

# *Revista da Graduação*

---

**Vol. 5**

**No. 2**

**2012**

**7**

---

**Seção:** Faculdade de Engenharia

**Título:** ARQUITETURA HÍBRIDA DE COMUNICAÇÃO  
PARA AMBIENTES DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL:  
protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485

Autor: Giuliano Bruno Martins Guarese



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADES DE ENGENHARIA E INFORMÁTICA  
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

GIULIANO BRUNO MARTINS GUARESE

**ARQUITETURA HÍBRIDA DE COMUNICAÇÃO PARA AMBIENTES DE  
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL:  
Protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485**

Porto Alegre

2011

GIULIANO BRUNO MARTINS GUARESE

**ARQUITETURA HÍBRIDA DE COMUNICAÇÃO PARA AMBIENTES DE  
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL: PROTOCOLOS IEEE 802.15.4 E MODBUS RTU  
SOBRE RS485**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado nas Faculdades de Engenharia e de Informática da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Computação.

**Orientador: César Augusto Missio Marcon**

Porto Alegre

2011

## RESUMO

Esta monografia descreve uma solução híbrida de comunicação para redes de automação industrial. Esta solução utiliza os protocolos com fio Modbus RTU sobre RS485 e sem fio IEEE 802.15.4. O protocolo Modbus RTU é amplamente utilizado em sistemas de automação industrial para integração de equipamentos. É um protocolo simples e robusto, o qual possibilita através de uma arquitetura mestre-escravo, a integração de 1 mestre a até 247 escravos. O protocolo IEEE 802.15.4 surgiu recentemente como solução sem fio para ambientes industriais. Estes ambientes têm muitos tipos de interferências eletromagnéticas necessitando de protocolos robustos e imunes a ruídos de diversos equipamentos, como motores e geradores. O IEEE 802.15.4 atende a estes requisitos, pois permite a avaliação do espectro eletromagnético e escolha entre 16 canais de operação, evitando comunicação em frequências com ruído e diminuindo a taxa de erros entre pacotes.

A solução descrita neste trabalho é híbrida, pois permite a inserção de segmentos sem fio em redes operando sobre o meio físico RS485 com protocolo Modbus RTU. Sistemas supervisórios residentes em computadores são também integrados através da interface USB. O meio físico sem fio opera em uma topologia de rede do tipo estrela. A solução híbrida aqui adotada permite uma topologia de rede do tipo árvore. Recursos inovadores para o protocolo Modbus, como a multiplexação de mestres, são também abordados.

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

## **ABSTRACT**

This monograph describes a hybrid communication solution to industrial automation networks. This solution employs the wired Modbus RTU and the wireless IEEE 802.15.4 protocols. The Modbus RTU protocol is used in industrial automation systems for equipment integration. It is a simple and robust protocol with master-slave architecture, it accept the integration between 1 master and up to 247 slaves. The IEEE 802.15.4 protocol emerged recently as a wireless solution to industrial environments. These environments have many types of electromagnetic interferences, which need robust protocols with noise immunity to many types of equipment, like motors and generators. The IEEE 802.15.4 protocol meets these necessities, because it allows the evaluation of the electromagnetic spectrum and the choice between 16 operation channels, thus avoiding communications in noise frequencies and decreasing the error rate between packets.

The solution described in this work is hybrid because it allows the wireless segmentation on wired RS485 networks with the Modbus RTU protocol. Supervisory systems resident on computers are also integrated through the USB interface. The wireless environment operates on a star network topology. The hybrid solution here adopted allows a tree network topology. Innovative resources to the Modbus protocol such as master multiplexing are also addressed.

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

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Topologias de rede suportadas pelo protocolo IEEE 802.15.4 [5].	18
Figura 2: Transmissão de pacote em modo direto [5].	20
Figura 3: Transmissão de pacote em modo indireto [5].	20
Figura 4: Composição do MPDU <i>data frame</i> .	21
Figura 5: Composição do MPDU <i>acknowledgement frame</i> .	21
Figura 6: Composição do MPDU <i>command frame</i> .	22
Figura 7: Canais de operação do protocolo IEEE 802.15.4 [5].	23
Figura 8: Composição do PPDU.	23
Figura 9: Estrutura de camadas do protocolo Modbus [15].	25
Figura 10: Composição do pacote de dados Modbus [15].	26
Figura 11: Fluxo de mensagens em uma rede Modbus [1].	28
Figura 12: <i>Inter-frame delay</i> [1].	28
Figura 13: <i>Inter-character timeout</i> [1].	29
Figura 14: Ligação elétrica de uma rede RS485 [1].	29
Figura 15: AirGate-Modbus [9].	31
Figura 16: Layout do Hardware.	32
Figura 17: Estrutura de camadas do AirGate-Modbus.	35
Figura 18: Estrutura de camadas do mestre e escravos.	36
Figura 19: Modo de operação <i>RS485-Slaves</i> .	38
Figura 20: Modo de operação <i>RS485-Master</i> .	38
Figura 21: Modo de operação <i>USB-Master</i> .	39
Figura 22: Modo de operação <i>Multi-Master</i> .	39
Figura 23: Rede Modbus com <i>gateway</i> conectado ao mestre (PC) de forma indireta através da interface RS485 [9].	41
Figura 24: Rede Modbus, com <i>gateway</i> conectado diretamente ao mestre através da interface USB [9].	42
Figura 25: Rede Modbus, com dois mestres conectados diretamente ao <i>gateway</i> através das interfaces USB e RS485 [9].	43
Figura 26: Rede Modbus com a exemplificação de uma aplicação, onde <i>gateways</i> permitem a realização de uma topologia de rede do tipo árvore [9].	44
Figura 27: Topologia de rede e equipamentos utilizados no primeiro teste.	46
Figura 28: Topologia de rede e equipamentos utilizados no segundo teste.	48

Figura 29: Topologia de rede e equipamentos utilizados no terceiro teste. ....	49
Figura 30: Tela do mestre Modbus Poll, utilizado para avaliar no terceiro teste a taxa de erros de comunicação na rede Modbus. Cada janela interna contém os dados lidos de cada escravo da rede. ....	50
Figura 31: Topologia de rede e equipamentos utilizados no quarto teste. ....	52
Figura 32: Tela do mestre Modbus Poll, utilizado para avaliar no quarto teste a taxa de erros de comunicação na rede Modbus. ....	53
Figura 33: Topologia de rede e equipamentos utilizados no quinto teste.....	55
Figura 34: Telas dos mestres Modbus Poll, utilizados para avaliar no quinto teste a taxa de erros de comunicação na rede Modbus.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre os trabalhos relacionados. ....	16
Tabela 2: Resultado do terceiro teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre. ....	51
Tabela 3: Resultado do quarto teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre. ....	53
Tabela 4: Resultado do quinto teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre conectado a interface USB do AirGate-Modbus. ....	57
Tabela 5: Resultado do quinto teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre conectado a interface RS485 do AirGate-Modbus. ....	57

## LISTA DE SIGLAS

ADU – Application Data Unit  
CCA – Clear Channel Assessment  
CRC – Cyclic Redundancy Check  
CSMA-CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance  
CSMA-CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection  
ED – Energy Detection  
FCS – Frame Check Sequence  
FFD – Full-Function Device  
HAL – Hardware Abstraction Layer  
HMI – Human Machine Interface  
I/O – Input/Output  
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IP – Internet Protocol  
LQI – Link Quality Indication  
LR-WPAN – Low Rate Wireless Personal Area Network  
MAC – Medium Access Control  
MPDU – MAC Protocol Data Unit  
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 .....	11
1.1.	Histórico de Pesquisa e Desenvolvimento.....	12
1.1.1.	Projeto PUCRS-Novus .....	12
1.1.2.	Projeto AirGate-Modbus .....	12
1.2.	Motivação .....	13
1.3.	Objetivo .....	14
1.4.	Divisão do Trabalho.....	14
2.	Trabalhos Relacionados.....	15
3.	Referencial Teórico .....	17
3.1.	Protocolo IEEE 802.15.4 .....	17
3.1.1.	Camada de Controle de Acesso ao Meio .....	18
3.1.2.	Camada Física .....	22
3.2.	Protocolo Modbus.....	23
3.2.1.	Camada de Aplicação .....	25
3.2.2.	Camada de Enlace de Dados.....	26
3.2.3.	Camada Física .....	29
4.	Gateway desenvolvido: AirGate-Modbus .....	31
4.1.	Plataforma de Hardware.....	32
4.1.1.	Módulo Central .....	33
4.1.2.	Módulo USB .....	34
4.1.3.	Módulo RS485.....	35
4.2.	Estrutura de Camadas do Sistema .....	35
4.2.1.	PHY e Camada MAC IEEE 802.15.4.....	36
4.2.2.	Camada Modbus RTU.....	37
4.2.3.	Camada de Aplicação .....	37
4.2.3.1.	Modo de Operação <i>RS485-Slaves</i> .....	37
4.2.3.2.	Modo de Operação <i>RS485-Master</i> .....	38
4.2.3.3.	Modo de Operação <i>USB-Master</i> .....	39
4.2.3.4.	Modo de Operação <i>Multi-Master</i> .....	39
4.3.	Topologias de Rede e Aplicações .....	40
4.3.1.	<i>Gateway</i> Ligado Indiretamente ao Mestre Modbus .....	40
4.3.2.	<i>Gateway</i> Ligado Diretamente ao Mestre Modbus.....	41

4.3.3.	Topologia de Rede que Opera com Dois Mestres Modbus Multiplexados	42
4.3.4.	Aplicação em Topologia de Rede do Tipo Árvore .....	43
5.	Testes e Validação do Sistema .....	45
5.1.	Primeiro Teste: Avaliação da Potência de Recepção e Taxa de Erros a uma Distância de 30 Centímetros .....	45
5.2.	Segundo Teste: Avaliação da Potência de Recepção e Taxa de Erros a uma Distância de 1200 Metros .....	47
5.3.	Terceiro Teste: Avaliação da Comunicação em Topologia de Rede 1 .....	48
5.4.	Quarto Teste: Avaliação da Comunicação em Topologia de Rede 2 .....	51
5.5.	Quinto Teste: Avaliação da Comunicação em Topologia de Rede 3.....	54
6.	Conclusões .....	58
6.1.	Trabalhos Futuros.....	58
6.2.	Artigo Publicado.....	58
	Referências .....	59

## 1. INTRODUÇÃO

Em automação industrial, especialmente na área de manufatura, o protocolo de comunicação de dados Modbus RTU [1] tem grande base instalada e é adotado em novos projetos por sua simplicidade, especificação aberta e grande oferta de produtos por múltiplos fabricantes. A atual tendência de adoção de soluções para comunicação sem fio está originando uma nova corrida para a definição de padrões para comunicação, cabendo destacar: WirelessHART [2], ISA 100.11a [3], ZigBee [4], entre tantos outros. Independente dos padrões que venham a predominar, um denominador comum já se destaca: IEEE 802.15.4 [5], um protocolo robusto que define as camadas física e de enlace e é adotado como base pelos protocolos citados e por muitos outros.

Modbus RTU é um protocolo de comunicação de dados criado para utilização em ambientes industriais. É um protocolo bastante simples, porém robusto, sendo utilizado desde 1970, quando foi criado, até hoje. Esse protocolo se baseia em uma arquitetura mestre e escravo e possibilita que um mestre controle até 247 escravos em uma rede.

Protocolos baseados em IEEE 802.15.4 possibilitam inúmeras formas de comunicação em redes sem fio. A frequência padrão de operação mundial é de 2,4 GHz, subdividida em 16 canais de comunicação. O protocolo prevê a avaliação do espectro eletromagnético dos canais, assim, no momento de escolha do canal a ser utilizado, será selecionado o com menor interferência. Visando reduzir o consumo, existe a possibilidade de diminuição do tráfego da rede, ao ponto de alguns dispositivos dormirem quando não estiverem comunicando. Isto permite a implementação em dispositivos alimentados por bateria. Levando em consideração que o meio sem fio tem restrições com relação à segurança, o padrão prevê um sistema de criptografia para a comunicação entre nodos da rede. O protocolo disponibiliza duas topologias básicas de rede: ponto-a-ponto e estrela.

## 1.1. HISTÓRICO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

### 1.1.1. Projeto PUCRS-Novus

Durante o ano de 2009 realizou-se um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em parceria da empresa Novus Produtos Eletrônicos [6] com a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) [7]. A missão desse projeto foi o desenvolvimento de um protocolo de comunicação sem fio robusto para ser utilizado na indústria e futuramente em produtos da empresa. Liderados pelo diretor de tecnologia da Novus, Marcos Dillenburger, pelo professor da PUCRS César Marcon, pelos coordenadores de projeto Edelpet Schneider e Epifânio Diniz, os bolsistas Felipe Lammel, Felipe Sieben, Giuliano Guarese, Tiago Cunha e Vinicius Bohrer pesquisaram diversos protocolos sem fio, contribuindo para o desenvolvimento do conhecimento adquirido para o trabalho aqui desenvolvido.

Nos primeiros seis meses de projeto trabalhou-se no desenvolvimento do protocolo WirelessHART [8]. Este é um protocolo novo, que oferece uma rede de comunicação sem fio completa, com arquitetura malha, baixo consumo de energia e que melhor atende às necessidades de comunicação sem fio da indústria. Entretanto, por se tratar de um protocolo novo, e ter ainda muitas falhas na especificação, seu desenvolvimento se tornou bastante complexo. Por esses motivos seu desenvolvimento foi abandonado, contudo esta pesquisa inicial serviu como base para o desenvolvimento de um protocolo proprietário sobre o mesmo protocolo base do WirelessHART, o protocolo IEEE 802.15.4 [5].

### 1.1.2. Projeto AirGate-Modbus

Em 2010, a equipe Giuliano Guarese e Felipe Sieben, agora trabalhando na Novus e orientados por Marcos Dillenburger, aceitou o desafio de tornar toda a pesquisa desenvolvida durante o ano de 2009 na PUCRS em um novo produto para a empresa. O objetivo inicial proposto foi o desenvolvimento de um produto com funcionalidade de *gateway* entre uma rede com protocolo Modbus RTU sobre RS485 e uma rede sem fio com protocolo proprietário sobre IEEE 802.15.4, nomeado *Wireless Modbus Network Peer-to-Peer* (WMN-PP). Esse trata-se de um protocolo

ponto-a-ponto que objetiva a substituição de segmentos cabeados de rede RS485 por segmentos sem fio com o uso de dois *gateways*.

Em 2011, após atingir o objetivo inicial proposto, foi especificada uma nova funcionalidade para o *gateway*. Esta funcionalidade implicava que fosse utilizado o protocolo IEEE 802.15.4 com a topologia estrela e uma porta para comunicação RS485 com protocolo Modbus RTU. Estes dois protocolos integrados no *gateway* possibilitaram criar uma arquitetura híbrida que suporta uma topologia de rede em forma de árvore. Este *gateway*, objetivo de estudo nesse trabalho, se tornou o produto AirGate-Modbus [9], lançado no mercado em setembro de 2011 pela empresa Novus.

## 1.2. MOTIVAÇÃO

Como dito anteriormente, o protocolo Modbus RTU já possui grande base instalada em sistemas de automação industrial. Esses sistemas necessitam de uma solução sem fio para facilitar a instalação de novos equipamentos sem necessidade de modificações na estrutura predial e sem a necessidade de substituição total dos equipamentos já existentes. Existe também a necessidade de melhorias no protocolo Modbus RTU, como a possibilidade de utilização de mais de um mestre na rede.

Já há no mercado equipamentos que permitem a conversão de comunicação com fio para sem fio e vice-versa. Alguns poucos desses se baseiam no padrão IEEE 802.15.4 e tipicamente atuam como conversores genéricos de e para protocolos de comunicação serial, categoria em que Modbus RTU se inclui. A motivação deste trabalho foi a criação de um sistema sem fio específico para redes Modbus RTU. Nesse sistema diversas inovações são propostas, como a multiplexação de mestres Modbus, possibilitando a utilização de mais de um mestre na rede.

O protocolo IEEE 802.15.4 possibilita a utilização em um modelo de rede do tipo estrela ou ponto-a-ponto. Ou seja, o seu protocolo não suporta que haja uma rede com profundidade maior que um. Assim, outra motivação e juntamente outra inovação foi a criação de uma arquitetura híbrida que suporta topologias de rede árvore de profundidade ilimitada.

### 1.3. OBJETIVO

O trabalho aqui descrito consiste na criação de uma arquitetura híbrida utilizando interfaces com fio e sem fio para possibilidade de expansão de utilização do protocolo Modbus RTU. Para concretização dessa arquitetura, foram criadas três interfaces de comunicação: (i) uma RS485, que possibilita a comunicação com sistemas Modbus RTU já instalados; (ii) uma USB para conexão com mestres Modbus residentes em computadores; e, por fim, (iii) uma interface sem fio, baseada no protocolo IEEE 802.15.4, que disponibiliza uma topologia de rede estrela. A interface RS485 é utilizada também para interligação de dispositivos sem fio, objetivando a expansão da rede e obtenção de uma topologia de rede do tipo árvore.

### 1.4. DIVISÃO DO TRABALHO

O trabalho aqui apresentado está dividido em dez capítulos, sendo o primeiro composto por esta introdução. O Capítulo 2 busca justificar o uso dos protocolos escolhidos, bem como a inovação aqui apresentada, relacionando este trabalho com artigos relevantes. O Capítulo 3 aborda o referencial teórico necessário para entendimento da ideia a ser desenvolvida. Neste são abordados os protocolos de comunicação de dados utilizados. O Capítulo 4 apresenta o *gateway* desenvolvido durante este trabalho, mostrando suas interfaces de comunicação e suas principais funcionalidades. O Capítulo 5 mostra a plataforma de *hardware* desenvolvida. O Capítulo 6 aborda a estrutura de camadas do sistema, apresentando a integração entre os protocolos utilizados, bem como a descrição das funcionalidades disponibilizadas pela camada de aplicação. O Capítulo 7 ilustra algumas possíveis topologias de rede e aplicações Modbus possibilitadas pelos modos de operação do *gateway*. O Capítulo 8 busca validar o sistema implementado através da demonstração de testes realizados em variadas topologias de rede. O Capítulo 9 apresenta um artigo que foi publicado no contexto do trabalho aqui apresentado. O Capítulo 10 encerra o trabalho desenvolvido apresentando as conclusões relevantes e descrevendo trabalhos futuros.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

De forma a qualificar e validar a inovação proposta no trabalho aqui desenvolvido, alguns artigos foram estudados. Dentre eles seguem três que possuem maior correlação:

(i) O artigo **Wireless System for Electrical Networks Testing Based on MODBUS Protocol** [10], publicado por F. H. Ramírez Leyva, J. P. Acevedo Cuellar, R. G. Maldonado Basilio e E. Espinosa Justo aborda o desenvolvimento de um sistema sem fio capaz de testar até 4 unidades escravas remotas que utilizam o protocolo Modbus RTU para se comunicar com um mestre através de um rádio modem. Este sistema é composto por uma unidade mestre, a qual roda em um computador em um software gráfico desenvolvido com o *LabVIEW* [11] que solicita informações de unidades escravas remotas. Cada unidade escrava pode estar distante em até 4 km através de um rádio modem, o qual utiliza o meio físico sem fio na faixa de 900 MHz para comunicar. A função de cada unidade escrava é monitorar medições na rede elétrica trifásica e disponibilizá-las para a unidade mestre;

(ii) O artigo **Using Wireless Sensor Networks to Enable Increased Oil Recovery** [12], publicado por Simon Carlsen, Amund Skavhaug, Stig Petersen e Paula Doyle demonstra o desenvolvimento de um sistema que utiliza o protocolo Modbus RTU e um protocolo proprietário baseado em IEEE 802.15.4 (nomeado DUST Wireless) para monitorar dados de temperatura, objetivando a prevenção de vazamentos em poços de gás e petróleo. O sistema consiste no desenvolvimento de um *gateway* que integra uma rede Modbus RTU sobre RS232 ou RS485 a uma rede de sensores sem fio baseada no protocolo DUST Wireless - o qual opera em uma topologia de rede do tipo malha. Também foram desenvolvidos nodos sensores de temperatura que se comunicam com o *gateway* através do protocolo DUST Wireless;

(iii) O artigo **MZ: An Ubiquitous Communication Protocol in Industrial Environment** [13], desenvolvido por Yuhuang Zheng descreve o protocolo de comunicação MZ (Modbus and ZigBee). O MZ foi desenvolvido para solucionar o problema dos diferentes protocolos de comunicação utilizados por Controladores Lógicos Programáveis (PLCs) em ambientes industriais. O sistema consiste no desenvolvimento de um *gateway* que converte os protocolos PPI (utilizado pelo PLC S7-224 da Siemens) e Modbus (utilizado pelo PLC XC3-24RT-E da XINJIE) em um protocolo comum MZ, o qual é baseado em ZigBee. Neste sistema, é feita a

integração entre um sistema supervisório em computador e dois PLCs através de três *gateways* que se comunicam pelo protocolo MZ.

Após o estudo dos artigos relacionados, foi criada a Tabela 1 que traça uma relação entre os sistemas desenvolvidos em cada um dos trabalhos.

**Tabela 1: Comparativo entre os trabalhos relacionados.**

Referência	Protocolos Utilizados	Topologia da rede	Número máximo de mestres	Número máximo de escravos	Alcance sem fio
<b>Presente Trabalho</b>	IEEE 802.15.4 Modbus	Estrela Árvore	2	247	1,2 km
<b>(i)</b>	Modbus Radio Modem 900 MHz	Estrela	1	4	4 km
<b>(ii)</b>	IEEE 802.15.4 Modbus	Malha	Não divulgado	Não divulgado	25 m
<b>(iii)</b>	ZigBee Modbus PPI	Estrela	1	Não divulgado	Não divulgado

Como pode ser observado, foram utilizados vários protocolos de comunicação sem fio. Com exceção do artigo (i), todos os outros baseiam sua comunicação sem fio no protocolo IEEE 802.15.4. Entre os *gateways* desenvolvidos nos trabalhos, apenas o AirGate-Modbus demonstra uma solução híbrida de comunicação entre dois protocolos que permite a segmentação e integração de redes Modbus. Os outros *gateways* implementam soluções específicas, onde apenas um escravo ou nodos sensores puramente sem fio são integrados a rede Modbus. Todos os trabalhos possuem uma relação com o protocolo Modbus, o que indica a forte aceitação deste. Porém, apenas o presente trabalho apresenta uma solução que possibilita a utilização de mais de um mestre na rede Modbus.

Assim, as duas principais contribuições deste trabalho são: (i) a solução híbrida de comunicação disponibilizada pelo *gateway* para integração em redes Modbus novas e já existentes; e (ii) a técnica de multiplexação de mestres Modbus. O uso destas contribuições permite ampliar o espectro de aplicações que o produto pode ter.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. PROTOCOLO IEEE 802.15.4

O protocolo IEEE 802.15.4 [5] 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 é uma definição para redes que requerem a transferência de informações em distâncias relativamente curtas [5]. 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) [14], o padrão IEEE 802.15.4 atua nas camadas física e de enlace, respectivamente, equivalentes às camadas PHY e MAC da norma.

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.

Dependendo dos requisitos da aplicação, duas topologias de rede podem ser implementadas utilizando o padrão definido pelo IEEE 802.15.4: (i) topologia estrela, onde 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*; e (ii) topologia ponto-a-ponto, onde não há um fluxo de comunicação centralizado e todos dispositivos FFDs da rede podem se conversar, como pode ser observado na Figura 1, referenciado por *Peer-to-Peer Topology*. Dispositivos RFDs podem estar presente comunicando apenas com dispositivos FFDs.

Baseado 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.

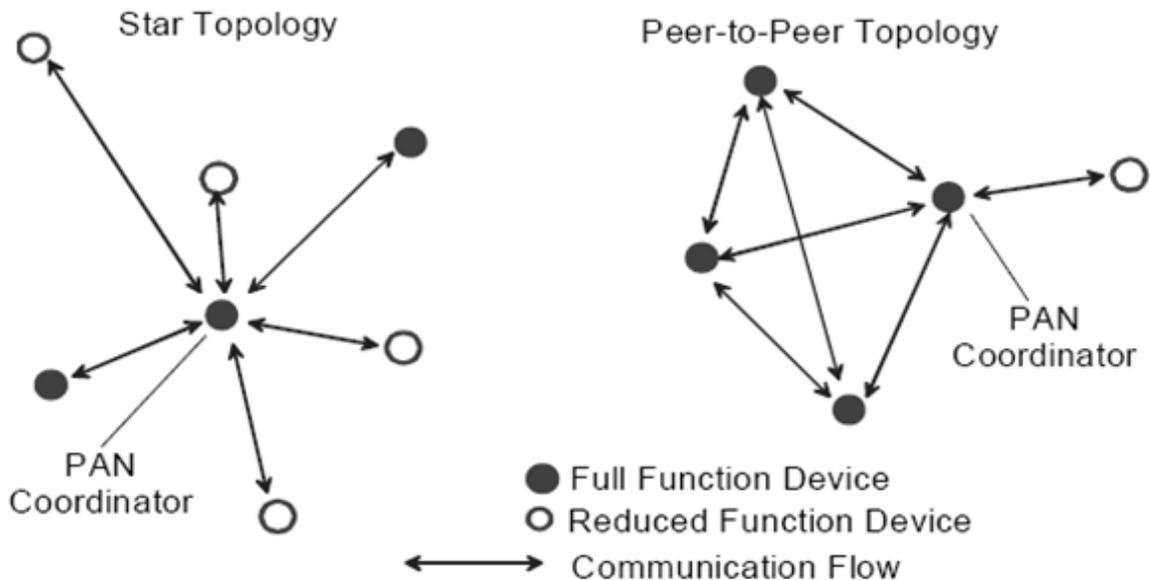


Figura 1: Topologias de rede suportadas pelo protocolo IEEE 802.15.4 [5].

### 3.1.1. Camada de Controle de Acesso ao Meio

A camada de controle de acesso ao meio, em inglês *Medium Access Control* (MAC), consiste em um conjunto de funções que disponibilizam um acesso facilitado à PHY, providenciando serviços de comunicação entre nodos de uma rede sem fio como o controle de associação e desassociação de dispositivos, garantia de tempo de acesso ao meio, controle de validação de *pacotes de dados (frames)* e suporte a criptografia de dados.

Cada dispositivo possui um endereço único universal de 64 bits, entretanto, para comunicação em uma rede, podem ser utilizados dois modos de endereçamento: (i) *short address* – onde cada dispositivo é endereçado por 16 bits e (ii) *extended address* – onde cada dispositivo é endereçado por 64 bits. Para identificação de dispositivos que fazem parte de uma mesma rede, há um endereço de 16 bits. Este se chama PAN Identifier (PAN ID). Este endereço é importante para identificar se dois dispositivos, RFD ou FFD, podem ou não se comunicarem diretamente.

A camada MAC é a responsável pelo suporte às topologias de rede ponto-a-ponto e estrela. Essa última pode ser implementada de duas formas: (i) *beacon-enabled network* – usada para suporte a sincronismo de dispositivos que necessitam consumir pouca energia; (ii) *nonbeacon-enabled network* – quando não é necessário o requisito de sincronismo e baixo consumo de energia. O trabalho aqui proposto utiliza *nonbeacon-enabled network*, portanto apenas esse terá seu funcionamento descrito.

O mecanismo de acesso ao canal de comunicação utilizado por redes *nonbeacon-enabled* é o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) [5]. Esse mecanismo busca evitar que colisões de pacotes transmitidos colidam no meio físico. De forma a aumentar a robustez, pode ser utilizado também o mecanismo de *frame acknowledgment*, o qual consiste na espera de um pacote de confirmação, transmitido pelo receptor, para cada pacote transmitido.

As transferências de dados entre dispositivos da rede se diferem em redes *beacon-enabled* e *nonbeacon-enabled*. Em redes *nonbeacon-enabled*, há dois tipos de transferências de dados: (i) **modo direto** - quando a mensagem parte de um dispositivo de campo (*Network Device*) para um coordenador (*Coordinator*); (ii) **modo indireto** – quando a mensagem parte de um coordenador para um dispositivo de campo. *Network Devices* são quaisquer dispositivos FFD ou RFD que não estejam coordenando uma rede. *Coordinator* é um dispositivo FFD que disponibiliza serviços de sincronização e associação de dispositivos.

Quando um dispositivo de campo (*Network Device*) deseja transmitir um pacote de dados para um coordenador (*Coordinator*) em uma rede *nonbeacon-enabled*, é feita uma transmissão em **modo direto** utilizando o mecanismo CSMA-CA. Se o mecanismo *frame acknowledgment* estiver habilitado, um pacote de confirmação de recepção da mensagem (*acknowledgment*) é transmitido em resposta pelo coordenador. A Figura 2 ilustra a transmissão de um pacote de dados de um *Network Device* para um *Coordinator*.

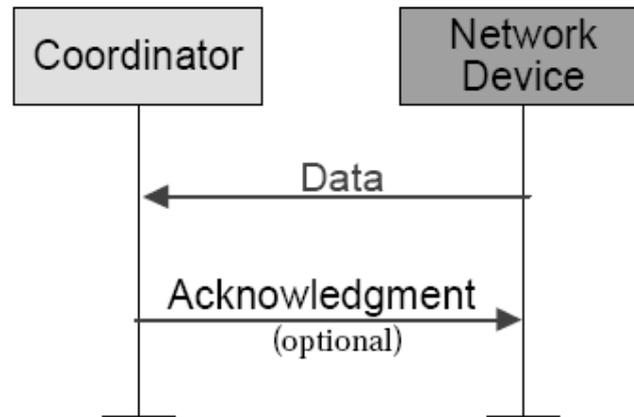


Figura 2: Transmissão de pacote em modo direto [5].

Quando um *Coordinator* deseja transmitir um pacote de dados para um *Network Device* em uma rede *nonbeacon-enabled*, ele coloca o pacote em uma fila de transmissão e aguarda um contato do dispositivo de campo para enviar o pacote. Este modo de envio é chamado de transmissão em **modo indireto**. A transmissão em modo indireto é necessária, pois dispositivos RFDs não mantêm seus módulos de recepção sempre ativos. A transmissão é realizada após o dispositivo de campo perguntar ao coordenador, através de um pacote de *Data Request*, se há dados para ele. Em caso afirmativo, o coordenador sinaliza em um *acknowledgment* que há dados a serem transmitidos. Em caso negativo apenas o *acknowledgment* sem sinalização é transmitido. Assim, quando o dispositivo de campo receber o *acknowledgment* sinalizado, ele mantém o módulo de recepção ativo até receber o pacote. Se o mecanismo *frame acknowledgment* estiver habilitado, um pacote de confirmação de recepção da mensagem (*acknowledgment*) é transmitido em resposta pelo dispositivo de campo após o término do processo de recepção. A Figura 3 ilustra a transmissão de um pacote de dados de um *Coordinator* para um *Network Device*.

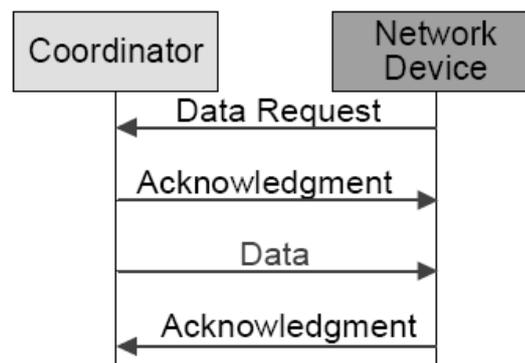


Figura 3: Transmissão de pacote em modo indireto [5].

A norma IEEE 802.15.4 define uma unidade de pacote para o protocolo da camada MAC, chamada unidade de dados do protocolo da MAC, em inglês *MAC Protocol Data Unit* (MPDU). O MPDU possui um tamanho máximo de 121 bytes. Na camada MAC são definidas quatro estruturas para o MPDU: (i) *beacon frame* – utilizado em redes *beacon-enabled*; (ii) *data frame* – utilizado para todas as transferências de dados; (iii) *acknowledgement frame* – utilizado para confirmar a recepção de um pacote com sucesso e (iv) *MAC command frame* – utilizado para transmissão de pacotes de controle da camada MAC.

Como ilustrado na Figura 4, o MPDU *data frame*, utilizado para transmissão de pacote de dados vindos da camada de cima, é composto por cinco campos, onde: (i) *Frame Control* e (ii) *Sequence Number* são utilizados para controle e sequencialização de pacotes; (iii) *Addressing Fields* identifica dispositivos origem e destino do pacote, podendo ter 4 bytes se utilizado modo de endereçamento *short* ou 20 bytes se utilizado modo de endereçamento *extended*; (iv) *Data Payload* – é disponibilizado para preenchimento pela camada de cima, podendo assumir um tamanho máximo de 112 bytes se utilizado modo de endereçamento *short*; (v) e FCS (*Frame Check Sequence*) é responsável pela validação da integridade do pacote.

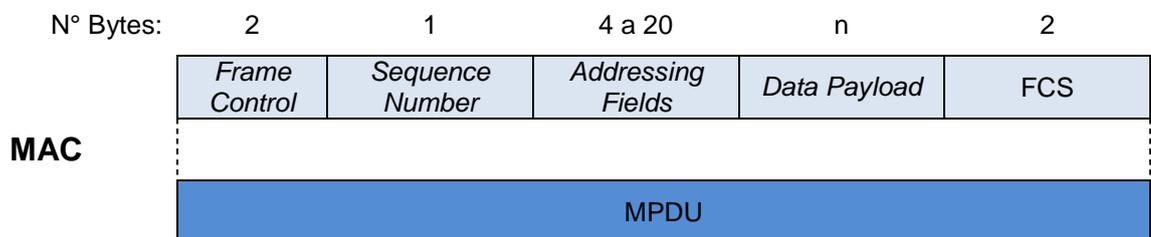


Figura 4: Composição do MPDU *data frame*.

O MPDU *acknowledgement frame*, utilizado pelo mecanismo *frame acknowledgement* para controle de confirmação que o pacote foi transmitido com sucesso, segue ilustrado na Figura 5. Como pode ser observado, esse pacote é composto pelos campos *Frame Control*, *Sequence Number* e FCS.

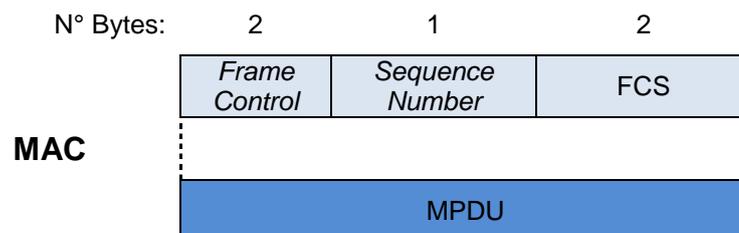


Figura 5: Composição do MPDU *acknowledgement frame*.

Originado pela camada MAC para controle da rede, o MPDU *command frame*, ilustrado na Figura 6, possui os campos: (i) *Frame Control*; (ii) *Sequence Number*;

(iii) *Addressing Fields*; (iv) *Command Type* que identifica o tipo de comando utilizado no pacote; (v) *Command Payload*, o qual varia de acordo com o comando utilizado e (vi) FCS.

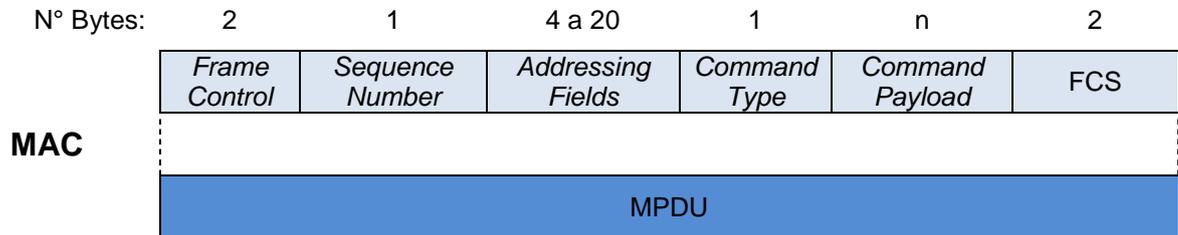


Figura 6: Composição do MPDU *command frame*.

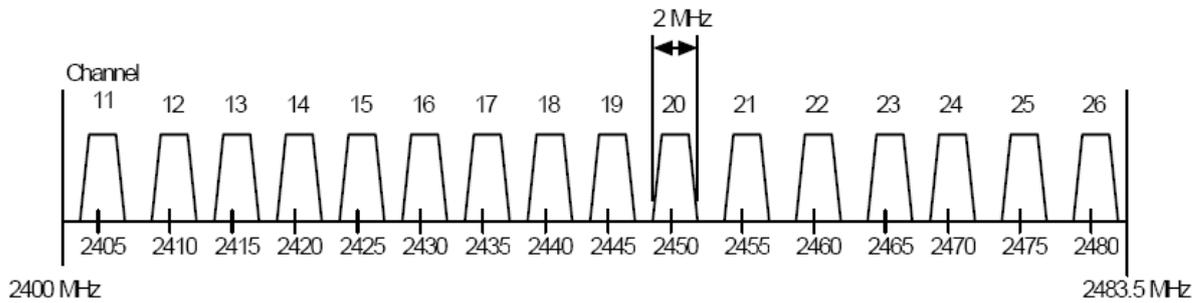
### 3.1.2. Camada Física

A camada física, em inglês *PHYsical layer* (PHY), dá suporte a serviços de transmissão de dados. Ela é responsável por disponibilizar os serviços de: (i) controle de ativação e desativação do radio transmissor; (ii) detecção de energia, em inglês *Energy Detection* (ED), do canal corrente, o qual serve para avaliar o nível de ruído do canal; (iii) indicação da qualidade da conexão, em inglês *Link Quality Indication* (LQI), que disponibiliza a qualidade da conexão do pacote recebido; (iv) verificação de canal livre, ou *Clear Channel Assessment* (CCA), utilizado pelo algoritmo de CSMA-CA para verificar se o canal está livre para transmissão; (v) seleção da frequência de transmissão e recepção; e (vi) controle de transmissão e recepção de dados.

A camada física opera em uma das três faixas de transmissão de dados licenciadas:

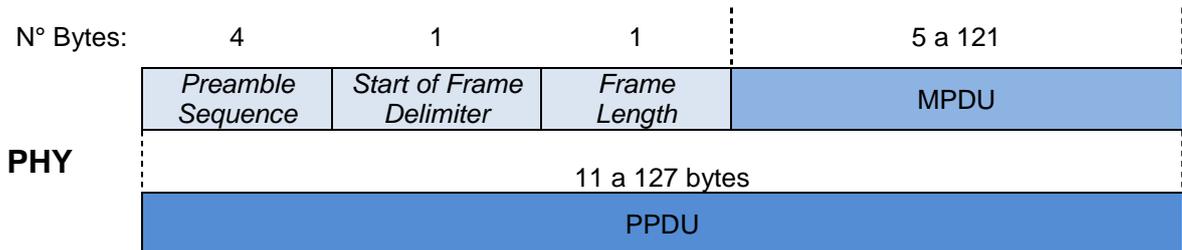
- 868,0-868,6 MHz na Europa, utilizando modulação *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) [5], com taxa de transmissão de dados de 20 Kb/s;
- 902-928 MHz na América do Norte, utilizando modulação BPSK, com taxa de transmissão de dados de 40 Kb/s;
- 2400-2483,5 MHz no resto do mundo, utilizando modulação *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (O-QPSK) [5], com taxa de transmissão de dados de 250 Kb/s;

A faixa de frequência utilizada no Brasil é a de 2400 a 2483,5 MHz. A norma específica para essa faixa 16 canais - normatizados do canal 11 ao canal 26, cada canal ocupando uma banda de 2 MHz, os quais podem ser visualizados na Figura 7.



**Figura 7: Canais de operação do protocolo IEEE 802.15.4 [5].**

A norma IEEE 802.15.4 define uma unidade de pacote para o protocolo da camada física, chamada unidade de dados do protocolo da PHY, em inglês *PHY Protocol Data Unit* (PPDU). O PPDU possui um tamanho máximo de 127 bytes, dos quais 6 são utilizados pela PHY, restando 121 bytes para as camadas MAC e aplicação. Os campos *Preamble Sequence* e *Start of Frame Delimiter* são definidos para controle de recepção e compreensão de início de pacote. O campo *Frame Length* é definido para indicar o tamanho do MPDU. A Figura 8 ilustra a composição do PPDU.



**Figura 8: Composição do PPDU.**

### 3.2. PROTOCOLO MODBUS

O protocolo Modbus [15] 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.

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

Desde 2004 o protocolo Modbus é mantido e controlado por uma comunidade de usuários e fornecedores de equipamentos de automação, conhecida como Modbus-IDA. Essa comunidade busca manter e controlar abertamente a atualização e padronização desse protocolo, de forma que produtos que utilizem esse mantenham compatibilidade independente do fabricante.

O protocolo Modbus atua na camada de aplicação, em inglês *application layer*. Este é baseado em arquitetura cliente/servidor, onde o servidor somente atua a partir de uma requisição do cliente.

Este protocolo disponibiliza uma interface de comunicação entre dispositivos conectados em diferentes tipos de redes. Diferentes interfaces de comunicação podem ser utilizadas. Atualmente o protocolo Modbus está implementado utilizando:

- TCP/IP sobre Ethernet - Nesse modo os dados são encapsulados em formato binário em *frames* TCP (*Transmission Control Protocol*) [16], utilizando o protocolo Ethernet (IEEE 802.3) [17]. O controle de acesso ao meio utilizado nesse modelo é o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (CSMA-CD) [17];
- Transmissão serial - Através de uma variedade de meios físicos, tais como fio, fibra óptica e rádio. Os principais protocolos que operam no meio físico do tipo fio são: EIA/TIA-232-E (conhecido como RS232) [1], EIA-422 (conhecido como RS422) [1], EIA/TIA-485-A (conhecido como RS485) [1]. Quando utilizada a transmissão serial, pode haver duas possíveis variações do protocolo Modbus:
  - Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) - no qual os dados são transmitidos em formato binário de 8 bits, onde números inteiros de -32768 a 32767 podem ser representados por 2 bytes;
  - Modbus ASCII - no qual os dados são transmitidos em formato ASCII de sete bits, o que torna as mensagens legíveis, entretanto muito maiores, causando um tráfego maior na rede.
- Modbus Plus - Uma rede de alta velocidade de passagem de bastão que possui vários recursos adicionais de roteamento, diagnóstico, endereçamento e consistência de dados. Apesar de mais robusto e eficiente, esse modo não é muito difundido por não possuir sua especificação aberta e ser de domínio da Schneider Electric.

A Figura 9 ilustra as camadas do protocolo Modbus explicadas anteriormente:

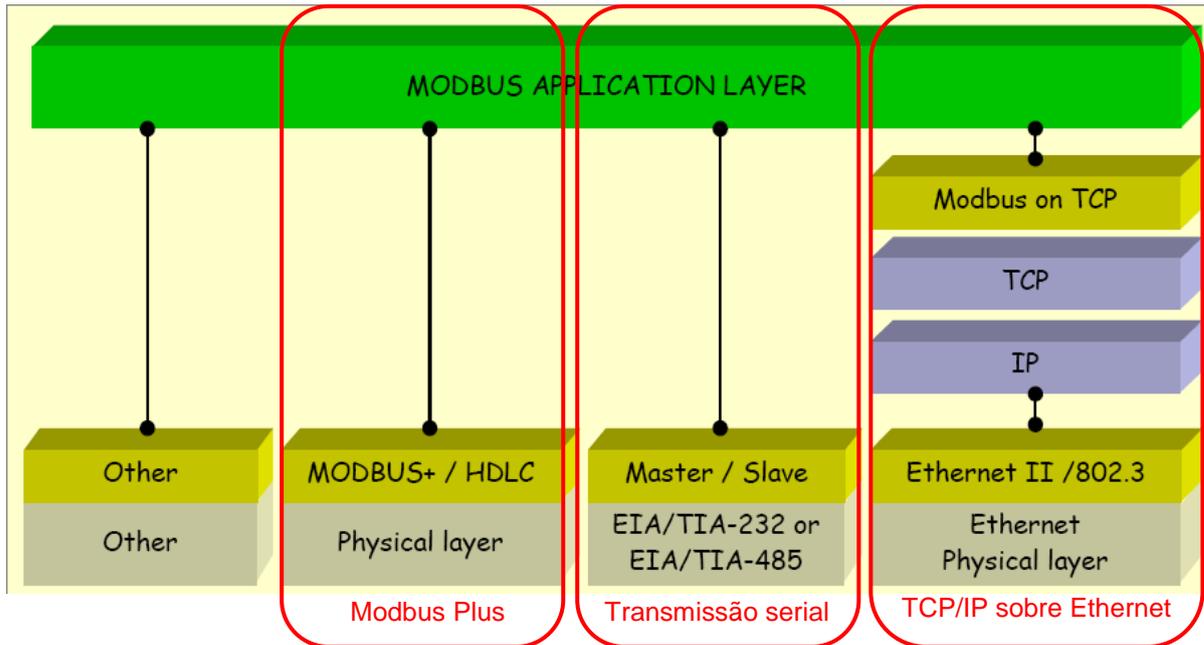


Figura 9: Estrutura de camadas do protocolo Modbus [15].

### 3.2.1. Camada de Aplicação

A norma Modbus [15] define uma camada de aplicação, em inglês *application layer*. Essa se posiciona no nível sete do modelo OSI e tem por objetivo disponibilizar serviços, seguindo o modelo cliente/servidor, que possibilitem a troca de mensagens entre dispositivos conectados em diferentes tipos de redes.

Nessa camada, independente do meio físico utilizado, é definida uma unidade de dados usada no protocolo, em inglês *Protocol Data Unit* (PDU), aqui chamada de pacote PDU. Este pacote requer que sejam definidas as funções utilizadas pela camada de aplicação, assim como o modelo de dados utilizado por cada função. Cada protocolo pode definir campos adicionais ao pacote PDU, formando uma unidade de dados de aplicativo, em inglês *Application Data Unit* (ADU). Esta é definida pela norma Modbus como a unidade de pacote de dados que engloba as unidades de dados definidas por cada camada. Nos campos adicionais são definidas informações de controle como servidor destinatário e verificador de erro.

A Figura 10 ilustra a composição do pacote de dados Modbus com a ADU e o pacote PDU como definido pela camada de aplicação. Como pode ser observado há um campo *Additional address* e um campo *Error check* que são de uso das camadas de comunicação subjacentes. Esses podem variar conforme o meio físico utilizado. Já os campos *Function code* e *Data* são definidos pela camada de aplicação como

PDU. O campo *Function code* possui tamanho de 1 byte e identifica a função utilizada na troca de mensagens entre cliente e servidor. O campo *Data* varia de acordo com a função utilizada, podendo assumir um tamanho máximo de 252 bytes.

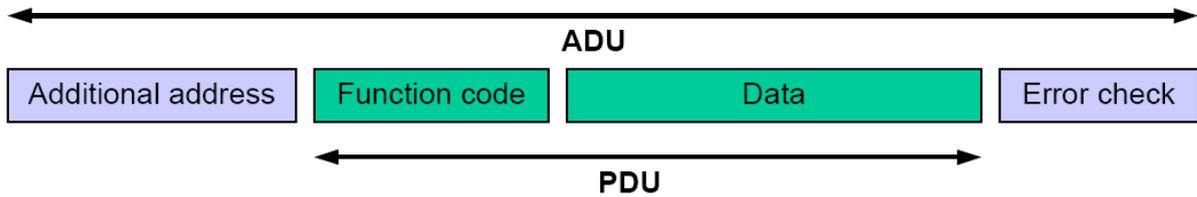


Figura 10: Composição do pacote de dados Modbus [15].

### 3.2.2. Camada de Enlace de Dados

Definido pela norma *Modbus over serial line* [1], a camada de enlace de dados, em inglês *data link layer*, equivale ao nível dois do modelo OSI. Essa norma baseia-se no modelo mestre/escravo. Duas possíveis implementações dessa camada podem ser utilizadas: Modbus ASCII ou Modbus RTU. Este último terá seu funcionamento melhor detalhado a seguir, visto que a proposta de estudo desse trabalho será uma solução de tecnologia sem fio para substituição de trechos de uma rede Modbus RTU com fiação RS485.

O modelo mestre/escravo definido pela camada de enlace de dados do protocolo Modbus permite que apenas um mestre controle até 247 escravos. O mestre da rede pode ser: (i) um software supervisor de aquisição de dados, em inglês *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), rodando em um computador; (ii) um dispositivo, nomeado *data logger*, com função de armazenar dados monitorados; ou (iii) um PLC. Escravos são normalmente dispositivos sensores que ficam adquirindo dados como temperatura e pressão, e enviam estes para o mestre quando solicitado.

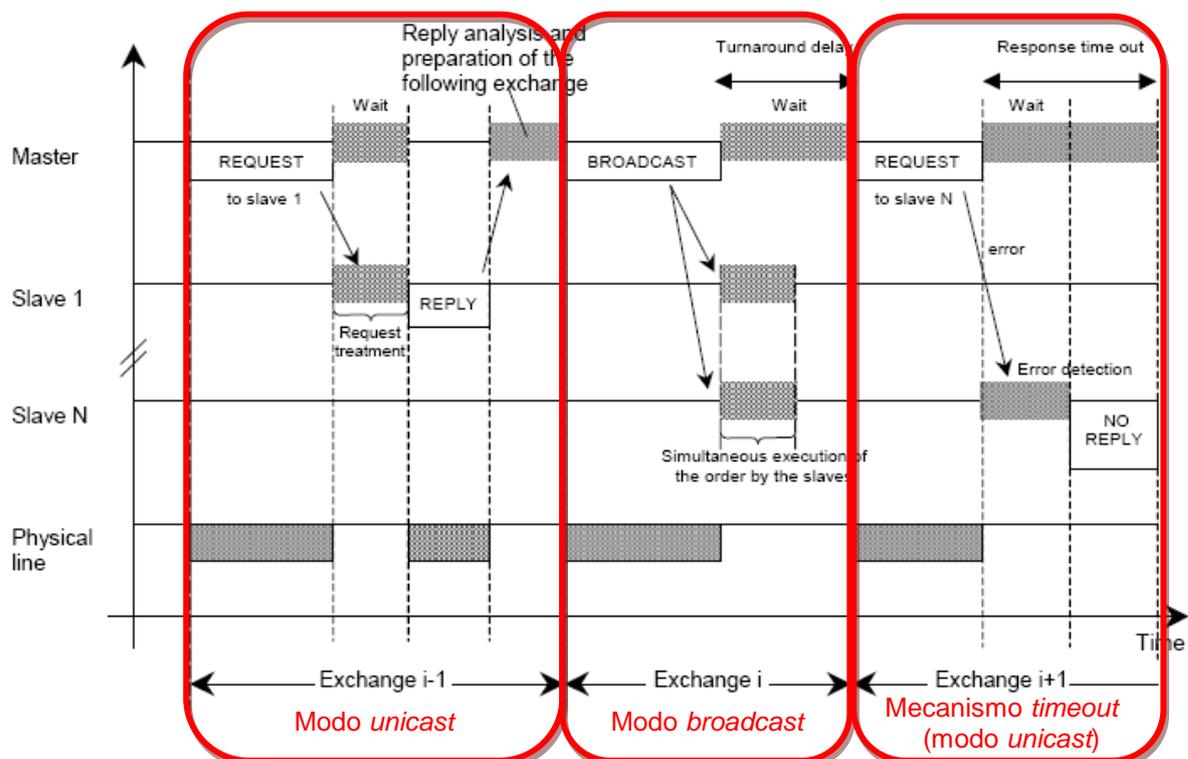
Na camada de enlace definem-se dois campos no pacote ADU: (i) O campo *Additional address*, visualizado na Figura 10, é utilizado para identificar o escravo destinatário do pacote. Esse campo possui o tamanho de 1 byte, limitando a 256 possibilidades de endereço. Entretanto, o endereço zero é destinado a *broadcast* e os endereços de 248 a 255 são reservados. Portanto, pode haver até 247 escravos em uma mesma rede Modbus. Lembrando que o protocolo Modbus permite a utilização de apenas um mestre na rede, esse não é identificado no pacote. (ii) O

campo *Error check*, também visualizado na Figura 10, é utilizado para controle de erros no pacote. Esse campo possui o tamanho de 2 bytes e valida a integridade do pacote utilizando o algoritmo *Cyclic Redundancy Check* de 16 bits (CRC-16) [1]. A camada de enlace de dados acrescenta portando 3 bytes ao ADU, podendo este possuir um tamanho máximo de 256 bytes (253 da camada de aplicação mais 3 bytes da camada de enlace de dados).

Toda transação de pacotes em uma rede Modbus utilizando protocolo serial é iniciada a partir do mestre através de requisições. Há duas maneiras de um mestre iniciar uma conversa:

- Modo *Unicast*: nesse modo o mestre envia uma mensagem de requisição (REQUEST) destinada a apenas um escravo e espera uma resposta (REPLY) de confirmação com a informação solicitada;
- Modo *Broadcast*: nesse modo o mestre envia uma mensagem de requisição destinada a todos os escravos da rede. O endereço de destino da mensagem nesse caso é zero e não são esperadas respostas.

Quando utilizado o modo *Unicast*, é disparado um mecanismo de *timeout* que espera a resposta por um determinado tempo. Desse modo, se alguma falha na comunicação ou no escravo destinatário acontecer, esse mecanismo irá desistir da espera da resposta avisando a camada superior.

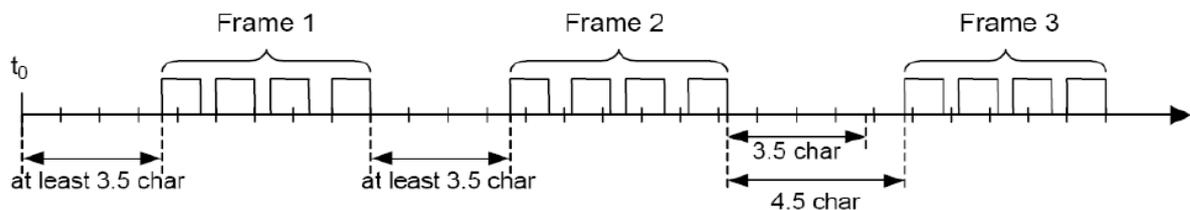


**Figura 11: Fluxo de mensagens em uma rede Modbus [1].**

A Figura 11 ilustra o fluxo de mensagens em uma rede Modbus. Em um primeiro momento é mostrado a transmissão de um pacote de REQUEST do mestre (*Master*) para o escravo 1 (*Slave 1*) e o respectivo REPLY do escravo. Após é ilustrada a transmissão de um pacote em modo *Broadcast*. Por ultimo é ilustrado o funcionamento do mecanismo de *timeout*, quando nenhum REPLY é detectado na rede.

O processo de transmissão e recepção de pacotes Modbus RTU possui requisitos temporais bastante rígidos, não permitindo que pacotes sejam fragmentados. A fragmentação de pacotes consiste na inserção de intervalos de tempo dentro de um pacote de dados, e causam erros de comunicação. Toda interceptação e reconhecimento de pacotes é realizado através de verificações temporais. Cada byte transmitido dentro de um pacote (*frame*) é acrescido de 3 bits de controle. Assim, pode-se dizer que um caractere (*char*) equivale ao tempo de transmissão de 11 bits.

Para controle da transmissão de um pacote, é definido o *inter-frame delay* que consiste em aguardar um período de tempo de 3,5 caracteres em silêncio antes de iniciar um novo pacote na rede. O *inter-character time-out* é definido visando detectar que a sequência de caracteres recebidos faz parte do mesmo pacote. Este define que para caracteres de um mesmo pacote, não pode haver um silêncio maior que o tempo de 1,5 caracteres [1]. Na Figura 12 são identificados três *frames* sendo transmitidos e divididos pelo *inter-frame delay*.



**Figura 12: Inter-frame delay [1].**

O *inter-character timeout* é representado pela Figura 13, que é composta por dois *frames*. O primeiro *frame* demonstra o correto funcionamento do *inter-character timeout*. A transmissão do segundo *frame* não atende aos requisitos da norma Modbus, pois teve seu *inter-character timeout* violado.

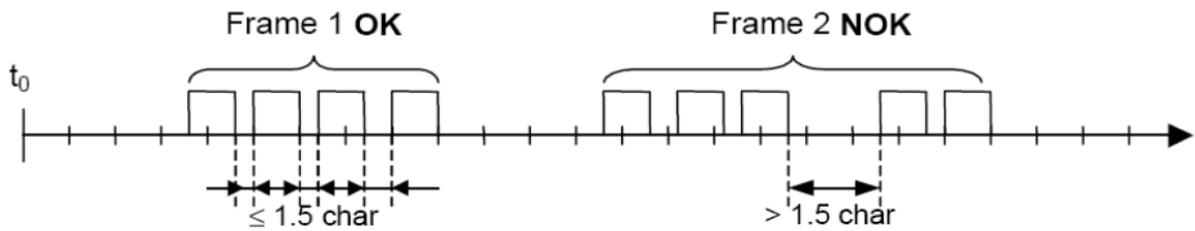


Figura 13: *Inter-character timeout* [1].

### 3.2.3. Camada Física

A norma *Modbus over serial line* [1] define uma camada física, equivalente ao nível um do modelo OSI. Esta camada define que todos os dispositivos de uma rede Modbus RTU ou Modbus ASCII devem se comunicar seguindo os modelos físicos definidos no padrão EIA/TIA-485, conhecido como RS485. Estes modelos baseiam-se numa comunicação serial *half-duplex*, onde a comunicação flui nos dois sentidos, porém não ao mesmo tempo. Outros modelos, como o RS232 e o RS422, ambos *full-duplex*, onde a comunicação flui nos dois sentidos e ao mesmo tempo, podem também ser utilizados.

O padrão RS485 permite a implementação de sistemas ponto-a-ponto e multiponto. Apenas 2 fios são necessários para comunicação, eles são utilizados para transmitir o sinal, onde um fio transporta o sinal invertido do outro. Isso permite um sinal elétrico mais forte, conseqüentemente maior distância na comunicação. Um fio para o sinal comum é também disponibilizado. Cada rede permite que pelo menos 32 dispositivos se comuniquem sem a necessidade do uso de repetidores. A distância máxima permitida da rede é de até 1000m.

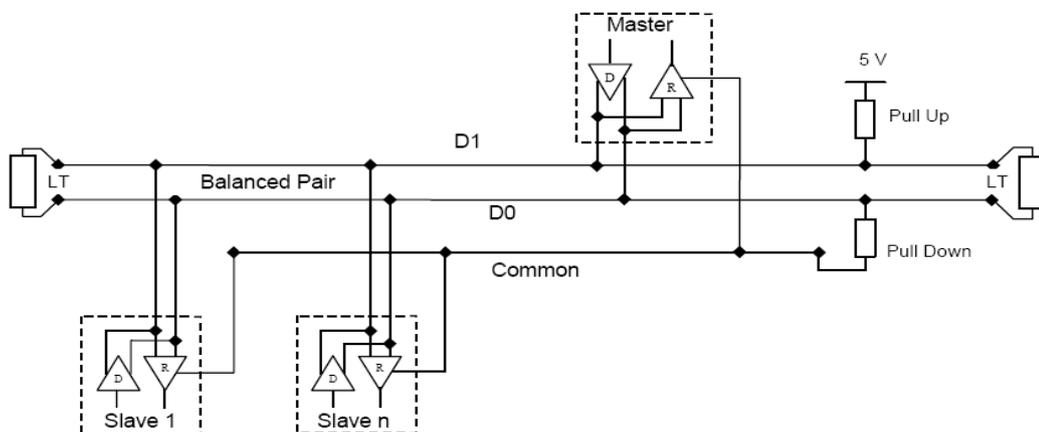


Figura 14: *Ligação elétrica de uma rede RS485* [1].

A Figura 14 ilustra as ligações elétricas de uma rede RS485. Como pode ser observado, mestre (*Master*) e escravos (*Slaves*) são conectados na rede paralelamente, em forma de barramento. A rede é balanceada utilizando-se resistores de *Pull Up* entre a alimentação (5 V) e um dos pinos de comunicação (D1) e resistores de *Pull Down* entre o fio comum (*Common*) e o outro pino de comunicação (D0). O fio *Common* deve ser interligado a todos os dispositivos e o resistor de terminação (LT) deve estar presente em cada um dos terminais da rede. Todas essas ações são necessárias para tornar a rede mais estável, evitando ruídos e contribuindo para um maior alcance e maior número de dispositivos associados a um mesmo barramento.

#### 4. GATEWAY DESENVOLVIDO: AIRGATE-MODBUS

O AirGate-Modbus [9] desenvolvido é um *gateway* que viabiliza a conversão entre os protocolos Modbus RTU sobre RS485 e IEEE 802.15.4. 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.

Como pode ser visualizado na Figura 15, cada dispositivo *gateway* dispõe de três tipos de interface de comunicação. Para facilitar a configuração e a conexão com sistemas SCADA 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, onde 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.

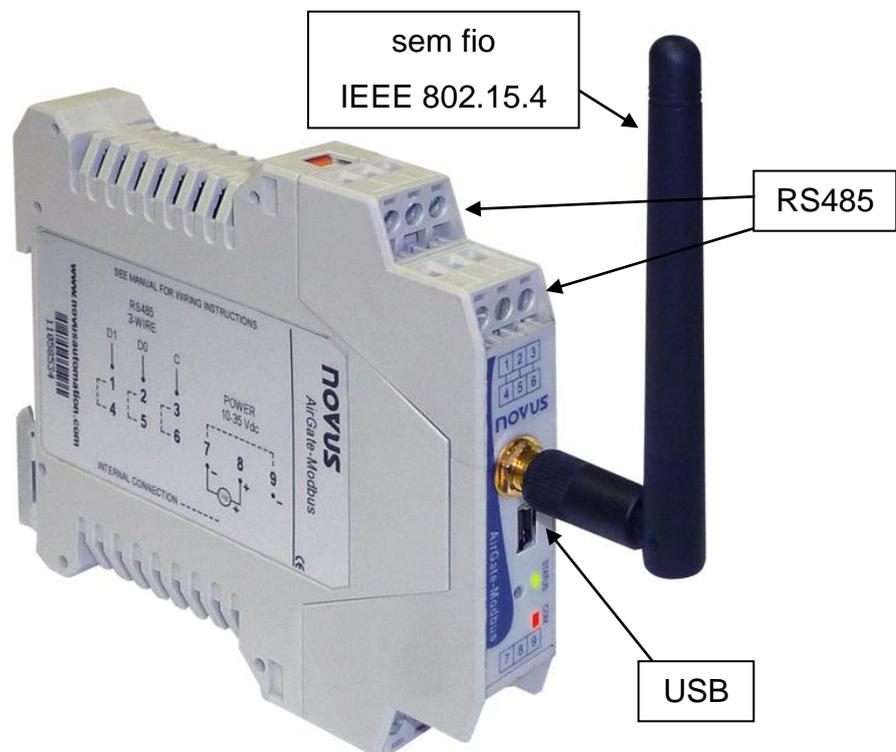


Figura 15: AirGate-Modbus [9].

Muitas aplicações industriais implantadas com redes Modbus RTU sobre RS485 necessitam da utilização de mais de um mestre Modbus. Exemplos destas aplicações são: (i) um sistema contendo um software SCADA e um dispositivo *data logger*; ou (ii) um sistema contendo um software SCADA e uma interface homem máquina, em inglês *Human Machine Interface (HMI)*. O protocolo Modbus RTU não permite o uso de mais de um mestre Modbus na rede. Visando uma melhoria deste protocolo o AirGate-Modbus implementa multiplexação de mestres, podendo até dois mestres Modbus controlarem uma mesma rede. O funcionamento da multiplexação está detalhado na Seção 4.2.3.

#### 4.1. PLATAFORMA DE HARDWARE

Para concretização do produto, foi desenvolvida dentro da empresa uma plataforma de hardware descrita na Figura 16.

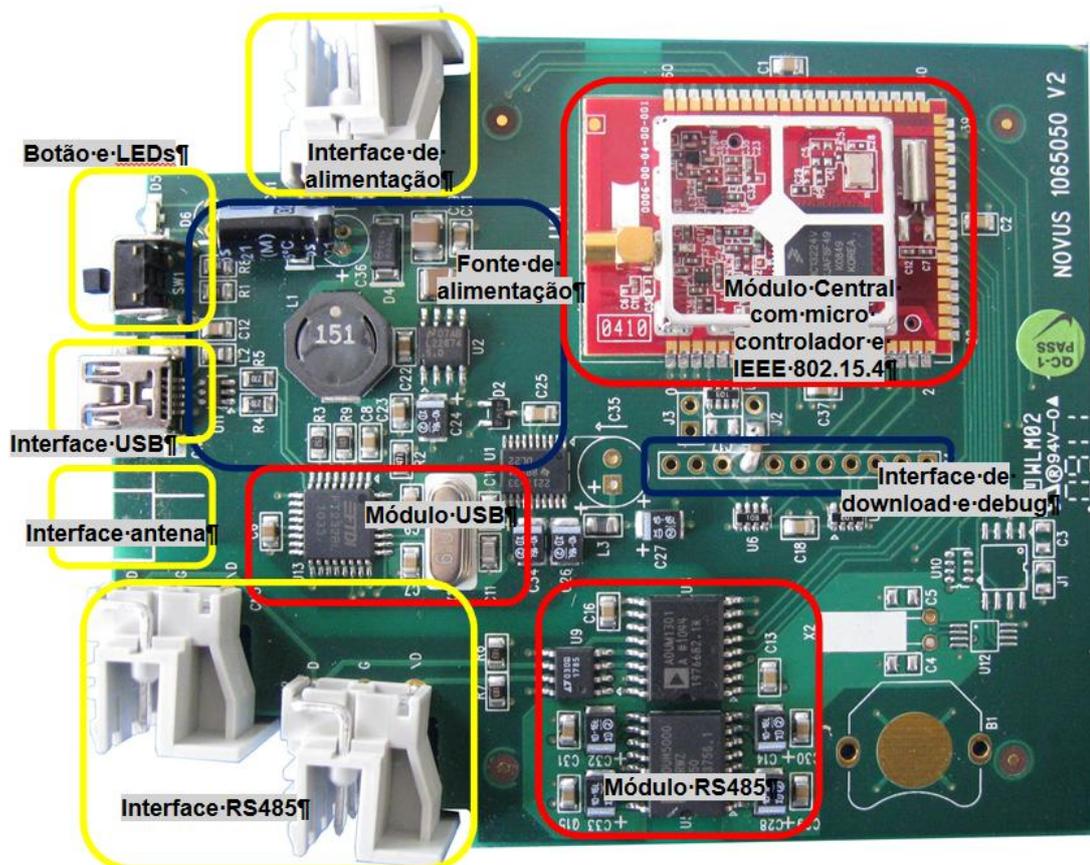


Figura 16: Layout do Hardware.

Esta plataforma de hardware é composta pelas seguintes regiões: (i) circundados por retângulos vermelhos estão ilustrados o módulo central

(processador e protocolo de comunicação IEEE 802.15.4), o módulo de comunicação responsável pelo protocolo físico USB e o módulo de comunicação responsável pelo protocolo físico RS485; (ii) circundados por retângulos azuis estão a fonte e a interface de *download* e *debug*; e (iii) circundados por retângulos amarelos estão apresentadas as interfaces para ligação da antena, do cabo USB e de dois conectores RS485, a interface de alimentação, um botão e dois LEDs indicadores de status.

A fonte disponibiliza ao usuário do AirGate-Modbus uma interface de alimentação de 10 Vcc a 35 Vcc. Essa fonte é responsável por regular a tensão e alimentar todos os módulos periféricos do sistema com suas respectivas faixas de alimentação. Ela regula a tensão para 3,3 Vcc e 5 Vcc.

A interface de *download* e *debug* segue o padrão disponibilizado pelo fabricante do micro controlador e pode ser utilizada tanto para embarcar o firmware no dispositivo, quanto para *debug* de forma a facilitar o desenvolvimento do *gateway*.

#### **4.1.1. Módulo Central**

O módulo central é composto por um micro controlador MC1322x [18], fabricado pela Freescale [19]. O MC1322x, além de conter o firmware do sistema, implementa o protocolo IEEE 802.15.4. Este se baseia em uma arquitetura 32 bits ARM7 TDMI (*Thumb Debug Multiplier ICE*) de processamento, possuindo memórias ROM (*Read-Only Memory*), RAM (*Random-Access Memory*) e Flash integradas, além de diversos periféricos. O principal atrativo para escolha desse micro controlador é que ele possui as camadas MAC e PHY do protocolo IEEE 802.15.4 já integradas dentro do chip, disponibilizando toda unidade de processamento e comunicação necessária para o desenvolvimento do *gateway*.

O MC1322x disponibiliza uma memória Flash de 128 KB para armazenamento do firmware e outros dados retentivos. Para operação do sistema, onde dados não retentivos são armazenados durante operação, ele disponibiliza uma memória RAM de 96 KB. Uma memória ROM, gravada em fábrica pela Freescale, disponibiliza o protocolo IEEE 802.15.4 e uma *Hardware Abstraction Layer* (HAL) para facilitar o acesso aos periféricos do MC1322x.

Dentre os periféricos disponíveis no MC1322x, foram utilizados duas interfaces UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). Uma destas ligada no módulo responsável pela camada física do protocolo USB (Universal Serial Interface) e outra ligada no módulo responsável pela camada física do protocolo RS485. Cada interface UART pode ser configurada independentemente para taxas de comunicação de 1,2 Kbaud<sup>2</sup> a 1843,2 Kbaud, seguindo os padrões de 8 bits de dado, um ou dois bits de parada e paridade par, ímpar ou nenhuma. Foram utilizadas também as máquinas de criptografia e decifração em hardware baseada no algoritmo AES-128, e três interfaces de entrada e saída. Uma das interfaces foi utilizada para conectar um botão. As outras duas foram utilizadas para conectar LEDs indicadores de status do AirGate-Modbus.

O MC1322x da suporte a todas as funções da camada MAC do IEEE 802.15.4 com exceção das funções necessárias para operar em uma rede *beacon-enabled*. A PHY do protocolo IEEE 802.15.4 disponibilizada no MC1322x trabalha na faixa de 2,4 GHz, disponibilizando os 16 canais de comunicação especificados pela norma. A sensibilidade de recepção é de -96 dBm e a potencia de transmissão pode ser configurada entre -30 dBm e 4 dBm. Visando um maior alcance de comunicação, junto no módulo há também um amplificador de potência, em inglês *Power Amplifier* (PA). Este possibilita aumentar a potencia de transmissão para até 20 dBm.

#### **4.1.2. Módulo USB**

O módulo USB, composto pelo chip FT232BL [20] fabricado pela FTDI [21], é responsável pela conversão entre o protocolo UART e o protocolo USB. Este efetua a comunicação entre módulo central (contendo a interface UART) e o computador (contendo a interface USB). Este chip é compatível com os padrões USB 1.1 e USB 2.0. Ele é alimentado pela própria USB, com tensão de 4,35 Vcc a 5,25 Vcc e fornece tensão regulada de 3,3 Vcc para alimentação do micro controlador e demais

---

<sup>2</sup> Baud significa taxa de modulação ou número de vezes por segundo que uma linha muda de estado. Para comunicações seriais 1 baud é equivalente a 1bit por segundo.

periféricos. Sua velocidade de comunicação pode ser configurada entre 300 baud e 3 Mbaud podendo utilizar o padrão de comunicação de 8 ou 7 bits de dados, 1 ou 2 bits de parada e paridade (par, ímpar, *Mark*, *Space*) ou sem paridade.

#### 4.1.3. Módulo RS485

O módulo RS485 é responsável pela conversão entre os protocolos UART e RS485. O protocolo UART trabalha com nível de 3,3 V com uma comunicação serial *Full-Duplex*, enquanto o protocolo RS485 trabalha com nível de 5 V com uma comunicação serial *Half-Duplex*. Portanto os chips ADUM 5000 [22] e ADUM 1301 [23] são necessários para conversão do nível de tensão e controle do fluxo de comunicação, visto que o protocolo UART possui duas vias de comunicação, enquanto o protocolo RS485 possui apenas uma. A velocidade e os padrões de comunicação são controlados pelo micro controlador.

## 4.2. ESTRUTURA DE CAMADAS DO SISTEMA

Como visualizado na Figura 17, o AirGate-Modbus possui no primeiro nível do modelo OSI três protocolos independentes: (i) O PHY IEEE 802.15.4, responsável por disponibilizar uma interface de acesso ao meio físico sem fio; (ii) o PHY USB, responsável por disponibilizar uma interface de acesso ao meio físico USB; e (iii) o PHY RS485, responsável por disponibilizar uma interface de acesso ao meio físico RS485. No segundo nível do modelo OSI há dois protocolos: (i) O MAC IEEE 802.15.4, responsável por disponibilizar funções de controle de associação e comunicação em uma rede em topologia estrela; e (ii) o Modbus RTU, responsável pela compreensão dos pacotes recebidos e transmitidos para os protocolos PHY USB e PHY RS485. Por fim, equivalente ao nível três do modelo OSI, a camada de aplicação do *gateway* é responsável pelo roteamento dos pacotes recebidos pelas três interfaces de comunicação.

Aplicação <i>Gateway</i>		
MAC IEEE 802.15.4	Modbus RTU	
PHY IEEE 802.15.4	PHY USB	PHY RS485

Figura 17: Estrutura de camadas do AirGate-Modbus.

Como observado na Figura 18, mestres e escravos de uma rede Modbus possuem: (i) no primeiro nível do modelo OSI o PHY USB ou o PHY RS485 e (ii) no segundo nível o protocolo Modbus RTU. O último nível, diferentemente do AirGate-Modbus, não é de roteamento, mas sim de aplicação. Este é responsável pela aquisição e coleta de dados monitorados pelos escravos da rede, para que sejam disponibilizados para o usuário.

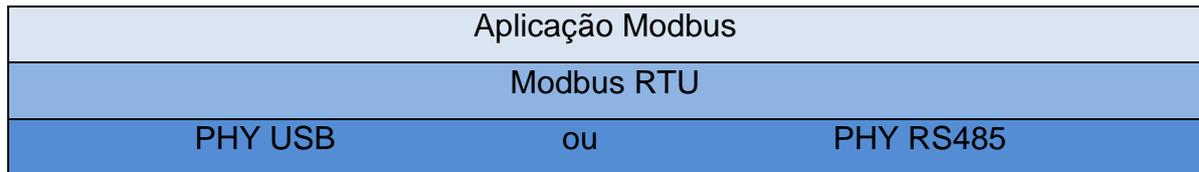


Figura 18: Estrutura de camadas do mestre e escravos.

#### 4.2.1. PHY e Camada MAC IEEE 802.15.4

Como explicado na Seção 4.1.1, o micro controlador MC1322x já possui a PHY e a camada MAC do protocolo IEEE 802.15.4 implementadas. No MC1322x são disponibilizados todos os serviços do protocolo, conforme descrito na Seção 3.1. Além disto, a topologia de rede disponibilizada pela camada MAC é do tipo estrela.

Junto à camada MAC foi desenvolvido uma **subcamada de transporte**. Esta subcamada é responsável por disponibilizar para a camada de aplicação o transporte de uma unidade de dados de até 4096 bytes. Já que o protocolo IEEE 802.15.4 disponibiliza para preenchimento na camada de aplicação um *Data Payload* de 112 bytes, e que o protocolo Modbus RTU pode assumir um ADU máximo de 256 bytes, esta subcamada se faz necessária. A disponibilidade de 4096 bytes se dá pelo fato de alguns equipamentos ferirem a regra Modbus, utilizando um ADU maior que o especificado. Sendo assim, a subcamada de transporte permite transportar pacotes de dados de até 4096 bytes.

Sistemas sem fio são por natureza vulneráveis a ataques, pois diferentemente de sistemas cabeados, o acesso ao meio físico não é restrito. Com o intuito de prevenção a estes, uma **subcamada de controle** de associação e desassociação de dispositivos foi criada junto à camada MAC para garantir que apenas equipamentos da Novus se comuniquem. Na subcamada de controle foi implantado também o uso da criptografia de dados utilizando o algoritmo AES-128 disponibilizado pelo MC1322x. Assim, pacotes de dados transmitidos pela interface

sem fio IEEE 802.15.4, que sejam capturados, só serão compreendidos se o receptor da informação for um produto da Novus com a chave de criptografia configurada corretamente.

#### **4.2.2. Camada Modbus RTU**

A camada Modbus RTU é responsável pelas funcionalidades descritas na Subseção 3.2.2. Esta camada cria uma ligação entre a camada de aplicação e as interfaces USB e RS485. Para cada uma das interfaces é disponibilizado um *buffer* de transmissão e recepção de 4096 bytes. Deste modo, mesmo equipamentos que não respeitem o tamanho máximo do pacote de dados serão compreendidos e terão suas mensagens encaminhadas para o destinatário correto.

Seguindo os requisitos temporais da norma Modbus, os pacotes recebidos pelas interfaces USB e RS485 serão *bufferizados* e encaminhados para roteamento pela camada de aplicação. Pacotes recebidos da camada de aplicação serão encaminhados e transmitidos para a interface solicitada.

#### **4.2.3. Camada de Aplicação**

O AirGate-Modbus possui uma camada de aplicação bastante complexa. Esta é responsável pelo roteamento das mensagens que podem ser recebidas pelas interfaces USB, RS485 ou IEEE 802.15.4. Ela é responsável também pela multiplexação de mestres Modbus e pela possibilidade de implantação de uma topologia de rede do tipo árvore utilizando uma arquitetura híbrida com IEEE 802.15.4 e Modbus RTU. As Subseções 4.2.3.2 a 4.2.3.4 explicam os modos de operação criados pela camada de aplicação que disponibiliza as funcionalidades necessárias para implantação das topologias de rede e aplicações demonstradas no Capítulo 4.3.

##### **4.2.3.1. Modo de Operação *RS485-Slaves***

Como ilustrado na Figura 19, *Gateways* operando no modo *RS485-Slaves* têm o objetivo de dar continuidade à rede Modbus. Utiliza a interface sem fio IEEE

802.15.4 para se comunicar com outro *gateway*, onde está localizado o mestre da rede. A interface RS485 é utilizada para se comunicar com escravos Modbus. O *gateway* opera no modo RFD, onde busca por um FFD e se mantém pareado após a inicialização da rede.



Figura 19: Modo de operação *RS485-Slaves*.

#### 4.2.3.2. Modo de Operação *RS485-Master*

Já no modo *RS485-Master*, o *gateway* utiliza a interface RS485 para se comunicar com uma rede Modbus. Operando como FFD, ele faz o papel de coordenador da rede IEEE 802.15.4, inicializando-a em um canal previamente selecionado através do algoritmo de ED. O *gateway* aguarda por associações de outros *gateways* operando no modo *RS485-Slaves*, os quais dão continuidade a segmentos cabeados. Posteriormente, o *gateway* aguarda por mensagens Modbus e passa a roteá-las para o segmento da rede no qual o escravo destinatário da mensagem está localizado. Respostas de escravos recebidas pela interface sem fio IEEE 802.15.4 são encaminhadas diretamente para a interface RS485. A Figura 20 ilustra esse modo de operação.



Figura 20: Modo de operação *RS485-Master*.

#### 4.2.3.3. Modo de Operação *USB-Master*

Semelhante ao modo de operação *RS485-Master*, no modo *USB-Master* o *gateway* também opera como FFD inicializando e coordenando a rede, entretanto utiliza a interface USB para se comunicar diretamente com um mestre Modbus e sua interface RS485 para se comunicar com uma rede de escravos Modbus. Este modo de operação pode ser visualizado na Figura 21.



Figura 21: Modo de operação *USB-Master*.

#### 4.2.3.4. Modo de Operação *Multi-Master*

Operando como FFD, no modo *Multi-Master*, como pode ser observado na Figura 22, o *gateway* utiliza suas interfaces RS485 e USB para multiplexação de mestres Modbus. Ele multiplexa as solicitações dos mestres, encaminhando-as para o segmento onde está o escravo destinatário. Isso ocorre de forma transparente à rede Modbus, fazendo com que apenas o mestre que solicitou a informação receba a resposta e que não haja colisão entre as solicitações dos mestres.



Figura 22: Modo de operação *Multi-Master*.

### 4.3. TOPOLOGIAS DE REDE E APLICAÇÕES

O AirGate-Modbus é bastante versátil, possuindo diversas aplicações. É possível utilizá-lo desde a simples substituição de segmentos cabeados por segmentos sem fio, até a complexa multiplexação de mestres. Possibilita também a utilização de uma topologia em árvore para redes Modbus RTU sobre RS485. Todas estas aplicações são de fácil configuração e transparentes para a rede Modbus. Desta forma, o *gateway* pode ser implantado tanto em redes já instaladas como em novos projetos de automação industrial. As Seções 4.3.1 a 4.3.4 demonstram algumas possíveis topologias de rede e aplicações.

#### 4.3.1. Gateway Ligado Indiretamente ao Mestre Modbus

A Figura 23 ilustra a arquitetura de uma rede Modbus quando utilizado um *gateway* no modo de operação *RS485-Master* e dois *gateways* no modo de operação *RS485-Slaves*. Nesta arquitetura pode ser observada a utilização de um mestre Modbus (*PC Modbus Master*) que se comunica com a rede através de um conversor USB-RS485. O segmento sem fio aparece conectado indiretamente ao mestre, podendo haver escravos Modbus neste segmento que é cabeado. Cada segmento de cabo é conectado ao *gateway* através da interface RS485. Cabe ao *gateway*, que opera no modo *RS485-Master*, iniciar a rede e identificar automaticamente quais escravos Modbus estão em cada segmento sem fio.

Na Figura 23 aparecem três sub-redes Modbus: (i) Na primeira encontram-se escravos endereçados de 1 a 15, interligados ao mestre através de um conversor USB-RS485. Nesta sub-rede está conectado um *gateway* operando no modo *RS485-Master* que da continuidade a dois segmentos interligados por meio físico sem fio; (ii) Na segunda sub-rede, conectada pelo *gateway* local operando no modo *RS485-Slaves* ao *gateway* remoto operando no modo *RS485-Master*, encontram-se escravos endereçados de 16 a 20 conectados a interface RS485 do *gateway* local; e (iii) A terceira, interligada da mesma forma que a segunda, possui escravos endereçados de 30 a 40.

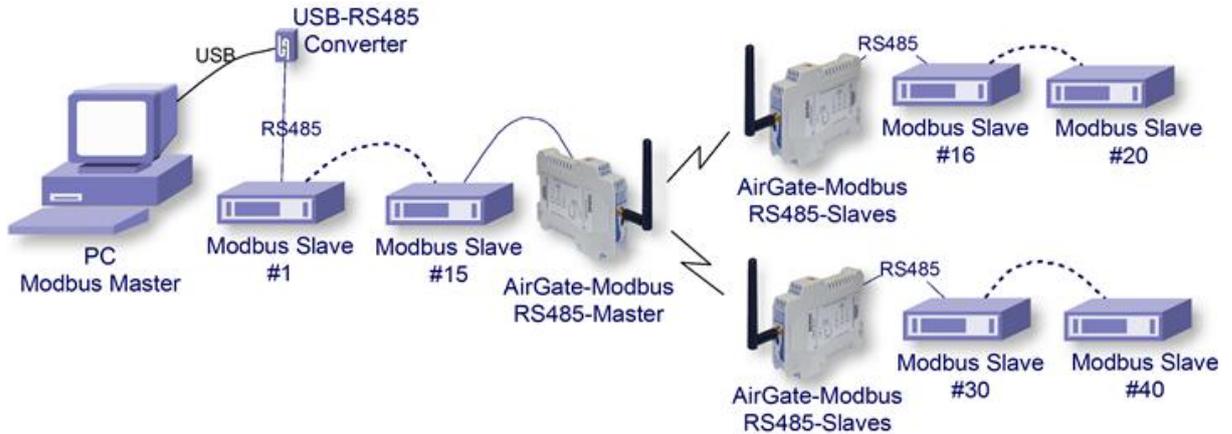


Figura 23: Rede Modbus com *gateway* conectado ao mestre (PC) de forma indireta através da interface RS485 [9].

#### 4.3.2. Gateway Ligado Diretamente ao Mestre Modbus

A Figura 24 ilustra a arquitetura da rede Modbus quando utilizado um *gateway* no modo de operação *USB-Master* e dois *gateways* no modo de operação *RS485-Slaves*. Nesta arquitetura o segmento sem fio aparece conectado diretamente ao mestre Modbus, o qual utiliza a interface USB do *gateway* para se comunicar com a rede de escravos. A interface RS485 do *gateway* é utilizada para conexão de escravos Modbus. O *gateway* operando no modo de operação *USB-Master* faz o papel de gerenciador da rede sem fio, cabendo a ele, também, identificar em qual dos 3 segmentos está localizado cada escravo.

Na Figura 24 aparecem três sub-redes Modbus: (i) Na primeira encontram-se escravos endereçados de 1 a 15 interligados ao mestre através do *gateway* operando no modo *USB-Master* que faz um papel de conversor USB-RS485 para este ramo; (ii) Na segunda, conectada pelo *gateway* local operando no modo *RS485-Slaves* ao *gateway* remoto operando no modo *USB-Master*, encontram-se escravos endereçados de 16 a 20 conectados a interface RS485 do *gateway* local; e (iii) A terceira, interligada da mesma forma que a segunda, possui escravos endereçados de 30 a 40.

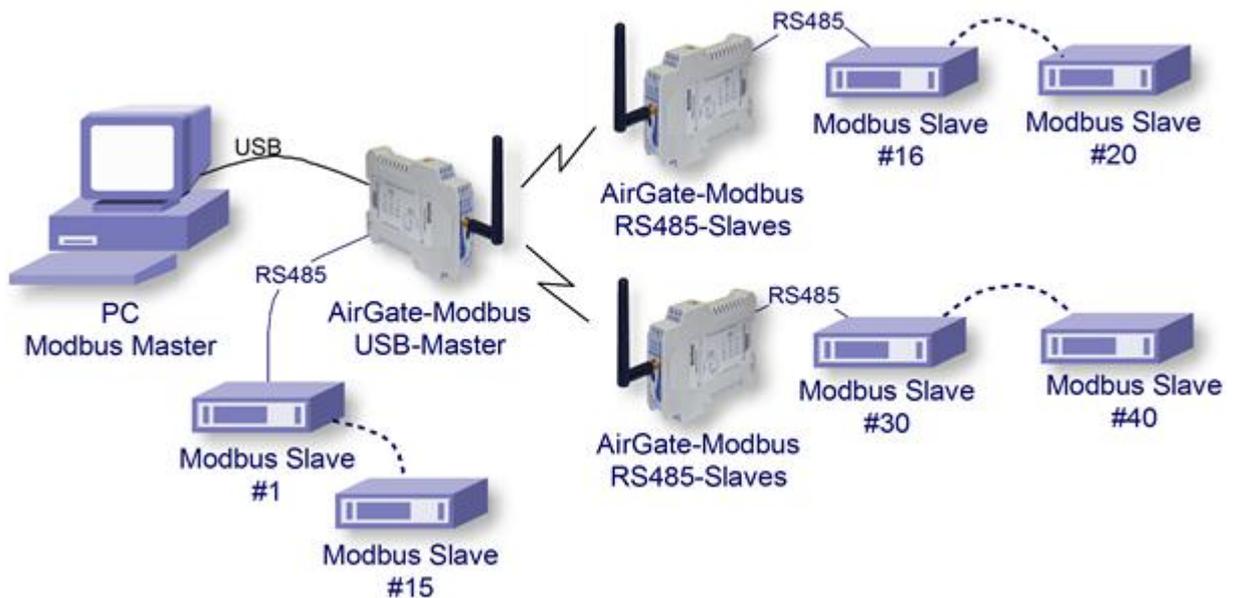


Figura 24: Rede Modbus, com *gateway* conectado diretamente ao mestre através da interface USB [9].

#### 4.3.3. Topologia de Rede que Opera com Dois Mestres Modbus Multiplexados

A Figura 25 ilustra a arquitetura da rede Modbus quando utilizado um *gateway* no modo de operação *Multi-Master* e dois *gateways* no modo de operação *RS485-Slaves*. Nesse exemplo há um mestre PC que utiliza a interface USB e outro mestre que utiliza a interface RS485 do *gateway*. Há dois segmentos sem fio com escravos Modbus. O *gateway* operando no modo *Multi-Master*, além de iniciar a rede, identificar a localização de cada escravo, ainda multiplexa as solicitações dos mestres de forma a possibilitar a utilização de até dois mestres sem conflitos nem colisões de mensagens.

Na Figura 25 aparecem duas sub-redes Modbus: (i) Na primeira, conectada pelo *gateway* local operando no modo *RS485-Slaves* ao *gateway* remoto operando no modo *Multi-Master*, encontram-se escravos endereçados de 1 a 15 conectados a interface RS485 do *gateway* local; e (ii) A segunda, interligada da mesma forma que a primeira, possui escravos endereçados de 16 a 20.

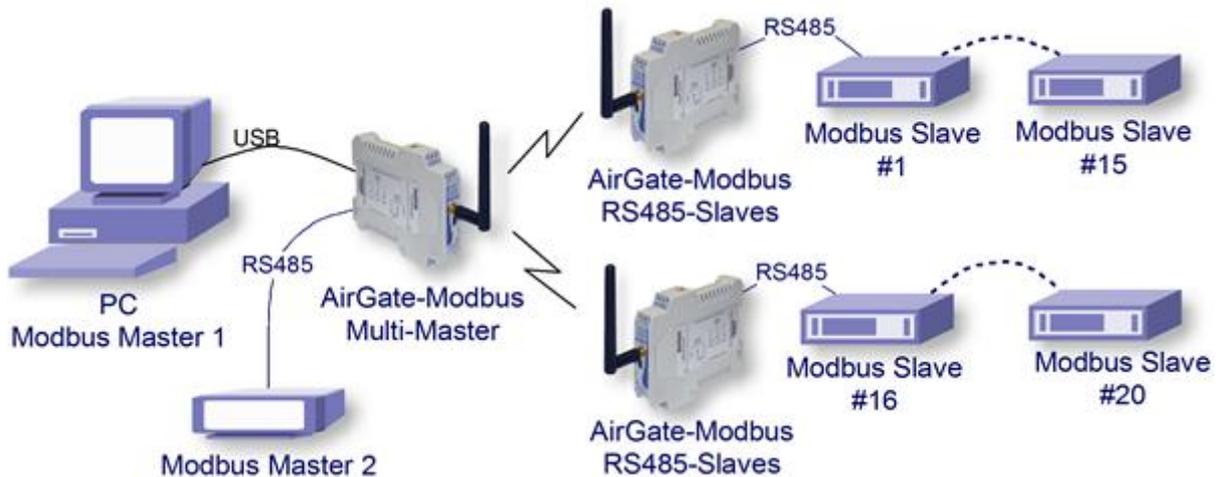


Figura 25: Rede Modbus, com dois mestres conectados diretamente ao *gateway* através das interfaces USB e RS485 [9].

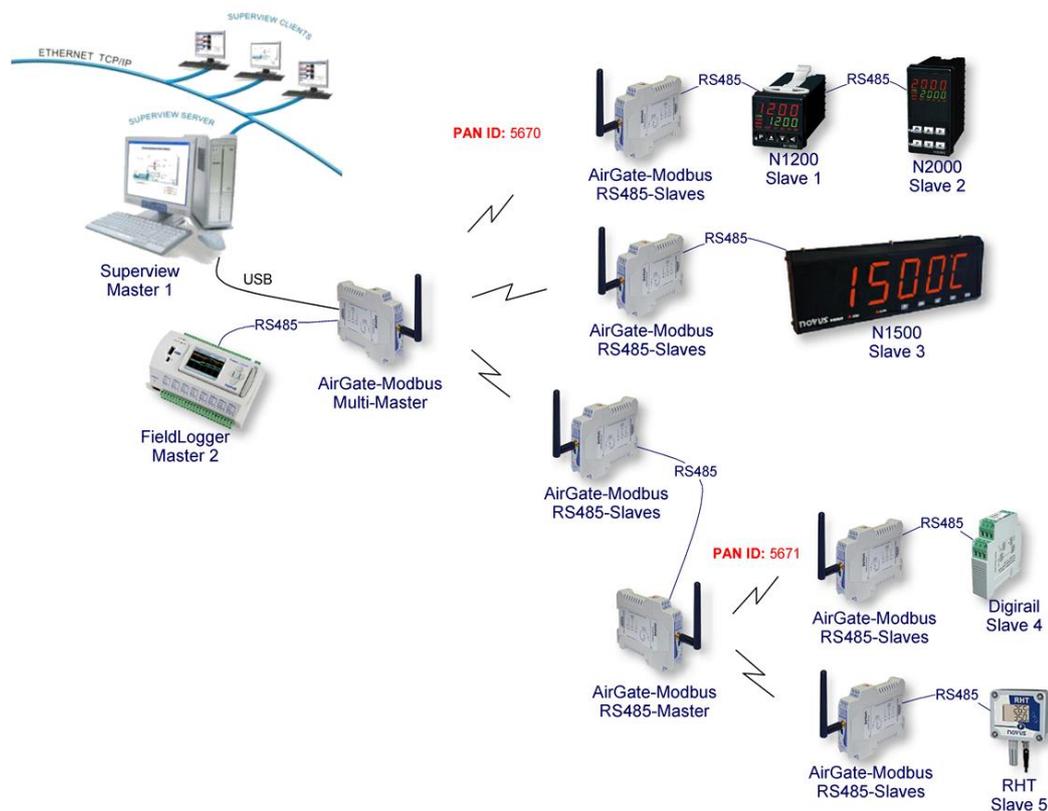
#### 4.3.4. Aplicação em Topologia de Rede do Tipo Árvore

Topologias de rede do tipo árvore também são possíveis, como exemplificado na Figura 26. Nesta, um *gateway* operando no modo *Multi-Master* é ligado a dois mestres Modbus. Neste *gateway* são interligados, através da interface sem fio, três segmentos cabeados através de *gateways* operando no modo *RS485-Slaves*. Em um destes *gateways*, visando aumentar o alcance e dispor de mais segmentos de escravos, está conectado através da interface RS485 outro *gateway* operando no modo *RS485-Master*. Este possibilita uma nova estrela de segmentos sem fio, dando origem a mais dois segmentos cabeados através de outros *gateways* operando no modo *RS485-Slaves*.

Para identificar que dispositivos *gateways* fazem parte de uma mesma rede estrela, cada dispositivo possui uma PAN ID configurada. Essa PAN ID é comum a todos os equipamentos de uma mesma rede e deve diferenciar uma rede da outra, como ilustrado na Figura 26, onde uma rede é identificada pela PAN ID 5670 e a outra rede é identificada pela PAN ID 5671.

A Figura 26 exemplifica uma aplicação onde alguns equipamentos vendidos pela empresa Novus são utilizados. Nesta, há dois mestres Modbus interligados ao *gateway* operando no modo *Multi-Master*: (i) O primeiro mestre é um software SCADA rodando em PC (SuperView [24]). Este se encontra conectado a rede Modbus através da interface USB do *gateway*; (ii) O segundo mestre é um equipamento *data logger* (FieldLogger [25]). Este se encontra conectado a rede

Modbus através da interface RS485 do *gateway*. Conectados ao *gateway* operando no modo *Multi-Master* encontram-se três sub-redes de escravos Modbus interligadas por *gateways* operando no modo *RS485-Slaves* através da interface RS485: (i) Na primeira estão um N1200 [26] e um N2000 [27] com respectivos endereços 1 e 2. Estes são equipamentos que controlam processos como manter temperatura e pressão; (ii) Na segunda encontra-se um N1500 [28] com endereço 3, o qual possui a função de indicador de processos, como exibir a temperatura de um tanque que está sendo controlado por um N1200; e (iii) Na terceira sub-rede está conectado um *gateway* no modo de operação *RS485-Master* que da origem a dois novos segmentos cabeados através de dois *gateways* operando no modo *RS485-Slaves*: (i) No primeiro está um Digirail [29] com endereço 4. Este possui entradas analógicas universais que podem ser utilizadas para, por exemplo, obter dados de pressão de um sensor; e (ii) No segundo encontra-se um RHT [30] com endereço 5 capaz de monitorar temperatura e umidade.



**Figura 26: Rede Modbus com a exemplificação de uma aplicação, onde *gateways* permitem a realização de uma topologia de rede do tipo árvore [9].**

## 5. TESTES E VALIDAÇÃO DO SISTEMA

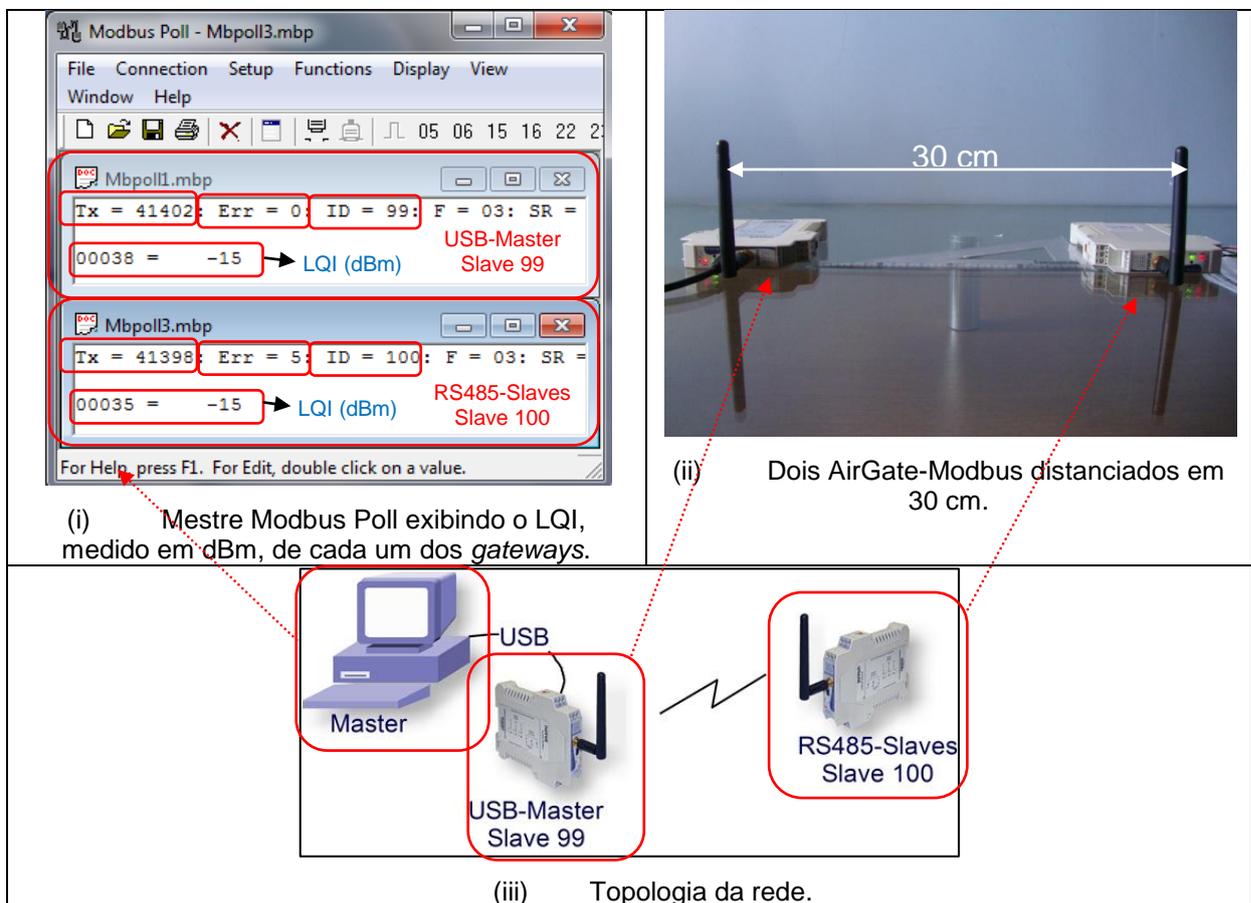
Visando a validação do sistema implementado, uma bateria de testes foi realizada em cima do *gateway*. Essa bateria envolve testes de: (i) Avaliação do consumo de energia do equipamento; (ii) Avaliação da emissão irradiada pelo módulo RF, a qual é homologada pela Anatel que controla no Brasil a conformidade dos equipamentos que possuem comunicação sem fio [31]; (iii) Avaliação do alcance relacionando à potência de recepção, assim como a taxa de erro de pacotes transmitidos e recebidos; (iv) Avaliação da taxa de erro de pacotes transmitidos e recebido para cada um dos modos de operação disponibilizados pelo *gateway*, assim como a topologia de rede árvore com diferentes configurações e tamanhos.

Dentre os testes abordados na bateria de testes, apenas o terceiro e o quarto, por possuírem maior relação com o presente trabalho, serão apresentados nas Seções 5.1 a 5.5. Para realização dos testes foi utilizada a ferramenta Modbus Poll [32] que permite validar redes Modbus. O Modbus Poll é um software que simula um mestre em uma rede Modbus, permitindo a configurar a taxa de comunicação, o tempo máximo de espera para a resposta do escravo, o número de escravos na rede, o tamanho de cada pacote de dados, bem como a avaliar o número de pacotes enviados e o número de erros de comunicação.

### 5.1. PRIMEIRO TESTE: AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DE RECEPÇÃO E TAXA DE ERROS A UMA DISTÂNCIA DE 30 CENTÍMETROS

Para avaliar a potência de recepção e a taxa de erros, foi desenvolvido um *firmware* que permite ler de cada *gateway* da rede o parâmetro que indica a qualidade da conexão (LQI), o qual é disponibilizado pela camada física do protocolo IEEE 802.15.4. Esse parâmetro indica em dBm a potência de recepção do último pacote recebido pela interface sem fio. Apesar da sensibilidade máxima de recepção do MC1322x ser de -96 dBm, o LQI pode variar de -15 dBm a -100 dBm. O *firmware* desenvolvido para o teste faz o *gateway* se comportar como escravo da rede para um determinado endereço configurado. Assim, quando o *gateway* recebe um pacote com seu endereço, ao invés de encaminhar para a rede, ele responde os dados solicitados.

Um primeiro teste, o qual pode ser visualizado na Figura 27, avalia a taxa de erros de comunicação quando utilizados dois AirGate-Modbus a uma distância de 30 cm. Neste teste foi utilizado um AirGate-Modbus local operando como *USB-Master*, o qual responde a solicitações do mestre pelo endereço 99 e um AirGate-Modbus remoto operando como *RS485-Slaves*, o qual responde a solicitações do mestre pelo endereço 100. O *gateway* local se comunica com um computador, no qual o *software* Modbus Poll (mestre da rede) solicita informações pela interface USB. Como pode ser observado, na Figura 27 são apresentadas três imagens: (i) O Modbus Poll exibindo os dados monitorados de cada *gateway*; (ii) Os AirGate-Modbus utilizados no teste; e (iii) A topologia da rede.



**Figura 27: Topologia de rede e equipamentos utilizados no primeiro teste.**

No software Modbus Poll as seguintes informações são apresentadas: (i) O parâmetro Tx indica a quantidade de pacotes transmitidos, onde para cada pacote transmitido é esperado um pacote de resposta; (ii) O parâmetro Err indica a quantidade de erros de comunicação, ou seja, a quantidade de pacotes transmitidos que não obtiveram resposta; (iii) O parâmetro ID identifica o endereço do escravo a qual pertence às informações que seguem na tela; (iv) Abaixo destes parâmetros, são apresentados o endereço de cada registrador lido com seu respectivo valor,

podendo ser lido até 127 registradores, onde cada registrador possui 16 bits e representa uma informação disponibilizada pelo escravo.

Como demonstrado na tela Figura 27 (i), o registrador 00038 disponibiliza o LQI do *gateway* local, enquanto o registrador 00035 disponibiliza o LQI do *gateway* remoto, onde para ambos o valor do LQI é -15 dBm, ou seja, a maior potencia de recepção possível. Para ambos os *gateways* o número de pacotes transmitidos é 41402 (número de pacotes transmitidos em uma hora de teste), onde não ocorreu nenhum erro de comunicação com o *gateway* local. Entretanto, com o *gateway* remoto, ocorreram 5 erros. Portanto, a taxa de erros do link sem fio obtida no teste é de 0,012 %.

## 5.2. SEGUNDO TESTE: AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DE RECEPÇÃO E TAXA DE ERROS A UMA DISTÂNCIA DE 1200 METROS

Similarmente a Seção 5.1, esta seção apresenta o teste que avalia a potência de recepção e taxa de erros a uma distância que é o limite da conexão sem fio entre os *gateways*. Este limite pode ser obtido através do cálculo do enlace, em inglês *link budget* [33]. Este cálculo obtém a distância limite de conexão ao relacionar a potência de transmissão (20 dBm), a sensibilidade de recepção (-96 dBm), o ganho de cada antena (2 dBi) e a perda do sinal determinado pelo meio físico, o qual relaciona a frequência e a distância de comunicação. Também deve ser considerada no cálculo a perda relacionada à altura de cada antena em relação a algum obstáculo entre elas, como explicada pela Zona de Fresnel [34]. O cálculo para obtenção da distância limite de comunicação não será apresentado, entretanto, através da análise dos dados, foi obtida a distância limite de aproximadamente 1200 metros com visada direta, ou seja, sem obstáculos entre as antenas de comunicação.

Como pode ser observado na Figura 28, os mesmos equipamentos e a mesma topologia de rede apresentada no teste abordado na Seção 5.1 foram utilizados neste segundo teste. A única mudança foi a distância entre os *gateways*. O mestre Modbus Poll demonstra que o LQI para ambos os *gateways* neste teste é de -97 dBm, restando apenas 3 dBm para perda do link de comunicação. Entretanto, é verificada uma baixa taxa de erro. Como pode ser visualizado, 5057 pacotes foram

transmitidos com sucesso para o *gateway* local, e destes, apenas 4 apresentaram erro de comunicação com o *gateway* remoto. A taxa de erros verificada no teste é de 0,079 % para o link sem fio.

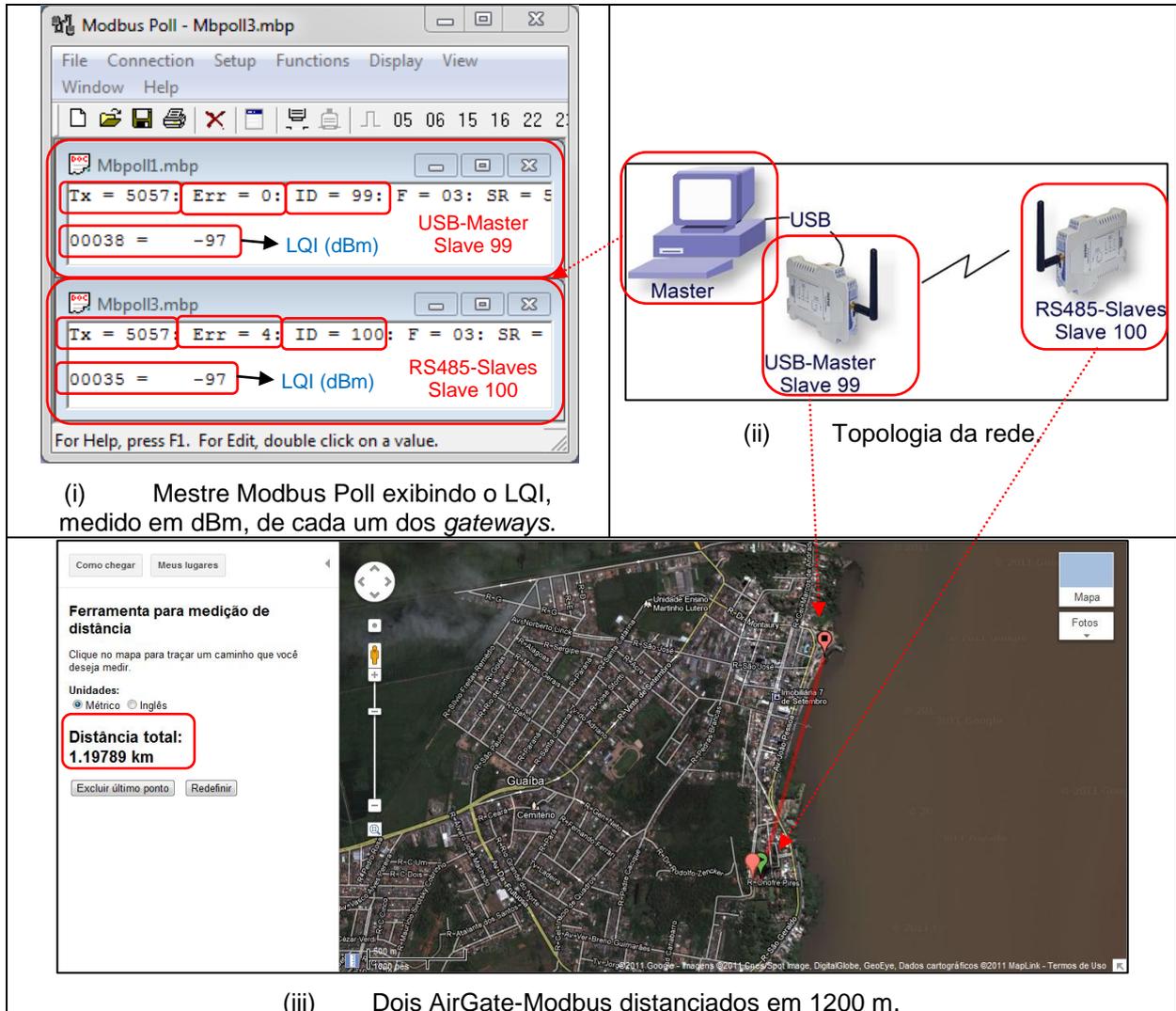
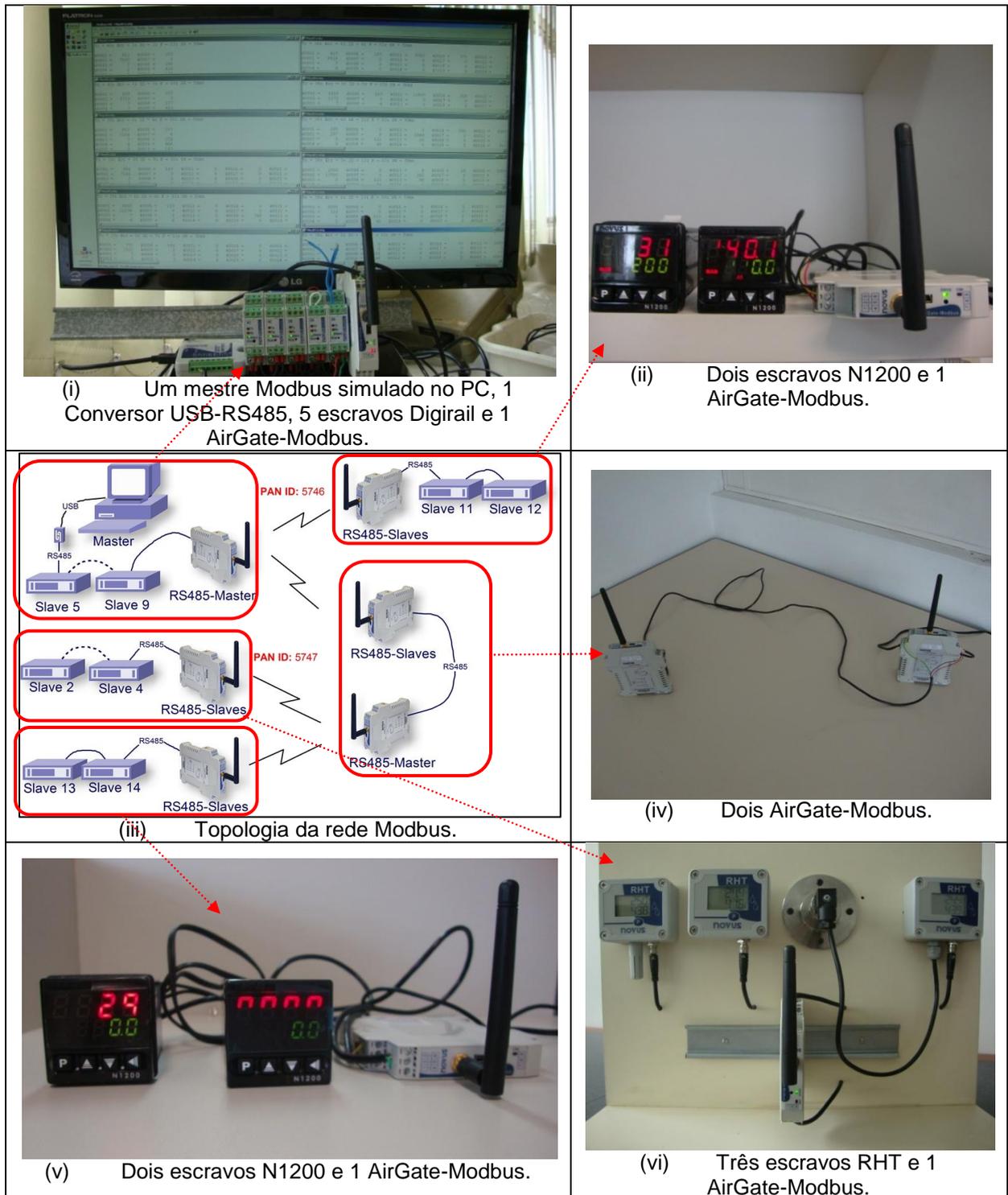


Figura 28: Topologia de rede e equipamentos utilizados no segundo teste.

### 5.3. TERCEIRO TESTE: AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO EM TOPOLOGIA DE REDE 1

Nesta Seção é apresentado o teste de avaliação da comunicação em topologia de rede do tipo árvore envolvendo seis AirGate-Modbus, um mestre e oito escravos. Este teste tem como objetivo validar os modos de operação *RS485-Master* e *RS485-Slaves*. A Figura 29 apresenta seis ilustrações do teste realizado, onde a tela (iii) apresenta a topologia da rede Modbus e as demais telas apresentam os equipamentos em operação durante a realização do teste.



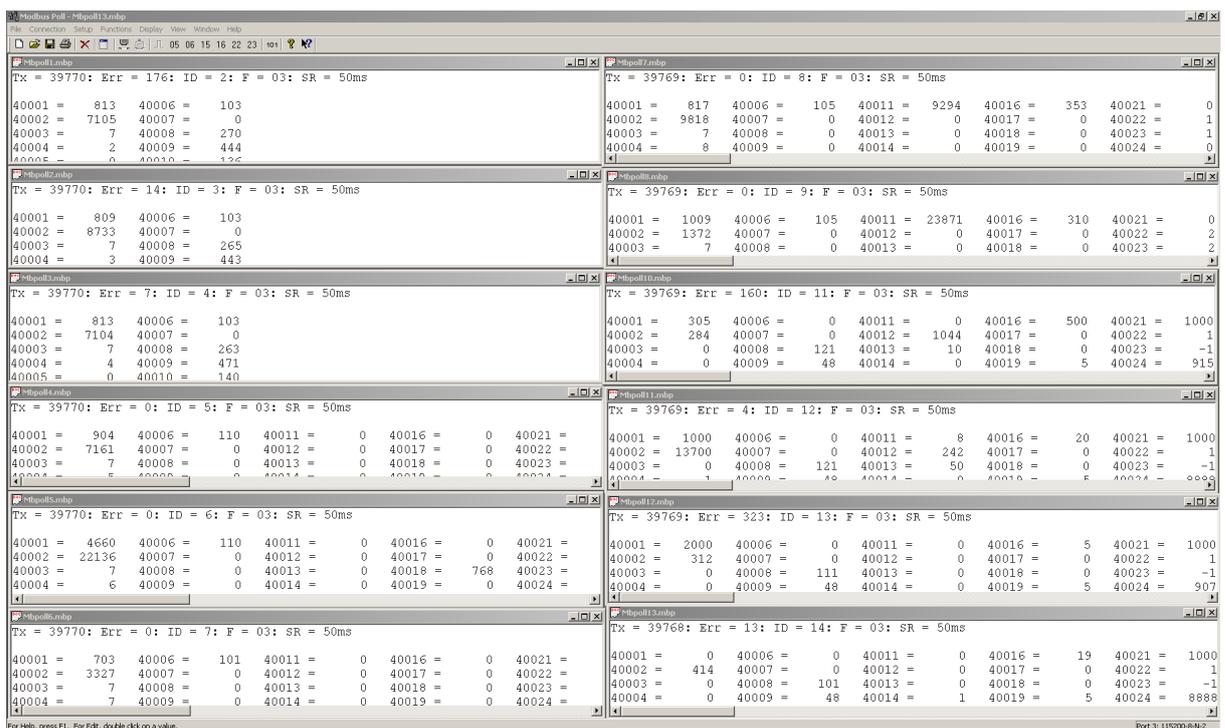
**Figura 29: Topologia de rede e equipamentos utilizados no terceiro teste.**

Como ilustrado na Figura 29, a topologia de rede utilizada no teste possui 3 níveis de profundidade<sup>3</sup>: (i) No nível 0, endereçados de 5 a 9, estão localizados 5

<sup>3</sup> Profundidade indica o número de segmentos sem fio entre o mestre e o escravo avaliado.

escravos Digirail; (ii) No nível 1 estão localizados 2 escravos N1200 com endereços 11 e 12; (iii) No nível 2 estão localizados dois segmentos de escravos. No primeiro segmento localizam-se 3 escravos RHT, endereçados de 2 a 4. No segundo segmento, com endereços 13 e 14, localizam-se 2 escravos N1200.

Para validar a comunicação com diferentes tamanhos de pacote, o mestre da rede, o qual pode ser visualizado na Figura 30, solicitou para cada um dos escravos uma quantidade diferente de registradores. O tamanho do pacote de solicitação de leitura de registradores para cada um dos escravos é de 8 bytes. Para os escravos endereçados de 2 a 4 foi solicitada a leitura de 10 registradores, sendo esperado um pacote de resposta de 26 bytes. Para os escravos endereçados de 5 a 7 foi solicitada a leitura de 80 registradores, sendo esperado um pacote de resposta de 166 bytes. Para os escravos endereçados de 8 a 9 e 11 a 14 foi solicitada a leitura de 125 registradores, sendo esperado um pacote de resposta de 256 bytes.



**Figura 30: Tela do mestre Modbus Poll, utilizado para avaliar no terceiro teste a taxa de erros de comunicação na rede Modbus. Cada janela interna contém os dados lidos de cada escravo da rede.**

Para facilitar a avaliação dos dados apresentados pelo mestre, a Tabela 2 apresenta para cada escravo: (i) o seu endereço de rede; (ii) sua profundidade; (iii) o número de pacotes transmitidos para o mesmo; (iv) a quantidade de registradores lidos em cada solicitação; (v) o tamanho de cada pacote recebido; (vi) o número de erros da comunicação; e (vi) taxa de erros de comunicação.

**Tabela 2: Resultado do terceiro teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre.**

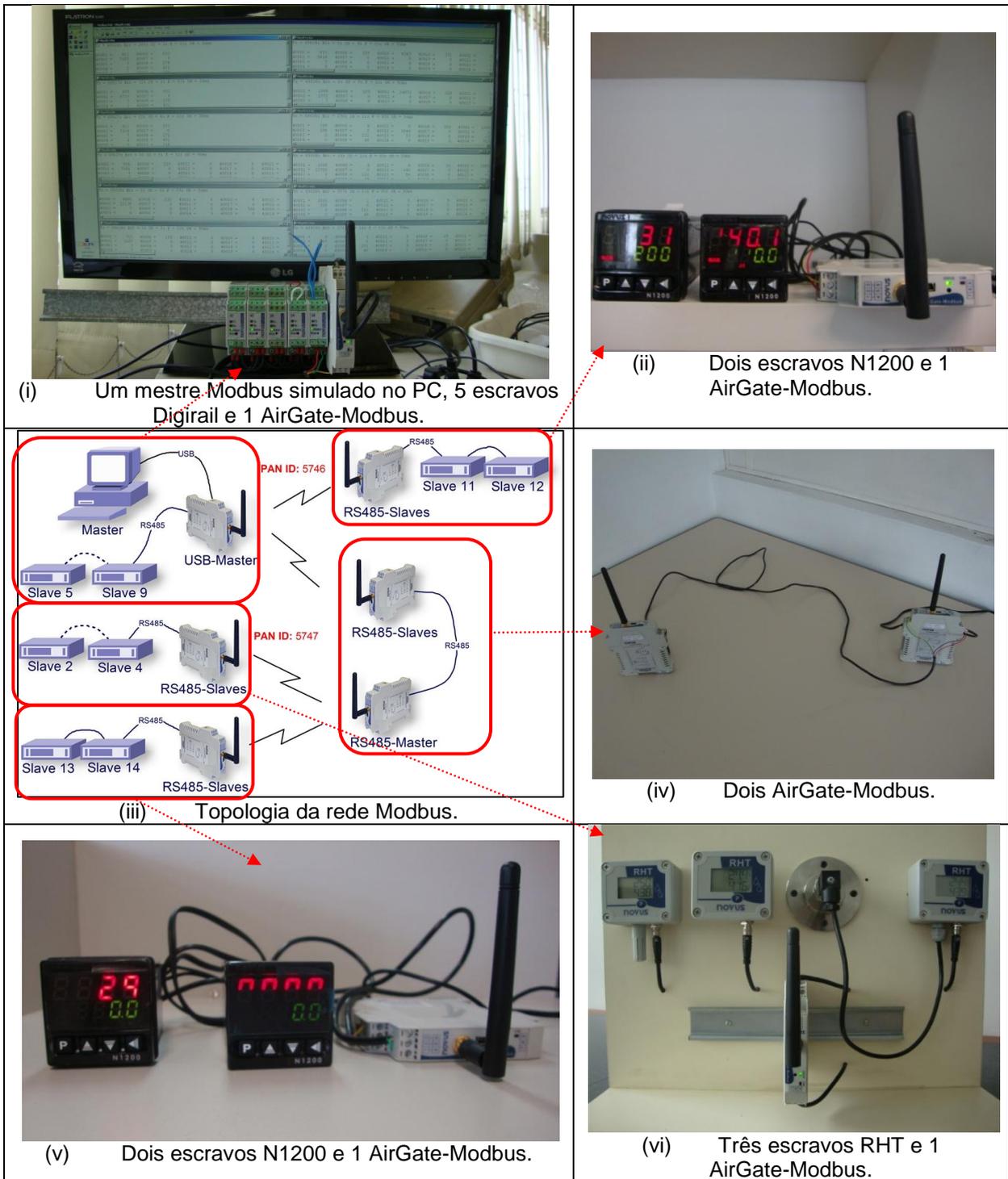
Endereço do Escravo	Profundidade da Rede	Nº de Pacotes Transmitidos	Nº de Registradores lidos	Tamanho dos Pacotes Recebidos (B)	Nº de Erros	Taxa de Erros (%)
2	2	39770	10	26	176	0,44
3	2	39770	10	26	14	0,04
4	2	39770	10	26	7	0,02
5	0	39770	80	166	0	0,00
6	0	39770	80	166	0	0,00
7	0	39770	80	166	0	0,00
8	0	39769	125	256	0	0,00
9	0	39769	125	256	0	0,00
11	1	39769	125	256	160	0,40
12	1	39769	125	256	4	0,01
13	2	39769	125	256	323	0,81
14	2	39768	125	256	13	0,03
<b>Taxa de Erros Média (%):</b> 0,15						
<b>Taxa de Erros Mínima (%):</b>		0,00		<b>Taxa de Erros Máxima (%):</b> 0,81		

Como pode ser observado, escravos com profundidade 0 obtiveram uma taxa de erros de 0 %, enquanto escravos com profundidade 1 e 2 obtiveram taxas de erros variáveis. A taxa de erros média da rede foi de 0,15 %, enquanto a taxa máxima obtida é de 0,81 %. Todos os erros de comunicação são tratados pela camada de aplicação do mestre da rede Modbus com re-solicitação do pacote que não obteve resposta. Assim, a baixa taxa de erros de 0,81 % é mascarada pelo mestre da rede. Portanto, a reduzida taxa de erros máxima de 0,81 % demonstra a validade dos modos de operação *RS485-Master* e *RS485-Slaves* na topologia de rede utilizada neste teste.

#### 5.4. QUARTO TESTE: AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO EM TOPOLOGIA DE REDE 2

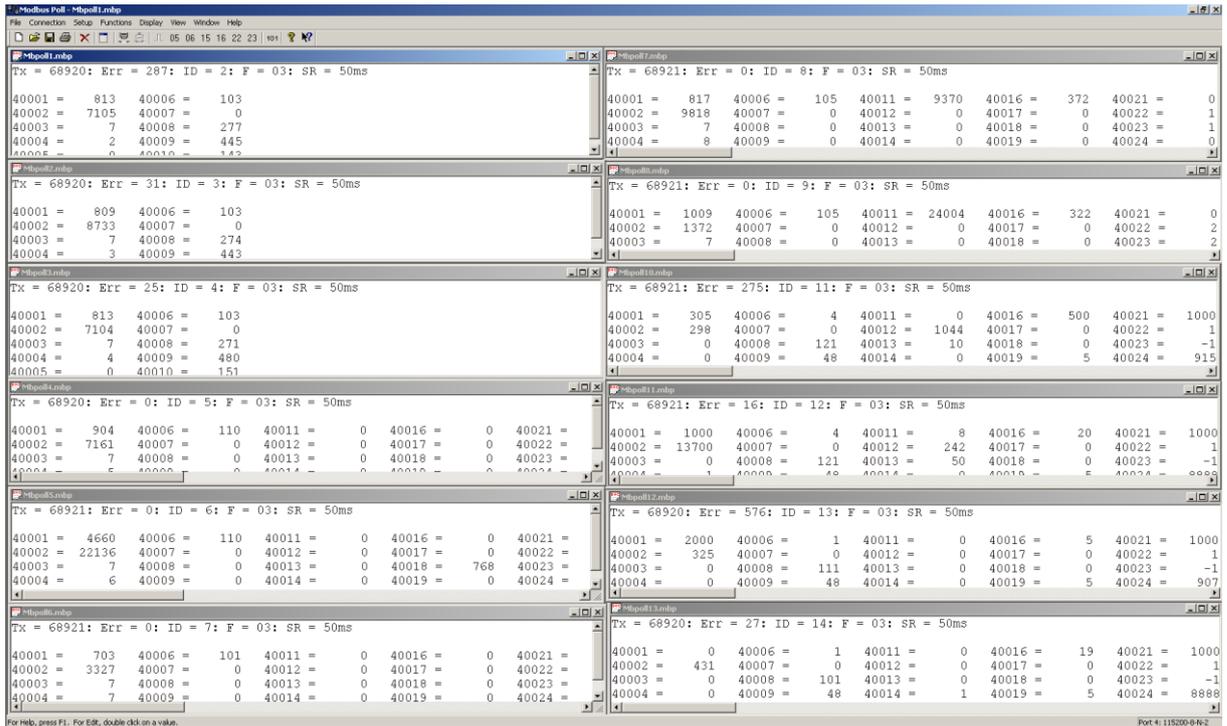
Similar ao teste abordado na Seção 5.3, nesta seção é abordado o teste que tem como objetivo a validação do modo de operação *USB-Master*. Como pode ser observado na Figura 31, são utilizados a mesma topologia de rede e os mesmos equipamentos do terceiro teste. Entretanto, neste quarto teste, o primeiro AirGate-Modbus da rede está operando como *USB-Master*. Ele serve como conversor USB-

RS485 para os escravos locais (profundidade 0), dispensando a necessidade de um conversor USB-RS485.



**Figura 31: Topologia de rede e equipamentos utilizados no quarto teste.**

Como apresentado na Figura 32, foi utilizado o mesmo mestre do terceiro teste, com a mesma configuração.



**Figura 32: Tela do mestre Modbus Poll, utilizado para avaliar no quarto teste a taxa de erros de comunicação na rede Modbus.**

**Tabela 3: Resultado do quarto teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre.**

Endereço do Escravo	Profundidade da Rede	Nº de Pacotes Transmitidos	Nº de Registradores lidos	Tamanho dos Pacotes Recebidos (B)	Nº de Erros	Taxa de Erros (%)	
2	2	68920	10	26	287	0,42	
3	2	68920	10	26	13	0,02	
4	2	68920	10	26	25	0,04	
5	0	68920	80	166	0	0,00	
6	0	68921	80	166	0	0,00	
7	0	68921	80	166	0	0,00	
8	0	68921	125	256	0	0,00	
9	0	68921	125	256	0	0,00	
11	1	68921	125	256	275	0,40	
12	1	68921	125	256	16	0,02	
13	2	68920	125	256	576	0,84	
14	2	68920	125	256	27	0,04	
<b>Taxa de Erros Média (%):</b>		<b>0,15</b>	<b>Taxa de Erros Mínima (%):</b>		<b>0,00</b>	<b>Taxa de Erros Máxima (%):</b>	<b>0,84</b>

Da mesma forma que a Tabela 2, a Tabela 3 apresenta os dados obtidos ao avaliar os resultados do teste abordado nesta Seção. Como pode ser observado ao comparar as duas tabelas, os mesmos equipamentos, em ambos os testes, obtiveram taxas de erros semelhantes. Escravos Digirail, cuja profundidade é 0, não

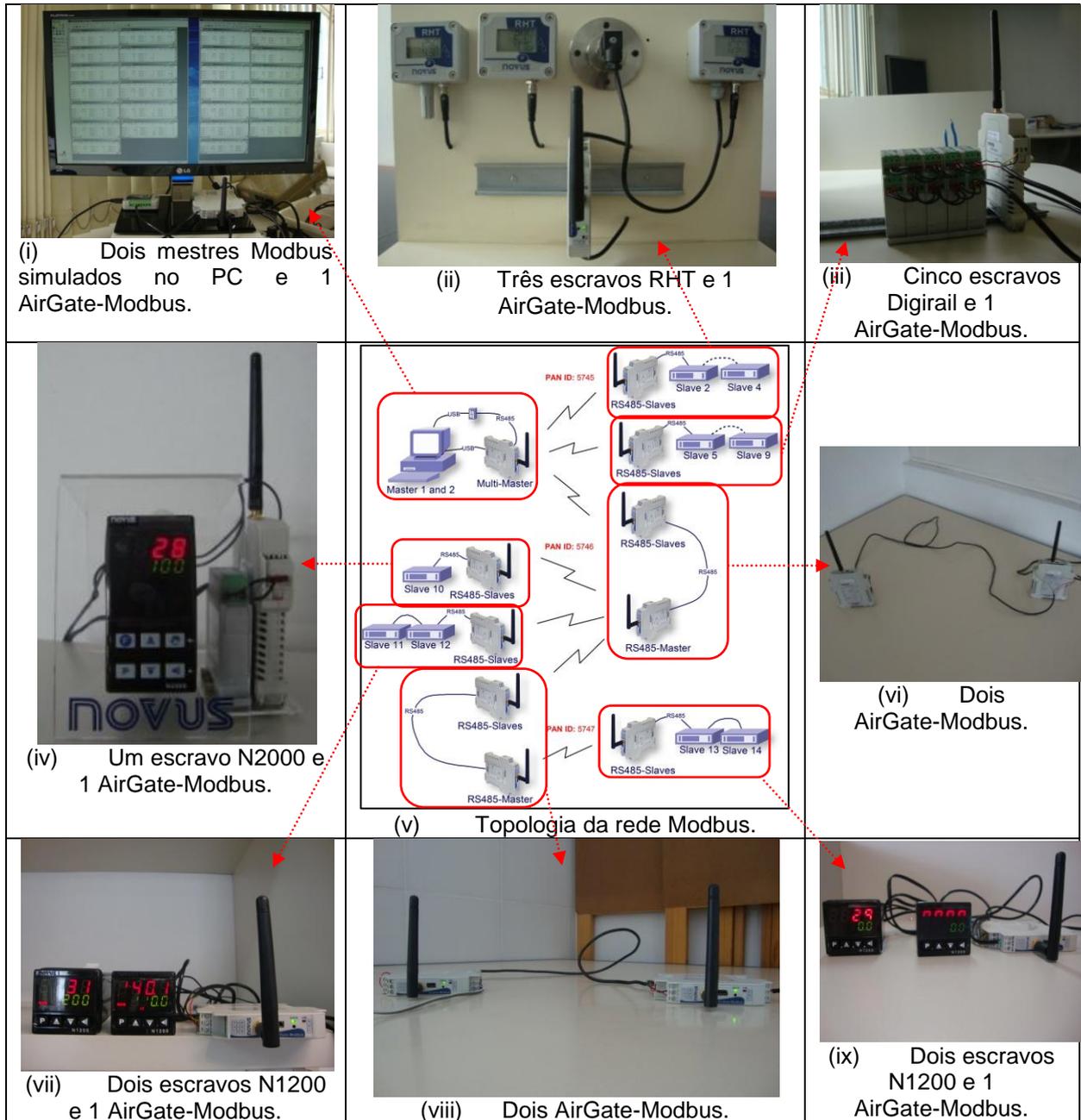
apresentaram nenhum erro de comunicação. O escravo RHT de endereço 2 apresentou taxa de erros de 0,44 % no terceiro teste e taxa de 0,42 % no quarto. O escravo N1200, cujo endereço é 13, apresentou taxa de erros de 0,81 % no terceiro teste, enquanto neste, apresentou taxa de 0,84 %. Os demais equipamentos da rede também apresentaram a mesma similaridade. Portanto, é possível concluir que os mesmos equipamentos se comportaram de maneira semelhante para uma mesma topologia de rede, independente do modo de operação do AirGate-Modbus local ao mestre. Também é possível concluir que não há diferenças entre o mestre se conectar a rede Modbus através de um conversor USB-RS485 ou utilizar a interface USB do AirGate-Modbus, assim validando o modo de operação *USB-Master*.

### 5.5. QUINTO TESTE: AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO EM TOPOLOGIA DE REDE 3

Nesta Seção será abordado o teste que valida a utilização de mais de um mestre na rede Modbus. Aplicação possibilitada pelo modo de operação *Multi-Master* do AirGate-Modbus. Além da utilização de dois mestres na rede, neste teste, como demonstrado na Figura 33 tela (v), a topologia de rede foi acrescida em um nível de profundidade, onde foram utilizados 10 AirGate-Modbus e 13 escravos.

Como pode ser observado na Figura 33 tela (i), um computador foi conectado ao AirGate-Modbus, o qual opera no modo *Multi-Master*, diretamente através da interface USB e indiretamente através de um conversor USB-RS485. Cada uma destas portas de comunicação do computador foi utilizada por uma instância do *software* Modbus Poll, onde cada uma simula um mestre da rede. Isto pode ser visualizado na Figura 34 que apresenta as telas dos mestres Modbus Poll durante a realização do teste. Estes dois mestres solicitam a leitura dos registradores dos escravos localizados nos três níveis de profundidade da rede: (i) No nível 1 estão três segmentos de escravos, onde: (a) No primeiro segmento encontram-se 3 escravos RHT, endereçados de 2 a 4; (b) No segundo segmento localizam-se 5 escravos Digirail, com endereços de 5 a 9; (c) No terceiro segmento estão dois AirGate-Modbus utilizados para expandir o alcance da rede, dando origem a um novo nível de profundidade; (ii) No nível 2 há mais três segmentos de escravos: (a) No primeiro segmento do nível 2 há um escravo N2000 com endereço 10; No

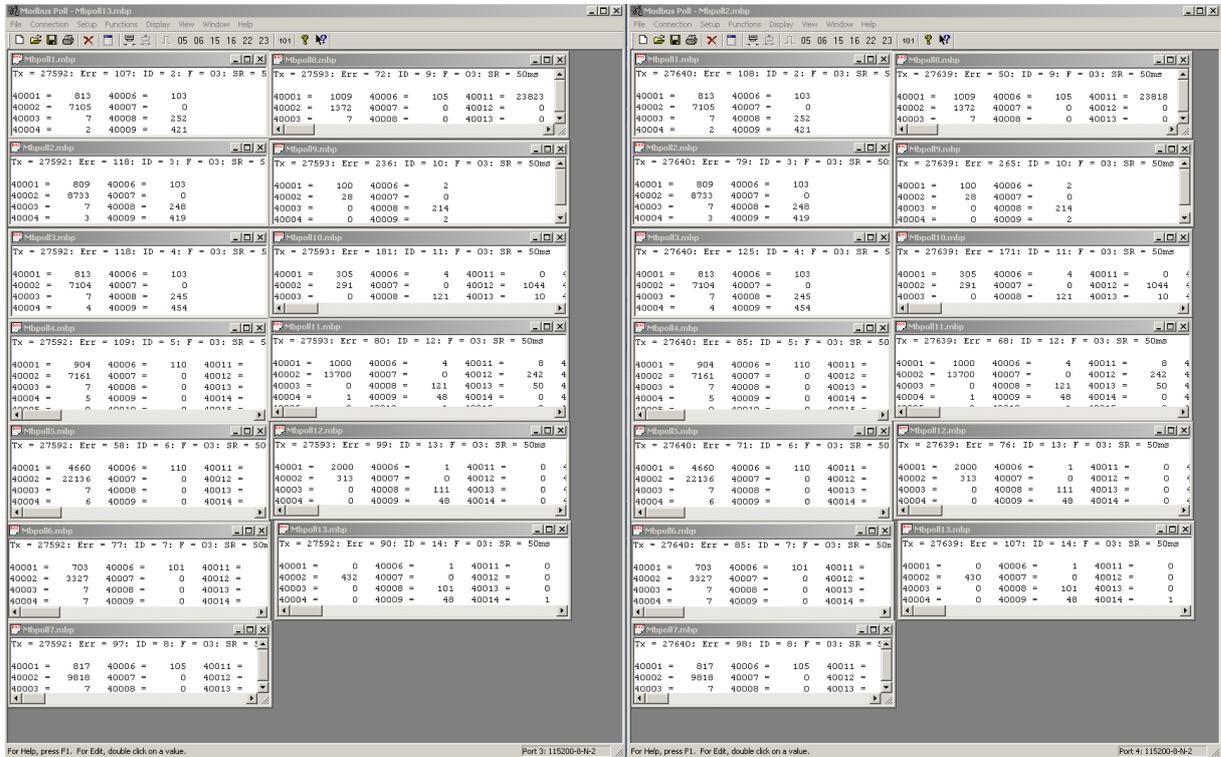
segundo segmento estão dois escravos N1200 endereçados de 11 a 12; No terceiro segmento, um novo par de AirGate-Modbus expande novamente o alcance da rede; e (iii) No nível 3 localizam-se dois escravos N1200 com endereços 13 e 14.



**Figura 33: Topologia de rede e equipamentos utilizados no quinto teste.**

Da mesma forma que a Tabela 2 e a Tabela 3, a Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam a análise dos resultados obtidos no quinto teste. A Tabela 4 apresenta os dados obtidos na tela do mestre conectado a interface USB do AirGate-Modbus (primeira tela da Figura 34), enquanto a Tabela 5 apresenta os do mestre conectado indiretamente a interface RS485 (segunda tela da Figura 34). O número de registradores lidos de cada escravo, em cada solicitação de leitura, por cada um dos

mestres, foi igual ao terceiro e quarto teste, exceto pelo escravo N2000, com endereço 10, que não estava presente. Dele foram lidos 10 registradores, totalizando 26 bytes esperados em cada resposta.



**Figura 34: Telas dos mestres Modbus Poll, utilizados para avaliar no quinto teste a taxa de erros de comunicação na rede Modbus.**

Após a análise dos dados apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, é possível concluir que houve um aumento relativo na taxa de erros quando comparado aos testes apresentados nas Seções 5.2 e 5.3. Entretanto este aumento não foi significativo, visto que a taxa de erros média subiu de 0,15 % para 0,21 % no mestre conectado a interface USB do AirGate-Modbus e 0,18 % no mestre conectado indiretamente a interface RS485, enquanto que a taxa de erros máxima subiu de 0,81 % no terceiro teste e 0,84 % no quarto teste para 0,86 % no mestre conectado a interface USB e 0,96 % no mestre conectado a interface RS485. Portanto, o modo *Multi-Master* do AirGate-Modbus permite a utilização de mais de um mestre em uma rede Modbus com uma baixa taxa de erros.

**Tabela 4: Resultado do quinto teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre conectado a interface USB do AirGate-Modbus.**

Endereço do Escravo	Profundidade da Rede	Nº de Pacotes Transmitidos	Nº de Registradores lidos	Tamanho dos Pacotes Recebidos (B)	Nº de Erros	Taxa de Erros (%)	
2	1	27592	10	26	107	0,39	
3	1	27592	10	26	118	0,43	
4	1	27592	10	26	118	0,43	
5	1	27592	80	166	109	0,40	
6	1	27592	80	166	58	0,21	
7	1	27592	80	166	77	0,28	
8	1	27592	125	256	97	0,35	
9	1	27593	125	256	72	0,26	
10	2	27593	10	26	236	0,86	
11	2	27593	125	256	181	0,66	
12	2	27593	125	256	80	0,29	
13	3	27593	125	256	99	0,36	
14	3	27592	125	256	90	0,33	
<b>Taxa de Erros Média (%):</b>		0,40	<b>Taxa de Erros Mínima (%):</b>		0,21	<b>Taxa de Erros Máxima (%):</b>	0,86

**Tabela 5: Resultado do quinto teste, obtido ao avaliar os dados exibidos na tela do mestre conectado a interface RS485 do AirGate-Modbus.**

Endereço do Escravo	Profundidade da Rede	Nº de Pacotes Transmitidos	Nº de Registradores lidos	Tamanho dos Pacotes Recebidos (B)	Nº de Erros	Taxa de Erros (%)	
2	1	27640	10	26	108	0,39	
3	1	27640	10	26	79	0,29	
4	1	27640	10	26	125	0,45	
5	1	27640	80	166	85	0,31	
6	1	27640	80	166	71	0,26	
7	1	27640	80	166	85	0,31	
8	1	27640	125	256	98	0,35	
9	1	27639	125	256	50	0,18	
10	2	27639	10	26	265	0,96	
11	2	27639	125	256	171	0,62	
12	2	27639	125	256	68	0,25	
13	3	27639	125	256	76	0,27	
14	3	27639	125	256	107	0,39	
<b>Taxa de Erros Média (%):</b>		0,39	<b>Taxa de Erros Mínima (%):</b>		0,18	<b>Taxa de Erros Máxima (%):</b>	0,96

## 6. CONCLUSÕES

As inovações propostas neste trabalho agregaram valores ao consolidado protocolo Modbus. A solução desenvolvida permite não só a utilização em novos projetos de automação industrial, mas também a manutenção de redes Modbus já existentes. A facilidade de configuração, as múltiplas interfaces de comunicação e os diversificados modos de operação permitem que o *gateway* desenvolvido atenda inúmeras aplicações. A criação de uma solução híbrida de comunicação, que possibilita que redes Modbus desfrutem dos benefícios da comunicação sem fio, assim como melhorias feitas no protocolo Modbus, como a Multiplexação de mestres, tornaram o protocolo Modbus mais atrativo. Deste modo, o trabalho desenvolvido contribuiu em diversos aspectos para inovações nas redes de automação industrial.

Baseado nos testes realizados, os quais foram descritos no Capítulo 5, verificou-se que as inovações propostas foram satisfatórias. Os resultados dos testes demonstraram uma baixa taxa de erros de comunicação, evidenciando que a solução desenvolvida atende satisfatoriamente aos requisitos de robustez de uma rede de comunicação industrial.

### 6.1. TRABALHOS FUTUROS

Além da comunicação sem fio, o mercado carece de equipamentos sensores que operam por anos com bateria. O AirGate-Modbus desenvolvido não possui estes sensores, nem opera com bateria. Visando à melhoria contínua deste sistema, trabalhos futuros irão abordar o desenvolvimento destes equipamentos.

### 6.2. ARTIGO PUBLICADO

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi publicado o artigo **Soluções Inovadoras para Implementação Wireless Modbus** [35] no 15º Congresso Internacional e Exposição de Automação, Sistemas e Instrumentação [36]. Este artigo possui uma abordagem técnica, de mesmo cunho, porém resumido, do trabalho aqui desenvolvido.

## REFERÊNCIAS

- [1] MODBUS-IDA. **Modbus over serial line specification and implementation guide v1.02**. Edição de 2006. Disponível em <[www.modbus-ida.org/docs/Modbus\\_over\\_serial\\_line\\_V1\\_02.pdf](http://www.modbus-ida.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf)>. Acesso em jul. 2011.
- [2] HART COMMUNICATION FOUNDATION. **WirelessHART Overview**. Disponível em: <[www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless\\_overview.html](http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_overview.html)>. Acesso em ago. 2011.
- [3] INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ISA-100.11a-2009 Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications**. Disponível em: <[www.isa.org/Template.cfm?Section=Standards2&template=/Ecommerce/ProductDisplay.cfm&ProductID=10766](http://www.isa.org/Template.cfm?Section=Standards2&template=/Ecommerce/ProductDisplay.cfm&ProductID=10766)>. Acesso em ago. 2011.
- [4] ZIGBEE ALLIANCE. **ZigBee Specification Overview**. Disponível em: <[www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx](http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx)>. Acesso em ago. 2011.
- [5] 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 jul. 2011.
- [6] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **Histórico**. Disponível em: <[www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=916099&SecaoID=648364](http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=916099&SecaoID=648364)>. Acesso em ago. 2011.
- [7] PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. **A Universidade**. Disponível em: <[www3.pucrs.br/portal/page/portal/pucrs/Capa/AUniversidade](http://www3.pucrs.br/portal/page/portal/pucrs/Capa/AUniversidade)>. Acesso em ago. 2011.
- [8] HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HART Protocol Revision 7.1**. HART Communication Foundation, Austin, USA, 2004.
- [9] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **AirGate-Modbus**. Disponível em: <[www.novus.com.br/downloads/Arquivos/v11x\\_manual\\_airgate-modbus\\_portuguese\\_a4.pdf](http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/v11x_manual_airgate-modbus_portuguese_a4.pdf)>. Acesso em out. 2011.
- [10] F. H. RAMÍREZ LEYVA, J. P. ACEVEDO CUELLAR, R. G. MALDONADO BASILIO, E. ESPINOSA JUSTO. **Wireless System for Electrical Networks Testing Based on MODBUS Protocol**. International Conference on Electronics, Communications and Computers, pp. 58-62, Feb. 2004.
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW Accelerates Productivity**. Disponível em: <[www.ni.com/labview/](http://www.ni.com/labview/)>. Acesso em nov. 2011.
- [12] SIMON CARLSEN, AMUND SKAVHAUG, STIG PETERSEN E PAULA DOYLE. **Using Wireless Sensor Networks to Enable Increased Oil Recovery**. IEEE

International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 1039-1048, 2008.

- [13] YUHUANG ZHENG. **MZ: An Ubiquitous Communication Protocol in Industrial Environment**. International Conference on E-Business and Information System Security, (EBISS), pp. 1-4, 2009.
- [14] ISO/IEC 7498-1. **Information technology -- Open Systems Interconnection – Basic Reference: The Basic Model**. Edição de 1994. Disponível em: <[http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=20269](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=20269)> Acesso em ago. 2011.
- [15] MODBUS-IDA. **Modbus application protocol specification v1.1b**. Edição de 2006. Disponível em: <[www.modbus-ida.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b.pdf](http://www.modbus-ida.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf)>. Acesso em jul. 2011.
- [16] INFORMATION SCIENCES INSTITUTE - UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. **Transmission control protocol - Darpa internet program - Protocol specification**. Edição de 1981. Disponível em: <[www.ietf.org/rfc/rfc793.txt](http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt)>. Acesso em ago. 2011.
- [17] IEEE STANDARD. **Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD)**. Disponível em: <[standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html](http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html)>. Acesso em ago. 2011.
- [18] FREESCALE SEMICONDUCTOR. **MC1322x**. Disponível em: <[www.freescale.com/files/rf\\_if/doc/data\\_sheet/MC1322x.pdf](http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC1322x.pdf)>. Acesso em out. 2011.
- [19] FREESCALE SEMICONDUCTOR. **About Us**. Disponível em: <[www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=COMPANY\\_INFO\\_HOME#](http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=COMPANY_INFO_HOME#)>. Acesso em set. 2011.
- [20] FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LTD. **FT232BL/BQ USB UART IC Datasheet Version 2**. Disponível em: <[www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232BL\\_BQ.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232BL_BQ.pdf)>. Acesso em out. 2011.
- [21] FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LTD. **Corporate Information**. Disponível em: <[www.ftdichip.com/FTCorporate.htm](http://www.ftdichip.com/FTCorporate.htm)>. Acesso em out. 2011.
- [22] ANALOG DEVICES. **ADuM5000**. Disponível em: <[www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADuM5000.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuM5000.pdf)>. Acesso em out. 2011.
- [23] ANALOG DEVICES. **ADuM1300/ADuM1301**. Disponível em: <[www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADuM1300\\_1301.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuM1300_1301.pdf)>. Acesso em out. 2011.
- [24] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **SuperView**. Disponível em: <[www.superview.com.br/site/default.asp?TroncoID=648306&SecaID=0&SubsecaID=0](http://www.superview.com.br/site/default.asp?TroncoID=648306&SecaID=0&SubsecaID=0)>. Acesso em out. 2011.

- [25] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **FieldLogger**. Disponível em: <[www.fieldlogger.com.br/site/default.asp?TroncoID=648306&SecaoID=0&SubsecaoID=0](http://www.fieldlogger.com.br/site/default.asp?TroncoID=648306&SecaoID=0&SubsecaoID=0)>. Acesso em out. 2011.
- [26] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **Controlador Universal de Processos N1200 - PID auto-adaptativo**. Disponível em: <[www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=946383&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout\\_produto.asp&ProdutoID=907280](http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=946383&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=907280)>. Acesso em out. 2011.
- [27] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **Controlador Universal N2000**. Disponível em: <[www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=946383&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout\\_produto.asp&ProdutoID=715305](http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=946383&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=715305)>. Acesso em out. 2011.
- [28] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **N1500G + RT 4-20 MA + RS485**. Disponível em: <[www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=946383&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout\\_produto.asp&ProdutoID=164637](http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=946383&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=164637)>. Acesso em out. 2011.
- [29] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. **DigiRail - Condicionador de Sinais**. Disponível em: <[www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=607370&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout\\_produto.asp&ProdutoID=082818](http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=607370&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=082818)>. Acesso em out. 2011.
- [30] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. Transmissor de Temperatura e Umidade - RHT MODBUS. Disponível em: <[www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=738360&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout\\_produto.asp&ProdutoID=634532](http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=738360&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=634532)>. Acesso em out. 2011.
- [31] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Certificado de Homologação**. Disponível em: <[sistemas.anatel.gov.br/sgch/HistoricoCertificado/Homologacao.asp?NumRFGCT=163611&idtHistoricoCert=44535](http://sistemas.anatel.gov.br/sgch/HistoricoCertificado/Homologacao.asp?NumRFGCT=163611&idtHistoricoCert=44535)>. Acesso em out. 2011.
- [32] MODBUS TOOLS. **Modbus Poll**. Disponível em: <[www.modbustools.com/modbus\\_poll.asp](http://www.modbustools.com/modbus_poll.asp)>. Acesso em out. 2011.
- [33] WIKIPEDIA. **Link budget**. Disponível em: <[en.wikipedia.org/wiki/Link\\_budget](http://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget)>. Acesso em out. 2011.
- [34] WIKIPEDIA. **Fresnel Zone**. Disponível em: <[en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_zone](http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone)>. Acesso em out. 2011.
- [35] SIEBEN G. FELIPE; GUARESE M. GIULIANO B.; DILLENBURG R. MARCOS; **Soluções Inovadoras para Implementação Wireless Modbus**. Disponível em: <[www.isadistrito4.org/artigos.php](http://www.isadistrito4.org/artigos.php)>. Acesso em dez. 2011.
- [36] ISA DISTRITO 4. **Brazil Automation ISA 2011**. Disponível em: <[www.brazilautomation.com.br/2011/](http://www.brazilautomation.com.br/2011/)>. Acesso em nov. 2011.