

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**ELON CRIS PENTEADO HARA**

**INFRAESTRUTURA DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR REDES DE SENSORES  
SEM FIOS E BARRAMENTOS PARA MONITORAMENTO DO CONSUMO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2013**

**ELON CRIS PENTEADO HARA**

**INFRAESTRUTURA DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR REDES DE  
SENSORES SEM FIOS E BARRAMENTOS PARA MONITORAMENTO  
DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de automação e sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Cardoso Castaldo.

**CURITIBA**

**2013**

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

H254i Hara, Elon Cris Penteado  
2013 Infraestrutura de aquisição de dados por redes de  
sensores sem fios e barramentos para monitoramento  
do consumo de energia elétrica / Elon Cris Penteado  
Hara.-- 2013.  
140 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2013  
Bibliografia: f. 120-129

1. Energia elétrica - Consumo - Monitoramento. 2.  
Redes de sensores sem fio. 3. Aquisição de dados.  
4. Sistemas híbridos. 5. Arquitetura peer-to-peer  
(Redes de computadores). 6. Sistemas embarcados (Computadores).  
7. Redes elétricas inteligentes. 8. Instrumentos de  
medição - Testes. 9. Engenharia elétrica - Dissertações.  
I. Castaldo, Fernando Cardoso. II. Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

---

CDD 22 -- 621.3

---

**Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba**

Título da Dissertação Nº. 651

**“Infraestrutura de aquisição de dados por redes de sensores sem fios e barramentos para monitoramento do consumo de energia elétrica.”**

por

**Elon Cris Penteado Hara**

**Orientador:** Prof. Dr. Fernando Cardoso Castaldo

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 14h do dia 18 de dezembro de 2013. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

---

Prof. Dr. Fernando Cardoso Castaldo  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Wanderley Veiga  
(UFPR)

---

Prof. Dr. Keiko Verônica Ono Fonseca  
(UTFPR)

Visto da coordenação:

---

**Prof. Ricardo Lüders, Dr.**  
(Coordenador do CPGEI)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

## **AGRADECIMENTOS**

Aos colaboradores da UTE-Norte Fluminense, pela atenciosa recepção e acompanhamento dos trabalhos em suas instalações.

A Jordão Engenharia pela confiança depositada.

Ao orientador Prof. Dr. Fernando Cardoso Castaldo, pela oportunidade e pela parceria estabelecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colegas do mestrado, pelo apoio e por compartilharam seus conhecimentos e companhia.

Aos meus colegas de laboratório, amigos e familiares sem o apoio dos quais teria sido muito difícil superar esse desafio.

A CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

## RESUMO

HARA, Elon Cris Penteado. **Infraestrutura de aquisição de dados por redes de sensores sem fios e barramentos para monitoramento do consumo de energia elétrica**. 2013. 140 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Um sistema monitor de consumo de energia elétrica para setores internos de unidades consumidoras foi desenvolvido para um projeto de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O sistema utiliza Redes de Sensores sem Fios (RSSF) alocadas em pontos estratégicos da rede de energia elétrica e conectadas por radioenlace a um banco de dados remoto. Os sensores fornecem dados que são registrados e posteriormente acessados por um aplicativo que apresenta informativos ao usuários por meio de alertas, relatórios e interfaces gráficas. As RSSF são empregadas em sistemas de aquisição de sinais de múltiplos sensores dispersos em grandes áreas, em redes escalonáveis quanto ao número de dispositivos e flexíveis quanto a topologias, que podem ser formadas automaticamente em função das melhores rotas ou das rotas disponíveis em um dado momento. As RSSF também têm sido úteis em sistemas relacionados ao conceito da *Smart Grid*, oferecendo uma ferramenta “inteligente”, que permite integrar informações colhidas a partir de cargas elétricas nas unidades consumidoras ao sistema de geração e distribuição de energia, com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema nos picos de demanda. Apesar da disponibilidade tecnológicas, dispositivos comerciais ainda são escassos no mercado, resultando em custos finais elevados para sistemas de monitoramento de consumo. Assim, para preencher esta lacuna foi desenvolvida uma configuração de infraestrutura de baixo custo, com módulos sensores interligados por barramentos I2C com uma memória compartilhada, formando um cluster que é ligado em RSSF capaz de formar redes em malha por meio do protocolo Miwi P2P (*Peer to Peer*). Como múltiplos sensores ocupam uma única antena para enviar dados, os custos são minimizados. Outro diferencial do método é dar acesso a sensores concentrados dentro de armários e gabinetes metálicos, que de outra forma não poderiam ser conectados em uma RSSF.

**Palavras-chave:** Sistemas de gerenciamento do consumo. Redes de Sensores Sem Fios. Sistema Híbrido com Radioenlace e Barramento. Rotas em Comunicação P2P. Sistemas Embarcados.

## ABSTRACT

HARA, Elon Cris Penteado. **Infrastructure data acquisition with wireless sensor networks and buses for power consumption monitoring**. 2013. 140 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática industrial, Federal Technology University – Paraná. Curitiba 2013.

An electric power consumption monitoring system for indoor sectors of costumers was developed to an ANEELR&D project. The system uses wireless sensor networks (WSN) placed at strategic points of the power grid and connected by radio link to a remote database. The sensor provide data, that are recorded and later accessed by a software presenting information to end users through alerts, reports and graphical interfaces. The WSN systems are used to acquire signals from multiple sensors scattered over large areas, with number of devices scalable in networks and flexible topologies, which can be formed automatically choosing the best routes or available routes. The WSNs have been useful in systems related with smart grid, offering a "smart" tool that allows collect information from electric loads in consumer units to the system of generation and distribution of energy, with the aim of improving system performance at peak demand by an electric utility. Despite the availability of technological, commercial devices are still scarce in the Brazilian market, resulting in high costs for final consumption monitoring systems. Therefore, to fill a gap a new configuration was developed presenting an infrastructure affordably with sensor modules connected by I2C bus with a shared memory forming clusters that are connected in WSN but can work in mesh networks through miwi P2P (Peer to Peer) protocol. With multiple sensors sharing a single antenna to send data, costs are reduced. Another exclusive feature of this method is to give access to sensors inside of cabinets and enclosures, which otherwise would not connected to a WSN.

**Keywords:** Energy Management Systems. Wireless Sensor Network. Hybrid Systems with Wireless and Buses Communication. Miwi P2P Routing System. Embedded Systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Economia potencial x geração de energia em 2019.....	17
Figura 2 – Requisitos para medidores pela resolução 507.....	21
Figura 3 – Conexão entre pessoas, informações e máquinas.....	23
Figura 4 – Módulos básicos que compõe uma RSSF.....	25
Figura 5 – Módulos básicos que compõe uma RSSF.....	28
Figura 6 – Pilha de protocolos Zigbee.....	30
Figura 7 – Pilha de protocolos Miwi.....	34
Figura 8 – Pilha de protocolos Zigbee IP e SEP 2.0.....	36
Figura 9 – Triângulo das potências.....	39
Figura 10 – RSSF em topologia tree-cluster.....	49
Figura 11 – <i>Software</i> Netfab e peças produzidas por FDM.....	53
Figura 12 – Esquema de conexões do barramento de Sensores.....	58
Figura 13 – Modelagem em Rdp do barramento de Sensores.....	59
Figura 14 – Sequência de registros na memória compartilhada.....	61
Figura 15 – Número de Sensores e intervalo entre registros.....	62
Figura 16 – Roteadores nos galpões da usina.....	64
Figura 17 – Número de buscas por tentativa e erro.....	69
Figura 18 – Método de busca baseado em algoritmo BAI.....	70
Figura 19 – Número de buscas com algoritmo BAI.....	71
Figura 20 – Relação entre topologias e número de nós.....	72
Figura 21 – Tabela de tempo para busca por BPI.....	73
Figura 22 – Método de busca integrada com requisição de dados.....	74
Figura 23 – Fluxograma parcial do funcionamento do Módulo Gerente.....	77
Figura 24 – Aplicativo Realterm em requisição de dados.....	80
Figura 25 – Esquemático do sistema híbrido de RSSF/barramento.....	83
Figura 26 – Infraestrutura de testes no Bloco Q da UTFPR.....	88
Figura 27 – Frequência de envios e recepções.....	96
Figura 28 – Frequência de envios e recepções em 2 saltos.....	97
Figura 29 – Falhas observadas em 40 séries de 2000 envios.....	100
Figura 30 – Média das falhas de envios por tamanho da mensagem.....	100
Figura 31 – Histograma de falhas no experimento com 1 salto e 2 nós.....	102

Figura 32 – Histograma de falhas no experimento com 2 saltos e 3 nós ...	103
Figura 33 – Formação das rotas no <i>Sniffer Zena</i> .....	104
Figura 34 – Alcance e posicionamento dos Módulos .....	106
Figura 35 – Dados coletados pelos sensores 3, 6 e 12 em um dia .....	108
Figura 36 – Dados registrados em 3 meses pelos sensores 6, 9 e 11 .....	109

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Módulos transceptores de rádio frequência MA e MB .....	29
Fotografia 2 – Ambiente externo da usina.....	46
Fotografia 3 – Módulos Sensores: detalhes internos e externos .....	51
Fotografia 4 – Módulos de ZAMAC e pintura eletrostática .....	52
Fotografia 5 – Quadros elétricos na usina Termomacaé.....	63
Fotografia 6 – Roteadores nas janelas dos galpões.....	64
Fotografia 7 – <i>Hardware</i> do Módulo Coordenador e antena MB .....	78
Fotografia 8 – Ensaio de medição dos intervalos entre envios.....	85
Fotografia 9 – Módulo Gerente e antena MA.....	87
Fotografia 10 – <i>Sniffer</i> Zena da Microchip.....	88
Fotografia 11 – Conjunto de Módulos utilizados no teste qualitativo .....	89
Fotografia 12 – Temperatura inicial, corrente e tensão do circuito Gerente. 92	
Fotografia 13 – Arranjo do ensaio de temperatura na superfície do circuito. 93	
Fotografia 14 – Instalação com dois adaptadores e cabo longo.....	94
Fotografia 15 – Cabos, 5 adaptadores e osciloscópio nas vias I2C. ....	95
Fotografia 16 – Infraestrutura de testes no Bloco Q da UTFPR .....	105
Fotografia 17 – Instalação dos Gerentes e alicates de 10 mm.....	107
Fotografia 18 – Instalação dos Gerentes e alicates de 25 mm.....	110
Fotografia 19 – Reposicionamento do roteador externo.....	111
Fotografia 20 – Alinhamento dos Gerentes e roteadores internos na UCB 111	
Fotografia 21 – Aquecimento do circuito e caixa plástica até 103°C .....	112
Fotografia 22 – Reguladores de 5 V e de 3.3 V funcionando em 80°C .....	113
Fotografia 23 – Capacitância do barramento I2C, medindo 1140,4 pF. ....	114
Fotografia 24 – Borda de subida da via SCL, lenta (esq.) e normal (dir.)... 114	
Fotografia 25 – Via SDA em falha (esq.) e normal (dir.).....	115

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Solução de projeto com matriz acoplada .....	55
Quadro 2 – Solução de projeto ideal, com matriz desacoplada.....	57
Quadro 3 – Cabeçalho no quadro de mensagens, com 4 <i>bytes</i> para rotas. .	67
Quadro 4 – Formato padrão dos comandos e requisição de dados .....	79
Quadro 5 – Comandos e respostas esperadas .....	79
Quadro 6 – Relação de possíveis erros do coordenador codificados .....	81
Quadro 7 – Troca de mensagens entre 2 nós (1 salto).....	98
Quadro 8 – Troca de mensagens entre três nós (2 saltos).....	99
Quadro 9 – Dados estatísticos dos experimentos 1 e 2.....	101
Quadro 10 – Dados estatísticos do experimento com 1 salto.....	102
Quadro 11 – Dados estatísticos do experimento com 2 saltos .....	102

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.3	MOTIVAÇÃO .....	17
1.4	DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	19
2.2	PRIMEIROS SISTEMAS DE MEDIÇÃO REMOTA .....	19
2.3	MEDIDORES AMR E AMI .....	19
2.4	<i>SMART METER</i> .....	20
2.5	SISTEMA DE MEDIÇÃO NO BRASIL .....	20
2.6	MEDIDORES INTERNOS DE CONSUMO DE ENERGIA .....	22
2.7	INFRAESTRUTURAS COLETORAS DE DADOS .....	23
2.7.1	Características das RSSFs .....	26
2.7.2	<i>Hardware</i> para Desenvolvimento de RSSFs .....	28
2.7.3	Protocolos de Comunicação para RSSF .....	30
2.7.3.1	IEEE 802.15.4 .....	30
2.7.3.2	Smart Bluetooth .....	31
2.7.3.3	DASH7 .....	32
2.7.3.4	IPv6 over Low Power WPAN (6LoWPAN) .....	33
2.7.3.5	Outros protocolos proprietários .....	34
2.7.3.6	Zigbee IP e Smart Energy Profile: SEP 2.0 .....	35
2.8	GERENCIAMENTO DE ENERGIA .....	38
2.8.1	Ações Administrativas e Metas do Consumo .....	39
2.8.2	Aproveitamento Eficiente da Energia Elétrica .....	40
2.9	CONCLUSÃO .....	41
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>43</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	43
3.2	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....	43
3.3	NECESSIDADES E RESTRIÇÕES DE PROJETO .....	44

3.3.1	Identificação das Necessidades de Projeto.....	45
3.3.2	Identificação das Restrições de Projeto. ....	46
3.3.3	Análise das Restrições de Projeto. ....	47
3.4	PROBLEMAS E SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS .....	48
3.4.1	Topologias para Infraestrutura Coletora de Dados por RSSF.....	48
3.4.2	Módulos Sensores para Ambientes Blindados a RF .....	50
3.4.2.1	Medições não invasivas de corrente. ....	50
3.4.2.2	Mecânica para os Módulos Sensores.....	51
3.4.2.3	Protótipos produzidos pela tecnologia de impressão 3D.....	52
3.4.2.4	Barramento serial para Sensores. ....	53
3.4.2.5	Endereçamento convencional para barramento I2C. ....	54
3.4.2.6	Acesso controlado por hardware ao barramento I2C. ....	56
3.4.2.7	Estrutura do hardware e método de acesso ao barramento I2C. .	57
3.4.2.8	Vetor de dados na memória I2C.....	60
3.4.2.9	Dimensionamento do barramento compartilhado. ....	61
3.4.3	Módulos Gerentes como Roteadores.....	63
3.4.3.1	Transmissão por RF e Módulos transceptores .....	65
3.4.3.2	Miwi P2P e resolução automática de rotas.....	66
3.4.3.3	Quadro de mensagens Miwi P2P com cabeçalho de rotas .....	66
3.4.3.4	Descoberta e manutenção de rotas em uma rede Miwi P2P .....	68
3.4.3.5	Método de busca baseado no algoritmo BAI .....	70
3.4.3.6	Método de busca por propagação inversa, BPI.....	72
3.4.3.7	Método de busca integrada .....	74
3.4.3.8	Requisições de dados agregados .....	75
3.4.3.9	Módulo Gerente e outras funcionalidades .....	76
3.4.4	Módulo Coordenador e Banco de Dados .....	78
3.5	CONCLUSÃO .....	82
<b>4</b>	<b>ENSAIOS, IMPLANTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL ...</b>	<b>84</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	84
4.2	ENSAIOS DE BANCADA.....	84
4.2.1	Frequência de Troca de Mensagens.....	84
4.2.2	Medição da Qualidade do Sinal por RSSI.....	85
4.2.3	Taxa de Envios de Dados .....	85
4.2.4	Contabilização de Perdas de Pacotes .....	86

4.2.5	Formação de Rotas com Miwi P2P .....	87
4.3	TESTES DE CAMPO .....	88
4.3.1	Rede Miwi na UTFPR .....	88
4.3.2	Testes da Rede Miwi na Usina.....	89
4.3.3	Primeira instalação do sistema .....	90
4.3.4	Segunda instalação do sistema .....	90
4.3.5	Ajustes e atualizações finais. ....	91
4.3.5.1	Problemas detectados e possíveis causas.....	91
4.3.5.2	Reposicionamento dos Módulos e Gerentes .....	92
4.3.5.3	Ensaio de aquecimento nos Módulos e fontes .....	92
4.3.5.4	Revisão do firmware.....	93
4.3.5.5	Ensaio com o barramento I2C: .....	94
4.4	CONCLUSÃO .....	95
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>96</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	96
5.2	ENSAIOS DE BANCADA .....	96
5.2.1	Frequência de Envios e Recepções de Mensagens .....	96
5.2.2	Medição da Qualidade do Sinal por RSSI.....	97
5.2.3	Taxa de Envios de Dados .....	97
5.2.4	Contabilização de Perdas de Mensagens .....	99
5.2.5	Formação de Rotas com Miwi P2P .....	103
5.3	TESTES DE CAMPO .....	104
5.3.1	Rede Miwi na UTFPR .....	104
5.3.2	Testes da Rede Miwi na Usina.....	106
5.3.3	Primeira Instalação do Sistema.....	107
5.3.4	Segunda Instalação do Sistema.....	110
5.3.5	Revisão do Sistema Completo e Atualizações Finais. ....	110
5.3.5.1	Intervenções Corretivas e Ensaio .....	111
5.3.5.2	Ensaio de aquecimento nos Módulos e fontes .....	112
5.3.5.3	Revisão do firmware.....	113
5.3.5.4	Ensaio com o barramento I2C .....	113
5.3.5.5	Conclusões da revisão no sistema .....	115
5.4	CONCLUSÃO .....	116
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>117</b>

6.1	MEDIDORES DE CONSUMO.....	117
6.2	REQUISITOS E PARÂMETROS DE PROJETO.....	117
6.3	SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS.....	118
6.4	ENSAIOS E TESTES DE CAMPO.....	118
6.5	RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS.....	119
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE A - SÍNTESE DOS REQUISITOS E PARÂMETROS .....</b>	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE B - RESUMO DA PATENTE.....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas distribuídos, ubíquos ou pervasivos, constituídos por computadores e dispositivos embarcados conectados em redes permeiam há algum tempo as atividades industriais, comerciais e cada vez mais as atividades domésticas e pessoais neste início de século. A atual era da informação representou para a sociedade um avanço equivalente ao domínio da agricultura e da industrialização, e neste contexto o gerenciamento eficiente das informações disponíveis é um diferencial para que as empresas deste século se mantenham competitivas (TOFFLER, 1980). No século 21, os computadores estão cada vez mais conectados em redes invisíveis aos usuários, por ondas eletromagnéticas que tornam a computação ubíqua, disponibilizando de forma simples, informações em qualquer hora e local (WEISER, 1991).

O progresso da indústria dos semicondutores gera dispositivos eletrônicos cada vez mais sofisticados, pequenos, baratos e recentemente também capazes de conexão em redes. Estes dispositivos alavancaram progressos em comunicações digitais, por várias demandas que fizeram surgir protocolos de redes com as mais diversas características, confirmando as previsões de Toffler e Weiser de um mundo no qual a informação tem tanto valor quanto os meios de produção tiveram no século passado, e que as informações poderão ser acessadas em qualquer hora e local, por meio de dispositivos interligados por redes.

A *Internet* é o melhor exemplo atual de sistema distribuído de informações que podem ser compartilhadas. Se a *Internet* conecta computadores pessoais em redes, os avanços das telecomunicações habilitam dispositivos móveis a se conectarem em redes sem fios, pela telefonia celular e outras tecnologias que mais recentemente estão permitindo interligar dispositivos de uso mais cotidiano (URBANSKI *et al*, 2009).

Na indústria, o uso de tecnologias de identificação por rádio frequência (RFID) associado a sistemas integrados de gestão empresarial (SIGE) permite que um produto seja rastreado durante todo o seu ciclo de vida, desde a logística dos diversos componentes na cadeia de distribuição, produção, comércio, até sua reciclagem (ROH, 2009). Na agropecuária, a legislação de alguns países exige que a procedência das carnes possa ser verificada nas gôndolas dos supermercados, exigindo soluções de tecnologia da informação que forneçam os dados do animal durante sua vida,

outros alimentos também tendem para exigências de rastreabilidade na cadeia de suprimento (REGATTIERI, 2007).

O processo de interligar dispositivos já está atingido até equipamentos e objetos do uso cotidiano, que conectados em redes podem ter novas funcionalidades, tornando as atividades mais práticas ou automáticas. A tecnologia pode gerar novos modelos de negócio, melhorar a eficiência com que as tarefas são realizadas, e alterar hábitos e comportamentos da sociedade (MEHRJERDI, 2011). As áreas da segurança, transporte, logística e saúde oferecem muitas novas oportunidades de inovação, bem como a área da geração e distribuição de energia, água e gás. Uma possível aplicação é o gerenciamento do consumo de energia elétrica em uma unidade consumidora (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Neste contexto, a proposta deste trabalho é apresentar um estudo sobre tecnologias de telemetria em redes, aplicado ao desenvolvimento de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que teve como principal produto o *hardware* que equipa o sistema AGREE - Assistência ao Gerenciamento Remoto de Energia Elétrica por redes de Sensores sem fios, ambientado em uma usina termoelétrica, a Usina Termoelétrica (UTE) Norte Fluminense de Macaé-RJ, financiadora do projeto.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Projetar um sistema telemétrico por rede de Sensores sem fios (RSSF) para monitorar o consumo de energia elétrica em ambientes industriais, bem como dispositivos eletrônicos para esta finalidade.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo de projetar e desenvolver uma RSSF telemétrica que atendesse as necessidades do monitoramento do consumo de energia elétrica em ambientes industriais com o da usina termoelétrica, UTE Norte Fluminense foi necessário realizar as seguintes tarefas:

- pesquisar o estado da arte;
- pesquisar o estado da técnica;

- analisar a viabilidade do projeto;
- analisar as necessidades do projeto;
- definir os requisitos do sistema;
- projetar o sistema;
- definir protocolos e metodologias para o sistema;
- projetar protótipos funcionais;
- integrar o sistema;
- realizar testes de bancada e de campo.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

A pesquisa desenvolvida pode contribuir tanto na área de eficiência energética quanto no gerenciamento do consumo de energia elétrica. A Empresa de Pesquisas Energética (EPE), que lança planos decenais de energia prevê uma crescente necessidade de políticas e tecnologias de assistência ao gerenciamento do consumo de energia elétrica. Segundo a EPE, as iniciativas fiscais e tecnologias já disponíveis permitiriam uma economia que equivale a 8,6% do que é produzido atualmente. Na figura 1 observa-se uma projeção do potencial de economia de energia em alguns setores da indústria até 2019, por medidas de eficiência energética.

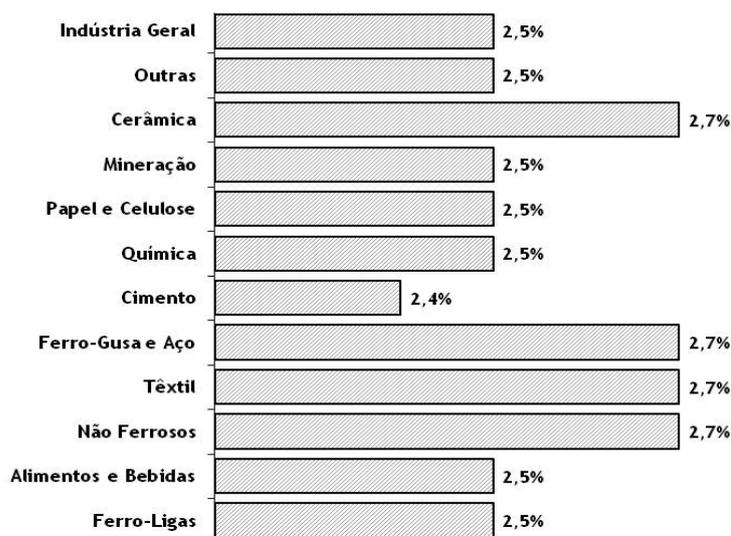


Figura 1 –Economia potencial x geração de energia em 2019

Fonte: EPE (2013)

Avalia-se que com a continuidade das políticas de incentivo aliadas ao avanço da tecnologia, a indústria deverá obter ganhos em eficiência elétrica de até 9.243 GWh, o que equivale a 2,5% do total do consumo de energia elétrica projetado para o ano de 2019 (EPE, 2013). Neste sentido, acredita-se que este trabalho contribui com o avanço tecnológico, oferecendo uma ferramenta de suporte à decisão gerencial em ações de “eficientização”.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Dentre as inúmeras linhas de pesquisa, tecnologias e trabalhos relacionados com sistemas telemétricos para monitoramento de energia elétrica, o trabalho consistiu em pesquisar, eleger e testar as opções para desenvolver uma infraestrutura de aquisição de baixo custo, utilizando redes de Sensores sem fios. O principal requisito é medir o consumo de energia elétrica em setores ou equipamentos de unidades consumidoras.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 1 é feita uma introdução e contextualização do problema tratado, no Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre os conceitos básicos necessários ao desenvolvimento do trabalho e à compreensão do tema central, que são as redes de Sensores sem fios aplicadas ao monitoramento do consumo de energia elétrica, no Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento propriamente dito, no Capítulo 4 são apresentados os ensaios realizados em bancada e testes de campo, no Capítulo 5 são demonstrados os resultados dos ensaios de bancada e de campo, a instalação do sistema e dificuldades enfrentadas, no Capítulo 6 são feitos os comentários finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o referencial teórico dos aspectos relevantes para este projeto de pesquisa e desenvolvimento: breve histórico da evolução dos medidores remotos de consumo; sistemas e métodos de gerenciamento de energia e eficiência energética; redes de Sensores sem fios, tecnologias, arquiteturas e topologias de rede, componentes e circuitos.

### 2.2 PRIMEIROS SISTEMAS DE MEDIÇÃO REMOTA

Os instrumentos remotos para medição elétrica estavam em desenvolvimento já nos anos 60, quando foram criados alguns sistemas de medição remota pela própria rede elétrica (ELECTROMETRE S.A, 1964) e por cabos telefônicos (ALLDRITT; BEAM, 1965). Nos anos 70, foi depositada uma patente de um sistema de aquisição de dados e sinais de alarmes contra incêndios e intrusão domiciliar, que também controlava cargas remotamente e recebia leituras de medidores de energia elétrica, gás e água (PARASKEVASKOS *ELETRONICS*, 1972).

Outra patente desse período descrevia um sistema com transferência de dados por linha telefônica para uma central para um sistema para coleta de dados. Nesta patente se comenta que a transmissão por rádio frequência (RF) era inviabilizada pelos altos custos e baixa confiabilidade do sistema. Os alarmes falsos gerados pela comunicação em RF poderiam gerar despesas maiores que os benefícios da informação remota. Neste sistema, além de dados tarifários de consumo de água energia elétrica e gás, também eram transmitidos alertas de invasão e incêndios nos ambientes monitorados (WILIIS, 1975).

### 2.3 MEDIDORES AMR E AMI

Os medidores remotos projetados nos anos 70 eram equipamentos com outras finalidades além de tarifar unidades consumidoras para concessionárias. Nos anos 80, os medidores remotos de energia elétrica evoluíram e foram separados de

outros sistemas como alarmes e controles remotos, sendo conhecidos como *Automatic Meter Reading* (AMR) que ainda estão em utilização até hoje (2013). Com a concepção da *Smart Grid* a partir dos anos 2000 com seus sistemas distribuídos de energia elétrica, tornou-se necessário gerenciar não só o consumo, como também a produção da energia a partir de usuários ou outros distribuidores além das concessionárias. Surgiu assim a demanda por uma estrutura coletora de dados mais avançada, conhecida como *Advanced Meter infrastructure* (AMI). A principal diferença entre uma infraestrutura AMR e AMI é a capacidade de comunicação de duas vias entre consumidores e o fornecedores de energia (BOUHAFS; MACKAY; MERABTI, 2012).

#### 2.4 SMART METER

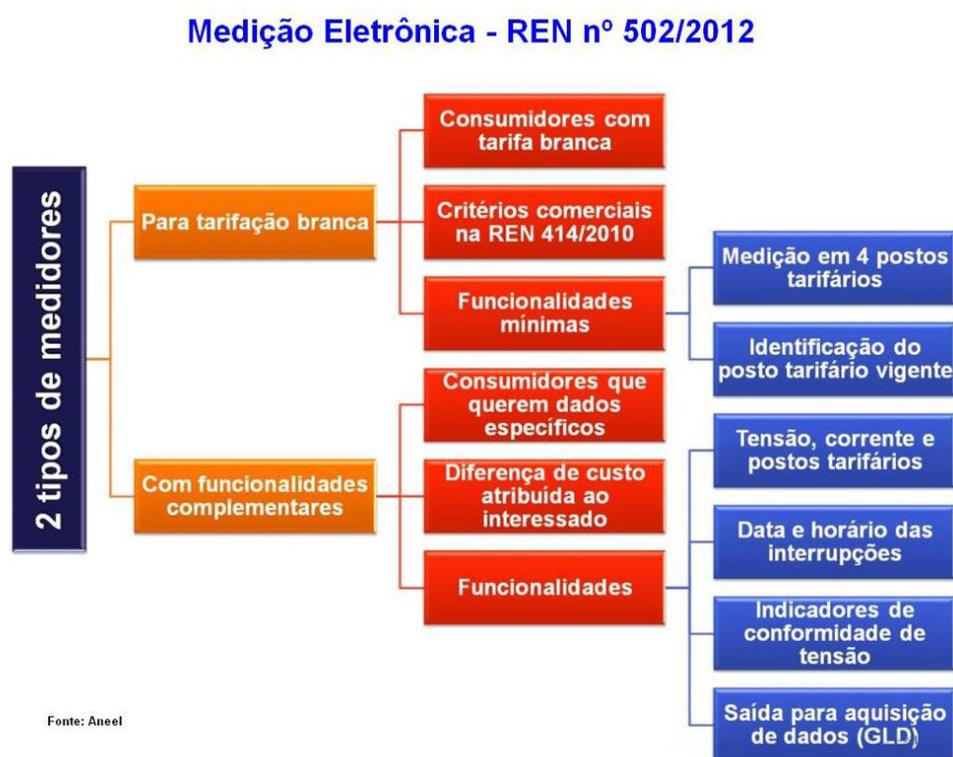
Na *Smart Grid*, concessionária e consumidores compartilham as informações em tempo real. O consumidor pode controlar seus gastos e escolher entre vários fornecedores, inclusive como valores diferenciados por horário. Uma opção que deve ser contemplada pelos novos medidores, são informações sobre ganhos provenientes da produção de energia em unidades consumidoras e geradoras. As concessionárias tem a opção de criar novas modalidades de cobrança, como o sistema pré-pago. São medidores com capacidade de processamento e comunicação desenvolvidos para equipar uma infraestrutura avançada de medidores AMI. Estes medidores auxiliam no controle do consumo da energia elétrica, ar comprimido ou gás. O *Smart Meter*, ou medidor “inteligente” agrega funções de controle, registro de dados, auto ajuste, comunicação em rede com outros medidores e com uma central que concentra os registros dos usuários (BOUHAFS; MACKAY; MERABTI, 2012).

#### 2.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO NO BRASIL

Os sistemas de medição compreendem o conjunto de equipamentos instalados para permitir medições de parâmetros elétricos. No Brasil, os wattímetros utilizados para tarifar as unidades consumidoras são em grande maioria analógicos e eletromecânicos, recebendo a energia elétrica pela rede elétrica e quantificando a potência consumida. Este modelo exige a visita mensal de inspetores para a coleta de dados manual e não oferece funcionalidades extras que permitam extrair dados

qualitativos sobre a energia consumida. Como visto, tecnicamente é possível disponibilizar medidores mais sofisticados aos usuários há muitos anos, mas de fato a substituição dos medidores eletromecânicos por eletrônicos, segundo a nota técnica 0044/2010-SRD da ANEEL (2013a, p.4), é feita em uma taxa de 1,5 % ao ano somando cerca de 2,4 milhões de novos medidores por ano. Atualmente os medidores eletrônicos se limitam a reproduzir as funcionalidades dos antigos sistemas eletromecânicos. Isso ocorria devido à falta de uma regulamentação para a renovação do sistema por parte da agência reguladora, que veio apenas com a resolução 502 de agosto de 2012, da ANEEL (ANEEL, 2013b).

A resolução 502 elenca alguns pontos que devem ser observados durante o período de transição do sistema atual para o novo sistema com medidores eletrônicos ditos “inteligentes”, como ilustrado no esquema da figura 2.



**Figura 2 –Requisitos para medidores pela resolução 507**

Fonte: Anatel (2003)

Entre as especificações, ressalta-se a capacidade de estipular tarifas com variação horária, visando melhorar o sistema de distribuição, evidenciar gastos com energia ativa e reativa, apontar índices de qualidade na distribuição, registrar histórico de interrupções de curta e longa duração entre outros índices. Os consumidores da

classe B serão o público-alvo para os novos medidores, pelo potencial de resposta a indicadores econômicos de consumo de energia. Espera-se que a transição ocorra inicialmente com instrumentos que atendam às exigências mínimas, e depois com modelos mais complexos com funcionalidades complementares, tendo o objetivo de atender requisitos para o estabelecimento de um sistema de distribuição baseado em *Smart Grid* (ANEEL, 2013a, p.12-13).

## 2.6 MEDIDORES INTERNOS DE CONSUMO DE ENERGIA

Atualmente existem equipamentos comerciais, que medem o consumo de energia, conectados serialmente entre uma carga elétrica e uma tomada da rede elétrica. Alguns destes medidores são de classe A e dimensionados pela potência máxima monitorada, registrando cumulativamente os gastos em unidade monetária ou em watts. Alguns medem corrente, tensão e potência, e modelos recentes podem ser conectados a um banco de dados local ou em “nuvem”, com cada equipamento ligado em uma RSSF local. Citando apenas equipamentos interligados por redes Zigbee, dezenas de empresas oferecem soluções e dispositivos medidores para eficiência energética, como as multinacionais como Honeywell, Panasonic, Samsung, LG, Schneider Electric, General Electric (Zigbee, 2013b).

Pelo grande potencial de mercado, vários destes produtos devem estar disponíveis aos consumidores brasileiros em breve. Fabricantes chineses já oferecem vários produtos de baixo custo, tornado viável estabelecer uma RSSF com muitos Sensores. Na época desta pesquisa (2013) uma busca na *Internet* em portais de fornecedores globais de equipamentos industriais com as palavras-chave “*remote power meter*”, retornava mais de 15 mil produtos entre medidores remotos, *gateways* e *Smart-Meters* de 603 fornecedores do mundo todo. Uma barreira à entrada destes produtos no Brasil é a dificuldade de adequar estes sistemas ao mercado nacional, sendo necessário que as empresas ofereçam produtos certificados, com garantias ao consumidor e suporte técnico.

Embora os consumidores domésticos em geral não tenham conhecimento de ferramentas e métodos de controle do consumo, existe uma demanda latente por ferramentas e soluções que auxiliem no gerenciamento de consumo. Segundo pesquisas (SEBRAE, 2013), 81% das micro e pequenas empresas valorizam e praticam algum controle de consumo de energia elétrica.

Embora já existam medidores comerciais de uso genéricos de baixo custo, um sistema mais sofisticado e específico para uso industrial e comercial requer uma infraestrutura coletora que integre os Sensores em ligados em redes, bancos de dados, aplicativos e usuários de forma que efetivamente resultem na economia de energia.

## 2.7 INFRAESTRUTURAS COLETORAS DE DADOS

Ao pesquisar tecnologias aplicáveis a sistemas de aquisição, depara-se com várias correntes de desenvolvimentos com conceitos semelhantes, que buscam a integração de dispositivos remotos de eletrônica embarcada por meio de redes. Dentre as linhas de pesquisa, destaca-se a Internet de Todas as Coisas (IoE), os sistemas “Ciber-Físicos” (CPS) e as tecnologias de RSSF (ou WSN) ocupam uma posição central no objetivo de conectar pessoas, informações e máquinas como ilustrado na figura 4.

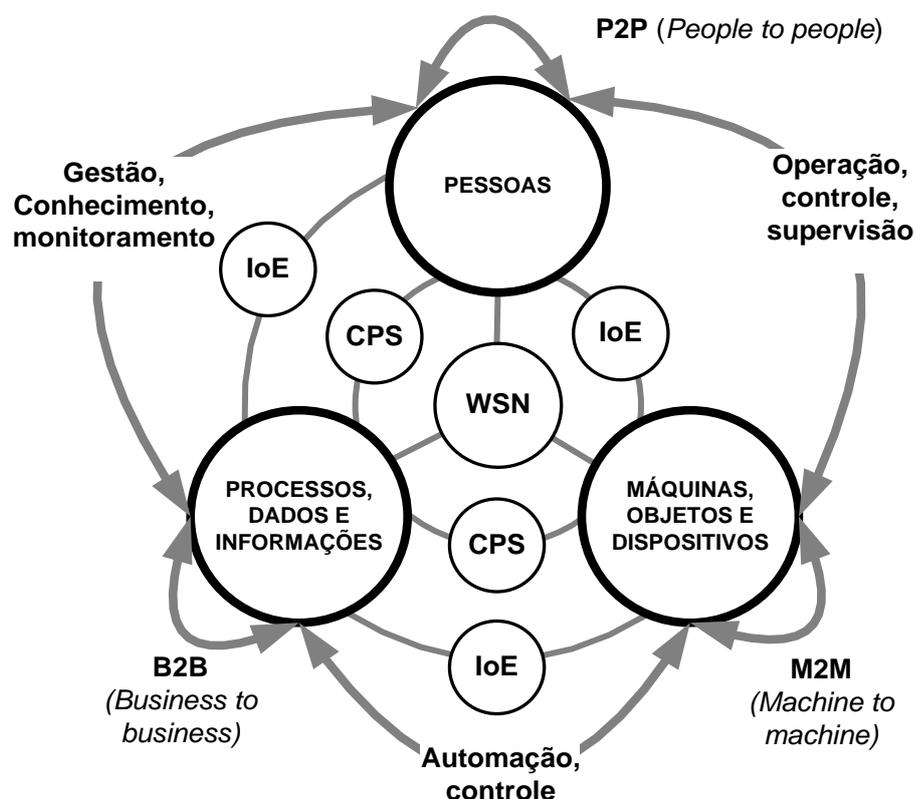


Figura 3 – Conexão entre pessoas, informações e máquinas.

Fonte: Autoria própria, adaptado de Evans (2003), Li; Bao, Shen (2011) e Chen *et al*, (2012).

A integração de sistemas embarcados conectados por redes móveis com a *Internet*, cria a infraestrutura denominada IoT (*Internet of Things*), que pretende interligar máquinas, dispositivos ou qualquer outro objeto por meio de redes remotas, ou ainda IoE (*Internet of Everything*) que também inclui processos, pessoas e animais em uma rede. Pela abordagem da *Internet* dos objetos físicos, cada nó da rede que representa um objeto real e possui um endereço único de acesso e compartilhamento de dados com outras redes como a *Internet* (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Algumas tecnologias importantes para consolidar a IoT são:

- IPv6 em substituição ao IPv4, permitindo que cada objeto tenha um endereço único de 128 *bits* na rede TCP/IP, com mais de 340 mil bilhões de endereços disponíveis (HUSTON, 2013);
- protocolos de alto nível, já compatíveis com IPv6 sobre a camada física por radioenlace vão facilitar a integração entre sistemas embarcados e a *Internet* (DAS, 2013).
- RFID e EPC Global - *Electronic Product Code*, o padrão de identificação remota eletrônica de produtos permitirá a troca de dados entre objetos físicos, aparelhos e redes, por registros de identificação em *Tags*, que são pequenas etiquetas com antenas impressas e um circuito integrado que se comunica por RFID (GS1, 2013);
- NFC, *Near Field Communication*, é um padrão de comunicação a curta distância (menor que 4 cm) muito utilizado para identificação, transferência de dados em pagamentos por dispositivos móveis como *Tablets e Smartphones* (NFC, 2013);

Outra linha de pesquisas envolve engenharia de sistemas de computação e interfaces de comunicação com o mundo físico. Surgida em 2006 quando a norte-americana *National Science Foundation* (NSF) apoiou o projeto "A Ciência da Integração para CPSs (*Cyber Physical Systems*)", reuniu várias universidades e institutos como UC Berkeley, Vanderbilt, Memphis, Michigan, Notre Dame, Maryland e Centro de P&D General Motors (WAN *et al*, 2011). O termo "CPS" foi cunhado por Helen Gil da NSF e significa integrar processos computacionais e físicos. Dispositivos embarcados são ligados em redes remotas, com bancos de dados e interação com componentes físicos, em tempo real e geralmente com controle em malha fechada.

As pesquisas em CPS buscam estudar técnicas para resolver problemas de sincronismo e temporização entre eventos concorrentes (LEE; SHESHIA, 2011).

Segundo Al-karaki e Kamal (2004, p.6) uma RSSF ou Rede de Sensores Sem Fio consistem em pequenos nós com capacidade de Sensoriamento, computação e comunicação sem fios, Matim e Islam (2012, p.3) caracterizam as redes sem fio pela capacidade de configuração automática e pela indefinição estrutural com objetivo de facilitar a monitoração de condições físicas ou ambientais, como ilustrado na figura 4.

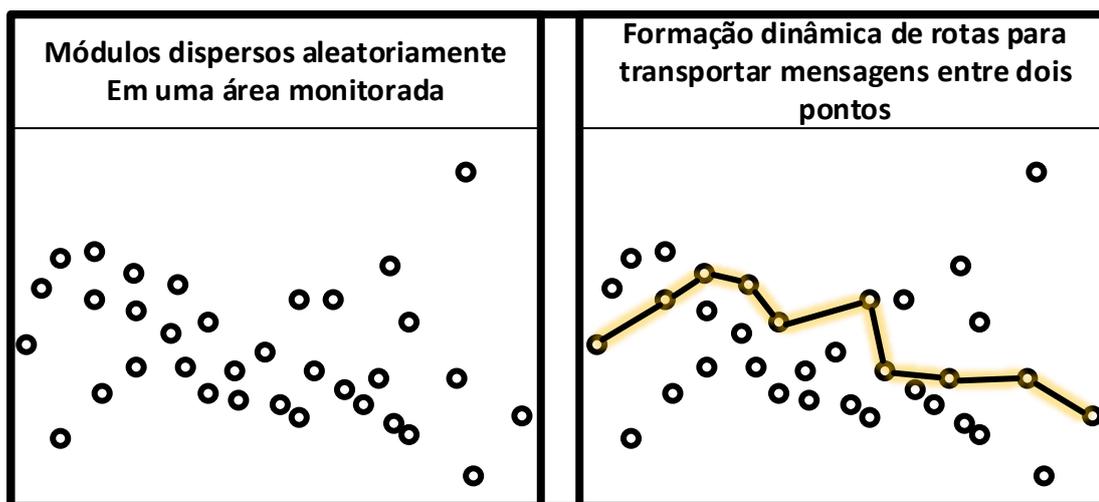


Figura 4 – Módulos básicos que compõe uma RSSF

Fonte: Autoria própria, adaptado de Akyildiz *et al* (2002) e Loureiro (2003)

As RSSF solucionam vários problemas práticos de localização e monitoramento, prevenção de catástrofes, segurança patrimonial contra invasões ou incêndios, monitoramento do fluxo de materiais e pessoas, gerenciamento de consumo de água, gás, energia elétrica entre outros (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). A oportunidade que alavancou a ideia das RSSF foram os avanços das telecomunicações e eletrônica embarcada que permitiram desenvolver nós Sensores multifuncionais de pequenas dimensões para transmissões de curtas distâncias com baixo custo e consumo de energia.

As RSSF foram inicialmente projetadas para fins militares a partir de estudos pioneiros em Berkeley, com o projeto *Smart Dust*, que previa redes formadas por centenas ou milhares de minúsculos Sensores com as dimensões de grãos de poeira. Os Sensores seriam espalhados em campos de batalha, funcionando por longos períodos para detectar, por exemplo, movimentos de tropas inimigas. Neste projeto foi utilizada uma estratégia de rede, na qual qualquer dispositivo se comunicava com os nós vizinhos até encontrar seu destino.

Como transceptores de RF exigem antenas volumosas que consomem muita energia em relação ao volume de dados transmitidos, o projeto *Smart Dust* utilizou um sistema ótico de comunicação para construir dispositivos minúsculos, se comunicando por métodos de compartilhamento de acesso modulado (TDMA, CDMA, FDMA). Para estabelecer comunicação foram utilizados feixes de laser que consumiam apenas  $1\mu\text{W}$ , mas exigiam linha de visada para os raios laser. Com a utilização da técnica SDMA, foi possível interligar simultaneamente 1000 nós de rede (KAHN; KATZ; PISTER, 1999).

Desde então, o potencial das redes distribuídas de Sensores com estas características incentivou outros trabalhos e pesquisas, que buscavam reduzir o consumo de energia dos dispositivos, desenvolver protocolos de troca dados, oferecer mobilidade aos nós de rede, identificar e gerenciar dispositivos de rede com mais facilidade, reduzir os custo de *hardware*, desenvolver transceptores mais eficientes, etc. Estes trabalhos acabaram produzindo muitos sistemas incompatíveis, mas por outro lado, visando aplicações comerciais foram criadas padronizações para redes *ad-hoc* e para RSSF, como os protocolos IEEE entre outros.

Assim, considerando os requisitos de projeto, o trabalho será dirigido ao estudo mais detalhados das características das RSSF.

### 2.7.1 Características das RSSFs

As RSSFs têm como características possuir um grande número de nós de Sensores, com capacidade de organização dinâmica e automática da rede que podem ser dispersos em terrenos de difícil acesso, com posicionamento aleatório e móvel. Os nós Sensores cooperam entre si para transmitir mensagens, e agregam dados processados localmente para transmitir apenas as informações necessárias (AKYILDIZ *et al*, 2002).

As RSSFs podem ser comparadas a sistemas distribuídos. Do ponto de vista do usuário ou de um *software* é como se a RSSF fosse um grande banco de dados no qual é possível acessar informações específicas como, por exemplo, o consumo de energia elétrica da máquina X em um setor Y, entre 15:00 H e 17:00 H de 12 de janeiro. Do ponto de vista do sistema, em uma RSSF cada dispositivo é independente e possui suas próprias rotinas de funcionamento, sem relação espacial ou temporal com os outros nós da rede (TANEMBAUM; STEEN, 2007, p. 28-30).

Segundo Ruiz *et al* (2004) e Al-karaki e Kamal (2004, p.8-10), as características e especificações destes dispositivos variam de acordo com as restrições do ambiente e grandezas físicas que se pretende monitorar, influenciando na escolha da arquitetura e nas funções exercidas pelos nós de rede. As características da rede também definem requisitos que devem ser levados em conta no *design* dos Módulos:

- capacidade de processamento, de memória, Módulos Sensores necessários, fontes de energia e alcance dos transceptores;
- dimensionamento da rede quanto ao número de nós;
- topologias de rede entre P2P (Peer to Peer), *star*, *mesh*, *tree-cluster* ou híbrida;
- pilha de protocolos de comunicação;
- identificação dos dispositivos na rede sem fios, endereçamento ou outro meio para definir a origem e o destino dos dados na rede;
- estratégia de acesso aos dados de cada Módulo servidor;
- planejamento da distribuição e mobilidade dos Módulos;
- método de agregação de dados para aumentar a transferência de dados úteis e reduzir trocas de mensagens e consumo de energia;

Dentre as restrições que podem ser citadas, as principais são:

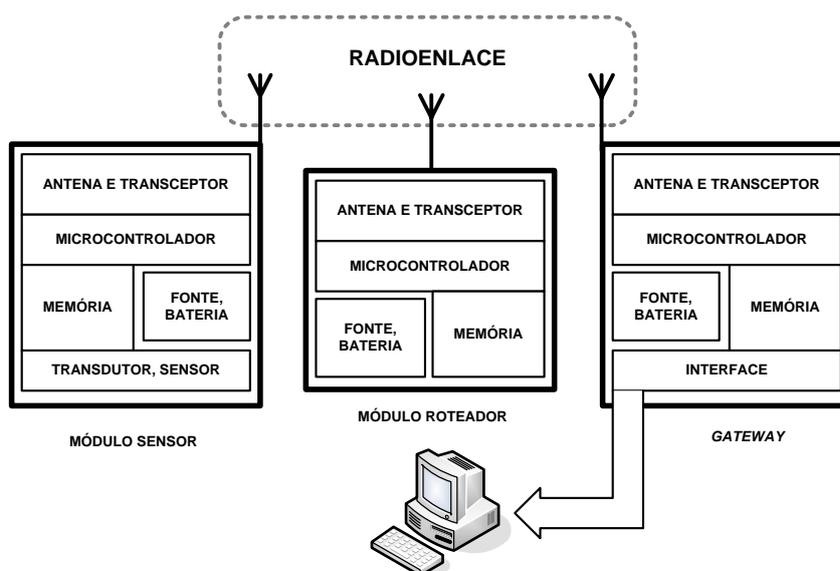
- latência entre transmissões são causadas por perturbações do meio e pelo tempo de processamento das mensagens;
- sincronização e organização das entradas os dados no tempo, levando em conta as latências;
- estratégia para manter a qualidade de serviço satisfatória, levando em conta as inevitáveis falhas de comunicação;
- baixo consumo para reduzir manutenções e estender ao máximo o tempo de vida do serviço nos Módulos remotos.

Segundo Ruiz *et al* (2004, p.171-173) as RSSFs também podem ser classificadas pelas seguintes características:

- composição (homogênea, heterogênea), organização (hierárquica, plana), mobilidade (estacionária, móvel), densidade (balanceada, densa, esparsa) distribuição (regular, irregular);
- tipo de coleta de dados dos Sensores (periódica, contínua, reativa, em tempo real);
- disseminação de dados (programada, contínua, por demanda), tipo de conexão (simétrica, assimétrica), transmissão (*simplex*, *half-duplex*, *full duplex*), alocação de canal (estática ou dinâmica), fluxo de informações (*flooding*, *multicast*, *unicast*, *gossiping*, *bargaining*).

### 2.7.2 Hardware para Desenvolvimento de RSSFs

Os componentes básicos de uma RSSF são (figura 5): Módulos Sensores, Módulos Roteadores e Módulo *Gateway* (LOUREIRO, 2003). Nos Módulos Sensores os principais componentes são: elemento Sensor ou transdutor, microcontrolador, transceptor (ou ainda transmissor, receptor, *transponder*) e fonte de alimentação. Na maioria dos sistemas de RSSF, cada Módulo Sensor faz a aquisição de dados por um conversor AD e já processa os dados, evitando trocas de mensagens que poderiam aumentar o consumo de cada dispositivo e reduzir a durabilidade da bateria de cada Módulo.



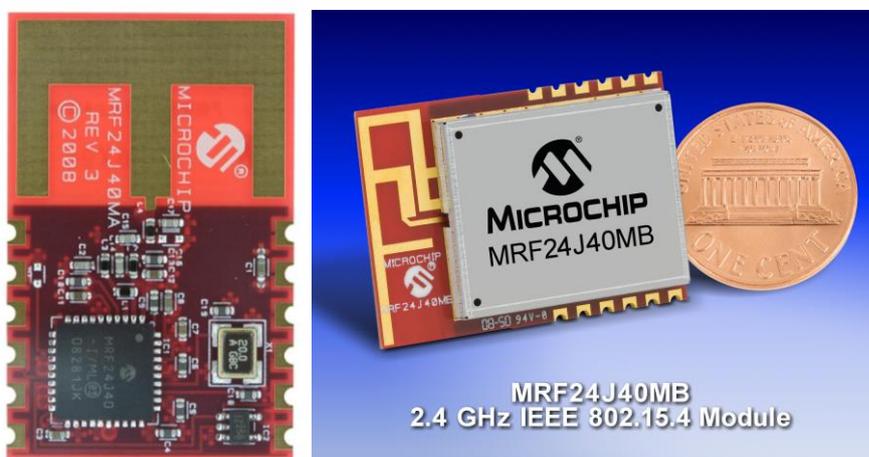
**Figura 5 – Módulos básicos que compõe uma RSSF**

Fonte: Autoria própria, Adaptado de Akyildiz *et al* (2002) e Loureiro (2003)

Os dados adquiridos e processados pelo microcontrolador são então enviados pelos transceptores para a rede sem fios, chegando a um ou mais Módulos *Gateway*. Módulos transceptores com capacidade de roteamento podem ser necessários para estender o alcance das antenas em espaços amplos, se a rede for homogênea os próprios Módulos Sensores já servem como roteadores (AKYILDIZ *et al*, 2002, p.103).

Projetos de dispositivos para RSSF podem ser elaborados a partir dos componentes básicos, como os circuitos integrados transceptores MRF24J40 da empresa Microchip (MICROCHIP, 2013b), ou como o SoC (*System on Chip*) da empresa Texas Instruments CC2531F256RHAT com saída para USB (TEXAS INSTRUMENTS, 2013b).

Também existem circuitos embarcados já com transceptores, antenas planas impressas e demais componentes periféricos que contribuem para acelerar o desenvolvimento do sistema, evitando a complexidade dos circuitos analógicos de RF. Estes circuitos embarcados são compactos, e podem ser soldados em uma placa como componentes de montagem de superfície (SMT), e alguns modelos possuem conectores (MICROCHIP, 2013c); (MICROCHIP, 2013d).



**Fotografia 1 – Módulos transceptores de rádio frequência MA e MB**

**Fonte: Microchip (2013c) e Microchip (2013d)**

Existem ainda Módulos que além dos transceptores e demais componentes analógicos, incluem também um microcontrolador embarcado. Estes Módulos são preferíveis em desenvolvimentos rápidos, disponibilizando ao projetista um circuito completo que só precisa ser parametrizado, contendo portas analógicas, digitais e interface digital serial UART ou USB. Um exemplo são os Módulos de RF da empresa DIGI, que possui circuitos embarcados comerciais operando em diversas frequências

e nos protocolos mais utilizados em dispositivos M2M (*Machine to Machine*) e outras aplicações mais específicas como Redes de Sensores sem fios (DIGI, 2013b).

### 2.7.3 Protocolos de Comunicação para RSSF

A escolha do *hardware* implica na escolha do protocolo, devendo ser uma decisão conjunta, em função dos requisitos de projeto. Para transmissões com potência na faixa de 1 mW a 100 mW, que são mais comuns em RSSF pelo requisito de baixo consumo, existem vários padrões consolidados de grandes consórcios e outros que estão surgindo como excelentes opções para infraestruturas de redes de medição de consumo de energia elétrica, como os apresentados a seguir:

#### 2.7.3.1 IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 define as camadas inferiores e de suporte ao protocolo Zigbee, que é um dos mais utilizados em RSSFs pelos seus custos relativamente baixos. O padrão IEEE 802.15.4 define as camadas PHY (camada física OSI) e MAC (camada de dados OSI), e o Zigbee determina as camadas OSI de aplicação e de rede como pode ser visto na figura 7, tendo sido adotado com o apoio de grandes fabricantes de semicondutores.

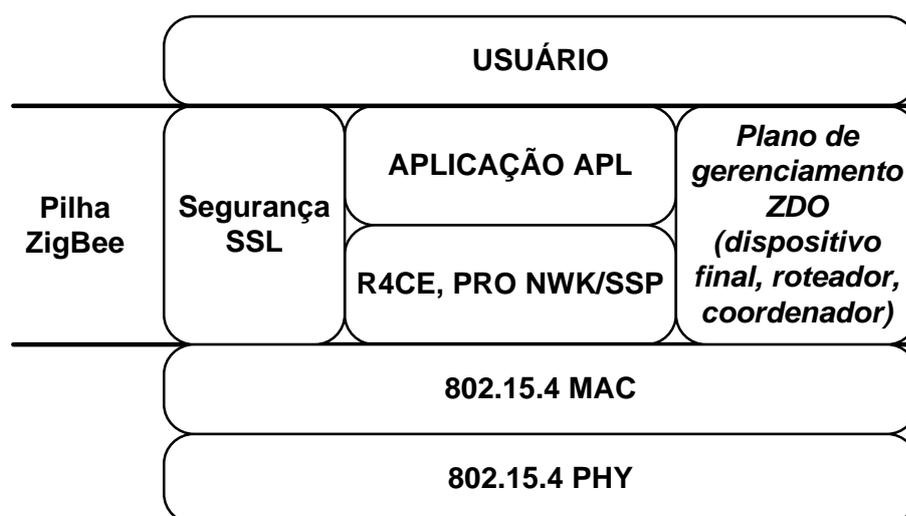


Figura 6 – Pilha de protocolos Zigbee

Fonte: Adaptado de Zigbee (2013c)

Há relatos de diversos trabalhos utilizando redes Zigbee para monitoramento de energia elétrica (HAN; LIM, 2010). Neste padrão, os transceptores podem operar na banda de frequência não-licenciada ISM (*Instrumentation, Scientific and Medical*) de 2.4 GHz, nas topologias de estrela, árvore ou malha, com taxas de transmissão de dados de até 250 Kbps, empregando o método *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) para evitar colisões de dados.

Uma rede Zigbee possui três tipos de dispositivos: Coordenador, Roteador e Dispositivos Finais. Coordenadores e Roteadores (FFD) podem: receber, transmitir e encaminhar mensagens para outros Módulos. Dispositivos finais (RFD) são mais simples, sendo previstos principalmente para reduzir o consumo em dispositivos alimentados por baterias, que permanecem a maior parte do tempo em um estado “adormecido”, permanecendo ativa apenas a função para receber requisições (HORAK, 2007, p.411).

As mensagens são trocadas por meio de quadros (*frames*) com *bytes* para identificação e endereçamento MAC (*Medium Access Control*), *bytes* para determinar o tamanho do campo de dados, os dados podem ter até 72 *bytes* de campo e por fim um *byte* para controle de erros. A sincronização de dados por ser feita pelo de envio de *beacon* (Farol), que são sinais enviados em intervalos fixos indicando o início e fim dos quadros de mensagem. Redes Zigbee podem operar com até 64000 nós, com alcance de 10 a 30 metros em áreas construídas e de 100 a 300 metros ao ar livre. O padrão apresenta a versão Zigbee 2006, Zigbee PRO e a versão compacta Zigbee 4RCE, que devem ser escolhidas de acordo com as características da RSSF. O protocolo Zigbee PRO oferece mais recursos e serviços de rede, já o Zigbee 4RCE suporta componentes eletrônicos de baixo custo, ocupando entre 2 Kb a 16 Kb de memória, em redes de curto alcance e baixo consumo. O uso comercial de tecnologias envolvendo a marca ou o protocolo Zigbee requer a obtenção de licenças, certificações e filiação na Zigbee *Alliance* (ZIGBEE, 2013a).

#### 2.7.3.2 Smart Bluetooth

O *Smart Bluetooth* antes denominado de Bluetooth de baixa energia (BLE) interage com dispositivos móveis como *Tablet* e *Smartphone* e opera na banda de frequência não-licenciada ISM de 2.45 GHz, com um taxa de transferência de dados entre 1 MHz e 3 MHz, empregando o método *Frequency Hopping Spread Spectrum*

(FHSS) para evitar colisões entre mensagens. A tecnologia lançada em 2010 é compatível com o Bluetooth clássico e tem como objetivo operar com consumo inferior de energia, que pode ser até 17 vezes menor que na versão clássica. O *Smart Bluetooth* alcança até 10 metros, formando redes denominadas “Piconets”. As Piconets são redes possuem um mestre e sete escravos que não se comunicam entre si sem a permissão do mestre. Os dados são recebidos e enviados em forma de pacotes subdivididos em intervalos de tempo (*slots*) de 625  $\mu$ S. Os pacotes podem conter 1, 3 ou 5 *slots*. Uma Piconet pode ser unida a outras Piconets, com um dispositivo intermediário chamado de *Bridge* formando uma rede “Scatternet”. Estas redes operam com até 100 dispositivos com um atraso entre 20 e 80 segundos na comunicação, dependendo da estratégia de controle de fluxo (BLUETOOTH, 2013).

### 2.7.3.3 DASH7

O padrão ISO 18000-7 organizado pelo consórcio DASH7 é uma tecnologia de comunicação sem fios alternativa ao padrão IEEE 802.15.4, adotada para operações militares pelo departamento de defesa dos Estados Unidos, também possui interoperabilidade com as etiquetas eletrônicas ou RFID, e também como protocolo de comunicação de campo próximo ou NFC, que são tecnologias de padrão ISO disseminadas mundialmente. O DASH7 possui vantagens como menor latência nas comunicações, maior alcance de transmissão com a mesma potência dissipada e ainda ocupa menos espaço de memória em relação aos protocolos IEEE, com potencial para reduzir o custo de *hardware* neste quesito (NORAIR, 2013, p.8).

O padrão DASH7 emprega a pilha de protocolos de fonte aberta conhecida como OPENTAG, que é gratuita e ocupa menos de 17 Kb de memória de programa. A arquitetura do sistema prevê três tipos de dispositivos: *Endpoint*, *Sub controller* e *Gateway* que podem se comunicar em várias topologias de rede e pode ser compatível com IPv6. O DASH7 Opera na frequência ISM de 433.92 MHz, que segundo Norair (2013, p.10-11) é mais eficiente dentro de áreas construídas, podendo atravessar paredes de concreto e água, pelo fato de ter o comprimento de onda de 69 cm, em comparação ao comprimento de onda de 12 cm para a frequência ISM de 2.4 GHz, que pode ser bloqueada com mais facilidade por obstáculos. Assim fica garantida também uma comunicação mais estável em áreas de trânsito de pessoas ou máquinas, e o impacto da comunicação ser realizada entre antenas com linha de

visada livre também é reduzido. Com um alcance de 250 metros em áreas construídas e até 5 quilômetros em áreas abertas, utiliza a topologia de rede em estrela no seu raio de abrangência, tornando a comunicação mais rápida, por não necessitar de roteadores que causam atrasos de forma cumulativa em topologias de malha e árvore.

As possíveis estratégias de modulação são a FSK (*Frequency Shift Keying*) ou GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), com taxas de transmissão entre 27.8 Kbps e 200 Kbps, método de codificação Manchester e com boa relação sinal ruído (SNR), o que confere flexibilidade ao projeto (NORAIR, 2013, p.14). A Texas Instruments disponibiliza o transceptor CC430 e seu *kit* de desenvolvimento, assim como a Melexis, Analog Devices que também fornecem circuitos de desenvolvimento para DASH7 (DASH7, 2013).

#### 2.7.3.4 IPv6 over Low Power WPAN (6LoWPAN)

O padrão TCP/IP está sendo adaptado ao paradigma da *Internet* das coisas, com a versão 6 da pilha de protocolos (IPv6), que visa interconectar objetos do cotidiano, Sensores, atuadores, telefones móveis e etiquetas (*tags*) identificadores de rádio frequência RFID, levando em conta os recursos limitados de energia, *hardware*, memória para estes dispositivos ligados em redes de baixo consumo com capacidade de envio de pequenos pacotes de dados (KUSHALNAGAR; MONTENEGRO; SCHUMACHER, 2013).

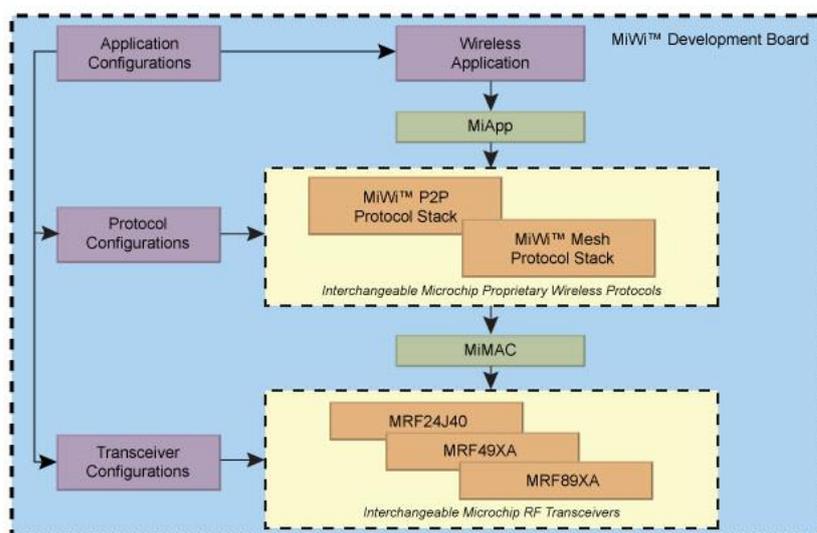
O desenvolvimento do protocolo aberto IPv6 foi iniciado em 2005 por pesquisadores da Sun Microsystems e Intel por meio da IETF - *Internet Engineering Task Force* (IETF, 2013). A aplicação do protocolo IPv6 foi inicialmente sugerida para redes de baixa potência a Zigbee (MONTENEGRO *et al*, 2013), que também é aplicável a redes Z-wave, DASH7 ou Bluetooth LE. Uma rede 6LoWPAN pode ser instalada em *firmware* de um microcontrolador de 8 *bits*, 10 MHz de *clock* e com menos de 32 Kb de memória Flash, definindo a existência de três tipos de dispositivos: o LC (*Local Controller*), o LBR (*LoWPAN Border Router*) e N (*LoWPAN node*). O protocolo permite a inclusão de mais de 1000 nós e a formação de todas as possíveis topologias do padrão IEEE 802.15.4. Uma das vantagens é a facilidade de integração com a *Internet*, que pode interligar diretamente dois LBRs. Estudos sugerem que redes 6LoWPAN são centradas no endereçamento e as redes WSN centradas em

dados, e que um sistema híbrido seria mais eficiente para acelerar a coleta de dados e reduzir consumo de energia (WANG; HUANG, 2013).

### 2.7.3.5 Outros protocolos proprietários

O consórcio Zigbee padroniza produtos fabricados no mundo todo, pois a compatibilidade é um fator desejável como estratégia de negócios para ampliar a base de usuários. Para tal é necessário um processo de licenciamento com custos anuais, que também restringem a liberdade de alteração na pilha de protocolos.

Para produtos específicos, fabricantes de transceptores e microcontroladores disponibilizam gratuitamente pilhas de protocolos baseados na camada física do padrão IEEE 802.15.4, que podem ser alterados sem restrições para usuários de seus componentes. Entre estes, destaca-se o protocolo SimpliciTI, da fabricante TI que em seu portfólio oferece uma grande linha de circuitos integrados para RF (TEXAS INSTRUMENTS, 2013a), e o ambiente de desenvolvimento Miwi DE da empresa Microchip, ilustrado na figura 8 que suporta desde uma rede P2P (entre pares) até redes com topologias em malha, como a Miwi Pro (MICROCHIP, 2013a).



**Figura 7 – Pilha de protocolos Miwi**

**Fonte: Microchip (2013d)**

Existem soluções prontas e completas de conectividade, como o SNAP da empresa Synapse *Wireless* que é um sistema operacional para redes. O SNAP interliga dispositivos em redes como RS485, USB, ETHERNET, TCP/IP ou IEEE 802.15.4, que se comunicam automaticamente sem hierarquias e nem dispositivos

concentradores. O sistema é suportado por microcontroladores de 8 *bits* com 45 Kb de memória de programa, ou por células do sistema programadas na linguagem Python em aplicativos para PCs, que compõe o sistema SNAP. As redes SNAP também se interligam com bancos de dados remotos acessados pela *Internet (cloud)* (SYNAPSE WIRELESS, 2013).

A Fabricante DIGI, que também fabrica Módulos embarcados para redes Zigbee, disponibiliza Módulos com a rede proprietária DigiMesh em topologia *peer-to-peer*, constituindo uma rede homogênea que não exige discriminar Coordenadores, roteadores e dispositivos finais, facilitando assim a instalação de um novo sistema (DIGI, 2013a).

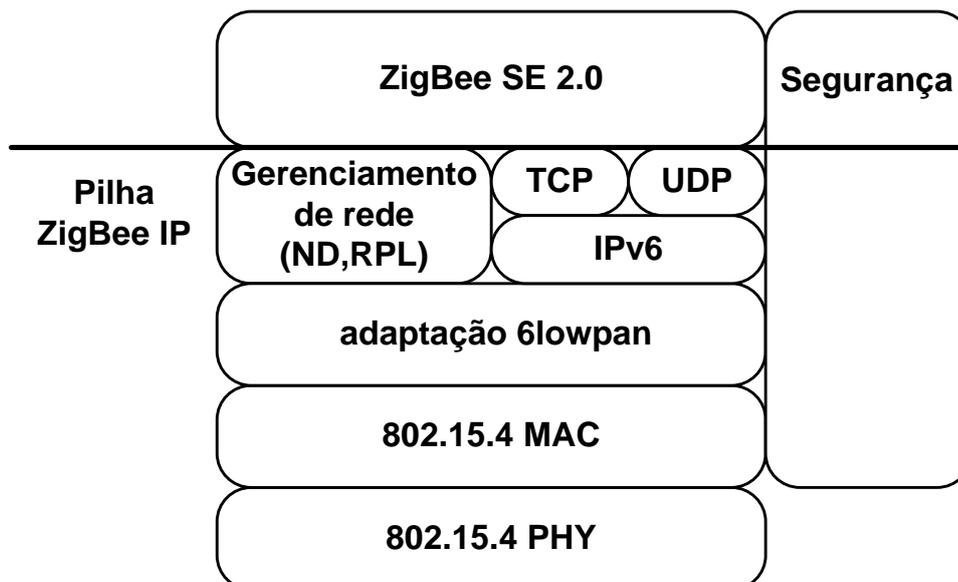
Na indústria é bastante empregado o *Wireless HART* que possui sua pilha de protocolos de alto nível inserida no padrão IEEE 802.15.4, tendo como característica a redundância dos sinais para evitar as interferências dos ambientes industriais (HART..., 2013).

O surgimento de vários protocolos proprietários e sistemas baseados nas camadas PHY e MAC do padrão 802.15.4 ressaltaram a necessidade de interligar as redes sem fios com a *Internet*, pelo paradigma da IoT. A partir de 2013, o consórcio Zigbee lançou o SEP2.0 um novo produto de código aberto que oficializa a união do IEEE 802.15.4 com o protocolo 6LoWPAN, que é o protocolo Zigbee IP.

#### 2.7.3.6 Zigbee IP e Smart Energy Profile: SEP 2.0

A principal aplicação do Zigbee IP é interligar diferentes protocolos de redes remotas com a *Smart Grid*. O Zigbee *Energy Smart Profile 2.0* (SEP 2.0) é uma camada de aplicação que conecta vários dispositivos “inteligentes” com a *Smart Grid*, permitindo estabelecer sistemas de gestão de energia e oferecendo novos serviços aos consumidores. O SEP 2.0 é fruto da colaboração entre os vários consórcios como WiFi *Alliance*, Zigbee *Alliance*, HomePlug *Alliance* e Home *Grid Alliance* (Zigbee, 2013c).

A pilha de protocolos Zigbee IP, ilustrada na figura 9, foi realizada por um esforço conjunto entre a IEEE, IETF e outras tecnologias *open-source* e proprietárias, buscando interoperabilidade entre padrões, considerando que cada tecnologia é necessária em seu principal nicho de atuação.



**Figura 8 – Pilha de protocolos Zigbee IP e SEP 2.0**

Fonte: Adaptado de Zigbee (2013c)

A SEP 2.0 oferece uma interface entre medidores internos residenciais e o medidor eletrônico “inteligente” (*Smart Meter*) principal de uma unidade consumidora, que interliga o consumidor com o sistema de distribuição de energia, possibilitando serviços e funcionalidades coordenadas, como:

- gerenciamento e medição de energia, medições de consumo em tempo real com *Smart Meters*;
- controle automático de cargas elétricas em função do valor da tarifa em determinado horário, baseado nas preferências do usuário;
- acionamento remoto de cargas elétricas por mensagens de e-mail, (SMS), alertas de voz e outros;
- controle automático de carga por demanda-reposta por parte da concessionária, dos níveis de consumo de aparelhos em troca de incentivos financeiros aos usuários;
- inclusão de veículos elétricos na rede;
- gestão distribuída de energia renovável.

O protocolo SEP 2.0 disponibiliza ferramentas e ambientes para desenvolvimento de aplicativos com tecnologias que já são de domínio da comunidade de desenvolvedores (SAKSENA, 2013), tais como:

- XML - *Extensible Markup Language*, protocolo desenvolvido em uma arquitetura REST utilizando HTTP para a camada de transporte;
- REST - (*Representational State Transfer*), serviço Web sobre HTTP - *Hypertext Transfer Protocol*. No SEP 2.0, os recursos representam leitura de medidores, tarifas de preços, os eventos de resposta à demanda de consumos, etc.;
- CIM - *Common Information Model* fornece modelos, esquemas e especificações para padronizações em geral na indústria;
- mDNS *Multicast Domain Name System* e *Service Discovery* oferece um método para descoberta de dispositivos SEP 2.0 em uma rede local;
- TLS - *Transport Layer Security*, protocolo que garante troca de informações seguras e integridade das transações do consumidor na *Smart Grid*.

Com a inovadora tecnologia SEP 2.0, poderão ser oferecidos ao usuário recursos que superam a simples economia de energia. Para racionalizar o consumo bastaria cultivar hábitos como desligar aparelhos eletroeletrônicos ao sair de casa, ajustar o aquecimento do chuveiro ou a refrigeração do ar-condicionado de acordo com a temperatura ambiente, reduzir o volume do aparelho de som, o brilho da TV, apagar as luzes dos cômodos desocupados etc. Porém muitos consideram estes hábitos mesquinhos, trabalhosos e desconfortáveis, assim dispositivos automáticos “inteligentes” são essenciais para engajar os consumidores na causa da gestão do consumo de energia.

A SEP 2.0, disponibiliza aos usuários ricas interfaces visuais e interativas para *Smartphone* e *Tablets*. Serviços baseados em “nuvem” apresentam dados de uso dos aparelhos por painéis e gráficos, como detecção de falhas iminentes que podem gerar alertas ao usuário, indicando risco de danos ou desperdício. A geladeira informa que a porta ficou entreaberta, um purificador, que o filtro de água precisa ser trocado, ou uma lâmpada, alerta que está no final de sua vida útil. A análise dos dados orienta os usuários para melhor utilização dos aparelhos, e o sistema alerta para realização de manutenção preventiva, para substituição de peças ou do próprio equipamento.

A tecnologia SEP 2.0 SEP cria oportunidades para exploração de novos serviços de valor agregado, promove a adoção de dispositivos “inteligentes” nas residências, contribui para melhorar o sistema de distribuição de energia e auxilia no gerenciamento do consumo, em conformidade com os objetivos da *Smart Grid* (BALARAMAN; ANIL, 2013).

## 2.8 GERENCIAMENTO DE ENERGIA

A tecnologia de redes e a automação podem contribuir em muito com a atividade de gerenciamento de energia, relegando as tarefas repetitivas e enfadonhas a um sistema. Entretanto é importante rever os conceitos de gerenciamento de consumo do ponto de vista dos regulamentos da ANEEL, que são praticadas pelas concessionárias em todo o país. O gerenciamento do consumo de energia elétrica visa obter a melhor relação custo/benefício entre as diversas opções tarifárias de contratação de energia, determinadas e regulamentadas pela ANEEL.

Tarifa de energia elétrica se refere ao custo fixado pela prestação de serviços da concessionária aos consumidores de energia elétrica em suas unidades consumidoras. Por unidade consumidora, entende-se o conjunto composto por instalação, ramal de entrada, equipamentos elétricos, condutores e acessórios, inclusive a subestação quando fornecida a tensão primária. A unidade consumidora sempre recebe energia elétrica em um único ponto de entrega com medição individual para cada propriedade, salvo em espaços contíguos do mesmo contratante.

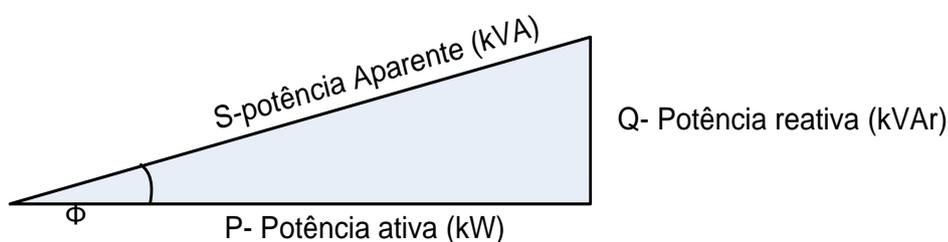
Para a cobrança de tarifas os consumidores são classificados em: residencial: comercial, serviços, Industrial, Rural, Iluminação Pública, Serviço Público, Consumo próprio. Existem dois grupos (A e B) de cobrança de tarifa em função da tensão fornecida. O grupo “A” recebe tensões superiores a 2,3 kV e se enquadra no sistema de tarifa binômica, que leva em conta a demanda contratada e a consumida em três modalidades de fornecimento: convencional, horossazonal azul e verde. O valor da tarifa horossazonal é influenciado pelo horário de utilização e época do ano, enquanto que a tarifa convencional tem valor fixo. O grupo B recebe tensões inferiores a 2,3 kV e são enquadrados na tarifa monômica que é destinada a consumidores residenciais, rurais, iluminação pública e demais classes (BARROS; BORELI; GEDRA, 2012, p.45-49).

### 2.8.1 Ações Administrativas e Metas do Consumo

Para os usuários do grupo A é importante definir metas e gerenciar o consumo em função da demanda contratada, estimada nos primeiros meses de contratação do serviço de acordo com a Resolução 414 da ANEEL. Se o consumo ultrapassar em 10% o valor contratado, a valor final a ser pago pode ter grandes acréscimos. Por outro lado, se o consumo for inferior à demanda contratada, o valor pago será o mesmo. É necessário ainda controlar o fator de potência cujo excesso pode ser tarifado, e acompanhar o fator de carga a título de conhecimento.

O fator de potência – FP (relação entre potências ativas e reativas), deve ser capacitivo com valor médio (um registro por hora) superior a 0,92 entre as 23:30 h e 6:30 h e indutivo no resto do dia com valor superior a 0,92. O fator de potência pode ser interpretado pela utilização do triângulo de potências, exibido na figura 10 e a partir do fator de potência pode ser calculada a relação entre as energias ativas e reativas pela equação 1.

$$FP = \cos \Phi = \frac{\text{Consumo (kWh)}}{\sqrt{\text{kWh}^2 + \text{kVArh}^2}} \quad (1)$$



**Figura 9 – Triângulo das potências**  
**Fonte: Barros, Borel e Gedra (2012, p.90).**

O Fator de carga - FC é o índice que compara a energia consumida resultantes da soma de demandas instantâneas de um determinado período, com a demanda estimada no período da análise, que pode ser definida pela equação 2 para o caso da tarifa convencional:

$$\text{Fator de Carga} = \frac{\text{Consumo (kWh)}}{\text{Demanda (kW)} \times t(\text{h})} \quad (2)$$

O aproveitamento da demanda contratada está próximo do ideal quando o valor do FC se aproxima de 1. Entretanto, o FC não pode ser calculado com precisão, pois as faturas não fornecem os horários das leituras, apenas a média do dia. Para analisar o FC com mais precisão, melhorando o índice de aproveitamento, é necessário consultar os registros na memória de massa do medidor eletrônico instalado pela concessionária mediante o pagamento de taxas. Outra opção é usar equipamentos analisadores e medidores instalados nos quadros de distribuição e no secundário dos transformadores.

Um sistema medidor ligado a um banco de dados permite analisar os picos de demanda e traçar estratégias gerenciais para adequar o consumo com a demanda contratada, seja determinando horários para certas atividades como partidas dos motores mais potentes, ou evitando executar várias atividades ao mesmo tempo. Manter as metas de consumo nos limites da demanda contratada permite reduzir substancialmente os gastos com energia elétrica. Em casos que se constate subutilização da demanda contratada é possível reduzir os valores contratados e obter ganhos econômicos.

Os usuários do grupo B tem um sistema de cobrança simplificado, onde a cobrança já incorpora a demanda de potência ao custo de fornecimento de energia, cobrado em reais por megawatt-hora (BARROS; BORELI; GEDRA, 2012, p.50-68).

## 2.8.2 Aproveitamento Eficiente da Energia Elétrica

Para a indústria e consumidores do grupo A, além do índice quantitativo do FC pode ser necessário renovar e ajustar as instalações elétricas e equipamentos para melhorar a eficiência do consumo de energia. Tanto o FC quanto o FP podem melhorar com equipamentos mais eficientes, e instalações dimensionadas de acordo com a real necessidade.

Um baixo FP pode ter as seguintes causas: motor de indução e transformadores superdimensionados, com pequenas cargas ou funcionando em vazio; muitos motores ou outras cargas indutivas trabalhando ao mesmo tempo; cargas especiais com alto consumo reativo; lâmpadas que utilizam reatores em grandes quantidades. O baixo FP aumenta a corrente circulante pelos cabos condutores, limitando o transporte de potência ativa e também causa perdas por efeito

joule provocando aquecimento. Um baixo FP pode ser corrigido para um índice maior ou igual a 0,92 pela instalação de bancos de capacitores nas proximidades de grandes cargas indutivas. Existe banco de capacitores de valor fixo, sistemas capacitivos semiautomáticos e sistemas automáticos programáveis que atuam na rede elétrica equilibrando o fator de potência.

Para melhores resultados em uma ação de “eficientização”, deve ser feita uma análise dos dados da empresa e seus processos, e um diagnóstico energético que caracterize o consumo e identifique perdas energéticas. Para elaborar recomendações precisas que embasem o combate à ineficiência e redução do consumo da energia elétrica são necessárias ferramentas de medição instaladas por longos períodos, a fim de melhor levantar o perfil de carga e determinar as possíveis ações corretivas. Após o trabalho de redimensionar o sistema elétrico, balancear o FC e FP e atualizar os equipamentos (*retrofit*), outra campanha de medições é necessária para validar os resultados das intervenções. (BARROS; BORELI; GEDRA, 2012, p.83-102).

No grupo B, as ações de “eficientização” estão condicionadas a mudanças nos hábitos de consumo, modernização do ambiente interno das edificações e na preferência por aparelhos certificados por programas de qualidade como as etiquetas PROCEL (BARROS; BORELI; GEDRA, 2012, p.159). Novos projetos arquitetônicos devem sempre privilegiar a iluminação natural e utilizar materiais que favoreçam o conforto térmico nos ambientes construídos. Ações como instalar aquecedores solares e sistemas automatizados que evitem desperdícios desempenham um papel importante na tarefa de gerenciar o consumo de energia, que é facilmente negligenciada por usuários relapsos (BARROS; BORELI; GEDRA, 2012, p.110-11).

## 2.9 CONCLUSÃO

Foram revisadas algumas tecnologias para estabelecer uma RSSF como: possíveis circuitos embarcados, antenas, protocolos e padrões de comunicação, culminando com o sistema SEP 2.0 que é uma tecnologia baseada no padrão Zigbee IP exclusiva para a *Smart Grid* que prevê funcionalidades que vão além dos objetivos de redução do consumo de energia elétrica, mas visam uma interação mais “inteligente” entre usuários e aparelhos elétricos que promova as atitudes de economia de consumo por meio da automação destas tarefas. Também foi

apresentado um histórico dos medidores remotos de consumo dos anos 70 até mais atuais aparelhos similares ao sistema desenvolvido compatíveis com os *Smart Meters*. Alguns conceitos e regulamentações da ANEEL embasam as ações administrativas e referenciam os parâmetros para o uso eficiente da energia elétrica, que é o objetivo da ferramenta desenvolvida pelo trabalho de pesquisa e desenvolvimento.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o desenvolvimento do sistema de coleta de dados por RSSF, com auxílio de algumas metodologias de projeto para avaliação qualitativa dos resultados obtidos. O projeto foi iniciado com a aprovação de uma proposta de P&D ANEEL para desenvolver um sistema de monitoramento de consumo de “baixo custo” por redes de Sensores sem fios com a tecnologia Zigbee. Uma peculiaridade do projeto é medir a potência consumida com base nas medições de corrente, levando em conta o perfil de carga nominal de cada dispositivo e máquina elétrica monitorada. Pelo fato de ser um sistema de “baixo custo”, o valor da tensão pode ser fixo ou medido apenas na entrada da unidade consumidora, sendo que só Sensores de corrente já bastam para inferir o consumo. O *hardware* a ser desenvolvido pela proposta inicial eram Sensores de corrente interligados em redes sem fios, e um dispositivo que fazia interface entre a RSSF e o computador.

O projeto com duração máxima de 24 meses consistiu na execução de duas fases iniciais, que segundo o manual de P&D da ANEEL (2013, p.16) são de pesquisa básica e aplicada, pela comprovação teórica da viabilidade tecnológica do conceito inicial e de testes práticos com protótipos funcionais, com vistas a obter um produto comercial em fases posteriores.

#### 3.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Após revisar a literatura em busca de sistemas e dispositivos preexistentes no estado da arte e da técnica e compreender os problemas e necessidades em medir e gerenciar o consumo, neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do projeto com auxílio da tecnologia do *Design Axiomático - DA* (AXIOMATIC..., 2013), método formal utilizado para avaliar o desenvolvimento conceitual de sistemas, identificando estruturas de dependência entre os conjuntos das necessidades do projeto ( $N_p$ ) por parte dos clientes, restrições de projeto ( $R_p$ ), requisitos funcionais ( $R_f$ ), parâmetros de projeto ( $P_p$ ) e variáveis de processo ( $V_p$ ), em um processo iterativo que culmina na

obtenção de soluções que podem ser validadas ou refutadas pelos axiomas (SUH, 1990):

- Axioma 1: “Maximizar a independência dos Requisitos Funcionais”. O ajuste de um parâmetro deve idealmente interferir em apenas um requisito funcional.
- Axioma 2: da informação: “Minimizar o conteúdo da informação do projeto”. Havendo várias possíveis soluções, a mais simples deve ser escolhida. O conteúdo da informação se refere à redução de incertezas, impactos, desgastes e pode ser quantificado pela probabilidade de um conjunto de soluções satisfazer aos requisitos funcionais.

Axiomas são abstrações afirmativas aceitas como verdades, para as quais não existem provas concretas por não existirem evidências que falsifiquem suas afirmações. O design axiomático começa por identificar restrições e requisitos funcionais de acordo com as necessidades do projeto. Neste ponto, vale ressaltar que a intenção neste trabalho é utilizar o DA como ferramenta de avaliação qualitativa em algumas decisões de projeto em função dos axiomas, matriz de decisões e métricas comparativas sugeridas pelo DA, para gerar uma lista com a síntese dos requisitos funcionais e suas respectivas soluções no domínio físico, que demonstra as tarefas executadas no projeto de uma forma coerente e concisa.

### 3.3 NECESSIDADES E RESTRIÇÕES DE PROJETO

Durante a primeira visita técnica nas instalações da usina termoeletrica UTE Norte Fluminense foram apuradas as necessidades do projeto em uma reunião com os usuários do sistema e feitos testes para avaliar o comportamento de antenas transceptoras MRF24J40MA, tanto em áreas livres quanto em áreas construídas na planta industrial da usina. As informações sobre as expectativas, necessidades dos clientes (Nc) e a observação do ambiente industrial da usina permitiu identificar também algumas restrições do projeto (Rp).

### 3.3.1 Identificação das Necessidades de Projeto.

De acordo com a reunião realizada na planta da usina termo Macaé, percebeu-se as seguintes expectativas e necessidades dos clientes a serem atendidas.

- Np1) Conceber um sistema para medir o consumo de energia elétrica em várias cargas dispersas na planta de produção de energia termoelétrica, pois os gestores do sistema desconhecem a parcela real de consumo de cada equipamento na instalação, ou a parcela de energia elétrica consumida em cada setor da empresa;
- Np2) o sistema deve ser automático e aplicável a múltiplas cargas, pois a instalação possui diversos equipamentos que se espera registrar o tempo de uso diário, consumo e curva de carga;
- Np3) o sistema deve possuir métodos de identificação e cadastro dos dispositivos para que possam ser incluídos, retirados ou substituídos sem afetar os demais medidores;
- Np4) o sistema deve armazenar os dados coletados, e permitir que os mesmos sejam apresentados em relatórios e gráficos demonstrando o consumo em períodos diários, semanais, mensais, anuais, etc;
- Np5) o sistema deve realizar medições simultâneas para comparações, em intervalos programáveis a partir de uma medição por minuto, ou outros intervalos maiores em função da ocupação das máquinas monitoradas;
- Np6) as secções transversais dos cabos condutores monitorados durante os ensaios no projeto medem de 20 mm e 25 mm, e os dispositivos Sensores devem comportar medições em cabos destes diâmetros;
- Np7) espera-se que o sistema registre curva de carga de equipamentos, como motores, bombas, *chillers*, etc., bem como o tempo de uso dos equipamentos, com vistas a medidas preventivas de manutenção;
- Np8) os dispositivos desenvolvidos devem ter “baixo custo” em relação a sistemas comerciais que poderiam satisfazer total ou parcialmente os requisitos deste sistema.

### 3.3.2 Identificação das Restrições de Projeto.

A identificação das necessidades de projeto revela as restrições e problemas que limitam o conjunto das possíveis soluções. Algumas restrições são inerentes ao “sistema” e não podem ser evitadas, outras são restrições ditas de “entrada”, que são limites impostos por especificações de projeto, por limites legais, de custos, etc.

Rp1) A usina termoeletrica é uma instalação com área de mais de 100.000 m<sup>2</sup>, com vários obstáculos como tubos e estruturas metálicas, paredes de concreto, com ambientes de acesso restrito pelo grau de periculosidade como visto na fotografia 2;



**Fotografia 2 – Ambiente externo da usina.**

**Fonte: Autoria própria**

Rp2) os cabos condutores das cargas elétricas monitoradas estão concentrados junto aos seus dispositivos de acionamento e controle no interior de armários e gabinetes metálicos que estão dentro de galpões com paredes espessas de concreto;

Rp3) a atmosfera da usina é agressiva aos circuitos eletrônicos exigindo proteção contra umidade, poeira e outros agentes dispersos no ar que podem causar oxidação de contatos e soldas, reduzindo a vida útil dos dispositivos;

- Rp4) os procedimentos para instalação do Sensor ou rede não podem interferir no funcionamento normal dos equipamentos, que não podem ser desligados;
- Rp5) o gerenciamento e manutenção do sistema medidor de consumo não deve depender de intervenções da equipe técnica da usina, que é pequena e prioriza as atividades rotineiras;
- Rp6) os Sensores de corrente devem ser confeccionados de materiais isolantes, preferivelmente polímeros, de acordo com as normas internas de segurança;
- Rp7) nas proximidades de alguns instrumentos específicos instalados na planta industrial é proibida utilização de fontes emisoras de RF;
- Rp8) a resolução ANATEL 365/2004, restringe a potência dissipada na faixa entre 2400 MHz e 2450 MHz ao limite de 400 mW (26 dBm), em cidades com mais de 500 mil habitantes, exigindo licença nestes casos. A potência máxima dissipada não pode ultrapassar 1 W (ANATEL, 2013).

### 3.3.3 Análise das Restrições de Projeto.

As Np1, Np2, Np3, Np4 e Np5 requerem armazenar as informações coletadas pelos dispositivos Sensores em um banco de dados, para apresentação visual em um terminal, na forma de gráficos ou relatórios. O sistema deve ser automático coletando dados em intervalos regulares. A Np8 privilegia o “baixo custo” em detrimento do desempenho, em havendo várias possíveis soluções, a de mais baixo custo deve ser escolhida.

As Rp1, Rp2 e Rp3 são restrições de sistema e as Rp4, Rp5, Rp6, Rp7 e Rp8 são restrições de entrada. Uma Infraestrutura de comunicação por cabo é mais estável e facilita gerenciar o sistema, mas as Rp1, Rp4 e Rp5 descartam esta possibilidade, que exige instalação permanente em todos os pontos monitorados, dificultando remover, deslocar ou adicionar novos Sensores, tornando o sistema “rígido” e aumentando os custos de manutenção.

Um sistema coletor baseado em RSSF evita as Rp4 e Rp5, mas fica limitado por Rp1 e Rp2 pelo modelo básico para RSSF, pois os Sensores devem fazer as medidas dentro dos armários e gabinetes metálicos que atenuam os sinais de RF e dificultam a formação de radioenlace. A Rp8 limita a potência do sinal de RF em 26

dBm para compensar os obstáculos e distâncias que separam os Módulos Sensores e o Módulo concentrador (*Gateway*) com banco de dados.

A Rp7 proíbe o uso de emissores de RF algumas áreas, para evitar interferências em sistemas preexistentes de instrumentação e controle, que são fundamentais para as operações da usina.

A Rp3 é baseada no relato de precedentes nos quais se observou uma degradação acelerada de circuitos eletrônicos desprotegidos, instalados na usina.

As Rp4 e Rp6 exigem métodos de medição que não interrompam o funcionamento normal das máquinas e equipamentos, excluindo a possibilidade de medir de corrente por resistor *shunt* em série com a carga monitorada, restando opções como medição por campo eletromagnético induzido por meio de bobinas de Rogowski ou por Sensores de efeito Hall, neste caso a seção transversal dos cabos condutores de 25 mm deve ser levada em conta.

### 3.4 PROBLEMAS E SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS

Partindo das necessidades do projeto e de suas restrições, com base na revisão teórica devem ser buscadas soluções para os problemas identificados, que permitirá a síntese dos requisitos.

#### 3.4.1 Topologias para Infraestrutura Coletora de Dados por RSSF.

As RSSF são ideais para monitorar fenômenos físicos observáveis em pontos remotos dispersos, em áreas extensas evitando grandes intervenções na planta industrial com instalação dos cabos de envio de dados. O problema de conectar Sensores ao banco de dados na topologia convencional de RSSF, causado por condições ambientais (armários metálicos, paredes de concreto e distância) que os degradam os sinais de RF pode ser resolvido pela divisão do requisito funcional de coletar dados em 3 etapas:

- 1) Coleta dos parâmetros elétricos no interior dos ambientes blindados: Módulos Sensores (MS) podem adquirir o valor analógico de corrente, digitalizar e transmitir os dados coletados por comunicação serial ligando um ou mais Módulos Sensores em barramentos, para um

- Módulo Gerente (MG) equipado com uma antena transceptora de RF, que envia os dados armazenados quando requisitado;
- 2) acesso aos Módulos Gerentes nos galpões: instalar roteadores para criar linhas de visada com o ambiente externo do galpão, contornando as paredes de concreto que atenuam o sinal de RF, e repassando os dados extraídos dos vários armários. Os roteadores devem ter o mesmo *hardware* e *firmware* dos MGs;
  - 3) coleta nos galpões monitorados na planta da usina: alguns pontos mais distantes requerem a instalação de um roteador entre os pontos monitorados e o Módulo Coordenador (MC), que está ligado ao banco de dados.

Nesta infraestrutura, vários Módulos Gerentes (MG) interligados atendem requisições de dados quando solicitados, ou repassam mensagens para outro destinatário atuando como Roteador. Um Módulo Coordenador (MC) faz as requisições de acordo com ordens de serviço (OS), recebidas de um aplicativo de interface entre o MC e o Banco de Dados, coletando os dados de um Gerente por vez, como ilustrado na figura 10.

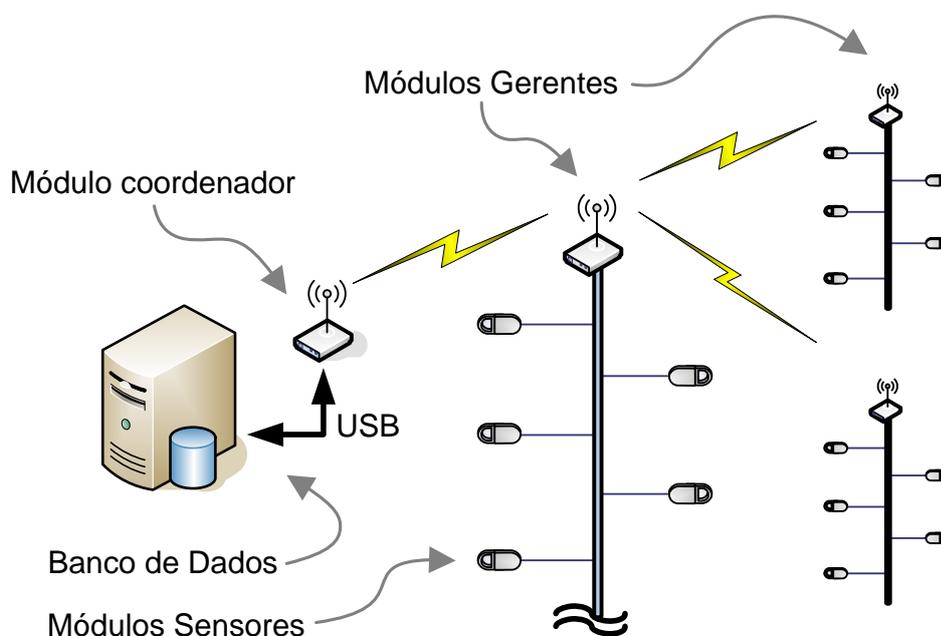


Figura 10 – RSSF em topologia tree-cluster.

Fonte: Autoria própria

### 3.4.2 Módulos Sensores para Ambientes Blindados a RF

Estabelecer um barramento compartilhado entre Módulos Sensores e um Módulo transceptor atende aos requisitos de redução de custos, e possibilita medições dentro dos painéis. De acordo com o axioma da informação, compartilhar recursos que não sejam concorrentes é uma forma de simplificar um sistema.

Digitalizar os sinais analógicos no próprio Sensor é necessário para evitar transmissões analógicas, que poderiam sofrer interferências eletromagnéticas no interior dos quadros elétricos. Se os sinais são digitalizados então podem ser transmitidos serialmente por um barramento, já que os microcontroladores possuem *hardware* para esse tipo de comunicação que interliga vários dispositivos em um único barramento.

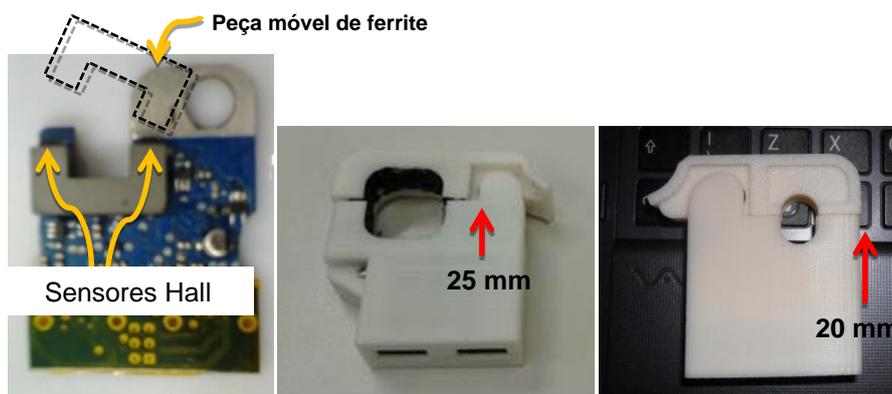
Para projetar o barramento é necessário levar em conta a restrição de espaço dentro dos armários e gabinetes. A escolha do sistema de medição dos sinais analógicos de corrente e dos conectores que devem ser utilizados para o barramento compartilhado, determinam a forma física dos Sensores de corrente, sendo preferíveis os componentes de menores dimensões.

#### 3.4.2.1 Medições não invasivas de corrente.

Para substituir a medição de corrente por queda de tensão em resistor *shunt* é possível medir o campo eletromagnético induzido em torno de um cabo condutor sem interromper o circuito elétrico, concentrado as linhas de fluxo em um circuito magnético que pode ser aberto e fechado.

Bobinas de Rogowski concentram o campo eletromagnético induzido pelo condutor, podem ser abertas e fechadas e são flexíveis e facilitando a concepção mecânica do dispositivo, mas exigem circuitos eletrônicos mais complexos e de custo elevado.

Opcionalmente os Sensores de efeito Hall possuem menor custo e medem o fluxo concentrado em circuitos ferromagnéticos rígidos, mas que normalmente exigem núcleos separados de ferrite de dimensões e geometria adequados, que permitem introduzir e retirar os cabos condutores, tornando a montagem mecânica mais complexa, como pode ser visto na fotografia 3.



Fotografia 3 – Módulos Sensores: detalhes internos e externos

Fonte: Autoria própria

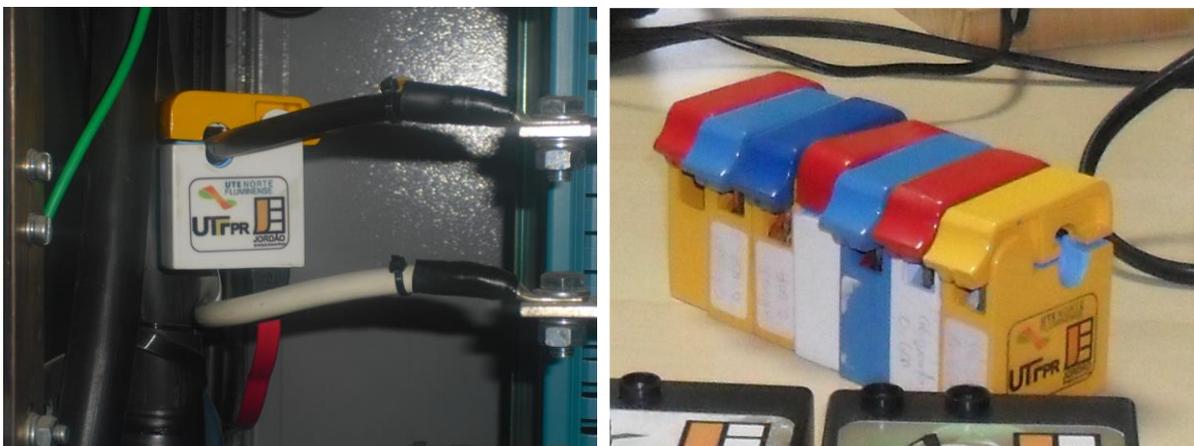
#### 3.4.2.2 Mecânica para os Módulos Sensores.

A tentativa inicial de proteger a eletrônica e o núcleo separado de ferrite móvel com baixo custo foi construindo protótipos com ZAMAC, que é uma liga metálica

composta por zinco, alumínio e cobre. O metal tinha função adicional de blindar o circuito contra interferências eletromagnéticas, que podem melhorar a qualidade e precisão da instrumentação dentro do microambiente do quadro elétrico. Adicionalmente, um processo de metalização em torno de um núcleo resinado sobre todo o circuito completavam a proteção e conferiam resistência mecânica ao protótipo.

Os Sensores foram instalados nos quadros da usina, como pode ser visto na fotografia 4, mas os protótipos construídos com esta tecnologia de baixo custo, conformados em moldes de silicone rígido apresentavam imperfeições que dificultavam a sua montagem, exigindo retoques manuais. Entretanto, acredita-se que um esforço de *design* para corrigir alguns detalhes pode resultar em um processo economicamente viável, de acordo com os requisitos do projeto.

Mas, na avaliação dos responsáveis pela execução do projeto, a carcaça de liga metálica, mesmo com proteção por pintura eletrostática, com rigidez dielétrica de milhares de volts, não foi uma solução bem aceita pelo aspecto da segurança. Neste caso uma restrição de projeto foi negligenciada, com origem na necessidade implícita do usuário de confiar no equipamento manuseado dentro de um quadro elétrico com barramentos “vivos” e “alimentados” com tensões e correntes elevadas.



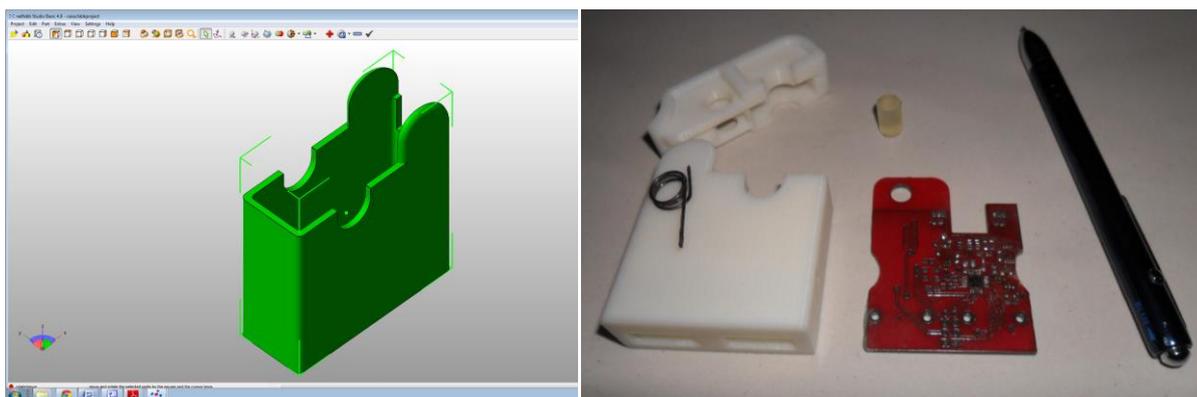
**Fotografia 4 – Módulos de ZAMAC e pintura eletrostática**

**Fonte: Autoria própria**

#### 3.4.2.3 Protótipos produzidos pela tecnologia de impressão 3D.

Para atender a questão da segurança, optou-se por confeccionar Sensores em plástico ABS pelo sistema de prototipagem rápida, com uma impressora UPrint da Stratasys, pelo processo conhecido como FDM (*Fused Deposition Modeling*), que é ideal para produzir pequenos lotes de peças funcionais. Neste sistema uma peça

projetada em um *software* de CAD (*Computer Aided Design*) é impressa em finas camadas sobrepostas, a partir de um arquivo do tipo stl. Como ferramentas de desenvolvimento e modelagem, foram utilizados os *softwares* nas versões livres do SketchUp (SKETCHUP, 2013) para modelagem e Netfab (NETFABB, 2013), para reparos no arquivo tipo “.stl” gerado pelo SketchUp, que pode apresentar algumas imperfeições em geometrias mais complexas. A figura 11 mostra o modelo digital e a peça confeccionada na impressora 3D (3 dimensões), com demais componentes.



**Figura 11 – Software Netfab e peças produzidas por FDM**

**Fonte: Autoria própria.**

Com auxílio da impressora 3D, foi desenvolvido um protótipo com dimensões e funcionalidades que atenderam aos requisitos do projeto, de tamanho, facilidade de manuseio, proteção e suporte ao conjunto de circuitos e elementos mecânicos. O conjunto final é composto de 4 peças principais, que são a caixa, a ponteira móvel, uma mola para retorno da ponteira móvel e um pino para o eixo da ponteira móvel, que é encaixado diretamente na placa de circuito impresso.

#### 3.4.2.4 Barramento serial para Sensores.

Depois de acondicionar os Módulos Sensores em invólucros apropriados, o próximo problema é agrupar os dados coletados em um barramento por meio de circuitos eletrônicos embarcados microcontrolados, com acesso a uma memória por comunicação serial, e prever métodos para identificar Sensores na RSSF.

Alguns microcontroladores possuem comunicação serial por *hardware* para implantar um barramento de comunicação. Entre os protocolos suportados são mais comuns: USB, UART, SPI, I2C, existindo alguns microcontroladores com protocolos como I2S, LIN, CAN entre outros, com custos mais elevados.

O barramento I2C permite ligar componentes como memória indelével do tipo EEPROM, RTC, Sensores diversos, monitores de LCD, entre outros que podem eventualmente compor o sistema. Assim, para satisfazer aos requisitos de custo, e manter a flexibilidade do projeto, optou-se pelo protocolo I2C cujo barramento admite dispositivos mestres, escravos e multimestres, além de transmitir em vários modos de velocidade e ocupar apenas duas vias, SDA (dados) e SCL (*clock*) (PHILIPS SEMICONDUCTOR, 2013).

O *hardware* dos microcontroladores PIC trabalham na frequência de 100 KHz, com capacitâncias máximas de 400 pF nas vias, que também são influenciadas pelo número de dispositivos, comprimento, características físicas do barramento e pelo valor dos resistores de *pull-up* necessários nas linhas SDA e SCL, calculados pela equação 3 (ZANCO, 2006):

$$C_{\text{barramento}} = t_r / (2,2 \times R_p) \quad (3)$$

Onde:

- $C_{\text{barramento}}$  é a capacitância em pF
- $t_r$  é o tempo de borda de subida em ns
- $R_p$  é o valor do resistor de *pull-up* em Ohms

Segundo Zanco (2006, p.206), desde que não se atinja o valor de 400 pF, a distância máxima do barramento pode chegar a alguns metros. Como são desnecessários cabos maiores que alguns metros (altura dos armários) interligando Sensores ao Módulo transceptor externo, foram usados cabos de rede comuns. Entretanto, para distâncias maiores ou para o caso de muitos dispositivos em rede é recomendado o uso de repetidores como o 82B715 nas extremidades do cabo, ampliando os limites de capacitância para 4000 pF e algumas dezenas de metros.

#### 3.4.2.5 Endereçamento convencional para barramento I2C.

Definindo o protocolo I2C, surgem problemas para identificar Módulos Sensores que podem ser inseridos ou retirados do barramento aleatoriamente.

No barramento I2C as comunicações sempre são iniciadas pelo dispositivo mestre, assim é necessário o prévio conhecimento do endereço do dispositivo para que se possa requisitar ou enviar qualquer informação. Em um circuito convencional isso não é um problema, pois o endereço de cada componente do barramento é conhecido e programado no *firmware* do microcontrolador, sendo acessados de acordo com a lógica do programa. Entretanto se o endereço for desconhecido, o acesso ao dispositivo não tem como ser realizado, pois dispositivos escravos não podem iniciar o envio de dados sem a ordem do mestre.

Um conjunto de Sensores com endereços conhecidos para cada barramento poderia ser utilizado, mas segundo o método axiomático, o resultado é uma solução acoplada. A identificação depende de um endereço, mas também do barramento para acessar a informação. A transmissão, da mesma forma depende de um endereço e um meio de acesso, conforme demonstra no quadro 1 que representa a matriz de *design*.

Esta solução exige Sensores com endereços únicos, para reconhecimento e acesso, mas o protocolo I2C dispõe de 10 *bits* para endereços que pode ser insuficiente em alguns casos.

		Pp1	Pp2
		Endereço	Barramento
Rf1	Identificar	X	X
Rf2	Transmitir	X	X

Quadro 1 – Solução de projeto com matriz acoplada

Fonte: Autoria própria, baseado em Suh (1990)

A duplicação de dispositivos pode gerar conflitos na rede, e certos endereços são restritos para controle na rede I2C. Como agravante, os endereços dos Módulos Sensores devem estar previamente gravados no *firmware* de cada Módulo Gerente, dificultando a produção em escala e descaracterizando a homogeneidade da rede, que deve ter o mesmo *hardware* e *firmware* em todos os Módulos. Uma solução melhor requer desacoplar os requisitos “identificar” e “transmitir”. De acordo com o

axioma da informação, deve-se simplificar o sistema compartilhando recursos que não sejam usados ao mesmo tempo sempre que possível.

#### 3.4.2.6 Acesso controlado por hardware ao barramento I2C.

Para eliminar a necessidade de endereços foi adicionada ao barramento uma via de ligação em série, que organiza o envio de dados em uma fila e mesmo com todos os dispositivos ligados ao barramento, apenas um por vez é o mestre. Topologicamente este encadeamento linear é similar ao *Daisy Chain* (MAXIM INTEGRATED, 2013). Assim, no barramento I2C existe apenas um mestre e um escravo por vez trocando dados. O último elemento ligado em série é o primeiro mestre da rede I2C, quando este finaliza sua comunicação pelo barramento, sinaliza ao próximo Sensor na fila que então assume o barramento. O objetivo prático é permitir que qualquer Módulo Sensor possa ser ligado em qualquer Módulo Gerente sem nenhuma configuração adicional ou cuidado extra durante a instalação do sistema.

O dispositivo escravo é uma memória compartilhada por Módulos Sensores, situada no Módulo Gerente com endereço único. Assim o requisito de “transmitir” dados não depende do mesmo endereço para o requisito de “identificar” o Módulo Sensor.

Quando todos os Módulos Sensores gravam seus dados, forma-se uma sequência determinada pela posição física do Sensor no barramento/série. Desta forma também se desacopla o Rf “identificar” do Pp “barramento”, além de permitir que qualquer Sensor seja ligado em qualquer Gerente, em qualquer posição. Os dados e Sensores ficam relacionados pela posição do Módulo Sensor em relação ao Módulo Gerente, previamente conhecida e cadastrada no sistema de banco de dados.

O único cuidado a ser tomado na instalação é observar a sequência dos Sensores no barramento, para relacionar as cargas e Sensores conforme cadastrado no sistema (por exemplo: Motor 1/ Sensor 1, motor 2/ Sensor 2, ar-condicionado/ Sensor 3). Uma limitação deste método é que a falha de um Sensor encadeado na fila, impossibilita o relacionamento dos dados e Sensores, sendo necessário prever e monitorar a ocorrência destas falhas no sistema.

Apesar deste inconveniente, esta solução gera uma matriz de *design* desacoplada entre os requisitos problemáticos, como pode ser verificado no quadro 2.

		Pp1	Endereço	Pp2	Barramento
Rf1	Identificar		x		0
Rf2	Transmitir		0		x

**Quadro 2 – Solução de projeto ideal, com matriz desacoplada.**  
**Fonte: Autoria própria, baseado em Suh (1990).**

#### 3.4.2.7 Estrutura do hardware e método de acesso ao barramento I2C.

Além dos Sensores, o barramento I2C também é compartilhado pelo microcontrolador que gerencia o sistema, pela memória indelével na qual os Sensores registram as medições, e pelo RTC que referencia os registros informando a data e hora para cada sequência de medição.

Cada Módulo Sensor disponibiliza um conector de entrada (E) e outro de saída (S). Para minimizar o espaço ocupado na placa de circuito impresso foram utilizados conectores SATA de montagem de superfície (SMD) com perfil baixo. Como cabos SATA encontrados no comércio são de 50 cm de comprimento, e o ponto externo onde o Módulo Gerente deve ser instalado pode ter dois metros ou mais, optou-se por projetar o Módulo Gerente com um conector RJ45, cujo cabo pode ser montado do tamanho necessário. Foi previsto um adaptador entre o cabo RJ45 e barramento por cabos SATA para este caso. Para ampliar o alcance da distância no barramento é necessário o uso de componentes repetidores como o circuito integrado 82B715 no projeto do *hardware*, permitindo que dois dispositivos possam estar 10 vezes mais afastados entre si.

O método de identificação dos Sensores no barramento depende da adição de uma via de controle além das outras quatro, de alimentação, *clock* e dados. Diferindo do barramento e alimentação ligados em paralelo, a via de controle é sequencial e encadeia os Módulos Sensores (S1, S2, S3, Sn...) na sequência de conexão ao barramento, como pode ser visto na figura 12.

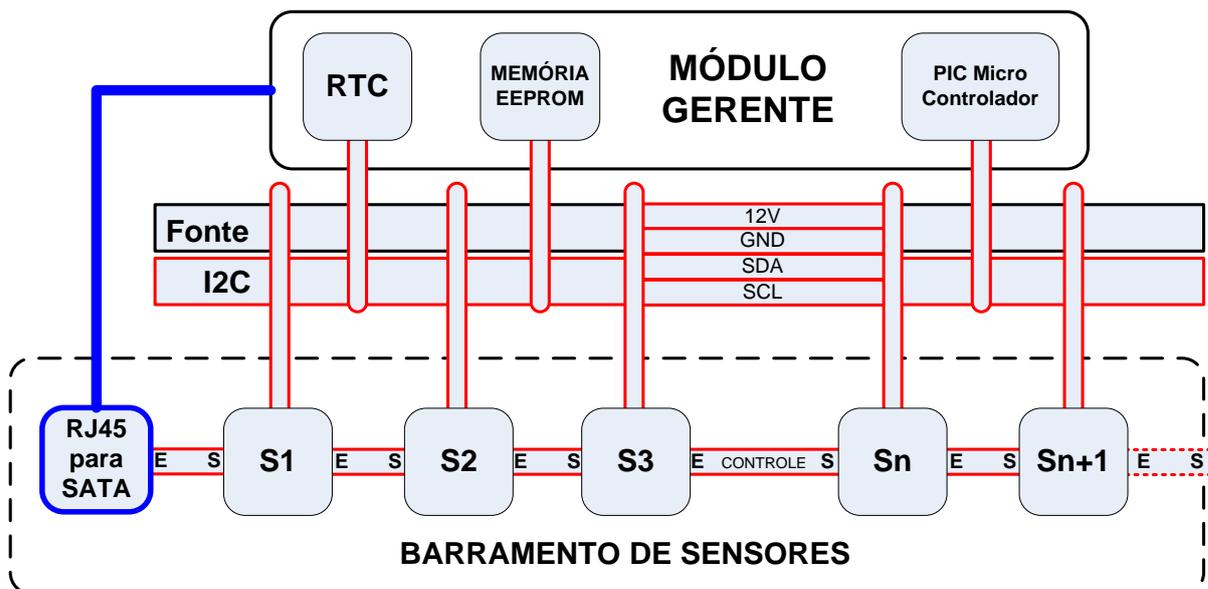


Figura 12 – Esquema de conexões do barramento de Sensores

Fonte: Autoria própria.

Todas as saídas (S) e estradas (E) ficam em nível alto quando o Sensor é conectado ao barramento e energizado, exceto o último Módulo Sensor da cadeia que possui sua entrada em nível baixo, fazendo-o o iniciar o processo sequencial de registros na memória compartilhada. O acréscimo de um novo dispositivo no barramento é detectado naturalmente, alterando apenas o tamanho do vetor de registros que é conferido pelo Gerente ao fim de cada ciclo.

Para desenvolver o sistema evitando a concorrência do barramento I2C, foi utilizado o simulador *Visual Object Net++*, que oferece uma interface gráfica para simular Redes de Petri (Rdp). As Rdp oferecem um método reconhecido para modelar sistemas a eventos discretos, que se funcional pode ser demonstrado por prova matemática (MURATA, 1989). Embora existam representações mais sofisticadas para Rdp, como redes coloridas e estocásticas, para uma simulação simplificada dos Sensores no barramento é suficiente uma representação por rede ordinária. As Rdp são um tipo particular de grafo simples, orientado e bipartite com um par  $G = (V, E)$  cujo conjunto de vértices  $V$  pode ser separado em dois conjuntos  $A$  e  $B$ , tal que toda aresta de  $E$  liga somente vértices de  $A$  com vértices de  $B$ . As Rdp podem ser representadas por símbolos gráficos de “transições”, “lugares” e os “fluxos” que depende de estados ou pré-condições e pós-condições. Segundo Murata (1989, p. 542-543).

Formalmente uma Rdp é uma 5-tupla (quíntupla)  $Rdp = (P, T, F, W, Mo)$ , onde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  é o conjunto finito e não vazio de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  é um conjunto finito e não vazio de transições;
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  é um conjunto de arcos de denota relação de fluxo;
- $W: F \rightarrow \mathbb{N}$  é o peso da função;
- $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$  é o ponto inicial.

A Rdp ilustrada na figura 13 sintetiza o modelo descritivo do barramento compartilhado. As pré-condições quando satisfeitas, disparam transições que correspondem a uma ação, fazendo fichas (*token*) que representam recursos se deslocarem de um estado, ou lugar “P<sub>1</sub>” para outro estado, ou lugar “P<sub>2</sub>” seguindo um fluxo “F”, direcionado por arcos de pesos “W” que indicam a quantidade de fichas necessárias ao disparo de uma transição.

A modelagem por Rdp foi preferida neste caso por se tratar de um sistema distribuído, onde eventos concorrentes precisam ser organizados para evitar conflitos e disputa de recursos entre os dispositivos.

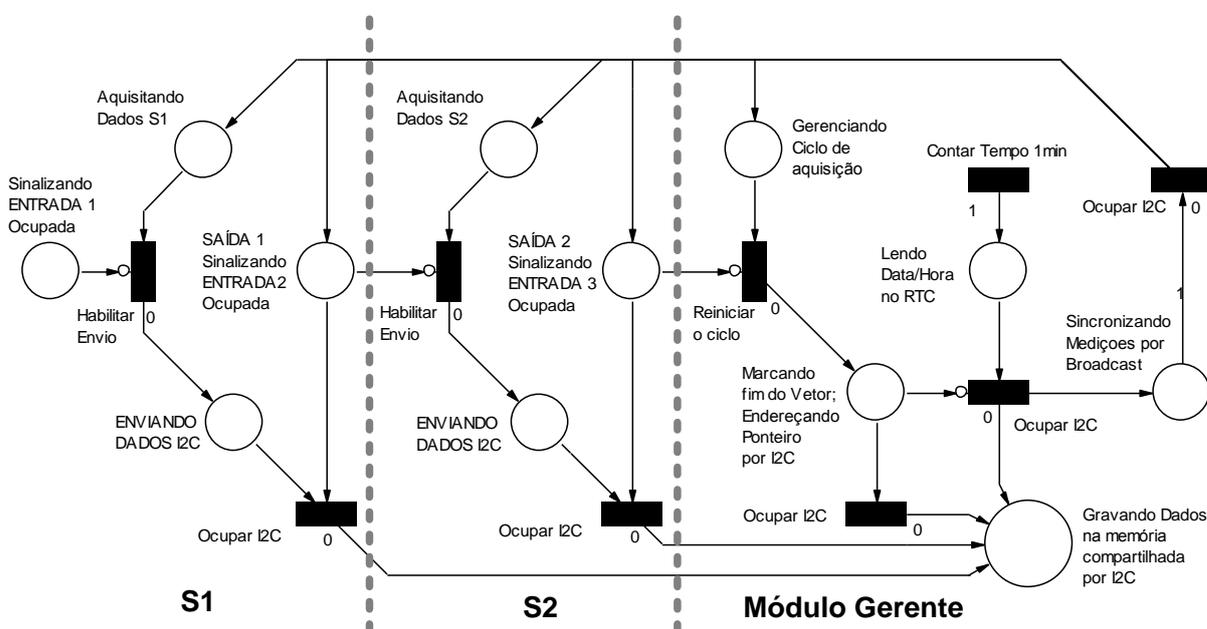


Figura 13 – Modelagem em Rdp do barramento de Sensores.

Fonte: Autoria própria.

#### 3.4.2.8 Vetor de dados na memória I2C.

No barramento I2C apenas o dispositivo mestre inicia as transmissões, assim é necessário um endereço previamente conhecido. O endereço lógico da memória é definido por padrão, mas pode ser diferenciado em *hardware* por 3 pinos (*chip select bits*), para casos nos quais mais memórias ocupem o mesmo barramento. Como foram usados apenas dois componentes, que são o RTC (*Real Time Clock*) e a memória, foi utilizado o método de endereçamento por 7 *bits*.

A memória, que sempre é um dispositivo “escravo” no barramento realiza operações de escrita e leitura. As operações de leitura podem ser diretas, aleatórias ou sequenciais e a memória possui um contador interno que é incrementado automaticamente a cada operação. Na operação de escrita é necessário enviar dois *bytes* para iniciar a operação, um de controle e outro de endereço para a memória. (ZANCO, p.212-213).

No barramento compartilhado há um problema, de que cada dispositivo Sensor desconhece o endereço atual da operação de escrita, sendo necessário armazenar esta informação em uma posição fixa de memória, a ser consultada no início desta operação. Este endereço atua como um “ponteiro”, consistindo em um valor de 1 *byte* que é incrementado após cada registro por Módulos Sensores, “apontando” para a próxima posição de memória. Cada Módulo Sensor registra valores entre 0000h e 00FAh, sendo os valores 00FBh~00FFh reservados para controle.

O processo de registros sucessivos inicia com uma consulta do Módulo Gerente ao RTC, gravando a hora/data atual na memória e atualizando o ponteiro. Posteriormente é feita uma operação de “chamada geral” pelo envio do valor 0000h no barramento I2C. Neste momento, os Módulos Sensores devem estar configurados como “escravos” e o Gerente, como “mestre”, para que seja possível a recepção da chamada geral. Após a chamada geral (*broadcast*) cada Módulo Sensor volta ser “mestre” para poder acessar a memória compartilhada.

Cada Módulo Sensor consulta o ponteiro, registra sua medida e atualiza o ponteiro, e por fim o Módulo Gerente marca o fim do vetor com 00FFh, delimitando o vetor para posterior processo de busca. Assim, cada vetor inicia com data/hora das medições sincronizadas, e termina com 00FFh.

Na figura 14, o esquema demonstra a sequência de eventos do sistema de barramento compartilhado, formando o vetor de dados com a sequência de Módulos Sensores, que é equivalente a sua posição física no barramento. A leitura ao ponteiro exige antes, uma operação de escrita ao endereço fixo do ponteiro.

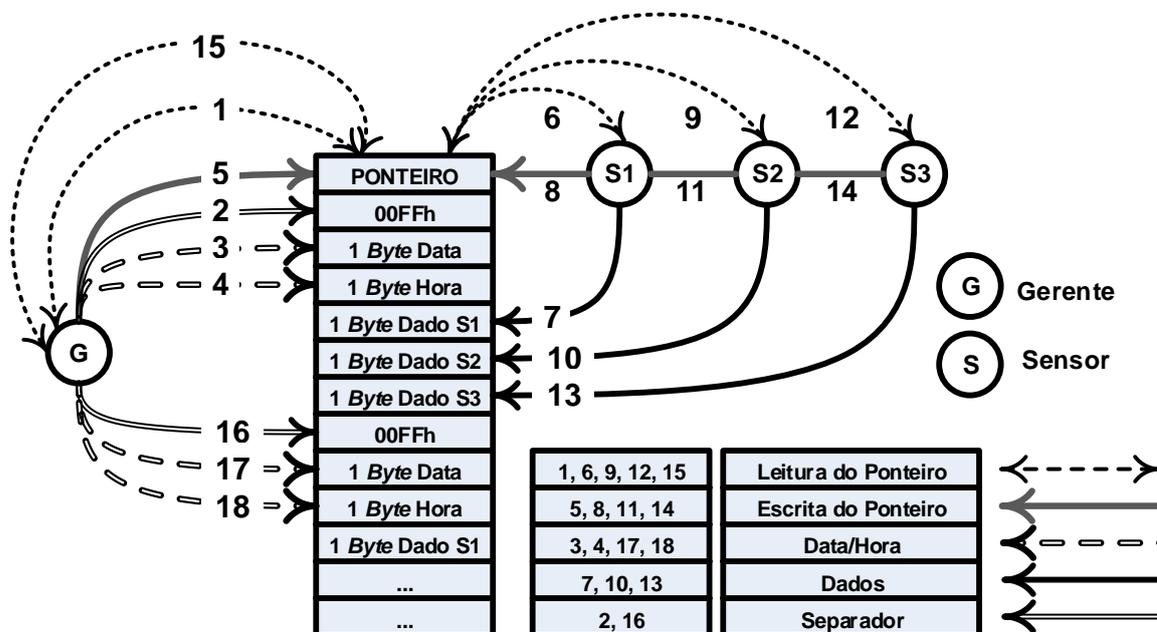


Figura 14 – Sequência de registros na memória compartilhada

Fonte: Autoria própria

#### 3.4.2.9 Dimensionamento do barramento compartilhado.

Além das limitações impostas pela capacitância do barramento que podem ser resolvidas com repetidores já comentadas, outra limitação do barramento I2C compartilhado, é o tempo gasto entre as transmissões no barramento que deve ser menor que o intervalo de 1 minuto entre chamadas gerais (*broadcast*) para a execução de leituras sincronizadas.

Pela sua capacidade de armazenamento a memória utilizada exige dois *bytes* para endereçamentos, e no barramento as transmissões enviam apenas um *byte* dados. O tempo de transmissão ( $T_{LOAD}$ ) em 100 kHz ( $F_{CLK}$ ), segundo a equação 4 é de 370 us, e o atraso por escrita ( $T_{WC}$ ) é em média de 3 ms, sendo no pior caso de 5 ms. Assim, pela equação 5 obtemos que uma escrita pode levar até 5,37 ms por *byte* escrito ( $byte_W$ ) e 370 us por *byte* lido ( $byte_R$ ) (MICROCHIP, 2013f). O tempo de

transmissão por Sensor no barramento ( $T_{BUS}$ ) pode ser obtido pela equação 6, que para o caso de um Sensor é de 43,7 ms, e no caso de três Sensores é de 76,66 ms.

$$T_{LOAD} = \frac{9 \cdot (1 + 2 \text{ bytes de endereço} + 1 \text{ byte dados}) + 1}{F_{CLK}} \quad (4)$$

$$T_{Total} = (T_{WC} + T_{LOAD}) \times \text{número de bytes} \quad (5)$$

$$T_{BUS} = (5 \text{ byte}_W + \text{byte}_R) + Sn \times (3 \text{ byte}_W + \text{byte}_R) \quad (6)$$

A figura 15 mostra o gráfico da equação 6 para até 3639 Sensores, o limite máximo para registrar valores no intervalo de 1 minuto. Entretanto esta quantidade é excessiva, pois o objetivo do barramento é monitorar a quantidade de cabos condutores que normalmente podem estar instalados em gabinetes, painéis, ou quadros elétricos.

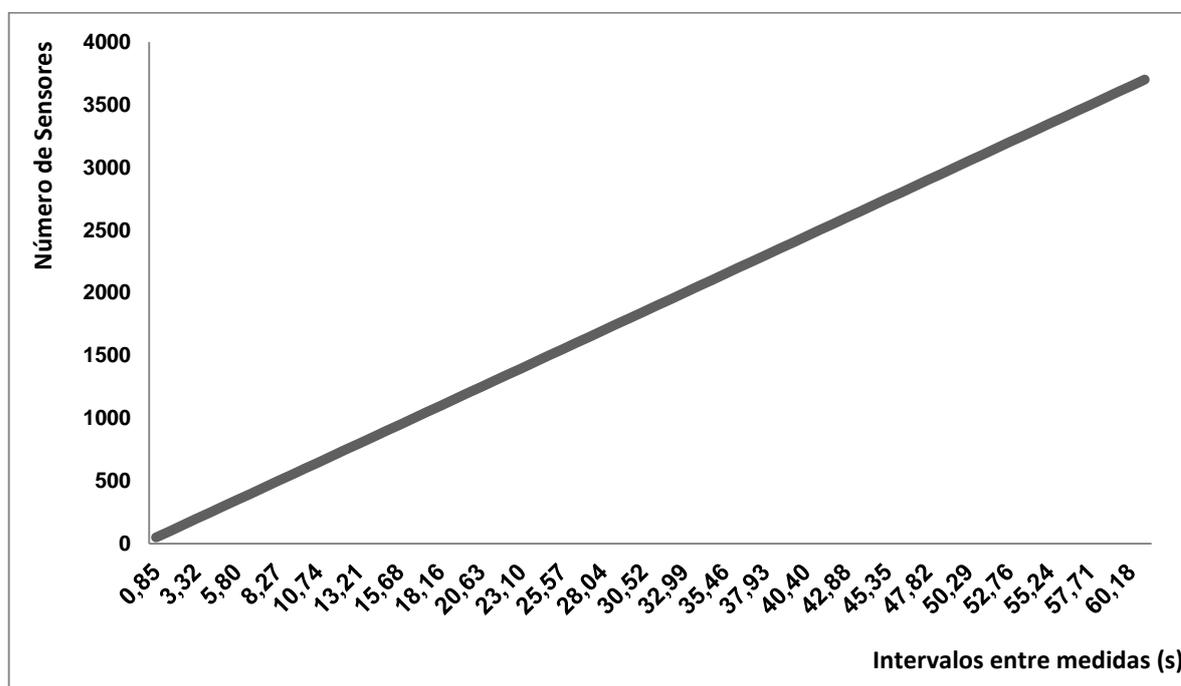
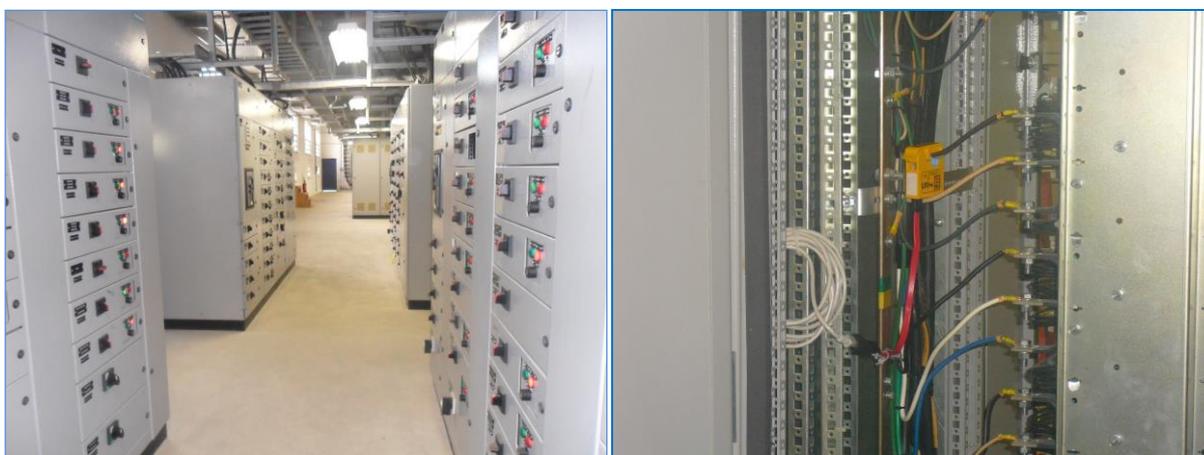


Figura 15 – Número de Sensores e intervalo entre registros

Fonte: Autoria própria

As normas NBR5410 e IEC-60439-1A não restringem a quantidade de condutores que pode haver em um quadro elétrico em baixa tensão, mas normatizam

as distâncias mínimas entre condutores e outros dispositivos internos, e os espaços reservados a manobras de manutenção. O número de elementos internos, altura máxima e dimensões adotadas pelos fabricantes de painéis, limitam a quantidade máxima de cabos condutores contidos em quadros elétricos comerciais (ABNT, 2004). Considerando os quadros elétricos existentes na instalação da usina termoelétrica (fotografia 5), também utilizados em outros ambientes industriais e comerciais, as limitações de custos e capacitância máxima dos cabos em 400 pF, definiu-se em dezenas a quantidade de Módulos Sensores por barramento. Outra limitação que deve ser considerada é a corrente máxima da fonte utilizada no Módulo Gerente.



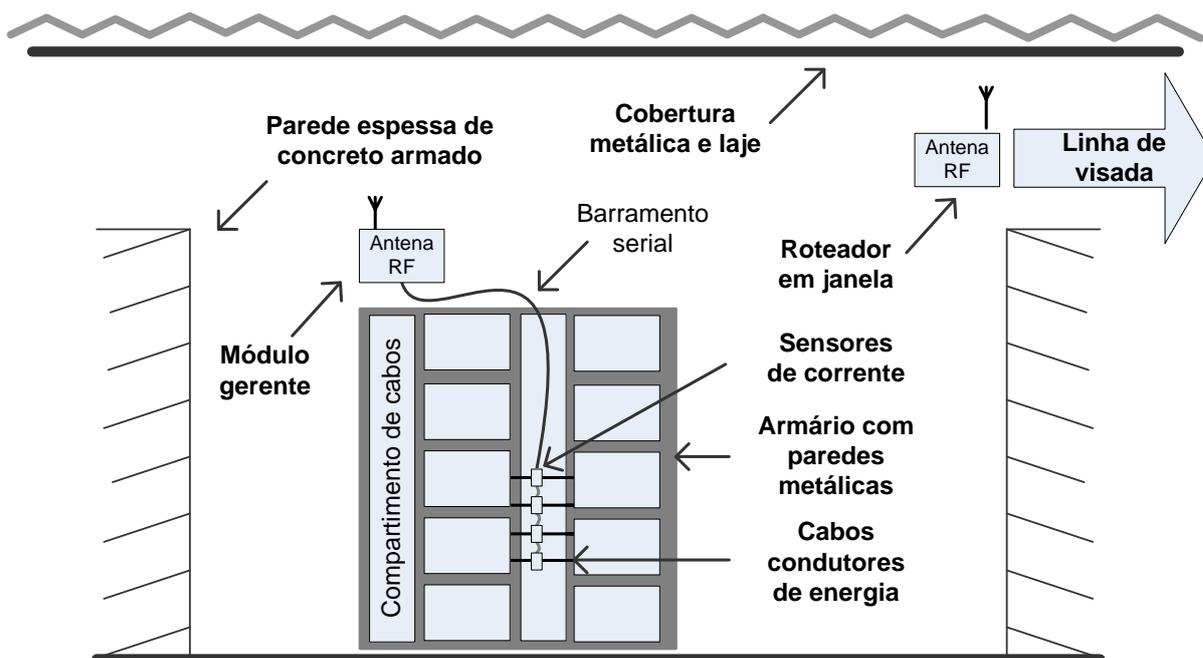
**Fotografia 5 – Quadros elétricos na usina Termomacaé.**

**Fonte: Autoria própria**

Um Módulo Gerente pode monitorar dezenas de Módulos Sensores que posteriormente terão seus dados registrados no Módulo Gerente e transmitidos por requisição para um Módulo Coordenador, evitando assim os problemas de instalação de infraestrutura por cabos até um computador central. Quantificar o número de Sensores no barramento também é importante para dimensionar a memória e o intervalo de dados que podem ser salvos e recuperados em casos de falhas, e o tamanho do vetor que pode ser armazenado e transmitido em uma única mensagem.

### 3.4.3 Módulos Gerentes como Roteadores

Como ilustrado na figura 16, o ambiente no qual estão instalados os quadros elétricos é construído para suportar explosões, e as paredes de blocos de concreto são mais espessas que as de alvenaria convencional.



**Figura 16 – Roteadores nos galpões da usina**

Fonte: Autoria própria

A cobertura é metálica na parte externa, além de possuir uma laje internamente, e as janelas são passagens que causam menos atenuação dos sinais de RF. Para transmitir os sinais de RF dos Gerentes no interior do galpão foi instalado um Módulo roteador próximo à janela do galpão, pois o vidro causa menos atenuação aos sinais de RF, criando uma linha de visada com o ambiente externo (fotografia 6).



**Fotografia 6 – Roteadores nas janelas dos galpões.**

Fonte: Autoria própria

### 3.4.3.1 Transmissão por RF e Módulos transceptores

Para transmitir dados pela RSSF é necessário definir os Módulos transceptores de radioenlace e o protocolo de comunicação. De acordo com os estudos prévios, o DASH7 e o Bluetooth LE eram opções promissoras no início do projeto, mas ofereciam poucos componentes para testes e os transceptores para estes protocolos tinham custo elevado.

O protocolo Zigbee é uma referência no contexto das RSSF, mas os custos de licenças do protocolo, filiação ao consórcio Zigbee, anuidades e licenciamento de produtos comerciais reduzem seu interesse. Uma rede Zigbee conecta até 64 mil nós de rede, mas requer espaço de memória de programa e de dados nos circuitos embarcados. Em uma RSSF híbrida como a proposta, cujos Sensores podem estar ligados em barramento, apenas um Módulo transceptor já atende a vários Sensores.

Em uma instalação elétrica, o número de quadros elétricos é da ordem de dezenas ou centenas, dependendo da atividade industrial ou comercial da unidade consumidora. Para estes casos, a fabricante Microchip disponibiliza o ambiente de desenvolvimento Miwi DE, com pilhas de protocolos nas versões Miwi P2P, Miwi e Miwi Pro para até 8000 nós de rede. O protocolo Miwi admite alterações e disponibiliza os blocos de códigos MiApp e MiMac em *firmware*. A pilha de protocolo é gratuita quando utilizada em conjunto com os componentes da Microchip, e os transceptores MRF24J40 também suportam o protocolo Zigbee, já que os protocolos Miwi são compatíveis com as camadas PHY e MAC do IEEE 802.15.4.

O bloco MiMac suporta transceptores MRF24J40 (2.4 GHz), MRF49XA (434 MHz) e MRF89XA (868 MHz) por protocolo SPI, oferecendo flexibilidade de projeto com vistas a futuras adaptações. Outros protocolos proprietários podem ser igualmente vantajosos, mas a experiência prévia com microcontroladores da Microchip por parte da equipe foi decisiva nesta escolha.

Para os Módulos Gerente e Coordenador, foram selecionadas as antenas MRF24J40MB com alcance de 1200 metros em áreas livres, com potência dissipada no limite permitido para a frequência de 2.4 GHz. Em relação ao método axiomático, a escolha do protocolo e do transceptor é amparada pelo axioma da informação que, em havendo opções, indica escolher sistemas simples de parâmetros elásticos que permitam adaptações.

### 3.4.3.2 Miwi P2P e resolução automática de rotas

As pilhas Miwi e Miwi Pro foram testadas, entretanto nestes protocolos o estabelecimento das rotas e trocas de mensagens pode durar frações de segundos ou quase minutos, e não é possível conhecer as rotas utilizadas. Os testes com a pilha P2P, que não forma rotas automaticamente, apresentou um comportamento mais previsível e estável, sendo uma boa opção para redes menores.

A pilha Miwi P2P (*Peer to Peer*) ocupa menos de 4 Kb de memória de programa e não exige memória de dados. Na rede é previsto um dispositivo Coordenador de rede, dispositivos de função completa que podem enviar e receber mensagens, e dispositivos de funções reduzidas que só respondem requisições.

A comunicação Miwi P2P é realizada em apenas dois passos de “negociação” (*handshake*) para conectar dispositivos, o pedido de conexão e a resposta. Havendo vários pedidos, o primeiro conectado é atendido. O padrão 802.15.4 prevê dois tipos de endereçamento, o longo com 64 *bits* e o curto com 16 *bits*. O Miwi P2P usa o endereçamento longo EUI (*Extended Unique Identifier*) para mensagens por *unicast* (comunicação de um para outro), e o curto para mensagens por *broadcast* (comunicação de um para todos) (YANG, 2013c, p.7-9).

No sistema implantado, cada Módulo possui um endereço único a ser definido na sua fabricação. A rede é homogênea com Módulos idênticos na forma, *hardware* e *firmware*, sendo configurados como dispositivos de função completa que podem enviar e receber mensagens.

Os roteadores necessários para contornar os obstáculos e superar a distância entre os Módulos Coordenador e Gerentes que não existem em redes P2P foram definidos em uma camada de transporte inserida no quadro de dados do protocolo Miwi P2P de 92 *bytes*, que se resume em 1 *byte* de controle e 4 *bytes* que definem origens e destino das rotas. Esta configuração limita naturalmente a rede ao máximo de 255 nós Gerentes, mas se necessário os endereços estão disponíveis até 8 *bytes*.

### 3.4.3.3 Quadro de mensagens Miwi P2P com cabeçalho de rotas

O protocolo Miwi P2P possui um quadro de mensagens simples em relação aos protocolos Miwi Pro, ou mesmo Zigbee, transmitindo um maior volume de carga útil de dados. Embora o Miwi P2P transporte até 92 *bytes* de dados por mensagens,

constatou-se em repetidos ensaios e testes que mensagens com 60 *bytes* e 70 *bytes* são ideais para o *hardware* e *firmware* confeccionados, trocando de 8 a 13 mensagens por segundo entre dois pontos (Coordenador-Gerente).

Restrições como espaço no interior dos quadros elétricos; corrente máxima suportada pela fonte do Módulo Gerente; comprimento dos cabos e aumento de capacitância por Sensor adicionado limitam o número de Sensores em algumas dezenas em cada barramento.

Nos ensaios (sem repetidores I2C) o máximo número testado foi com 10 Sensores, mas um quadro de 70 *bytes* agruparia dados de até 70 Sensores (respeitando as limitações mencionadas). Além dos *bytes* de dados que variam de acordo com o número de Sensores, um cabeçalho com 5 *bytes* no quadro de mensagens informam a origem e destino das mensagens (quadro 3).

Para a topologia adotada, com um roteador interno nas janelas dos galpões, roteadores externos e o próprio Coordenador, 3 saltos são suficientes para abranger toda a área da usina. Protocolos como Zigbee, Miwi Pro também limitam o número de salto em 3, evitando consumo excessivo de memória para guardar tabelas de todas as rotas possíveis ou de tempo de busca por estas rotas.

Controle	Origem 1	Origem 2	Origem 3	Destino	dado 1	dado 2	dado 3	...	dado 65
1 <i>byte</i>	...	1 <i>byte</i>							

**Quadro 3 – Cabeçalho no quadro de mensagens, com 4 *bytes* para rotas.**

**Fonte: Autoria própria**

O quadro de mensagens pode ser lido diretamente pelos métodos disponibilizados pela MiApp, que trata da comunicação ao nível dos protocolos SPI, controle de fluxo, de erros, entre outros atributos de redes. Os Módulos Gerentes recebem as mensagens com um cabeçalho de 5 *bytes*, que é analisado e tratado.

Se o receptor é destinatário da mensagem, esta é executada. Senão a mensagem é replicada e o endereço incluído na rota. Se já existirem três rotas ou se o receptor está incluído no cabeçalho, a mensagem é ignorada pelo receptor para evitar infinitas trocas da mesma mensagem.

### 3.4.3.4 Descoberta e manutenção de rotas em uma rede Miwi P2P

Após estabelecer a camada de transporte com o cabeçalho de rotas no quadro de dados do protocolo Miwi P2P, é necessário definir a política de descoberta e manutenção das rotas, visando os requisitos de facilidade de instalação, mobilidade e flexibilidade para incluir, excluir e substituir Módulos Gerentes sem interferir no funcionamento do sistema.

A definição de rotas entre o Coordenador e nós Gerentes dispersos aleatoriamente pelo ambiente da usina pode ser classificada com um problema de busca cega, ou sem informações prévias sobre as possíveis rotas, que precisam ser descobertas (RUSSELL; NORVING, 2004 p.74). O problema pode ser representado por grafos simples com nós de grau igual ou maior que 2, não se enquadrando no caso específico de buscas em árvores binárias. A profundidade do grafo é limitada ao comprimento de 3 saltos, que são os caminhos possíveis entre o nó raiz e as folhas do grafo. O nó raiz corresponde ao Módulo Coordenador, os nós internos são roteadores e nas bordas ou folhas existem os nós Gerentes. Do ponto de vista do sistema, os nós Gerentes e roteadores possuem o mesmo *hardware e firmware*.

O processo de busca pode ser iniciado pelo Coordenador ou pelos Módulos Gerentes, e pode inclusive ser bidirecional, desde que haja como organizar as buscas partindo de ambas as extremidades.

Em uma primeira abordagem *top-down*, o banco de dados informa os Módulos cadastrados ao Módulo Coordenador, que se encarrega de gerar, testar todas as possíveis rotas e escolher as melhores pelo método *unicast*, que automaticamente descarta mensagens não esperadas. As referências para escolha são respectivamente os caminhos com menos saltos e com menos erros. Para manter as rotas atualizadas é necessário repetir o processo de testes em intervalos programáveis de tempo, este intervalo é programável e está ajustado para 15 minutos.

Como desvantagem da busca por tentativa e erro, cita-se que o aumento da quantidade de nós consome muitos recursos em termos de tempo, processamento e memória. O crescimento das possibilidades pode ser calculado pelo princípio fundamental da contagem, pela simples equação 7, de arranjo.

$$A_n = \frac{n!}{(n-p)!} \quad (7)$$

Onde:

A = Número de possíveis rotas

n = número de nós de rede

p = número de saltos

Somando as rotas para 1, 2 e 3 saltos em função do número “n” de Gerente na forma  $(n) + (n^2 - n) + (n^3 - 3n^2 + 2n)$  obtêm-se a equação 8, que informa o total de rotas possíveis para 3 saltos:

$$A_T = n^3 - 2n^2 + 2n \quad (8)$$

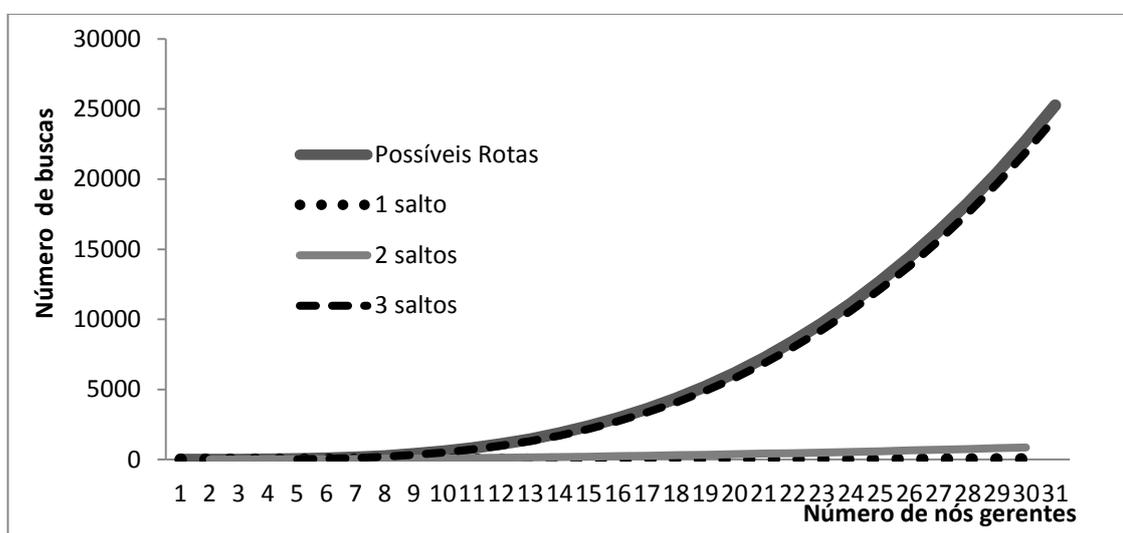


Figura 17 – Número de buscas por tentativa e erro

Fonte: Autoria própria

Na figura 17 o gráfico das possíveis rotas é traçado para até 30 Gerentes, resultando em 25260 possíveis rotas. Com apenas 100 Gerentes este número se aproxima de 1 milhão de possibilidades. O cálculo para gerar as rotas é rápido, mesmo executado em um microcontrolador com apenas 20 MHz de *clock*. Entretanto, considerando a quantidade de memória necessária para armazenar as possíveis rotas e o tempo da busca acumulado, sendo que a troca de mensagens de 70 *bytes* pode demorar até 0,12 s (tempo de pedido e resposta), conclui-se que a abordagem de busca por tentativa e erro é inviável mesmo para redes com poucos Gerentes, requerendo métodos de busca mais sofisticados.

### 3.4.3.5 Método de busca baseado no algoritmo BAI

Dentre os possíveis métodos de busca sem informação que partem do nó raiz, o algoritmo de Busca por Aprofundamento Iterativo (BAI) é uma boa estratégia por consumir pouca memória e ser realizado em tempo  $O(b^d)$  e espaço  $O(bd)$ , (sendo  $b$  as ramificações e  $d$  a profundidade da busca). Neste método, todos os nós de uma profundidade são visitados em busca dos estados objetivos. A busca é expandida para outro nível até uma determinada profundidade ou até que todos os estados objetivos sejam atingidos (RUSSELL; NORVING, 2004, p.78).

De forma similar, a busca pode ser iniciada a partir do Módulo Coordenador testando rotas diretas ( $A_1$ ) para todos os “ $n$ ” Gerentes. Na condição ideal, todos os Gerentes são acessados nesta busca, e o número de busca é igual ao número de nós. Se o número de Gerentes encontrado for menor que o número previamente conhecido, a busca se expande a partir dos nós descobertos no primeiro nível, testando as rotas ( $A_2$ ) para os nós ainda não encontrados. O processo se repete em ( $A_3$ ) buscando rotas entre os nós encontrados no segundo nível aos nós faltantes do terceiro nível. Ao final das iterações de busca são armazenadas até 3 possíveis rotas existentes para cada destino, que podem ser alternadas em caso de falhas.

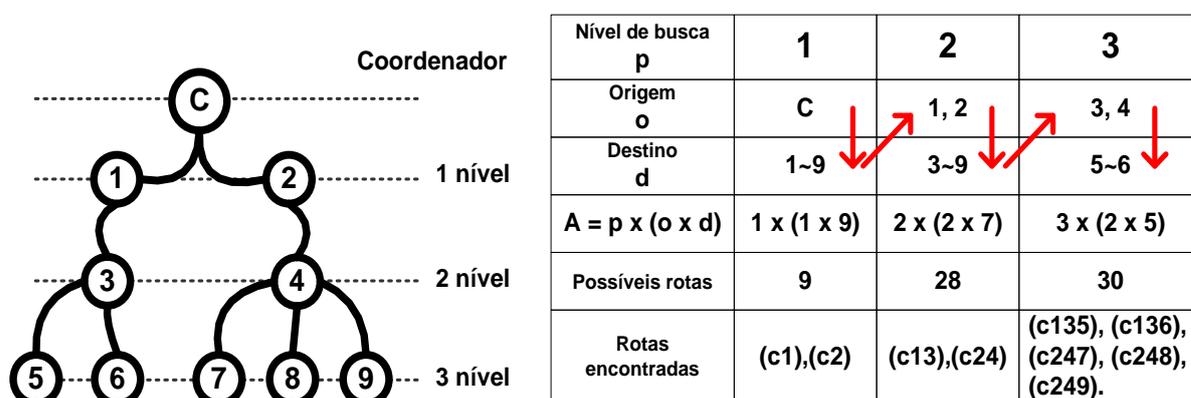


Figura 18 – Método de busca baseado em algoritmo BAI

Fonte: Autoria própria

Na figura 18 é demonstrado uma possível topologia de rede, com 9 nós Gerentes e 3 níveis. O Coordenador inicia o processo de busca na tentativa de alcançar todos os 9 nós em um salto, no exemplo foram descobertos os nós 1 e 2

neste nível. O segundo nível tem como origens 1 e 2, e pelas rotas c1 e c2, tenta-se atingir todos os destinos restantes, encontrando em os nós 3 e 4 em 28 tentativas.

Como último nível deve conter todos os nós restantes, quando um estado objetivo for encontrado a busca pode parar economizando tempo. No exemplo, ao testar as 5 possíveis rotas por c13, são encontrados os nós 5 e 6. Ao testar as rotas restantes por c24, o campo de busca é reduzido para 7,8 e 9 que podem ser alcançados em 3 tentativas, totalizando 24 saltos em vez dos 30 previstos. A busca completa gera estados repetidos em alguns casos, que podem ser memorizados e utilizados como rota opcional em caso de falhas nas posteriores operações de requisição de dados.

Considerando o tempo de retorno, o intervalo para mensagens de 70 bytes é de até 0,12 s, e que na busca completa do exemplo são necessários 67 saltos, o tempo total da busca será de até 8,4 segundos, caso não haja perda de pacotes. A perda de uma mensagem na transmissão por *unicast* gera um atraso de 0,36 s ( $3 \times 0,12$  s) no pior caso, mas as mensagens por *broadcast* não são confirmadas.

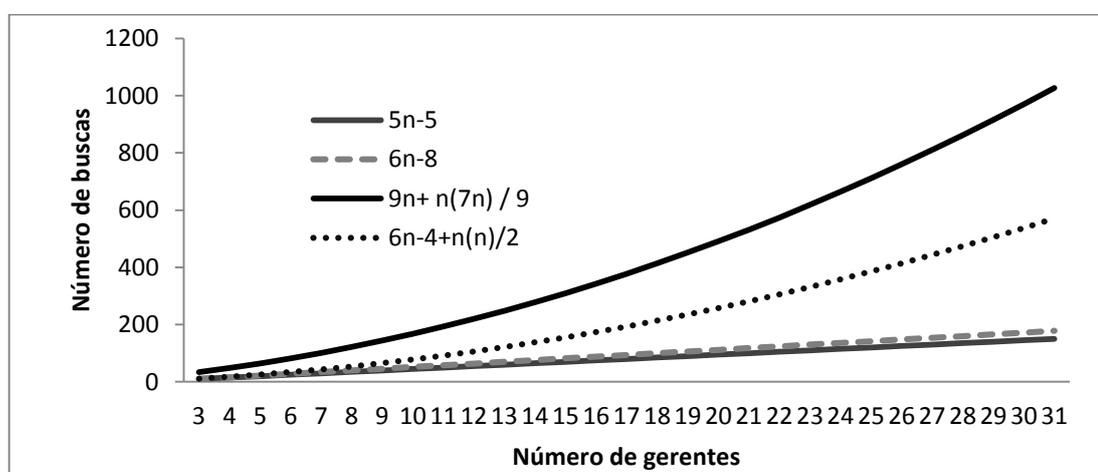


Figura 19 – Número de buscas com algoritmo BAI

Fonte: Autoria própria

Na figura 19, é mostrada a relação entre buscas BAI e número de Gerentes em diferentes topologias com profundidade 3 para “n” nós de rede. Na primeira topologia os nós estão concentrados no nível 1 na forma **5n-5**, na segunda topologia os nós estão concentrados no nível 2 ou 3 na forma **6n-8**, na terceira topologia os nós estão divididos em partes iguais pelos três níveis na forma **9n+7n<sup>2</sup> / 9**, e na quarta topologia na forma **6n-4+n<sup>2</sup> / 2**. Os valores para “n” nós de rede foram obtidos pela

análise das topologias vistas na figura 20 a partir das fórmulas já apresentadas na figura 18.

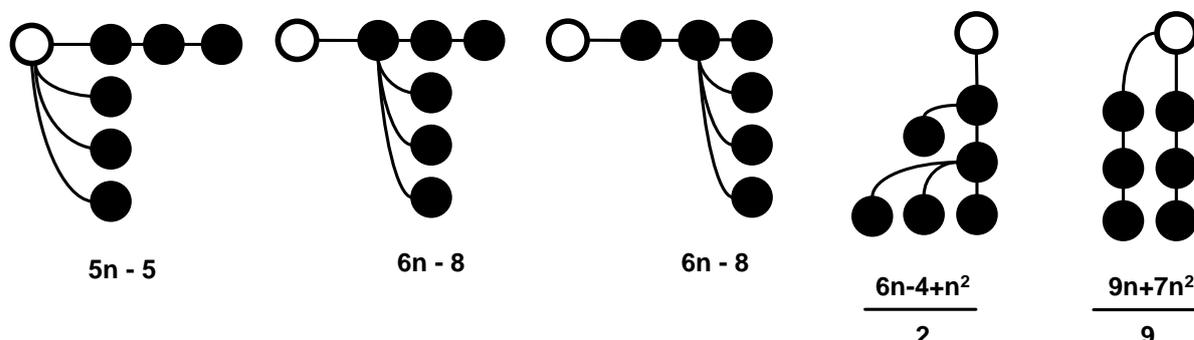


Figura 20 – Relação entre topologias e número de nós

Fonte: Autoria própria

#### 3.4.3.6 Método de busca por propagação inversa, BPI

Este método de parte de uma abordagem *bottom-up*, no qual o processo de buscas é feito a partir dos nós Gerentes para o nó Coordenador. Uma busca inversa é possível quando todas as ações nos espaços de estados são reversíveis, e os predecessores são iguais aos sucessores (RUSSELL; NORVING, 2004, p.81).

No método BPI, o Coordenador inicia o processo enviando um comando de gerar rotas por *broadcast* para a rede, que é replicado por todos os Gerentes pelo menos uma vez, de forma a alcançar todos os nós até a profundidade de 3 saltos.

Após receber o comando, cada Gerente aguarda um tempo múltiplo ao seu endereço único na rede (EUI), o qual é enviado no quadro de mensagens por *broadcast*, tendo como destino o nó Coordenador.

Diferentes intervalos de espera evitam conflitos nos envios, mas criam uma solução de projeto que acopla a “janela” de envios ao EUI, que acumula as funções de identificar os Módulos com a função de definir os intervalos entre envios. Idealmente os endereços devem ser sequenciais a partir de 1, para que os intervalos somados ou multiplicados por uma constante, gerem uma sequência que acomode três envios antes que o próximo nó da rede inicie outra sequência. A figura 21 ilustra um exemplo com 9 Gerentes e 30 passos para serem formadas rotas no cabeçalho do quadro de mensagens.

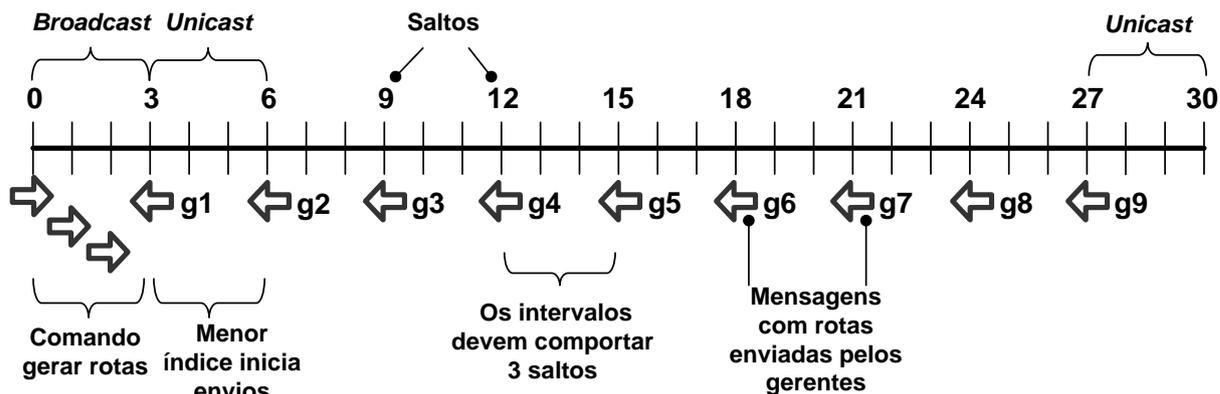


Figura 21 – Tabela de tempo para busca por BPI

Fonte: Autoria própria

As regras para receber, replicar ou eliminar um comando de rotas são simples. As mensagens são sempre destinadas ao Coordenador, tendo origem nos Gerentes. Quando um nó Gerente recebe mensagens com menos de três origens, e o próprio nó não pertence a este conjunto, a mensagem é replicada por *broadcast* incluindo seu endereço como segunda ou terceira origem. Se algum Gerente recebe mensagens com três origens, a mensagem é ignorada para evitar múltiplos envios.

Em comparação aos algoritmos anteriores, o BPI se revela mais eficiente, pois em no máximo 3 saltos todos os nós da rede iniciam uma contagem regressiva, e nos próximos 3 saltos enviam endereços sucessiva e cumulativamente ao Coordenador. O número de saltos necessários em uma busca em profundidade 3 pode ser obtido pela equação 9.

$$At = 3n + 3 \quad (9)$$

A topologia não altera a quantidade de saltos necessários, e assim o número de saltos para realizar a busca do exemplo da figura 18, é de  $3 \times 9 + 3 = 30$  saltos, já considerando a requisição e resposta. Calculando com o tempo de salto como 60 ms, o tempo total é de no mínimo 1,8 segundos caso não haja perda de pacotes.

O tempo de 1,8 segundos é 4 vezes menor que os 8,04 segundos do método BAI, mas sistema fica limitado a 1000 trocas de mensagens (ou 166 gerentes no terceiro nível) para o intervalo máximo de 1 minuto para gerar rotas sem perda de dados quando for necessário atualizar a estrutura da rede, o que pode não ser aceitável em alguns casos, exigindo que a busca seja feita em etapas. Uma

desvantagem do BPI é criar um acoplamento entre os requisitos funcionais de identificar os Gerentes, e os de ordenar os envios atribuindo ao endereço duas funções, dificultando o controle de fabricação e requerendo a instalação de Gerentes com índices compatíveis. Os endereços devem ser multiplicados ou somados a uma constante garantindo intervalos que comportem 3 salto (pior caso), sem gerar intervalos longos, ou curtos demais. Mesmo com todos os nós no primeiro nível, a espera será equivalente a todos os nós no terceiro nível.

### 3.4.3.7 Método de busca integrada

Como visto no método BPI, é possível alcançar todos os nós da rede em três envios de *broadcast*, desde que o posicionamento dos Gerentes tenha sido feito adequadamente. Utilizando as regras do cabeçalho de 5 bytes, as rotas podem ser geradas durante um pedido de dados para um nó Gerente da rede por *broadcast*. Quando a requisição encontrar seu destino, a rota acumulada deve ser utilizada para o retorno com o vetor de dados por *unicast*, evitando retransmissões desnecessárias que causam interferências na rede, como esquematizado na figura 22.

O Módulo Coordenador recebe os dados em conjunto com as informações das rotas, que são utilizadas nas próximas requisições por *unicast*. O método de buscas é integrado ao processo de requisição de dados e permite economizar o tempo do processo de busca por rotas, que é necessário para atualizar as melhores rotas disponíveis.

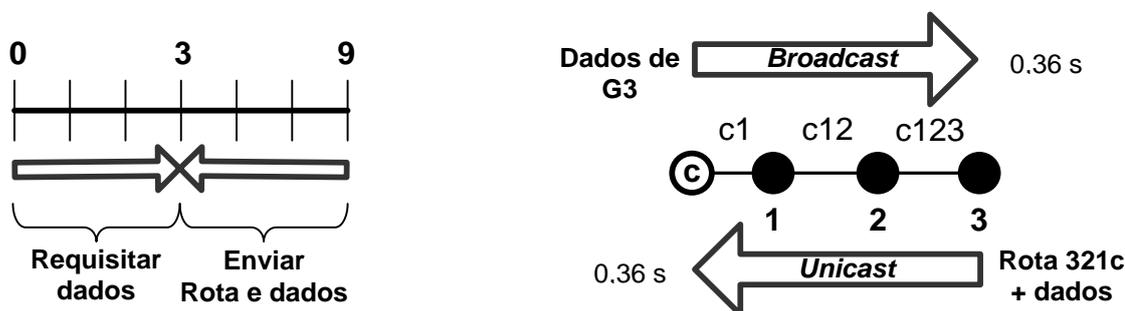


Figura 22 – Método de busca integrada com requisição de dados

Fonte: Autoria própria

Entretanto, durante o período de descoberta de rotas alguns pedidos de dados podem não ter resposta ou demorar mais que os 0,36 segundos esperados para 3

saltos, pois o *broadcast* ocasiona múltiplos envios, que eventualmente ocasiona falhas de comunicação que não são corrigidas pelos métodos da pilha do protocolo Miwi P2P. Outro inconveniente é o recebimento de dados repetidos que devem ser identificados e eliminados.

Resolvendo a questão de buscar e gerar rotas, é necessário um método para melhorar a própria requisição de dados. O tempo de 0,36 segundos entre envio e resposta, limita o número de nós Gerentes em 166 Módulos (1000 trocas de mensagens) para o intervalo de 1 minuto entre medições, considerando que os Gerentes estão a três saltos do Coordenador e que não ocorram erros na comunicação.

#### 3.4.3.8 Requisições de dados agregados

Para aumentar a quantidade de Gerentes na rede, mantendo a capacidade de alimentar o banco de dados com uma medida por minuto, é necessário ampliar o intervalo entre pedidos ou criar mecanismos agregadores de dados.

Os dados dos Sensores já são agregados pelo barramento em cada Módulo Gerente, podendo conter até 70 medidas, valor máximo convencionado em função da taxa de transferência possível com o *hardware* desenvolvido. A transferência de informação útil é favorecida também pelo sistema de organização dos dados na mensagem que permite identificar a posição dos Sensores no barramento, tornando desnecessário enviar os endereços para cada Sensor.

Como a rede Miwi P2P é limitada a mil troca de mensagens por minuto, ou de 166 Módulos Gerentes no terceiro nível no método BPI, considerando o tempo de salto em 60 ms, o máximo de Módulos Sensores teoricamente comportados nesta rede seria de 11620 Módulos Sensores (166 x 70). Desconsiderando as restrições dos barramentos que já foram comentadas, o número 11620 representa a quantidade ideal de *bytes* que deveriam ser transmitidos por cada ciclo de requisições Coordenador-Gerente para maximizar a troca de informação por mensagem.

Fazendo com que os acessos do Coordenador aos Gerentes sejam agendados para receber dados acumulados dos mesmos Sensores, seria possível sempre transmitir o máximo de *bytes* em cada ciclo. Assim, um Gerente com apenas um Módulo Sensor poderia ser acessado apenas 1 vez em cada 70, economizando muitas trocas de mensagens pela rede.

Com a técnica de agregação de dados e agendamento de requisições é possível ampliar o número de Gerentes para várias centenas, no limite máximo 11620 *bytes* transmitidos em 1000 trocas de mensagem de 70 *bytes* com tempo de salto de 60 ms dentro de um ciclo de requisições de 1 minuto.

Outra possibilidade é aumentar a taxa de transferência de dados para até 625 Kbps, em vez dos 250 Kbps definidos pelo padrão IEEE 802.15.4, que poderia dobrar o número de *bytes* enviados. Entretanto esta possibilidade não foi testada nos ensaios de comunicação.

#### 3.4.3.9 Módulo Gerente e outras funcionalidades

O Módulo Gerente é atualmente um dispositivo que realiza as seguintes funções:

- gerenciamento do barramento I2C sincronizando as medições e delimitando os espaços de dados em função da data/hora do RTC;
- repasse de mensagens entre o Módulo Coordenador e outros Módulos Gerentes da rede através do protocolo Miwi P2P, em função do cabeçalho no quadro de mensagens;
- busca e envio de dados contidos na memória compartilhada;
- ajuste do RTC em função de comando por *broadcast*;
- envio de mensagens de erros.

Além dos métodos e soluções já comentados, é importante citar que o RTC local nos Módulos Gerentes tem função de indexar o espaço de dados, referenciando o processo de buscas na memória compartilhada. Cada requisição de dados é sempre acompanhada da informação de data/hora, que permite ao Módulo Gerente identificar a respectiva medida feita naquele intervalo. A sincronização garante que os dados em toda a rede são relativos ao mesmo intervalo de tempo, independente de quanto tempo a requisição de todos os Gerentes possa vir a demorar.

Sem a informação do tempo, o último dado da memória poderia ser repassado, mas em caso de falhas na aquisição de dados o retorno de um pedido seria sempre o mesmo conjunto de valores, sendo impossível determinar a última

medição correta. Assim, se dados requisitados em uma determinada data/hora não forem encontrados no espaço da memória, uma mensagem de erro é retornada ao Coordenador, indicando um possível problema que deve ser investigado.

Os RTC (*Real Time Clock*) são ajustados por um comando de *broadcast* com erro de até 0,18 s, que para o intervalo de 1 minuto entre medições não é relevante neste sistema. Entretanto seria possível sincronizar os relógios utilizando o algoritmo de Berkeley que se baseia em ajustes sucessivos feitos por um relógio central, até que a diferença seja desprezível. Para tais ajustes é necessário estimar o intervalo de tempo entre a leitura do horário remoto e a recepção pelo relógio local e somar ou subtrair as diferenças entre os relógios (TANENBAUM, 2007, p.241-242).

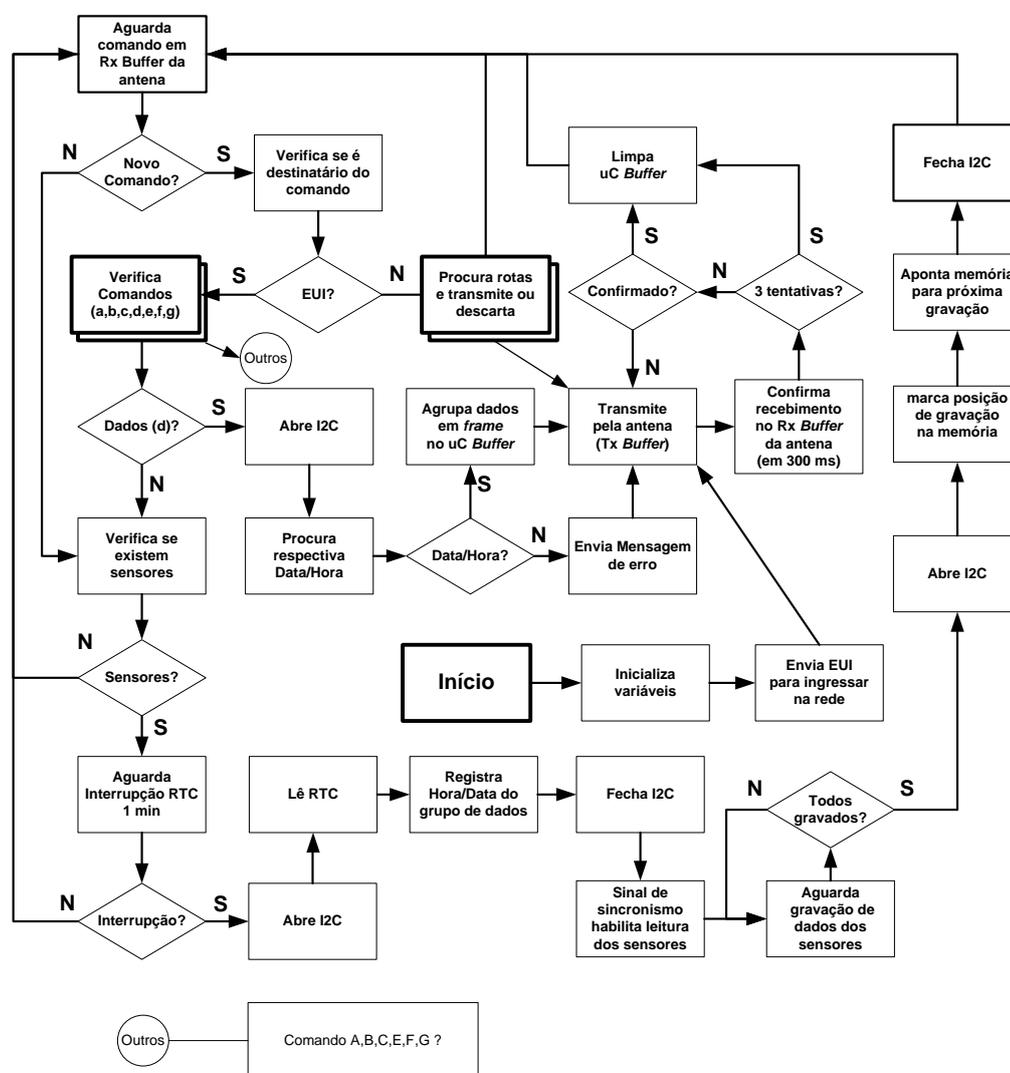


Figura 23 – Fluxograma parcial do funcionamento do Módulo Gerente

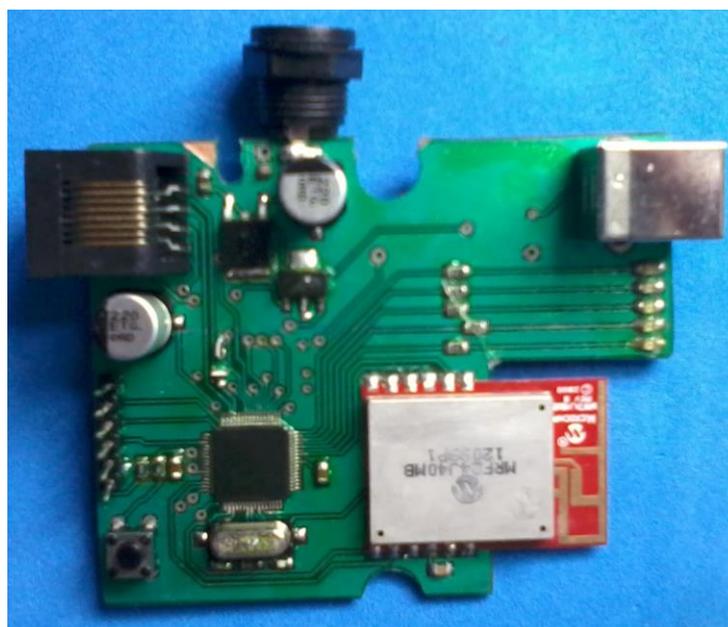
Fonte: Autoria própria

Na figura 23 é apresentado um fluxograma do funcionamento parcial do Módulo Gerente, na rotina de espera de comandos pela rede Miwi P2P e gerenciamento do barramento de Sensores.

Outro detalhe a ser comentado é que durante o processo de instalação de um novo Módulo Gerente na rede é feito pelo envio por *broadcast* de uma mensagem com *byte* de controle 0x03 e o endereço de origem no cabeçalho da mensagem. Com no máximo três trocas de mensagens, o pedido de ingresso e as rotas formadas chegam ao Módulo Coordenador sendo registradas. Assim, ao término do processo de instalação inicial do sistema, todas as rotas já devem estar estabelecidas no Coordenador.

#### 3.4.4 Módulo Coordenador e Banco de Dados

Para coordenar a troca de mensagens pela rede sem fios, pelo protocolo Miwi P2P é necessário um dispositivo central denominado de Coordenador, que determina certos atributos da rede, como frequência de trabalho e identificador de rede PAN. No sistema de monitoramento de consumo por RSSF, o Módulo com a antena transceptora configurada como *coordinator*, é chamado de Módulo Coordenador.



Fotografia 7 – Hardware do Módulo Coordenador e antena MB

Fonte: Autoria própria

O Coordenador (fotografia 7) tem como funções receber comandos de um aplicativo em um computador com banco de dados e repassar aos respectivos Módulos Gerentes, bem como receber os dados da rede sem fios e repassar ao aplicativo, que os armazena no banco de dados. O sistema foi projetado para que os pedidos de dados sejam feitos pelo sistema de *polling*.

No Banco de Dados, um sistema de cadastro relaciona Módulos Gerentes e Sensores. Depois de estabelecer um período entre medições no aplicativo, uma sequência de pedidos para o Módulo Coordenador é definida e enviada em um vetor denominado ordem de serviço - OS. O Módulo Coordenador recebe a OS e executa o comando de acordo com um protocolo definido para esta finalidade. A OS é uma *string* de caracteres enviada ao Módulo Coordenador pela porta USB (Universal Serial Bus), no padrão do quadro 4.

<b>1 caractere</b>	<b>1 caractere</b>	<b>14 caracteres</b>	<b>3 caracteres</b>	<b>1 caractere</b>
i	Comando	Data/Hora	Endereço	t

**Quadro 4 – Formato padrão dos comandos e requisição de dados**

Fonte: Autoria própria

Os comandos são recebidos pelo Coordenador, que executa a ação correspondente ao comando da OS, resumidos no quadro 5.

<b>Comando</b>	<b>Descrição</b>	<b>Resposta</b>
<b>a</b>	Ajustar todos os relógios	(Desnecessária)
<b>b</b>	Ajustar um relógio específico	Data/hora ajustada
<b>c</b>	Confirmar data/hora	Data/hora atual
<b>d</b>	Requisitar Dados	Dados dos Sensores
<b>e</b>	Exibir rotas	Rotas armazenadas
<b>f</b>	Falhas/Envios	Nº de falhas para 10 envios
<b>g</b>	Gerar novas rotas	Rotas geradas

**Quadro 5 – Comandos e respostas esperadas**

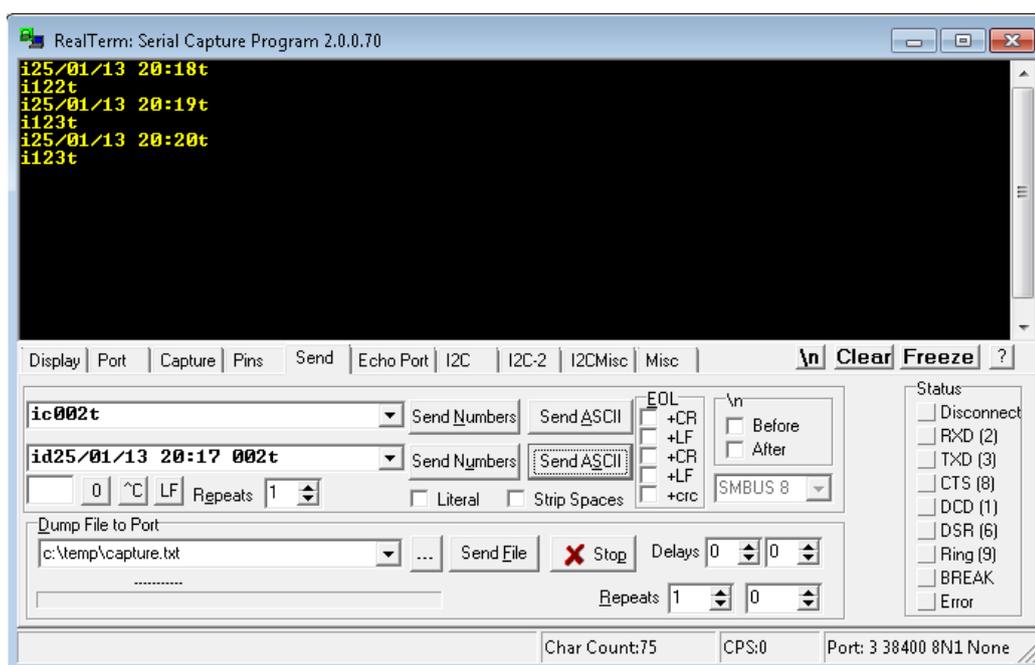
Fonte: Autoria própria

Os comandos são trocados entre o Coordenador e o aplicativo na codificação ASCII pela porta serial de um computador e podem ser visualizados em aplicativos do tipo terminal de dados, como o HyperTerminal ou Realterm cuja tela pode ser vista na

figura 30, em requisição ao Gerente 002 na data de 25/01/2013 entre 20:18 e 20:20, obtendo respectivamente 122,123 e123 como respostas.

A independência entre a visualização dos dados e o desenvolvimento do *software* desacopla os sistemas, que podem ser elaborados separadamente, tendo em comum um protocolo próprio para trocar caracteres. A única dependência funcional entre os sistemas é uma conexão serial por USB ativa e configurada adequadamente. A saída USB do Módulo Coordenador atua como uma porta serial virtual, que aparece para o sistema como uma porta COM x, configurada na forma 38400, 8N1, *None*.

Os caracteres “i” e “t” determinam respectivamente o início e término de envio em ambos os sentidos da troca de dados. Quando alguma informação é solicitada ao Módulo Coordenador, e não respondida em um intervalo de 15s é enviado outro caractere i, até o limite de 4 tentativas, quando é enviado o erro “T?”. O erro indica atividade do Coordenador, que por algum motivo não pode responder ao comando requisitado naquele intervalo.



**Figura 24 – Aplicativo Realterm em requisição de dados**

**Fonte: Autoria própria**

Se a informação ou resposta do comando enviado estiver disponível ela é imediatamente enviada ao terminal e pode ser visualizada. Para cada comando existe

uma resposta esperada, sendo também previstas outras mensagens de erros como visto no quadro 6.

<b>Erro</b>	<b>Causa</b>	<b>Formato</b>
G?	Gerente não respondeu (Time Out)	iG?t
R?	Sem rotas para o Gerente escolhido	iR?t
D?	Sem dados disponíveis no Gerente	iD?t
H?	Sem Hora/Data disponível	iH?t
P?	Erro de sintaxe do Protocolo	iP?t
	Coordenador ocupado	iiiiT?

**Quadro 6 – Relação de possíveis erros do coordenador codificados**

**Fonte: A autoria própria**

Os comandos de requisição de dados enviados ao Módulo Coordenador atualizam o relógio e as rotas para os nós na rede Miwi P2P. O sistema de formação das rotas necessita adicionalmente de métodos para avaliar a qualidade das rotas estabelecidas em um tempo programável, durante o processo de instalação dos Sensores em campo ou ainda prevendo que os Gerentes podem ser deslocados em algum momento. Como não existe uma integração real e permanente entre os Módulos pelos métodos previstos pela pilha Miwi P2P, foi criado o comando “f”, que faz o coordenador realizar dez envios sucessivos por *unicast* por uma determinada rota e contabilizar os envios bem sucedidos, que é a resposta ao comando que pode ser visualizada no terminal. O aplicativo pode repetir este comando quantas vezes for necessário para obter uma medida confiável da estabilidade de uma rota.

O aplicativo do sistema deve realizar periodicamente o teste, enviando o comando “f” para que as rotas sejam redefinidas se a taxa de falhas por envios for mais alta que o esperado. Durante o teste na usina termoelétrica, verificou-se a ocorrência de falhas de até 50% entre nós distantes em 300 metros (5 falhas em 10 envios), pelo próprio ambiente são inevitáveis as ocorrências de uma ou duas falhas em quase todas as sequências de 10 envios. Pelo protocolo criado sobre o P2P, durante as requisições são feitas 3 tentativas para uma mesma data/hora antes de passar para o próximo Gerente. O número de tentativas é programável e pode ser definido de acordo com o número de gerentes. Para uma rede com 9 Gerentes no

terceiro nível (9 gerentes x 6 trocas de mensagens x 60 ms) cada ciclo sem falhas pode ser concluído em 3,24 segundos, restando 56,76 segundos para recuperar dados perdidos gravados nos Gerentes dentro de 1 minuto, as tentativas podem continuar no próximo ciclo. Entretanto, utilizando 166 Gerentes no terceiro nível (166 gerentes x 6 trocas de mensagem x 60 ms) não haveria tempo para recuperar dados perdidos no intervalo de 1 minuto.

Durante as requisições de dados por *unicast*, a própria pilha Miwi P2P verifica os erros pelo método CRC (*Cyclic Redundancy Check*) e repete automaticamente a operação em caso de erros. Os erros são registrados no *bit* CCAFAIL do registrador TXSTAT 0x24<5> do transceptor que envia uma notificação ao microcontrolador.

### 3.5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto foi apresentado com base na metodologia axiomática, que parte das necessidades dos usuários para definir requisitos funcionais (Rf) e encontrar parâmetros de projeto (Pp) que resolvam problemas no domínio físico. Durante o desenvolvimento, as soluções de projeto buscavam simplicidade e independência entre os requisitos funcionais, tendo sido escolhidas com base nas necessidades dos usuários e dentro das possibilidades conhecidas no estado da arte e da técnica.

Entre outras definições de parâmetros de projeto realizadas na etapa do desenvolvimento destacam-se: dividir a coleta de dados em três etapas, com Módulos Sensores em barramento, Módulos Gerentes e Módulo Coordenador em redes sem fios; selecionar o protocolo Miwi P2P e nele inserir um cabeçalho capaz de transportar as informações da sequência de saltos; optar pela busca integrada como forma de atualizar as rotas. A síntese dos requisitos e parâmetros de projeto está incluída no apêndice A.

O número máximo teórico de Módulos Sensores no sistema é de 11620 dispositivos se for possível ligar 70 Sensores em todos os barramentos para 166 Gerentes no terceiro nível trocando 1000 mensagens ou atendendo a 60 requisições no intervalo de 1 minuto.

Na prática, o uso de 70 sensores por barramento é restringidos pelo espaço interno nos quadros elétricos, pela máxima corrente fornecida pela fonte de alimentação do Gerente e pela capacitância acumulada nas vias de dados e *clock*.

Desde que haja espaço físico disponível, as outras limitações podem ser compensadas pelo uso de circuitos integrados repetidores entre gerentes e sensores, e com fontes adicionais ligadas ao barramento. O barramento com os componentes aqui descritos, funcionou satisfatoriamente com até 10 sensores, e 3 metros de cabos.

O sistema pode ser esquematizado pelas suas três principais partes componentes que compreendem o Módulo Sensor, Módulo Gerente e Módulo Coordenador, interligadas por barramento I2C, Rede Miwi P2P e USB conforme o esquema em blocos demonstrado na figura 25.

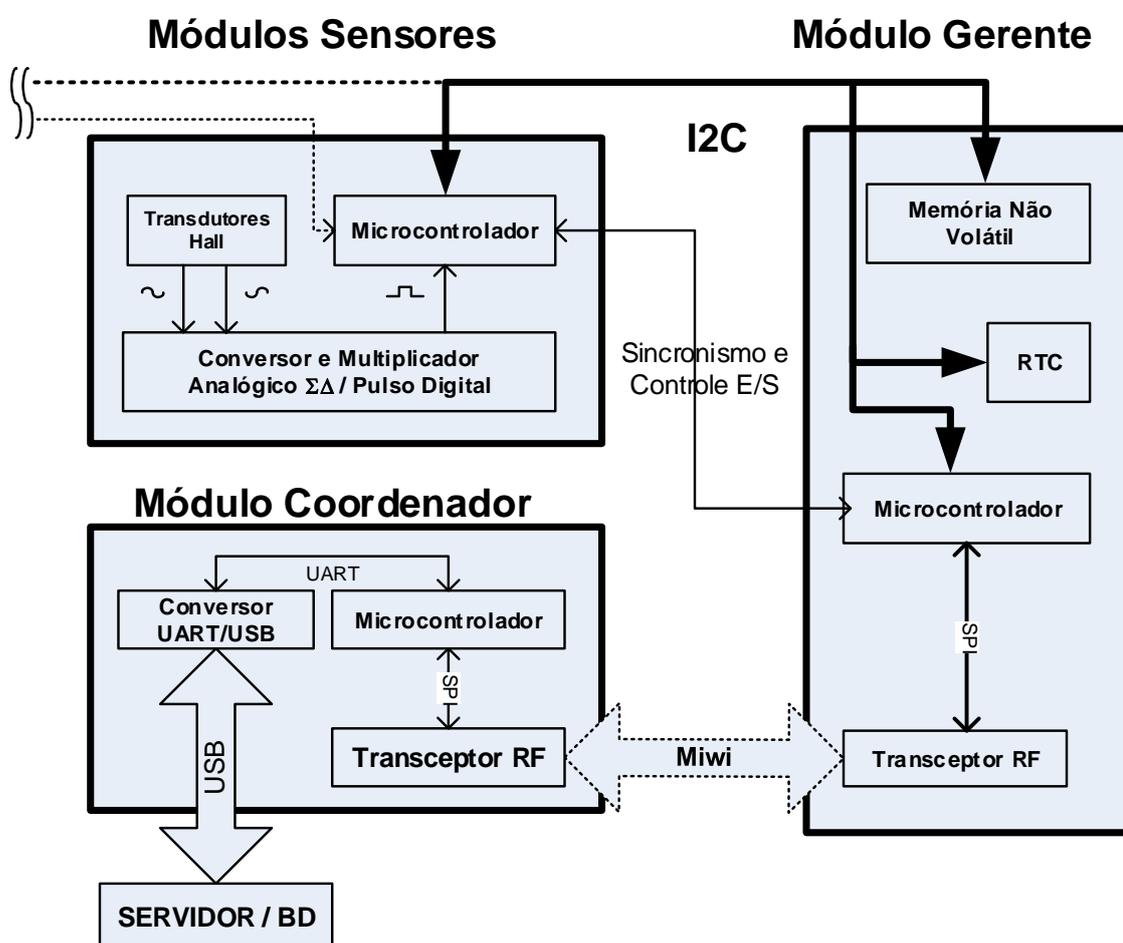


Figura 25 – Esquemático do sistema híbrido de RSSF/barramento

Fonte: Autoria própria

## 4 ENSAIOS, IMPLANTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados nos ensaios de bancada para validação experimental, bem como a implantação do sistema na usina, testes de campo e relação de problemas encontrados durante as etapas de projeto do sistema híbrido de barramentos acessados por RSSF.

### 4.2 ENSAIOS DE BANCADA

Os ensaios de bancada serviram como ponto inicial para dimensionar a rede sem fios quanto aos aspectos como taxa de transmissão, taxa de erros, formação automática de rotas, interferências com outras redes, etc.

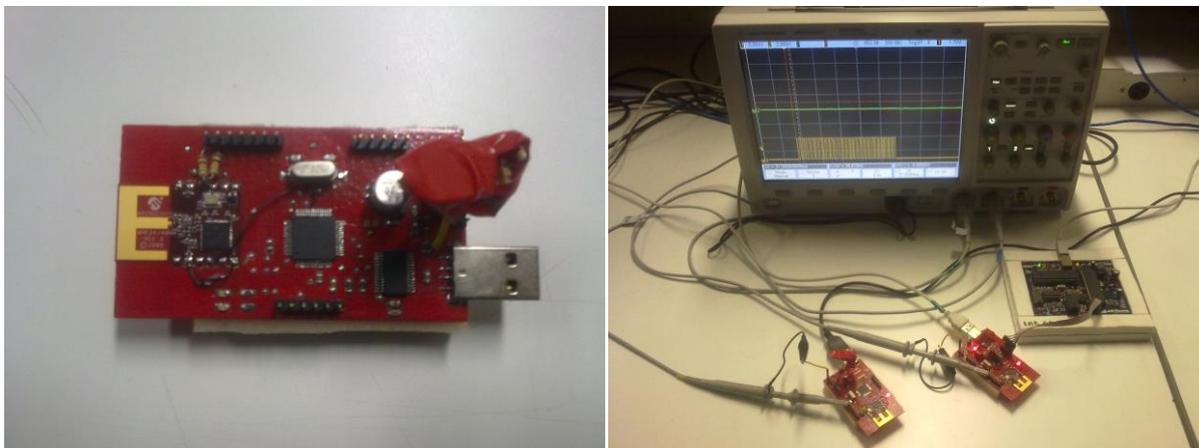
#### 4.2.1 Frequência de Troca de Mensagens

O ensaio foi feito com Módulos embarcados projetados e montados com microcontroladores dspic33FJ128MC70, transceptores MRF24J40MA e conversores seriais FT232RL.

Os Módulos foram programados com a pilha Miwi, de acordo com os documentos AN1283 (YANG, 2013a) e AN1284 (YANG, 2013b) da Microchip. Foi utilizado o aplicativo Miwi WDS para configurar o endereço EUI, tipo de dispositivo, ID da rede, tamanho do buffer de recepção de mensagens, etc. O aplicativo gera um código de configuração em linguagem C, que é adicionado ao projeto principal no ambiente de desenvolvimento MPLAB C30, compilado e gravado no microcontrolador.

Os códigos de exemplo fornecido pela Microchip para Coordenador e dispositivo final, foram utilizados como referência e adaptados ao *hardware* projetado. Um Módulo foi programado para enviar mensagens sucessivas durante 1 segundo, e outro Módulo para receber as mensagens e alterar o nível lógico de uma porta monitorada no osciloscópio, como visto na fotografia 8. Os Módulos estavam afastados a menos de 1 metro e o ensaio tinha por objetivo testar a frequência máxima

que poderia ser alcançada entre dois dispositivos sem considerar a distância. Assim seria conhecido o limite superior de transmissão ou “melhor caso” possível.



**Fotografia 8 – Ensaio de medição dos intervalos entre envios**

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.2.2 Medição da Qualidade do Sinal por RSSI

Era conhecido o fato de que este valor é influenciado por outras fontes geradoras de frequência na faixa dos 2.4 GHz, como Wi-Fi e Bluetooth não sendo um parâmetro confiável. Com o mesmo arranjo ensaio anterior foi realizado um teste qualitativo de alcance dos sinais, para avaliação do valor RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) fornecido pelo Módulo receptor como método de medir a distância entre os Módulos, função que poderia ser útil no processo de instalação determinando se um Módulo estava ou não dentro do raio de alcance de outro transceptor.

#### 4.2.3 Taxa de Envios de Dados

Neste ensaio um Módulo Gerente foi programado para enviar sucessivas mensagens durante 1 segundo, e outro Módulo Coordenador foi programado para receber e contabilizar estas mensagens. Um controle manual feito por envios de caracteres do terminal para o coordenador permitia alterar o comprimento da mensagem em *bytes*. A cada 1 segundo o número de mensagens recebidas era contabilizado e impresso na tela do terminal TeraTerm VT.

Os ensaios de duração de 1 segundo foram repetidos 100 vezes, contendo mensagens de comprimento variando entre 1 *byte* e 70 *bytes*, interligando dois nós

(Coordenador-Gerente) e três nós (Coordenador-Gerente-Cordenador). Como resultado se esperava obter o número de mensagens trocadas por segundo, em função do comprimento da mensagem e do número de nós. Estes valores foram utilizados para verificar o tamanho ideal para o quadro de mensagens do Miwi P2P que pode ser definido de 1 até 98 *bytes*. Em 100 repetições é possível executar mais de 1000 trocas de mensagens para 70 *bytes*, número satisfatório para avaliar a taxa de envios de dados, considerando que o requisito do sistema é de 60 envios por hora.

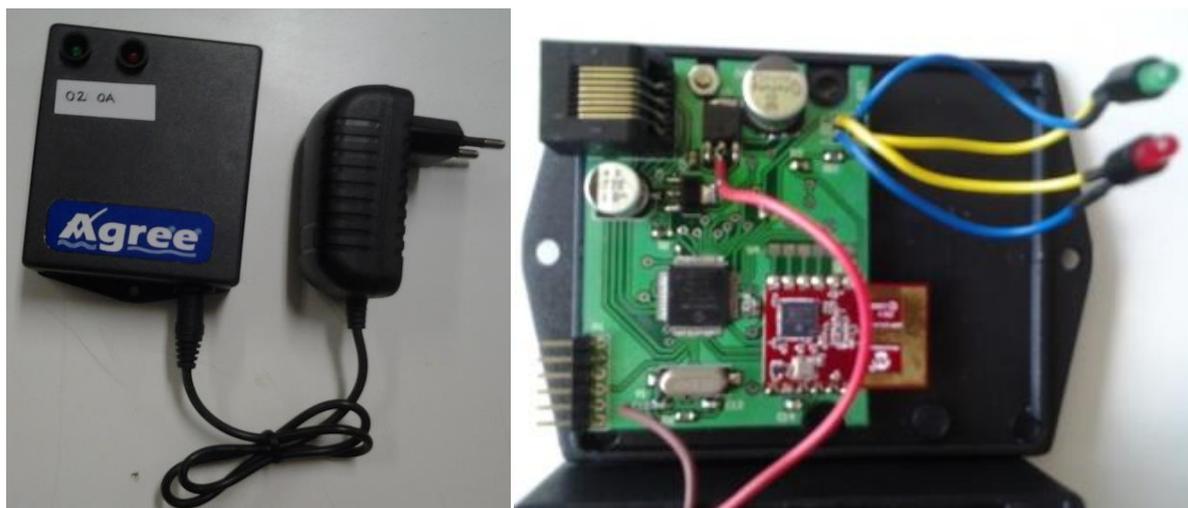
#### 4.2.4 Contabilização de Perdas de Pacotes

De acordo com os parâmetros do projeto, o requisito do sistema é realizar 60 trocas de mensagens por hora, ou 8640 trocas para três saltos por requisição de medidas. Este experimento consistiu em contabilizar o número de pacotes perdidos durante envios sucessivos de 40 séries com 2000 mensagens (sem intervalos entre eles), sendo aumentado o número de *bytes* a cada 5 séries, assim em cada 5 séries é possível experimentar mais de 24 horas de aquisição de dados.

Para obter uma amostragem significativa, foram realizados dois experimentos em dias diferentes com duração aproximada de 3 horas. As 8 séries do primeiro experimento equivalem a mais de 9 dias de testes com 80 mil trocas de mensagens. No segundo experimento entre 3 dispositivos com 2 saltos, foram realizadas 240 mil trocas de mensagens que equivalem a mais 18 dias de funcionamento do sistema coletando dados de gerentes à 3 saltos.

Os pacotes são considerados “perdidos” quando uma mensagem enviada não obtém confirmação de recebimento pelo outro Módulo após o intervalo máximo de 300 ms, definido com base no tempo médio de 90 ms para trocar 3 mensagens com 2 saltos (envio e resposta). Os Módulos estavam em fixados a 2 metros do nível do piso com distância máxima de 100 metros, em andares diferentes nos corredores do bloco Q do Campus Curitiba da UTFPR.

O Módulo Coordenador foi o mesmo utilizado nos ensaios anteriores, e os Módulos Gerentes foram substituídos pelo *hardware* definitivo, utilizado até o fim do projeto que pode ser observado na fotografia 9, acompanhado da fonte de 12 V e montado com o transceptor MRF24J40MA e LEDs indicadores.



**Fotografia 9 – Módulo Gerente e antena MA**

**Fonte: Autoria própria**

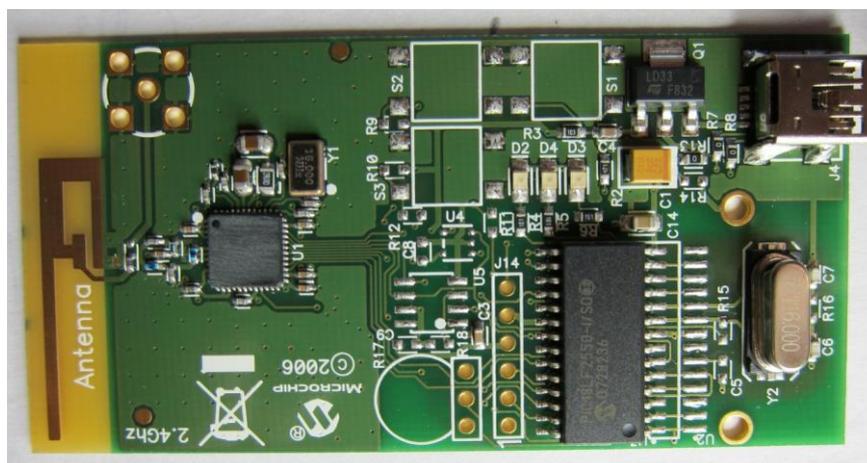
Nas mensagens de *unicast* a confirmação e reenvio são tratados automaticamente pela pilha P2P e podem ser configurados nos registradores do transceptor. Mas no *broadcast*, necessário em algumas operações, a perda de pacote não é tratada automaticamente e deve ser solucionada por um reenvio do comando depois de passado o tempo estimado de resposta. O tempo foi estimado de acordo com os valores obtidos experimentalmente entre envios e respostas, considerando que uma resposta deveria ser recebida em um tempo não superior a 6 vezes o tempo de um envio/resposta. Este intervalo é necessário levando em conta que uma resposta pode depender de até 6 saltos, na maioria dos casos.

Perdas de mensagens durante um *broadcast* causam atrasos na rede e precisam ser corrigidas quando detectadas pelas possíveis ações: reposicionamento das antenas procurando melhorar a linha de visada entre os transceptores ou o acréscimo de roteadores para distâncias maiores que 100 metros em áreas construídas ou 300 metros em áreas abertas para as antenas MA, e 300 metros em áreas construídas ou 1000 para áreas abertas para as antenas MB.

#### 4.2.5 Formação de Rotas com Miwi P2P

Para validar a utilização do campo de dados como meio para orientar os saltos na rede Miwi P2P, foram feitos testes monitorados pelo *Sniffer Zena* da Microchip. Ligado diretamente ao computador por uma porta USB, o *Sniffer Zena* (fotografia 10) detecta e demonstra em um ambiente gráfico por meio de tabelas, a evolução de

trocas de mensagens pelas redes do protocolo Miwi e todos os detalhes da pilha de pilha de protocolos, como erros e perdas de pacotes.



Fotografia 10 – Sniffer Zena da Microchip

Fonte: Autoria própria

#### 4.3 TESTES DE CAMPO

##### 4.3.1 Rede Miwi na UTFPR

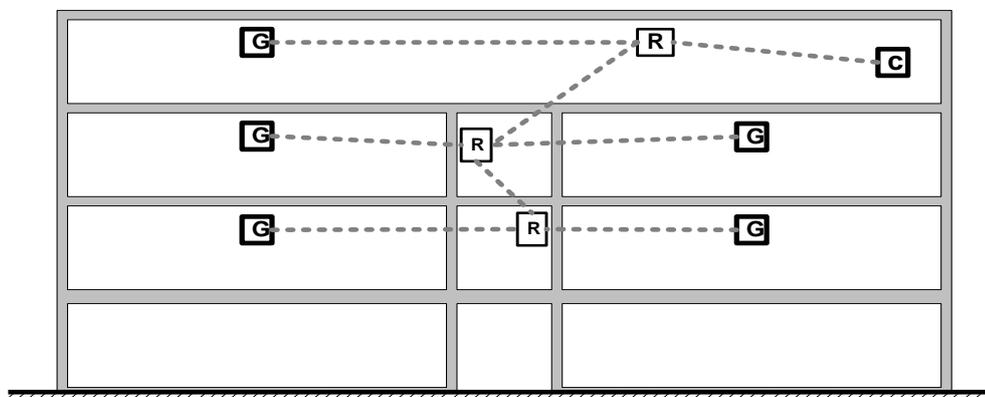


Figura 26 – Infraestrutura de testes no Bloco Q da UTFPR

Fonte: Autoria própria

Módulos Gerentes foram instalados nos corredores do bloco Q da UTFPR, com Sensores instalados nos quadros elétricos dos laboratórios. Acima de cada quadro elétrico foram instaladas caixas de PVC, para ligar a fonte de alimentação dos Módulos e permitir acesso ao interior dos quadros elétricos por um duto. As caixas foram instaladas a mais de 2 m do chão para evitar possíveis bloqueios do sinal causado por móveis ou trânsito de pessoas. A instalação foi usada para realizar os

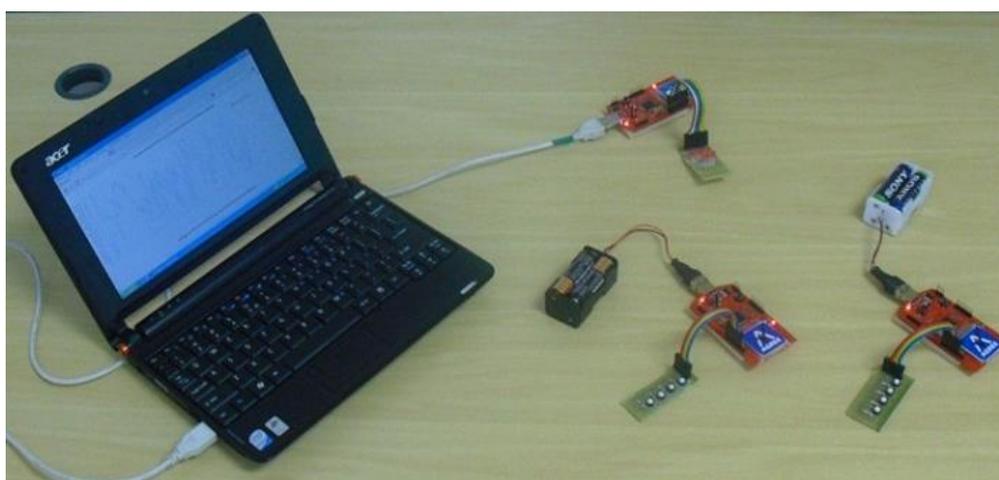
testes com os protocolos Miwi que levaram ao desenvolvimento da rede P2P com sistema de rotas.

Os Módulos Gerentes foram instalados em três diferentes pavimentos, sendo previstos roteadores entre estes Módulos para ampliar o alcance dos sinais. A distância entre os Módulos é entre 120 m e 250 m, e a instalação foi feita conforme o esquema da figura 26. O Módulo Coordenador ficou instalado na sala Q303 sobre uma bancada de testes e ligado em um computador com banco de dados que nunca é desligado.

#### 4.3.2 Testes da Rede Miwi na Usina

O primeiro teste qualitativo tinha como objetivo testar os transceptores MRF24J40MA na área da usina nos espaços livres e obstruídos da planta da usina Termomacaé. Com a percepção da qualidade do sinal, pretendia-se planejar o posicionamento para instalação dos Módulos e roteadores e definir onde seria possível instalar Módulos Gerentes.

O teste consistiu em manter o Módulo Coordenador fixo, e afastar os Módulos transceptores até o limite dos 120 metros, tanto nas áreas abertas quanto nas áreas construídas, obstruídas por tubulações metálicas e pelos muros de concreto armado.



**Fotografia 11 – Conjunto de Módulos utilizados no teste qualitativo**

**Fonte: Autoria própria**

O *hardware* utilizado é similar ao dos testes iniciais, sendo a eles acrescentado um circuito com quatro botões ligado a portas de I/O do microcontrolador, que quando pressionados geravam os valores enviados ao Módulo Coordenador. Para o teste foram utilizados Módulos móveis alimentados por baterias que registravam valores em um aplicativo, o qual recebia mensagens pelo protocolo Miwi P2P e exibia em um gráfico (fotografia 11).

#### 4.3.3 Primeira instalação do sistema

Os Módulos roteadores foram instalados em suas posições definitivas, assim como os pontos de tomada de energia para as fontes de alimentação dos Módulos Gerentes ou roteadores da rede. O *hardware* desenvolvido para o Módulo Gerente foi montado dentro de uma caixa plástica e protegido com uma camada de látex para evitar corrosão, e manteve esta composição básica até o final da fase inicial do projeto.

Para cada Módulo Gerente ou Roteador foi necessário instalar uma tomada de energia para a fonte de 12 V, os Módulos Sensores compartilham esta mesma fonte por duas vias previstas para alimentação no barramento. Cada Módulo Sensor tem reguladores de 5 V, que servem para manter a estabilidade da alimentação bem como servir de referência para as aquisições pelo conversor A/D.

Nesta etapa os transceptores MRF24J40MB foram utilizados tanto nos Módulos Gerentes como nos roteadores, o *firmware* foi atualizado para enviar medidas reais a partir da busca de dados indexada por RTC na memória compartilhada por I2C, e o protocolo de roteamento foi atualizado pelo sistema de busca inversa simples. Foram instalados barramentos de Sensores em alguns Módulos Gerentes com seus respectivos adaptadores de cabo SATA para cabo de rede, e os Módulos Sensores de corrente nesta etapa foram confeccionados em ZAMAC, com pintura eletrostática e podiam medir cabos condutores com diâmetro de até 10 mm. Antes da segunda instalação ainda foram testados alguns Módulos Sensores de 10 mm feito em ABS, que funcionaram durante 4 meses.

#### 4.3.4 Segunda instalação do sistema

Na etapa final a infraestrutura coletora foi reduzida de três para dois galpões monitorados, onde existem cargas de interesse em maior quantidade.

O *firmware* foi ajustado para fazer medidas em intervalos de 1 minuto, e para gerar novas rotas em intervalos de 15 minutos pelo método BPI (busca de propagação inversa). O protocolo de comunicação entre o Coordenador e o aplicativo com banco de dados foi aprimorado e foram criados códigos de erros, que eram enviados pelos Gerentes em determinadas situações. Também foram acrescentados métodos automáticos de *reset*, para casos de travamentos, e foi resolvido o problema de ajustes dos RCT, que ocorriam quando o RTC de um Módulo Gerente estava adiantado em relação ao Módulo Coordenador.

Os barramentos de Sensores foram reinstalados, agora apenas sendo utilizados Módulos Sensores com carcaça feita de ABS, impressa em 3D pelo método FDM. Neste modelo o núcleo de ferrite do Módulo Sensor era adaptado para aceitar cabos condutores de até 25 mm.

#### 4.3.5 Ajustes e atualizações finais.

Após a instalação completa do sistema, com o passar de alguns dias surgiram algumas inconsistências que exigiram novas atualizações e ajustes no *firmware*. Em uma nova visita, foi feito um levantamento e apuração dos problemas, e novos ensaios de bancada para testar as hipóteses, além de uma revisão do sistema de troca de mensagens para detectar e corrigir as falhas.

##### 4.3.5.1 Problemas detectados e possíveis causas

O sistema então instalado na usina era composto por 8 Gerentes, nos quais 2 apresentavam eventualmente as falhas “H?”, “G?”, “R?” e “D?”. As observações na instalação da usina permitiram levantar algumas hipóteses que foram testadas para explicar as falhas intermitentes:

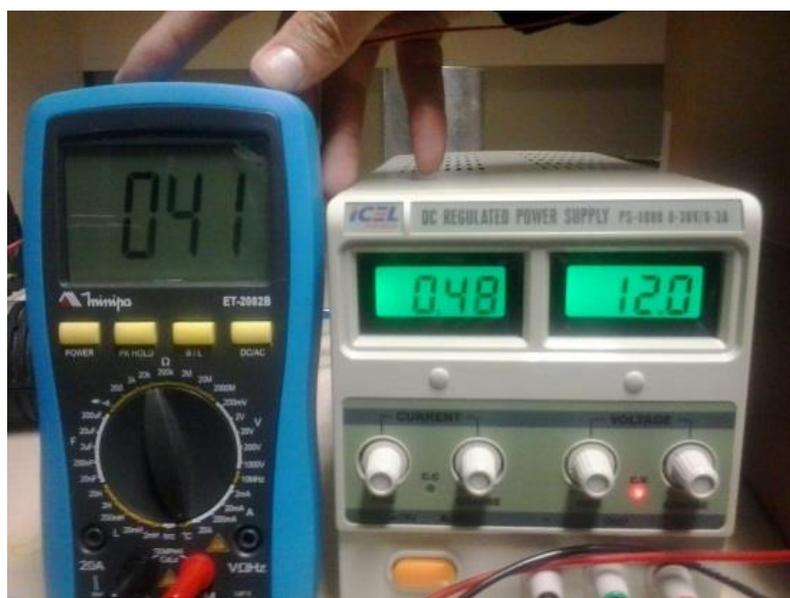
- dois Gerentes em falha tinham 5 alicates conectados, sugerindo problemas nas fontes de 12 V e 750 mA, que poderiam estar sendo insuficientes para alimentar todos os alicates, desajustando o RTC e explicando a falha H?. Outra causa poderia ser o comprimento do cabo de rede com capacitância acima da permitida;

- o aumento das falhas durante a tarde sugeria alguma influência da temperatura ambiente, mais alta nesse horário;
- a causa poderia ser o Módulo roteador externo que foi desligado por engano durante as operações normais de manutenção na usina;
- o posicionamento adequado dos Módulos poderia ter sido negligenciado na última intervenção;
- Um módulo gerente desatualizado permaneceu ligado na última visita e poderia estar interferindo nos novos gerentes.

#### 4.3.5.2 Reposicionamento dos Módulos e Gerentes

- A instalação de energia da fonte de 12 V do roteador externo foi refeita de modo que não fosse desligada por engano;
- Módulos Gerentes e roteadores dentro dos galpões UCA e UCC foram religados de forma definitiva e também foram reposicionados para se obter a melhor linha de visada com o roteador externo ou com o Coordenador.

#### 4.3.5.3 Ensaios de aquecimento nos Módulos e fontes



Fotografia 12 – Temperatura inicial, corrente e tensão do circuito Gerente.

Fonte: Autoria própria

A influência da temperatura no funcionamento das fontes de 12 V e dos Módulos, foi testada monitorando a corrente, tensão e a temperatura na superfície da placa. No ensaio foram ligados 10 alicates drenando corrente entre 0,48 A e 0,55 A em 12 V com a mesma fonte de 12 V utilizada na usina, e posteriormente com uma fonte regulada. A temperatura foi elevada até 100°C com a placa de circuito impresso dentro da sua caixa protetora. A temperatura ambiente era de 25°C iniciais, e a interna de 41°C (fotografia 13).

A montagem do ensaio foi feita dentro de uma caixa de papelão para criar um ambiente de temperatura elevada com auxílio de uma lâmpada de 200 W. Neste teste foram monitorados alguns circuitos integrados críticos ao funcionamento do sistema: reguladores de tensão, microcontrolador e RTC (*Real Time Clock*) (fotografia 14).



Fotografia 13 – Arranjo do ensaio de temperatura na superfície do circuito.

Fonte: Autoria própria

#### 4.3.5.4 Revisão do firmware

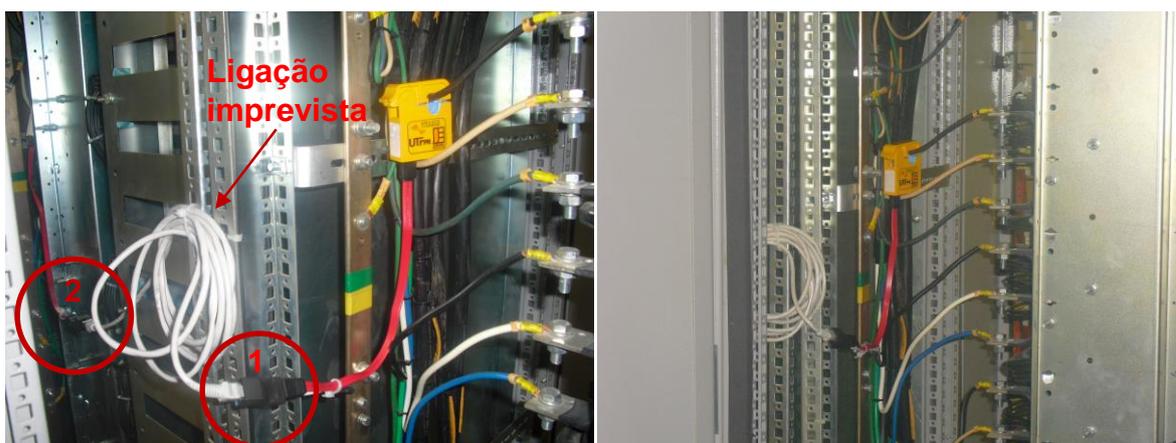
Para confirmar as condições em que as mensagens de erro eram geradas, foi feita uma revisão no *firmware*, na qual foram detectadas algumas inconsistências no código:

- o erro H? era atribuído falsamente a falhas de comunicação durante o comando C (confirmação de hora/data), quando deveria ser “G?”, indicando um Gerente indisponível;
- o envio do comando “b” (ajustar um Módulo Gerente) retornava o próprio dado enviado sem realmente verificar se o relógio foi ajustado;

- o comando “e” não exibia no terminal as rotas atuais, e sim as anteriores;
- o comando “f” não discriminava a comunicação *wireless* e o barramento I2C, se alguma estivesse em falha, o índice era afetado, mesmo não havendo problemas na rede Miwi P2P.

#### 4.3.5.5 Ensaios com o barramento I2C:

O sistema foi projetado para ser instalado na sequência: Gerente, cabo de rede, adaptador, Sensor 1, cabo SATA, Sensor 2, cabo SATA, Sensor 3, etc. Entretanto a instalação foi feita em alguns gerentes na sequência: Gerente, cabo de rede, adaptador, Sensor 1, cabo SATA, adaptador, cabo de rede, adaptador, cabo SATA, Sensor 2, cabo SATA, Sensor 3, etc.

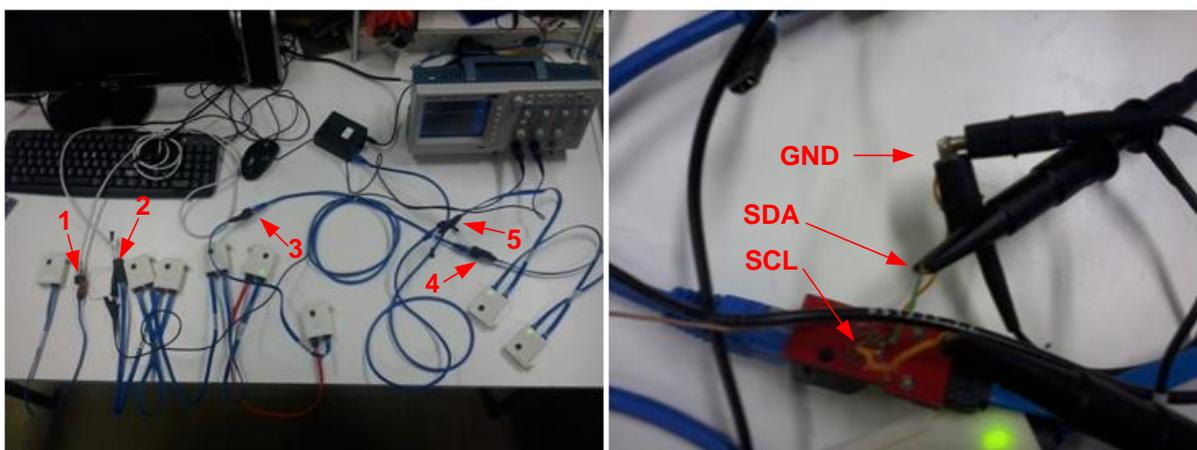


**Fotografia 14 – Instalação com dois adaptadores e cabo longo**

**Fonte: Autoria própria**

Não houveram problemas após a primeira instalação, com 1 ou 2 Sensores ligado ao barramento para testes, e o funcionamento foi normal neste período. Porém o comprimento do cabo tem uma restrição, que no barramento I2C é dado pela capacitância máxima de 400 pF. Mas durante a segunda instalação a adição de mais 3 Sensores nestes barramentos desencadeou a ocorrência de falhas eventuais nas linhas de clock do I2C. Durante a depuração do sistema, foi contatado que o uso inadequado de dois circuitos adaptadores conectados em série com um cabo de rede para aumentar o alcance de um cabo SATA entre dois Sensores, situação que não havia sido prevista, poderia ser a causa das falhas (fotografia 14).

Para reproduzir a condição de falha, foi feito um ensaio de bancada (fotografia 15) que consistiu em instalar 10 Sensores a um barramento, com 5 adaptadores, 4 metros de cabo de rede, além dos cabos SATA a exemplo do que foi feito na instalação do equipamento na usina. Durante o ensaio foram monitoradas as linhas SDA e SCL do I2C, e capacitância do barramento foi medida com uma ponte RLC digital em um dos adaptadores.



Fotografia 15 – Cabos, 5 adaptadores e osciloscópio nas vias I2C.

Fonte: Autoria própria

#### 4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os experimentos de validação e testes para obter valores que foram importantes na etapa de desenvolvimento e dimensionamento da rede e do barramento de Sensores, além disso, foram feitos testes de bancada para verificar o funcionamento dos dispositivos submetidos ao aquecimento, com a temperatura medida na superfície de alguns componentes, dentro da caixa e fora da caixa. Nos testes de aquecimento foram acompanhados a corrente, tensão e o funcionamento dos Módulos. Nos testes com o barramento I2C foram monitoradas as vias de dados e *clock* do barramento I2C, e medida a capacitância com vários Sensores, adaptadores e cabos de rede. Além destes testes também fizeram parte do projeto os ensaios de calibração dos Sensores, que, entretanto não era o objetivo principal e estão relatados em detalhes no trabalho de Koizumi (2013).

## 5 RESULTADOS

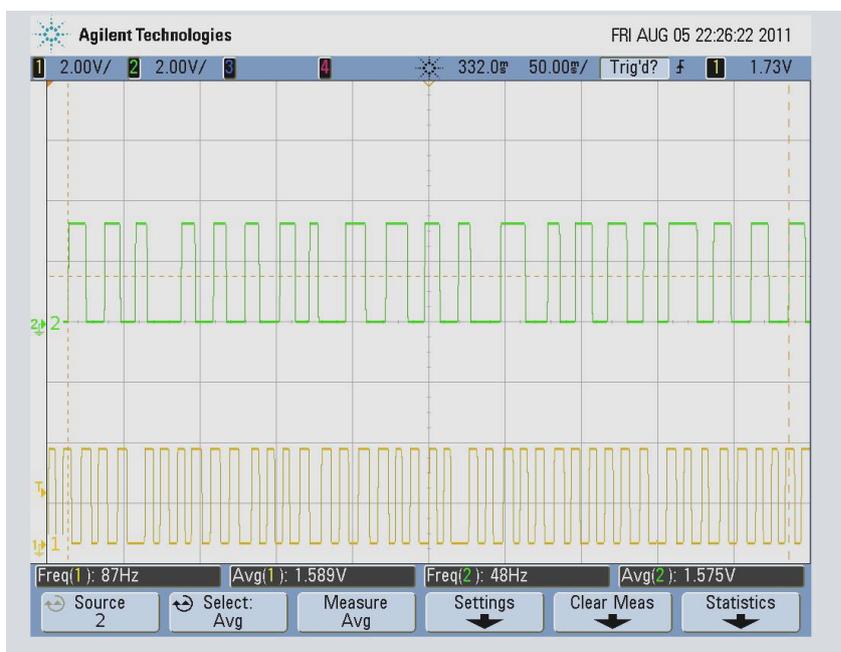
### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de bancada e testes realizados em campo na UTFPR e na usina UTE Norte Fluminense para validação experimental e dimensionamento do sistema.

### 5.2 ENSAIOS DE BANCADA

#### 5.2.1 Frequência de Envios e Recepções de Mensagens

Os experimentos de medição do intervalo entre envios de mensagens são fundamentais para o dimensionamento da rede, permitindo medir o tempo total que inclui o processamento, controle de erros, neste ensaio inicial foi verificada uma taxa de envios de 87 Hz e uma taxa de recepções de 48 Hz ou 20 ms (figura 27), esta discrepância indica uma limitação na recepção das mensagens em comparação à capacidade de enviá-las.



**Figura 27 – Frequência de envios e recepções**

**Fonte: Autoria própria**

### 5.2.2 Medição da Qualidade do Sinal por RSSI

A antena MRF24J40MA foi testada atingindo a distância de 120 metros em áreas abertas e aproximadamente 30 metros em espaço construído. O sinal RSSI apresenta muita variação, mesmo mantendo a distância fixa. Os intervalos de valores de 1 *byte* registram faixas de variação que detectam de forma eficiente apenas a diferença entre 5 metros e 50 metros, não sendo assim uma boa referência da distância ou da qualidade do sinal. O RSSI é um dos índices utilizados para obter o LQI (*Link Quality Indication*) que pode ser utilizado, mas não está disponível nos métodos da pilha Miwi P2P, embora seja suportado pelo transceptor MRF24J40.

Concluiu-se que o uso do valor RSSI não pode ser utilizado como ferramenta para auxiliar na instalação e posicionamento das antenas transceptoras.

### 5.2.3 Taxa de Envios de Dados

Na tela do aplicativo Teraterm VT (figura 28), era possível controlar o número de *bytes* enviados por envio de comandos ao coordenador via teclado, e visualizar o número total de mensagens recebidas em 1 segundo. O *firmware* contabilizava as mensagens recebidas por segundo e imprimia na tela. O conteúdo não era processado, e após impressas a quantidade de mensagens era sempre sobrescrita ou apagada do *buffer* para evitar o reenvio do mesmo valor.

```

COM12:9600baud - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
0 numero de mensagen en 1 segundo e 09
0 numero de mensagen en 1 segundo e 16
HiApp_ProtocolInit inicializado sem netuork freeze
Digite u para aumentar o tamanho da mensagen
Digite s para diminuir o tamanho da mensagen
Digite e para sair
0 tamanho da mensagen atual e 01
0 numero de mensagen en 1 segundo e 22
0 numero de mensagen en 1 segundo e 31
0 numero de mensagen en 1 segundo e 41
0 numero de mensagen en 1 segundo e 41
0 numero de mensagen en 1 segundo e 38
0 numero de mensagen en 1 segundo e 40
0 numero de mensagen en 1 segundo e 41
0 numero de mensagen en 1 segundo e 38
0 numero de mensagen en 1 segundo e 41
0 numero de mensagen en 1 segundo e 42
0 numero de mensagen en 1 segundo e 42
0 numero de mensagen en 1 segundo e 36
0 tamanho da mensagen atual e 02
0 numero de mensagen en 1 segundo e 30
0 tamanho da mensagen atual e 03
0 tamanho da mensagen atual e 04
0 tamanho da mensagen atual e 05
0 numero de mensagen en 1 segundo e 21
0 numero de mensagen en 1 segundo e 31
0 numero de mensagen en 1 segundo e 34
0 numero de mensagen en 1 segundo e 36

```

Figura 28 – Frequência de envios e recepções em 2 saltos

Fonte: Autoria própria

Na comunicação entre dois nós de rede, configuração no qual um Módulo Gerente só envia e o Módulo Coordenador só recebe e imprime os resultados, o intervalo obtido entre envios de mensagens com 1 *byte* de dados foi de 14 ms  $\pm$  3 ms. Conclui-se que a mensagem mais rápida que pode ser enviada por *unicast* entre dois dispositivos, tem duração de 10 ms.

Aumentando a carga útil de dados até 70 *bytes*, que foi um valor definido para comparação com o protocolo Zigbee, é obtido o intervalo de 44 ms  $\pm$  2,0 ms que permite a transferência média de 23 mensagens por segundo ou 1610 B/s de dados úteis (quadro 7).

<b>Bytes por mensagem</b>	<b>Nº de Mensagens</b>	<b>Dados úteis (B/s)</b>	<b>Duração Média (ms)</b>	<b>Varição <math>\pm</math> (ms)</b>
<b>1</b>	76	76	14	3,0
<b>10</b>	57	570	18	3,0
<b>20</b>	45	900	22	4,0
<b>30</b>	38	1140	26	2,0
<b>40</b>	34	1360	30	4,0
<b>50</b>	29	1450	34	2,0
<b>60</b>	26	1560	38	2,0
<b>70</b>	23	1610	44	2,0

**Quadro 7 – Troca de mensagens entre 2 nós (1 salto).**

**Fonte: Autoria própria**

No experimento de comunicação com dois saltos, um Módulo Gerente sempre envia, um roteador recebe e repassa a mensagem para o coordenador, que por sua vez recebe e contabiliza as mensagens por segundo e envia os resultados para o terminal. Esta sequência é equivalente a uma requisição de dados e obtenção de resposta entre dois dispositivos (coordenador-gerente).

A troca de mensagem mais rápida por *unicast*, foi observada entre dois dispositivos (um salto), com carga útil de dados de 1 *byte* e teve duração de 26 ms, corroborando o resultado obtido no segundo experimento (quadro 8) no qual se obteve uma média de 38 trocas de mensagem por segundo (dois saltos). Aumentando-se a carga de dados para 70 *bytes*, e seguindo o padrão do primeiro experimento, foi obtido o intervalo médio de 96 ms que transfere até 13 mensagens por segundo ou no máximo 910 B/s de dados úteis. Os resultados das médias foram arredondados

utilizando o critério do valor par mais próximo, e o número de mensagens trocadas por segundo podem variar entre 3 ms e 34 ms, variação explicada pela ocorrência de falhas de comunicação, que no segundo experimento é maior pelo fato de haver o dobro de possibilidades de falhas entre envios e respostas.

<b>Bytes por mensagem</b>	<b>Mensagem por segundo</b>	<b>Dados úteis Média (B/s)</b>	<b>Duração Média (ms)</b>	<b>Varição ± (ms)</b>
<b>1</b>	38± 4	37	26	3,0
<b>10</b>	28 ± 3	280	36	4,0
<b>20</b>	23 ± 2	460	44	4,0
<b>30</b>	21 ± 2	630	48	5,0
<b>40</b>	16 ± 3	640	62	14,0
<b>50</b>	14 ± 3	700	72	19,0
<b>60</b>	13 ± 3	780	84	17,0
<b>70</b>	11 ± 3	770	90	34,0

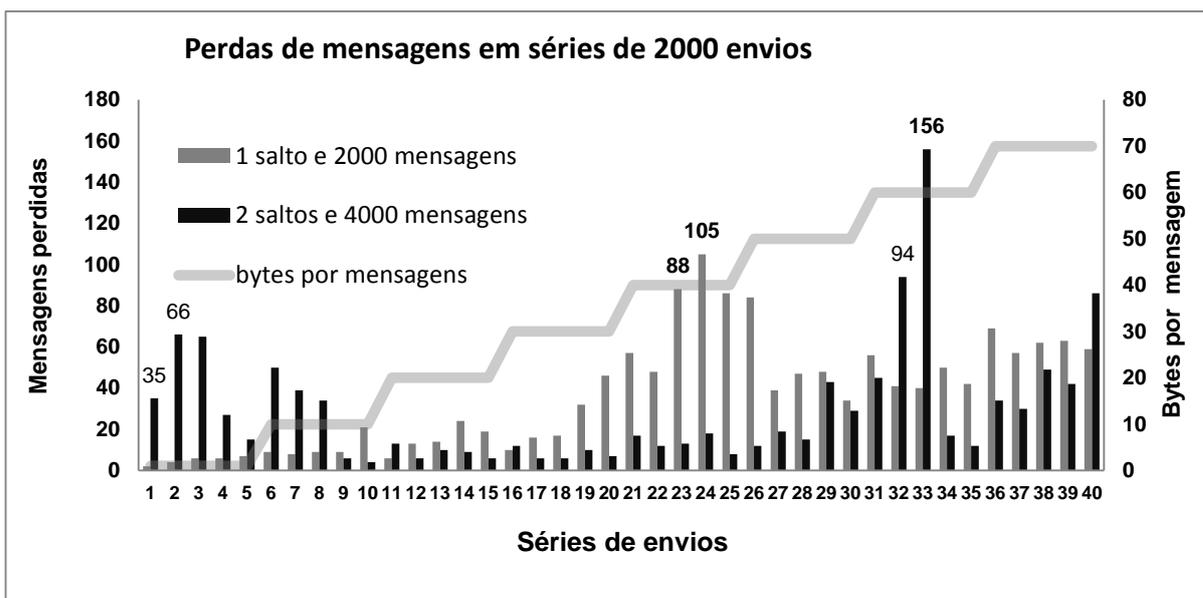
**Quadro 8 – Troca de mensagens entre três nós (2 saltos)**

**Fonte: Autoria própria**

#### 5.2.4 Contabilização de Perdas de Mensagens

Os experimentos foram realizado em dois dias diferentes, com um nó programado para enviar uma série de 2000 mensagens, com um atraso entre os envios de 20 ms (máxima frequência de recepção). Cada série de 2000 envios era repetida 5 vezes (10 mil envios), tendo então sua carga útil de dados incrementada automaticamente de 1 *byte* para 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 *bytes* (figura 29). No experimento 1, havia um nó de rede enviando e outro recebendo mensagens (ou 2 nós, 1 salto e 1 mensagem por envio). No experimento 2 foi acrescentando outro nó que repassava as mensagens, totalizando 3 nós e 2 saltos, assim dobrando o número de mensagens trocadas por cada envio (em um total de 4000 trocas por série).

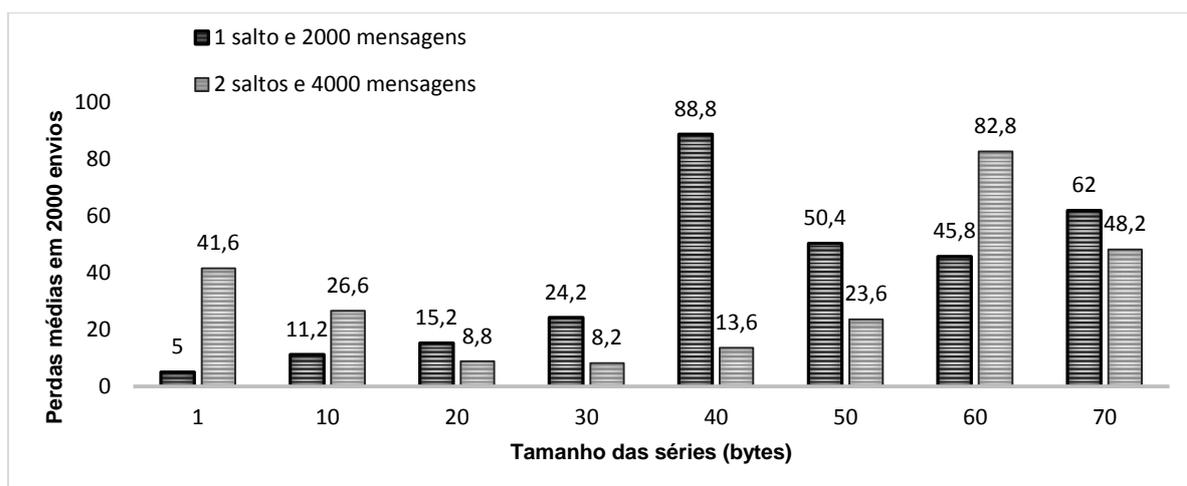
No experimento 1 foi obtida a média de perdas de 36,4 mensagens e desvio padrão de 27,4 envios por causa da série 24 (40 *bytes*) na qual falharam 105 dos 2000 envios (5,25% do total), o intervalo de confiança para o grupo foi de 8,5 com nível de confiança de 95%. No experimento 2, a média de perdas foi de 29,4 mensagens e o desvio padrão foi de 27,4 envios, por influência da série 33 do experimento 2 (60 *bytes*) com a perda de 156 das 4000 mensagens trocadas (3,9% do total), o intervalo de confiança para o grupo foi de 9,4 com nível de confiança de 95%.



**Figura 29 – Falhas observadas em 40 séries de 2000 envios**

Fonte: Autoria própria

Os experimentos não foram programados para determinar as causas das falhas, por se tratar de eventos aleatórios de curta duração. Por exemplo, no primeiro experimento a série 24 de 2000 envios durou aproximadamente 59 s, não sendo conhecido em quais dos 2000 envios houveram falhas, horários em que as falhas ocorreram, se foram falhas sequenciais ou distribuídas pela série. A figura 30 demonstra o número médio de perdas de mensagens em função do tamanho da carga útil de dados, de 1 a 70 bytes.



**Figura 30 – Média das falhas de envios por tamanho da mensagem.**

Fonte: Autoria própria

Algumas causas de falhas relatadas na literatura apontam para interferência de outras redes com maior potência de transmissão em 2.4 GHz como o Wi-Fi (LIANG,

2010), vários outros fatores contribuem para atenuar os sinais de transmissão sendo possíveis causas de falhas de comunicação (CAPRILE, 2009, p1-14).

No primeiro experimento foram trocadas 80 mil mensagens entre dois nós das quais se perderam 1117 (1,4%), e no segundo experimento foram trocadas 160 mil mensagens entre 3 nós e foram perdidas 1453 (0,9%). Somando os experimentos é obtido um total de 240 mil mensagens trocadas e 2570 mensagens perdidas (1%), de acordo com a Regra da Raiz Quadrada para Experimentos de Contagem (TAYLOR, 2012) a incerteza para este caso é de  $\approx 50$  mensagens perdidas, e a média de perda para 240 mil mensagens é de  $2750 \pm 50$ .

Analisando separadamente os dados das falhas de envios para os experimentos com auxílio do *software Input Analyzer*, que é parte integrante do simulador de eventos discretos Arena (ARENA, 2013), são obtidos os resultados vistos nos quadros 9, 10 e 11.

Entrada	Experimento 1 (2000 mensagens/série)	Experimento 2 (4000 mensagens/série)
Séries de envios	40	40
Média das perdas	36.3	29.4
Menor perda	2	4
Maior perda	105	156
Desvio Padrão	27.4	30.3
Faixa do Histograma	2 à 105	4 à 156
Número de intervalos	6	6
Fórmula	$2 + 103 * \text{BETA} (0.717, 1.43)$	$4 + \text{EXPO} (25.4)$

**Quadro 9 – Dados estatísticos dos experimentos 1 e 2**

**Fonte: A autoria própria**

A distribuição que mais se ajusta ao conjunto de dados coletados para o primeiro experimento é a Beta, e no segundo experimento a distribuição mais adequada foi a Exponencial, conforme os histogramas (figura 31 e 32). A distribuição limite se estabiliza de acordo com o crescimento do intervalo amostral (TAYLOR, 2012). Assim, o segundo experimento com 160 mil amostras se aproxima mais de uma situação estável, indicando que a quantidade de mensagens perdidas em séries de 4000 trocas de mensagens (2000 envios) em 87,5% dos casos é de um número entre 10 e 25 mensagens.

Número Do Intervalo	Frequência Absoluta	Mensagens Perdidas em 1 salto	Frequência Relativa		Frequência Acumulada	
			Dados Reais	Distribuição $\beta$	Dados Reais	Distribuição $\beta$
0	16	19,2	0,400	0,377	0,400	0,377
1	4	36,3	0,100	0,213	0,500	0,590
2	9	53,5	0,225	0,164	0,725	0,754
3	7	70,7	0,175	0,129	0,900	0,882
4	2	87,8	0,0500	0,0957	0,950	0,978
5	2	105	0,0500	0,0532	1,00	1,03

Quadro 10 – Dados estatísticos do experimento com 1 salto

Fonte: Autoria própria

Número Do Intervalo	Frequência Absoluta	Mensagens Perdidas em 2 saltos	Frequência Relativa		Frequência Acumulada	
			Dados Reais	Distribuição Exponencial	Dados Reais	Distribuição Exponencial
0	25	29,3	0,625	0,631	0,625	0,631
1	10	54,7	0,250	0,233	0,875	0,864
2	2	80,0	0,050	0,086	0,925	0,950
3	2	105	0,050	0,031	0,975	0,981
4	0	131	0,000	0,011	0,975	0,993
5	1	156	0,025	0,004	1,00	0,997

Quadro 11 – Dados estatísticos do experimento com 2 saltos

Fonte: Autoria própria

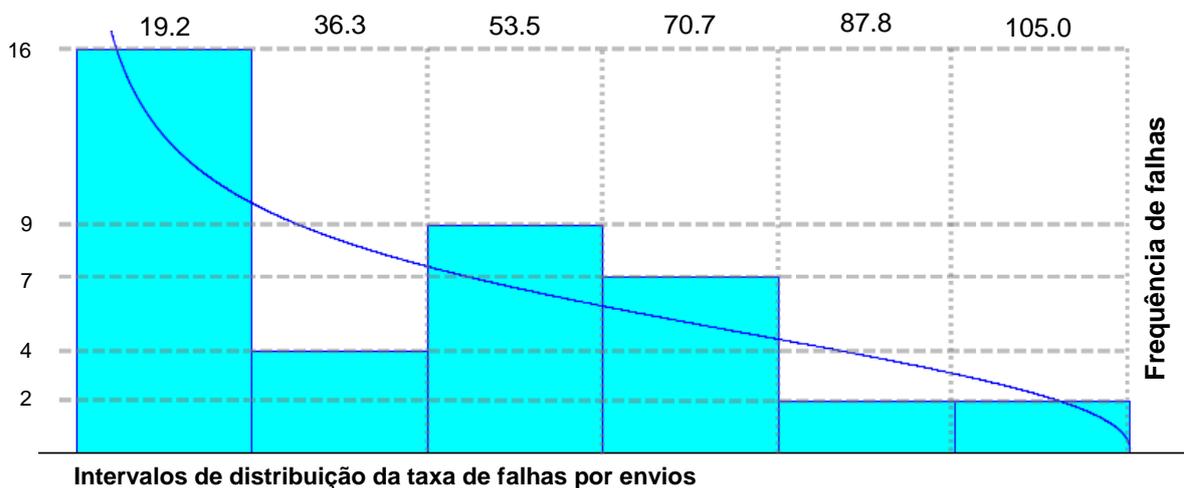


Figura 31 – Histograma de falhas no experimento com 1 salto e 2 nós

Fonte: Autoria própria

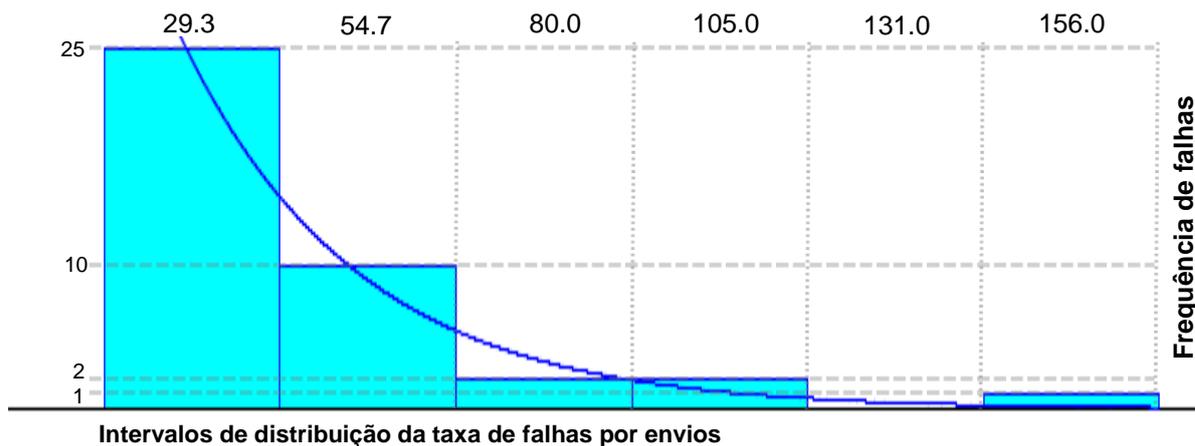


Figura 32 – Histograma de falhas no experimento com 2 saltos e 3 nós

Fonte: Autoria própria

As informações dos dados de entrada permitem simular redes no *software* Arena, a partir destes resultados. Contatou-se por experiência prática da instalação do sistema na usina, que redes com até 20 gerentes podem ser testadas em campo em dois ou três dias de trabalho e ajustadas durante o processo, mas em redes maiores este trabalho pode ser complexo. As simulações podem simplificar o dimensionamento e ajustes do sistema quanto ao número de gerentes e roteadores, número de saltos, intervalos máximos entre requisições de dados, máximo número de sensores, requisições agendadas, entre outras possibilidades. A simulação prévia pode poupar tempo e trabalho de instalação e de testes práticos.

O termo “Mensagem” foi utilizado como equivalente ao termo mais técnico “pacote” (próprio para a camada de rede), se referindo ao quadro de mensagens completo transmitido por RF entre os transceptores, que inclui o cabeçalho, os campos de controle do protocolo P2P e campo dos dados úteis (TANENBAUM, 2007, p.120).

### 5.2.5 Formação de Rotas com Miwi P2P

O *sniffer* Zena foi utilizado para detectar as trocas de mensagens entre os Módulos Gerentes e Coordenador. Pode-se observar que no campo “*payload*” que transfere os dados entre os Módulos, os Módulos incluem seu endereço ao receberem um comando hexadecimal do tipo “0x03” que neste ensaio significava uma mensagem de *broadcast* para formar rotas, os valores hexadecimais “0x46” e “0x11” são respectivamente a origem e destino, sendo “0x11” o Coordenador. A seguir, são

acrescentadas as rotas e como visto na figura 31, o endereço é sempre acrescentado ao final de cada sequência quando o próprio Módulo não está incluído na lista das rotas. Nesse exemplo, apenas o último *byte* dos 8 possíveis foi alterado para identificar os Módulos, já que a rede formada era menor que 255 Módulos. O teste comprovou o funcionamento do sistema de troca de mensagens, que posteriormente foi aprimorado com a criação de outros comandos.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame	Seq Num	Dest PAN	Dest Addr	Source Address	Payload	FCS
00019	+3056 =1335216	23	0xC841	0x87	0x0000	0xFFFF	0x0101010101010101	0x03 0x46 0x11 0x43 0x49 0x4B	RSSI Corr CRC 0x04 0x6B 1
9 Hidden Packet(s)									
00029	+2608 =1354208	23	0xC841	0xAA	0x0000	0xFFFF	0x0101010101010101	0x03 0x46 0x11 0x43 0x47 0x49	RSSI Corr CRC 0x11 0x6A 1
2 Hidden Packet(s)									
00032	+2800 =1361344	24	0xC841	0xAB	0x0000	0xFFFF	0x0101010101010101	0x03 0x46 0x11 0x43 0x47 0x49 0x44	RSSI Corr CRC 0x02 0x68 1
00033	+1968 =1363312	24	0xC841	0x3F	0x0000	0xFFFF	0x0101010101010101	0x03 0x46 0x11 0x43 0x47 0x49 0x48	RSSI Corr CRC 0x08 0x69 1
8 Hidden Packet(s)									
00042	+188736 =1576752	23	0xC841	0x39	0x0000	0xFFFF	0x0101010101010101	0x03 0x46 0x11 0x43 0x49 0x42	RSSI Corr CRC 0x04 0x6A 1
00043	+3312 =1580064	24	0xC841	0x44	0x0000	0xFFFF	0x0101010101010101	0x03 0x46 0x11 0x43 0x49 0x42 0x48	RSSI Corr CRC 0x07 0x63 1

Figura 33 – Formação das rotas no *Sniffer Zena*

Fonte: Autoria própria

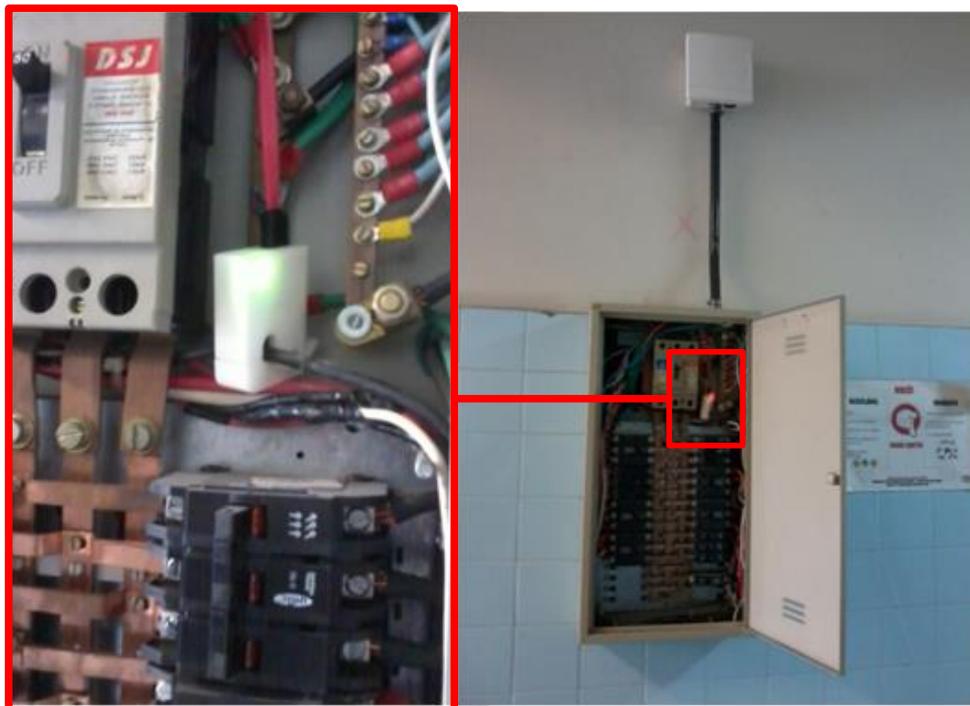
## 5.3 TESTES DE CAMPO

### 5.3.1 Rede Miwi na UTFPR

A rede montada nos quadros elétricos do bloco Q da UTFPR serviu como base para diversos ensaios e alterações nos protocolos de busca para rotas, transmissão de dados e medições nos quadros, por meio dos Módulos Sensores.

Foi instalada uma caixa de PVC ligada a um eletroduto, que dava acesso ao interior do quadro elétrico (fotografia 16). Os primeiros testes com as redes Miwi Pro foram feitos a partir dos códigos oferecidos pela empresa Microchip, porém as trocas de mensagens eram muito demoradas, podendo levar quase 30 segundos que um

novo Módulo fosse reconhecido na rede. Às vezes um Módulo era ligado, reconhecido, parava de transmitir durante vários minutos, até estabelecer conexão novamente.



**Fotografia 16 – Infraestrutura de testes no Bloco Q da UTFPR**

**Fonte: Autoria própria**

Como os resultados não foram satisfatórios com o protocolo Miwi Pro, foi feita uma tentativa com o protocolo Miwi, com o qual também não teve bons resultados. O hardware projetado não possuía a memória para armazenamento de tabelas de vizinhança, que eram opcionais nos protocolos Miwi e Miwi Pro, concluiu-se que talvez este fato tornasse a resposta e organização da rede mais lenta.

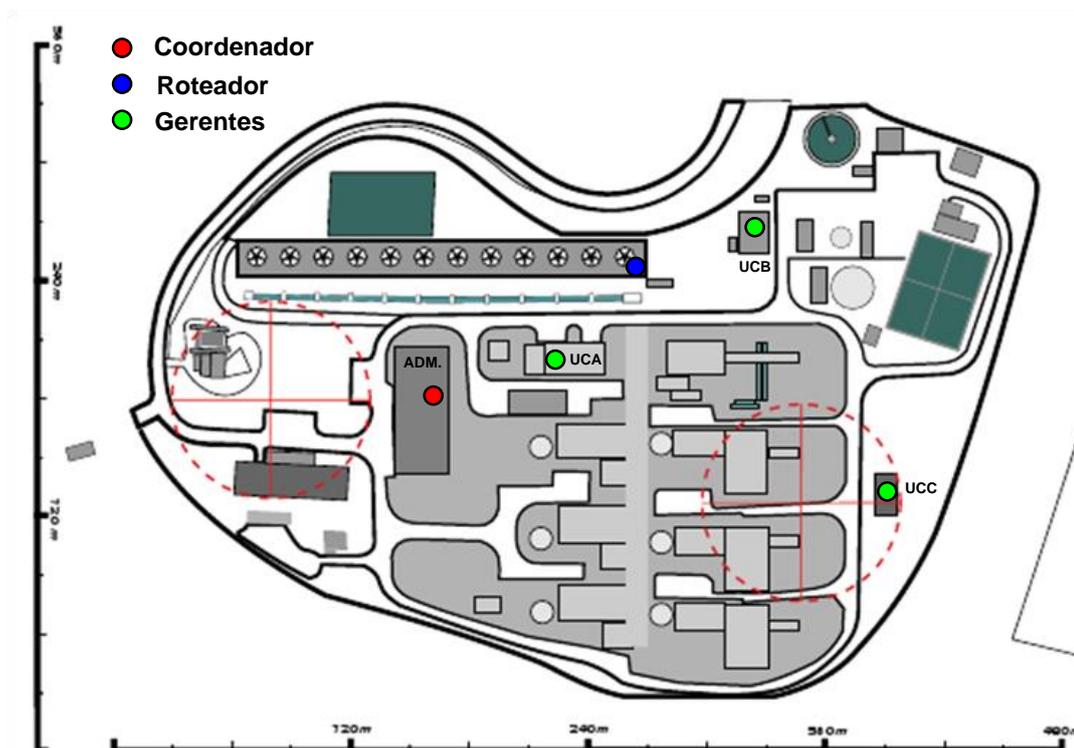
Antes de rever o projeto do hardware, optou-se por testar a pilha Miwi P2P que, não forma redes do tipo *Mesh* com roteadores, mas não requer memória extra. Como o teste foi bem sucedido, desenvolveu-se a ideia de transferir rotas por meio do quadro de dados, para que cada nó de rede recebesse uma mensagem com a informação do próximo endereço ao qual deveria se conectar.

As transmissões com o Miwi P2P se demonstraram simples e diretas, com conexão rápida e estável, provavelmente por não haver necessidade de manter toda a rede conectada e trocando informações constantemente, como ocorre em redes Miwi e Miwi Pro, ou mesmo na rede Zigbee.

Além do teste com o sistema instalado, foram feitos testes de alcance com as antenas MRF24JMA e MB. Em um teste de alcance feito com um módulo MB mantido na janela do laboratório, foi possível estabelecer comunicação em um ponto distante 1200 metros distante do prédio (medida obtida por fotos de satélite), com outro módulo MRF24JMB alimentado por baterias.

### 5.3.2 Testes da Rede Miwi na Usina

Nos primeiros testes na usina, foi confirmado o alcance das antenas MRF24J40MA tanto em campo aberto quanto nas áreas mais concentradas com obstáculos. O sinal alcançou distâncias próximas ao valor de 120 metros neste teste, realizado com o firmware do protocolo Miwi P2P, sem o sistema de rotas (figura 32).



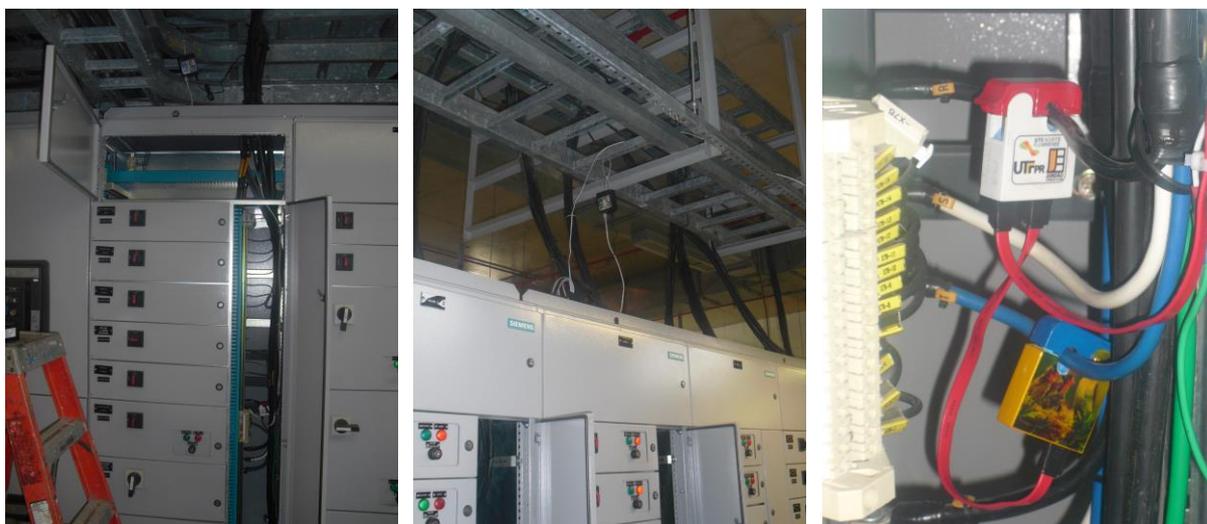
**Figura 34 – Alcance e posicionamento dos Módulos**  
**Fonte: Autoria própria, baseado em fotos de satélite.**

Depois do teste foram visitados os pontos de interesse que deveriam ser monitorados por módulos gerentes. Na etapa inicial do projeto, foram definidos três ambientes que deveriam ser monitorados. Estes ambiente são as Unidades de Controle UCA, UCB e UCC, de onde seriam enviados os dados dos sensores para a

sala de controle e administração da usina. Como ponto de instalação do roteador externo, foi escolhido o prédio das torres de refrigeração, que é alto e tem linha de visada aos roteadores internos. O galpão mais distante é o UCC que está a quase 200 metros da torre, requerendo transceptores do modelo MRF24J40MB que alcançam 1200 metros em campo aberto e 120 metros em áreas com obstáculos.

### 5.3.3 Primeira Instalação do Sistema

Na segunda visita foram instalados os Módulos Gerentes e roteadores de acordo com as posições definidas na primeira visita, bem como os Módulos Sensores (fotografia 17).



**Fotografia 17 – Instalação dos Gerentes e alicates de 10 mm**

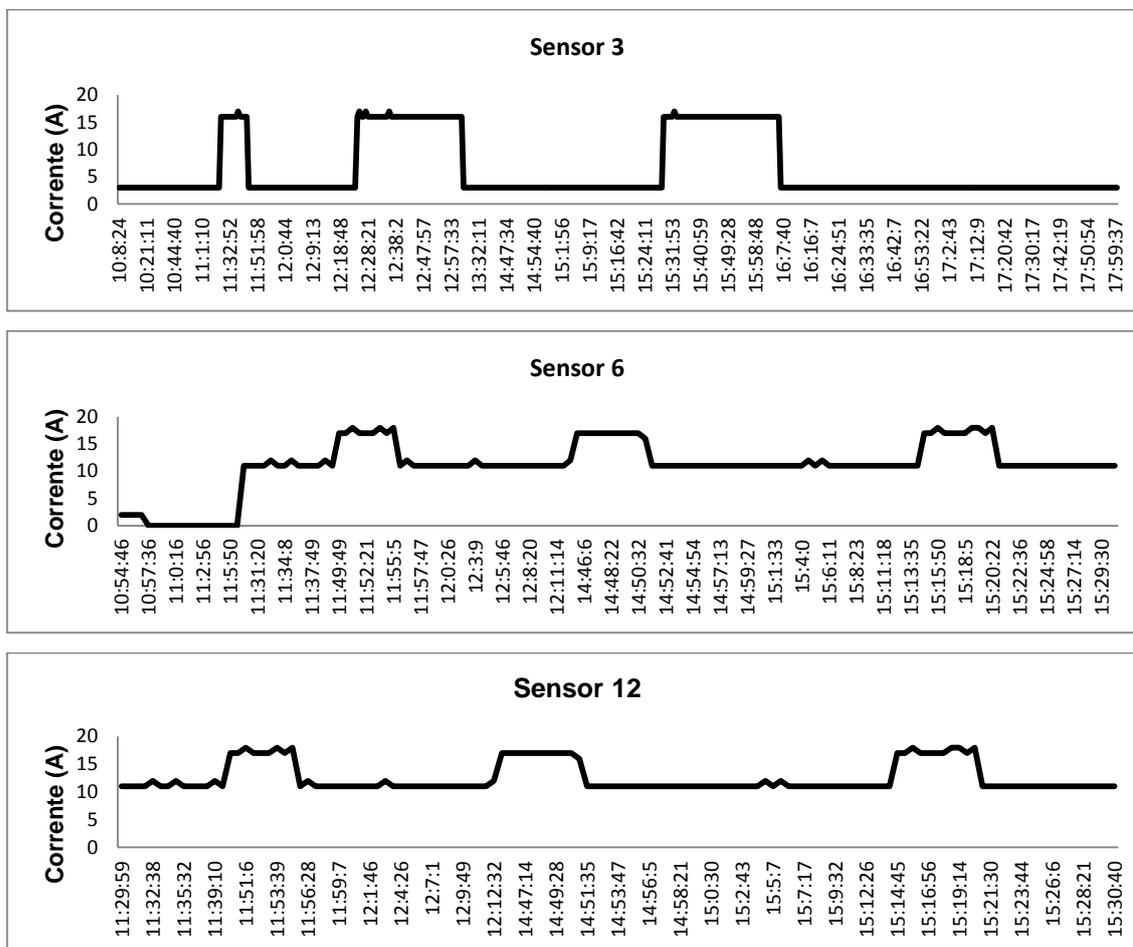
**Fonte: Autoria própria**

Optou-se por instalar 3 Gerentes em cada galpão, sendo instalados os Gerentes 1,2,3 na UCA, os Gerentes 4,5,6 na UCB, e os Gerentes 7,8 e 9 na UCD.

Todos os Módulos internos e externos estavam equipados com o transceptor de maior potência MRF24J40MB. Foram instalados 6 Sensores de corrente, confeccionados de ZAMAC com o diâmetro interno para acomodar condutores de 10 mm de diâmetro. A figura 50 mostra registros dos dados coletados pelos Sensores 3, 6 e 12 de um dia, no período entre as 10 da manhã até as 6 da tarde.

Na primeira versão, o *firmware* do coordenador estava ajustado para fazer requisições a cada 10 segundos, e quando os módulos falhavam era necessário ligar

e desligar manualmente a alimentação do equipamento para que este voltasse a funcionar normalmente.

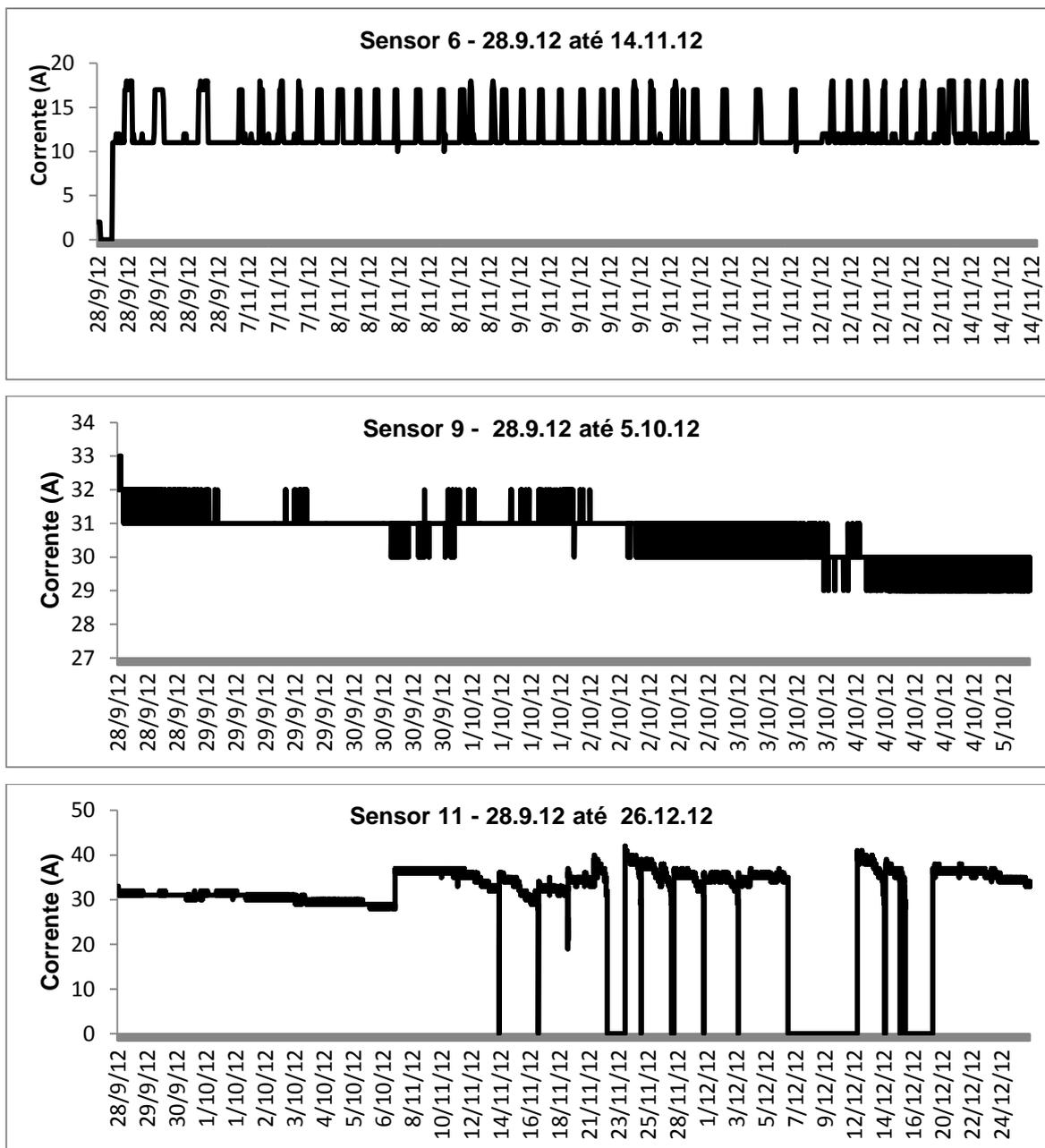


**Figura 35 –Dados coletados pelos sensores 3, 6 e 12 em um dia**

**Fonte: Autoria própria**

Outro problema enfrentado foi a perda de comunicação entre o Módulo Coordenador e o computador com banco de dados. Embora o coordenador continuasse funcionando, o computador parava de pedir dados e toda a rede ficava aguardando novas requisições.

A religação da conexão pela porta serial do computador podia ser feita remotamente, mas no caso das falhas do gerente era necessário cortar a alimentação do dispositivo no local da instalação. Como não havia pessoal disponível para realizar a operação de religação do equipamento logo que fosse detectada alguma falha, quando um sensor falhava ficava vários dias inoperante, explicando os períodos em que os sensores não possuem dados. Na figura 51 são mostrados dados coletados ao longo de 3 meses de coleta de dados.



**Figura 36 – Dados registrados em 3 meses pelos sensores 6, 9 e 11**

Fonte: Autoria própria

Estes testes evidenciaram a necessidade de melhorar os métodos automáticos de reinicialização dos Módulos Gerentes e Coordenador, e de criar formas de reiniciar o Módulo Gerente remotamente se necessário. Foi definido que as leituras seriam feitas apenas em minutos inteiros, para facilitar a interpretação dos dados e comparar os diversos Sensores nos mesmos intervalos. Outra observação para este primeiro hardware e firmware instalado é que alguns módulos paravam por várias horas ou dias e depois voltavam a funcionar sem nenhuma intervenção. Uma

das causas era a lentidão do processo de busca de rotas, e o período de renovação das rotas formadas.

### 5.3.4 Segunda Instalação do Sistema



**Fotografia 18 – Instalação dos Gerentes e alicates de 25 mm**

**Fonte: Autoria própria**

Na terceira visita, os Sensores de 10 mm foram substituídos por novos modelos com abertura de 25 mm, confeccionados em ABS impresso pelo processo FDM, em um total de 20 unidades (figura 52). Os Gerentes e roteadores foram substituídos por Módulos com uma nova versão de *firmware*, com correções para os problemas verificados na primeira instalação do sistema, mantendo-se as posições de todos os Módulos definidas na primeira instalação.

Nesta visita, o sistema de banco de dados foi atualizado, e os dados foram perdidos durante a instalação do novo banco.

### 5.3.5 Revisão do Sistema Completo e Atualizações Finais.

A última visita à usina teve como objetivo conferir o funcionamento geral do sistema instalado e completo para investigar e resolver algumas inconsistências ainda observadas em alguns dos Módulos Gerentes instalados na usina. Que haviam funcionado normalmente durante um período e depois começaram a apresentar falhas intermitentes.

### 5.3.5.1 Intervenções Corretivas e Ensaios

Foi constatado que o conector da fonte do roteador externo foi desligado acidentalmente durante as operações de rotina da usina. O roteador foi retirado, substituído e reativado, e feita uma ligação elétrica direta sem conectores. Este roteador estabelece a melhor rota para o galpão da UCB (figura 52).



**Fotografia 19 – Reposicionamento do roteador externo**

**Fonte: Autoria própria**

Além do roteador externo desativado, havia um roteador interno da UCB que não foi substituído na visita anterior, e ainda funcionava com o *firmware* antigo. Este Módulo foi substituído e o Gerente da UCB foi reposicionado para não ser obstruído por eletrocalhas metálicas, que podem bloquear o sinal de 2,4 GHz quando muito próximas da antena transceptora (figura 53).



**Fotografia 20 – Alinhamento dos Gerentes e roteadores internos na UCB**

**Fonte: Autoria própria**

Estas providências embora necessárias, não contribuíram para eliminar os problemas de comunicação e nem os erros verificados no Módulo Coordenador. Para avaliar outras hipóteses para o mal funcionamento da rede que precisava ser corrigido, foram feitos uma série de testes ensaios de bancada.

### 5.3.5.2 Ensaios de aquecimento nos Módulos e fontes

O ensaio foi repetido 10 vezes, com a mesma fonte de 12 V utilizada em campo, medindo a temperatura em diferentes componentes, com placa exposta e fechada da caixa. Com a caixa fechada, a temperatura interna chegou a 103°C. O Módulo funcionou normalmente, e o teste foi interrompido pelo derretimento da caixa (figura 54).



**Fotografia 21 – Aquecimento do circuito e caixa plástica até 103°C**

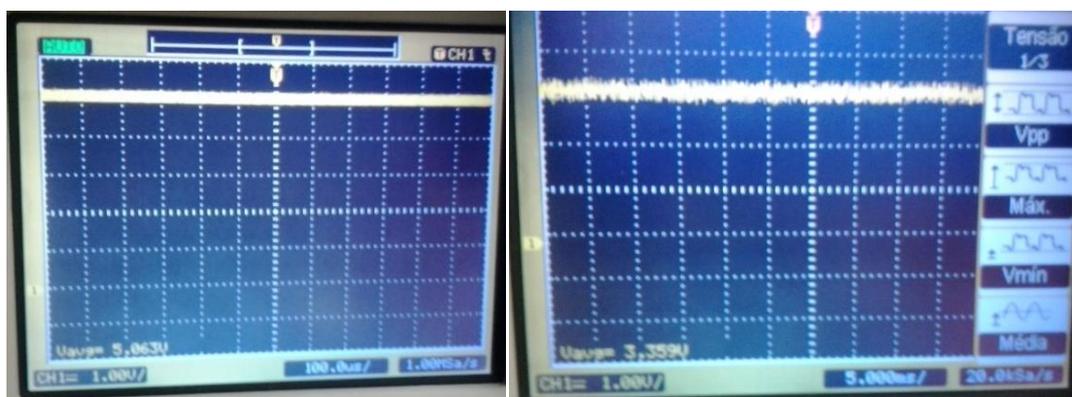
**Fonte: Autoria própria**

Nos testes com a placa exposta (sem a proteção da caixa), em 2 ocasiões ocorreram os erros “H?” e “G?”, como esperado, pois a temperatura nominal de operação do RTC é abaixo de 70°C e do microcontrolador dsPIC é abaixo de 85°C. Mas, em 80% dos casos a temperatura de 90°C não afetou o funcionamento normal da placa.

Os reguladores de 5 V e 3.3 V que já tinham uma temperatura inicial de 40°C continuaram a funcionar normalmente quando a temperatura foi aumentada até 80°C e 90°C (figura 55), os testes tiveram duração aproximada de 20 minutos.

A conclusão dos testes é que as falhas “H?” e “G?” não são causadas pela temperatura ambiente nos galpões, nem por sobrecarga nas fontes de 12 V e nem por uma combinação destes dois fatos.

O sistema continuou operando normalmente mesmo em temperaturas bem superiores aos 40°C, que eventualmente podem ser registradas dentro dos ambientes monitorados. A caixa plástica também contribui para reduzir o efeito do aquecimento externo, funcionando como um isolante térmico.



**Fotografia 22 – Reguladores de 5 V e de 3.3 V funcionando em 80°C**

**Fonte: Autoria própria**

#### 5.3.5.3 Revisão do firmware

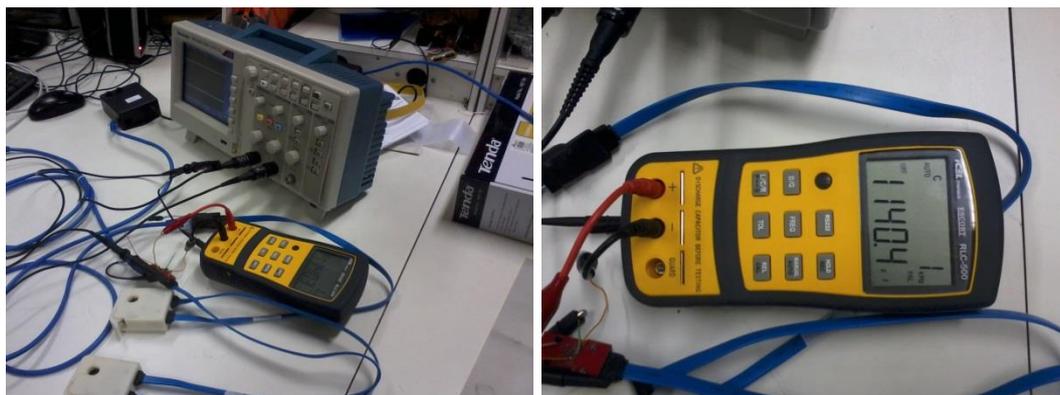
A revisão do firmware permitiu concluir que a causa dos erros é o barramento I2C. O erro “G?” era exibido mesmo quando existiam rotas e não havia problema no radioenlace por que o barramento I2C estava em falha. O teste com o envio do comando “b” de ajuste do RTC, sempre retornava o valor correto, mas na verdade o valor era o mesmo enviado, e não o lido a partir do RTC por meio do barramento I2C. Com o barramento em falha, nem o RTC e nem a memória compartilhada podem ser acessados, gerando os erros “G?”, “H?” e “D?” nos respectivos comandos de requisição de dados ou confirmação de hora.

Assim foram feitos testes em bancada para reproduzir a ocorrência das falhas, e verificar se os mesmos erros e problemas detectados na usina poderiam ocorrer por causa do barramento compartilhado, com instalação feita de maneira inadequada.

#### 5.3.5.4 Ensaios com o barramento I2C

O primeiro teste consistiu em verificar a capacitância do barramento, que como se sabe não pode superar 400 pF. Para a montagem feita na bancada com 10 Módulos Sensores e com vários metros de cabo de rede, foi medida uma capacitância

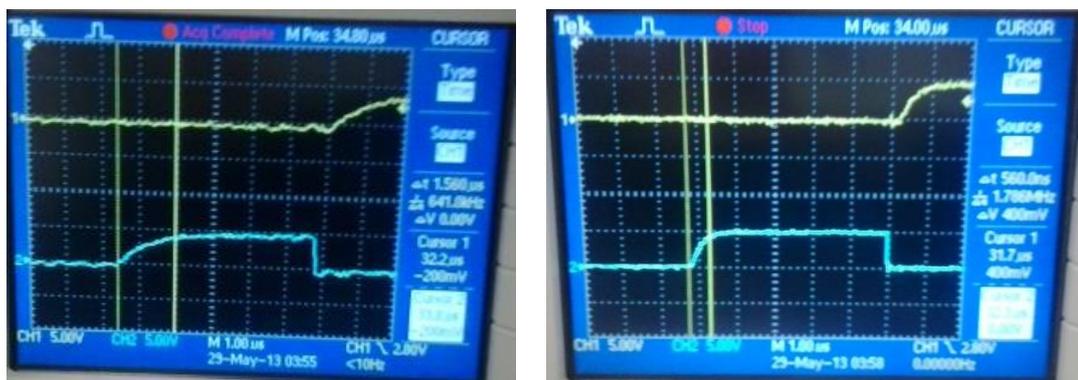
de 1140,4 pF que está fora da faixa permitida, conforme pode ser visto na figura 56. A capacitância foi medida com o barramento sem energia, na placa adaptadora de cabos SATA para cabo de rede com conectores RJ45. Um acompanhamento das formas de onda da rede I2C (vias de dados e de *clock*) comprovou este comportamento, como pode ser visto na comparação entre um pulso de *clock* com problemas e outro normal.



Fotografia 23 – Capacitância do barramento I2C, medindo 1140,4 pF.

Fonte: Autoria própria

O pulso demora mais que 1  $\mu$ S para atingir a tensão de 5 V, causando erros de protocolo (figura 57). A rede I2C funcionava em alguns momentos, mas parava em outros porque o sistema não conseguia acessar o barramento I2C para ler a memória compartilhada e nem ao RTC (figura 58).

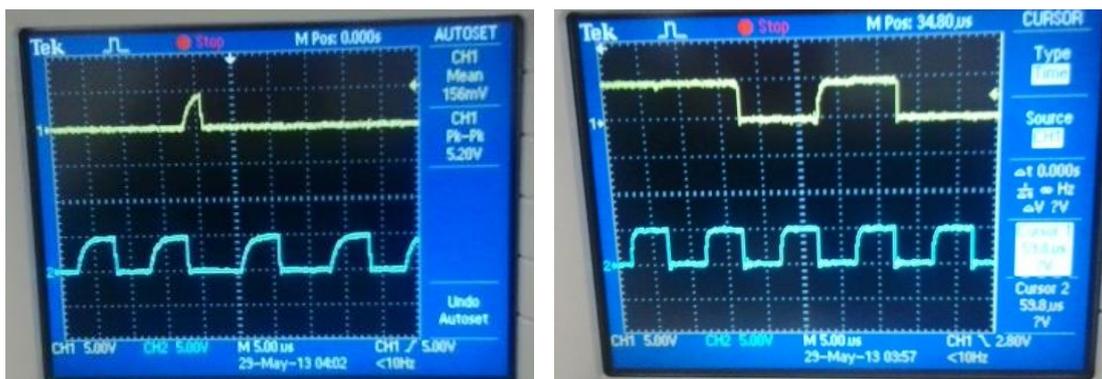


Fotografia 24 – Borda de subida da via SCL, lenta (esq.) e normal (dir.).

Fonte: Autoria própria

Foi assim constatado que os erros eram causados pelo barramento I2C no Gerente, recebidos pelo Coordenador e enviados ao terminal.

As mensagens de erro “G?”, “H?” e “D?” podem ser interpretadas erroneamente como causadas por falhas na rede Miwi, pois embora a rede I2C não funcione para alguns comandos, funciona para outros que não dependem do barramento. Na segunda fase do projeto, o sistema de troca de mensagens de erros será revisto para diferenciar as situações de falhas no barramento e na rede sem fios, lembrando que é necessário ter métodos para detectar falhas no barramento.



Fotografia 25 – Via SDA em falha (esq.) e normal (dir.).

Fonte: Autoria própria

#### 5.3.5.5 Conclusões da revisão no sistema

Feitos todos os ensaios, pode-se concluir que a causa dos problemas era a comunicação pelo barramento I2C, causada pelo mau procedimento de instalação, além disso outras conclusões fora que:

- Desligar o roteador na torre de refrigeração dificultou a comunicação com os Módulos instalados no barracão UCB antes da visita.
- O mau posicionamento dos Gerentes somados a ausência de roteadores internos no galpão UCB aumentam a ocorrência de perdas de mensagens.
- A fonte de 12 V não falha por sobrecarga, e no teste com 10 alicates consumiu apenas 450 mA.
- O aquecimento, desde que abaixo de 70°C não interfere nem na fonte e nem nos Módulos Gerentes, a caixa plástica protege do aquecimento externo.
- Para um comando C os erros “H?” e “G?” são causados por falha de comunicação com o Gerente, mas o erro H? e o erro “D?” também podiam estar indicando falha de comunicação no I2C.

- Ocorrências de erros “f” indicam falhas no sistema todo, incluindo o funcionamento do RTC, memória compartilhada, barramento I2C e Miwi P2P.
- É necessário instalar o barramento de acordo com o projeto e manter a capacitância inferior a 400 pF, com um cabo de rede, um adaptador e vários cabos SATA.
- Sugere-se instalar um novo Gerente, em vez de alongar o barramento com cabos curtos.

#### 5.4 CONCLUSÃO

Os ensaios e testes realizados na usina UTE- Norte Fluminense e na UTFPR serviram para comprovar a viabilidade do conceito da RSSF associada a barramentos de Sensores, instalados em quadros elétricos e dispersos por uma unidade consumidora, quer seja ela industrial, como na usina termoelétrica ou outros ambientes, como os laboratórios e salas de aula da universidade.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 MEDIDORES DE CONSUMO

Medidores de consumo, ou wattímetros voltados para medições remotas já existem desde os anos 70. Atualmente, a IEEE 2030, comissão que trata de Smart Grid, prevê dispositivos HEMS (*Home Energy Management System*) para a tarefa de monitorar cargas dentro de uma unidade consumidora, mas até recentemente ainda não havia consenso ou padronização sobre as tecnologias mais adequadas. As opções mais relevantes para comunicação entre os dispositivos medidores e uma central coletora são: IEEE 1901 (*Power Line Communication – PLC*), IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.1 ou IEEE 802.11. No contexto dos dispositivos HEMS, formou-se a SEP 2.0 (*Smart Energy Profile*), que é uma nova coalizão que especifica um padrão para interligar os principais protocolos em uma *Smart Meter*, permitindo a troca de informações entre distribuidoras e geradoras de energia com os equipamento e medidores “inteligentes” existentes nos ambientes monitorado.

### 6.2 REQUISITOS E PARÂMETROS DE PROJETO

Vários protocolos poderiam ser utilizados para projetar a infraestrutura, mas atualmente nenhum sistema comercial possui o custo e o conjunto de requisitos técnicos apropriados para os ambientes monitorados de uma usina termelétrica, que são de acesso restrito pela periculosidade, e separados por grandes distâncias e com vários obstáculos metálicos e densas paredes de concreto. As cargas elétricas monitoradas não podem ser desligadas e as medições devem ser feitas dentro dos gabinetes e quadros elétricos onde é possível identificar a fiação com mais facilidade. Porém, os ambientes blindados atenuam os sinais de rádio frequência e impedem a transmissão direta por radioenlace.

Para o caso específico deste projeto, de estabelecer um sistema de medição de consumo de baixo custo no interior de quadros elétricos, foi criado um sistema que associa a praticidade das RSSF que facilita a instalação da infraestrutura, com a comunicação digital por barramentos que permitem monitorar vários Sensores ao

mesmo tempo a partir de uma única antena transceptora, agregando dados e reduzindo o tamanho do sistema quanto ao número de nós da RSSF.

### 6.3 SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS

Atendendo ao requisito de baixo custo, foi utilizado um protocolo proprietário da fabricante Microchip, baseado no IEEE 802.15.4 conhecido com Miwi P2P, que foi adaptado para transportar um cabeçalho no campo de dados indicando as origens e destino para o próximo dispositivo da rede.

A implantação das rotas por meio do protocolo P2P dependeu da criação de métodos para buscar e manter o roteamento e a qualidade do serviço, bem como exigiu ensaios que permitissem dimensionar o sistema, quanto à capacidade de medição e transporte de dados úteis. Com base nos experimentos realizados, estima-se que seja possível construir redes com até 11620 Sensores com 166 nós Gerentes no terceiro nível, trocando um total de mil mensagens por minuto.

Agregando as medições no tempo em barramentos com menos de 70 Sensores na memória local do Módulo Gerente, as mil trocas de mensagens podem ser feitas entre mais de 166 Módulos Gerentes, pelo sistema de requisição agendada no intervalo de 1 minuto.

### 6.4 ENSAIOS E TESTES DE CAMPO

Os dispositivos da rede foram desenvolvidos e testados na infraestrutura montada no bloco Q da UTFPR, e posteriormente na usina termoeletrica de Macaé, durante 20 meses de projeto executado como parte de um P&D ANEEL / UTE- Norte Fluminense. Os ensaios e testes resultaram em um sistema funcional que comprova as hipóteses iniciais do projeto, com várias adaptações e soluções desenvolvidas.

Além do desenvolvimento dos protocolos, sistema de comunicação e aquisição de dados por RSSF e barramentos, do projeto do hardware e firmware necessários para implantação do sistema, várias dificuldades foram causadas por detalhes mecânicos do projeto. Não existiam núcleos de ferrite nas dimensões necessárias para acomodar os cabos condutores de 25 mm, e foram necessárias várias tentativas entre projetos e montagens para obter a forma final dos Módulos

Sensores de corrente, até a versão atual impressa em 3D com plástico ABS por meio da tecnologia FDM.

## 6.5 RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS

Embora a implantação do sistema não tenha contemplado todo o trabalho de desenvolvimento no projeto por falta de tempo para mais testes, um sistema com um Coordenador, 10 nós Gerentes e 20 Sensores foi instalado e está funcionando na usina depois de 4 visitas entre instalações e ajustes. O projeto originou a publicação de artigos para o congresso CBA2012, e para o CBQEE 2013, foi apresentado no MOPP 2013 e gerou o depósito de uma patente, cujo resumo está no apêndice B deste trabalho.

O sistema deverá auxiliar no gerenciamento do consumo de energia elétrica nos setores internos de uma unidade consumidora industrial, bem como auxiliar na manutenção preventiva medindo o tempo de uso dos equipamentos, e na preditiva detectando anomalias no perfil da curva de carga dos equipamentos monitorados.

Também se espera que o sistema possa auxiliar na avaliação de ações de eficiência energética, tanto nas campanhas de medição de longo prazo que orientam as ações de eficiência, como nas campanhas posteriores para confirmação de resultados.

Para futuros trabalhos, é sugerida a implantação completa do sistema de busca integrada, sistema de agendamento de requisições e agregação de dados. Seria interessante também realizar testes com outras frequências de transmissão, como a de 433 MHz, que possui antenas transceptoras de menor custo que podem alcançar distâncias maiores com menor potência dissipada, ultrapassando certos obstáculos com maior facilidade. A infraestrutura desenvolvida também pode ser associada a outros tipos de Sensores, permitindo criar sistemas para outras diversas áreas de atuação, como manutenção preventiva e preditiva.

## REFERÊNCIAS

ARENA. **Arena Simulation Software**. Disponível em: <[http://www.arenasimulation.com/Arena\\_Home.aspx](http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx)>. Acesso em: 9 dez. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

AL-KARAKI, J.N.; KAMAL, A. E. **Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey**. In: *IEEE Wireless Communications*, vol. 11. n. 6, p. 6-27, dez. 2004.

AKYILDIZ, I.F.; WEILIAN SU; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E., **A survey on Sensor networks**. In: *Communications Magazine, IEEE*, vol.40. no.8, p.102-114, ago. 2002.

ALLDRITT, Donald H.; BEAM, Theodore E. **Meter reading means and method**. P.I US3478342, 24 ago. 1965.

ANATEL, AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução nº 365, 10 mai. 2004 - Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita**. Disponível em: <[http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?null&filtro=1&documentoPath=biblioteca/resolucao/2004/res\\_365\\_2004.pdf](http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?null&filtro=1&documentoPath=biblioteca/resolucao/2004/res_365_2004.pdf)>. Acesso em: 19 ago. 2013.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 0044/2010-SRD**. ANEEL , 17 set. 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/documento/nota\\_tecnica\\_0044\\_2010\\_srd.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/documento/nota_tecnica_0044_2010_srd.pdf)> Acesso em: 19 jul. 2013a.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 502, 7 ago. 2012.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012502.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2013b.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica.** Brasília, DF, ago. 2012. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura\\_arquivo/arquivos/Manual-PeD\\_REN-504-2012.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura_arquivo/arquivos/Manual-PeD_REN-504-2012.pdf)>. Acesso em: 19 ago. 2013c

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. ***The Internet of Things: A survey.*** In: *Computer Networks*, vol. 54. n. 15, p. 2787-2805, 28 out. 2010.

AXIOMATIC DESIGN SOLUTIONS, INC. ***Axiomatic Design Technology.*** Disponível em: <<http://www.axiomaticdesign.com/technology/axiomatic.asp>>. Acesso em: 6 ago. 2013

BALARAMAN, Srinath; ANIL Khanna. ***An overview of ZigBee's Smart Energy Profile 2.0 standard: Being smart about smart energy,*** EETIMES, 14 mai. 2013. Disponível em: <[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1280846&](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280846&)>. Acesso em: 4 ago. 2013.

BARROS, Benjamim Ferreira de; BORELI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luis. **Gerenciamento de energia:** Ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, 2012.

BOUHAFS, Faycal; MACKAY, Michael; MERABTI, Madjid. ***Links to the Future: Communication Requirements and Challenges in the Smart Grid.*** In: *IEEE Power & Energy magazine*, vol.10. n.1, p.24-32, jan./fev. 2012.

BLUETOOTH. **BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.0 [Vol 2]**. 30 Jun. 2010. Disponível em: <[https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc\\_id=229737](https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737)>. Acesso em: 24 jul. 2013.

CAPRILE, Sérgio R. **Equisbi: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos Zigbee e 802.15.4**, 1. ed. Buenos Aires: Gran Aldea Editores-GAE, 2009.

CHEN, Dong; CHANG, Guiran; SUN, Dawei; JIA Jie; WANG, Xingwei. **Lightweight key management scheme to enhance the security of Internet of things**. In: *International Journal of Wireless and Mobile Computing. Wireless and Mobile Computing*, vol. 5. n. 2, p.191-198, 2012.

DASH7 ALLIANCE. Disponível em: <<http://www.dash7.org/>>. Acesso em: 25 jul. 2013.

DIGI. **The DigiMesh™ Networking Protocol**. Disponível em: <<http://www.digi.com/technology/digimesh/>>. Acesso em: 25 jul. 2013a.

DIGI. **RF Modules**. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/>>. Acesso em: 25 jul. 2013b.

Disponível em: < [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1279156](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279156)>/>. Acesso em: 25 jul. 2013.

ELECTROMETRE S.A (Zug, Suíça). Alfred Spiilti, **System for interrogating remote stations via power lines of an electrical distribution network**. P.I US3445814, 24 mar. 1964.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Série: ESTUDOS DA DEMANDA - NOTA TÉCNICA DEA 14/10 - Avaliação da Eficiência energética na indústria e**

**nas residências no horizonte decenal (2010-2019)**, Rio de Janeiro 2010. Disponível em:

<[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809\\_4.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_4.pdf)>. Acesso em: 5 ago. 2013.

EVANS, Dave. ***The Internet of Everything: How more relevant and valuable Connections will change the world***, CISCO IBSG, 2012. Disponível em: <<http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoE.pdf>> Acesso em: 3 de ago. 2012.

GS1. ***EPC Global***. Disponível em: <<http://www.gs1.org/epcglobal>>. Acesso em: 28 jul. 2013.

HAN, Dae-Man; LIM, Jae-Hyun. ***Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and Zigbee***. In: *Consumer Electronics, IEEE Transactions*, vol.56. n.3, p. 1403-1410, ago. 2010.

HORAK, Ray. ***Telecommunications and data communications handbook***. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

WANG, Xiaonan; HUANG, Haili. ***A service model for 6LoWPAN wireless Sensor networks***. In: *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, vol.2013. n. 692735, 2013.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. ***WirelessHART® Technology***. Disponível em: <<http://www.hartcomm.org/index.html>>. Acesso em: 26 jul. 2013.

HUSTON, Geoff. ***Os desafios da transição aoIPv6***. Disponível em: <[http://www.politics.org.br/sites/default/files/16\\_26\\_DesafiosDaTransicaoIPv6\\_poliTI-Cs\\_15.pdf](http://www.politics.org.br/sites/default/files/16_26_DesafiosDaTransicaoIPv6_poliTI-Cs_15.pdf)>. Acesso em: 29 jul.2013.

IETF. **6lowPAN**. Disponível em <<http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>>. Acesso em: 19 jul. 2013.

DAS, Kaushik. **IPv6 e Wireless Sensor Networks**. IPv6.com, 2008. Disponível em: <<http://www.ipv6.com/articles/Sensors/IPv6-Sensor-Networks.htm>> Acesso em: 31 jul. 2013. KUSHALNAGAR, N., MONTENEGRO, G., SCHUMACHER, C. **6LoWPAN: Overview, assumptions, problem statement, and goals**. IETF RFC 4919. 2007. Disponível em: <<http://datatracker.ietf.org/doc/rfc4919/>> Acesso em: 26 jul. 2013.

KAHN, J. M.; KATZ, R. H.; PISTER, K. S. J. **Mobile Networking for Smart Dust**. In: ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking, 1999, Seattle, p. 271-278, ago. 1999.

LEE, Edward A. **CPS Foundations**. In: *Proceedings - Design Automation Conference*, n. 47, p. 737-742, jun. 2010.

LI, Wenfeng; BAO, Junrong; SHEN, Weiming. **Collaborative wireless Sensor networks: A survey** In: *Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2011 IEEE International Conference, p.2614-2619, 9-12 out. 2011.

LIANG, Chieh-Jan Mike; PRIYANTHA, Nissanka Bodhi; LIU, Jie; JIA Jie; TERZIS, Andreas. **Surviving Wi-Fi Interference in Low Power ZigBee Networks**. In: *SenSys*, 2010, Zurique, Suíça, 3-5 nov. 2012.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, R. A.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. **Redes de Sensores sem Fio**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'03), Natal, RN, Brasil. p. 179-226, 2003.

MATIN, M.A.; ISLAM, M.M. **Wireless Sensor Networks – Technology and Protocols: Overview of Wireless Sensor Network**, InTech, 6 set. 2012. Disponível

em: <[http://cdn.intechopen.com/pdfs/38793/InTech-Overview\\_of\\_wireless\\_Sensor\\_network.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/38793/InTech-Overview_of_wireless_Sensor_network.pdf)>. Acesso em: 30 jul. 2013.

MAXIM INTEGRATED. **Glossary of electrical engineering terms**. Disponível em: <[http://www.maximintegrated.com/glossary/definitions.mvp/term/daisy\\_chain/gpk/71](http://www.maximintegrated.com/glossary/definitions.mvp/term/daisy_chain/gpk/71)> acesso em: 25 jul. 2013.

MEHRJERDI, Y.Z. **RFID adoption: A systems thinking perspective through profitability engagement**. In: *Assembly Automation*, vol. 31. n. 2, p. 182-187, 2011.

MICROCHIP INC. **MiWi™ Development Environment**. Disponível em: <[http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=2113&param=en520414](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2113&param=en520414)> Acesso em: 25 jul. 2013a.

\_\_\_\_\_. **MRF24J40 Data Sheet, IEEE 802.15.4™ 2.4 GHz RF Transceiver**, 18 ago. 2010. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39776C.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2013b.

\_\_\_\_\_. **MRF24J40MA Data Sheet 2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4™ RF Transceiver Module**. 10 nov. 2008. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70329b.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2013c.

\_\_\_\_\_. **MRF24J40MB Data Sheet 2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4™ 20 dBm RF Transceiver Module**. 10 ago. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70599B.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2013d.

\_\_\_\_\_. **MiWi™ Protocol**. Disponível em: <<http://www.microchip.com/pagehandler/en->

us/technology/personalareanetworks/technology/home.html>. Acesso em: 5 ago. 2013e.

\_\_\_\_\_. **Recommended Usage of Microchip I2C™ Serial EEPROM Devices.**

**AN1028.** 2006. Disponível em:

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01028a.pdf>>. Acesso em: 6 ago. 2013f.

MONTENEGRO, G.; KUSHALNAGAR, N.; HUI, J.; CULLER, D. **Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks.** IETF RFC 4944, 2007. Disponível em: <<http://datatracker.ietf.org/doc/rfc4944/>> Acesso em: 26 jul. 2013.

MURATA, Tadao. **Petri nets: Properties, analysis and applications.** In: *Proceedings of the IEEE*, vol. 77. N.4, p. 541-580, abr. 1989.

NETFABB. **Software for 3D Printing.** Disponível em: < <http://www.netfabb.com/>>. Acesso em: 29 jul. 2013.

NFC. **Near Field Communication.** Disponível em: <<http://www.nearfieldcommunication.org/>>. Acesso em: 29 jul.2013.

NORAIR, jp. **Introduction to DASH7 Technologies.** 1 ed. 16 Mar. 2009. Disponível em: <<https://dash7.memberclicks.net/assets/PDF/dash7%20wp%20ed1.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2013.

PARASKEVASKOS ELETRONICS. Paraskevakos, T.G. **Sensor Monitoring Device.** P.I US3842208. 11 jul. 1972.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. **The i2c-bus specification version 2.1,** jan. 2000. Disponível em: <<http://i2c2p.twibright.com/spec/i2c.pdf>>. Acesso em 20 ago.2013

REGATTIERI, A.; GAMBERI, M.; MANZINI, R. **Traceability of food products: General framework and experimental evidence**. In: *Journal of Food Engineering*, vol. 81, p. 347-356, jul. 2007.

ROH, J. Jungbae; KUNNATHUR, Anand; TARAFDAR, Monideepa. **Classification of RFID adoption: An expected benefits approach**. In: *Information & Management*, vol. 46. n. 6, p. 357-363, ago. 2009.

RUIZ, LINNYER B.; CORREIA, LUIZ H.; VIEIRA, LUIZ F.; *et al.* **Arquitetura de redes de Sensores sem fio**. Minicursos do XXII In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04), Gramado, RS, Brasil. Cap. 4, p. 167–218. 2004.

SKETCHUP, **The easiest way to draw in 3D**. Disponível em: <<http://www.sketchup.com>>. Acesso em 20 ago. 2013.

SAKSENA, Mamas. **Design How-To, Smart Energy Profile (SEP) 2.0 Uncovered**. EE TIMES. Disponível em: <[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1279156](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279156)>. Acesso em: 7 ago. 2013.

SYNAPSE WIRELESS, INC. **Synapse's SNAP Network Operating System**. Disponível em: <[http://synapse-wireless.com/documents/white\\_paper/Synapse-SNAP-OS-White-Paper.pdf](http://synapse-wireless.com/documents/white_paper/Synapse-SNAP-OS-White-Paper.pdf)>. Acesso em: 7 ago. 2013

SUH, Nam P. **The principles of Design**. New York: Oxford Press, 1990.

TANEMBAUM, Andrew S.; STEEN, Maarten V. **Distributed Systems: Principles and Paradigms**, 2. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

TAYLOR, John R. **Análise de Erros**, 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

TEXAS INSTRUMENTS, **SimpliciTI Compliant Protocol Stack**. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/simpliciti#description>>. Acesso em: 25 jul. 2013a.

TEXAS INSTRUMENTS, ***A USB-Enabled System-On-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and Zigbee***, set. 2009 - revisado em jun. 2010. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2531.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2013b.

TOFLER, Alvin. **A Terceira Onda**. ed. 30, Rio de Janeiro: Record, 1980.

URBANSKI, Stephan; HUBER, Eduard; WIELAND, Matthias; LEYMANN, Frank. ***PerFlows for the computers of the 21st century, Pervasive Computing and Communications***. In: PerCom, 2009. IEEE *International Conference on*, p. 1, 6, 9-13, mar. 2009.

YANG, Yifeng. FLOWERS, David. Microchip Inc. ***Miwi wireless networking protocol stack***. **AN1066**. 2010. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN1066%20-%20MiWi%20App%20Note.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

YANG, Yifeng. Microchip Inc. ***Microchip wireless (miwi™) media access controller mimac***. **AN1283**. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01283a.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013a.

\_\_\_\_\_. ***Microchip wireless (miwi™) application programming interface-miapp***, **AN1284**. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01284a.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013b.

\_\_\_\_\_. ***Microchip miwi p2p wireless protocol***, **AN1204**. 2011. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01204B.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013c.

\_\_\_\_\_. **Microchip miwi pro wireless networking protocol, AN1371.** 2011. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01371A.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013d.

YICK, Jennifer; MUKHERJEE, Biswanath; GHOSAL, Dipak. **Wireless Sensor network survey.** In: *Computer Networks*, vol. 52. 2008, n.12, p. 2292-2330, 22 ago. 2008.

WAN, Jiafu; YAN, Hehua; SUO, Hui; LI, Fang. **Advances in cyber-physical systems research.** In: *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 46. n. 6, p. 1891-1908, nov. 2011.

WEISER, Mark. **The computer for the 21st century.** *Scientific American*, ed. 265, p. 94-104, set. 1991.

WILLIS, J.R., Electromitor, Inc., 1975. **Apparatus for automatically sending data over a telephone system from a remote station to a central station.** P.I US 3987246, 1975.

Z-WAVE ALLIANCE. Disponível em: <<http://www.z-wavealliance.org>>. Acesso em: 19 jul. 2013.

ZIGBEE ALLIANCE. Disponível em: < <http://www.zigbee.org/>>. Acesso em: 18 jul. 2013a.

\_\_\_\_\_. **Zigbee Certified Products.** Disponível em: <<http://www.zigbee.org/Products/ByFunction/EnergyEfficiency.aspx>>. Acesso em: 18 jul. 2013b.

\_\_\_\_\_. **ZigBee Technology Overview.** 2009. Disponível em: <<http://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/09-5376.pdf>>. Acesso em: 31 de jul. 2013c.

**APÊNDICE A - SÍNTESE DOS REQUISITOS E PARÂMETROS**

## SÍNTESE DOS REQUISITOS FUNCIONAIS DO SISTEMA

### Rf 1) Medir o consumo de cargas elétricas dispersas em grandes áreas

#### Rf 1.1) Registrar dados dos Módulos Sensores no Módulo Gerente

**Rf 11.1** Compartilhar o registro de dados por um barramento

*Rf 111.1* Conectar Módulos Sensores ao barramento

**1111.1** Prover vias de alimentação, GND, *clock*, dados e controle

*11111.1* Proteger conexão inversa

*11111.2* Ocupar pouco espaço na placa e na caixa

**1111.2** Conectar Módulos Gerentes ao barramento

*11112.1* Proteger conexão inversa

*11112.2* Conectar cabo SATA em cabo Ethernet

**Rf 11.2** Sincronizar leituras de corrente nos Módulos Sensores

*Rf 112.1* Aguardar sinal em broadcast de sincronismo por I2C

*Rf 112.2* Alterar nível lógico da porta de saída do Sensor para “alto”

*Rf 112.3* Iniciar aquisição de dados sincronizada

**Rf 11.3** Medir campo eletromagnético induzido pelos condutores

*Rf 113.1* Concentrar o fluxo magnético induzido pelo cabo condutor

**1131.1** Envolver o cabo condutor no circuito magnético

**1131.2** Abrir e fechar o circuito magnético

*Rf 113.2* Medir fluxo eletromagnético

**1132.1** Evitar ruídos externos

**1132.2** Amplificar o sinal diferencial

**Rf 11.4** Converter a medição analógica em valor digital de 1 *byte*

*Rf 114.1* Adquirir várias amostras do sinal diferencial amplificado

*Rf 114.2* Calcular o valor RMS da corrente em um intervalo definido

**Rf 11.5** Registrar valores convertidos em memória indelével

**1151.1** Aguardar nível lógico “baixo” em entrada digital

**1151.2** Ocupar barramento I2C

**1151.3** Ler endereço de gravação no ponteiro de memória

**1151.4** Registrar valor RMS convertido no endereço lido

**1151.5** Desocupar barramento I2C

**1151.6** Alterar nível lógico de porta de saída para “baixo”

**Rf 11.6** Proteger o circuito e mecânica em invólucro

*Rf 116.1* Mecanismo para envolver cabo condutor em circuito magnético

*Rf 116.2* Acomodar o circuito eletrônico e conectores

*Rf 116.3* Proteger contra intempéries, poeira e umidade

*Rf 116.4* Conferir resistência mecânica ao conjunto

*Rf 116.5* Conferir isolamento elétrico ao conjunto

**Rf 1.2) Agrupar leituras dos Sensores e enviar ao Módulo Coordenador por radioenlace**

**Rf 12.1 Ingressar na rede miwi P2P**

*Rf 121.1* Estabelecer radioenlace com Módulo Coordenador

*Rf 121.2* Alcançar mais de 300 metros em área construída

*Rf 121.3* Enviar endereço EUI ao Módulo Coordenador

**Rf 12.2 Receber mensagens**

*Rf 122.1* Verificar a origem e destino do comando

**1221.1** Descartar a mensagem

**1221.2** Repassar a mensagem

**1221.3** Executar o comando

*Rf 122.2* Identificar comando

**1222.1** Ajustar o relógio RTC

**1222.2** Retornar a data/hora atual do RTC

**1222.3** Retornar dados

**1222.4** Retornar *ping*

**1222.5** Retornar endereço EUI

**Rf 12.3 Buscar dados na memória compartilhada**

*Rf 123.1* Buscar dados com a referência de data/hora

**1231.1** Encontrar respectiva data/hora

**1231.2** Identificar o limite da sequência de dados

**1231.3** Agrupar o vetor de dados

**1231.4** Retornar erro na ausência de dados na data/hora

**Rf 12.4 Gerenciar sincronismo de leituras dos Sensores**

- Rf 124.1* Verificar nível lógico “baixo” em entrada digital
- Rf 124.2* Aguardar interrupção por RTC
- Rf 124.3* Ocupar barramento I2C
- Rf 124.4* Verificar ponteiro da memória
- Rf 124.5* Verificar data/hora no RTC
- Rf 124.6* Marcar data/hora
- Rf 124.7* Enviar comando de leitura por barramento I2C
- Rf 124.8* Desocupar barramento I2C

**Rf 12.5 Proteger o circuito em invólucro**

- Rf 125.1* Acomodar o circuito eletrônico e conectores
- Rf 125.2* Proteger contra intempéries, poeira e umidade

**Rf 1.3) Agrupar os dados dos Gerentes em um banco de dados**

**Rf 13.1 Estabelecer radioenlace com Módulos Gerentes**

- Rf 131.1* Estabelecer conexão com a rede miwi P2P
  - 1311.1** Requisitar EUI dos Módulos Gerentes
  - 1311.2** Receber EUI dos Módulos Gerentes
- Rf 131.2* Estabelecer rotas
  - 1312.1** Calcular todas as possíveis rotas com até 3 saltos
  - 1312.2** Testar as rotas
  - 1312.3** Escolher rotas
    - 13123.1* Identificar rotas com menos saltos
    - 13123.2* Identificar rotas com menos falhas
  - 1312.4** Alternar rotas
    - 13124.1* Detectar falha
    - 13124.2* Refazer testes de rotas

**Rf 13.2 Enviar comandos para a rede sem fios**

- Rf 132.1* Estabelecer comunicação com um Gerente
- Rf 132.2* Aguardar comandos do computador por USB
- Rf 132.3* Identificar comando
  - 1323.1** Ajustar todos os relógios RTC
  - 1323.2** Ajustar o RTC de algum Módulo Gerente
  - 1323.3** Confirmar data/hora no RTC

- 1323.4 Requisitar vetor de dados dos Gerentes
- 1323.5 Exibir rotas estabelecidas
- 1323.6 Contabilizar número de falhas em 10 envios
- 1323.7 Gerar novas rotas para Gerentes

*Rf 132.4* Compor o vetor de comando

*Rf 132.5* Enviar o comando ao transceptor

### **Rf 13.3 Receber comandos pela rede sem fios**

*Rf 133.1* Verificar buffer do transceptor

*Rf 133.2* Interpretar vetor da mensagem

### **Rf 13.4 Estabelecer comunicação serial USB com o computador**

*Rf 134.1* Receber comandos do computador

1341.1 Identificar comando

1341.2 Executar comando

*Rf 134.2* Enviar mensagens ao computador

1342.1 Receber mensagens retornadas da rede miwi

1342.2 Filtrar apenas os dados

1342.3 Montar vetor com os dados

1342.4 Enviar os dados ao computador

*Rf 134.3* Enviar sinal de *status* “funcionando” ao computador

1343.1 Enviar de caractere “i”

### **Rf 13.5 Proteger o circuito em invólucro**

*Rf 135.1* Acomodar o circuito eletrônico e conectores

*Rf 135.2* Proteger contra intempéries, poeira e umidade

## PARÂMETROS DE PROJETO NO DOMÍNIO FÍSICO

### Pp 1) Rede sem fios de Sensores de corrente

#### Pp 1.1) Módulo microcontrolado Sensor de corrente ligado em barramento digital I2C

##### Pp 11.1 Memória compartilhada por barramento I2C

*Pp 111.1* Cabo e conectores com 5 vias

**1111.1** Cabo serial-ATA (SATA)

*11111.1* Conector SATA com trava contra inversão

*11111.2* Conector SMD de encaixe paralelo à placa

**1111.2** Cabo serial Ethernet

*11112.1* Conector RJ45 com trava contra inversão

*11112.2* Circuito adaptador SATA para Ethernet

*Pp 111.2* Circuito microcontrolado com barramento I2C

##### Pp 11.2 Sinal de sincronização de leituras de corrente

*Pp 112.1* Rotina que recebe sinal de *broadcast* por I2C

*Pp 112.2* Entrada digital em nível lógico “baixo”

*Pp 112.3* Rotina que inicia a aquisição de dados

##### Pp 11.3 Circuito analógico com Sensor de efeito Hall

*Pp 113.1* Núcleo ferromagnético envolvendo o cabo condutor

**1131.1** Núcleo ferromagnético composto por duas peças

**1131.2** Disposição mecânica para envolver cabo condutor

*Pp 113.2* Sensores de efeito Hall

**1132.1** Dois Sensores em configuração diferencial

**1132.2** Circuito amplificador diferencial analógico

##### Pp 11.4 Microcontrolador com conversor A/D

*Pp 114.1* Rotina de aquisição do sinal analógico

*Pp 114.2* Rotina de cálculo do valor RMS de corrente

##### Pp 11.5 Memória indelével conectada ao barramento I2C

*Pp 115.1* Entrada digital em nível lógico “baixo”

*Pp 115.2* Barramento I2C desocupado

*Pp 115.3* Memória com endereço definido para ponteiro

*Pp 115.4* Valor RMS e endereço para registro na memória

*Pp 115.5* Barramento I2C ocupado

*Pp 115.6* Nível lógico “alto” na porta de saída

### **Pp 11.6 Corpo do Módulo Sensor**

*Pp 116.1* Peça móvel com retorno por mola

*Pp 116.2* Caixa e tampa

*Pp 116.3* Película protetora sobre os componentes

*Pp 116.4* Peças feitas em plástico ABS por impressão 3D

*Pp 116.5* Peças feitas em plástico ABS por impressão 3D

## **Pp 1.2) Módulo microcontrolado Gerente em rede Miwi P2P e barramento I2C**

### **Pp 12.1 Rotina para ingressar na rede Miwi P2P**

*Pp 121.1* Porta SPI com conexão ao Transceptor

*Pp 121.2* Antena transceptora MRF24J40MB

*Pp 121.3* Endereço EUI gravado em *firmware*.

### **Pp 12.2 Rotina para detectar mensagens no *buffer* da Antena**

*Pp 122.1* Rotina para verificar a origem e destino do comando

**1352.1** Rotina para descartar a mensagem

**1352.2** Rotina para repassar uma mensagem

**1352.3** Rotina para executar comandos

*Rf 135.3* Rotina para identificar comando

**1353.1** Rotina para ajustar o relógio RTC

**1353.2** Rotina para retornar a data/hora atual do RTC

**1353.3** Retornar dados

**1353.4** Retornar *ping*

**1353.5** Retornar endereço EUI

### **Pp 12.3 Memória indelével I2C**

*Pp 123.1* Rotina de agrupamento de dados em função da hora/data

**1231.1** Rotina para localizar data/hora

**1231.2** Rotina para Identificar o limite da sequência de dados

**1231.3** Rotina para agrupar os dados em um vetor

**1231.4** Rotina para comunicar falta de dados no intervalo

**Pp 12.4 Rotina para sincronizar leituras dos Sensores**

*Pp 124.1* Rotina para verificar nível lógico “baixo” em entrada digital

*Pp 124.2* Pino de interrupção por RTC no microcontrolador

*Pp 124.3* Barramento I2C desocupado

*Pp 124.4* Ponteiro de memória com endereço para gravação

*Pp 124.5* Circuito com RTC

*Pp 124.6* Rotina para ler data/hora do RTC

*Pp 124.7* Rotina de sincronismo por broadcast no barramento I2C

*Pp 124.8* Barramento I2C Ocupado

**Pp 12.5 Caixa para proteger os circuitos e conectores**

*Pp 125.1* Caixa com suportes e parafusos e tampa de ABS

*Pp 125.2* Película protetora sobre os componentes

**Pp 1.3) Módulo microcontrolado Coordenador em rede Miwi P2P e USB**

**Pp 13.1 Rotina para ingressar na rede Miwi P2P**

*Pp 131.1* Porta SPI com conexão ao transceptor

**1311.1** Antena transceptora MRF24J40MB

**1311.2** Gerente com respectivo EUI presente na rede

*Pp 131.2* Rotina para estabelecer rotas com os Gerentes

**1312.1** Rotina para calcular possíveis rotas

**1312.2** Rotina para enviar mensagens por *unicast*

**1312.3** Rotina para escolher possíveis rotas

*13123.1* Rotina para identificar rotas com menos saltos

*13123.2* Rotina para identificar rotas estáveis

**1312.4** Rotina para alternar sequência de rotas

*13124.1* Rotina para detectar falha de comunicação

*13124.2* Rotina para reiniciar processos de testes

**Pp 13.2 Rotinas para enviar comandos por SPI ao transceptor**

*Pp 132.1* Gerente na rede com rota definida

*Pp 132.2* Componente conversor USB para UART

*Pp 132.3* Rotina para identificar o comando recebido

**1323.1** Comando “A” ajustar todos os relógios RTC

- 1323.2 Comando “B” Ajustar o RTC de algum Módulo Gerente
- 1323.3 Comando “C” para confirmar data/hora no RTC
- 1323.4 Comando “D” para requisitar dados dos Gerentes
- 1323.5 Comando “E” para exibir rotas estabelecidas
- 1323.6 Comando “F” para contabilizar falhas em 10 envios
- 1323.7 Comando “G” para gerar novas rotas para Gerentes

*Pp 132.4* Rotina para compor o vetor de comando

*Pp 132.5* Rotina para enviar o comando por SPI ao transceptor

### **Pp 13.3 Buffer de recepção no transceptor**

*Pp 133.1* Rotina que verifica nova mensagem no *buffer* do transceptor

*Pp 133.2* Rotina para interpretar o vetor da mensagem

### **Pp 13.4 Conector USB tipo B**

*Pp 134.1* Rotina que recebe comandos do computador

1341.1 Rotina que recebe mensagem retornada da rede miwi

1341.2 Rotina que filtrar apenas os dados

1341.3 Rotina que monta o vetor de dados

1341.4 Rotina que envia os dados ao computador

*Pp 134.2* Rotina que envia um vetor de dados ao computador

1342.1 Rotina para receber dados retornados da rede Miwi

1342.2 Rotina que envia vetor de dados ao computador

*Pp 134.3* Rotina para enviar caractere por porta USB

1343.1 Rotina para enviar de caractere “i”

### **Pp 13.5 Proteger o circuito em invólucro**

*Pp 135.1* Caixa protetora de plástico ABS

*Pp 135.2* Película protetora sobre os circuitos eletrônicos

**APÊNDICE B - RESUMO DA PATENTE**

## RESUMO

Patente de Invenção: “REDE DE SENSORES DE CORRENTE PARA QUADROS ELÉTRICOS EM SISTEMA DE ASSISTÊNCIA AO GERENCIAMENTO REMOTO SOB O PROTOCOLO MIWi.”

Esta patente apresenta um sistema de aquisição de dados dedicado ao monitoramento do consumo de energia elétrica em quadros de distribuição em instalações elétricas. A medição setorizada e contínua pode ser realizada por meio de elementos Sensores conectados a ramais inseridos em quadros de energia, cujos dados medidos são transferidos localmente por meio de uma rede I2C e na sequência, para um banco de dados por meio de uma rede de comunicação em RF para posterior publicação e visualização dos dados. Esta arquitetura pode ser replicada e ampliada para outros setores monitorados, mantendo o baixo custo do sistema por kW monitorado. O sistema é modular e composto por 3 camadas, na primeira camada encontram-se os Módulos Sensores que realizam as leituras de forma não-invasiva em cada ramal e transferem por uma rede I2C para o Módulo Gerente. Na segunda camada, o Módulo Gerente agrupa os dados em forma de um vetor e envia em intervalos de tempo programáveis para o Módulo de interface. Na terceira camada o Módulo Coordenador ou de interface recebe vetores de dados provenientes de vários Módulos Gerentes e repassa estes dados ao servidor de banco de dados. Ainda na terceira camada existem Módulos roteadores que servem apenas como um elo de comunicação entre os Módulos Gerentes e o Módulo Coordenador. O sistema provê métodos e algoritmos de leitura e sincronização com tempos programáveis, controle do fluxo de dados, reconhecimento de dispositivos na rede e calibração automática.