltos; menor consumo de energia; melhor balanceamento de tráfego da rede; maior confiabilidade de transmissão de dados; maior estabilidade; maior taxa de transferência de dados, entre outras (TOH, 2001).

De maneira geral, os algoritmos de roteamento buscam encontrar uma rota que minimize alguma função de custo relacionada às métricas, ao mesmo tempo em que se realize uma otimização da utilização dos recursos disponíveis na rede (LI et al., 2011). Em algumas aplicações a definição das rotas pode ter mais que um objetivo. Neste caso, são utilizados

critérios multiobjetivo, que atribuem pesos a cada um dos objetivos, criando um balanço de prioridades nas métricas (PARISSIDIS et al, 2009).

A utilização de redes sem fio em aplicações de controle na indústria ainda impõe requisitos mais rigorosos no que diz respeito à comunicação confiável e em tempo real, já que a perda ou o atraso na entrega dos pacotes pode degradar a qualidade do controle (HAN et al., 2011). Rotas redundantes são as soluções propostas em diversos trabalhos para aumentar a confiabilidade das comunicações em redes sem fio (SRINIVAS; MODIANO, 2005; WANG; SEAH; KONG, 2007; ENYEDI; RÉTVÁRI, 2009; CHEN et al., 2011; HAN et al., 2011; MA et al., 2012). A maioria destes trabalhos busca identificar um conjunto de rotas que podem ser utilizadas para o encaminhamento de uma mensagem. Estes trabalhos, entretanto, não podem ser aplicados diretamente às redes WirelessHART, já que o padrão sugere requisitos mais restritos de confiabilidade, de modo que cada dispositivo possua ao menos dois vizinhos pelos quais ele é capaz de encaminhar ou receber mensagens (HAN et al, 2011). O trabalho de Han et al. (2011) propõe algoritmos de roteamento que buscam construir grafos confiáveis de *uplink*, *downlink* e *broadcast* para atender a estes requisitos específicos das redes WirelessHART.

A complexidade na determinação de rotas, a combinação de diferentes métricas e os diversos requisitos a serem atendidos nas aplicações agregam complexidade ao desenvolvimento, ajuste e análise de algoritmos. Um ambiente onde os algoritmos possam ser avaliados e comparados, através de diferentes topologias de rede e condições de operação da mesma, pode auxiliar nestes processos.

Gerenciadores de rede comerciais e ambientes de monitoração podem apresentar limitações na exposição e obtenção de informações sobre as condições atuais de uma rede operacional sob análise (CHEN et al, 2008). Estas limitações dificultam a análise e a identificação de problemas. A utilização de ambientes de monitoração passivos é abordada em

diversos trabalhos para auxiliar na obtenção de informações (RINGWALD, RÖMER, VITALETTI; 2007; CHEN et al., 2008; KRÄTZIG et al., 2009; FERRARI et al., 2009; HAN et al., 2009; YU, 2010). Estes trabalhos, entretanto, não abordam os mecanismos de encriptação existentes em alguns protocolos, como no caso do WirelessHART. Sem um mecanismo de decríptação o ambiente é incapaz de obter os comandos trafegados na camada de aplicação e, portanto, a descoberta de informações sobre o estado da rede, configurações atuais sobre rotas e topologia, características dos dispositivos, entre outros. Uma ferramenta passiva de monitoração capaz de decriptar os pacotes capturados em uma rede WirelessHART ainda é uma necessidade.

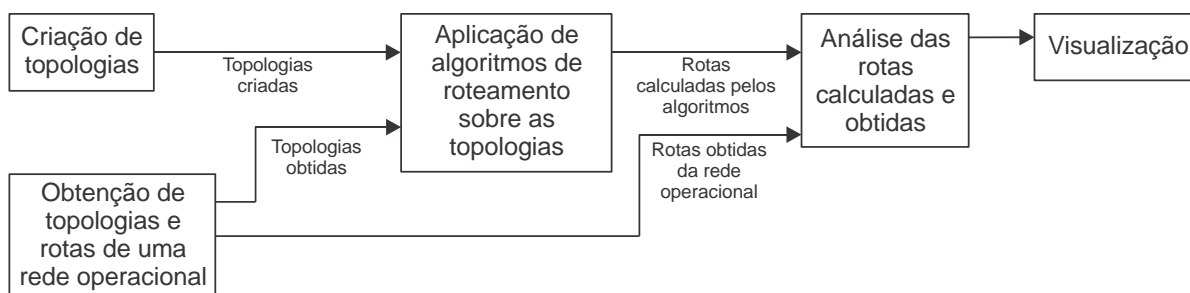
Neste contexto, é observada a necessidade de um ambiente genérico para avaliação de estratégias de roteamento para redes sem fio do tipo WirelessHART, onde rotas descobertas através da monitoração de uma rede operacional, bem como rotas construídas por diferentes algoritmos de roteamento podem ser avaliados, através de diferentes métricas e estatísticas. O ambiente proposto é discutido na próxima seção.

## **5.2 AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO**

O ambiente proposto nesta seção tem como objetivo avaliar diferentes estratégias de roteamento para redes WirelessHART, permitindo a análise de rotas calculadas por algoritmos aplicados sobre uma topologia de rede, bem como das rotas em uso em redes reais em operação. A avaliação das estratégias de roteamento é realizada através da análise das rotas construídas, com base em informações do grafo da topologia da rede e das informações sobre as características dos dispositivos presentes na rede.

O ambiente pode ser dividido em cinco blocos principais: criação de topologias para aplicação em algoritmos de roteamento; obtenção de topologias e rotas através de captura de pacotes de uma rede operacional; aplicação de algoritmos de roteamento sobre as topologias

construídas e obtidas; análise das rotas construídas e obtidas e visualização das análises. Uma representação dos blocos principais do ambiente pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7 Blocos principais do ambiente proposto**

De forma geral, o grafo da topologia da rede pode ser criado a partir de definições do usuário ou obtido a partir da monitoração e obtenção de informações de uma rede WirelessHART em funcionamento. Para o segundo caso, um equipamento é utilizado para capturar o tráfego de mensagens da rede, obtendo informações pertinentes à topologia da rede, rotas construídas e características dos dispositivos.

### 5.2.1 Criação de topologias

A topologia da rede pode ser descrita por um conjunto de nodos e de pontos de acesso espalhados dentro de uma área física. No ambiente proposto, esta topologia pode ser criada de duas maneiras: manualmente, onde a criação, o posicionamento e o ajuste das características dos nodos são feitos através das definições do usuário; e de maneira aleatória, na qual o usuário informa uma quantidade de dispositivos com suas características comuns e o próprio ambiente posiciona os dispositivos, servindo de base para criação de topologias mais genéricas.

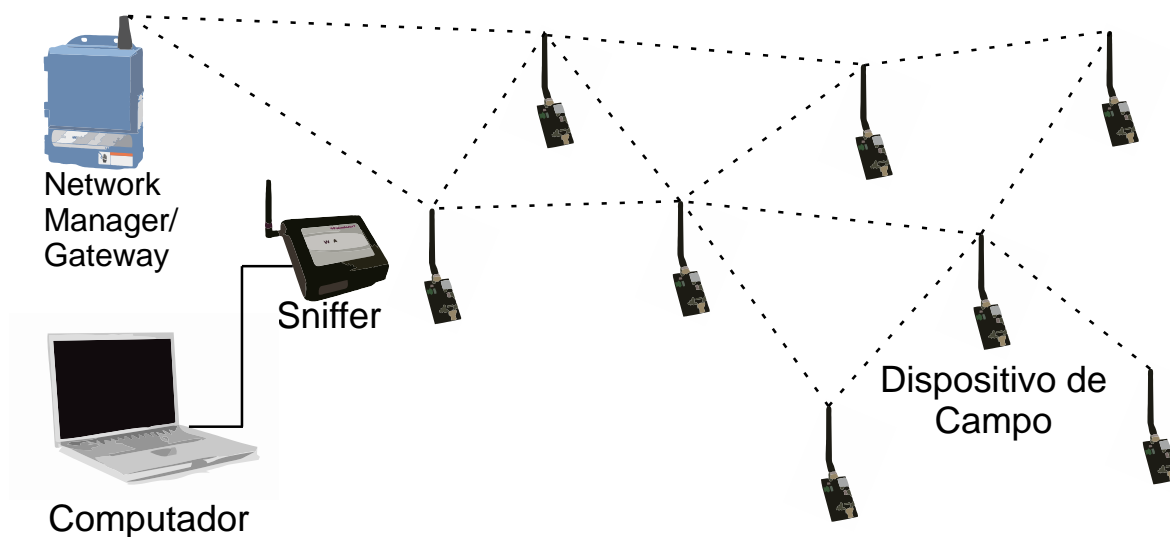
Modelos de conectividade são utilizados para determinar a capacidade de cada par de nodos de se comunicar, com base em diferentes aspectos, como distâncias, probabilidades e modelos de transmissão e perda de sinal (HAN et al., 2011).



### 5.2.2 Obtenção de topologias e rotas através da monitoração de uma rede WirelessHART operacional

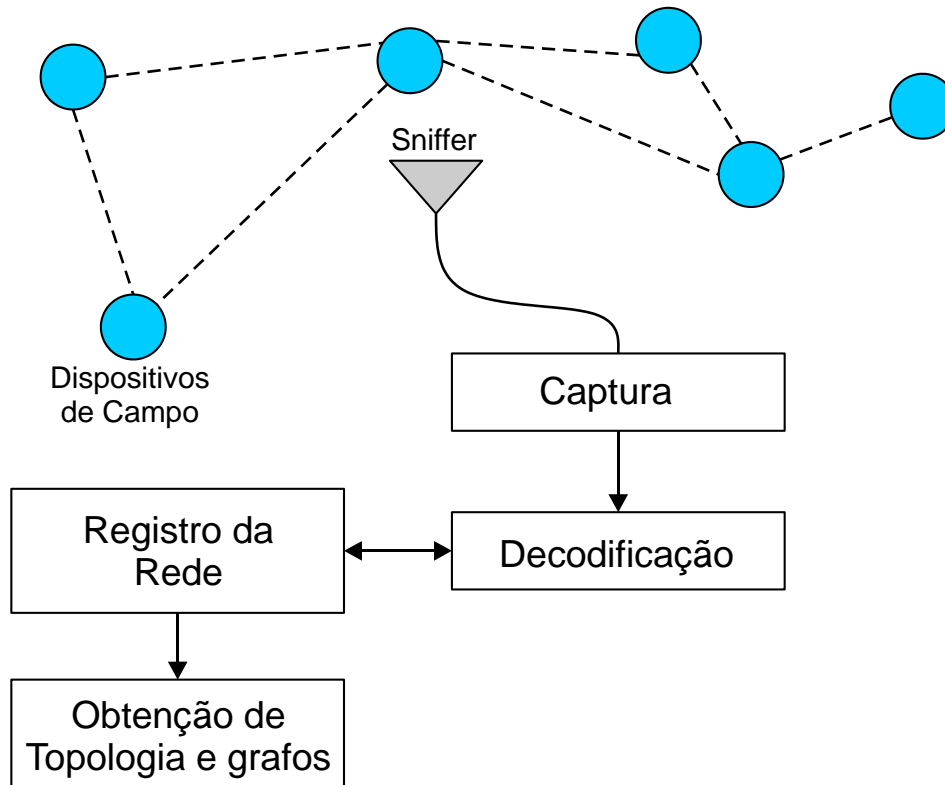
Esta subseção descreve a captura de pacotes para obtenção da topologia e dos grafos de uma rede WirelessHART operacional.

A obtenção das informações da rede é realizada a partir de dois elementos principais: um dispositivo eletrônico conhecido como *sniffer*, capaz de capturar passivamente os pacotes trafegados no meio físico de uma rede WirelessHART em funcionamento; e um programa de computador, onde os pacotes capturados são recebidos, armazenados, decodificados e interpretados. Uma visão geral de uma rede WirelessHART operacional com um *sniffer* capturando o tráfego de dados é apresentado na Figura 8.



**Figura 8** Captura passiva de pacotes de uma rede WirelessHART operacional

O processo para a captura e interpretação dos pacotes envolve diversas etapas, que têm como objetivo converter os pacotes capturados em informações que serão utilizadas posteriormente no ambiente. As principais etapas são apresentadas na Figura 9 e descritas a seguir.



**Figura 9** Etapas do processo de captura e obtenção de grafos

### 5.2.2.1 Captura

A captura dos pacotes trafegados é realizada através da instalação de um *sniffer* na área de cobertura da rede. As vantagens da captura passiva foram apresentadas no capítulo 3. Os pacotes recebidos recebem uma estampa temporal que indica o instante do envio do pacote pelo dispositivo transmissor do mesmo, além de informações do canal utilizado e da intensidade de sinal recebido. Após a captura, os mesmos são transferidos para o computador.

Em função do seu posicionamento, da sensibilidade do seu rádio e da presença de interferências, o *sniffer* pode não ser capaz de capturar todo o tráfego da rede. Porém, uma cobertura parcial pode ser aceitável em determinados tipos de análise (YU, 2010). Neste caso, o *sniffer* é instalado próximo ao dispositivo de interesse. Para a captura dos dados relacionados ao roteamento, o *sniffer* deve ser instalado próximo ao AP da rede, já que é pelo AP que passa todo o tráfego que é gerado e recebido pelo NM. A informação da intensidade do sinal recebido dos pacotes pode ser utilizada para determinar o melhor posicionamento do

*sniffer*. Se a rede contiver mais que um AP, pode ser necessária a utilização de múltiplos *sniffers*. Neste trabalho optou-se por não se utilizar a abordagem com múltiplos *sniffers*, já que diversos trabalhos citados anteriormente abordam a fusão dos pacotes capturados por múltiplos *sniffers* em um registro global e, além disso, os equipamentos comerciais disponíveis para redes WirelessHART até o momento não disponibilizam mais de um AP.

Um aspecto importante é que o protocolo WirelessHART pode realizar comunicações simultâneas nos diferentes canais da IEEE 802.15.4. Deste modo, o *sniffer* deve ser capaz de monitorar os 15 canais utilizados simultaneamente.

De modo a manter a flexibilidade da ferramenta proposta, optou-se pela utilização de uma interface que permite a leitura de arquivos contendo pacotes capturados através de outra ferramenta ou a leitura de pacotes através de comunicação direta com um *sniffer*. Os pacotes recebidos são armazenados em uma fila, e processados em blocos com intervalos de tempo pré-determinados, permitindo a análise e o acompanhamento da evolução da rede nestes intervalos. Como exemplo, o usuário pode ler os pacotes da fila em períodos de 15 minutos entre os pacotes, acompanhando as mudanças ocorridas na rede neste período. O tamanho desta fila deve ser considerado quando análises muito extensas são realizadas, o que pode sobrecarregar a memória do computador.

### **5.2.2.2 Decodificação**

O bloco de decodificação tem como função principal converter um pacote recebido do *sniffer* de uma sequência de bytes para uma descrição estruturada, de acordo com as camadas do protocolo WirelessHART. Ao final do processo, os comandos contidos na camada de aplicação dos pacotes são interpretados para obtenção das informações da rede. Os pacotes decodificados também são adicionados a uma lista para análises posteriores.

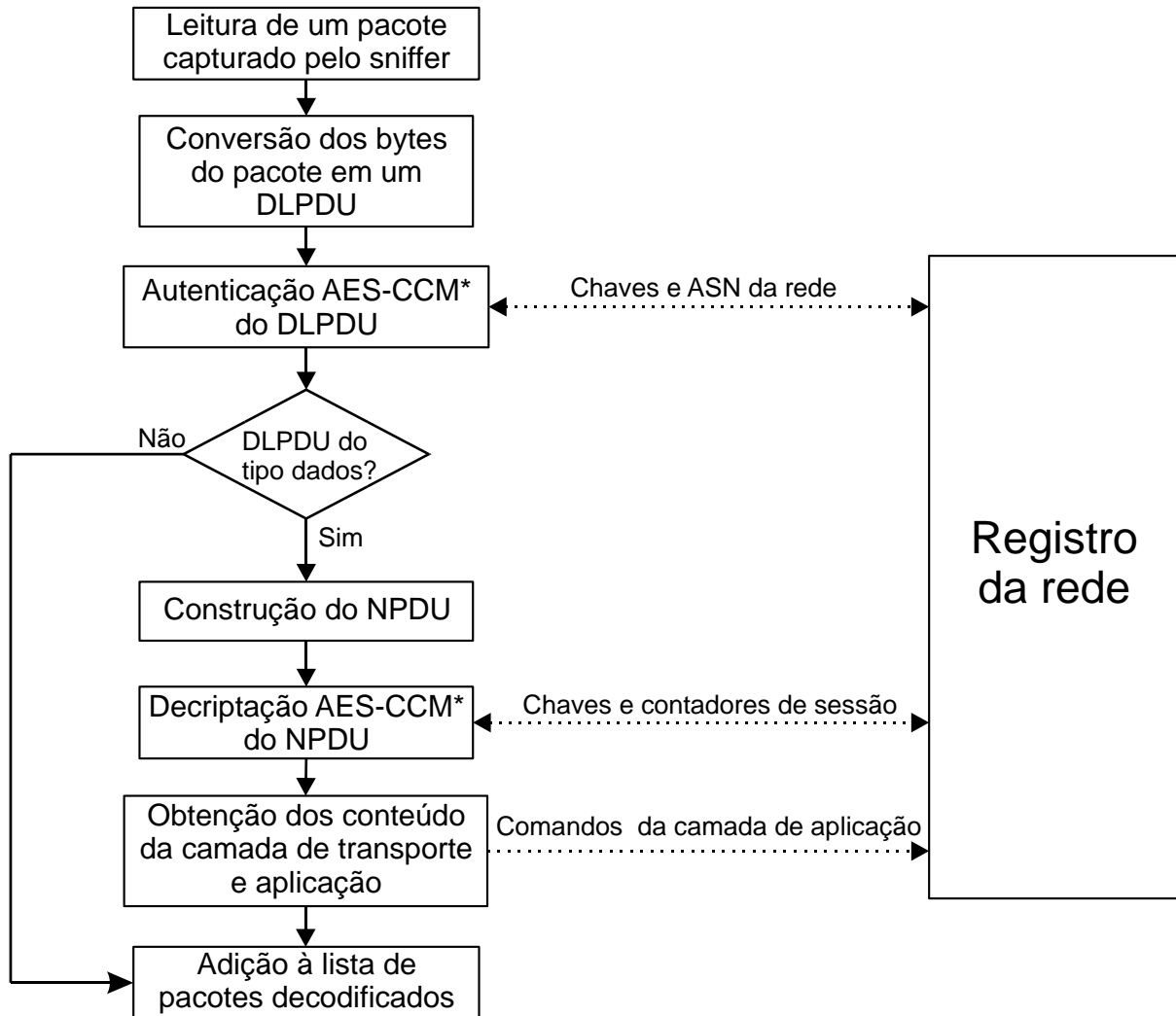
O processo de decodificação possui complexidade em função do mecanismo AES-CCM\* utilizado no protocolo, que necessita que informações sobre as chaves e contadores

sejam obtidas e armazenadas para correta autenticação e decriptação dos pacotes. Por isto, cada pacote recebido deve ser decodificado e interpretado, para extração e atualização das informações importantes relacionadas às chaves e contadores.

O bloco de Registro da Rede (RR) armazena e provê estas informações necessárias para a autenticação e decriptação dos pacotes. Ele também armazena informações atuais da rede, obtidas através dos comandos contidos na camada de aplicação de cada pacote. Características dos dispositivos e dos seus vizinhos, *superframes* e *links*, bem como rotas configuradas nos dispositivos, são alguns exemplos destas outras informações armazenadas no RR. Dependendo da cobertura fornecida pelo *sniffer*, a informação armazenada no RR é bastante similar àquela do NM, que possui a informação completa da rede em operação. Conforme comentado anteriormente, para cada mensagem autenticada ou decriptada, o RR é atualizado, mantendo atualizadas as chaves e os contadores utilizados, bem como as informações atuais da rede. Pacotes não capturados pelo *sniffer* podem comprometer a autenticação e decriptação, em razão da não obtenção de chaves e contadores atualizados sendo utilizados na rede. O RR ainda deve utilizar as informações dos contadores das sessões para ignorar pacotes que já tenham sido interpretados, em função do *sniffer* capturar eventualmente os múltiplos saltos realizados por um pacote na rede.

Uma representação das principais etapas para decodificação de um pacote, e da troca de informações com o RR durante algumas das etapas, é apresentada na Figura 10.

O processo de decodificação inicia com a conversão das sequências de bytes de um pacote em um DLPDU da camada de enlace do protocolo. Pacotes com o CRC-16 e com cabeçalho incorreto devem ser identificados e removidos. O identificador (*network id*) da rede sendo analisada é informado antecipadamente pelo usuário, e pacotes que não pertencem à rede também devem ser removidos.



**Figura 10** Representação das etapas de decodificação de um pacote

Em seguida, ocorre a autenticação do DLPDU, de modo a verificar sua integridade. O campo *Message Integrity Code* (MIC) do DLPDU é comparado com o MIC obtido através da aplicação do algoritmo AES-CCM\*. Se o valor é diferente, o pacote é identificado e removido. Para a autenticação, o RR deve manter registro do ASN atual da rede, da chave bem conhecida do protocolo (*Well-known key*) e da chave da rede (*Network key*). Para o RR sincronizar o seu ASN com o da rede na inicialização, é necessário que um pacote DLPDU de *advertise* seja capturado, pois o ASN atual da rede é obtido através deste pacote. Ao final da autenticação, o ASN atual do RR é atualizado, os pacotes DLPDU de dados são enviados para decodificação na camada de rede e os outros tipos de DLPDU são enviados para o bloco de construção do objeto mensagem.

Se o DLPDU autenticado é do tipo de dados, é construído o pacote *Network Protocol Data Unit* (NPDU) da camada de rede. Para autenticação e decriptação nesta camada, o campo MIC do NPDU é comparado com o MIC obtido através da aplicação do algoritmo AES-CCM\*. Se o valor é desigual, o pacote é identificado e removido. O RR mantém registro da chave de *join* da rede e das chaves de sessão que cada dispositivo possui, bem como dos contadores utilizados em cada sessão. A chave de *join* da rede deve ser fornecida pelo usuário na inicialização. Para realizar a decriptação dos pacotes, o *sniffer* deve ser capaz de ouvir o processo de entrada na rede de cada dispositivo, onde as chaves de sessão das comunicações da camada de rede são fornecidas pelo NM. Sem estas chaves não é possível decriptar o conteúdo dos dados da camada de transporte.

Uma vez autenticado e decriptado, o NPDU é decodificado na camada de transporte e de aplicação, onde são obtidos os comandos contidos no pacote. O RR possui um interpretador de comandos, pelo qual o mesmo atualiza a visão global da rede, com informações dos dispositivos e dos seus vizinhos, condições das comunicações, *superframes* e *links*, chaves e contadores de sessão, entre outros. O RR deve ser capaz de interpretar os diversos comandos do protocolo para conseguir extrair todas as informações relevantes.

Ao final do processo de decodificação, as informações contidas nas diversas camadas de cada pacote são agrupadas e adicionadas a uma lista, para que posteriores filtragens e análises possam ser realizadas. Um arquivo em formato de planilha é gerado, contendo as informações obtidas de cada pacote, no caso de uma análise mais criteriosa dos dados ser necessária.

### **5.2.2.3 Obtenção de topologia e grafos**

Este bloco tem como função construir os grafos com base nas informações descobertas e armazenadas no RR. A topologia global da rede é construída com base nos dispositivos descobertos e nas informações fornecidas sobre os seus vizinhos. Os grafos utilizados em

rotas específicas são mais complexos de serem determinados e necessitam de informações sobre as rotas configuradas nos dispositivos. Com base nestas informações, podem ser descobertos os métodos de roteamento utilizados em cada rota, que podem ser do tipo por *superframe* ou por grafos. Para o método de roteamento por *superframes*, os grafos são obtidos através da obtenção dos *links* configurados dentro de cada *superframe*. Para o método de roteamento por grafos são combinadas informações sobre os grafos e sobre os pares de grafos-vizinhos configurados nos dispositivos.

### **5.2.3 Aplicação de algoritmos de roteamento**

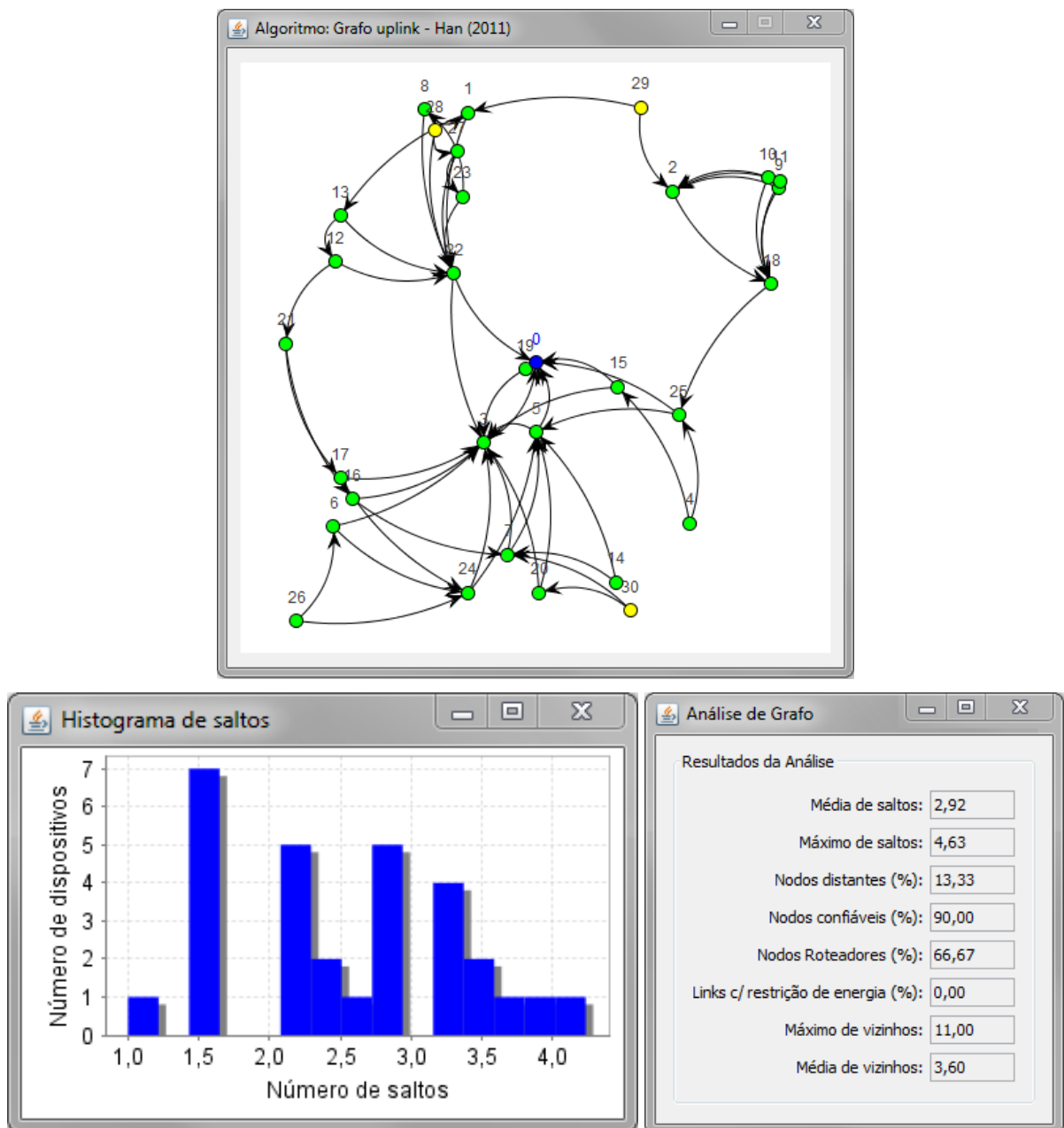
O grafo da topologia global da rede é utilizado como entrada para diferentes algoritmos de roteamento a serem analisados. Parâmetros de entrada específicos de cada algoritmo, como pesos de diferentes funções de custo, por exemplo, são ajustados através de uma interface gráfica que é específica para cada algoritmo. Após o ajuste dos parâmetros, o algoritmo é executado. Ao final da execução do algoritmo, os grafos e rotas calculadas são repassados ao módulo de análise.

### **5.2.4 Análise e visualização**

O módulo de análise permite a análise das rotas construídas a partir dos algoritmos de roteamento aplicados à topologia da rede ou obtidas a partir da captura de informações de uma rede WirelessHART operacional.

Diferentes formas de visualização dos resultados estão disponíveis: visualização dos grafos, histogramas e resumo de estatísticas. A visualização dos grafos representa de maneira gráfica a topologia da rede e os grafos construídos para as diversas rotas, facilitando a identificação dos dispositivos participantes e a identificação de diferentes aspectos dos grafos. Já os histogramas permitem avaliar a contagem de dispositivos da rede de acordo com uma

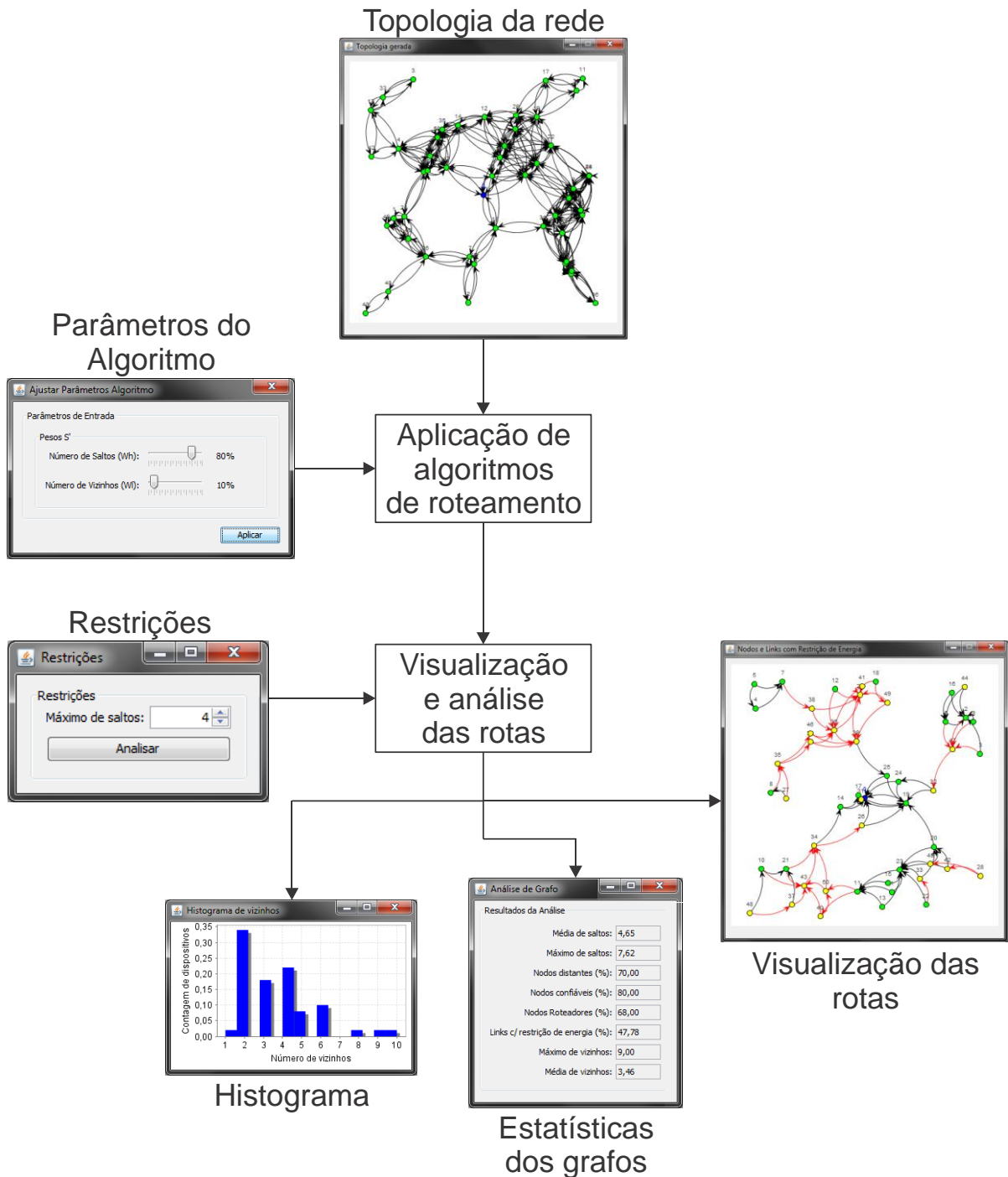
propriedade específica do grafo sendo analisado. Por fim, o resumo de estatísticas apresenta valores estatísticos, como valores máximo, mínimo e médio relacionados às características do grafo. Restrições podem ser inseridas nas análises, de modo a gerar estatísticas relacionadas a dispositivos que atendem ou não a diferentes restrições e identificar estes mesmos dispositivos na visualização do grafo. Uma representação da visualização dos grafos, histogramas e estatísticas é apresentada na Figura 11.



**Figura 11** Formas de visualização de resultados de análise



Um exemplo da aplicação do ambiente é apresentado na Figura 12, onde a topologia de uma rede é criada ou obtida através da ou monitoração de uma rede operacional e é utilizada como entrada para um algoritmo de roteamento. O grafo determinado pelo algoritmo é analisado a partir do bloco de análise e em seguida são gerados histogramas e a visualização dos grafos e rotas construídas.



**Figura 12** Aplicação de algoritmos e análise de rotas geradas no ambiente

### 5.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS E DEFINIÇÃO DE MÉTRICAS DE ANÁLISE

Esta seção descreve os procedimentos e escolhas realizadas para a realização de experimentos utilizando o ambiente. São apresentadas também as métricas propostas para avaliação dos grafos.

#### 5.3.1 Primeiro experimento

O primeiro experimento envolve a implementação, modificação e análise dos algoritmos de *broadcast* e *uplink* para redes WirelessHART propostos no trabalho de Han et al. (2011). Neste trabalho, são propostos algoritmos para definição dos grafos *uplink*, *downlink* e *broadcast* que buscam atender aos requisitos de confiabilidade do protocolo. O critério utilizado para a construção das rotas leva em conta o número de saltos, que corresponde à distância em número de enlaces que uma mensagem deve utilizar para atingir o seu destinatário. A utilização deste critério de definição diminui a latência na entrega dos pacotes, o consumo de energia por mensagem transmitida e a necessidade de configuração dos dispositivos, mas aumenta a distância entre os dispositivos, reduzindo a intensidade de sinal entre os mesmos e causando o aumento da taxa de erros de transmissão (MISHRA; MISHRA, 2011). Adicionalmente, o critério pode concentrar a tarefa de roteamento em alguns dispositivos da rede, fazendo com que alguns dispositivos possuam um número de vizinhos significativo. Se considerarmos os recursos limitados de memória e energia dos dispositivos, estes problemas relacionados com o critério utilizado podem causar problemas de sobrecargas de comunicação nos nodos e a depleção das baterias de alguns deles rapidamente (LI et al., 2011).

A modificação dos algoritmos de *broadcast* e *uplink* busca combinar a métrica do número de saltos com outras métricas que considerem as características e recursos de cada dispositivo. As adaptações propostas se limitam à definição das rotas utilizando informações

do tipo de fonte de energia e do número máximo de vizinhos, fornecidas pelo dispositivo quando o mesmo entra na rede. Os algoritmos são construídos e avaliados separadamente. Optou-se ainda por utilizar o mesmo modelo de conectividade do trabalho de Han et al. (2011), onde um limiar de distância é utilizado para indicar se dois dispositivos são capazes de se comunicar ou não, permitindo a comparação dos resultados.

### 5.3.1.1 Características dos algoritmos de definição de rotas

Os algoritmos propostos são do tipo *greedy*, ou ganancioso. Este tipo de algoritmo é utilizado para resolver problemas de otimização, sempre realizando a escolha que parece ser a mais adequada em determinado momento da execução. Fazendo esta escolha ótima local, é esperado que a escolha leve à solução ótima global. Algoritmos gananciosos têm a vantagem de serem algoritmos simples, porém nem sempre conduzem a soluções ótimas globais (SKIENA, 2008).

O funcionamento deste tipo de algoritmo para determinação dos grafos pode ser descrito da seguinte forma: Inicialmente, têm-se o grafo da topologia completa da rede  $G(V, E)$  e o grafo solução  $G_S(V_S, E_S)$ , vazio. A cada etapa, um nodo candidato de  $G$  é adicionado a  $G_S$ , juntamente com as arestas candidatas. O nodo e as arestas são escolhidos por diferentes funções de seleção. O algoritmo encerra a execução quando  $V_S$  conter todos os nodos de  $V$ . No caso de  $G$  ser um grafo desconexo,  $G_S$  não contém os nodos desconectados.

### 5.3.1.2 Construção do grafo modificado de *broadcast*

O grafo de *broadcast*  $G_B(V_B, E_B)$  é utilizado para a disseminação de mensagens que tem origem no *gateway* e no NM e tem como destino todos os nodos da rede. Um nodo só é considerado confiável no grafo quando o mesmo possui ao menos dois vizinhos dos quais ele recebe estas mensagens.

Os objetivos para construção deste grafo são maximizar o número de nodos confiáveis, ao mesmo tempo em que se minimize o número médio de saltos de cada nodo em relação ao *gateway*, diminuindo por consequência o consumo de energia por mensagem propagada e a latência. De modo a aumentar o tempo de vida da rede, busca-se ainda que os nodos roteadores das mensagens sejam dispositivos que não tenham restrições quanto ao consumo de energia. O número máximo de vizinhos não é considerado na construção, pois para os nodos roteadores da mensagem de *broadcast*, é configurado um *link* do tipo *broadcast*, sem vizinhos específicos. Os nodos receptores terão no máximo dois vizinhos configurados dos quais receberão as mensagens de *broadcast* por caminhos diferentes, sendo este um valor pequeno em relação ao número máximo de vizinhos apresentado na Tabela 1.

O Algoritmo 1 apresenta os passos para a construção de  $G_B$ . O conjunto de nodos  $V_B$  é utilizado para armazenar os nodos já percorridos pelo algoritmo, e é inicializado com o *gateway*  $g$  e com o conjunto dos pontos de acesso  $V_{AP}$ . As arestas exploradas são armazenadas no conjunto  $E_B$ , que é inicializado com as arestas de  $g$  para  $V_{AP}$ . A cada iteração, um nodo candidato  $v$  do conjunto restante  $V - V_B$  é escolhido para ser adicionado a  $V_B$  até todos os nodos restantes serem adicionados, momento no qual  $G_B$  está completo.

---

**Algoritmo 1** Construção do grafo de *broadcast*

---

**Entrada:** Grafo da topologia completa  $G(V, E)$

**Saída:** Grafo de *broadcast*  $G_B(V_B, E_B)$

- 1 Inicie  $V_B = g \cup V_{AP}$  e  $E_B$  com as arestas de  $g$  em direção a  $V_{AP}$
- 2 **enquanto**  $V_B \neq V$  **faça**
- 3   Encontre  $S' \subseteq V - V_B: \forall v \in S', v$  tenha duas ou mais arestas provindas de  $V_B$  em  $G$
- 4   **se**  $S' \neq \emptyset$  **então**
- 5     **para todo**  $v \in S'$  **faça**
- 6        $E_v$  recebe as arestas vindas de  $V_B$
- 7        $P_v$  recebe os nodos de origem das arestas  $E_v$
- 8       Classifique  $P_v$  de acordo com a Eq. 1
- 9       Escolha as arestas  $e_{u1,v}$  e  $e_{u2,v}$  relativas aos nodos ordenados em  $P_v$
- 10        $h_v = \frac{h_{u1} + h_{u2}}{2} + 1$
- 11     **fim para**
- 12     identifique o nodo  $v$  com menor custo em  $S'$  de acordo com a Eq. 1
- 13      $V_B = V_B \cup v$  e  $E_B = E_B \cup e_{u1,v} \cup e_{u2,v}$

```

14 caso contrário
15   encontre  $S'' \subseteq V - V_B: \forall v \in S'', v$  tenha uma aresta provinda de  $V_B$  em  $G$ 
16   se  $S'' \neq \emptyset$  então
17     para todo  $v \in S''$  faça
18        $h_v = h_{u1} + 1$ 
19       calcule  $n_v$ , o # de arestas que vão em direção a  $V - V_B$ 
20     fim para
21     identifique o nodo  $v$  com menor custo em  $S''$  de acordo com a Eq. 3
22      $V_B = V_B \cup v$  e  $E_B = E_B \cup e_{u,v}$ 
24   caso contrário
25     //nodos desconectados
26     retorne  $G_B$ , que possui o grafo parcial, sem os nodos desconectados
27   fim se
28 fim se
29 fim equanto
30 retorne  $G_B$ , que está completo

```

---

Inicialmente é procurado o conjunto  $S'$ , que corresponde aos nodos candidatos confiáveis (que possuem duas ou mais arestas provindas de  $V_B$  no grafo  $G$ ). Para cada um dos candidatos  $v$  de  $S'$  são armazenadas suas arestas provindas de  $V_B$  em  $E_v$ . Em  $P_v$  são armazenados os nodos de origem das arestas de  $E_v$ .

A seguir é realizada a classificação dos nodos de origem  $P_v$  de acordo com a Equação 1. Esta equação avalia o custo de um nodo candidato  $i$  de acordo com o seu tipo de fonte de alimentação e do seu número de saltos relativo à  $h_{max}$ , que corresponde ao número máximo de saltos identificado no conjunto sendo avaliado. Os pesos  $w_h$  e  $w_p$  determinam a importância de cada um dos fatores na avaliação. A restrição de energia é dada por  $p_i$ , e vale 0 para um nodo sem restrição de consumo de energia, e 1 para o nodo com restrição. No caso de  $h_{max}$  ser nulo, o peso do número de saltos é desprezado.

$$c_i = \frac{w_h \frac{h_i}{h_{max}} + w_p p_i}{w_h + w_p} \quad (1)$$

Onde:

$i$  - nodo a ser avaliado

$c_i$  - custo do nodo  $i$ ,  $0 \leq c_i \leq 1$

$h_i$  - número de saltos de  $i$

$h_{max}$  - número de saltos máximo do conjunto de candidatos

$p_i$  - restrição de energia do nodo  $i$ ,  $0 \leq p_i \leq 1$

$w_h$  - peso do número de saltos

$w_p$  - peso da fonte de energia

Após o ordenamento, são identificados os nodos de origem  $u_1$  e  $u_2$  em  $P_v$  com o menor custo e as duas arestas  $e_{u_1,v}$  e  $e_{u_2,v}$  de  $E_v$  respectivas à estes nodos. Ao nodo  $v$  é atribuído o seu número médio de saltos, conforme a Equação 2.

$$h_v = \frac{h_{u_1} + h_{u_2}}{2} + 1 \quad (2)$$

Onde:

$h_v$  - número médio de saltos do nodo  $v$

$h_{u_1}$  - número de saltos do nodo de origem  $u_1$

$h_{u_2}$  - número de saltos do nodo de origem  $u_2$

Após a ordenação das arestas de todos os nodos  $v$  de  $S'$ , é aplicada a Equação 1 novamente, agora sobre o conjunto  $S'$ . O nodo candidato  $v$  de  $S'$  que possuir o menor custo é adicionado a  $V_B$  e são adicionadas as arestas  $e_{u_1,v}$  e  $e_{u_2,v}$  a  $E_B$ .

Se nenhum nodo confiável foi encontrado no conjunto  $S'$ , é procurado o conjunto  $S''$ , que contém os nodos que possuem apenas uma aresta provinda de  $V_B$  no grafo  $G$ . Para cada nodo  $v$  de  $S''$  é determinado  $n_v$ , o número de arestas de saída de  $v$  que vão em direção ao conjunto  $V - V_B$ . Em  $n_{max}$  é armazenado o valor máximo identificado de  $n_v$  do conjunto. O nodo de  $S''$  que é adicionado a  $V_B$  é aquele que possui o menor custo de acordo com a Equação 3.

Esta equação determina o custo de um nodo relacionando  $n_v$  (de modo a aumentar a possibilidade de um nodo confiável ser encontrado na próxima iteração) com a fonte de

energia (adicionando preferencialmente um nodo com a menor restrição no consumo de energia). Os pesos  $w_n$  e  $w_p$  determinam a importância de cada um dos fatores na avaliação e consequentemente, na escolha do nodo adicionado.

$$c_v = \frac{w_n \left(1 - \frac{n_v}{n_{max}}\right) + w_p p_v}{w_n + w_p} \quad (3)$$

Onde:

$v$  - nodo a ser avaliado

$c_v$  - custo do nodo  $v$ ,  $0 \leq c_v \leq 1$

$n_v$  - número de arestas que saem de  $v$  em direção a  $V - V_B$

$n_{max}$  - número máximo de  $n_v$  do conjunto de candidatos

$p_v$  - peso atribuído ao tipo de fonte de energia do nodo  $v$

$w_n$  - peso do número de arestas

$w_p$  - peso da fonte de energia

Por fim, se nenhum nodo confiável é encontrado no conjunto  $S'$  ou  $S''$ , o algoritmo encerra sua execução, já que os nodos restantes em  $V - V_B$  estão desconectados da topologia.

### 5.3.1.3 Construção do grafo de *uplink* modificado

O grafo de *uplink*  $G_U(V_U, E_U)$  é utilizado para o envio de mensagens dos nodos ao *gateway*. Nodos sensores enviam suas leituras periodicamente através deste grafo. Um nodo só é considerado confiável no grafo quando o mesmo possui ao menos dois vizinhos pelos quais ele pode propagar estas mensagens em direção ao *gateway*.

A estrutura do algoritmo para construção dos grafos de *uplink* é similar à do Algoritmo 1. A diferença é que todas as arestas devem ter seu sentido invertido no grafo original, e então o algoritmo pode ser aplicado. Ao final do processo, o sentido das arestas é novamente revertido. O Algoritmo 2 apresenta as etapas para construção do grafo de *uplink*.

---

**Algoritmo 2** Construção do grafo de *uplink*


---

**Entrada:** Grafo da topologia completa  $G(V, E)$ 
**Saída:** Grafo de *uplink*  $G_U(V_U, E_U)$ 

```

1  Construa o grafo  $G^R(V, E^R)$ , invertendo o sentido de todas as arestas de  $G(V, E)$ 
2  Inicie  $V_U = g \cup V_{AP}$  e  $E_U$  com as arestas de  $g$  em direção a  $V_{AP}$ 
3  enquanto  $V_U \neq V$  faça
4      Encontre  $S' \subseteq V - V_U: \forall v \in S', v$  tenha duas ou mais arestas provindas de  $V_U$  em  $G$ 
      onde os nodos de origem das arestas não tenham atingido o seu limite de vizinhos
5      se  $S' \neq \emptyset$  então
6          para todo  $v \in S'$  faça
7               $E_v$  recebe as arestas provindas de  $V_U$ 
8               $P_v$  recebe os nodos de origem das arestas de  $E_v$ 
9              Classifique  $P_v$  de acordo com a Eq. 4
10             Escolha as arestas  $e_{u1,v}$  e  $e_{u2,v}$  relativas aos nodos ordenados em  $P_v$ 
11              $h_v = \frac{h_{u1} + h_{u2}}{2} + 1$  e  $l_v = 2$ 
12         fim para
13         identifique o nodo  $v$  com menor custo em  $S'$  de acordo com a Eq. 4
14          $V_U = V_U \cup v$  e  $E_U = E_U \cup e_{u1,v} \cup e_{u2,v}$  e  $l_{u1} = l_{u1} + 1$  e  $l_{u2} = l_{u2} + 1$ 
15     caso contrário
16         encontre  $S'' \subseteq V - V_U: \forall v \in S'', v$  tenha uma aresta provinda de  $V_U$  em  $G$ 
      onde os nodos de origem das arestas não tenham atingido o seu limite de vizinhos
17     se  $S'' \neq \emptyset$  então
18         para todo  $v \in S''$  faça
19              $h_v = h_{u1} + 1$  e  $l_v = 1$ 
20             calcule  $n_v$ , o # de arestas que vão em direção a  $V - V_U$ 
21         fim para
22         identifique o nodo  $v$  com menor custo em  $S''$  de acordo com a Eq. 3
23          $V_U = V_U \cup v$  e  $E_U = E_U \cup e_{u,v}$  e  $l_u = l_u + 1$ 
24     fim se
25     caso contrário
26         //nodos desconectados, o grafo  $G_U$  é parcial
29     fim se
30 fim se
31 fim enquanto
32 Construa o grafo  $G_U(V_U, E_U)$ , revertendo as arestas de  $G_U$ 

```

---

Os objetivos para construção deste grafo são similares ao do grafo modificado de *broadcast*. Adicionalmente, busca-se balancear o número de vizinhos que cada nodo já possui durante a construção do grafo, evitando que a tarefa de roteamento se concentre em alguns nodos da rede. Para isto, é realizada a substituição da Equação 1 pela Equação 4 na linha 9. Nesta equação, o número de vizinhos atual  $l_i$  do nodo  $i$  é relacionado ao seu número máximo de vizinhos  $l_{imax}$ . O peso do fator número de vizinhos é dado por  $w_l$ .



$$c_i = \frac{w_h \frac{h_i}{h_{max}} + w_p p_i + w_l \frac{l_i}{l_{imax}}}{w_h + w_p + w_l} \quad (4)$$

Onde:

$i$  - nodo a ser avaliado

$c_i$  - custo do nodo  $i$ ,  $0 \leq c_i \leq 1$

$h_i$  - número de saltos de  $i$

$h_{max}$  - número de saltos máximo do conjunto de candidatos

$p_i$  - restrição de energia do nodo  $i$ ,  $0 \leq p_i \leq 1$

$l_i$  - número atual de vizinhos do nodo  $i$

$l_{imax}$  - número máximo de vizinhos do nodo  $i$

$w_h$  - peso do número de saltos

$w_p$  - peso da fonte de energia

$w_l$  - peso do número atual de vizinhos

Para evitar que nodos que já tenham atingido seu número máximo de vizinhos recebam mais conexões, o algoritmo ainda restringe, nas linhas 4 e 16, a busca às arestas onde os nodos de origem não tenham atingido seu número máximo de vizinhos.

Por fim, ao ser adicionado o nodo  $v$ , é incrementado o seu número de vizinhos (linhas 11 ou 19), bem como o número de vizinhos dos nodos de origem das arestas adicionadas (linhas 14 ou 23).

### 5.3.2 Segundo experimento

O segundo experimento envolve a captura de pacotes trafegados em uma rede WirelessHART operacional através de um *sniffer*. Com base nos pacotes capturados, é realizada a identificação da topologia da rede, dos grafos construídos, das características dos dispositivos presentes na rede, e é realizada a análise dos grafos.

### 5.3.3 Métricas para avaliação e comparação dos grafos

As métricas propostas para a avaliação dos grafos nos experimentos têm relação com os objetivos de definição de rotas utilizados no primeiro experimento:

- a) Média de saltos do grafo: Corresponde à média de saltos dos dispositivos do grafo em relação ao AP, e provê uma indicação da distância média da rede, do consumo de energia por mensagem, e da necessidade de configuração dos dispositivos;
- b) Máximo de saltos no grafo: Corresponde ao maior número de saltos entre todos os dispositivos presentes na rede em relação ao AP;
- c) Distribuição de frequência do número de saltos: Esta métrica, avaliada através de histograma, indica a contagem de dispositivos do grafo em relação ao seu número de saltos;
- d) Porcentagem de nodos distantes: Corresponde à porcentagem de nodos que estão a uma distância em número de saltos maior que um determinado valor;
- e) Porcentagem de nodos confiáveis: Corresponde à porcentagem de nodos que possuem ao menos dois vizinhos no grafo de *uplink* pelo qual o mesmo propaga suas mensagens, e à porcentagem de nodos que possuem ao menos 2 vizinhos no grafo de *broadcast* pelo qual o mesmo recebe mensagens;
- f) Porcentagem de dispositivos roteadores: Esta métrica avalia a quantidade de dispositivos que têm a função de roteadores. Uma baixa porcentagem pode indicar que alguns dispositivos podem estar sobrecarregados na função de roteamento, enquanto uma alta porcentagem indica uma grande distribuição da carga da rede. Um nodo é considerado roteador no grafo de *broadcast* se o mesmo propaga mensagens para outros vizinhos, e no grafo de *uplink* se o mesmo recebe mensagens de outros vizinhos.

- g) Porcentagem de arestas com restrição de energia: No grafo de *broadcast*, este valor corresponde à porcentagem de arestas do grafo que tem como origem nodos com restrição de energia, indicando que os mesmos são roteadores de mensagens. No grafo de *uplink*, este valor corresponde à porcentagem de arestas que tem como destino nodos com restrição de energia, que atuam neste grafo como roteadores. Quanto menor o número de arestas com restrição de energia, menor é a depleção da fonte de energia destes nodos.
- h) Número máximo de vizinhos: Indica o nodo com maior número de vizinhos no grafo de *uplink*, indicando a carga máxima aplicada em um nodo da rede;
- i) Distribuição de frequência do número de vizinhos: Esta métrica, avaliada através de histograma, indica a distribuição dos dispositivos em relação ao seu número de vizinhos.

## **6 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS**

Este capítulo descreve a implementação do ambiente proposto e os resultados obtidos com os experimentos propostos.

### **6.1 DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO**

O ambiente proposto e os algoritmos foram desenvolvidos em linguagem Java. A implementação foi separada em diferentes módulos: criação de topologias, captura de topologias, aplicação de algoritmos de roteamento; e análise de grafos. Um breve detalhamento da implementação é apresentado a seguir.

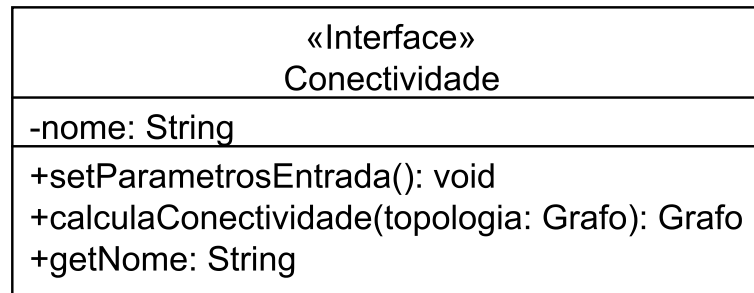
#### **6.1.1 Classe Grafo**

A classe Grafo consiste em uma lista de objetos do tipo Nodo e Aresta, e corresponde à base para descrição das topologias da rede e grafos construídos. A classe Nodo contém diversas informações sobre as características de cada nodo presente na rede (tipo de dispositivo, tipo de fonte de energia, posição, características, entre outros), enquanto que a classe Aresta contém informações sobre as características das conexões existentes entre dois nodos (nodo de origem, nodo de destino, nível de sinal, entre outros). A classe Grafo possui funções para identificação das arestas de destino e origem de cada nodo, obtenção de listas de nodos que possuem uma característica específica, entre outros.

#### **6.1.2 Módulo de criação de topologias**

A sequência para a criação de uma topologia é similar à do simulador proposto por Zats et al. (2011), e inicia com a definição da topologia, através da criação e posicionamento dos nodos dentro de uma área. Por fim é aplicado o modelo de conectividade, que define as conexões com base no posicionamento dos dispositivos.

Cada modelo de conectividade consiste em uma classe que implementa os métodos da interface Conectividade, apresentado na Figura 13. Os modelos desenvolvidos são inseridos dentro de um pacote específico do ambiente, e são carregados dinamicamente nas interfaces gráficas desenvolvidas.

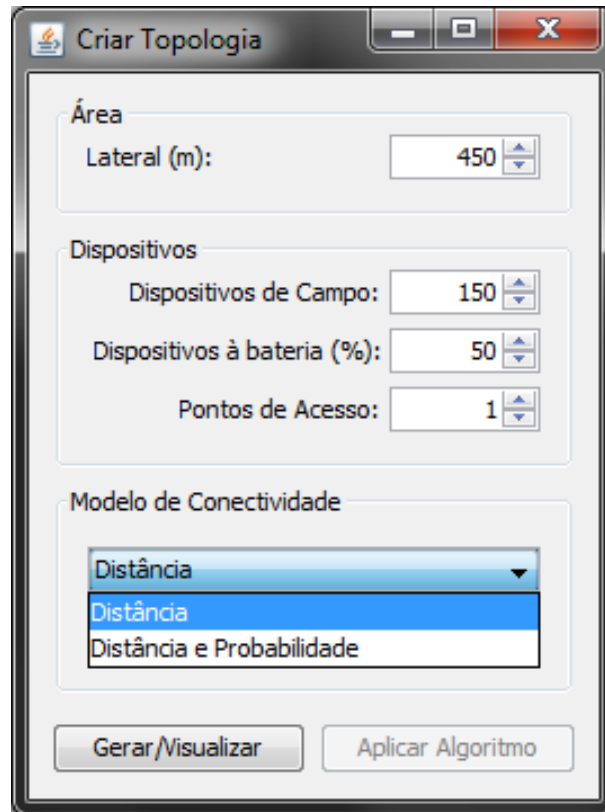


**Figura 13 Interface para implementação de modelos de conectividade**

Três métodos principais estão disponíveis nesta interface: um método para obtenção do nome do modelo de conectividade; outro para ajuste dos parâmetros do modelo, chamado pelo ambiente antes da execução, de modo a fornecer uma interface gráfica específica para ajuste de parâmetros; e por fim, o método que aplica o modelo sobre a topologia e retorna o grafo calculado.

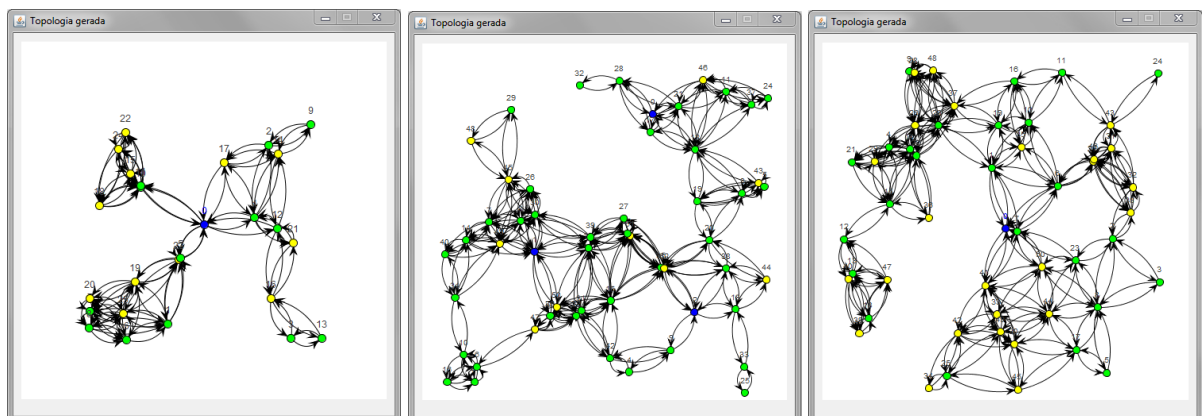
Uma interface gráfica foi desenvolvida para a criação randômica de topologias utilizada nos experimentos. A interface é apresentada na Figura 14. A partir da interface, um cenário pode ser criado e os nodos são dispostos de maneira randômica dentro da área do cenário. O AP é inserido centralmente à área. No caso de mais AP serem utilizados, os mesmos são dispostos de maneira aleatória.

Dois botões são disponibilizados na interface: o botão de geração e visualização realiza a geração da topologia com base nos parâmetros informados e exibe a mesma; e o botão de aplicação de algoritmo encaminha a topologia gerada para o módulo de aplicação de algoritmos.



**Figura 14 Interface para criação de topologias**

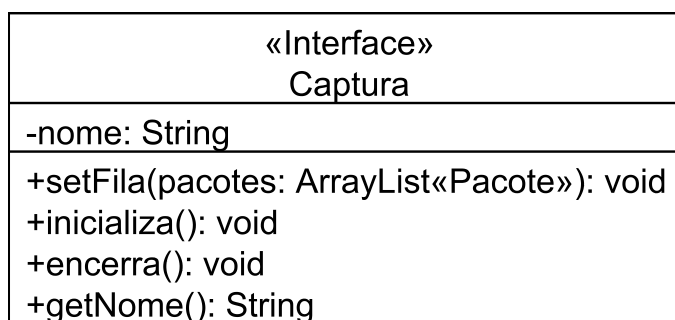
Alguns exemplos de topologias geradas a partir desta interface gráfica, com quantidades diferentes de dispositivos, são apresentados na Figura 15. Os nodos em azul representam os AP, os nodos em amarelo são dispositivos à bateria, e os dispositivos em verde são dispositivos alimentados na rede elétrica da planta.



**Figura 15 Exemplos de topologias geradas**

### 6.1.3 Módulo de captura de topologias

Este módulo permite a captura de pacotes de uma rede operacional através da conexão com um *sniffer*, ou a partir da leitura de um arquivo com os pacotes capturados. Para permitir a utilização de diversos mecanismos de entrada, uma interface denominada Captura, apresentada na Figura 16, é disponibilizada para implementação de classes específicas para cada mecanismo. As classes desenvolvidas também são adicionadas a um pacote específico e são carregadas dinamicamente na interface.



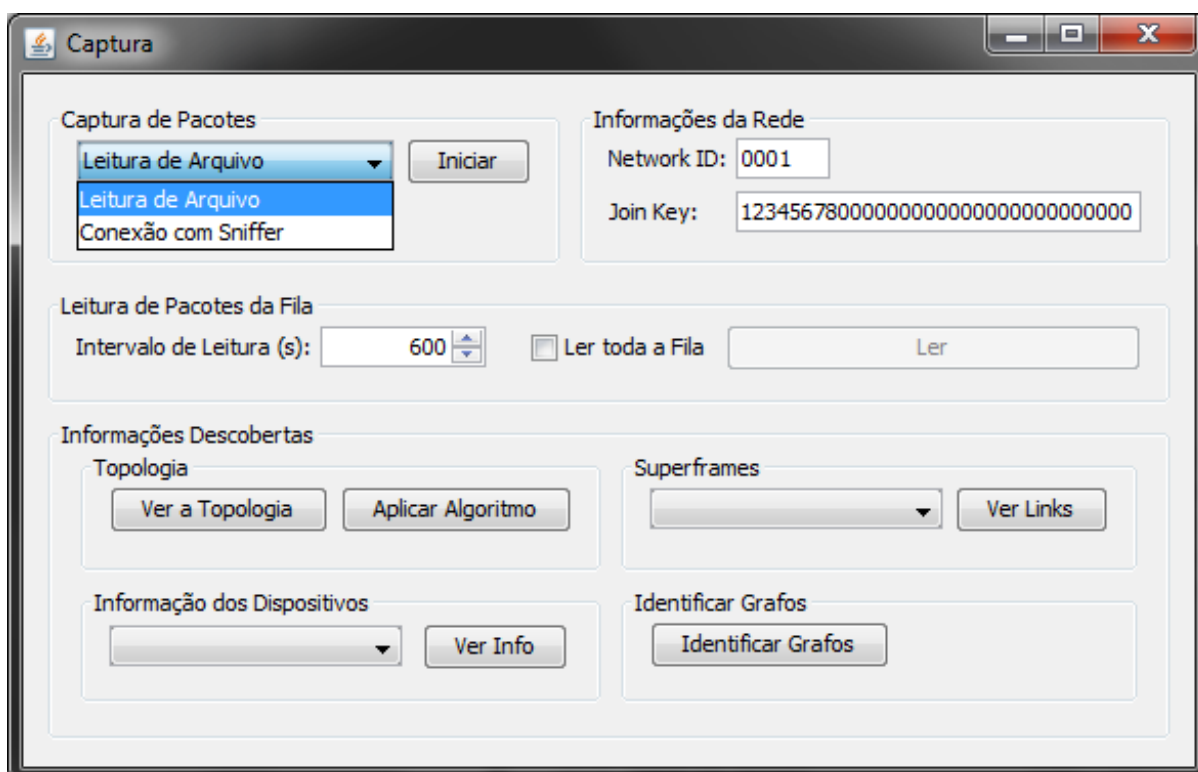
**Figura 16 Interface de implementação de captura de pacotes**

A interface possui quatro métodos: um método para obtenção do nome do mecanismo de entrada; um método para passar a referência da fila a ser usada para adição de pacotes capturados; um método para dar início ao processo de captura dos pacotes; e outro para encerrar o processo de captura, ao fim da análise.

Uma classe do módulo tem a função de retirar os pacotes da fila e realizar a decodificação dos mesmos. A cada pacote decodificado, é chamada a instância da classe Registro da Rede, que atualiza as informações e interpreta os comandos da camada de aplicação. Nesta classe são mantidas as diversas listas que guardam informações sobre os dispositivos da rede, sobre seus vizinhos, chaves de sessões, *superframes*, *links*, grafos, rotas, entre outros.

A Figura 17 apresenta a interface desenvolvida para a obtenção das topologias a partir da captura de pacotes. Uma classe que implementa a interface Captura foi desenvolvida para

permitir o carregamento de um arquivo contendo pacotes. No método de início de processo é solicitado ao usuário o caminho do arquivo com os pacotes. Os pacotes lidos então armazenados em uma fila, onde podem ser lidos em intervalos de tempo de acordo com as estampas temporais dos pacotes, permitindo o acompanhamento da evolução da rede ao longo do tempo de monitoração.



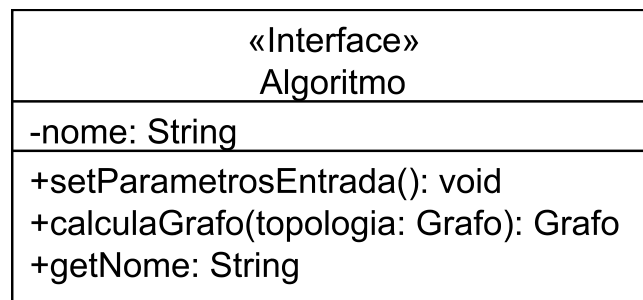
**Figura 17** Interface de captura de topologias

A interface disponibiliza meios para a visualização da topologia capturada e utilização da mesma em outros algoritmos de roteamento. Além disso, é possível visualizar as informações sobre as configurações e características de cada dispositivo descoberto na rede, conforme apresentado na Figura 30. Por fim, a interface ainda permite a visualização dos *superframes* configurados e a identificação dos grafos configurados na rede. Estes grafos podem ser encaminhados para a análise de resultados.



### 6.1.4 Aplicação de algoritmos

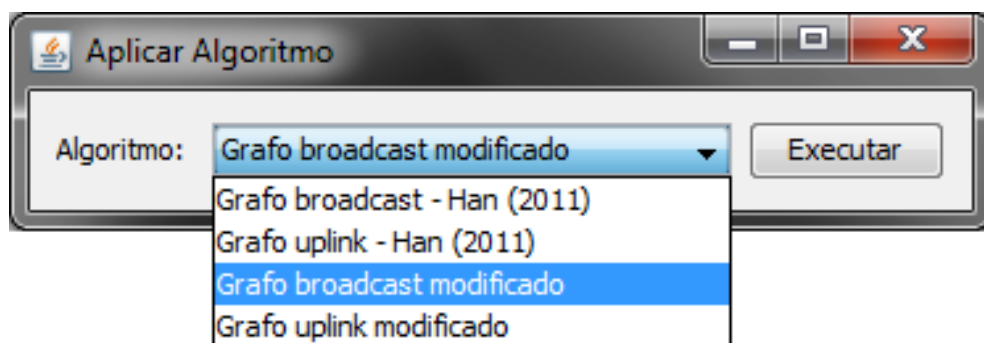
Cada algoritmo desenvolvido consiste em uma classe específica que implementa os métodos da interface Algoritmo, apresentado na Figura 18. Os algoritmos desenvolvidos são inseridos dentro de um pacote específico do ambiente e são carregados dinamicamente pelo ambiente.



**Figura 18 Interface para implementação de algoritmos de roteamento**

Três métodos principais estão disponíveis nesta interface: um método para obtenção do nome do algoritmo, outro para ajuste dos parâmetros de entrada, que é chamado pelo ambiente antes da execução do algoritmo de modo a fornecer uma interface gráfica específica para ajuste dos parâmetros do algoritmo; e por fim, o método que aplica o algoritmo sobre a topologia e retorna o grafo calculado.

Uma interface gráfica foi desenvolvida com o objetivo de selecionar o algoritmo a ser aplicado à topologia, conforme visualizado na Figura 19.



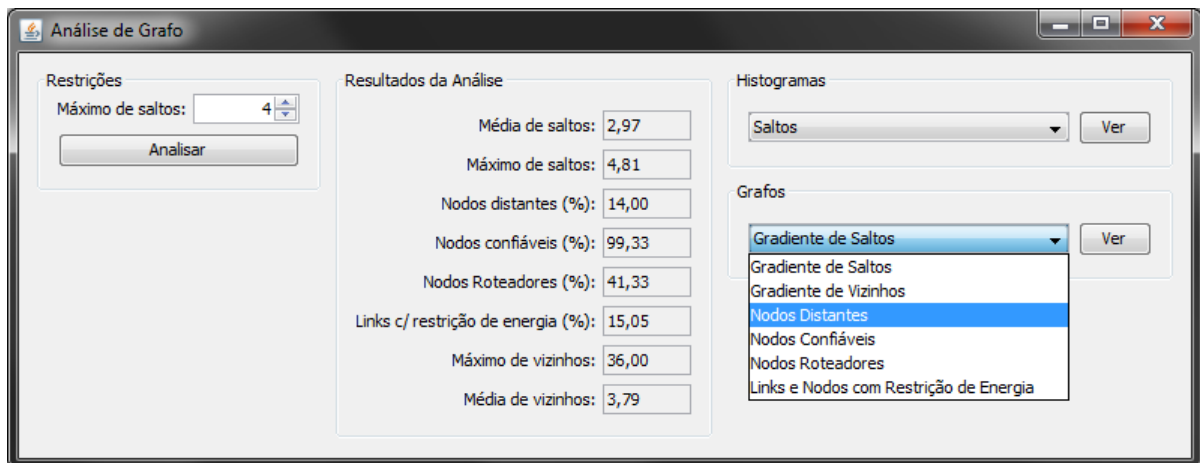
**Figura 19 Interface de escolha de algoritmo**

### 6.1.5 Módulo de análise de grafos construídos

Esta interface permite a análise dos grafos obtidos e gerados, através de estatísticas, histogramas e visualização dos grafos construídos. Restrições podem ser aplicadas para verificar o impacto nos resultados.

Duas interfaces foram disponibilizadas para o desenvolvimento de classes que apresentam diferentes histogramas e grafos gerados. Os grafos permitem a identificação de características específicas de cada nodo e aresta, através da aplicação de cores diferentes a cada elemento Nodo e Aresta. Os histogramas permitem exibir diferentes distribuições, de acordo com uma característica específica dos dispositivos. As classes implementadas são inseridas em pacotes específicos do ambiente e são carregadas dinamicamente.

A Figura 20 apresenta a interface gráfica desenvolvida para análise dos grafos e rotas construídas nos experimentos. Uma restrição para o número máximo de saltos foi adicionada, de modo a permitir a identificação do número de nodos distantes, de acordo com a métrica de avaliação proposta. As restrições são compartilhadas de modo que as estatísticas, histogramas e grafos possam fazer uso das mesmas em suas implementações de classe.



**Figura 20 Interface de análise de grafos construídos**

## 6.2 PRIMEIRO EXPERIMENTO: MODIFICAÇÃO DE ALGORITMOS DE ROTEAMENTO

Neste experimento, os grafos modificados de *uplink* e *broadcast* foram analisados no ambiente. Um cenário foi criado a partir da distribuição aleatória dos dispositivos dentro de uma área, com o AP centralizado nesta área. As dimensões da área e o modelo de conectividade são os mesmos utilizados no do trabalho de Han et al. (2011), e os valores são apresentados juntamente com as características dos dispositivos na Tabela 5. A restrição de número de saltos foi definida como 4, e os nodos com o número de saltos maior que a restrição foram considerados distantes nas análises.

Dimensões da área	450 x 450 m
Alcance máximo de comunicação	100 m
Número máximo de vizinhos	32
Número de dispositivos	150
Dispositivos à bateria	50 %
Pontos de Acesso	1

A topologia gerada a partir dos parâmetros é apresentada na Figura 21. Na figura, o AP está representado em azul, os dispositivos alimentados à bateria são representados pela cor amarela, enquanto os dispositivos sem restrição de consumo energia são representados em verde.

### 6.2.1 Avaliação do algoritmo de *broadcast*

O algoritmo de *broadcast* proposto por Han et al. (2011), cujo objetivo de construção das rotas leva em conta apenas a distância em número de saltos, e o algoritmo de *broadcast* modificado proposto, que leva em conta não somente o número de saltos mas também o tipo de fonte de energia dos dispositivos, foram aplicados à topologia gerada.



A Tabela 7 apresenta a comparação dos resultados obtidos a partir dos grafos de *broadcast* resultantes da aplicação dos algoritmos sobre a topologia da rede. As células em cinza claro destacam os menores valores, enquanto que as células em cinza escuro destacam os maiores valores.

**Tabela 7 Comparação dos resultados para o grafo de *broadcast* modificado**

Resultados	Han et al. (2011)	A	B	C
Média de saltos	2,97	2,97	3,03	3,16
Máximo de saltos	4,81	4,81	5,11	5,94
Nodos distantes (%)	14,00	14,00	17,33	22,00
Nodos confiáveis (%)	99,33	99,33	99,33	99,33
Nodos roteadores (%)	41,33	41,33	35,33	34,67
Arestas com restrição de energia (%)	15,05	15,05	5,35	0,67

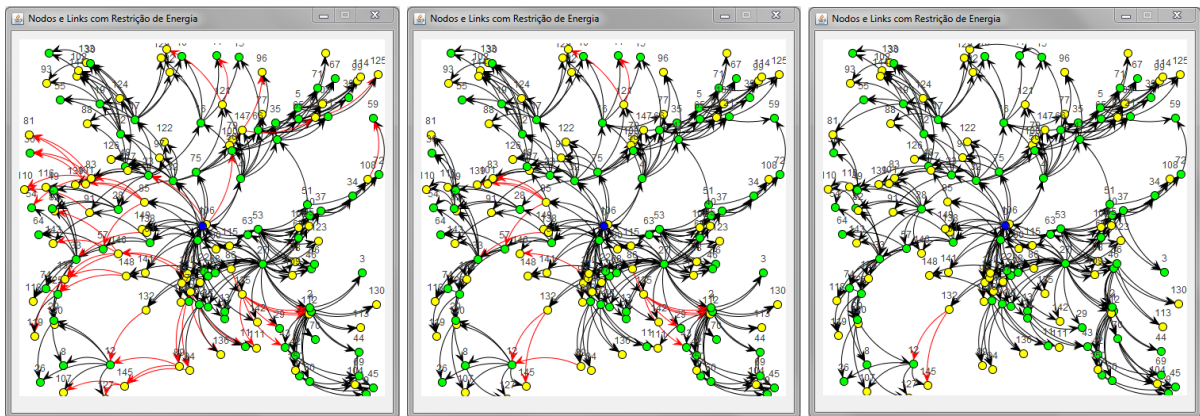
O algoritmo de Han et al. (2011) e o algoritmo modificado com o conjunto de parâmetros A apresentam a menor média de saltos, o menor número máximo de saltos e o menor número de nodos distantes, em função do primeiro utilizar apenas o número de saltos como métrica e o segundo ter o peso  $w_h$  como único peso significativo para definição do grafo. Entretanto, o número de nodos roteadores e o número de arestas com restrição de energia é o maior.

Já no conjunto de parâmetros B é aplicado um peso ao tipo de fonte de energia, e, por consequência, as arestas com restrição de energia diminuem para aproximadamente 5% no grafo. O conjunto de parâmetros C aplica um peso maior na restrição de energia, e por consequência, a porcentagem de arestas com restrição de energia é a menor dos conjuntos. Adicionalmente, este conjunto possui o menor número de dispositivos roteadores, já que apenas os nodos sem restrição de energia tentam ser utilizados. Por outro lado, este conjunto tem o nodo com o máximo número de saltos, a maior média de saltos e a maior porcentagem de nodos a uma distância maior que quatro saltos.

A quantidade de nodos confiáveis se manteve constante, indicando que todos os nodos possuíam vizinhos suficientes pelos quais os mesmos puderam ser conectados. Apenas um

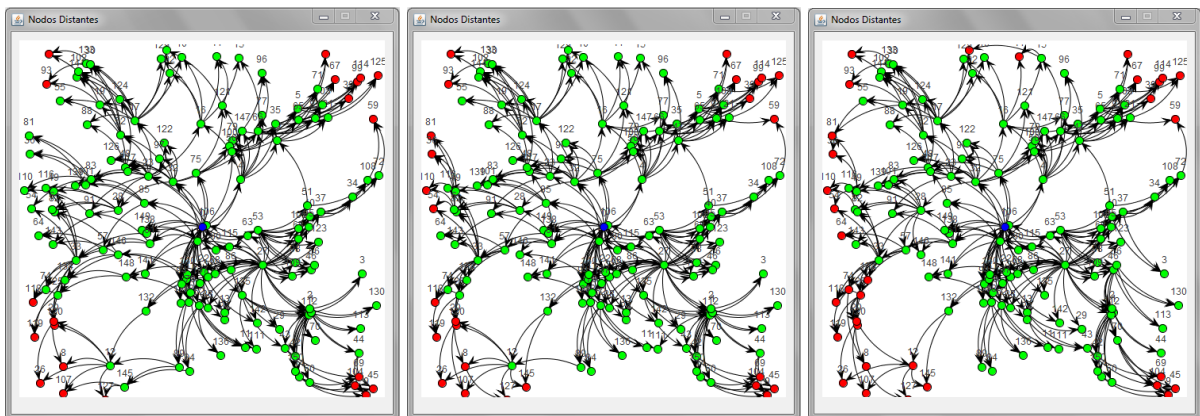
nodo não foi considerado confiável. Este é um problema que ocorre em redes que possuem apenas um AP, já que o primeiro nodo a ser adicionado na execução dos Algoritmo 1 e Algoritmo 2 só possui uma opção de conexão, que é o próprio AP (Han et al., 2011).

A Figura 22 apresenta os grafos com a identificação dos nodos e arestas com restrição de energia, para os conjuntos de parâmetros A, B e C. Pode ser observado que à medida que o peso  $w_p$  aumenta, diminui-se o número de arestas com restrição.



**Figura 22 Nodos e arestas com restrição de energia nos conjuntos de parâmetros A, B e C**

Já na Figura 23 são apresentados os nodos distantes, que estão a um número de saltos do AP maior que quatro. Conforme observado, os dispositivos distantes estão nas extremidades da área, já que o AP se encontra no centro.



**Figura 23 Nodos distantes para os conjuntos A, B e C**

### 6.2.2 Avaliação do algoritmo de *uplink*

O algoritmo de *uplink* proposto por Han et al. (2011) e o algoritmo de *uplink* modificado também foram aplicados à topologia gerada. Cinco combinações de parâmetros foram utilizadas no algoritmo modificado, e as combinações são apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8 Conjunto de parâmetros para avaliação do algoritmo de *uplink***

Conjunto de parâmetros	Característica do conjunto	Equação 4			Equação 3	
		$w_h$	$w_l$	$w_p$	$w_n$	$w_p$
A	Saltos	1	0	0	0,5	0,5
B	Saltos e vizinhos	0,6	0,4	0	0,5	0,5
C	Saltos e energia	0,8	0	0,2	0,5	0,5
D	Saltos e energia	0,6	0	0,4	0,5	0,5
E	Saltos, vizinhos e energia	0,4	0,4	0,2	0,5	0,5

A Tabela 9 apresenta a comparação dos resultados obtidos a partir da aplicação dos algoritmos de *uplink* sobre a topologia da rede. As células em cinza claro destacam os menores valores, enquanto que as células em cinza escuro destacam os maiores valores.

A menor média de saltos, o menor número máximo de saltos e o menor número de nodos distantes são encontrados no algoritmo original de Han et al (2011) em função do mesmo utilizar apenas o número de saltos como métrica para definição das rotas. Por outro lado, o número máximo de vizinhos passa do limite de vizinhos disponível nos nodos (de acordo com a Tabela 1), já que não existe nenhuma limitação no algoritmo. O conjunto A possui como peso apenas o número de saltos, mas é possível observar que o número de vizinhos foi limitado a 32, impactando no aumento do número de nodos roteadores no conjunto em relação ao algoritmo de Han et al. (2011).

O conjunto de parâmetros B possui a maior porcentagem de roteadores, já que o conjunto B considera a quantidade de vizinhos atual de cada nodo durante a execução do

algoritmo. Como o número de roteadores é maior, a quantidade de arestas com restrição de energia também aumenta.

**Tabela 9 Comparação dos resultados para diferentes conjuntos de parâmetros**

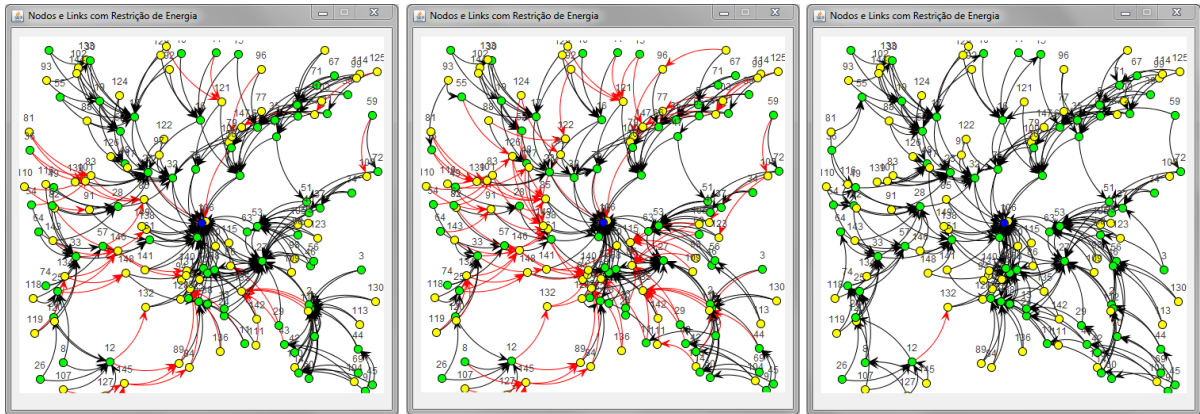
Resultados	Han et al. (2011)	A	B	C	D	E
Média de saltos	2,97	2,98	3,01	3,04	3,20	3,22
Máximo de saltos	4,81	4,81	4,84	5,11	6,62	5,94
Nodos distantes (%)	14,00	14,00	14,00	17,33	22,00	24,0
Nodos confiáveis (%)	99,33	99,33	99,33	99,33	99,33	99,33
Nodos roteadores (%)	41,33	42,67	59,33	36,77	35,33	41,3
Arestas com restrição de energia (%)	15,05	15,05	33,78	5,02	0	0,33
Máximo de vizinhos	36	32	20	32	32	17

O conjunto de parâmetros C aplica um peso na restrição do consumo de energia, e por consequência, a porcentagem de arestas com restrição de energia diminui. O conjunto de parâmetros D aplica um peso maior na restrição, e por consequência, a quantidade de arestas com restrição de energia é igual a 0, indicando que nenhum dispositivo com restrição de energia está atuando como roteador de mensagens. Adicionalmente, este conjunto possui o menor número de dispositivos roteadores, já que apenas os nodos sem restrição de energia tentam ser utilizados. Por outro lado, este conjunto tem o nodo com o máximo número de saltos.

Por fim, o conjunto E possui o menor peso de todos para o número de saltos, causando o maior número de nodos distantes e a maior média de saltos. Por outro lado, o conjunto mantém o menor número máximo de vizinhos e um valor baixo de arestas com restrição.

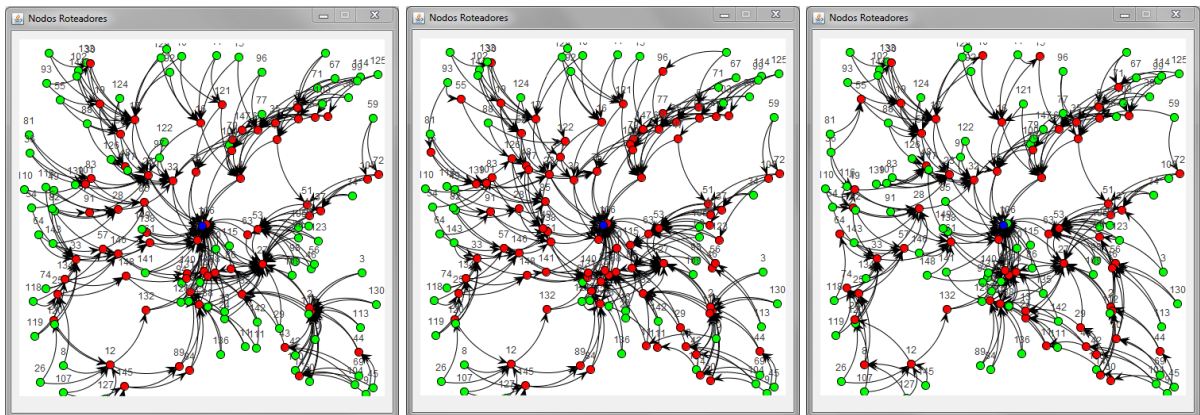
Os grafos com a identificação dos nodos e arestas com restrição, gerados a partir dos conjuntos de parâmetros A, B e E, são apresentados na Figura 24.





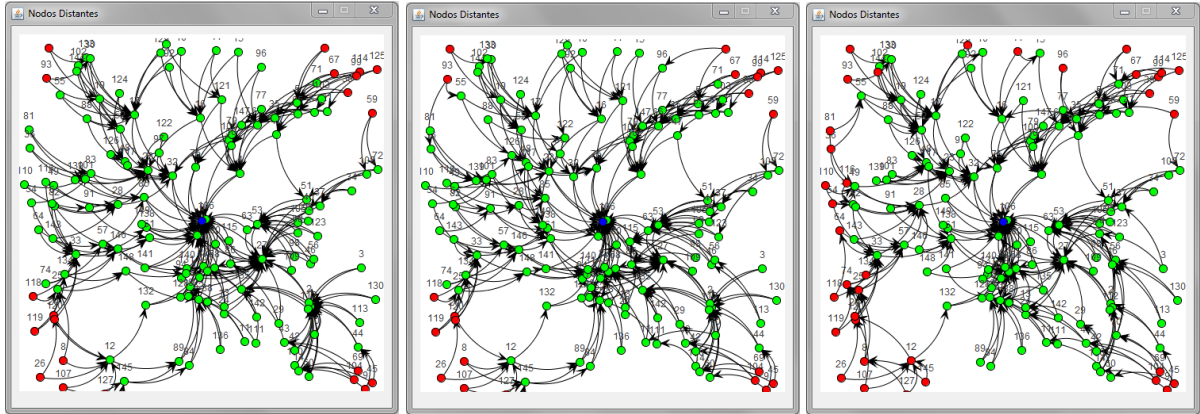
**Figura 24** Nodos e arestas com restrição de energia nos conjuntos de parâmetros A, B e E

Os nodos roteadores dos grafos para os conjuntos A, B e E são apresentados na Figura 25. Como pode ser observado, para os conjuntos A e B a maioria dos nodos roteadores são aqueles próximos do AP. Para o conjunto E, que possui peso no consumo de energia, observa-se a distribuição dos roteadores pela rede, sempre evitando que os dispositivos a bateria sejam roteadores.



**Figura 25** Nodos roteadores nos conjuntos de parâmetros A, B e E

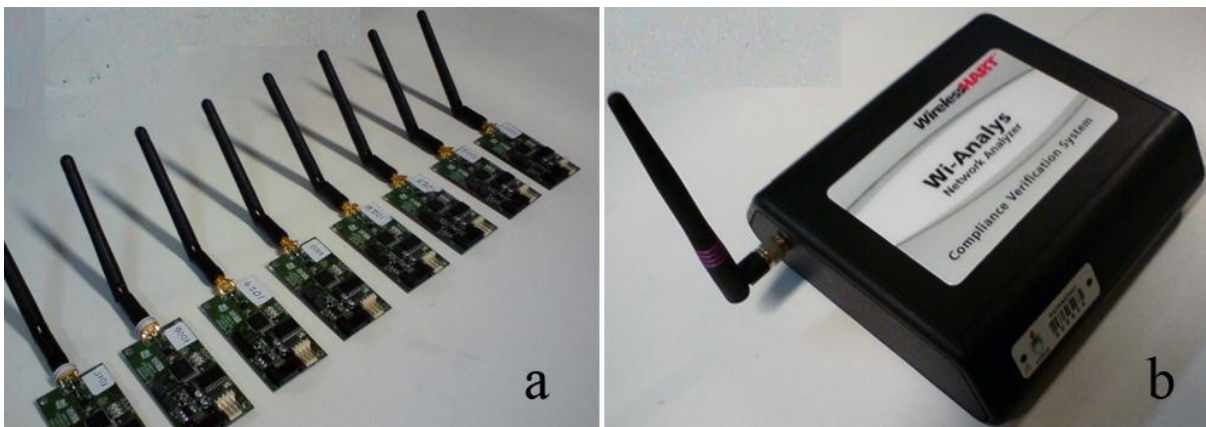
Por fim, a Figura 26 destaca os nodos distantes para o conjunto de parâmetros A, B e E. Conforme observado, o conjunto de parâmetros E contém o maior número de nodos distantes.



**Figura 26** Nodos distantes (número de saltos maior que 4)

### 6.3 SEGUNDO EXPERIMENTO: CAPTURA DE INFORMAÇÕES DE UMA REDE WIRELESSHART OPERACIONAL

A fim de verificar a funcionalidade de captura desenvolvida, uma rede WirelessHART foi montada no Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica da UFRGS. O cenário, representado anteriormente na Figura 8, foi composto dos seguintes dispositivos: *Network Manager*, Ponto de Acesso e *Gateway* da Emerson (modelo 1420A); nove dispositivos compatíveis com o protocolo WirelessHART desenvolvidos no laboratório (MULLER et al., 2010); um *sniffer* *Wi-Analys* da HCF; e um computador para o armazenamento dos pacotes coletados. A Figura 27 apresenta os protótipos e o *sniffer* e a Figura 28 apresenta o equipamento da Emerson.



**Figura 27** Protótipos compatíveis com o protocolo (a) e *sniffer* (b)



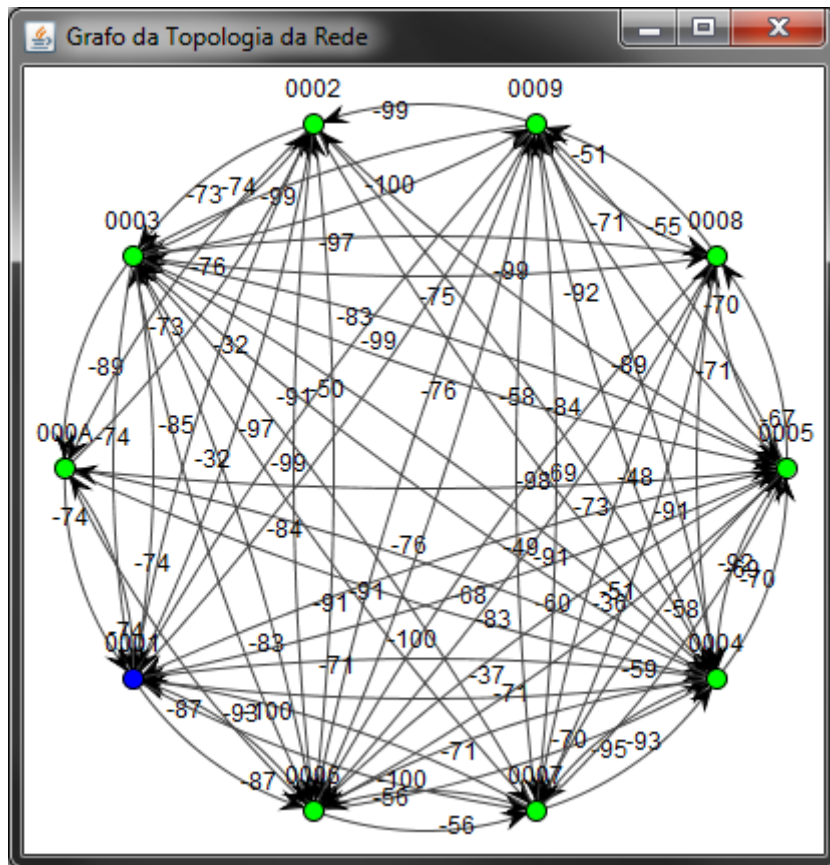
**Figura 28 Gateway Emerson 1420A**

O *sniffer* possui um programa de computador proprietário para captura e armazenamento dos pacotes. Os pacotes coletados são armazenados em um arquivo, onde cada linha do arquivo contém um pacote com a sua estampa temporal, o canal, o nível de sinal recebido, as sequências de bytes do pacote, entre outros. Desta forma, uma classe específica foi desenvolvida, a partir da interface Captura, para carregar cada pacote do arquivo no ambiente.

A sequência de inicialização do experimento ocorreu com a ligação e configuração do arquivo de coleta do *sniffer*. Em seguida, foi realizada a ligação do NM e por fim a ligação dos protótipos. Antes do experimento, todos os dispositivos foram configurados com o identificador da rede (0x0001) e com a chave de *join* da rede (0x12345678000000000000000000000000). O tráfego da rede foi coletado durante um período de operação de 2 horas.

Após a coleta do tráfego de dados da rede, o arquivo foi carregado e processado no ambiente. A topologia da rede, obtida a partir dos comandos 787 e 780 enviados pelos dispositivos ao NM, é apresentada na Figura 29. Estes comandos informam ao NM, respectivamente, o nível de sinal dos vizinhos descobertos pelos dispositivos e dos vizinhos com os quais o dispositivo possui *links* para comunicação. A distribuição dos dispositivos no

diagrama não representa a sua posição real no experimento. O nodo azul indica o AP e os nodos verdes indicam os dispositivos. O RSL das arestas também é apresentado. É observado que a conectividade da topologia é alta.



**Figura 29 Topologia da rede WirelessHART do experimento**

A Figura 30 apresenta a interface gráfica que contém as principais informações obtidas sobre o dispositivo “1013 – ufrgs” presente na rede. Na interface são apresentadas informações sobre a identificação do dispositivo, características sobre a fonte de energia, nível mínimo de sinal e número máximo de vizinhos do dispositivo. Além disso, são exibidas informações relacionadas aos vizinhos com *link* e vizinhos descobertos. As chaves de sessão utilizadas nas comunicações, bem como as rotas e *superframes* configurados também são apresentadas.

Através das rotas configuradas neste e nos outros dispositivos, foi observado que o *graph id* da rota configurada para a comunicação dos dispositivos com o *gateway* e o NM

(endereços 0xF981 e 0xF980, respectivamente) tem o identificador 0. Isto indica que o *superframe* 0 contém a rota que corresponde ao grafo de *uplink* da rede, já que valores de *graph id* menores que 256 indicam o método de roteamento por *superframe*.

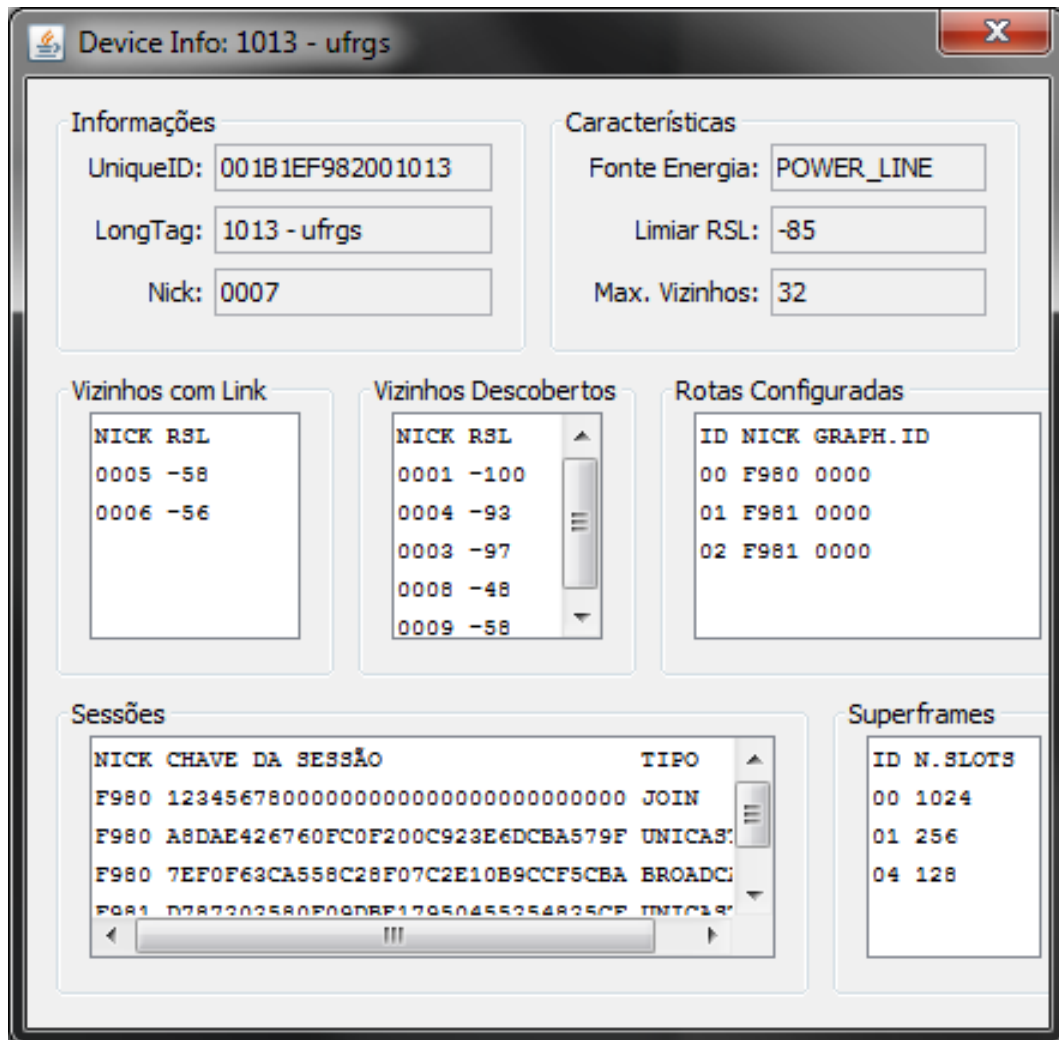


Figura 30 Informações obtidas do dispositivo “1013 – ufrgs”

Além deste *superframe*, foi observada a configuração dos *superframes* 1 e 4 na rede. O *superframe* 1 possui rotas do AP em direção a todos os dispositivos, indicando que este *superframe* é utilizado para envio de mensagens do NM e *gateway* aos dispositivos. A Figura 31 apresenta os grafos contidos nos *superframes* 0 e 1.



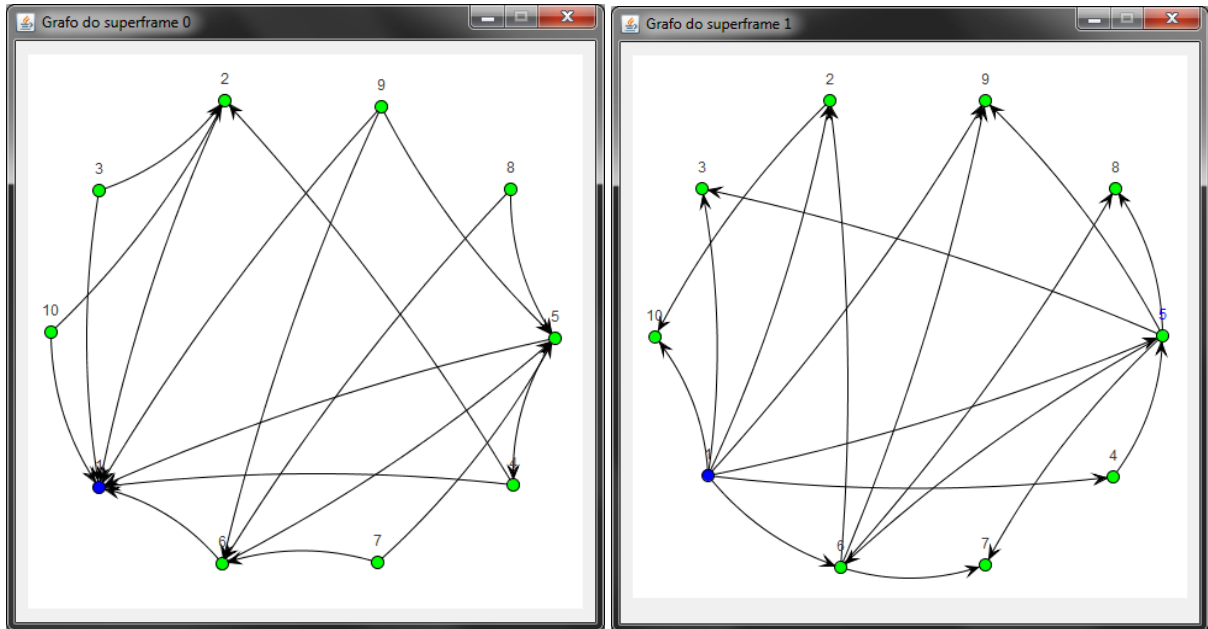


Figura 31 Grafos contidos nos *superframes* 0 e 1

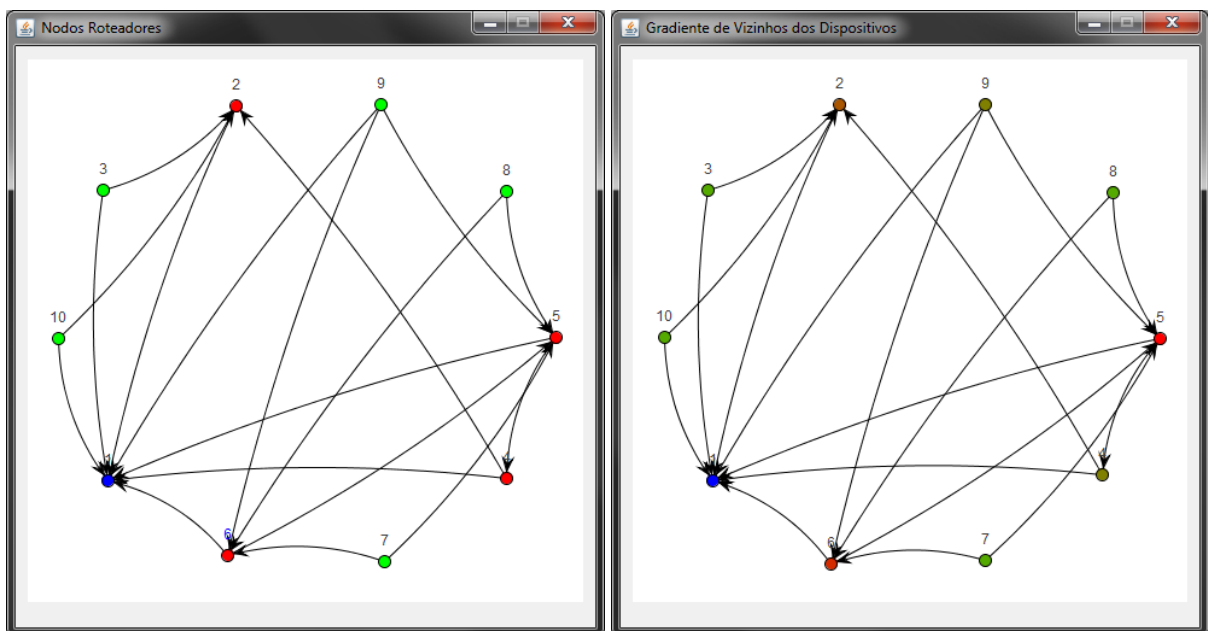
O *superframe* 4 possui *links* para novos dispositivos enviarem requisições de entrada na rede para o NM, bem como *links* de *broadcast* que são utilizados pelos dispositivos que já estão na rede para enviarem mensagens de *advertise*, como foi possível verificar através da lista de *links* apresentados na Figura 32.

Dispositivo	Número do Slot	Offset Canal	Vizinho	Tipo	Opções
NM Advertise...	0004	07	FFFF	JOIN	RECEIVE
NM Advertise...	0020	07	FFFF	JOIN	RECEIVE
NM Advertise...	0043	07	FFFF	JOIN	RECEIVE
NM Advertise...	0059	07	FFFF	JOIN	RECEIVE
NM Advertise...	0087	07	FFFF	JOIN	RECEIVE
NM Advertise...	0107	07	FFFF	JOIN	RECEIVE
1026 - ufrgs (...)	0068	07	FFFF	BROADCAST	TRANSMIT
1025 - ufrgs (...)	0056	07	FFFF	BROADCAST	TRANSMIT
1003 - Ufrgs (...)	0019	07	FFFF	BROADCAST	TRANSMIT
1008 - Ufrgs (...)	0072	07	FFFF	BROADCAST	TRANSMIT
1023 - ufrgs (...)	0111	07	FFFF	BROADCAST	TRANSMIT
1012 - ufrgs (...)	0082	07	FFFF	BROADCAST	TRANSMIT

Figura 32 Lista de links do *superframe* 4

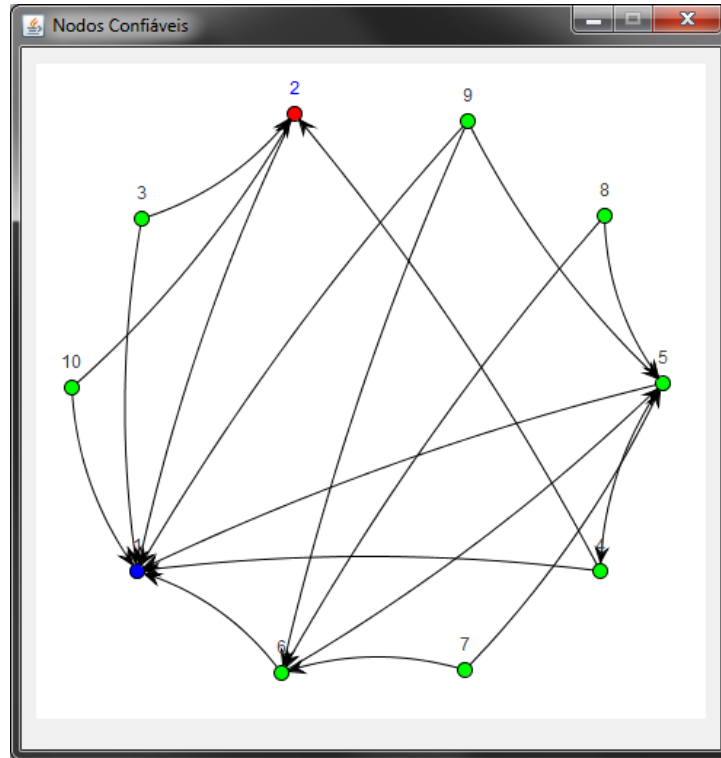
Nesta figura, são apresentadas informações sobre os *links* configurados no *superframe*. Cada linha da tabela representa um *link* configurado, indicando o dispositivo no qual o *link* está configurado, o número do *slot* dentro do *superframe*, o *offset* de canal do *link*, o vizinho com o qual o *link* está configurado e por fim o tipo de *link* e as opções que indicam se o *link* é de transmissão ou de recepção.

Após a obtenção das informações, o grafo de *uplink* contido no *superframe* 0 foi analisado para identificação de nodos roteadores e do gradiente de número de vizinhos, conforme apresentado na Figura 33.



**Figura 33 Nodos roteadores e gradiente de vizinhos do grafo de *uplink***

Por fim, a Figura 34 apresenta os nodos confiáveis do grafo de *uplink*. O nodo 2 não é considerado confiável, já que o mesmo só possui um vizinho pelo qual o mesmo pode propagar suas mensagens.



**Figura 34** Nós confiáveis do grafo de *uplink*



## 7 CONCLUSÃO

A presente dissertação abordou o desenvolvimento de um ambiente para análise de estratégias de roteamento para redes sem fio do tipo WirelessHART. O trabalho abordou a criação de topologias de rede, a construção de algoritmos para definição de rotas e a análise e comparação dos mesmos a partir de diferentes métricas relacionadas às rotas construídas. Um algoritmo estado da arte para definição de rotas em redes WirelessHART foi implementado e modificado, com o intuito de melhorar os grafos construídos dentro de alguns critérios. Também foi apresentada uma abordagem para a obtenção de topologias e grafos a partir da captura passiva de pacotes de uma rede WirelessHART operacional. Um processo para decodificação, autenticação e decriptação dos pacotes do protocolo WirelessHART foi descrito.

O ambiente permite analisar e verificar as características de grafos e rotas construídas, e auxilia na identificação de problemas, tanto em algoritmos desenvolvidos quanto em redes operacionais. Além disso, o ambiente pode auxiliar na comparação de algoritmos e ajuste dos parâmetros mais apropriados para determinadas aplicações de cada algoritmo.

Os estudos de caso apresentados mostram a aplicabilidade da ferramenta dentro dos objetivos propostos.

Com relação aos resultados do primeiro experimento, observou-se que a adição de diferentes pesos na definição dos algoritmos modificados impacta no aumento do número de saltos e na quantidade de dispositivos distantes na rede, em relação à utilização única da métrica de definição que utiliza o número de saltos. Por outro lado, observou-se uma melhor distribuição do número de vizinhos dos dispositivos, o que descentraliza a rede e evita que a falha de um nodo comprometa o funcionamento de diversos dispositivos. Observou-se ainda a diminuição da utilização de dispositivos com restrições no consumo de energia na função de

roteadores de mensagens, o que pode refletir no aumento do tempo de vida destes dispositivos na rede.

Com relação ao segundo experimento, observou-se que a topologia da rede apresentava alta conectividade, e muitos dos dispositivos conseguiam se comunicar diretamente com o NM. Observou-se a utilização do mecanismo de roteamento por *superframe* no NM, onde dois *superframes* foram configurados, sendo um para o grafo de *uplink* e outro para o grafo de *broadcast*.

Em ambos os experimentos foi utilizado apenas um AP, o que impactou em sempre haver ao menos um dispositivo que não é confiável no grafo. Este detalhe enfatiza a afirmação de que um segundo AP pode melhorar a confiabilidade da rede (HAN et al, 2011; CHEN; NIXON; MOK, 2010). O ambiente permitiu ainda verificar que as estratégias de roteamento utilizadas nos experimentos buscaram atender aos requisitos de confiabilidade do protocolo, de modo que sempre que possível os dispositivos tivessem dois vizinhos pelos quais os mesmos recebiam e enviavam as suas mensagens.

Dentre as possíveis atividades que buscam dar continuidade ao trabalho, destacam-se a extensão da ferramenta para análises que envolvem não só o roteamento, mas também o escalonamento das comunicações. O escalonamento é o processo de definir os *timeslots* que serão utilizados nas comunicações de acordo com as demandas dos dispositivos. Desta forma, busca-se integrar a aplicação de algoritmos de roteamento e de escalonamento no ambiente, melhorando a compreensão dos impactos da combinação das estratégias utilizadas. A extensão da ferramenta para análises de escalonamento pode permitir a monitoração da latência do tráfego de dados de processo em redes operacionais, através da medição dos tempos entre a geração e a chegada ao destinatário destas mensagens que contém os dados de processo.

Outra atividade sugerida é a integração da ferramenta em um ambiente de simulação de redes sem fio, onde o desempenho dos algoritmos analisados pode ser verificado ao longo do tempo e conforme as mudanças ocorridas na rede. Esta atividade poderia auxiliar no ajuste de parâmetros e no desenvolvimento de algoritmos adaptativos de roteamento e escalonamento que levem em consideração os diversos aspectos dinâmicos da rede.

## REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless Sensor Networks: A Survey. **Computer Networks**, Amsterdã, v. 38, n. 4, p. 393-422, Mar. 2002.
- AKYILDIZ, I. F., WANG, X., WANG, W. Wireless Mesh Networks: A Survey. **Computer Networks**, Amsterdã, v. 47, n. 4, p. 445-487, Mar. 2005.
- ARAMPATZIS, T., LYGEROS, J., MANESIS, S. A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks. In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, 13., 2005, Limassol. **Proceedings...** Limassol: IEEE, 2005. p. 719-724.
- CHEN, B. R. et al. LiveNet: Using Passive Monitoring to Reconstruct Sensor Network Dynamics. In: CONFERENCE ON DISTRIBUTED COMPUTING IN SENSOR SYSTEMS, 2008, Ilha Santorini. **Proceedings...** Ilha Santorini: IEEE, 2008. p.79-98.
- CHEN, P. et al. **Multi-path Routing Metrics for Reliable Wireless Mesh Routing Topologies**. 2011. 11 p. Disponível em <<http://arxiv.org/abs/1103.5957>> Acesso em: 2 out. 2012.
- CHEN, D., NIXON, M., MOK, A.K. **WirelessHART: Real-Time Mesh Network for Industrial Automation**. New York: Springer, 2010. 276 p. ISBN 978-1-4419-6046-7.
- DAINTREE NETWORKS. **Solution Overview: Sensor Network Analysis**. 2009. 2 p. Disponível em: <[http://www.daintree.net/downloads/datasheets/daintree\\_overview.pdf](http://www.daintree.net/downloads/datasheets/daintree_overview.pdf)> Acesso em: 11 out. 2012.
- DWORKIN, M. **Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CCM Mode for Authentication and Confidentiality**. 2007. 21 p. Disponível em: <[http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-38C/SP800-38C\\_updated-July20\\_2007.pdf](http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-38C/SP800-38C_updated-July20_2007.pdf)> Acesso em: 5 out. 2012.
- ENYEDI, G., RÉTVÁRI, G. On Finding Maximally Redundant Trees in Strictly Linear Time. In: SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 2009, Sousse. **Proceedings...** Sousse: IEEE, 2009. p. 206-211.
- FERRARI, P. et al. An Innovative Distributed Instrument for WirelessHART Testing. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2009, Singapura. **Proceedings...** Singapura: IEEE, 2009. p. 1091-1096.
- FRONTLINE. **Real-time 802.15.4 / ZigBee Network View and Communications Debugging**. 2011. Disponível em <<http://www.nohau.co.uk/Suppliers/Frontline/meshdecoder.htm>> Acesso em: 2 out. 2012.

HAN, S. et al. Wi-HTEST: Compliance Test Suite for Diagnosing Devices in Real-Time WirelessHART Network. In: REAL-TIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SYMPOSIUM, 2009, São Francisco. **Proceedings...** São Francisco: IEEE, Apr. 2009. p. 327-336.

HAN, S. et al. Control over WirelessHART networks. In: ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 36., 2010, Glendale. **Proceedings...** Glendale: IEEE, Nov. 2010. p. 2114-2119.

HAN, S. et al. Reliable and Real-Time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks. In: REAL-TIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SYMPOSIUM, 17., 2011, Chicago. **Proceedings...** Chicago: IEEE, Apr. 2011. p. 3-12.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF\_SPEC-065**: 2.4GHz DSSS O-QPSK Physical Layer Specification. Austin, 2007, 20 p.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF\_SPEC-075**: TDMA Data Link Layer Specification. Austin, 2008a, 76 p.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF\_SPEC-085**: Network Management Specification. Austin, 2009, 98 p.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF\_SPEC-155**: Wireless Command Specification. Austin, 2008b, 140 p.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF\_SPEC-290**: WirelessHART Device Specification. Austin, 2008c, 159 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Part 15.4**: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. 2009. 39 p. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2012.

KRÄTZIG, M. et al. 16-Channel-Analyser for Parallel IEEE 802.15.4 Monitoring. In: CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES & FACTORY AUTOMATION, 2009, Palma de Mallorca. **Proceedings...** Palma de Mallorca: IEEE, Sep. 2009. p. 1-4.

KUMAR, S., CHAUHAN, S. A Survey on Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks. **International Journal of Computer Applications**, Nova Iorque, v. 20, n. 5, p. 7-13, Apr. 2011.

LI, Y., XIONG, Y., ZHOU, L., ZHU, R. Adaptive Optimization-based Routing in Wireless Mesh Networks. **Wireless Personal Communications**, Nova Iorque, v. 56, n. 3, p. 403-415, Feb. 2011.

MA, X. et al. Design and implementation of one redundancy function in wireless tree networks. In: MEASUREMENT, INFORMATION AND CONTROL INTERNATIONAL CONFERENCE, 2012, Harbin. **Proceedings...** Harbin: IEEE, May 2012. p. 1-4.

MISHRA, M. K., MISHRA, S. Performance Based Optimization Routing Technique for Wireless Mesh Network. **Journal of Current Computer Science and Technology**, Nova Deli, v. 1, n. 8, p. 442-451, 2011.

- MULLER, I. et al. Development of WirelessHART Compatible Field Devices. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2010, Austin. **Proceedings...** Austin: IEEE, 2010. p. 1430-1434.
- MULLER, I., NETTO, J.C., PEREIRA, C.E. WirelessHART Field Devices. **Instrumentation & Measurement Magazine**, Nova Iorque, v. 14, p. 20-25, 2011.
- MULLER, I. et al. Towards WirelessHART Protocol Decentralization: A Proposal Overview. **Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking Lecture Notes in Computer Science**, Berlim, v. 7469, p. 248-259, 2012.
- PARISSIDIS, G. et al. Routing Metrics for Wireless Mesh Networks. In: MISRA, S., MISRA, S. C. **Guide to Wireless Mesh Networks**. Londres: Springer, 2009. p. 199-230.
- RINGWALD, M., RÖMER, K., VITALETTI, A. Passive Inspection of Sensor Networks. **Lecture Notes in Computer Science**, Nova Iorque, v. 4549, p. 205-222, Feb. 2007.
- SAPUTRO, N., AKKAYA, K., ULUDAG, S. A survey of routing protocols for smart grid communications, **Computer Networks**, Amsterdã, v. 56, n. 11, p. 2742-2771, July 2012.
- SIMPSON, W. **RFC 1549 - PPP in HDLC Framing**. 2012. Disponível em: <<http://www.faqs.org/rfcs/rfc1549.html>> Acesso em: 20 out 2012.
- SKIENA, S. S. **The Algorithm Design Manual**. 2. ed. New York: Springer, 2008.
- SRINIVAS, A., MODIANO, E. Finding Minimum Energy Disjoint Paths in Wireless Ad-Hoc Networks. **Wireless Networks**, Nova Iorque, v. 11, n. 4, p. 401-417, July 2005.
- TANENBAUM, A. S., WETHERALL, D. J. **Redes de computadores**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- TOH, C. K. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks. **IEEE Communications Magazine**, Piscataway, v. 39, n. 6, p. 138-147, June 2001.
- WAHARTE, S. et al. Routing protocols in wireless mesh networks: challenges and design considerations. **Multimedia Tools and Applications**, Hingham, v. 29, n. 3, p. 285-303, June 2006.
- WANG, N., ZHANG, N., WANG, M. Wireless Sensors in Agriculture and Food Industry-Recent Development and Future Perspective, **Computer and Electronics in Agriculture**, Amsterdã, v. 50, n. 1, p. 1-14, Jan. 2006.
- WANG, H., SEAH, W.K.G., KONG, P.Y. Maximizing End-to-End Reliability of Routing with Redundant Path by Optimal Link Layer Scheduling. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2007, Kowloon. **Proceedings...** Kowloon: IEEE, Mar. 2007. p. 4227-4232.
- YU, D. DiF: A Diagnosis Framework for Wireless Sensor Networks. In: INFOCOM CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS WORKSHOPS, 2010, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, Mar 2010. p. 1-5.

ZATS, S. et al. Scalability of Time Synchronized Wireless Sensor Networking, In: ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 37., 2011, Berkeley. **Proceedings...** Berkeley: IEEE, Nov. 2011. p. 3011-3016.