

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA  
ARQUITETURA DE REDE SEM FIO COM  
TOPOLOGIA BASEADA EM ÁRVORE**

GIULIANO BRUNO MARTINS GUARESE

Dissertação apresentada como  
requisito parcial à obtenção do grau de  
Mestre em Ciência da Computação na  
Pontifícia Universidade Católica do Rio  
Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon

Porto Alegre

2014

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G914i Guarese, Giuliano Bruno Martins  
Implementação e avaliação de uma arquitetura de rede sem fio com topologia baseada em árvore / Giuliano Bruno Martins Guarese. – Porto Alegre, 2014.  
66 p.

Diss. (Mestrado) – Fac. de Informática, PUCRS.  
Orientador: Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon.

1. Informática. 2. Arquitetura de Computador. 3. Redes de Computadores. 4. Protocolos de Aplicação Sem Fio (Protocolos de Rede de Computação). I. Marcon, César Augusto Missio. II. Título.

CDD 004.62

**Ficha Catalográfica elaborada pelo  
Setor de Tratamento da Informação da BC-PUCRS**



## TERMO DE APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação intitulada "Implementação e Avaliação de Arquiteturas de Rede Sem Fio com Topologias Baseadas em Árvore" apresentada por Giuliano Bruno Martins Guarese como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, aprovada em 18/03/2014 pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon -  
Orientador

PPGCC/PUCRS

Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel -

PPGCC/PUCRS

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira -

UFRGS

Homologada em 24/04/2014, conforme Ata No. 006 pela Comissão Coordenadora.

Prof. Dr. Luiz Gustavo Leão Fernandes  
Coordenador.

**PUCRS**

**Campus Central**

Av. Ipiranga, 6681 - P32- sala 507 - CEP: 90619-900

Fone: (51) 3320-3611 - Fax (51) 3320-3621

E-mail: [ppgcc@pucrs.br](mailto:ppgcc@pucrs.br)

[www.pucrs.br/facin/pos](http://www.pucrs.br/facin/pos)

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Paulo Antônio e Maria Cleci, que com muito esforço tornaram possível a realização dos meus ideais.

À minha namorada Larissa, pelo amor e carinho, por sempre estar ao meu lado nos momentos em que mais precisei, me orientando e corrigindo meu texto.

Ao orientador deste trabalho, professor César Marcon, pela oportunidade oferecida.

Ao colega Felipe Sieben, pela contribuição no desenvolvimento técnico e prático deste projeto.

À Novus Produtos Eletrônicos, por ceder algumas horas de trabalho para dedicação desta pesquisa, principalmente na pessoa de Marcos Rebello Dillenburg.

À HP (Hewlett-Packard Development Company, L.P.) pela bolsa concedida.

Obrigado.

## RESUMO

A crescente demanda de equipamentos sem fio para uso em redes de automação industrial motivou o desenvolvimento dessa dissertação. O surgimento de novas tecnologias sem fio, tais como Wireless Hart, ISA 100.11a e Zigbee, todas baseadas no protocolo IEEE 802.15.4, bem como o envolvimento do autor no desenvolvimento de dois produtos sem fio para uso na automação industrial, fundamentou a área a ser pesquisada.

Essa pesquisa restringiu-se na implementação e avaliação de uma arquitetura de rede sem fio com topologia baseada em rede do tipo árvore. Essa arquitetura, por consequência de ser explorada para uso na indústria, é pesquisada e desenvolvida tendo como base o protocolo IEEE 802.15.4, hoje considerado o mais adequado para automação industrial.

Nesta dissertação será abordada a pesquisa realizada em redes de sensores sem fio para uso em automação industrial, bem como o desenvolvimento de uma solução híbrida que engloba o protocolo Modbus RTU (um dos protocolos de comunicação mais difundidos em redes de automação industrial) e o protocolo IEEE 802.15.4. Essa solução envolve dispositivos gateways que criam uma interface entre os dois protocolos e criam uma rede sem fio com topologia árvore, bem como dispositivos finais que operam a bateria e possuem sensores de umidade e temperatura. O trabalho aborda desde a pesquisa e desenvolvimento da solução, até a realização de testes finais que validam a solução desenvolvida.

**Palavras-chave:** Rede Sem Fio. Protocolo IEEE 802.15.4. Protocolo Modbus RTU. Multiplexação de Mestres Modbus. Solução Híbrida de Comunicação.

## **ABSTRACT**

The growing demand for wireless equipment for use in industrial automation communication networks has motivated the development of this dissertation. The emergence of new wireless technologies such as Wireless Hart, ISA 100.11a and Zigbee, all based on the IEEE 802.15.4 protocol, as well as the involvement of the author in the development of two wireless products for use in industrial automation, has grounded the area to be searched.

This research was restricted in the implementation and evaluation of a wireless network architecture based on tree network topology. This architecture will be exploited for use in industry, in which will be researched and developed based on the IEEE 802.15.4 protocol, today considered the most suitable for industrial automation.

This dissertation will look at the research conducted in wireless sensor networks for use in industrial automation systems, as well as the development of a hybrid solution that encompasses one of the most widespread protocols of communication networks in industrial automation, the Modbus RTU protocol, and the IEEE 802.15.4 protocol. This solution involves gateways devices that interface between protocols and create a wireless network with tree network topology as well as end devices that operate with battery and have temperature and humidity sensors. The work covers everything from research and development of the solution, until the final test to validate the developed solution.

**Key words:** Wireless Network. IEEE 802.15.4 Protocol. Modbus RTU Protocol. Modbus Master Multiplexing. Hybrid Communication Solution.

## Lista de Figuras

Figura 1: Topologias de rede suportadas pelo protocolo IEEE 802.15.4 [15].	14
Figura 2: Canais de operação do protocolo IEEE 802.15.4 [15].	15
Figura 3: AirGate-Modbus [16].	16
Figura 4: Topologia de rede Ponto-a-Ponto [16].	19
Figura 5: Topologia de rede Estrela [16].	19
Figura 6: Topologia de rede Árvore Híbrida [16].	20
Figura 7: Máquina de Estados da Camada de Aplicação do Nodo <i>Gateway</i> .	29
Figura 8: Máquina de Estados da Camada de Aplicação do Nodo não <i>Gateway</i> .	30
Figura 9: <i>Short MAC Address</i> .	31
Figura 10: Máquina de Estados de Pareamento do Nodo Coordenador.	35
Figura 11: Máquina de Estados de Pareamento do Nodo <i>Gateway</i> .	36
Figura 12: Máquina de Estados de Pareamento do Nodo não <i>Gateway</i> .	37
Figura 13: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 2.	38
Figura 14: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 3.	38
Figura 15: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 4.	39
Figura 16: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 5.	39
Figura 17: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 6.	40
Figura 18: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 7.	40
Figura 19: Simulação do Processo de Pareamento – Falha do nodo com Endereço 3.	41
Figura 20: Simulação do Pareamento – Perda de Comunicação dos nodos com endereço 5 a 7.	42
Figura 21: Simulação do Pareamento – nodos com endereço 5, 6 e 7 pareiam novamente.	43
Figura 22: Caracterização de Latência.	44
Figura 23: Caracterização de Vazão.	45

Figura 24: Topologia de rede árvore totalmente sem fio. ....	47
Figura 25: Topologia de rede árvore híbrida utilizando-se da nova arquitetura de rede desenvolvida. ....	48
Figura 26: Nodo não gateway pareando a 0 dBm - queda de tensão no resistor de 4.62 $\Omega$ . ....	51
Figura 27: Nodo não gateway comunicando a 0 dBm - queda de tensão no resistor de 4.62 $\Omega$ . ....	52
Figura 28: Relação entre Profundidade na Rede e Latência para diferentes tamanhos de pacote. ....	55
Figura 29: Relação entre Profundidade na Rede e Vazão para diferentes tamanhos de pacote. ....	56
Figura 30: Teste realizado com 10 nodos <i>gateways</i> e 12 nodos <i>folhas</i> não <i>gateways</i> . ....	58
Figura 31: Análise da profundidade com relação à taxa de erros do teste realizado. ....	60
Figura 32: Análise da profundidade com relação à latência do teste realizado. ....	61
Figura 33: Análise da profundidade com relação à vazão do teste realizado. ....	61

## Lista de tabelas

Tabela 1: Resumo dos Trabalhos Relacionados.....	25
Tabela 2: Relação entre potência de transmissão e consumo.....	52
Tabela 3: Relação de duração da bateria. ....	53
Tabela 4: Especificações dos protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4. ....	54
Tabela 5: Estimativas comportamentais da rede seguindo a especificação dos protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4.....	55
Tabela 6: Teste realizado com 10 nodos <i>gateways</i> e 12 nodos <i>folhas</i> não <i>gateways</i> . ....	59

## Lista de Siglas

FFD – Full-Function Device

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP – Internet Protocol

LQI – Link Quality Indication

MAC – Medium Access Control

OSI – Open Systems Interconnection

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PAN – Personal Area Network

PAN ID – PAN IDentifier

PDU – Protocol Data Unit

PHY – PHYSical Layer

PLC – Programmable Logic Controllers

PPDU – PHY Protocol Data Unit

RAM – Random-Access Memory

RFD – Reduced-Function Device

ROM – Read-Only Memory

RTU – Remote Terminal Unit

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

TCP – Transmission Control Protocol

TDMI – Thumb Debug Multiplier ICE

TG4 – Task Group 4

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

USB – Universal Serial Interface

WMN-PP – Wireless Modbus Network Peer to Peer

WPAN – Wireless Personal Area Network

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	12
2.1	WIRELESS HART .....	12
2.2	ISA 100.11A .....	12
2.3	ZIGBEE .....	13
2.4	PROTOCOLO MODBUS RTU .....	13
2.5	PROTOCOLO IEEE 802.15.4.....	14
2.6	SOLUÇÃO DESENVOLVIDA ANTERIORMENTE .....	16
2.6.1	<i>Tipos de Nodos</i> .....	17
2.6.2	<i>Topologias de Rede</i> .....	18
3	TRABALHOS RELACIONADOS .....	22
4	ARQUITETURA .....	26
4.1	TIPOS DE NODOS.....	26
4.1.1	<i>Nodo Coordenador</i> .....	26
4.1.2	<i>Nodo Roteador</i> .....	26
4.1.3	<i>Nodo Folha Gateway</i> .....	27
4.1.4	<i>Nodo Folha não Gateway</i> .....	27
4.2	PROTOCOLOS UTILIZADOS.....	28
4.2.1	<i>Protocolo da Camada de Aplicação</i> .....	28
4.2.2	<i>Protocolo da Camada de Rede</i> .....	30
4.2.3	<i>Protocolo das Camadas Física e de Enlace</i> .....	34
4.3	MÉTRICAS DA CAMADA DE APLICAÇÃO PARA AVALIAR E VALIDAR A ARQUITETURA .....	43
4.3.1	<i>Obtenção de Informações da Qualidade do Sinal</i> .....	43
4.3.2	<i>Obtenção de Informações de Latência para cada Nodo da Rede</i> .....	44
4.3.3	<i>Obtenção de Informações de Vazão para cada Nodo da Rede</i> .....	45
4.3.4	<i>Obtenção de Informações de Taxa de Erros para cada Nodo da Rede</i> .....	45
4.3.5	<i>Obtenção do Ruído Eletromagnético dos Canais de Operação</i> .....	46
4.4	TOPOLOGIAS POSSÍVEIS .....	46
5	VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA .....	50
5.1	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO, CONSUMO E EXPECTATIVA DE VIDA DA BATERIA DO EQUIPAMENTO NÃO GATEWAY ....	50
5.2	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA REDE ÁRVORE CONSTITUÍDA POR COORDENADOR, ROTEADORES, FOLHAS GATEWAYS E FOLHAS NÃO GATEWAYS.....	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
	REFERÊNCIAS .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2009 a empresa Novus Produtos Eletrônicos e a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul iniciaram um projeto de pesquisa conjunto cujo objetivo era o desenvolvimento de um equipamento *Wireless* com funcionalidade de *Gateway* para utilização na Indústria. Este projeto motivou a pesquisa de tecnologias *Wireless*. Além disso, por meio da leitura de vários artigos, constatou-se o crescimento da pesquisa na área de Redes de Sensores Sem Fio, em inglês Wireless Sensor Network (WSN), em diversas áreas de engenharia, bem como do uso em redes de automação industrial.

A equipe pesquisou diversas possibilidades de tecnologias sem fio utilizadas em equipamentos desenvolvidos pela empresa para uso em redes industriais. Nessa época diversos protocolos estavam em ascensão, tais como *Wireless Hart* [8], *ISA 100.11a* [9], *Zigbee* [11], entre tantos outros, baseados nas camadas física e de enlace do protocolo *IEEE 802.15.4* [15], tornando difícil a escolha do protocolo base de desenvolvimento para equipamentos sem fio com possibilidade de comercialização pela empresa.

Como resultado da pesquisa realizada, foi o escolhido o protocolo *IEEE 802.15.4*, principalmente por se tratar da camada base dos principais protocolos sem fio desenvolvidos para uso em redes de automação industrial, assim como o utilizado no desenvolvimento dos equipamentos sem fio da empresa Novus. Dessa forma, como alicerce para o desenvolvimento desta dissertação, o primeiro equipamento desenvolvido pela empresa foi explorado com o intuito de garantir melhorias, como novos tipos de nodos, novas topologias de rede e avaliação da arquitetura desenvolvida.

O resultado do trabalho desenvolvido até então, que se tornou um produto em novembro de 2011, solucionou diversas necessidades de redes de automação sem fio em indústrias brasileiras e estrangeiras, havendo diversos casos de sucesso tanto no Brasil quanto nos Estados Unidos, Argentina, Austrália, Chile, Israel, entre outros. Novas necessidades, entretanto, foram surgindo, como a funcionalidade de repetição de sinal para que um equipamento possa expandir o alcance da rede sem fio, a comunicação com equipamentos sensores que operem à bateria e uma maior facilidade para configuração de equipamentos por meio da própria rede sem fio.

Dentre essas novas necessidades que surgem, criou-se a possibilidade de investigar novas arquiteturas de redes.

Ainda, à medida que os equipamentos foram instalados em diferentes ambientes, surgiram perguntas:

- (i) Os equipamentos foram instalados de forma adequada?
- (ii) A qualidade das conexões entre os equipamentos é adequada para manter a comunicação em diversas situações de operação?
- (iii) Os equipamentos poderiam ter sido instalados de uma forma que permitisse melhores *links* de comunicação?
- (iv) Os pré-requisitos de instalação foram atendidos de maneira a permitir o fluxo de dados que a aplicação necessitava?

Com o intuito de esclarecer essas perguntas, diversas métricas serão exploradas nesta dissertação. Assim, o trabalho aqui apresentado permitirá que futuramente diversas aplicações possam utilizar das métricas estudadas a fim de verificar as instalações realizadas.

Dada as motivações expostas, esta dissertação tem como objetivo explorar o desenvolvimento e avaliação de uma nova arquitetura de rede sem fio que permita que as necessidades expostas sejam atendidas.

A partir deste capítulo introdutório, segue neste documento a seguinte organização: (i) o Capítulo 2 tem a fundamentação teórica que busca explicar a arquitetura base utilizada para o desenvolvimento desta dissertação; (ii) o Capítulo 3 descreve artigos que usam redes de sensores sem fios como base de pesquisa; (iii) o Capítulo 4 apresenta a pesquisa desenvolvida; (iv) o Capítulo 5 busca avaliar e validar a pesquisa; por fim, (v) o Capítulo 6 apresenta considerações finais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo descrever toda a arquitetura que foi utilizada como base para o desenvolvimento do trabalho proposto. Esta é fortemente apoiada em dois protocolos base: Modbus RTU e IEEE 802.15.4. Antes de explicar os dois, falar-se-á dos outros protocolos sem fio em ascensão mencionados na introdução também baseados nas camadas física e de enlace do IEEE 802.15.4 e porque foram descartados para a implementação do produto da empresa Novus.

### 2.1 Wireless Hart

O protocolo *Wireless Hart* [8], um dos mais promissores, possui diversas vantagens: (i) comunicação em topologia de rede Malha, tornando o protocolo mais robusto pelos algoritmos de roteamento que conseguem redefinir as rotas caso um dos nodos de comunicação falhe; (ii) utilização do algoritmo de *Frequency Hopping*, definindo que todos os nodos comunicantes da rede mudem de frequência de operação a cada comunicação, evitando que um canal de comunicação com interferências derrube a rede; e (iii) modelo de comunicação que permite a todos os nodos da rede “dormir” – desligar temporariamente - durante períodos de tempo pré-determinados para economizar energia e permitir aumentar o tempo de duração da bateria. Esse protocolo, no entanto, foi visto pela equipe como complexo demais para implementação, uma vez que na época do projeto apenas a empresa Emerson possuía um *Gateway* com essa tecnologia, o que tornaria os equipamentos desenvolvidos extremamente caros e difíceis de serem comercializados em pequenas indústrias. Ainda, pelo fato de todos os nodos dormirem e apenas se comunicarem de tempos em tempos, a implementação de um *gateway* que consiga interligar essa característica com sistemas de tempo real, os quais muitos protocolos exigem, como o Modbus, torna-se bastante difícil.

### 2.2 ISA 100.11a

Quanto ao protocolo *ISA 100.11a* [9], esse possui características bastante semelhantes aos de seu concorrente direto, o *Wireless Hart*, sendo também seu desenvolvimento de grande complexidade, com os mesmos empecilhos. Ele é, entretanto, um pouco mais flexível quanto a comunicação com redes de mais altos níveis, permitindo comunicação direta com protocolos TCP/IP por meio da

implementação de um protocolo de rede chamado *6LowPan* [10]. Pelos mesmos motivos do protocolo *Wireless Hart*, esse é um protocolo robusto e de grande complexidade, o que tornaria o desenvolvimento caro e difícil de interligar com a maioria das redes de automação de indústrias de pequeno porte que ainda utilizam como base o simples, porém robusto e bem difundido protocolo Modbus.

### 2.3 Zigbee

Segundo Farahani [11], *Zigbee* é uma tecnologia criada pela ZigBee Alliance com o intuito de desenvolver um padrão de baixo custo e consumo de energia em redes sem fio. Esse protocolo tem características bastante distintas dos anteriores, pois está apoiado completamente no protocolo *IEEE 802.15.4*, apresentando topologias de rede Ponto-a-Ponto e Estrela, incorporando novas funcionalidades na camada de rede e permitindo a expansão para topologias de rede do tipo *Árvore* e *Malha*. Ele foi bastante difundido no meio acadêmico em projetos de pesquisa e em empresas que desenvolvem equipamentos para automação residencial e hospitalar. Contudo, pela falta de robustez, como a não utilização de um algoritmo de seleção de canal, e pela fragilidade de manter a rede operando quando há falha em um dos nodos comunicantes, esse protocolo foi pouco difundido no meio industrial.

### 2.4 Protocolo Modbus RTU

O protocolo Modbus RTU (*Remote Terminal Unit* – Unidade Terminal Remota) [12] foi criado em 1979 pela Modicon<sup>1</sup> com o objetivo de definir uma forma de troca de dados entre seus Controladores Lógicos Programáveis, em inglês *Programmable Logic Controllers* (PLC). Ele foi publicado abertamente pela Modicon, de forma que qualquer pessoa pudesse utilizar sem pagar *royalties*. Por esse fator e também pela sua simplicidade e robustez, foi um dos primeiros protocolos amplamente aceitos como padrão de comunicação em redes industriais.

Atua na camada de aplicação, sendo baseado em arquitetura *mestre-escravo*, em que o *escravo* somente atua a partir de uma requisição do *mestre*. *Mestres* são normalmente sistemas supervisórios residentes em computadores, PLCs ou *Data Loggers* (equipamento com função de guardar dados) que monitoram dados dos *escravos*, que podem possuir diversas funcionalidades, como transmissor de

---

<sup>1</sup> Antiga fabricante de PLCs, atualmente uma marca da Schneider Electric.

temperatura e umidade, controlador de processos, entre outros. Esse protocolo define a forma de comunicação entre os dispositivos, podendo ser implementado em diversos meios físicos, como RS485 e USB [13] e TCP/IP [14]. Entretanto, a forma de comunicação em meios físicos sem fio ainda não foi definida.

Ele define que cada dispositivo da rede Modbus RTU deve ser configurado com um endereço de 1 bytes (*Modbus Address*), permitindo assim até 256 escravos – na verdade 247, pois os endereços 0 e 248 a 254 são reservados e 255 representa transmissão *broadcast* – para um *mestre* Modbus. Visto que a norma não permite mais do que um *mestre* Modbus RTU, ele não possui endereço.

## 2.5 Protocolo IEEE 802.15.4

O protocolo IEEE 802.15.4 [15] especifica a camada física, em inglês *PHYsical layer* (PHY), e a camada de controle de acesso ao meio, em inglês *Medium Access Control*, (MAC). Essa norma objetiva a construção de uma rede do tipo *Wireless Personal Area Network* (WPAN). WPAN, de acordo com o texto do protocolo, é uma definição para redes que requerem a transferência de informações em distâncias relativamente curtas. Essa norma é mantida pelo grupo *IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4* (TG4) e tem por objetivo a construção de uma rede de baixas taxas de transferência para implementar redes de comunicação sem fio de baixo consumo de energia. Essa rede é chamada de *Low Rate WPAN* (LR-WPAN).

Fazendo um comparativo com as sete camadas do modelo *Open Systems Interconnection* (OSI), o padrão IEEE 802.15.4 atua nas camadas física e de enlace, respectivamente, equivalentes às camadas PHY e MAC da norma.

Conforme ilustrado na Figura 1, a norma define dois tipos básicos de dispositivo para operar em uma rede: O *Full-Function Device* (FFD), um dispositivo que contém todas as funções definidas pela norma e tem o objetivo de iniciar e coordenar uma rede de sensores; e o *Reduced-Function Device* (RFD), um dispositivo com funções limitadas que se comunica única e exclusivamente com um FFD e tem o objetivo de sensoriamento com reduzido consumo de energia.

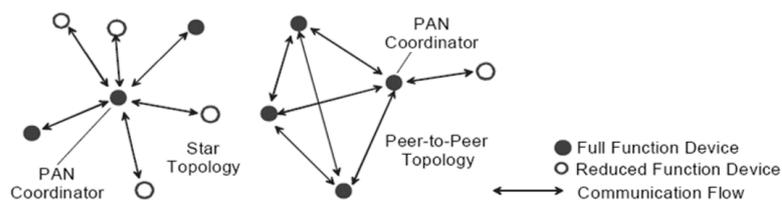
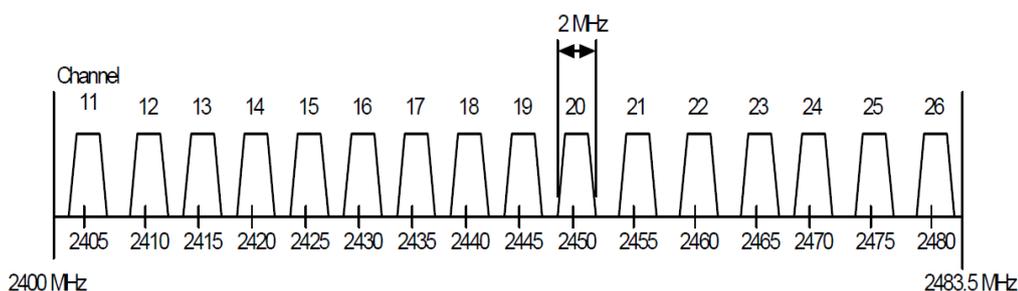


Figura 1: Topologias de rede suportadas pelo protocolo IEEE 802.15.4 [15].

Dependendo dos requisitos da aplicação, duas topologias de rede podem ser implementadas utilizando o padrão definido pelo IEEE 802.15.4:

- (i) Topologia Estrela, em que um dispositivo FFD inicia uma rede centralizando o fluxo de comunicação. Esse é chamado de coordenador da *Personal Area Network* (PAN), em inglês *PAN Coordinator*. Demais dispositivos, que podem ser tanto FFDs como RFDs, se comunicam com o FFD central (*PAN Coordinator*) como pode ser visualizado na Figura 1, referenciado por *Star Topology*;
- (ii) Topologia Ponto-a-Ponto, em que não há um fluxo de comunicação centralizado e todos dispositivos FFDs da rede podem se comunicar, como pode ser observado na Figura 1, referenciado por *Peer-to-Peer Topology*. Dispositivos RFDs podem estar presente comunicando apenas com dispositivos FFDs.

A camada física do protocolo disponibiliza 16 possíveis canais de operação, cada um com uma banda de 2 MHz, espaçados de 5 em 5 MHz desde 2,405 GHz até 2,480 GHz, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Além disso, essa camada disponibiliza algoritmos de avaliação do espectro eletromagnético dos canais, bem como a qualidade do link de recepção de cada um dos pacotes recebidos dos dispositivos com os quais o nodo está pareado. Isso torna possível à implementação de um algoritmo de detecção e escolha do canal com menos interferência para comunicação.



**Figura 2: Canais de operação do protocolo IEEE 802.15.4 [15].**

A camada de enlace define que cada dispositivo possui um endereço único universal de 64 bits. Entretanto, para comunicação em uma rede, podem ser utilizados dois modos de endereçamento: *Short MAC Address* – no qual cada dispositivo é endereçado por 16 bits e *Long MAC Address* – no qual cada dispositivo é endereçado por 64 bits. Para identificação de dispositivos que fazem parte de uma

mesma rede, há um endereço de 16 bits chamado *PAN Identifier* (PAN ID). Ele é importante para identificar se dois ou mais nodos podem ou não se comunicarem diretamente.

Baseadas nas duas topologias básicas de rede disponibilizadas pela norma, outras topologias podem ser implementadas criando-se uma camada de rede que gerencia o fluxo de informações.

## 2.6 Solução desenvolvida anteriormente

Resultado da pesquisa realizada no projeto PUCRS-Novus em 2009, o AirGate-Modbus, cujo desenvolvimento se deu na empresa Novus durante o período de 2010 a 2011, é um *gateway* que viabiliza a conversão entre os protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4 [16]. Essa conversão é realizada de forma transparente para a rede Modbus, assim possibilitando a simples substituição de longos trechos de cabeamento estruturado por segmentos sem fio.

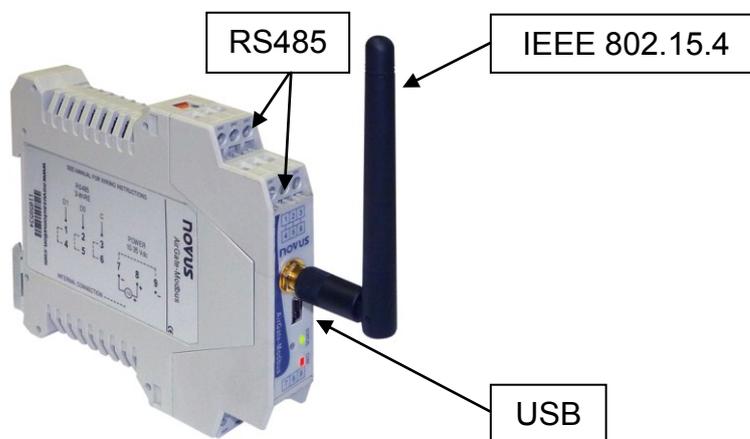


Figura 3: AirGate-Modbus [16]

Como pode ser visualizado na Figura 3, cada dispositivo *gateway* dispõe de três tipos de interface de comunicação. Para facilitar a configuração e a conexão com sistemas Supervisórios residentes em computadores, foi prevista uma interface USB. Objetivando a comunicação com Mestre ou Escravos Modbus RTU, são disponibilizados dois conectores para uma interface RS485 que tem sua funcionalidade determinada de acordo com o modo de operação que o *gateway* estiver configurado. A interface sem fio IEEE 802.15.4 é utilizada para comunicação entre os *gateways* que poderão estar dispostos numa topologia em forma de Estrela, em que um *gateway* coordenador da rede pode estar comunicando com até 247

*gateways* (limitação do endereçamento Modbus) e estes podem estar conectados a Escravos Modbus RTU.

### 2.6.1 Tipos de Nodos

Utilizando-se as três interfaces de comunicação disponíveis em modos distintos, quatro modos de operação foram criados para permitir a solução de diversas necessidades topológicas das redes de automação industriais [16]. Esses modos de operação seguem descritos abaixo:

- **RS485-Slaves** – opera como RFD do protocolo IEEE 802.15.4, em que procura um FFD para se parear por meio da interface sem fio IEEE 802.15.4 e utiliza a interface RS485 para interligar escravos da rede Modbus RTU;
- **RS485-Master** – opera como FFD do protocolo IEEE 802.15.4, que tem a função de coordenador, sendo responsável por iniciar a rede e disponibilizar sua interface sem fio IEEE 802.15.4 para se parear com até 247 RFDs que estarão operando como RS485-Slaves. Ele utiliza a interface RS485 para se comunicar com o segmento Modbus RTU em que esteja o *mestre* da rede, assim permitindo interligar o *mestre* localizado na interface RS485 aos escravos localizados nas interfaces RS485 de seus filhos RS485-Slaves;
- **USB-Mater** – opera de forma semelhante ao modo de operação RS485-Master, com a diferença de utilizar a interface USB para comunicação direta com o *mestre* da rede Modbus RTU e a interface RS485 para comunicação com escravos da rede.
- **Multi-Mater** – semelhante aos modos de operação RS485-Master e USB-Master, ele também opera como coordenador da rede IEEE 802.15.4. Entretanto, para suprir uma necessidade não permitida pelo protocolo Modbus RTU, ele utiliza suas interfaces USB e RS485 para multiplexar até dois *mestres* em uma mesma rede Modbus.

#### 2.6.1.1 Nodos Coordenadores

Nodos coordenadores são nodos FFD do protocolo IEEE 802.15.4 que possuem a função de escolher um canal livre de interferências para comunicar e

iniciar a rede para permitir que até 247 nodos *folhas* se conectem a eles [16]. Como visto anteriormente, para utilizar da melhor forma possível as três interfaces de comunicação disponíveis, três possíveis modos de operação podem desempenhar a funcionalidade de coordenador da rede: RS485-Master, USB-Master e Multi-Master.

#### 2.6.1.2 Nodos *Folhas*

Nodos *folhas* são nodos RFD do protocolo IEEE 802.15.4 que têm por objetivo dar continuidade à rede Modbus [16]. Eles são nodos que operam no modo RS485-Slaves, permitindo que, após parearem com um nodo coordenador de sua PAN ID, possam interconectar segmentos de rede Modbus RTU.

#### 2.6.2 Topologias de Rede

O AirGate-Modbus é bastante versátil, tornando possível a solução de diversas aplicações. É possível utilizá-lo desde a simples substituição de segmentos cabeados por segmentos sem fio, como será visto mais adiante, até a complexa multiplexação de *mestres*. Possibilita também a utilização de uma topologia de rede em forma de *árvore* utilizando-se nodos com PAN IDs diferentes interligados por meio de suas interfaces RS485. Desta forma, o *gateway* pode ser implantado tanto em redes já instaladas como em novos projetos de automação industrial.

Uma vez que o objetivo de estudo deste trabalho é a exploração de novas topologias de rede e a avaliação de métricas, a ênfase desta Subseção não será os possíveis modos de operação dos nodos, mas sim as possíveis topologias de rede.

##### 2.6.2.1 Rede Ponto-a-Ponto

Utilizando apenas um par de nodos, é possível configurá-los em uma topologia de rede do tipo Ponto-a-Ponto. Conforme pode ser visualizado na Figura 4, pode-se utilizar um nodo coordenador operando como USB-Master, o qual terá em sua interface USB o *mestre* da rede (*PC Modbus Master*), em sua interface RS485 alguns *escravos* – como ilustrado no exemplo, 15 *escravos* endereçados de 1 a 15 - e em sua interface IEEE 802.15.4 um nodo *folha* operando como RS485-Slaves que dá continuidade à rede de *escravos* – como ilustrado no exemplo, 5 *escravos* endereçados de 16 a 20.

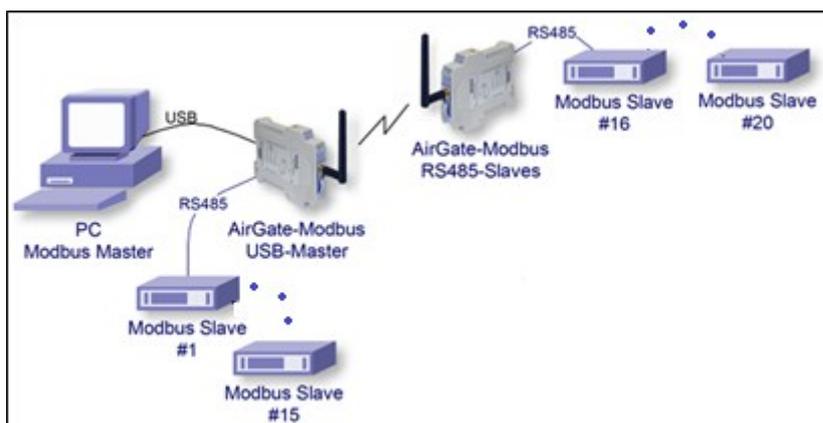


Figura 4: Topologia de rede Ponto-a-Ponto [16].

### 2.6.2.2 Rede Estrela

Utilizando-se mais que um par de nodos, é possível expandir a rede para uma topologia do tipo Estrela, no qual o nodo coordenador representa o centro da estrela e cada um dos nodos *folhas* pareados a ele representam uma ponta da estrela. Como exemplificado na Figura 5, para prover solução sem fio a uma rede Modbus já existente, em que um Mestre (*PC Modbus Master*) se conectava a 15 Escravos – endereçados de 1 a 15- através de um conversor USB-RS485, é possível utilizar um nodo coordenador operando como RS485-Master - interligado a esse barramento RS485 - e demais nodos *folhas* operando como RS485-Slaves que dão continuidade à rede de Escravos. Conforme ilustrado no exemplo, um dos nodos *folhas* dá continuidade à rede de 5 Escravos - endereçados de 16 a 20 -, enquanto, o outro nodo *folha* dá continuidade à rede de 10 Escravos - endereçados de 30 a 40 -.

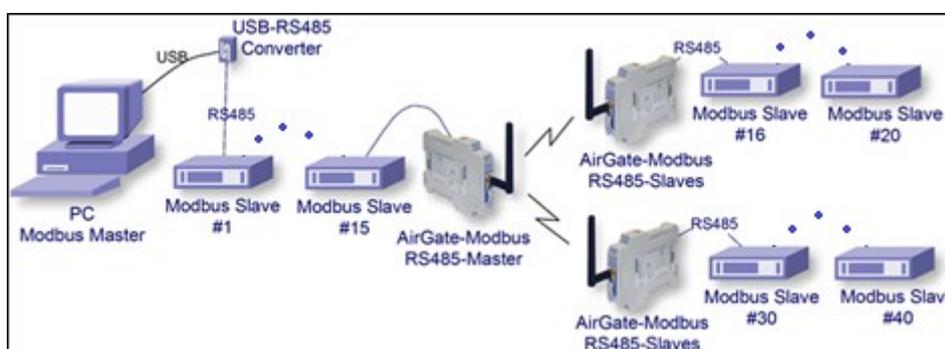


Figura 5: Topologia de rede Estrela [16].

### 2.6.2.3 Rede Árvore Híbrida

Topologias de rede do tipo *árvore* também são possíveis, como exemplificado na Figura 6. Nesta, um nodo coordenador operando no modo *Multi-Master* é ligado a

dois Mestres Modbus. Neste nodo são interligados, através da interface sem fio, três segmentos cabeados através de nodos *folhas* operando no modo *RS485-Slaves*. Em um destes nodos *folhas*, visando aumentar o alcance e dispor de mais segmentos de Escravos, está conectado, através da interface RS485, outro nodo coordenador operando no modo *RS485-Master*, criando uma nova PAN. Este possibilita uma nova estrela de segmentos sem fio, dando origem a mais dois segmentos cabeados através de outros nodos operando no modo *RS485-Slaves*, pertencentes a essa nova PAN.

Para identificar quais nodos fazem parte de uma mesma PAN, ou seja, de uma mesma rede estrela, cada dispositivo possui uma PAN ID configurada. Essa PAN ID é comum a todos os nodos de uma mesma PAN e deve diferenciar uma rede da outra, como ilustrado na Figura 6, onde uma rede é identificada pela PAN ID 5670 e a outra rede é identificada pela PAN ID 5671.

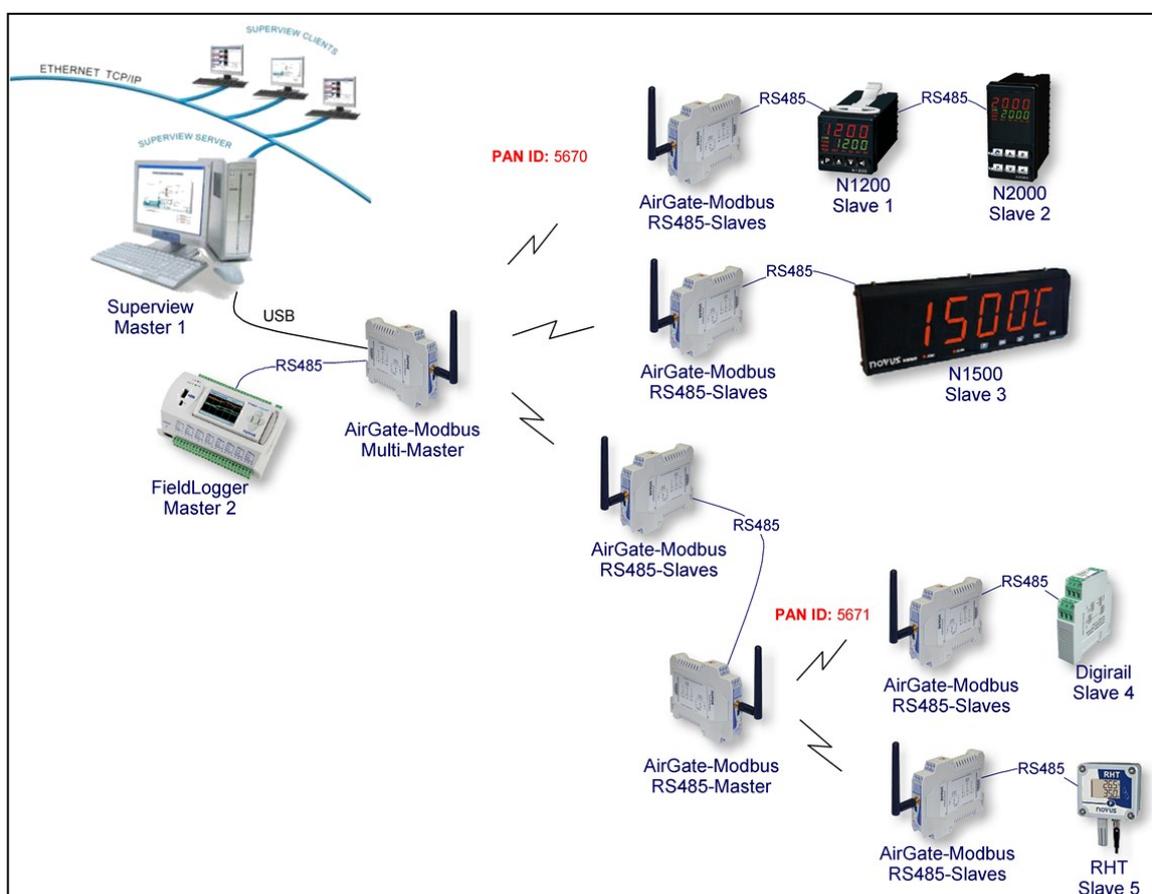


Figura 6: Topologia de rede Árvore Híbrida [16].

A Figura 6 exemplifica uma aplicação na qual alguns equipamentos vendidos pela empresa são utilizados. Nessa, há dois *mestres* Modbus interligados ao nodo

coordenador da PAN ID 5670. O primeiro *mestre* é um *software* supervisor rodando em PC (SuperView). Ele se encontra conectado à rede Modbus por meio da interface USB do nodo. O segundo *mestre* é um equipamento *Data Logger* (FieldLogger). Esse se encontra conectado à rede Modbus por meio da interface RS485 do nodo. Conectados a esse nodo coordenador, encontram-se três sub-redes de *escravos* Modbus interligadas por nodos *folhas* da PAN ID 5670 por suas interfaces RS485:

- (i) Na primeira estão um N1200 e um N2000, com respectivos endereços 1 e 2. Esses são equipamentos que controlam processos como manter temperatura e pressão;
- (ii) Na segunda encontra-se um N1500 com endereço 3, que possui a função de indicador de processos, como exibir a temperatura de um tanque que está sendo controlado por um N1200;
- (iii) Na terceira sub-rede está conectado um nodo coordenador da PAN ID 5671 que dá origem a dois novos segmentos cabeados através de dois nodos *folhas* desta PAN: (i) no primeiro está um Digirail com endereço 4, que possui entradas analógicas universais que podem ser utilizadas para, por exemplo, obter dados de pressão de um sensor; (ii) no segundo encontra-se um RHT com endereço 5 capaz de monitorar temperatura e umidade.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

O uso de protocolos heterogêneos impacta na complexidade de múltiplos sistemas de comunicação. Muitos estudos foram desenvolvidos com o intuito da integração de diferentes protocolos de comunicação com o objetivo de prover interoperabilidade, escalabilidade, confiabilidade entre os seguimentos da rede, bem como os requisitos, tais como baixo consumo de energia, minimização de atraso e alto desempenho satisfatório. A seguir, serão apresentados trabalhos relacionados que buscam soluções para ambientes de automação industrial em que foram desenvolvidos sistemas para integrar recursos de protocolos heterogêneos e lidar com as suas limitações.

Leyva et al. [20] abordam o desenvolvimento de um sistema industrial sem fios, capaz de testar só 4 unidades de *escravos* remotos que usam o protocolo Modbus RTU para se comunicar com um *mestre* via rádio modem na topologia em estrela. Esse sistema é composto por uma unidade principal, que funciona permanentemente por meio de um *software* gráfico, que solicita informações a partir de unidades de *escravos* remotos. Cada unidade escrava pode ser de até 4 km de distância via rádio modem, utilizando o meio físico sem fio na faixa de 900 MHz para se comunicar. A função de cada unidade escrava é monitorar as medições em uma rede elétrica trifásica e disponibilizá-las para a unidade principal com o objetivo de alcançar a eficiência da rede elétrica.

Carlsen et al. [21] apresentam um sistema que utiliza o protocolo Modbus RTU e um protocolo proprietário baseado em IEEE 802.15.4 (chamado DUST Wireless) para monitorar dados de temperatura, visando prever vazamentos em poços de petróleo e gás. O sistema consiste em um *gateway* que integra uma rede Modbus RTU sobre RS232 ou RS485 para uma rede sem fio baseada em protocolo DUST, que opera em uma topologia malha. Nós sensores de temperatura que se comunicam com a porta de entrada via protocolo wireless DUST também foram desenvolvidos. Essa solução, no entanto, foi criada apenas para esse caso.

Zheng [22] descreve o protocolo de comunicação MZ (Modbus e ZigBee). O MZ foi desenvolvido para lidar com diferentes protocolos de comunicação utilizados por Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) em ambientes industriais, possibilitando topologias de rede estrela e malha. O autor implementou um sistema

constituído por um *gateway* que converte um protocolo ponto-a-ponto (usado pelo CLP Siemens S7-224) e Modbus (usada pelo CLP XC3-24RT-E Xinjie) em um protocolo comum MZ, que se baseia em ZigBee. Nesse sistema, a integração entre um computador e um sistema de supervisão em dois CLPs é realizado através de três *gateways* que se comunicam pelo protocolo MZ. Os resultados experimentais mostram que as redes sem fio são adequadas em termos de desempenho e interoperabilidade de sistemas de instrumentos não-críticos de monitoramento. Entretanto o artigo não menciona o uso do MZ com um número grande de nodos.

Yanfei et al. [23] apresentam uma aplicação para monitoramento fisiológico das plantas em sistema ecológico, em que o protocolo Modbus é incorporado em uma pilha ZigBee, implementando um protocolo Wireless Modbus. Embora o ZigBee implemente topologia malha, o sistema desenvolvido utiliza apenas topologia em estrela. O módulo ZigBee está conectado com alguns sensores para medição dos parâmetros ambientais e análise do estado de saúde das plantas. Embora a tecnologia ZigBee seja de muito baixo consumo de energia, o sistema opera de forma eficiente, considerando os limites Modbus de endereçamento, mas apenas em pequenas redes.

Yu et al. [24], a fim de expandir o alcance de comunicação da rede, criaram uma nova arquitetura para a construção de uma rede ad hoc para sistemas de monitoramento remoto com base em Modbus e China Unicom 3G. O sistema é composto por medidores de fluxo, *gateways* 3G, *gateway* LAN, OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*) Server e um aplicativo de monitoramento remoto. A rede Modbus é utilizada nos sistemas de controle. LAN é usada para o sistema de monitoramento. Modbus e LAN estão conectados à Internet com *gateways* específicos (por exemplo *gateway* 3G, *gateway* LAN). O padrão OPC foi utilizado para padronizar as interfaces entre drivers e sistemas na arquitetura. Embora a arquitetura seja considerada viável, os autores apontam que atualmente é caro a adoção da tecnologia 3G em sistemas de controle industrial, além disso, a própria arquitetura ainda não está pronta para ser aplicada em ambientes industriais reais.

Haikuan et al. [25] discutem a arquitetura de integração entre redes cabeadas / sem fio em meios industriais híbridos, que inclui Profibus, Modbus / TCP e WICN (*Wireless Industrial Control Networks*). As experiências dos autores mostraram que

as redes híbridas árvore de barramento podem ser úteis para o controle do processo e, comparando com as redes não-híbridas, o desempenho é melhorado. O trabalho não foi conclusivo, apontando que o modelo de conversor de protocolo e *software* precisam ser melhorados para carga líquida pesada, e mais estudos de desempenho devem ser realizados.

Kollam e Sheree [26] apresentam um método para controlar sensores remotos em uma rede sem fio com topologia malha com o objetivo de melhorar a automação industrial interativa. Um modelo de consulta / resposta foi implementado utilizando como protocolo base o existente Zigbee com a implementação do protocolo Modbus, reduzindo o consumo de energia proveniente do monitoramento em tempo real e controle contínuo.

De Oliveira et al. [27] apresentam o desenvolvimento de um sistema embarcado dedicado para atenuar os problemas de implantação e manutenção encontrados nas unidades de elevação artificial de petróleo Plunger Lift, cujos requisitos são o baixo consumo de energia e confiabilidade. O sistema aplica Modbus para comunicar CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), com uma Zigbee WSN. O uso do protocolo Modbus sobre ZigBee permitiu a rede de sensores sem fio tornar-se transparente para o CLP.

Hui et al. [28] discutem o projeto de EPA (Ethernet Para a fábrica de Automação) e *gateway* de comunicação Modbus, implementando transceptor bidirecional de dados. EPA foi principalmente um padrão *fieldbus* Chinês de Ethernet em tempo real, e como o protocolo base do EPA inclui Ethernet (IEEE 802.3), Wireless LAN (IEEE 802.11) e Bluetooth (IEEE 802.15), o *gateway* torna-se adequado para o monitoramento on-line no contexto da área de controle de automação (por exemplo, automação industrial). Segundo os autores, o *gateway* de comunicação se conecta com outros equipamentos EPA por um switch Ethernet formando um segmento de rede EPA comunicação micro com topologia ad hoc, que se conecta com outros equipamentos Modbus via conexão RS485. Essa solução, entretanto, tem alto custo para implementação.

A Tabela 1 apresenta os sistemas desenvolvidos nos trabalhos relacionados acima mencionados e as características que são relevantes para a comparação.

Tabela 1: Resumo dos Trabalhos Relacionados.

Ano [trabalho]	Protocolos aplicados	Topologia de rede	Aplicação principal	Requisitos / Objetivos
2004 [20]	Modbus, wireless based on Radio	Estrela	Ambientes industriais	Análise de variáveis elétricas, medição da eficiência da rede elétrica
2008 [21]	IEEE 802.15.4, Modbus, RS232, RS485	Malha	Indústrias de óleo e gás	Confiabilidade na detecção da perda de fluxo (e.g. perda na produção de óleo)
2009 [22]	ZigBee, Modbus	Estrela, Malha	Ambientes industriais, sistema de monitoramento	Desempenho e interoperabilidade
2009 [23]	Zigbee, Modbus	Estrela	Sistema de monitoramento ecológico	Consumo de energia e redução da carga de processamento, mais flexibilidade
2010 [24]	Modbus, 3G, OPC	Ad hoc	Sistemas de controle industriais	Automação integrada
2010 [25]	Modbus, Profibus, WICN	Árvore	Ambientes industriais	Controle de processos, melhoria de desempenho
2011 [26]	Zigbee, Modbus	Malha	Ambientes industriais	Melhoria da interação, baixo consumo de energia, monitoramento em tempo real e controle
2011 [27]	Zigbee, Modbus	Malha	Unidades de elevação artificial de petróleo Plunger Lift	Interoperabilidade de equipamentos, confiabilidade, baixo consumo de energia
2012 [28]	EPA, Modbus, RS485	Ad hoc	Ambientes industriais	Interoperabilidade dos equipamentos, monitoramento online
<b>Este trabalho</b>	IEEE 802.15.4, Modbus, RS485	Árvore	Ambientes industriais	Flexibilidade, escalabilidade

Nesta seção foram apresentados alguns trabalhos relacionados que se propuseram a implementar *gateways* para a integração de redes com e sem fio usando Modbus. Esses *gateways* implementam soluções voltadas para as aplicações, em que apenas *escravos* (ou nós sensores puramente sem fio) são integrados na rede Modbus. A contribuição é apresentar uma solução que permita a utilização do sistema para aplicações heterogêneas, um sistema que permita além da criação de uma nova rede, a manutenção parcial de uma rede já existente.

Salienta-se, também, que o autor deste trabalho, já publicou outros trabalhos relacionados a este, tais como: (i) a monografia “Arquitetura Híbrida de Comunicação para Ambientes de Automação Industrial: Protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485” [16]; (ii) o artigo “Soluções Inovadoras para Implementação Wireless Modbus” [17]; (iii) o artigo “Solução de Wireless *Site Survey* para IEEE 802.15.4” [18] e (iv) o artigo “*Exploiting Modbus Protocol in Wired and Wireless Multilevel Communication Architecture*” [19].

## 4 ARQUITETURA

Este capítulo tem por objetivo descrever as funcionalidades desenvolvidas nesta dissertação para permitir que os nodos utilizados como base, descritos no capítulo anterior, possam formar novas topologias de rede, bem como admitir a integração de nodos não *gateways* (com funcionalidades de *escravos* sem fio na rede Modbus), além de apresentar a configuração e a obtenção de métricas de avaliação dos nodos da rede.

Tais funcionalidades necessitavam da modificação dos tipos de nodos, como será descrito na Seção 4.1; da alteração e criação de novas camadas do protocolo, conforme será abordado na Seção 4.2; para permitir a obtenção de métricas para avaliação e validação da arquitetura, conforme descritas na Seção 4.3 e obtenção de novas topologias de rede, como será visto na Seção 4.4.

### 4.1 Tipos de Nodos

A fim de possibilitar o uso de uma topologia de rede do tipo *árvore* totalmente sem fio e admitir que outros tipos de nodos – não *gateways* – possam interagir na rede, pequenas modificações foram realizadas nos tipos de nodos já existentes, e novos tipos de nodos foram criados.

#### 4.1.1 *Nodo Coordenador*

O nodo coordenador continua desempenhando o mesmo papel que já desempenhava na arquitetura base, podendo ele operar como RS485-Master, USB-Master ou Multi-Master. Ele continua sendo responsável por escolher um canal com menor nível de ruído e iniciar a rede dispondo suas interfaces USB e RS485 - conforme o modo de operação e a interface IEEE 802.15.4 para comunicação com demais nodos que podem agora ser roteadores, *folhas gateway* ou *folhas não gateway*. Sendo esse nodo responsável por iniciar a rede, é imprescindível a utilização de apenas um por PAN, ou seja, de todos os nodos configurados com a mesma PAN ID, apenas um pode estar configurado para ser o coordenador.

#### 4.1.2 *Nodo Roteador*

Nodos roteadores foram criados para desempenhar a função de repetição do sinal. Eles são nodos *gateways*, operando no modo de operação RS485-Slaves que, ao se parearem com o seu *pai*, - que agora pode ser um coordenador ou outro nodo

roteador - verificam, conforme seu endereço, se eles podem ter *filhos*, passando a desempenhar a função de roteador. Assim que um nodo operando no modo RS485-Slaves se pareia com um *pai* e descobre que pode virar roteador, ele passa a disponibilizar, além de sua interface RS485 para comunicação com *escravos* Modbus RTU, sua interface IEEE 802.15.4 para formar uma nova rede estrela com nodos *filhos* roteadores, *folhas gateway* ou *folhas não gateway*. Todos esses nodos fazem parte de uma mesma PAN, formando assim uma rede árvore totalmente sem fio.

#### 4.1.3 *Nodo Folha Gateway*

Nodo *Folha Gateway* é todo nodo *gateway* que após se parear com um *pai* Roteador descobre através de seu endereço que não pode ter *filhos*. Assim ele se torna um nodo *folha* da árvore, permitindo, assim como os nodos roteadores, que *escravos* Modbus se conectem à rede através da interface RS485. Porém, não permitem novas conexões IEEE 802.15.4.

#### 4.1.4 *Nodo Folha não Gateway*

Os nodos *folhas não gateways* são nodos de outros tipos, puramente *escravos* sem fio do protocolo Modbus RTU. Eles podem desempenhar papel de sensor de umidade e temperatura, controlador de processos, entre tantos outros, podendo também ter natureza de baixo consumo de energia, sendo alimentados por bateria. Enquanto os nodos *folhas gateway* possuem o mesmo modo de endereçamento que os demais nodos roteadores e coordenadores, os nodos *folhas não gateway* possuem um modo de endereçamento diferenciado, como veremos na Seção 4.2.2.

Nesta dissertação, um tipo específico de nodo *Folha não Gateway* é abordado. Esse é um nodo de natureza de baixo consumo de energia que pode ser alimentado por bateria. Por essa peculiaridade, esse nodo necessita dormir de tempos em tempos, a fim de consumir pouca energia e permitir longevidade para a bateria. Entretanto, por necessitar comunicação em uma rede Modbus RTU, a qual requer que os *escravos* respondam tão logo quanto solicitado, foi necessário a implementação de diversas funcionalidades nos demais nodos gateways da rede a fim de permitir que ambos os protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4 se comuniquem sem interferências.

## 4.2 Protocolos Utilizados

Nesta seção serão apresentados os protocolos utilizados para o desenvolvimento das funcionalidades necessárias para que a Rede de Sensores Sem Fio desejada seja obtida. Tais funcionalidades serão desenvolvidas para a implementação de nodos gateways e não gateways.

### 4.2.1 Protocolo da Camada de Aplicação

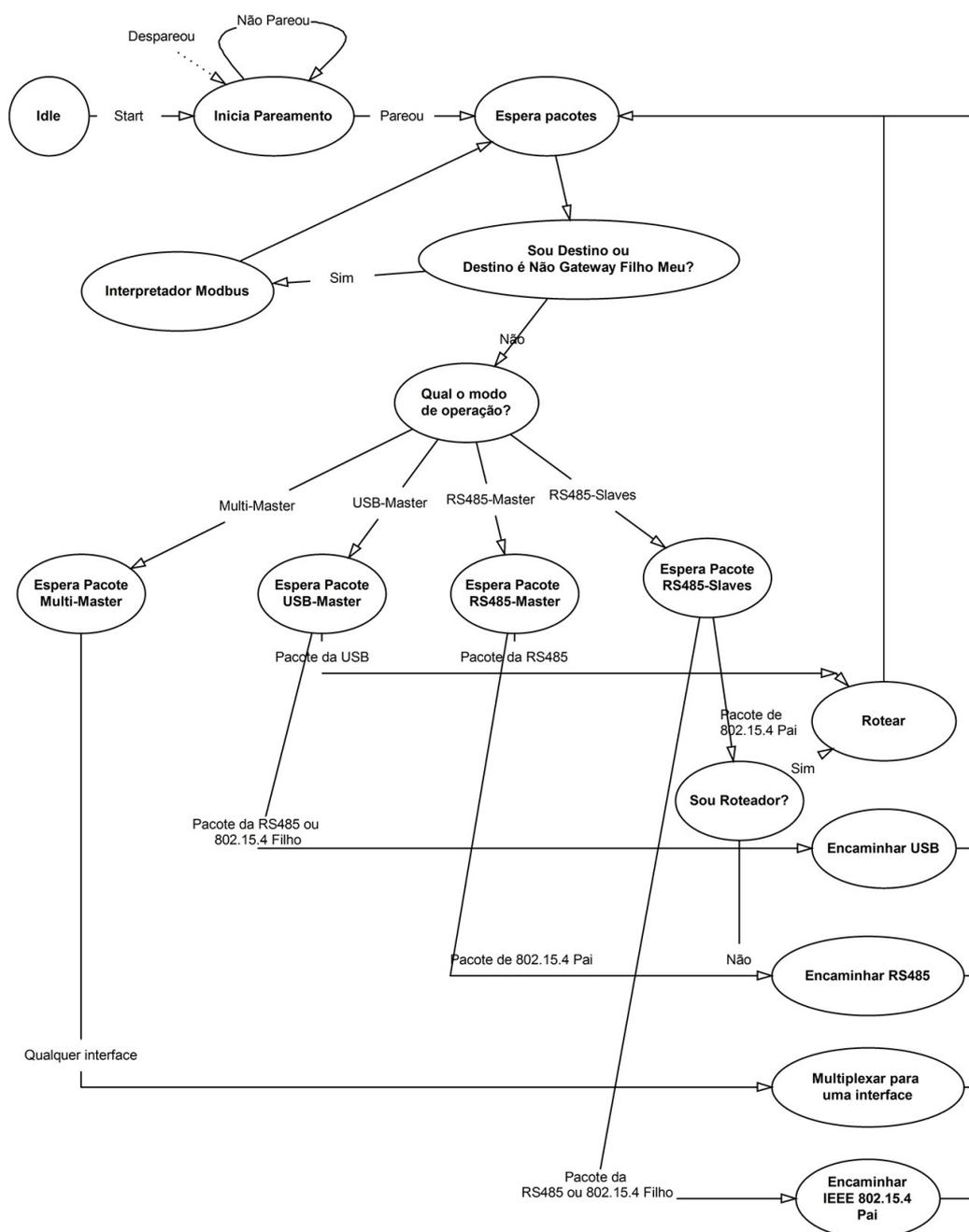
Para permitir a configuração dos nodos e obtenção de métricas, foi desenvolvida uma camada de aplicação. Essa camada desempenha o papel de interpretador de comandos Modbus, tornando os nodos *gateways* escravos da rede Modbus RTU quando o endereço Modbus destino dos pacotes coincide com os seus. Assim, quando um pacote que trafega pela rede cabeada ou sem fio se destina ao nodo *gateway*, sua camada de rede encaminha o pacote para a camada de aplicação que o interpreta, respondendo para o *mestre* solicitante.

A camada de aplicação provê diversos serviços, como o de configuração dos parâmetros de comunicação do dispositivo, tais como PAN ID, modo de operação, *Baud Rate* de cada uma das interfaces USB ou RS485, entre outros; além dos serviços de obtenção das métricas da rede, como qualidade do sinal entre o *link* de comunicação para com o *pai* e cada um dos nodos *filhos* da rede, latência para cada um dos nodos *filhos* da rede, avaliação do espectro eletromagnético de cada um dos possíveis canais de operação, etc.

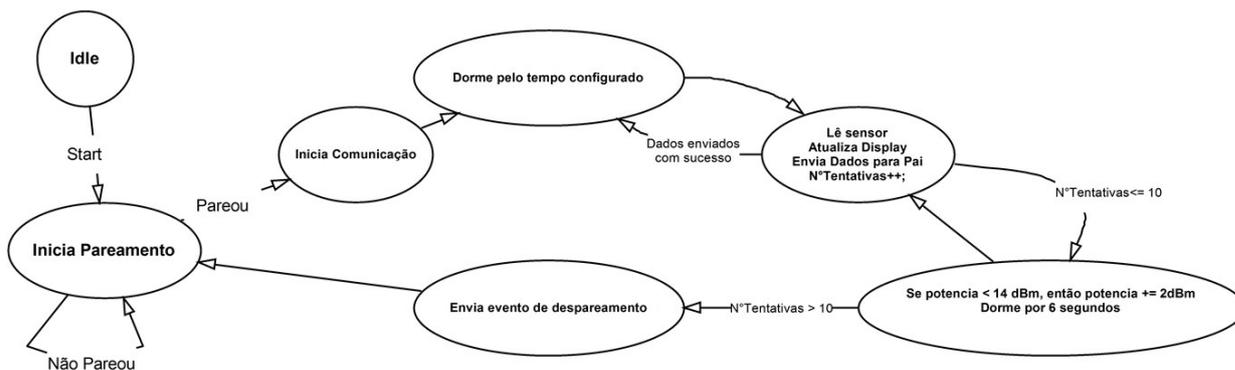
Além disso, a fim de permitir a integração de nodos não *gateways* que operem a bateria, foi criada na camada de aplicação de cada nodo *gateway* uma tabela que mapeia todos os registradores Modbus de cada nodo não *gateway* *filho*. Essa tabela é alimentada pelos nodos *filhos* não *gateways* de cada Coordenador ou Roteador cada vez que eles acordam. Ela é utilizada para responder aos comandos Modbus destinados aos nodos *filhos* não *gateways* que estarão dormindo. Assim, os nodos *gateways* assumem o papel de interpretador de comandos Modbus por cada um de seus *filhos*, respondendo ao *mestre* quando solicitado e evitando que ocorram latências e perdas de comunicação, já que seus *filhos* não *gateways* podem estar dormindo quando solicitado. Entretanto, imaginando um cenário onde o nodo *folha* não *gateway* está configurado para publicar os dados a cada intervalo de 10 minutos e o sistema supervisorio está configurado para solicitar os dados a cada minuto, isso

causa o efeito do supervisor ler 10 vezes a mesma informação que só será atualizada na 11ª leitura. A fim de minimizar esse efeito, foi criado um registrador que incrementa a cada segundo que não houve publicação, sendo ele zerado a cada nova publicação. Assim, isso permite ao sistema supervisorio avaliar qual a validade dos últimos dados lidos.

As máquinas de estados ilustradas na Figura 7 e na Figura 8 exemplificam o funcionamento da camada de aplicação dos nodos *gateways* e não *gateways*, respectivamente.



**Figura 7: Máquina de Estados da Camada de Aplicação do Nodo Gateway.**



**Figura 8: Máquina de Estados da Camada de Aplicação do Nó não Gateway.**

#### 4.2.2 Protocolo da Camada de Rede

Para permitir que todas as funcionalidades – topologias de rede, configuração e obtenção de métricas - desenvolvidas aqui fossem possíveis, foi necessário o desenvolvimento de dois novos subprotocolos na camada de rede: um subprotocolo de endereçamento *Short MAC Address* e um subprotocolo de roteamento.

##### 4.2.2.1 Subprotocolo de Endereçamento

Além dos endereçamentos *Long MAC Address* (estático, padronizado pela *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE, e utilizado no momento do pareamento entre dois nós), PAN ID (configurável e utilizado para identificar que os nós fazem parte de uma mesma PAN) e *Modbus Address* (configurável e utilizado pela camada de aplicação para comunicação com o *mestre* da rede Modbus RTU), foi necessária a definição de um modo de endereçamento para o *Short MAC Address*. Este define o endereçamento a ser utilizado durante a troca de pacote entre os nós sem fio de uma mesma PAN ID. Como será explicado, ele é formado automaticamente pela rede sem fio sem qualquer impacto na rede Modbus, visto que para integração dos dois protocolos foi criado um subprotocolo de roteamento, como será explicado na próxima seção. Além disso, esse endereçamento irá definir a topologia da rede, no caso *árvore*.

O *Short MAC Address* é um endereço configurado automaticamente quando o dispositivo se pareia com um *pai*. Ele é um endereço formado automaticamente pela rede, sendo que o coordenador sempre possui o *Short Mac* 0000 e endereça seus *filhos* que endereçam seus *filhos* a partir do próprio endereço. O *Short MAC Address* pode ser representado, conforme ilustrado na Figura 9.

Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
<b>Short MAC Address</b>															
Ignorado	Endereço Bisavô			Endereço Avô			Endereço Pai			= 0 se Gateway != 0 se não Gateway			Endereço Nodo		

**Figura 9: Short MAC Address.**

A fim de facilitar o endereçamento e a representação, conforme ilustrado pela Figura 9, o bit mais significativo do endereço de 16 bits foi desconsiderado. Assim, cada conjunto de 3 bits possui um significado para a rede, podendo o endereço ser representado em octal para facilitar a visualização. Isso permite que o endereço *Short Mac* de cada nodo represente diversas informações, tais como tipo de nodo, profundidade na rede, endereços disponíveis para os filhos, ramo da rede para o qual o pacote deve ser roteado, etc. A exemplo: (i) um nodo com endereço  $00000_{\text{octal}}$ <sup>2</sup> informa que o nodo é do tipo coordenador; (ii) um nodo com endereço  $00001_{\text{octal}}$  informa que o nodo é o primeiro filho do coordenador, sendo este do tipo roteador, possuindo profundidade 1; (iii) já um nodo com endereço  $00010_{\text{octal}}$ , informa que o nodo é do tipo *folha não gateway*, filho do coordenador, com profundidade 0, visto que é seu pai que assume os pacote endereçados a ele, diminuindo em 1 a sua profundidade na rede; (iv) enquanto um nodo com endereço  $77707_{\text{octal}}$  é um nodo do tipo *folha gateway*, visto que por estar no nível 4 de profundidade não pode mais ter filhos; (v) e um nodo com endereço  $77777_{\text{octal}}$  é o último nodo endereçado na rede, sendo ele do tipo *folha não gateway*, possuindo nível de profundidade 3. Os exemplos (ii) e (iii) representam nodos de diferentes tipos, porém, ambos filhos do coordenador. Já os exemplos (iv) e (v) representam também nodos de diferentes tipos, porém filhos do nodo roteador de endereço  $07707_{\text{octal}}$ , cujo pai é o roteador  $00707_{\text{octal}}$  que é filho do roteador  $00007_{\text{octal}}$  que por fim é o último filho *gateway* do coordenador.

A criação desse modo de endereçamento permitiu à expansão das topologias de rede suportadas pelo protocolo IEEE 802.15.4 (Estrela e Ponto-a-Ponto) para uma topologia de rede do tipo *árvore*. Essa possibilita que a rede se forme automaticamente com até quatro níveis de profundidade, onde cada nível representa um salto sem fio. A escolha da topologia de rede do tipo *árvore* foi realizada em

<sup>2</sup>  $NNNNN_{\text{octal}}$  – informa que o número NNNNN é representado em base octal.

função do protocolo Modbus RTU e das possíveis aplicações em redes de automação industrial. Sendo o protocolo Modbus RTU baseado em mestre escravo, onde sempre um mestre envia uma requisição e aguarda por um tempo determinado por uma única resposta, é intrínseco que a rede seja de baixa latência (da ordem de centenas de milissegundos – para não exceder o timeout do mestre) e não permita que a resposta seja enviada mais de uma vez para o mestre (visto que o mestre aguarda uma única resposta por transição). Assim, redes com topologia *malha* não são aconselháveis, pois apesar de proverem redundância, podem aumentar consideravelmente a latência, uma vez que há diversas possibilidades de rotas para os pacotes. Já redes do tipo *estrela*, podem ser empregadas, porém, reduzem a escalabilidade da solução, uma vez que apenas um salto é possível. Portanto, a topologia de rede do tipo *árvore* é a que melhor soluciona a integração entre redes Modbus RTU e Wireless IEEE 802.15.4, uma vez que as rotas são definidas (reduzindo a latência e impedindo o fluxo desnecessário de pacotes) e os ramos da árvore proporcionam a escalabilidade muitas vezes necessária para integração de diversos escravos Modbus RTU. Quanto a decisão de limitar a topologia da rede *árvore* em 4 níveis de profundidade, foi uma limitação do endereçamento e da necessidade de permitir uma determinada largura em cada nível de profundidade da árvore, conforme será explicado a seguir.

A representação de cada nível de profundidade, bem como o número de nodos coordenadores, roteadores, *folhas gateways* e *folhas não gateways* segue apresentado abaixo:

- No nível 0: 1 nodo coordenador;
- No 1º nível: 7 nodos roteadores + 56 nodos *folhas não gateways*;
- No 2º nível: 56 nodos roteadores + 392 nodos *folhas não gateways*;
- No 3º nível: 448 nodos roteadores + 3136 nodos *folhas não gateways*;
- No 4º nível: 3584 nodos *folhas gateways* + 25088 nodos *folhas não gateways*;
- Totalizando 32768 dispositivos em uma rede com topologia em árvore de profundidade 4.

Para melhor compreensão do modo de endereçamento, consultar Figura 24 na seção 4.4, onde é apresentada uma ilustração de uma possível rede com 4 níveis

de profundidade, nodos Coordenador, Roteadores e *Folhas não Gateways*, com seus respectivos *Short MAC Address*.

Para o endereçamento sem fio utilizado o *Short MAC Address*, cada roteador precisa apenas saber seu endereço para endereçar seus *filhos*. Para o roteamento sem fio utilizado o *Short MAC Address*, cada nodo *gateway* precisa apenas saber o endereço *Short MAC Address* do destino final a fim de transmitir o pacote para o seu *pai* ou *filho* que está na rota. Isso sem necessitar de nenhuma tabela de roteamento, bastando apenas o próprio endereço, visto que sabendo o seu endereço e o endereço destino final, o nodo sabe para que ramo da rede deve encaminhar o pacote.

Com esse endereçamento, a latência máxima da rede é de no máximo quatro saltos para uma mensagem que saia de um nodo *folha* para o coordenador. E de no máximo oito saltos para uma mensagem que saia de um nodo *folha* para qualquer outro nodo *folha* da rede.

#### 4.2.2.2 Subprotocolo de Roteamento

Quanto ao subprotocolo de roteamento da camada de rede, apesar do fato do subprotocolo de endereçamento não necessitar de tabelas para roteamento de pacote, baseado no fato de a camada física possuir três interfaces de comunicação e a camada de aplicação ser apoiada no protocolo Modbus RTU, cada nodo da rede necessita de uma tabela de roteamento que cria um *link* entre o *Modbus Address* destinatário do pacote e a interface na qual se encontra o dispositivo, podendo ela ser, dependendo do modo de operação, a interface RS485; a camada de aplicação, ou um dos seus *filhos* da interface IEEE 802.15.4 (neste caso é utilizado o *Short MAC Address* para cada salto na rede sem fio). A interface USB sempre será utilizada por um *mestre* da rede, nunca por um *escravo*.

Inicialmente, essa tabela inicia vazia. Quando chega um pacote na camada de rede, e esse não possui um *link* com interface definida, ele é encaminhado para todas as interfaces físicas, bem como para todos os nodos *filhos* IEEE 802.15.4. Quando a resposta é recebida por uma das interfaces, esse *link* é criado, e, na próxima transação para esse *escravo*, o pacote é encaminhado apenas à interface correspondente. Nesse momento, o *link* é quebrado novamente, sendo recriado quando o *escravo* responder. Isso funciona devido ao fato de, conforme o protocolo

Modbus RTU, sempre haver uma resposta para a solicitação de um *mestre*. Desta forma, caso o *escravo* mude de posição na rede, basta uma transação para identificar que ele não está mais naquela interface e outra para a descoberta da nova localização do *escravo*.

#### 4.2.3 Protocolo das Camadas Física e de Enlace

Para o desenvolvimento da nova arquitetura abordada neste trabalho, não houve necessidade de modificações nas camadas física e de enlace, continuando elas operando conforme foi descrito no Capítulo 2 e nos trabalhos [16], [17] e [19]. Entretanto, uma pequena modificação no subprotocolo de pareamento foi necessária a fim de permitir a integração de nodos *folhas* não gateway. Tais modificações serão abordadas nesta seção.

##### 4.2.3.1 Subprotocolo de Pareamento

A fim de se obter um sistema mais robusto, foi desenvolvido no subprotocolo de pareamento o uso diversas funcionalidades disponibilizadas pelo protocolo IEEE 802.15.4. Este permite que a rede inicie em um canal de operação livre de interferências e que os nodos procurem se comunicar com nodos mais próximos, ou seja, com melhor qualidade de *link*. Além disso, prevendo uma possível interferência na rede, o protocolo identifica que os nodos perderam comunicação e reinicia a rede em um novo canal sem interferências. Para isso, cada tipo de nodo possui um sistema diferente de pareamento.

O nodo coordenador é o responsável pela inicialização da rede. Uma vez configurado como USB-Master, RS485-Master ou Multi-Master, o nodo inicia a rede, conforme ilustrado na máquina de estados de pareamento da Figura 10, procurando por um canal livre de interferências. Esse processo é realizado através da funcionalidade de *Energy Detection* disponibilizada pela camada física do protocolo IEEE 802.15.4. Essa avalia a energia de cada um dos 16 possíveis canais de operação, retornando para o subprotocolo de pareamento o nível de ruído - indicado de -100 dBm (menos ruído) a -15 dBm (mais ruído) – de cada um destes. A partir de então, é escolhido o canal com menor interferência para iniciar a rede na PAN ID configurada.





potência, a fim de economizar energia não desperdiçando momentos em que um *pai* possa não estar presente e aumentando o alcance com o objetivo de encontrar um *pai* que possa estar mais distante.

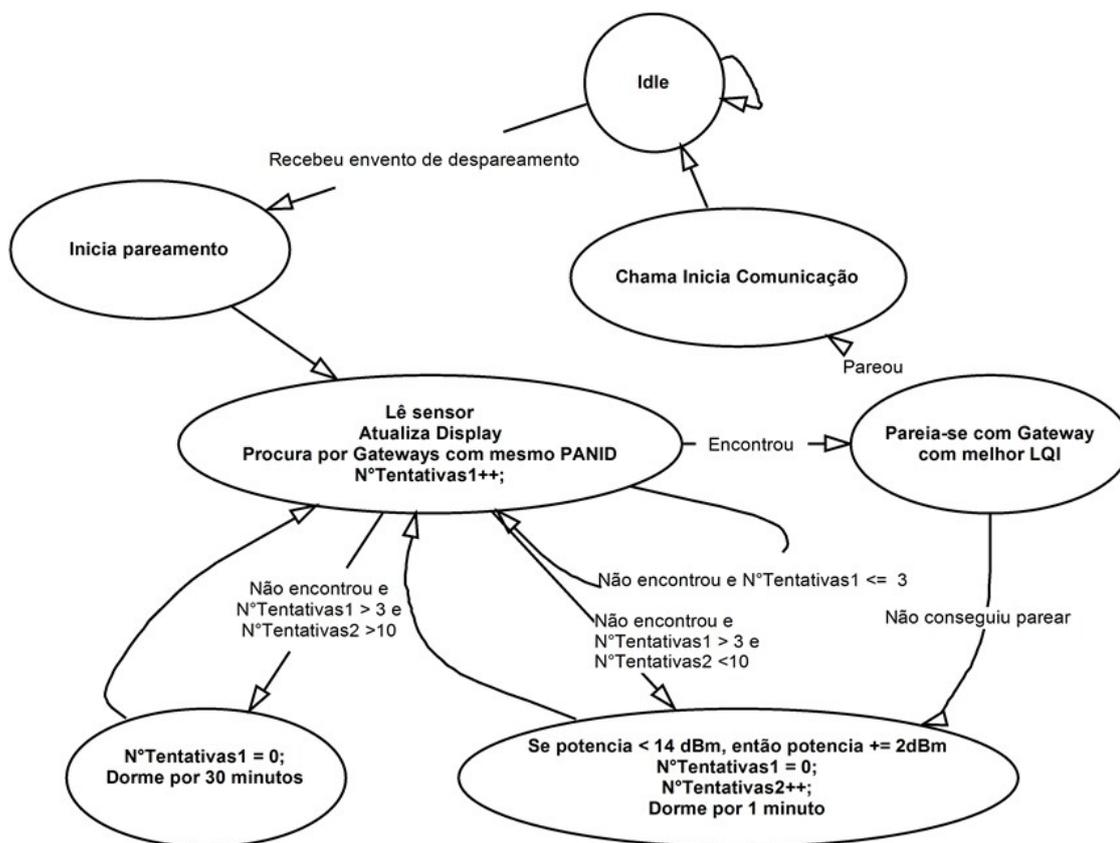


Figura 12: Máquina de Estados de Pareamento do Nodo não Gateway.

A sequência de ilustrações que seguem da Figura 13 a Figura 21 ilustram o processo de pareamento da rede. O processo ilustrado demonstra o funcionamento do sistema de escolha de pai através do LQI e o processo de reestabilização da rede quando um dos *gateways* roteadores entra em falha e para de se comunicar. Essa sequência de ilustrações tem por objetivo apresentar de maneira mais clara o funcionamento do subprotocolo de pareamento abordado nesta seção.

Como pode ser visualizado na Figura 13, a rede simulada inicia com um sistema supervisor, um coordenador e um nodo *folha não gateway*. Inicialmente, o nodo coordenador (Endereço 1), o qual foi previamente configurado como USB-Master para desempenhar essa função, inicia a rede na PAN ID configurada procurando pelo canal com menor nível de interferência. Assim que escolhido o canal, ele disponibiliza sua interface IEEE 802.15.4 para que filhos possam se parrear. Assim que ligado o nodo *folha não gateway* de endereço 2, ele inicia na rede

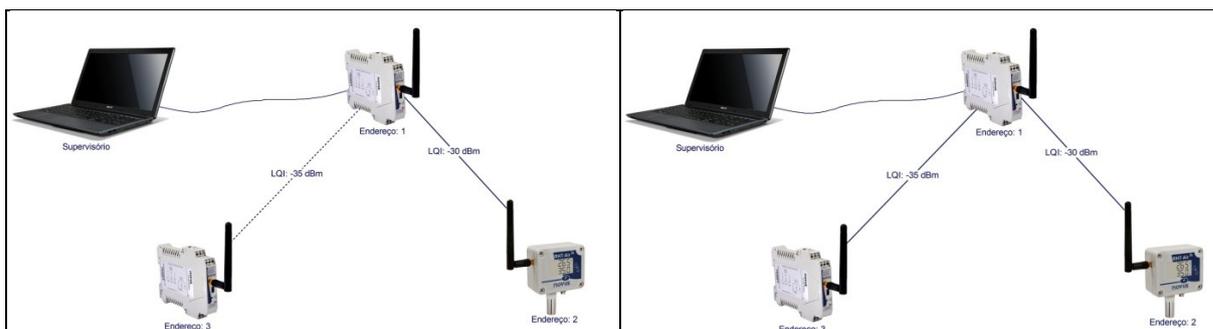
procurando por um pai que esteja operando em sua configurada PAN ID. Conforme ilustrado pela imagem à esquerda da Figura 13, ele encontra apenas o coordenador com LQI -30 dBm (linha tracejada representa os pais encontrados). Como, neste momento da rede, esse é o único pai disponível, ele troca uma série de pacotes até se parrear e estabelecer uma conexão, conforme ilustrado pela imagem à direita da Figura 13 (linha contínua representa uma conexão ativa).



**Figura 13: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 2.**

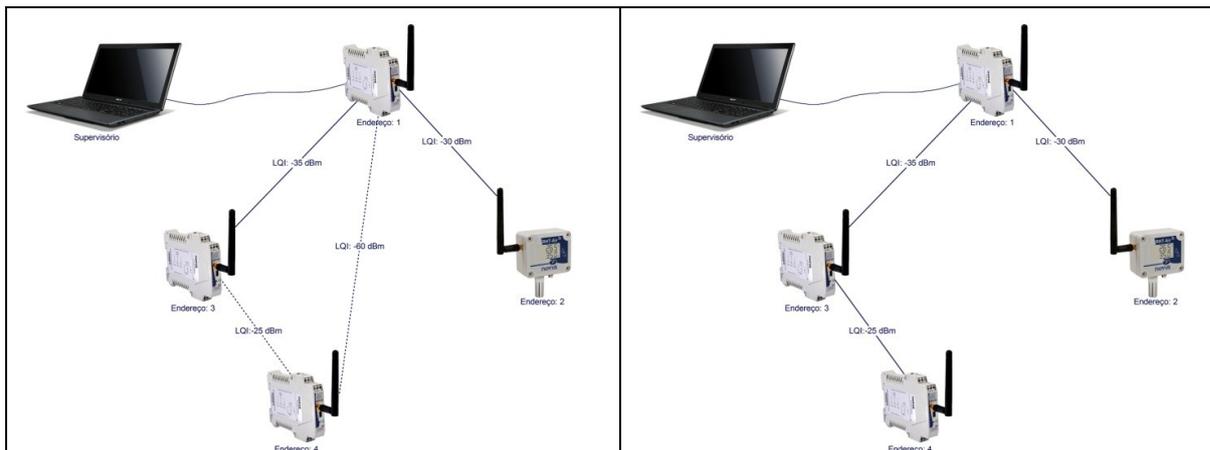
Após o pareamento do nodo de Endereço 2, conforme ilustrado pela Figura 14, é colocado na rede um nodo *gateway* com Endereço 3 que inicia na rede procurando por um pai. Conforme ilustrado na imagem à esquerda da Figura 14, o único pai disponível é o coordenador com LQI -35 dBm. Sendo assim, ele inicia o processo de pareamento com esse nodo, e, assim que estabelecida a conexão, ele passa a disponibilizar sua interface IEEE 802.15.4 para conexão de nodos filhos.

Apesar de o surgimento de um novo roteador na rede possibilitar um melhor LQI para os nodos que já haviam ingressado nela, o processo de repareamento não ocorre a menos que haja perda do link de comunicação. Esse processo seria interessante a fim de reorganizar a rede em tempo real conforme melhores qualidades de sinal, porém, prejudicaria temporariamente a comunicação Modbus, uma vez que um nodo que já havia ingressado na rede precisaria se ausentar para se parrear com um novo pai. Portanto, esta funcionalidade não foi explorada.



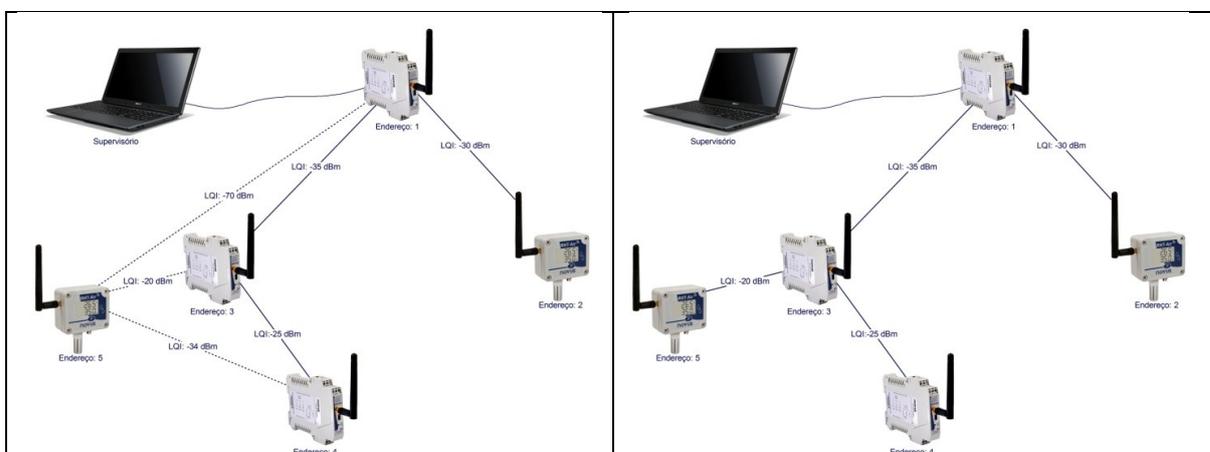
**Figura 14: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 3.**

Posteriormente, conforme ilustrado pela Figura 15, é colocado na rede um novo nodo *gateway* com Endereço 4.



**Figura 15: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 4.**

A imagem à esquerda da Figura 15 ilustra o nodo com Endereço 4, que após procurar por um nodo pai encontra dois nodos *gateway*, o nodo coordenador com LQI -60 dBm e o nodo roteador de Endereço 3 com LQI -25 dBm. Por conseguinte, ele inicia o processo de pareamento com o nodo 3, visto que foi o pai encontrado com melhor LQI, e, assim que estabelecida a conexão, ele passa a disponibilizar sua interface IEEE 802.15.4 para conectar nodos filhos. Quando inserido na rede o nodo de Endereço 5, conforme ilustrado na Figura 16, ele encontra 3 possíveis pais: (i) o nodo 1 com LQI -70 dBm; (ii) o nodo 3 com LQI -20 dBm e (iii) o nodo 4 com LQI -34 dBm. Conforme o processo de escolha, ele pareia-se com o nodo 3.



**Figura 16: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 5.**

Após, com a inserção do nodo 6 na rede, conforme Figura 17, ele procura por um pai e por estar mais afastado do coordenador, encontra disponível apenas os nodos 3 e 4, com respectivos LQI -50 dBm e -40dBm. Após se parear com o nodo 4,

ele torna-se roteador e passa a disponibilizar sua interface IEEE 802.15.4 para conexão de nodos filhos.

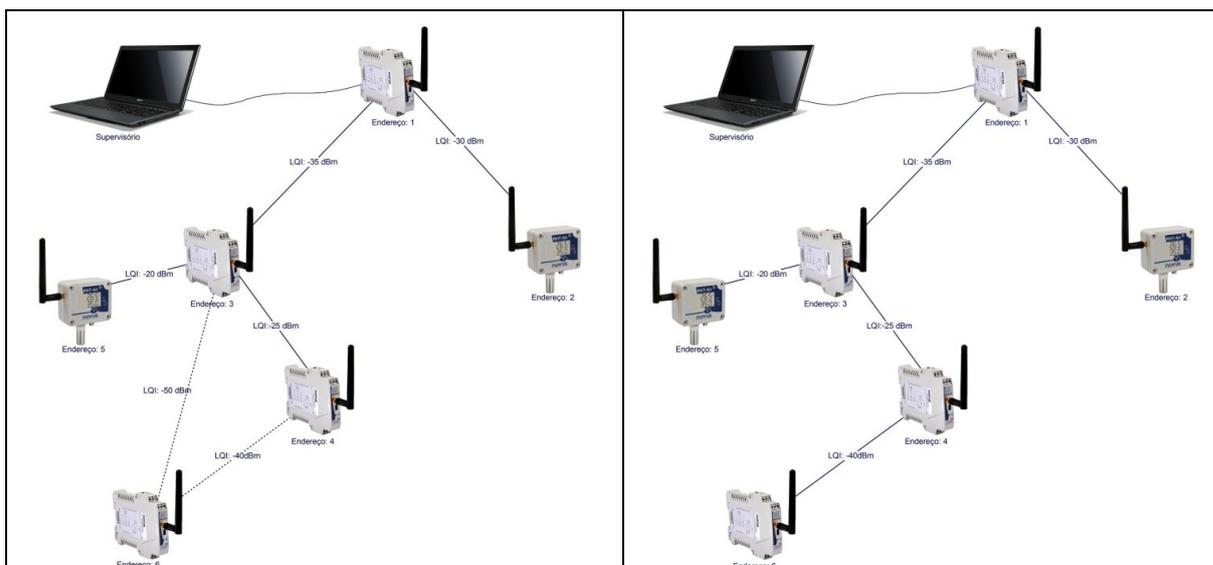


Figura 17: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 6.

Por fim, a Figura 18 ilustra o processo de pareamento do último nodo a ser inserido na rede, o nodo *folha não gateway* de endereço 7. Esse, encontra disponível para parear 4 nodos *gateways*: o nodo 1 com LQI -90 dBm, o nodo 3 com LQI -58 dBm, o nodo 4 com LQI -38 dBm e o nodo 6 com LQI -62 dBm. Assim que escolhido, ele se paraia e cria um link de comunicação com o nodo 4.

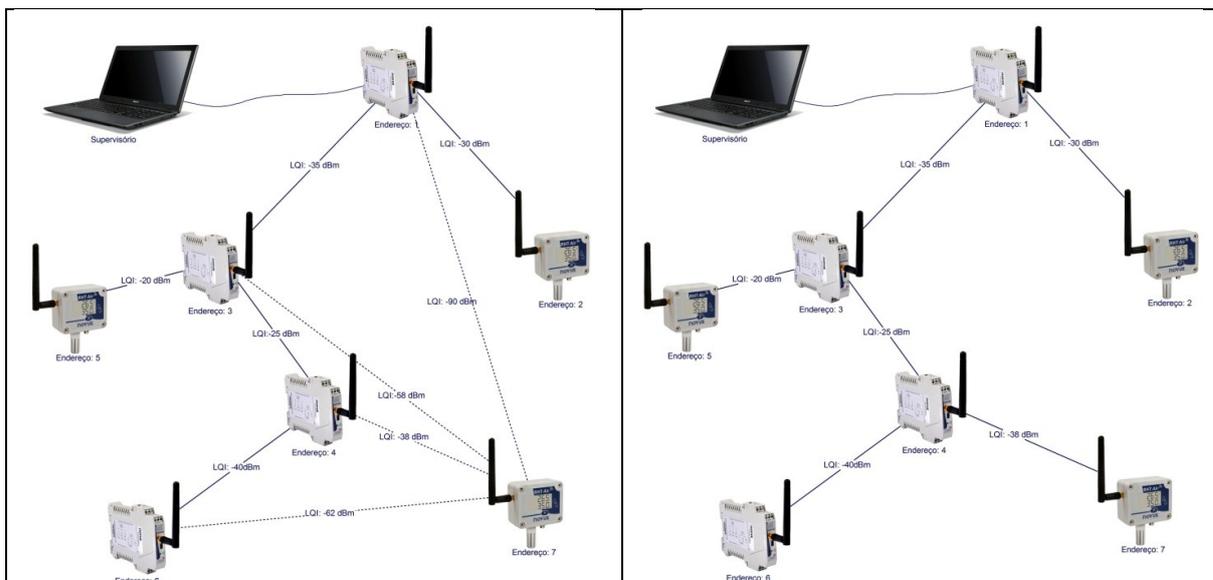
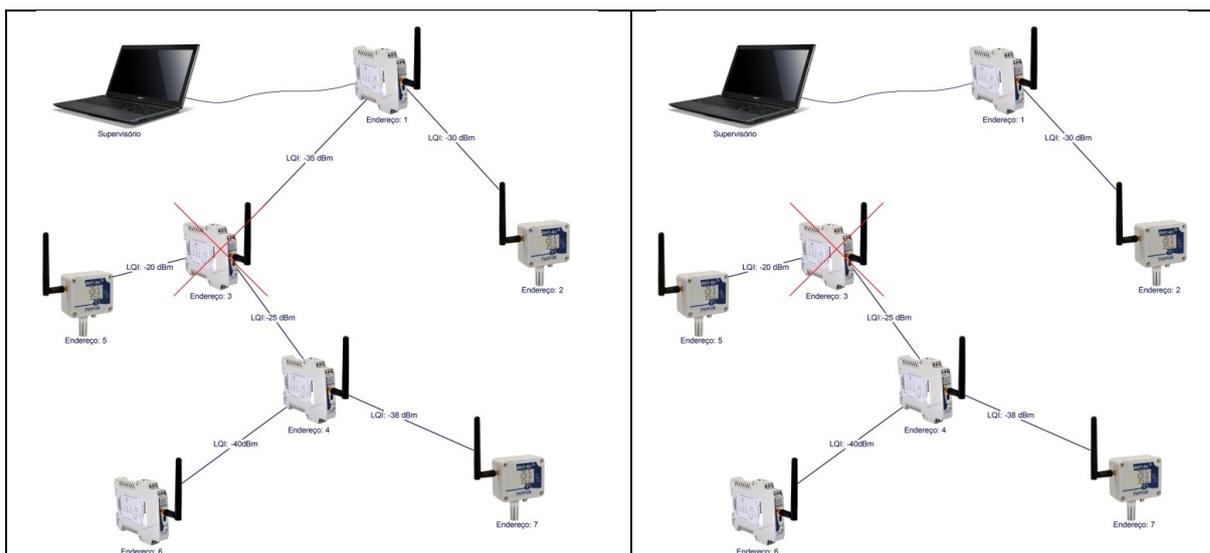


Figura 18: Simulação do Processo de Pareamento – Ingresso do nodo com Endereço 7.

Assim que estabelecida a rede, temos: (i) no nível 0 de profundidade os nodos 1 e 2; (ii) no nível 1 de profundidade os nodos 3 e 5; (iii) no nível 2 de

profundidade os nodos 4 e 7 e (iv) no nível 3 de profundidade o nodo 6. A fim de manter os nodos comunicando com a menor taxa de erros possível, a rede não se altera a menos que haja falha ou seja retirado um dos nodos roteadores. Com o intuito de reestabelecer as conexões o mais rápido possível caso haja falha ou seja retirado um dos nodos roteadores, pacotes periódicos de *keep alive* (manter vivo) trafegam entre pai e filhos para verificar se a conexão ainda está ativa.

A ilustração a esquerda da Figura 19 ilustra o momento em que o nodo roteador 3 entra em falha. Assim, através do processo de *keep alive*, o primeiro nodo a detectar que o link de comunicação caiu é seu pai (conforme ilustrado a direita da Figura 19) o nodo de Endereço 1, o qual, assim que detecta, quebra o link de comunicação, liberando de sua tabela o endereço destinado a este filho, bem como as tabelas de roteamento destinadas a este ramo da rede. Em sequência, seu nodo filho *gateway*, o nodo 4, é o próximo a detectar que o link de comunicação com seu pai caiu. Assim, conforme ilustrado a esquerda da Figura 20, enquanto o nodo 4 procura por um novo pai, seu filho *gateway* de endereço 6 detecta que seu link com o nodo 4 não está mais ativo.



**Figura 19: Simulação do Processo de Pareamento – Falha do nodo com Endereço 3.**

Os nodos *folha não gateway*, por estarem dormindo e se comunicarem apenas nos intervalos configurados, demoram mais tempo para detectar as perdas do link de comunicação, como é o caso dos nodos 5 e 7 ilustrados a esquerda da Figura 20. Assim que o nodo 4 se parecia com o único nodo *gateway* disponível, o coordenador, o nodo de endereço 6 inicia a procura por um novo pai, enquanto os

nodos 5 e 7 detectam que seus pais não estão mais presentes, conforme ilustrado a esquerda da Figura 20.

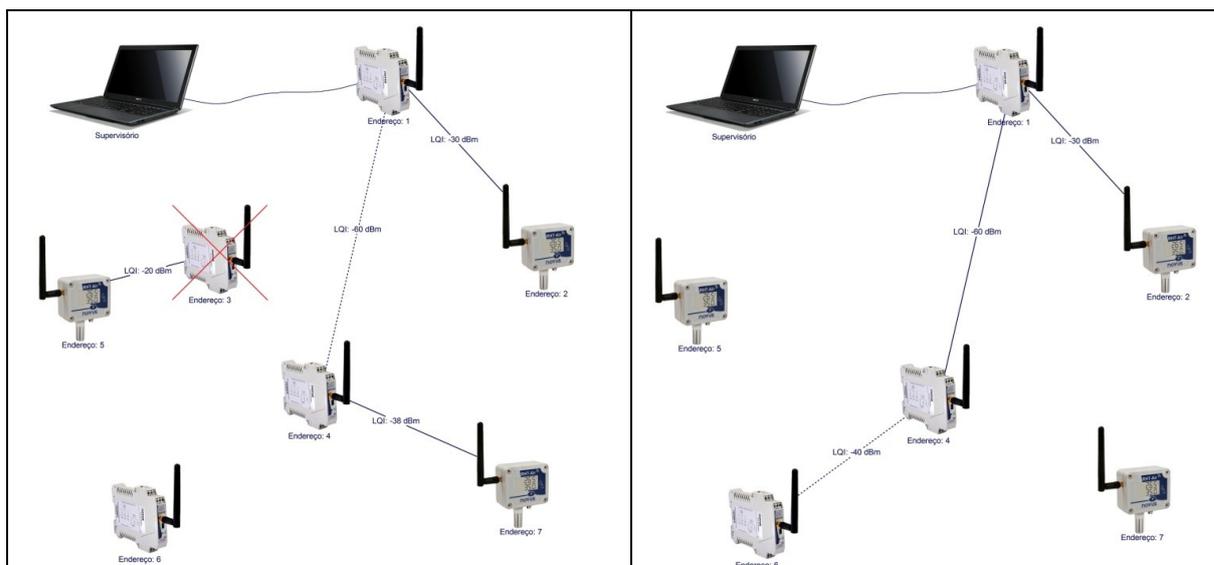


Figura 20: Simulação do Pareamento – Perda de Comunicação dos nodos com endereço 5 a 7.

Conforme ilustrado a esquerda na Figura 21, após o nodo 6 estabelecer comunicação com o nodo 4, os nodos *folha não gateway* 5 e 7 iniciam a busca por um novo pai. O nodo 5 encontra 3 opções de pai: (i) o nodo 1 com LQI -70 dBm; (ii) o nodo 4 com LQI -34 dBm e (iii) o nodo 6 com LQI -30 dBm. Enquanto o nodo 7 também encontra 3 opções de pai: (i) o nodo 1 com LQI -90 dBm; (ii) o nodo 4 com LQI -38 dBm e (iii) o nodo 6 com LQI -62 dBm. Assim, conforme ilustração a direita da Figura 21, o nodo 5 pareia-se com o nodo 6 e o nodo 7 pareia-se com o nodo 4.

Assim que estabelecidas todas as conexões, a rede segue operando e comunicando conforme o tráfego de pacotes requisitados pelo mestre Modbus até que algum evento de falha ocorra e a rede necessite se reestabelecer. Todo o processo de detecção da perda do link de comunicação e reparamento dura pouco segundos, o que representa poucos erros de comunicação para um mestre Modbus configurado para timeouts de 1 segundo e 3 retentivas por pacote. Entretanto, nodos *folha não gateway* podem levar o tempo configurado para publicação para detectar a perda do link de comunicação e buscar por um novo pai, o que pode acrescer na taxa de erros que será relativa ao intervalo configurado para publicação.

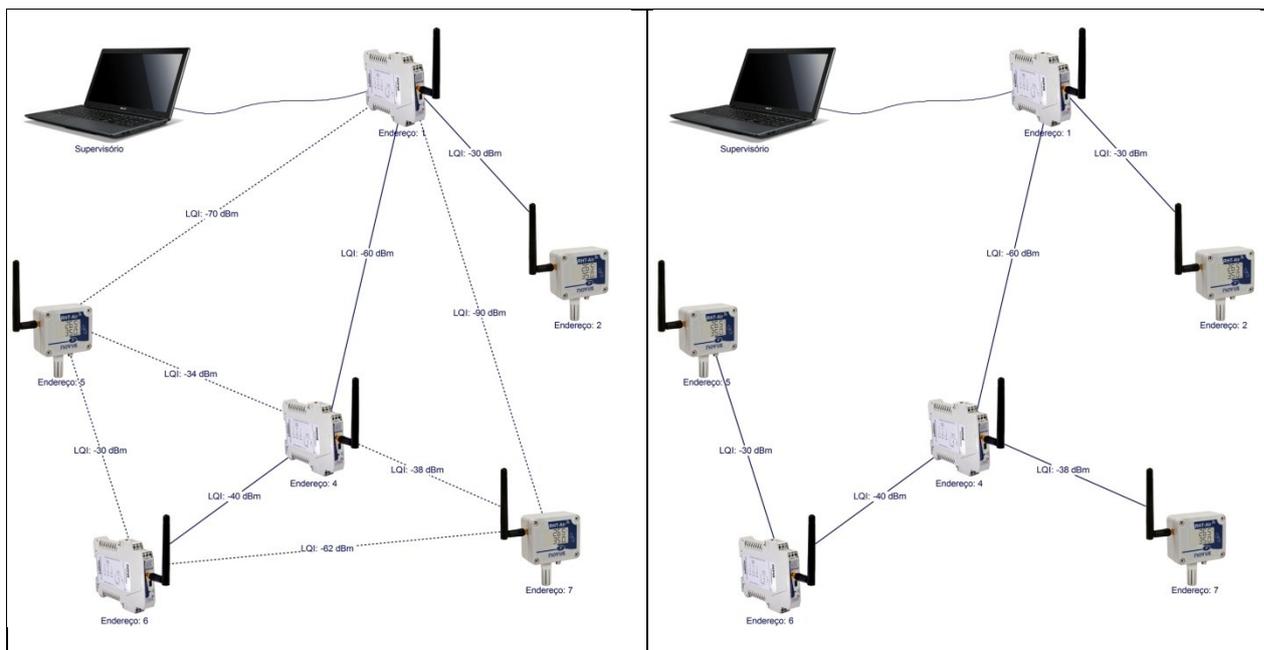


Figura 21: Simulação do Pareamento – nodos com endereço 5, 6 e 7 pareiam novamente.

### 4.3 Métricas da camada de Aplicação para avaliar e validar a Arquitetura

A fim de se obter informações para validação dos sistemas instalados, esta seção aborda um conjunto de métricas que permitem a validação da arquitetura apresentada. Estas métricas são de suma importância, pois, além de permitirem a verificação correta da instalação dos equipamentos e a validação dos requisitos da aplicação, permitem também a geração de dados para modelagem da arquitetura.

Providas pela camada de aplicação de cada nodo *gateway* da rede para que o *mestre* Modbus RTU possa solicitá-las a qualquer momento, as métricas abordadas aqui são obtidas desde as camadas física e de enlace dos protocolos IEEE 802.15.4, USB e RS485, até as camadas de rede e de aplicação.

#### 4.3.1 Obtenção de Informações da Qualidade do Sinal

A qualidade do sinal entre cada *link* de comunicação – par de nodos *pai* e *filho* - pode ser obtida pelo LQI, disponibilizado pela camada física do protocolo IEEE 802.15.4. Esse parâmetro indica em decibel miliwatt (dBm - relação logarítmica ao mW, em que 0 dBm equivale a 1 mW) a potência de recepção do último pacote recebido pela interface sem fio. O LQI pode variar de -15 dBm (melhor qualidade de sinal) a -100 dBm (limite inferior, a partir disso, perde-se o *link* de comunicação).

Para avaliação do *link* de comunicação entre dois equipamentos é necessário ler dois LQIs: LQI Rx – indica a qualidade de recepção do nodo A com relação à

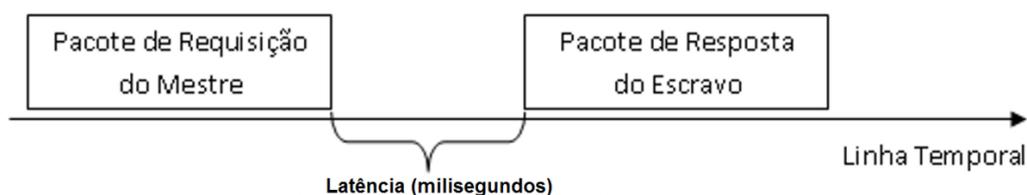
transmissão do nodo B – e o LQI Tx – indica a qualidade de recepção do B com relação à transmissão do nodo A. Isso é indispensável, pois o LQI é influenciado por diversos fatores, tais como potência de transmissão, sensibilidade de recepção, e nível de ruído próximo ao equipamento transmissor e ao equipamento receptor.

Além disso, o LQI possui uma relação inversamente proporcional com a distância entre dois nodos, bem como tem sua potência reduzida com a localização de obstáculos entre os nodos. Estes dois fatores que influenciam o LQI possuem diversas pesquisas [29][30] e modelos matemáticos como modelos de propagação do sinal, Zona de Fresnel e *Link Budget*.

#### 4.3.2 Obtenção de Informações de Latência para cada Nodo da Rede

Para cada nodo da rede é possível obter informações sobre a latência para cada um de seus *filhos* da rede. Essa latência, conforme caracterizado na Figura 22, é o tempo de resposta de uma transação, que é obtido pela diferença entre o instante de tempo da recepção do último byte (pela interface de requisição do *mestre*) e o instante de tempo da transmissão do primeiro byte do pacote de resposta do *escravo* para a interface do *mestre*. Assim, para descobrir a latência do pacote desde o *mestre* até um *escravo* da rede, deve-se requisitar ao coordenador qual a latência para aquele endereço Modbus do *escravo* pretendido. Se for solicitada a latência do próprio coordenador, ela será zero, pois o tempo de processamento entre a requisição e a resposta é mínimo e desconsiderado. Entretanto, para qualquer outro nodo da rede, a latência será proporcional tanto ao número de saltos sem fio e com fio quanto ao tamanho do pacote. Isso se dá pelo fato de que um maior pacote necessita de mais tempo para trafegar pela rede.

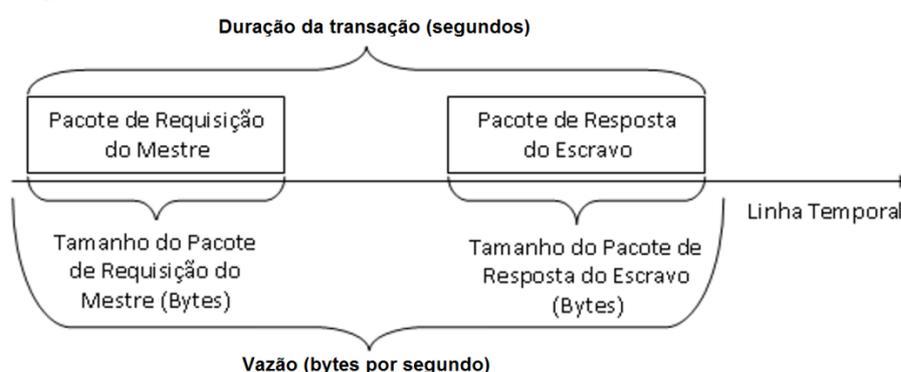
Além disso, a latência pode sofrer variações externas, tais como congestionamento da rede por interferências provenientes de outros nodos da mesma ou de outras redes, assim como de outros protocolos de comunicação sem fio.



**Figura 22: Caracterização de Latência.**

### 4.3.3 Obtenção de Informações de Vazão para cada Nodo da Rede

A vazão, conforme caracterizado na Figura 23, medida em bytes por unidade de tempo, é obtida pela relação dos pacotes de requisição e resposta com o intervalo de tempo desde o primeiro byte recebido pela interface de requisição do *mestre* até o último byte transmitido da resposta do *filho* para a interface do *mestre*. Ela possui relação inversamente proporcional à latência, de forma que, quanto maior a latência, menor será a vazão. Em contrapartida, quanto maior o tamanho dos pacotes trafegados pela rede, maior será a vazão.



**Figura 23: Caracterização de Vazão.**

Cabe salientar ainda que para cada salto sem fio, cada pacote é acrescido de um cabeçalho fixo. Esse cabeçalho cria um *overhead* maior para pacotes pequenos, pois pacotes grandes compensam o tamanho do cabeçalho. Ou seja, para pacotes pequenos, o número de saltos influencia mais na vazão que para pacotes grandes.

### 4.3.4 Obtenção de Informações de Taxa de Erros para cada Nodo da Rede

Informações de taxa de erros, medidas em percentual (%), são obtidas da camada de aplicação pela relação entre o número de pacotes requisitados a um *escravo* e o número de pacotes respondidos por esse *escravo*. Essa relação deve ser requisitada preferencialmente ao coordenador da rede, de forma que a informação caracterize a rede global. Entretanto, informações locais (de um ramo da árvore) podem ser também obtidas ao requisitar para nodos roteadores intermediários.

A taxa de erros possui uma relação direta com o BER (*Bit Error Rate* – taxa de erros por bit) e o PER (*Packet Error Rate* – taxa de erros por pacote), tais como descritos nas camadas físicas dos protocolos IEEE 802.15.4, USB e RS485. Além disso, ele é influenciado por diversos tipos de interferência eletromagnética que

podem provir de outros protocolos de comunicação sem fio, equipamentos que gerem ruídos como motores e inversores de frequência, entre outros.

#### 4.3.5 Obtenção do Ruído Eletromagnético dos Canais de Operação

Do mesmo modo que a camada física do protocolo IEEE 802.15.4 possibilita obter o LQI necessário, ela também permite obter o nível de ruído de cada um dos 16 possíveis canais de operação. Esse ruído eletromagnético pode variar de -100 dBm (canal livre de interferências) a -15 dBm (canal com maior grau de interferência). Assim como a taxa de erros, a sujeira dos canais de operação também pode sofrer interferência das mesmas possíveis fontes de ruídos eletromagnéticos.

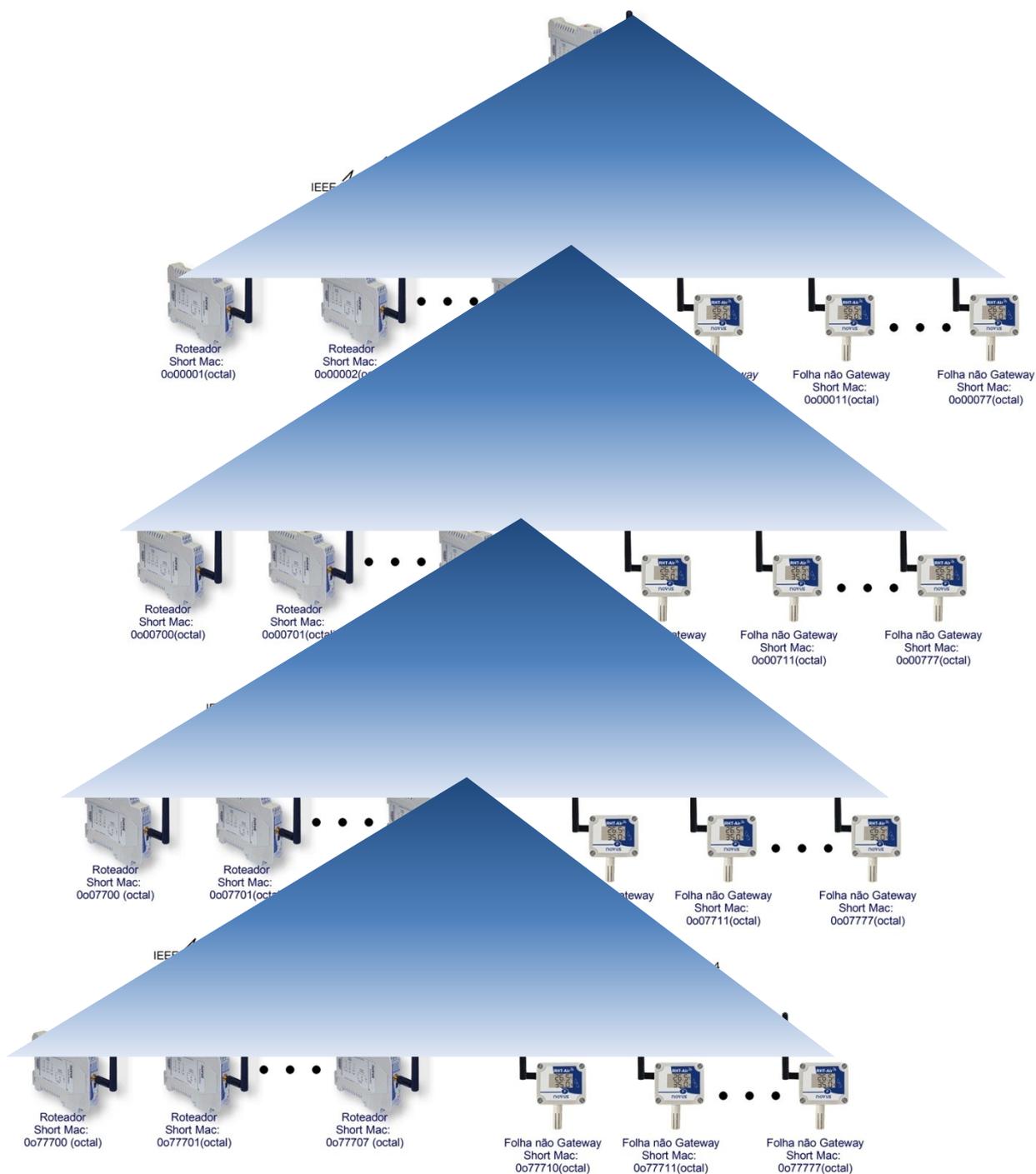
## 4.4 Topologias Possíveis

Após o desenvolvimento de todas as funcionalidades descritas aqui, além das possibilidades topológicas descritas na Seção 2.6.2, é possível dispor os nodos em uma topologia de rede *árvore* totalmente sem fio com até quatro níveis de profundidade, conforme pode ser visualizado na Figura 24, onde foram utilizados 32 nodos *gateways* e 224 nodos *folhas não gateways* em uma mesma PAN ID.

A topologia de rede ilustrada na Figura 24 busca complementar a explicação de como funciona o endereçamento *Short Mac* na rede, conforme explicado na Seção 4.2.2.1. Para isso, foi ilustrado um primeiro nodo coordenador que possui 7 filhos *gateway* com endereços *Short Mac* de  $00001_{\text{octal}}$  a  $00007_{\text{octal}}$  e 56 nodos filhos *folha não gateway*, endereçados de  $00010_{\text{octal}}$  a  $00077_{\text{octal}}$ . Seus filhos *gateway*, assim que se parearam se tornaram roteadores com profundidade 1, podendo cada um deles ter 8 filhos *gateway* e 56 filhos *folha não gateway*. Já seus filhos *folha não gateway* possuem profundidade 0, pois é ele que responde pelos pacotes endereçados a seus filhos. Todos os endereços estão representados em octal, e, para um melhor entendimento, deve-se dispor cada caractere numérico na representação ilustrada pela Figura 9.

Seguindo na rede ilustrada, o roteador com endereço  $00007_{\text{octal}}$  possui 8 filhos roteadores com profundidade 2 e 56 filhos *folha não gateway* com profundidade 1. Seu filho  $00707_{\text{octal}}$  possui 8 filhos roteadores com profundidade 3 e 56 filhos *folha não gateway* com profundidade 2. Por conseguinte, o filho roteador com endereço  $07707_{\text{octal}}$  possui 8 filhos *gateway* com profundidade 4 e 56 filhos *folha não gateway*

com profundidade 3. Por fim, esses 8 filhos *gateway* não podem ter filho por limitação de endereçamento e profundidade, finalizando a topologia ilustrada. Entretanto, cada um dos nodos roteadores ilustrados poderiam ter diversos nodos filhos, assim como cada um de seus filhos roteadores, novos nodos filhos, o que completaria o máximo de 32768 nodos em uma mesma PAN conforme demonstrado nos cálculos da Seção 4.2.2.1.



**Figura 24: Topologia de rede árvore totalmente sem fio.**

A fim de permitir que a rede alcance profundidades maiores que 4, também são possíveis arquiteturas de rede híbridas. Elas utilizam duas ou mais PANs interligadas por meio de pares de nodos *gateways* interligados através de cabo RS485, conforme ilustrado em um exemplo na Figura 25. Nesse, um nodo coordenador configurado como Multi-Master (endereço Modbus 100), o qual possui dois mestres Modbus conectados (Superview através da interface USB e FieldLogger através da interface RS485), está configurado com a PAN ID 5670. Ele possui 2 filhos roteadores (endereços Modbus 101 e 102) e 1 filho *folha não gateway* (endereço Modbus 3).

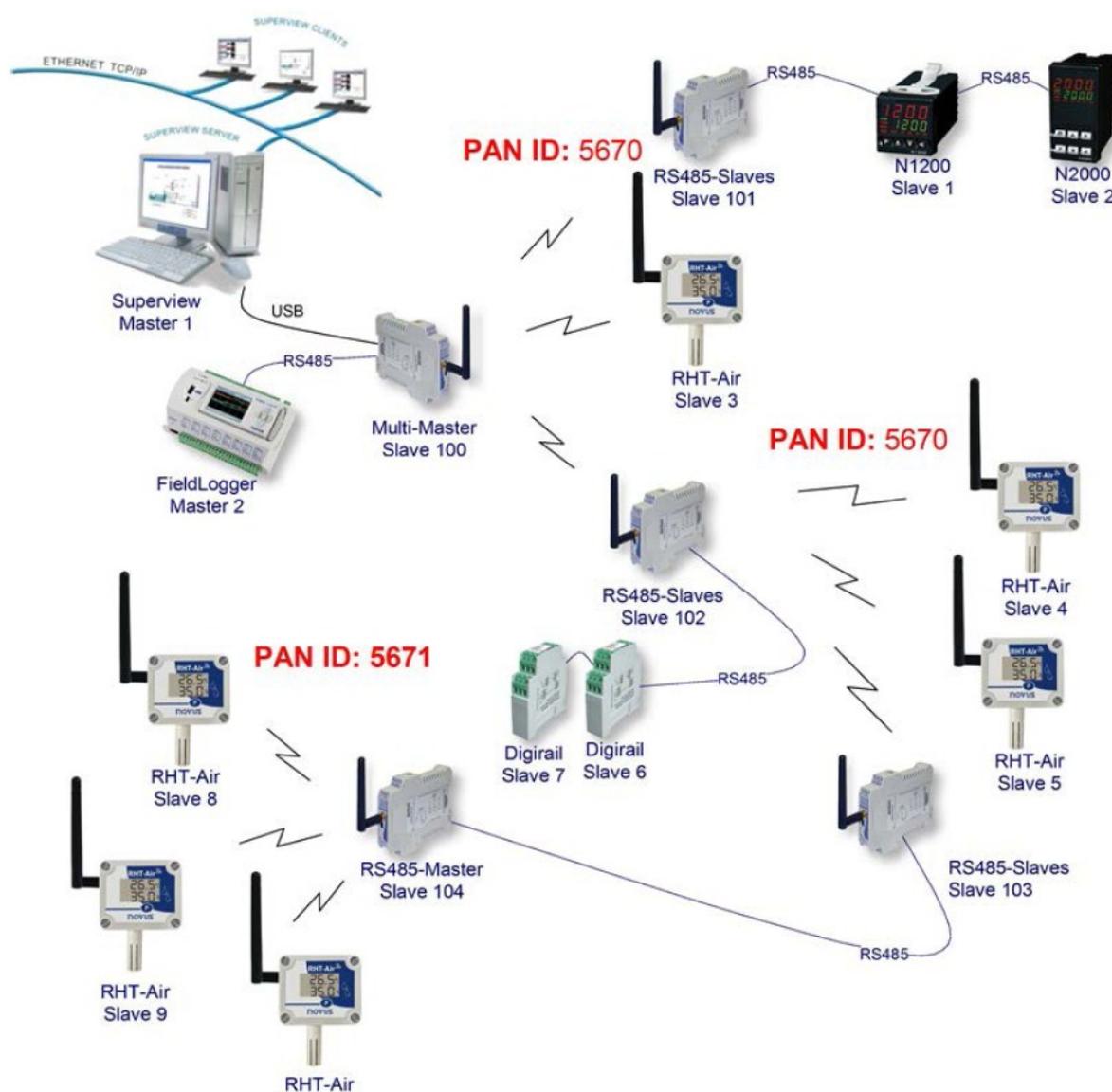


Figura 25: Topologia de rede árvore híbrida utilizando-se da nova arquitetura de rede desenvolvida.

O roteador com endereço Modbus 102 possui, na mesma PAN ID, 2 filhos *folha não gateway* (endereços Modbus 4 e 5) e um filho roteador (endereço Modbus 103). Esse filho roteador está conectado, através da interface RS485, a um nodo coordenador de outra PAN (PAN ID 5671) que está operando como RS485-Master. Através dessa ligação, a rede torna-se híbrida, dando continuidade a mesma rede Modbus RTU em outra rede IEEE 802.15.4, a qual, neste exemplo, possui 3 nodos *folha não gateway*.

## 5 VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA

Com o objetivo de validação da arquitetura desenvolvida, este capítulo aborda os resultados dos testes realizados com os equipamentos em diversos cenários.

### 5.1 Avaliação do comportamento, consumo e expectativa de vida da bateria do equipamento não *gateway*

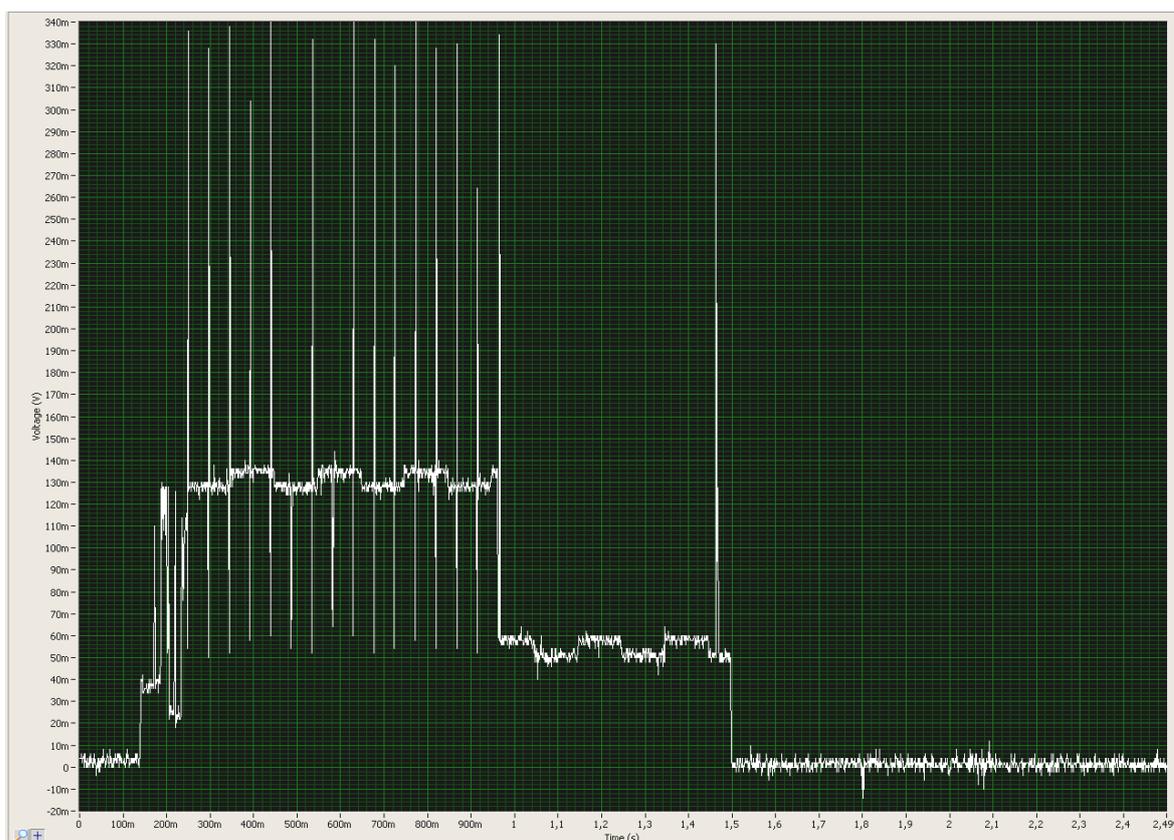
Com o propósito de validar o comportamento do nodo não *gateway* e obter informações para estimar a duração da bateria em diferentes condições de uso, foi avaliado o consumo do equipamento quando em condições de pareamento e operação para diferentes níveis de potência de transmissão. O comportamento do firmware utilizado nos testes consiste em parear, dormir e, a cada 10 segundos, acordar para comunicar com seu nodo *pai*. Para avaliação foram utilizados, além de um nodo *gateway* coordenador e um nodo não *gateway*, um multímetro de precisão, um osciloscópio e um resistor de 4,62  $\Omega$  para avaliar a corrente consumida em cada instante do processo.

Por meio do multímetro de precisão foi possível verificar que o consumo do nodo enquanto dorme é de aproximadamente 20  $\mu\text{A}$ . As demais potências dissipadas foram analisadas no osciloscópio mediante a queda de tensão no resistor de 4,62  $\Omega$ . Portanto, para cada ponto verificado na forma de onda do osciloscópio, o consumo é do ponto registrado (em V) dividido pela resistência fixa de 4,62  $\Omega$ . Os gráficos representados pela Figura 26 e pela Figura 27 representam, respectivamente, o processo de pareamento e o processo de comunicação do nodo não *gateway* operando com uma potência de transmissão de 0 dBm. As demais potências de transmissão serão discutidas na Tabela 2.

O pareamento, conforme observado na Figura 26, dura aproximadamente 1,4 segundos. Durante esse tempo, segue o seguinte procedimento:

1. O nodo que estava consumindo 20  $\mu\text{A}$  dormindo, acorda e por um intervalo de 100 ms fica em um estado oscilatório de 20 mA de consumo médio;
2. Após estabilizar, ele inicia o pareamento, que passa por 16 períodos em Tx (74 mA por 1 ms cada) e 16 períodos de Rx (29 mA por 44 ms cada);

3. Após a varredura dos 16 canais de operação, o nodo, além de escolher um *pai* para parrear, lê o sensor de umidade e temperatura e atualiza o display, o que dura aproximadamente 500 ms a um consumo de 12 mA;
4. Por fim, o nodo realiza uma transmissão que consome 74 mA por 1 ms e uma recepção que consome 29 mA por 4 ms;
5. Assim, finalizando o processo, o nodo guarda o estado de pareamento, se programando para dormir e acordar após o intervalo configurado. Esse processo consome mais 12 mA por 30 ms.

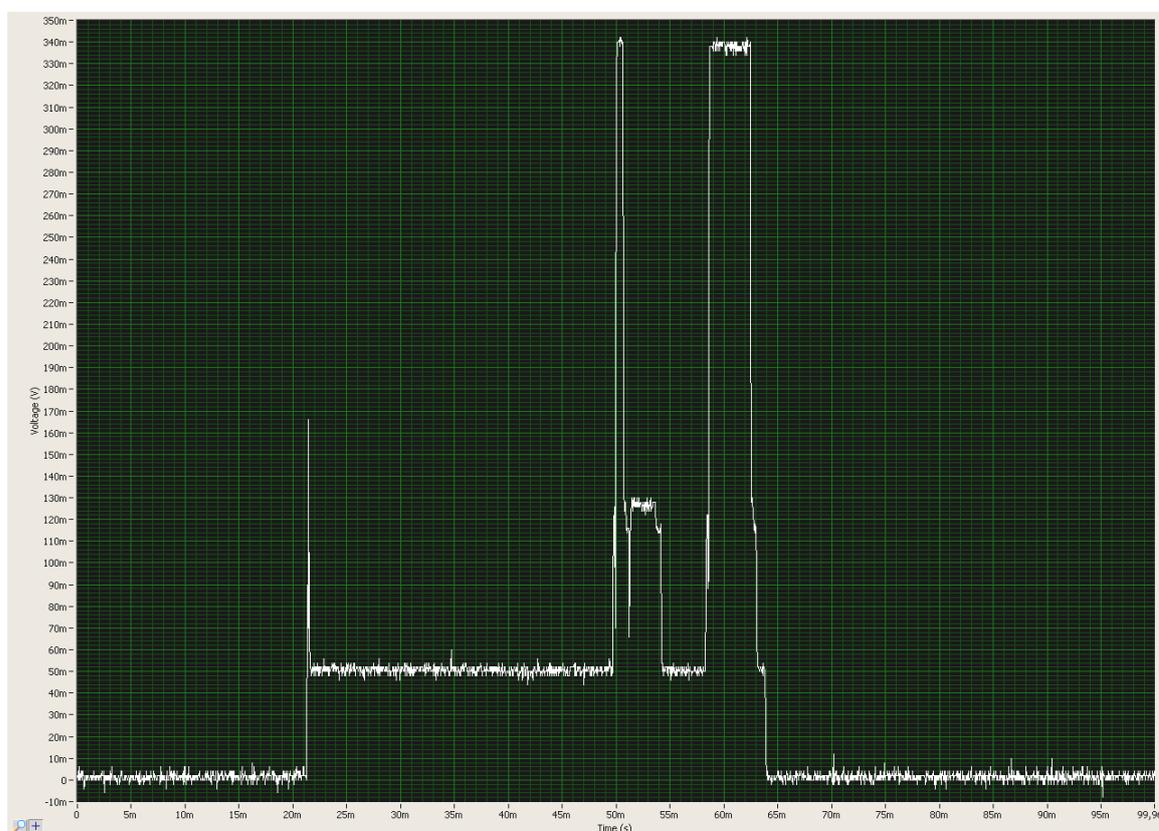


**Figura 26: Nodo não gateway pareando a 0 dBm - queda de tensão no resistor de 4.62  $\Omega$ .**

Após o processo de pareamento estar estabelecido, o nodo se comporta conforme o gráfico ilustrado pela Figura 27. A cada intervalo programado o nodo acorda de um consumo constante de 20  $\mu$ A e se comporta de acordo com a forma de onda, a qual pode ser analisada da seguinte forma:

1. O fato de acordar faz com que o nodo tenha um pico de consumo de 37 mA por 500  $\mu$ s;
2. Assim que estabelecido, ele leva 27,5 ms para ler o sensor e atualizar o display, consumindo constantemente 12 mA nesse intervalo de tempo;

3. Após obter as informações do sensor e atualizar o display, o nodo envia um pacote perguntando ao *pai* se há algum pacote para ele. Esse processo consome 74 mA por 1 ms em Tx e 29 mA por 4 ms em Rx;
4. Após ele leva 4,5 ms processando os dados e consumindo 12 mA;
5. Finalmente ele envia um pacote de 94 bytes com todas as suas informações sensorizadas para o *pai*, o que consome 74 mA por 5 ms.



**Figura 27: Nodo não gateway comunicando a 0 dBm - queda de tensão no resistor de 4.62  $\Omega$ .**

Além da análise para o nodo comunicando a 0 dBm, também foi analisado o consumo para as potências de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 20 dBm. Apenas estas potências foram verificadas, pois são as disponibilizadas para operação pelo módulo selecionado para o desenvolvimento. A relação de consumo de transmissão e potência seguem relacionadas na Tabela 2.

**Tabela 2: Relação entre potência de transmissão e consumo.**

Potência de Transmissão	Consumo na Transmissão	Potência de Transmissão	Consumo na Transmissão
0 dBm	74 mA	10 dBm	81 mA
2 dBm	76 mA	12 dBm	91 mA
4 dBm	78 mA	14 dBm	102 mA
6 dBm	79 mA	20 dBm	175 mA
8 dBm	80 mA		

Após levantamento dos dados de consumo do nodo para as situações de pareamento e comunicação em todas as possibilidades de potência de transmissão, foi gerada uma análise de consumo do conjunto para diversos cenários. Esses relacionam a duração da bateria com a variação de um dos parâmetros enquanto os outros mantinham os valores padrões, conforme Tabela 3. Para essa análise foi considerado que o nodo realizava o processo de pareamento a cada período de 24 horas e comunicação seguindo informações da tabela. Além disto, antes da análise, constatou-se que as características da bateria a ser utilizada não permitiam picos de corrente acima de 100 mA, portanto, a potência de 20 dBm foi desconsiderada na análise, sendo o nodo não *gateway* restringido a potência de até 14 dBm.

**Tabela 3: Relação de duração da bateria.**

Capacidade da bateria (Ah)	Potência de transmissão (dBm)	Intervalo de comunicação (s)	Duração da bateria (meses)
0,2	0	60	5,94
0,4	0	60	11,87
0,6	0	60	17,81
0,8	0	60	23,74
1	0	60	29,68
1,2	0	60	35,61
1,4	0	60	41,55
1,6	0	60	47,48
1	0	60	29,68
1	2	60	29,53
1	4	60	29,46
1	6	60	29,39
1	8	60	29,19
1	10	60	28,71
1	12	60	27,94
1	14	60	27,23
1	0	0,5	0,69
1	0	1	1,36
1	0	60	29,68
1	0	120	36,68
1	0	600	43,43
1	0	1800	44,97
1	0	3600	45,38
1	0	86400	45,77

A análise feita sobre a Tabela 3 permitiu definir que a escolha da bateria, a qual deve ter expectativa de vida em torno de 2 anos, deve ser uma que possui carga entre 0,8 e 1,0 Ah. Quanto ao intervalo de comunicação, foi possível observar duas coisas: (i) intervalos inferiores a 1 segundo degradam a bateria em menos de 1 mês; (ii) intervalos superiores a 1800 segundos tem pouco impacto na vida útil da bateria, o que se dá pelo fato do consumo quiescente (consumo dormindo) afetar

mais que os períodos comunicando. Portanto, essa análise permite concluir que é imprescindível que o nodo durma de tempos em tempos, sendo o consumo do nodo dormindo o de mais impacto para o tempo de descarga da bateria.

## 5.2 Avaliação do comportamento da rede *Árvore* constituída por

### Coordenador, Roteadores, *Folhas Gateways* e *Folhas não Gateways*

Com o intuito de validar o comportamento da rede constituída por inúmeros nodos de diferentes tipos, primeiramente, utilizando os dados de especificação dos protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4, conforme demonstrados na Tabela 4, foi levantado uma série de estimativas comportamentais que englobam a relação entre profundidade, vazão, latência da rede e tamanho do pacote.

**Tabela 4: Especificações dos protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4.**

Protocolo Modbus RTU		Protocolo IEEE 802.15.4	
BaudRate Serial:	115200	BaudRate Wireless:	250000
Bits por byte:	10	Taxa Real (B/s):	31250
<b>Taxa Real (B/s):</b>	<b>11520</b>	LIFS (B)	20
<b>Tempo entre pacote de requisição e resposta (s):</b>	<b>0,00175</b>	SIFS (B)	6
		ACK (B)	11
		Tamanho do cabeçalho da camada de rede (B)	30
		<b>Overhead total do pacote (B)</b>	<b>67</b>
		<b>Tamanho máximo para o pacote da aplicação (B):</b>	<b>94</b>

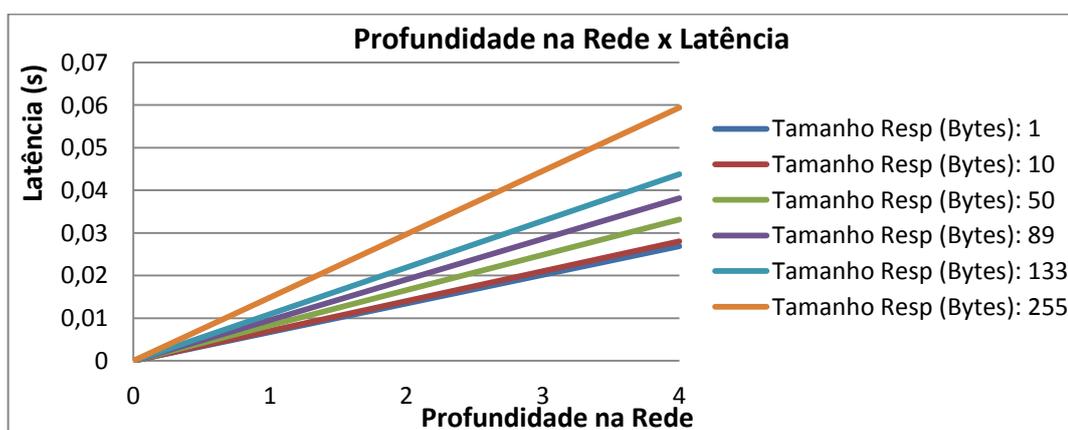
Utilizando os dados de Taxa Real e Tempo entre pacote de requisição e resposta do protocolo Modbus RTU, conforme ilustrado na Tabela 4, foi possível estimar a latência e vazão de diferentes tamanhos de pacotes na interface Serial, conforme ilustrado na Tabela 5. Da mesma forma, com os dados de Taxa Real, *Overhead* total do pacote e Tamanho máximo para o pacote da aplicação do protocolo IEEE 802.15.4, conforme ilustrado na Tabela 4, foi possível estimar a latência e vazão de diferentes tamanhos de pacotes na interface Wireless, conforme ilustrado na Tabela 5. Com ambas as informações, foram estimados para cada tamanho de pacote de resposta a Latência e a Vazão para cada um dos 5 possíveis níveis de profundidade para o nodo na rede. Nessa representação de profundidade, cada salto sem fio representa um nível, em que o nível 0 representa o Coordenador

da rede, visto que ele se comunica diretamente com o *mestre* através da interface serial. Além disso, cada equipamento *folha* não *gateway* possui em seu nível de profundidade um grau inferior ao número de saltos sem fio até ele, visto que seu *pai* responde por ele, e, portanto, do ponto de vista do *mestre* da rede, há um salto sem fio a menos na comunicação.

**Tabela 5: Estimativas comportamentais da rede seguindo a especificação dos protocolos Modbus RTU e IEEE 802.15.4.**

Profundidade:	Informações do pacote (Tamanho)	Serial	Wireless	Relação do Tamanho do Pacote com Profundidade				
				0	1	2	3	4
Latência (s):	Tamanho Req (Bytes): 8	0,00253	0,00672	0	0,00672	0,01344	0,02016	0,02688
Vazão (B/s):	Tamanho Resp (Bytes): 1	3555,5	1339,28	3555,55	972,84	563,51	396,62	306,00
Latência (s):	Tamanho Req (Bytes): 8	0,00331	0,00700	0	0,00700	0,01401	0,021024	0,02803
Vazão (B/s):	Tamanho Resp (Bytes): 10	5433,96	2568,49	5433,96	1744,10	1038,75	739,62	574,26
Latência (s):	Tamanho Req (Bytes): 8	0,00678	0,00828	0	0,00828	0,01657	0,024864	0,03315
Vazão (B/s):	Tamanho Resp (Bytes): 50	8548,61	6998,06	8548,61	3848,01	2482,79	1832,61	1452,29
Latência (s):	Tamanho Req (Bytes): 8	0,01017	0,00953	0	0,00953	0,01907	0,028608	0,03814
Vazão (B/s):	Tamanho Resp (Bytes): 89	9537,72	10171,97	9537,72	4922,32	3317,13	2501,40	2007,69
Latência (s):	Tamanho Req (Bytes): 8	0,01398	0,01094	0	0,01094	0,02188	0,032832	0,04377
Vazão (B/s):	Tamanho Resp (Bytes): 133	10078,92	12883,77	10078,92	5655,02	3930,03	3011,43	2440,9
Latência (s):	Tamanho Req (Bytes): 8	0,02457	0,01484	0	0,01484	0,02969	0,044544	0,05939
Vazão (B/s):	Tamanho Resp (Bytes): 255	10699,81	17712,82	10699,81	6670,41	4845,61	3804,76	3132,00

A partir das informações apresentadas na Tabela 5, foram gerados os gráficos ilustrados pelas Figura 28 e Figura 29. Ambos os gráficos representam a relação entre profundidade do nodo na rede e tempo de resposta do nodo conforme o tamanho do pacote, de acordo como é calculado pelas métricas de latência e vazão disponibilizadas pela camada de aplicação. Esses dados são de suma importância para avaliação da rede e serão utilizados depois para a análise dos resultados de simulação com uma rede real. Conforme discutido em trabalhos anteriores [16][17][18][19], não há uma relação direta entre taxa de erros e LQI, portanto, tal análise não será discutida nesta dissertação.



**Figura 28: Relação entre Profundidade na Rede e Latência para diferentes tamanhos de pacote.**

Conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 28, a relação entre profundidade na rede e latência é diretamente proporcional, visto que quanto maior o número de saltos sem fio necessários para alcançar o *escravo*, maior será o tempo para o pacote de resposta retornar ao *mestre*. Além disso, é possível observar que um pacote maior leva mais tempo que um pacote menor para trafegar pela rede, o que aumenta a sua latência. Entretanto, conforme ilustrado no gráfico da Figura 29, que possui relação quase que inversamente proporcional ao gráfico de latência, quanto maior o pacote trafegado, maior será sua vazão. Isso se dá pelo fato de um pacote maior compensar o *overhead* do cabeçalho do pacote que é fixo tanto para pacotes grandes quanto para pacotes pequenos. Além disso, o cálculo de vazão, conforme explicado na Seção 4.3, diferentemente do cálculo de latência, leva em consideração não só o tempo em que o pacote trafega na rede, mas também o seu tamanho, o que explica a forma do gráfico não ser exatamente inversamente proporcional ao gráfico da latência.

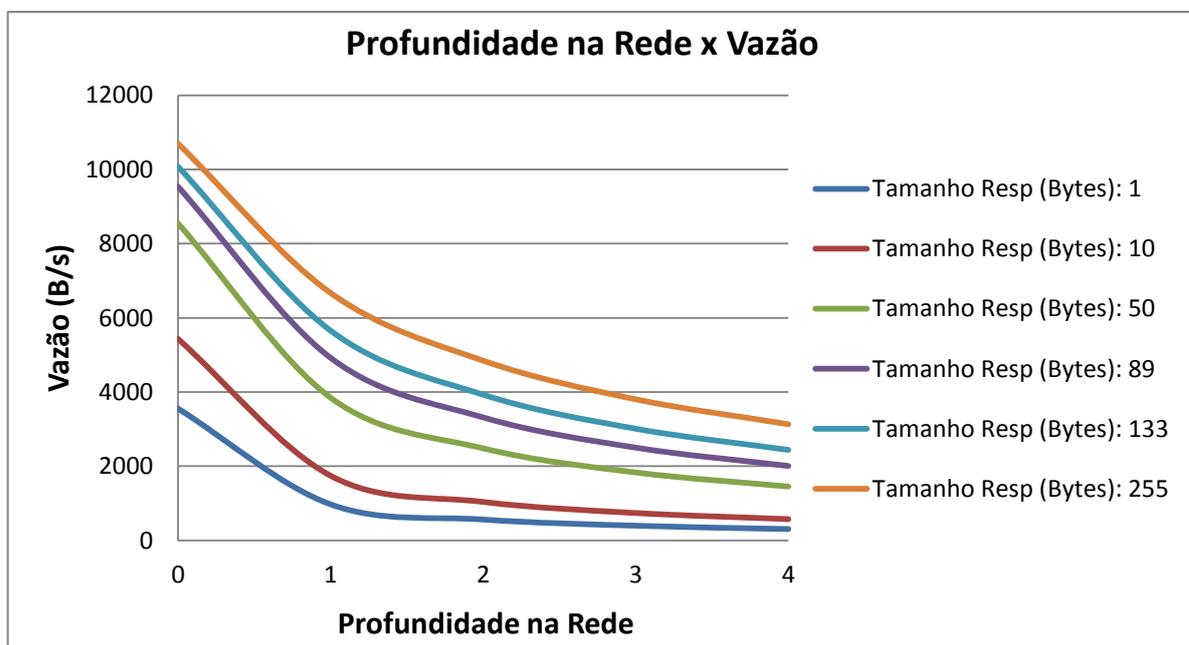


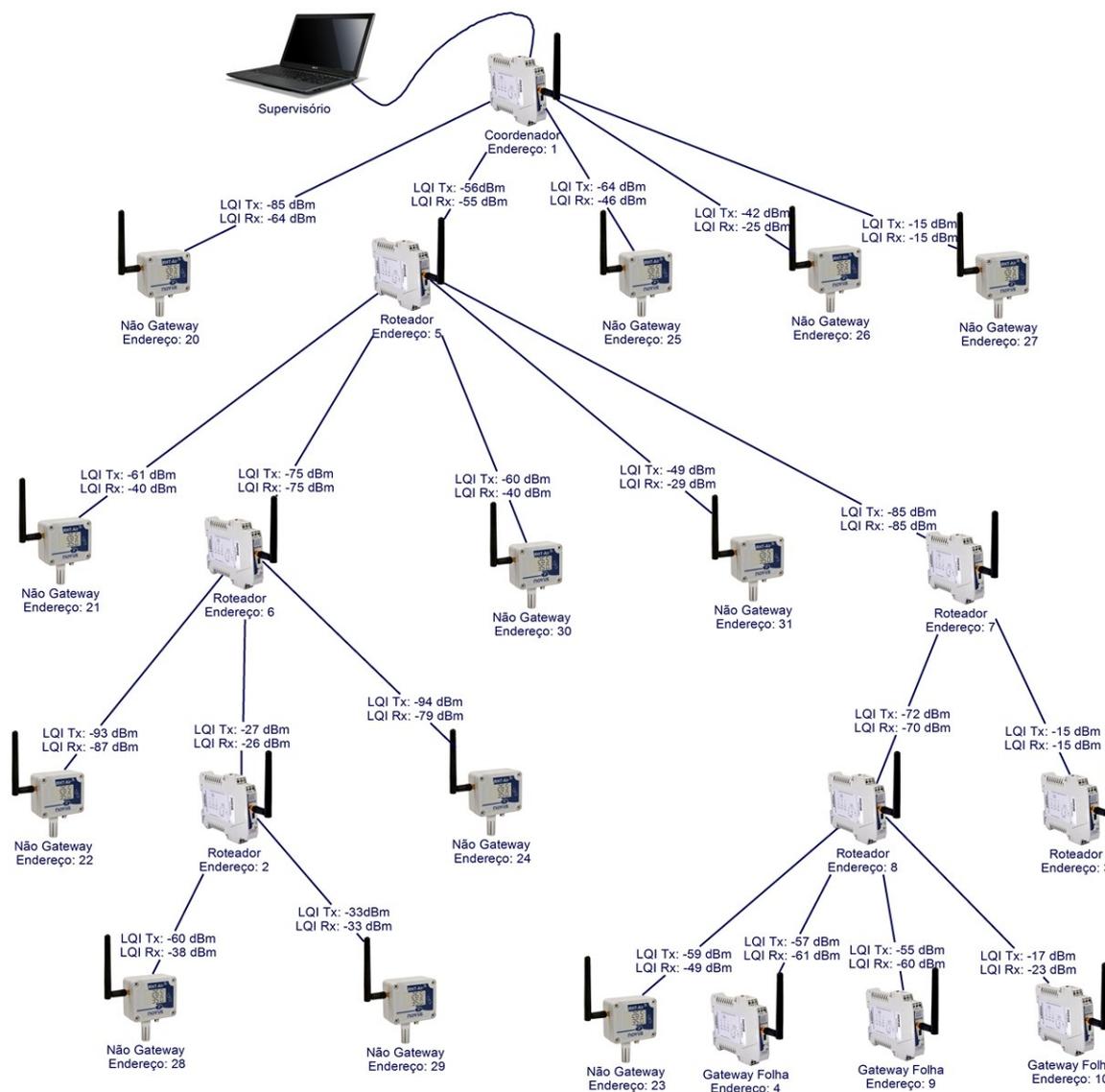
Figura 29: Relação entre Profundidade na Rede e Vazão para diferentes tamanhos de pacote.

Após o levantamento das estimativas de comportamento da rede, foi posto em prática um teste que engloba 10 nodos *Gateways* e 12 nodos *Folhas* não *Gateways*. Nesse teste, foi configurado um nodo *Gateway* como USB-Master, tornando-o Coordenador da rede. Esse nodo foi configurado com endereço 1 e conectado a um computador que simulava um sistema supervisorio requisitando dados de todos os

nodos da rede. Os demais nodos *Gateways* foram configurados como RS485-Slaves e endereçados de 2 a 10. Os nodos *Folhas* não *Gateways* foram configurados com endereços de 20 a 31 com potência inicial de transmissão de 0 dBm e envio de pacotes a cada 60 segundos. Essa configuração estima a duração da bateria, conforme discutido na Tabela 3, de 27 a 29 meses, de acordo com a necessidade de cada nodo aumentar sua potência de transmissão, o que eleva um pouco o consumo do equipamento quando transmitindo pacotes. Já a potência de transmissão dos nodos *Gateways*, essa foi configurada para 20 dBm, pois como são alimentados por fonte de alimentação, pouco impacta no consumo dos equipamentos.

Os nodos foram dispostos em um ambiente de trabalho sem controle do espectro eletromagnético, o que representa um ambiente comum de operação para os nodos. Tal ambiente possuía outros protocolos de comunicação sem fio concorrendo, tais como IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e outras redes IEEE 802.15.4 (mesmo protocolo, mas diferentes PAN IDs). Além disso, o ambiente possuía diversos outros tipos de interferências, tais como ruídos provenientes de equipamentos inversores de frequência, motores e fluxo intenso de pessoas. Portanto, a análise do espectro eletromagnético, bem como do LQI e as escolhas realizadas pelos equipamentos na formação da rede, tornou-se bastante difícil, o que a impossibilitou, visto que as informações seriam imprecisas.

Ademais, conforme ilustrado pela Figura 30, a rede se formou com 5 níveis de profundidade: (i) no nível 0, encontram-se o Coordenador e os seus *filhos* Não Gateway com endereços 20, 25, 26 e 27; (ii) no nível 1, encontra-se um Roteador de endereço 5, *filho* do Coordenador e seus *filhos* Não Gateway com endereços 21, 30 e 31; (iii) no nível 2, encontram-se os *filhos gateways* do Roteador 5, com endereços 6 e 7, onde cada um desses se tornou Roteador e criou novos ramos na árvore. E os *filhos* Não Gateway do Roteador 6, com endereços 22 e 24; (iv) Já no nível 3, dois ramos podem ser discutidos separadamente: (a) o ramo criado pelo Roteador 6, o qual encontram-se no nível 3 o *filho gateway* com endereço 2, o qual se tornou Roteador, com seus *filhos* Não Gateway 28 e 29; (b) o ramo criado pelo Roteador 7, o qual possui dois *filhos gateways* no nível 3, os Roteadores 3 e 8, e o *filho* Não Gateway do Roteador 8, o 23. (v) finalmente no 4º e último nível, encontram-se os *Gateways Folha*, *filhos* do Roteador 8, com endereços 4, 9 e 10.



**Figura 30: Teste realizado com 10 nodos gateways e 12 nodos folhas não gateways.**

Essa rede se formou automaticamente seguindo os critérios de pareamento discutidos na seção 4.2.3.1. Os LQI Tx (Qualidade do Link com que o *pai* recebe o pacote de um *filho*) e LQI Rx (Qualidade do Link com que o *filho* recebe o pacote de um *pai*), ilustrados na Figura 30, foram obtidos por meio da leitura dos registradores disponibilizados pelas métricas da aplicação discutidas na Seção 4.3. Após o processo de pareamento estar concluído para todos os nodos da rede, o sistema supervisorio iniciou a requisição de pacotes, sendo essa realizada a cada segundo para cada um dos nodos da rede. Para os nodos Coordenador, Roteador e *Folha Gateway* foi solicitado a leitura de 64 registradores, totalizando um pacote de requisição de 8 bytes e um pacote de resposta de 133 bytes. Já para os nodos *Folha*

não Gateway, foi solicitado a leitura de 42 registradores, totalizando um pacote de requisição de 8 bytes e um pacote de resposta de 89 bytes.

**Tabela 6: Teste realizado com 10 nodos gateways e 12 nodos folhas não gateways.**

Endereço Modbus (Profundidade)	Endereço ShortMac	Tipo de Dispositivo	Modo de Operação	Nº de Pacotes Transmitidos	Tamanho do Pacote de Recepção	Número de Erros (Taxa de Erros %)	Vazão (B/s)	Latência (s)
1 (0)	0000	Coordenador	USB-Master	79608	133	2 (0,00)	10071	0
2 (3)	0200	Roteador	RS485-Slaves	79608	133	95 (0,12)	1698	0,068
3 (3)	0241	Roteador	RS485-Slaves	79608	133	105 (0,13)	1639	0,071
4 (4)	1201	Folha Gateway	RS485-Slaves	79608	133	129 (0,16)	1101	0,113
5 (1)	0001	Roteador	RS485-Slaves	79608	133	25 (0,03)	3615	0,025
6 (2)	0040	Roteador	RS485-Slaves	79608	133	178 (0,22)	2350	0,046
7 (2)	0041	Roteador	RS485-Slaves	79608	133	192 (0,24)	2169	0,05
8 (3)	0240	Roteador	RS485-Slaves	79608	133	114 (0,14)	1549	0,076
9 (4)	1200	Folha Gateway	RS485-Slaves	79608	133	123 (0,15)	1236	0,099
10 (4)	1202	Folha Gateway	RS485-Slaves	79608	133	782 (0,98)	1270	0,097
20 (0)	000B	Folha não Gateway	-	79608	89	1 (0,00)	9700	0
21 (1)	0048	Folha não Gateway	-	79608	89	8 (0,01)	3592	0,017
22 (2)	0208	Folha não Gateway	-	79608	89	104 (0,13)	2155	0,034
23 (3)	1208	Folha não Gateway	-	79608	89	363 (0,45)	1590	0,05
24 (2)	0209	Folha não Gateway	-	79608	89	86 (0,10)	2108	0,035
25 (0)	000A	Folha não Gateway	-	79608	89	1 (0,00)	9700	0
26 (0)	0009	Folha não Gateway	-	79608	89	0 (0,00)	9700	0
27 (0)	0008	Folha não Gateway	-	79608	89	1 (0,00)	9700	0
28 (3)	1009	Folha não Gateway	-	79608	89	75 (0,09)	1590	0,05
29 (3)	1008	Folha não Gateway	-	79608	89	59 (0,07)	1672	0,047
30 (1)	004A	Folha não Gateway	-	79608	89	13 (0,02)	3233	0,019
31 (1)	0049	Folha não Gateway	-	79608	89	18 (0,02)	3233	0,019
<b>Taxa Média de Erros (%):</b>			<b>Taxa Mínima de Erros (%):</b>			<b>Taxa Máxima de Erros (%):</b>		
0.14			0.00			0.98		

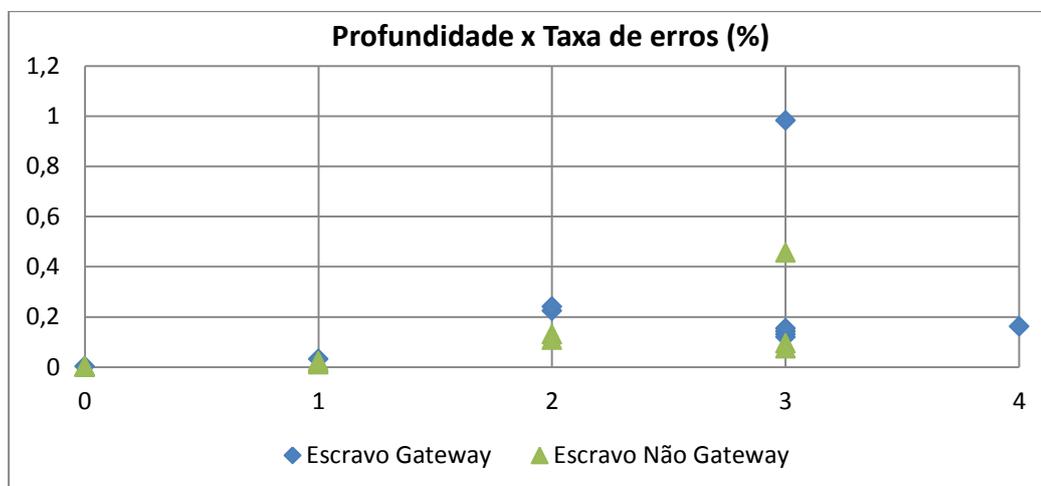
Conforme apresentado na Tabela 6, foram solicitados um total de 79608 pacotes para cada um dos nodos da rede, totalizando 1751376 pacotes em aproximadamente 21 dias de teste.

O Número de Erros apresentado na Tabela 6 foi obtido do sistema supervisorio com relação ao número de pacotes sem resposta. Já o Endereço *Short Mac*, a Vazão e a Latência foram obtidas mediante a leitura dos registradores disponibilizadas pela camada de aplicação de cada nodo.

A análise dos dados apresentados na Tabela 6 permite concluir que a rede operou satisfatoriamente dado o tempo do teste de 21 dias, o número de pacotes trafegados (1751376 pacotes) e a baixa taxa de erros, a qual teve um mínimo de 0% para alguns nodo, 0,14% de média e máxima de 0,98% para um dos nodos da rede.

A Figura 31 nos permite analisar graficamente a relação entre taxa de erros e profundidade na rede. Conforme pode ser observado, a taxa de erros aumenta conforme a profundidade dos nodos na rede. Nodos com profundidade 0 e 1 obtiveram taxas de erro de praticamente 0%, enquanto nodos com profundidade 2 obtiveram taxas de erro entre 0,1% e 0,3%. Dentre os nodos com profundidade 3, um deles chegou a uma taxa de erro de quase 1%, enquanto os demais mantiveram

a taxa de erros entre 0,1% e 0,5%. Entretanto, dentre os nodos com profundidade 4, a taxa de erros não passou de 0,2%, o que poderia invalidar a teoria de que a taxa de erros aumenta conforme a profundidade do nodo na rede. No entanto, o número de nodos na rede é muito pequeno para gerar uma massa estatística de dados que pudesse comprovar uma teoria.

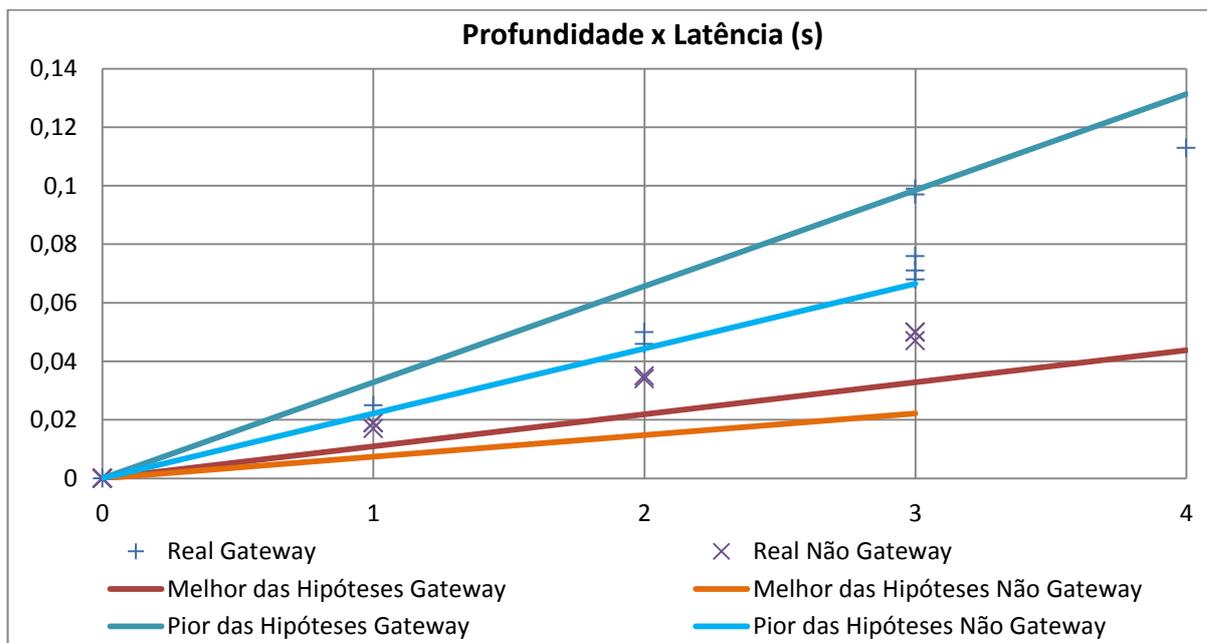


**Figura 31: Análise da profundidade com relação à taxa de erros do teste realizado.**

A fim de analisar os dados de latência e vazão obtidos de cada um dos nodos da rede, foram gerados os gráficos representados pelas Figura 32 e Figura 33, os quais, através dos dados estatísticos apresentados nos gráficos da Figura 28 e da Figura 29, relacionam para os dados de latência e vazão com relação à profundidade na rede os valores de melhor e pior caso, bem como os dados reais para cada nodo da rede.

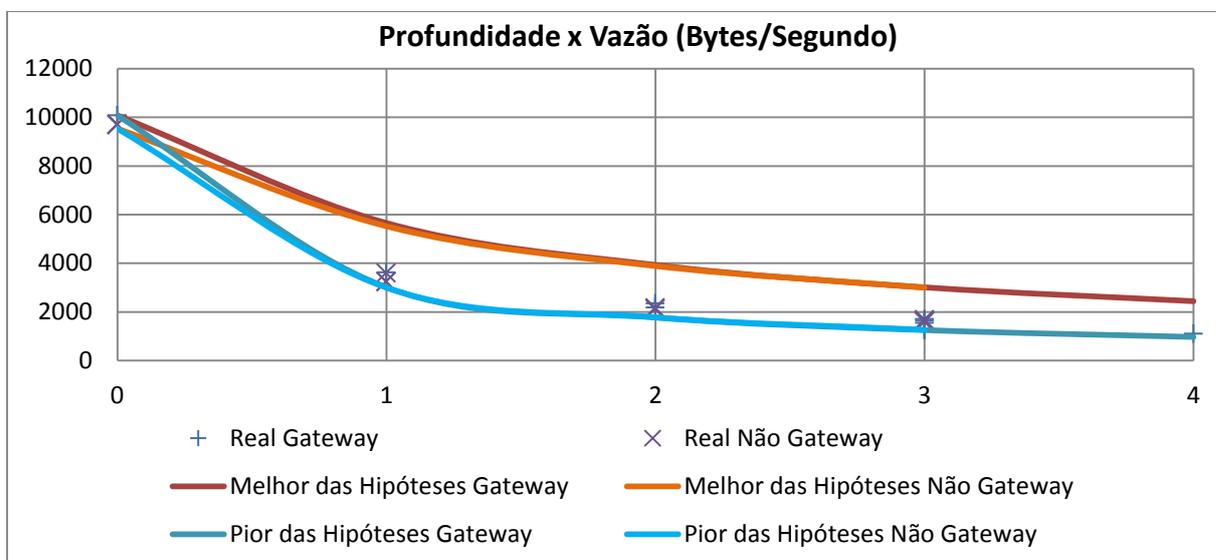
Na Figura 32 são demarcados como limites inferiores os melhores casos de latência para os nodos *Folhas* Não Gateways (linha laranja) e para os nodos Gateways (linha vermelha). Essas informações de melhor das hipóteses foram obtidas através do tamanho dos pacotes (89 bytes para os nodos *Folha* não Gateway e 133 bytes para os demais nodos *gateways*) ilustradas no gráfico da Figura 28. Já as demarcações de limites superiores, os quais representam os piores casos de latência para os nodos *Folhas* Não Gateways (linha azul claro) e para os nodos Gateways (linha azul escuro) foram obtidas com a relação de 3 tentativas de retransmissão para cada insucesso na primeira tentativa. Como pode ser observado no gráfico, todas as situações reais, tanto para os nodos *Gateways* quanto para os nodos Não *Gateways*, ficaram dentro das demarcações de melhor e pior da

hipóteses, o que confirma que a rede se comporta conforme o previsto nas análises estatísticas.



**Figura 32: Análise da profundidade com relação à latência do teste realizado.**

Quanto a relação entre profundidade na rede e vazão, representada graficamente pela Figura 33, a qual segue a mesma lógica de construção da Figura 32, também confirma que a rede se comporta conforme o previsto nas análises estatísticas, visto que todos os nodos da rede tiveram sua vazão real dentro do previsto para seu nível de profundidade.



**Figura 33: Análise da profundidade com relação à vazão do teste realizado.**

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A arquitetura proposta nesta dissertação aumenta o espectro de aplicações que utilizem o consolidado protocolo Modbus. As múltiplas interfaces de comunicação e os diversificados modos de operação permitem ao gateway projetado acoplar várias aplicações, tais como novos projetos de automação industrial, bem como a possibilidade de manutenção das redes existentes. A possibilidade de uma solução de comunicação híbrida torna o protocolo Modbus mais atraente, permitindo que as redes Modbus desfrutem dos benefícios da comunicação sem fio.

O *gateway* Wireless-Modbus proposto é um dispositivo robusto de fácil configuração, incorporando características de multiplexação de até dois mestres Modbus em uma rede. Algumas outras características são marcantes: (i) garante não fragmentação do pacote Modbus em conversões de e para o meio físico sem fio; (ii) implementa roteamento inteligente do tráfego de pacotes; (iii) não volta a transmitir pacotes com erro; (iv) avalia o endereço Modbus de cada pacote, encaminhando-o para o segmento apropriado; (v) apresenta interface USB para fácil conexão à sistemas supervisórios SCADA residente em PC; (vi) apresenta interface RS485 permitindo a conexão a um mestre ou escravo em uma rede Modbus; (vii) permite a integração de uma rede de sensores sem fio IEEE 802.15.4 em diferentes topologias de rede, de forma transparente para os segmentos da rede Modbus; (viii) avalia o espectro eletromagnético dos canais, de forma a permitir que a rede opere em uma frequência com menor interferência; (ix) e possibilita a integração de nodos não gateway operando a bateria sem interferências para a rede Modbus.

O nodo *folha* não *gateway*, sensor de umidade e temperatura, completa a solução desenvolvida, tornando-a mais atrativa. Além de possibilitar que um único equipamento transmita sem fio informações de umidade e temperatura, permite ser operado a bateria sem a necessidade de cabos para a fonte de alimentação. Além disso, a solução desenvolvida permitiu a integração de nodos sensores que dormem de tempo em tempo, para permitir operar a bateria, com o protocolo Modbus RTU que necessita que os nodos respondam assim que solicitado.

Portanto, esta dissertação contribui de muitas maneiras para inovações nas redes de automação industrial, uma vez que várias usinas de controle distribuído (ou

serviços) podem exigir o uso de redes heterogêneas em termos de dispositivos e sistemas de comunicação. O gateway proposto apresentou baixa taxa de erro de comunicação, indicando que a solução desenvolvida pode cumprir as exigências robustas de redes de comunicação do setor. Além disso, o gateway permite alta escalabilidade da topologia de rede por meio de conexões com e sem fio, o que é uma grande vantagem quando aplicada em ambientes industriais de grande escala.

## REFERÊNCIAS

- [1] AKYILDIZ, F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. **A Survey on Sensor Networks**. IEEE Communication Magazine, vol. 40 n. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] CHONG, C.; KUMAR, S. **Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges**. Proceedings of the IEEE. vol. 91, n. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003.
- [3] MOYNE, J.; TILBURY, D. **The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data**. Proceedings of the IEEE, vol. 95, n. 1, pp. 29-47, Jan. 2007.
- [4] WILLIG, A.; MATHEUS, K.; WOLISZ, A. **Wireless Technology in Industrial Networks**. Proceedings of the IEEE, vol. 93, n. 6, pp. 1130-1151, Jun. 2005.
- [5] GUNGOR, V.; HANCKE, G. **Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, n. 10, pp. 4258-4265, Oct. 2009.
- [6] FLAMMINI, A.; FERRARI, P.; MARIOLI, D.; SISINNI, E.; TARONI A. **Wired and wireless sensor networks for industrial applications**. Microelectronics Journal, vol. 40, n. 9, pp. 1322–1336, Sep. 2009.
- [7] YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. **Wireless sensor network survey**. Computer Networks, vol. 52, n. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008.
- [8] HART COMMUNICATION FOUNDATION. **WirelessHART Overview**. Disponível em: <[hartcomm.org/protocol/wihart/wireless\\_overview.html](http://hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_overview.html)>. Acesso em 17 dez. 2013.
- [9] INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ISA-100.11a-2009 Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications**. Disponível em: <[infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1372695](http://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1372695)>. Acesso em 17 dez. 2013.
- [10] BORMANN, C.; SHELBY, Z. **6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet**. Torquay, Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, 2009.
- [11] FARAHANI, S. **ZigBee Wireless Networks and Transceivers**. Elsevier (online: [www.sciencedirect.com/science/book/9780750683937](http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750683937)), 2008, 339 p.
- [12] MODBUS-IDA. **Modbus Application Protocol Specification V1.1b3**. Edição de 2012. Disponível em <[www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)>. Acesso em 17 dez. 2013.
- [13] MODBUS-IDA. **Modbus over Serial Line Specification and Implementation Guide v1.02**. Edição de 2006. Disponível em <[modbus.org/docs/Modbus\\_over\\_serial\\_line\\_V1\\_02.pdf](http://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf)>. Acesso em 21 dez. 2013.

- [14] MODBUS-IDA. **Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b**. Edição de 2006. Disponível em <[modbus.org/docs/Modbus\\_Messaging\\_Implementation\\_Guide\\_V1\\_0b.pdf](http://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf)>. Acesso em 21 dez. 2013.
- [15] IEEE STANDARD. **Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**. Edição de 2003. Disponível em <[standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf](http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf)>. Acesso em 17 dez. 2013.
- [16] GUARESE, G. **Arquitetura Híbrida de Comunicação para Ambientes de Automação Industrial: Protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485**. Monografia de Trabalho de Conclusão, Revista da Graduação da PUCRS, vol. 5, n. 2, 2012. 61 p.
- [17] DILLENBURG, M.; GUARESE, G.; SIEBEN, F. **Soluções Inovadoras para Implementação Wireless Modbus**. Disponível em <[isadistrito4.org/artigos.php](http://isadistrito4.org/artigos.php)>. Acesso em 17 dez. 2013.
- [18] DILLENBURG, M.; GUARESE, G.; SIEBEN, F. **Wireless Site Survey IEEE 802.15.4**. Disponível em <[isadistrito4.org/artigos.php](http://isadistrito4.org/artigos.php)>. Acesso em 17 dez. 2013.
- [19] GUARESE, G.; SIEBEN, F.; WEBBER, T.; DILLENBURG, M.; MARCON, C. **Exploiting Modbus Protocol in Wired and Wireless Multilevel Communication Architecture**. Brazilian Symposium on Computing System Engineering (SBESC), pp. 13-18, 2012.
- [20] LEYVA, F. et al. **Wireless System for Electrical Networks Testing Based on MODBUS Protocol**. International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), pp. 58-62, 2004.
- [21] CARLSEN, S. et al. **Using Wireless Sensor Networks to Enable Increased Oil Recovery**. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1039-1048, 2008.
- [22] ZHENG, Y. **MZ: An Ubiquitous Communication Protocol in Industrial Environment**. International Conference on E-Business and Information System Security (EBISS), pp. 1-4, 2009.
- [23] YANFEI, L. et al. **Research on ZigBee Wireless Sensors Network Based on ModBus Protocol**. International Forum on Information Technology and Applications (IFITA), pp. 487-490, 2009.
- [24] YU, Z et al. **Remote Monitoring Application based on Modbus and China Unicorn 3G**. IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS), pp. 445-448, 2010.
- [25] HAIKUAN, W. et al. **Polling-based protocol converter for the integration of hybrid wired/wireless industrial control networks**. Chinese Control Conference (CCC), pp. 5772-5777, 2010.

- [26] KOLLAM, M.; SHREE S. **Zigbee Wireless Sensor Network for Better Interactive Industrial Automation**. International Conference on Advanced Computing (ICoAC), pp. 304-308, 2011.
- [27] DE OLIVEIRA, F. et al. **Development and Implementation of WSN Embedded Systems Units to be applied on Plunger Lift Oil Elevation Method**. Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 2118-2123, 2011.
- [28] HUI, L.; HAO, Z.; DAOGANG, P. **Design and Application of Communication Gateway of EPA and MODBUS on Electric Power System**. Energy Procedia, vol. 17, n. A, pp. 286-292, 2012.
- [29] GUAN, K.; ZHONG, Z.; AI, B.; BRISO-RODRÍGUEZ, C. **Research of Propagation Characteristics of Break Point; Near Zone and Far Zone under Operational Subway Condition**. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp. 114-118, 2010.
- [30] ZENNARO, M.; BAGULA, A.; DAVID, A. **Long Distance Wireless Sensor Networks: simulation vs reality**. ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions (NSDR), Art. n. 12, 2010.