

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

EDUARDO NENOKI

**ZIGBEE – ESTUDO DA TECNOLOGIA E APLICAÇÃO NO
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

EDUARDO NENOKI

**ZIGBEE – ESTUDO DA TECNOLOGIA E APLICAÇÃO NO
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELN - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas

CURITIBA

2013

EDUARDO NENOKI

ZIGBEE – ESTUDO DA TECNOLOGIA E APLICAÇÃO NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 11 de abril de 2013, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguído pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luis Carlos Vieira
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

Prof. Dr. Décio Estevão do Nascimento
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto Foronda

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Orientador

Prof. MSc. Lincoln Herbert Teixeira

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos primeiramente à Deus, pois sem o dom da vida nada seria possível.

À minha esposa Florinda pelo incentivo, compreensão e paciência para muitas vezes suportar a ausência de seu esposo.

À minha filha Isabela pela compreensão e paciência de muitas vezes suportar a ausência de seu pai.

Ao Professor Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas pela orientação e apoio para a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. Décio Estevão do Nascimento pela orientação e revisão deste TCC.

Aos Engenheiros Marcos Vinicio Haas Rambo e Tiago Manczak pelo incentivo e apoio na aplicação prática e escolha do tema.

E finalmente a todos os professores do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, que com toda certeza contribuíram diretamente ou indiretamente para a conclusão deste trabalho através da transmissão de seus ensinamentos.

RESUMO

NENOKI, Eduardo. **ZIGBEE – Estudo da tecnologia e aplicação no sistema elétrico de potência.** 2013. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Muitos segmentos empresariais adotaram recentemente o uso de tecnologias de comunicação sem fio, até mesmo áreas de infraestruturas críticas como a da saúde e exploração de petróleo. No entanto nas concessionárias de energia ainda existe certa limitação para seu uso, talvez devido à confiabilidade que é exigida do sistema elétrico de potência e que poderá ser comprometida devido aos impulsos eletromagnéticos constantes nas subestações de energia elétrica. O presente trabalho descreve o estudo da tecnologia ZigBee e a análise dos resultados práticos de sua utilização em ambiente de subestações. O experimento prático tem como objetivo a comunicação através de uma rede sem fio utilizando a tecnologia ZigBee, entre uma Unidade de Aquisição e Controle (UAC) e uma Unidade de Comunicação e Controle (UCC), reportando os dados obtidos a um sistema de supervisão e controle (SCADA). Um ensaio prático como este é merecedor de estudos mais abrangentes, não sendo coberto em todos os detalhes por este trabalho de conclusão de curso pelo tempo e custos necessários.

Palavras-chave: Redes sem fio. ZigBee. Subestações.

ABSTRACT

NENOKI, Eduardo. ZIGBEE - Study and application of technology in the electric power system. 2013. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Many business segments have recently adopted the use of wireless communication technologies, even critical areas such as health care and oil exploration. However the power utilities still there is some limitation to their use, perhaps because of reliability that is required of the electric power system and may be compromised due to electromagnetic impulses contained in electric power substations. This work describes the study of ZigBee technology and the analysis of the practical results of its use in substation environment. The practical experiment aims to wireless communication using ZigBee technology, from a data acquisition unit (UAC) and a unit of communication and control (UCC), reporting the data to a Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA). A practical test like this is deserving of more comprehensive studies, not being covered in all details for this work of completion by the time and cost required.

Key words: Wireless. ZigBee. Substations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede Infra-estruturada ou Cliente-servidor	16
Figura 2 - Rede sem fio na topologia ad-hoc.....	17
Figura 3 - Taxa de Transferência x Alcance.....	20
Figura 4 - Arquitetura da pilha ZigBee	22
Figura 5 - Modelo de rede ZigBee	27
Figura 6 - Topologia de rede ZigBee.....	28

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APL	Camada de Aplicação
APS	Application Support Sublayer
AES	Advanced Encryption Standard
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CCA	Clear Channel Assessment
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DNP	Distributed Network Protocol
DCE	Equipamento de Comunicação de Dados
ETD	Equipamento Terminal de Dados
ED	Energy Detection
EMI	Interferência Eletromagnética
FFD	Full Function Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHM	Interface Homem Máquina
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Standard Organization
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control
MCSF/DD	Módulo Conversor de Dados Sem Fio - Bidirecional
NIC	Network Interface Card
NWK	Network Layer
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnection
PAN ID	Personal Area Network IDentification
PHY	Camada Física

RF	Rádio Frequência
RFD	Reduced Function Device
SAP	Ponto de Acesso de Serviço
SASE	Sistema de Automação de Subestações
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SE	Subestação
UAC	Unidade de Aquisição e Controle
UCC	Unidade de Comunicação e Controle
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZDO	ZigBee Device Object

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMA	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 REDES SEM FIO	14
2.1.1 Padronização das redes sem fio - IEEE 802.11	14
2.1.2 Topologia das redes sem fio	16
2.1.2.1 Infra estruturada ou Cliente - Servidor	16
2.1.2.2 AD - HOC.....	17
2.1.3 O Protocolo CSMA/CA.....	17
2.1.4 A Interface por Meio Aéreo.....	18
2.2 IEEE 802.15.4 - PARTE 15.4: (LOW RATE WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS - LR-WPANS).....	18
2.3 TECNOLOGIA ZIGBEE	19
2.3.1 ZIGBEE ALLIANCE.....	20
2.3.2 A Arquitetura da Pilha ZIGBEE (ZIGBEE STACK).....	21
2.3.2.1 A Camada Física (PHY)	22
2.3.2.2 A Camada de Controle de Acesso de Mídia (MAC).....	24
2.3.2.3 A Camada de Rede (NWK)	24
2.3.2.4 A Camada de Aplicação (APL)	25
2.4 COMPONENTES DE REDE.....	26
2.4.1 Tipos de Dispositivo	26
2.4.2 Funções Lógicas dos Dispositivos.....	26
2.4.3 Topologia de Redes	28
2.5 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP)	28
2.5.1 Subestação	29
2.6 DISTÚRBIOS ELÉTRICOS	30
2.6.1 Interferência Eletromagnética (EMI).....	30

2.6.2 Chaveamento do Sistema Elétrico de Potência	30
2.6.3 Acoplamento do Sistema Elétrico	31
2.6.4 Efeito Corona.....	31
3 APLICAÇÃO PRÁTICA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	33
3.1 O PROTOCOLO DNP VERSÃO 3.0	33
3.1.1 Padrão RS232	34
3.2 O ENSAIO DOS RÁDIOS ZIGBEE	35
3.2.1 Equipamentos	35
3.2.2 Configuração dos equipamentos	38
4 RESULTADOS	39
4.1 RELATÓRIOS	40
5 CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A utilização de redes sem fios na automação industrial para transmissão de dados ou monitoramento tem potenciais benefícios se comparada às redes convencionais (com fios), incluindo conveniência de implantação, facilidade de reconfiguração e redução de custos.

Muitos segmentos empresariais adotaram recentemente o uso de tecnologias sem fio, até mesmo áreas críticas como a da saúde e exploração de petróleo. No entanto nas concessionárias de energia ainda existe certa limitação ao seu uso, talvez devido à confiabilidade que é exigida do Sistema Elétrico de Potência (SEP) e que poderá ser comprometida devido às interferências eletromagnéticas constantes em subestações de transmissão de energia elétrica. As subestações com a presença de transformadores, disjuntores, seccionadoras, isoladores, banco de capacitores, reguladores de tensão, dentre outros equipamentos, esta sujeita a um campo eletromagnético intenso, bem como ao efeito corona, fenômeno que está presente nas linhas de transmissão com tensões iguais ou maiores do que 230 kV. Nas manobras realizadas na subestação existe a abertura de arco voltaicos de grande intensidade que geram impulsos eletromagnéticos de grande magnitude, realmente prejudiciais à comunicação *wireless* (sem fio).

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo da tecnologia ZigBee e analisar os resultados práticos de sua utilização em ambiente de subestação de transmissão de energia elétrica. O SEP é constituído de três segmentos distintos: geração, transmissão e distribuição. A tecnologia ZigBee pode ser encontrada em uso na distribuição, sendo utilizada para realizar medição do consumo de “grandes clientes”, facilitando o serviço do funcionário da concessionária que com um equipamento simples realiza medição de forma rápida e precisa.

1.1 PROBLEMA

O uso da comunicação sem fios em ambiente de subestação de transmissão de energia elétrica esbarra na confiabilidade que é exigida do SEP. As empresas de energia com instalações de geração e transmissão são fiscalizadas e regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e também são coordenadas e controladas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) seguindo normas rígidas de supervisão e controle.

O estudo de todas as tecnologias *wireless* existentes atualmente seria demasiado extenso e de custo bastante elevado, então este trabalho tem foco no estudo do padrão ZigBee. Aplicações da tecnologia ZigBee serão abordadas e analisadas, quanto a sua aplicação no SEP.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente na subestação de transmissão de energia elétrica a comunicação de dados entre os equipamentos e o sistema de supervisão tem como meio a fibra óptica, o par metálico não é indicado devido ao campo eletromagnético intenso neste tipo de ambiente. No entanto para a passagem dessas fibras ópticas se faz necessário abrir canaletas com tampas pesadas de aproximadamente setenta quilos em área de risco. A utilização viável de uma tecnologia *wireless* eficiente traria economia de tempo e dinheiro.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a aplicação da tecnologia *wireless* ZigBee em ambiente de subestação de transmissão de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar a tecnologia ZigBee e suas aplicações.
- Estudar o efeito dos ruídos impulsivos no ZigBee.
- Aplicar o padrão ZigBee em aplicação prática dentro de uma subestação de transmissão de energia elétrica.
- Apresentar e avaliar os resultados teóricos e práticos do estudo de caso e da experiência.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho terá na pesquisa aplicada a base para adquirir os conhecimentos necessários para a aplicação prática e solução do problema proposto. O procedimento técnico inicialmente adotado será a pesquisa bibliográfica, buscando informações e dados disponíveis em livros, teses, artigos e internet, recuperando o conhecimento científico acumulado sobre o tema abordado.

Após a pesquisa, serão consultados profissionais ligados ao SEP, que com vasta e comprovada experiência contribuirão para o estudo da tecnologia.

O procedimento seguinte será a aplicação prática em ambiente de subestação de energia, através de equipamentos de comunicação sem fio que façam uso da tecnologia ZigBee. Estes ensaios proporcionarão o levantamento de dados para a análise e conclusão da pesquisa. Através de relatórios e gráficos serão demonstrados a funcionalidade e resultados obtidos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de diplomação divide-se em cinco capítulos. O Capítulo 1 identifica e caracteriza o tema do trabalho, delineando os objetivos e o plano de ação básico. No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do trabalho, incluindo os fundamentos sobre redes sem fio e o estudo da tecnologia ZigBee.

A descrição formal da aplicação prática, implementação dos ensaios e a descrição de suas características são apresentados no Capítulo 3. Os resultados obtidos são expostos e analisados no Capítulo 4. Por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 5, seguidas de sugestões para futuros aperfeiçoamentos do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata dos principais tópicos teóricos necessários para o desenvolvimento e compreensão deste trabalho. Estes tópicos, porém, são tratados de maneira objetiva, sem que o assunto seja esgotado. Para uma abordagem mais completa de cada assunto, o leitor deverá consultar as respectivas referências bibliográficas.

2.1 REDES SEM FIO

O termo *wireless*, que em nosso idioma significa sem fio, possui alguns sinônimos tais como: comunicação sem fio, computação móvel e rede de computadores sem fio. A comunicação sem fio baseia-se no estabelecimento da comunicação por meio do ar, utilizando como meio de transporte o espaço. Redes sem fio transmitem e recebem dados sobre o ar, combinando conectividade de equipamentos e mobilidade do usuário. Como meio de transmissão, as redes sem fio utilizam as seguintes tecnologias: *spread spectrum* (rádio), infravermelho ou micro-onda (MENDES, 2007).

A rede sem fio que utiliza infravermelho fica confinada a uma simples sala, pois a luz infravermelha não ultrapassa paredes. Um sistema de espalhamento espectral, *spread spectrum* é aquele onde uma faixa mais ampla de banda de frequências é utilizada para transmitir um sinal, quando comparada à faixa mínima requerida para transmitir as informações desejadas. As redes que fazem uso das tecnologias *spread spectrum* e micro-onda utilizam o rádio para a transmissão de dados, geralmente as redes *spread spectrum* alcançam distâncias maiores e atuam em frequências mais baixas quando comparadas com as redes que utilizam micro-onda (MENDES, 2007).

2.1.1 Padronização das redes sem fio - IEEE 802.11

Além de garantir a interoperabilidade, a padronização também permite economia na produção em escala e conseqüentemente componentes com preços mais baixos. Por exemplo, redes locais sem fio (Wireless Local Area Networks - WLANs), normalmente operam em faixas espectrais não licenciadas, portanto não são obrigados a seguir um padrão específico. As primeiras gerações de redes sem fio não foram padronizadas e componentes especializados foram necessários para muitos sistemas, tornando os custos excessivamente elevados, quando

combinados com um fraco desempenho, levando a uma baixa aceitação. Esta experiência resultou em um forte impulso para padronizar a próxima geração de WLANs, que produziu os bem sucedidos padrões da família IEEE 802.11 (GOLDSMITH, 2005).

O Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) é uma organização da qual participam profissionais do mundo todo. Além de organizar conferências e publicar periódicos especializados, o IEEE inclui grupos de padronização nas áreas de Engenharia Elétrica, Eletrônica e Informática, responsáveis por desenvolver padrões para tecnologias emergentes. Coube ao IEEE à elaboração da família de especificações do padrão 802.11 a fim de garantir a conectividade e interoperabilidade entre os equipamentos de redes sem fio (MENDES, 2007).

Dentre as recomendações da série IEEE 802.11, estão os exemplos mais conhecidos para os padrões de redes sem fio e que nos permitem considerar a existência de quatro grandes grupos (PINHEIRO, 2004):

Wireless Personal Area Network (WPAN) – Neste grupo estão tecnologias sem fio de pequeno alcance (entre 10 e 100 metros). É um padrão para redes locais, definido pelo IEEE 802.15, para o endereçamento de redes sem fio que utilizam dispositivos portáteis ou móveis tais como PC's, PDA's, periféricos, celulares, pager's, etc.

Wireless Local Area Network (WLAN) – Neste grupo estão tecnologias sem fio destinadas à interligação de redes locais com alcance entre 100 e 300 metros. Trata-se de padrão implementado como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional (par metálico ou fibra óptica);

Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) - Neste grupo temos as tecnologias que tratam dos acessos de banda larga para última milha para redes em áreas metropolitanas, com alcance em torno de 6km;

Wireless Wide Area Network (WWAN) – Neste grupo estão as tecnologias voltadas para redes de longa distância em telecomunicações, atendendo aos serviços de voz e alguns serviços de dados.

O uso de tecnologias sem fio para LANs e PANs elimina a necessidade de se usar as tecnologias de rede de longa distância sem fio que são caras, como a CDMA, e GSM para

conexão em rede sem fio de curta distância. Algumas tecnologias de conexão em rede sem fio de curto a médio alcance são Bluetooth, ZigBee e HomeRF (SHARMA, 2001).

2.1.2 Topologia das redes sem fio

As redes 802.11 podem apresentar fisicamente duas topologias, sendo a cliente-servidor (infra estruturada) e a AD-HOC (MENDES, 2007).

2.1.2.1 Infra estruturada ou Cliente - Servidor

Uma característica da topologia de rede cliente-servidor é a existência de dois tipos de elementos: as estações móveis (*notebook, palm top*) e os pontos de acesso (*switch, HUBs*). Cada ponto de acesso é responsável pela conexão das estações móveis de uma área de cobertura, com a rede cabeada. Os pontos de acesso desempenham tarefas importantes na coordenação das estações móveis: aceita ou não a inserção de uma nova estação à rede, colhe estatísticas para melhor gerenciamento do canal e ajuda a definir quando uma estação deve ou não ser controlada por um ponto de acesso. Nesta topologia todo tráfego da rede passa pelo ponto de acesso sem fio. A topologia está ilustrada na figura 1 (MENDES, 2007).

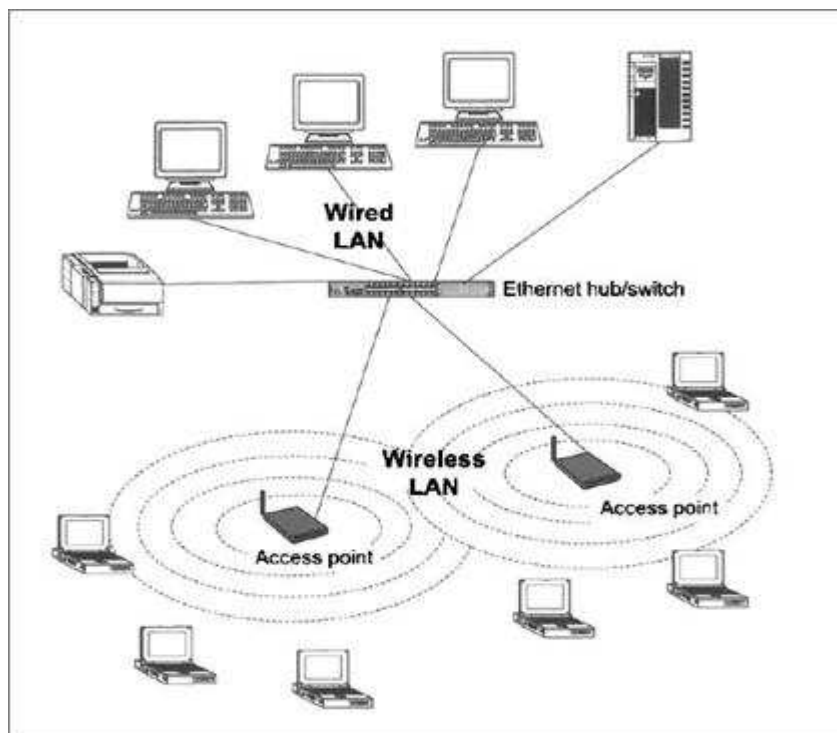


Figura 1 - Rede Infra-estruturada ou Cliente-servidor
Fonte: Fernandes (2012).

2.1.2.2 AD-HOC

A topologia de rede AD-HOC caracteriza-se por formar redes simples, onde as comunicações são estabelecidas entre múltiplas estações em certa área de cobertura, sem o uso de um ponto de acesso ao servidor. O padrão especifica os critérios que cada estação deve observar, de modo que todos tenham acesso ao meio sem fio. Os computadores trocam dados diretamente entre-si. A topologia está ilustrada na figura 2 (MENDES, 2007).

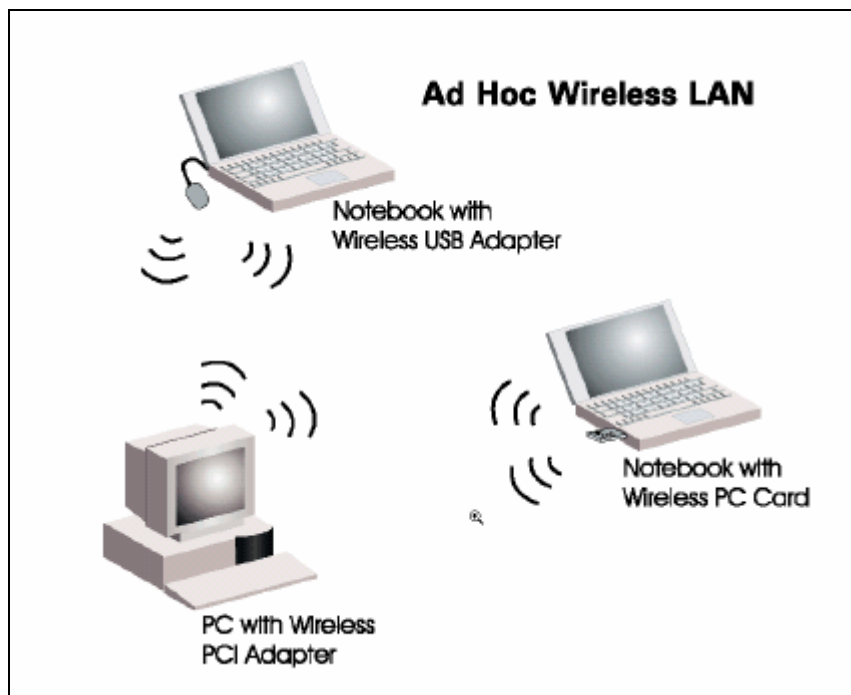


Figura 2 - Rede sem fio na topologia ad-hoc
Fonte: Martins (2011).

2.1.3 O Protocolo CSMA/CA

Segundo Mendes (2007), assim como no padrão IEEE 802.3 (*ethernet*), o padrão IEEE 802.11 (*wireless*) também possui um protocolo no nível de controle de acesso de mídia, (Media Access Control - MAC), para o controle da transmissão, conhecido como Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA). O protocolo CSMA/CA proporciona o acesso a um meio, compartilhado por várias estações reduzindo a probabilidade de colisões. É o padrão de acesso ao meio predominante hoje, sendo utilizado tanto por redes com fio e sem fio.

Segundo Geier (2004), o CSMA/CA permite o compartilhamento de um meio comum, permitindo que apenas uma estação através de um controlador de interface de rede (Network

Interface Card - NIC), transmita informações em um momento em particular. Isto é semelhante a uma reunião, onde as pessoas (como NICs) falam apenas quando ninguém estiver falando. Se mais de uma pessoa fala ao mesmo tempo, ocorre uma colisão, e cada pessoa precisará se revezar em repetir o que disse. O CSMA/CA implementa um protocolo de ouvir antes de falar para regular o acesso distribuído ao meio comum. Cada NIC sem fios terá a capacidade de detectar as transmissões de outros dispositivos (GEIER, 2004).

2.1.4 A Interface por Meio Aéreo

A interface por meio aéreo ocorre da seguinte forma: após o usuário instruir o computador para enviar informações sobre a rede sem fio, o equipamento negocia uma conexão com o computador remoto, que envolve o uso de funções da camada de transporte e de sessão. Depois de estabelecer uma ligação, o computador fornece os dados sob a forma digital para a placa de rede sem fios. O NIC sem fio geralmente envia um quadro contendo a informação de que está em conformidade com uma norma específica, tais como IEEE 802.11, para a placa de rede *wireless* localizada dentro do dispositivo de computador remoto ou ponto de acesso. A placa de rede *wireless* converte os dados para uma frequência de rádio analógico ou sinal de onda de luz antes da transmissão através da antena. Esta conversão requer a modulação, que envolve a conversão do sinal de digital para analógico. Depois da modulação, o sinal se propaga através do meio de ar para o NIC de recepção sem fios, que demodula e processa o sinal recebido antes de enviar os dados para as camadas de rede superiores (GEIER, 2004).

2.2 IEEE 802.15.4 - PARTE 15.4: (LOW RATE WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS - LR-WPANS)

O padrão IEEE 802.15.4 define o protocolo e a compatibilidade de interconexão para equipamentos de comunicação de dados em redes sem fio de área pessoal (WPAN) que utilizam baixa taxa de dados, baixa potência e transmissões de rádio frequência (RF) de curto alcance e baixa complexidade. Esta norma define a camada física (PHY) e a especificação da subcamada MAC em redes LR-WPAN (IEEE, 2011).

2.3 TECNOLOGIA ZIGBEE

Atualmente dentre as redes LR-WPAN existentes a mais recente e promissora é a que usa a tecnologia ZigBee IEEE 802.15.4. A tecnologia de rádio ZigBee é projetada para reduzir custos e consumo de energia assim como o Bluetooth. A sua especificação é baseada no padrão IEEE 802.15.4. O ZigBee permite comunicações robustas e opera na frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), sendo na Europa de 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) nos Estados Unidos e 2,4 GHz (16 canais) em outras partes do mundo, e não requerem licença para funcionamento, então pode ser usado em todo o mundo, sem quaisquer problemas de licenciamento. As Redes ZigBee oferecem uma excelente imunidade contra interferências, e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos numa rede (mais que 65.000), com taxas de transferências de dados variando entre 20kbps a 250kbps. Estas taxas de dados são mais lentas que o Bluetooth, mas em troca o rádio consome significativamente menos energia com uma gama maior de transmissão. O objetivo do ZigBee é fornecer operação de rádio durante meses ou anos sem necessidade de recarga, visando assim aplicações, tais como redes de sensores e etiquetas de inventário (GOLDSMITH, 2005).

Uma curiosidade sobre o ZigBee é o nome dado à tecnologia que foi tirado da dança que as abelhas fazem para comunicar informações sobre fontes de alimento recém-descobertos a outros membros da colônia (GOLDSMITH, 2005).

Nos dias de hoje existem diversas tecnologias de comunicação sem fio (WiMax, Wi-Fi, Bluetooth, WLAN.802.11.b/g) com capacidade de atingir médias e altas taxas de transmissão de dados em aplicações de voz, vídeo e redes de computadores. Dentre as tecnologias com baixa taxa de transmissão de dados e curto alcance encontra-se o ZigBee (OLIVEIRA FILHO, 2010).

O quadro 1 apresenta um comparativo entre as tecnologias sem fio: Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee. Na figura 3 está ilustrada a posição da tecnologia ZigBee quanto às taxas de transferência e alcance.

Característica	Wi-Fi 802.11b/g	Bluetooth	ZigBee
Frequência	2,4 GHz	2,4 GHz	868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz
Quantidade de Dispositivos	32	7	65000
Taxa de Transferência	11/54 Mbps	1/3 Mbps	250 kbps
Rádio			
Alcance	~100 m	~100 m	~240 – 3200 m (100 mW)
Latência	~3 s	~10 s	~30 ms
Segurança	Authentication Service Set ID (SSID) (WEP/WPA)	64-bit, 128-bit	128-bit AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>)
Topologia de Rede	<i>Point-to-Multipoint</i>	Ad hoc piconets	<i>Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Mesh</i>

Quadro 1 – Comparativo de algumas tecnologias sem fio

Fonte: Oliveira Filho (2010).

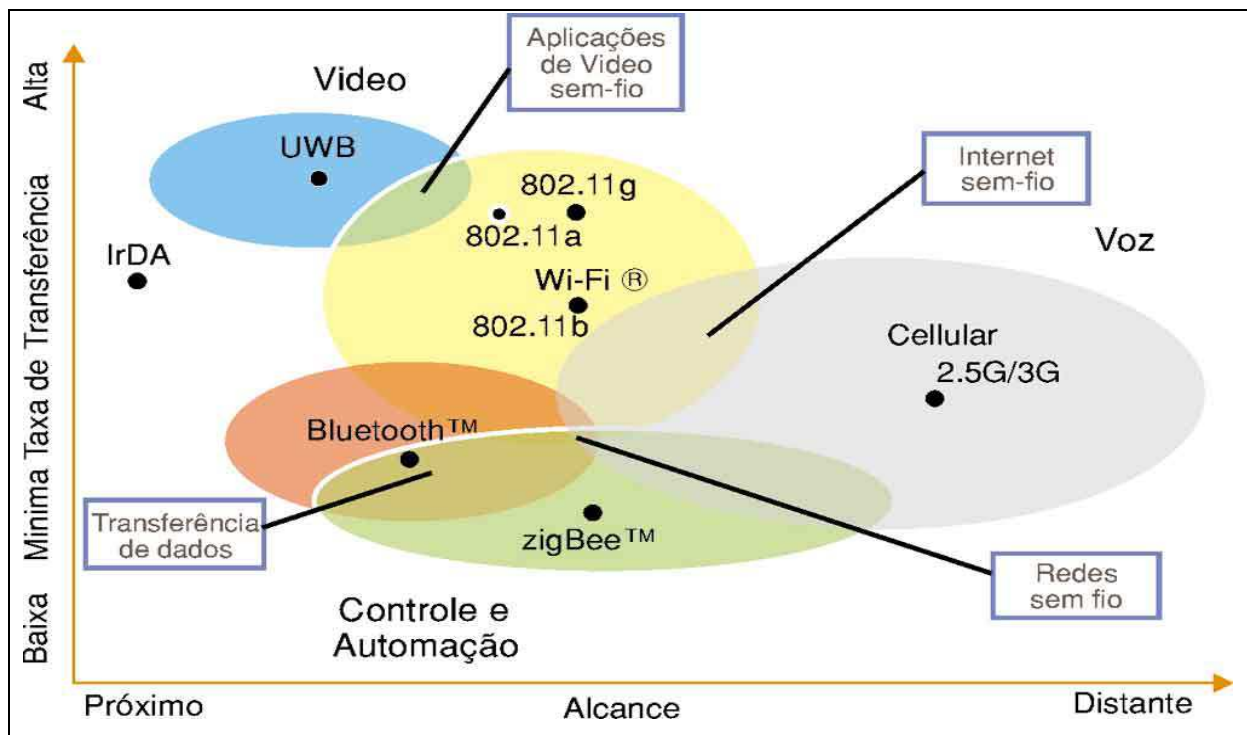


Figura 3 – Taxa de Transferência x Alcance

Fonte: Oliveira Filho (2010).

2.3.1 ZIGBEE ALLIANCE

Fundada em 2002, a ZigBee Alliance é quem desenvolve o padrão ZigBee junto ao IEEE, é uma associação de várias empresas, universidades e agências governamentais de todo o mundo que juntas, trabalham em conjunto para proporcionar e desenvolver tecnologias para criar um padrão de baixo consumo de energia, baixo custo, segurança, confiabilidade,

interoperabilidade e com funcionamento em rede sem fios baseado em uma norma aberta global (ZIGBEE ALLIANCE, 2013).

A especificação ZigBee desenvolvida pela Alliance melhora o padrão IEEE 802.15.4, adicionando camadas de rede e de segurança e uma estrutura de aplicativo. Com base neste fundamento, as normas podem ser usadas para criar multi-soluções interoperáveis. Para aplicações personalizadas em que a interoperabilidade não é necessária, os fabricantes podem criar suas próprias normas específicas (ZIGBEE ALLIANCE, 2013).

Algumas das características do ZigBee incluem (ZIGBEE ALLIANCE, 2013):

- Operação global na faixa de frequência de 2,4 GHz de acordo com o IEEE 802.15.4
- Operação regional na faixa de frequência de 915MHz (Américas) e 868MHz (Europa)
- Opera com mais de 16 canais na frequência de 2,4 GHz
- Incorpora mecanismos de economia de energia para todas as classes de dispositivos, além de suporte para dispositivos sem bateria (autoalimentados)
- Mecanismo de descoberta com confirmação plena na aplicação
- Mecanismo de emparelhamento com confirmação plena na aplicação
- Topologia em estrela múltipla e comunicação em redes PAN
- Várias opções de transmissão, incluindo o *broadcast*
- Mecanismo de geração de chaves de segurança
- Utiliza o padrão industrial de esquema de segurança AES-128
- Suporta padrões da Alliance ou inovações específicas do fabricante

2.3.2 Arquitetura da Pilha ZIGBEE (ZIGBEE STACK)

Segundo Oliveira Filho (2010), a pilha ZigBee, conforme a figura 4, tem como objetivo implementar as camadas do modelo ISO (International Standard Organization's) / OSI (Open System Interconnection) para uma rede sem fios de área pessoal de baixo tráfego de dados (LR-WPAN).

A norma IEEE 802.15.4-2003 define as duas camadas inferiores: a camada física (PHY) e a subcamada de controle de acesso de mídia (MAC). A ZigBee Alliance constrói

sobre essa base, fornecendo a camada de rede (Network Layer - NWK) e o quadro para a camada de aplicação. O quadro da camada de aplicação consiste na subcamada de apoio de aplicação (Application Support Sublayer - APS) e nos objetos dispositivos ZigBee (ZigBee Device Object - ZDO) (ZIGBEE ALLIANCE, 2007).

A arquitetura de pilha ZigBee é constituída de um conjunto de blocos, chamados de camadas. Cada camada executa um conjunto específico de serviços para a camada acima. Uma entidade de dados fornece um serviço de transmissão de dados e uma entidade de gerenciamento fornece todos os outros serviços. Cada entidade de serviço fornece uma interface para a camada superior por meio de um ponto de acesso de serviço (SAP), e cada SAP suporta um número de primitivas de serviço para alcançar a funcionalidade necessária (ZIGBEE ALLIANCE, 2007).

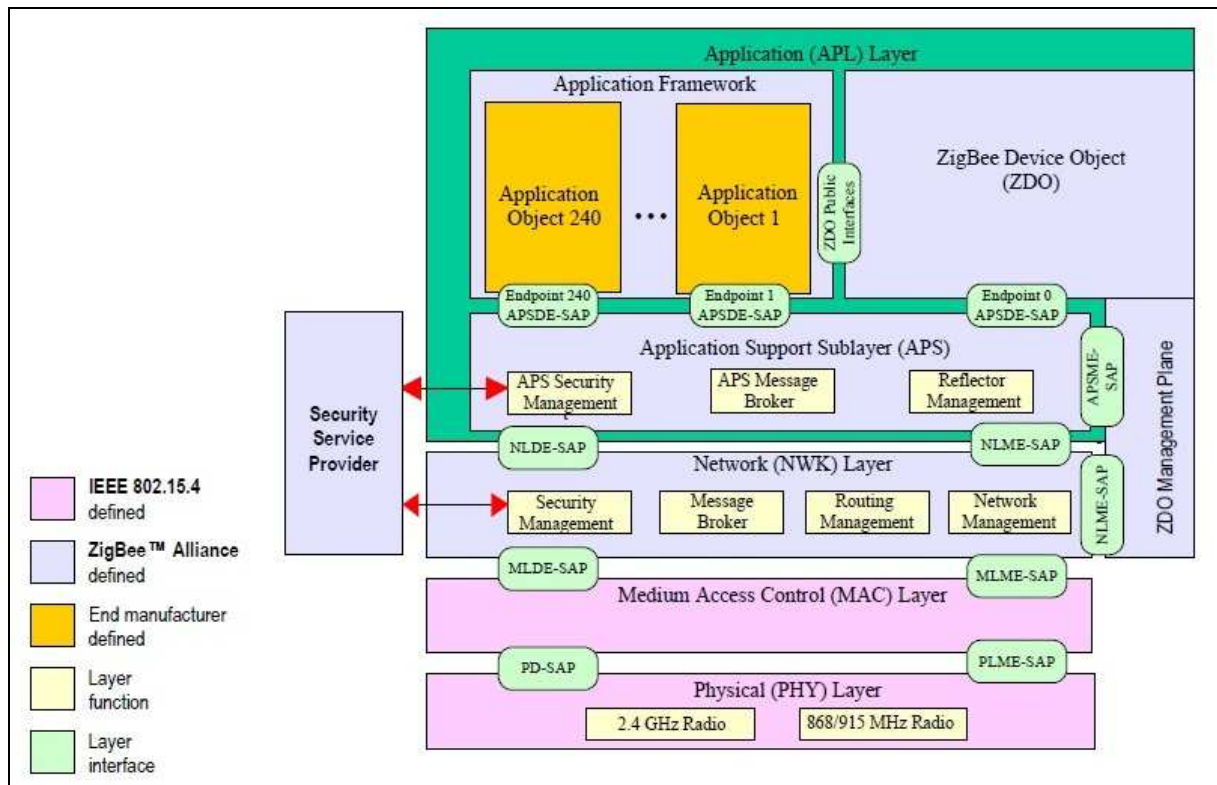


Figura 4 – Arquitetura da pilha ZigBee

Fonte: ZigBee Alliance (2007).

2.3.2.1 A Camada Física (PHY)

A camada PHY oferece a interface com o meio físico onde as comunicações realmente ocorrem. A camada PHY é a menor camada do modelo ISO / OSI (GUTIÉRREZ, 2007).

A camada PHY é responsável pelas seguintes tarefas (IEEE, 2011):

- Ativação e desativação do transmissor/receptor de rádio (*transceiver*);
- Detecção de energia (Energy Detection - ED) dentro do canal atual;
- Indicação de qualidade do *link* (Link Quality Indication - LQI) para os pacotes recebidos;
- Avaliação de canal livre (Clear Channel Assessment - CCA) para o (CSMA-CA);
- Seleção da frequência do canal;
- Transmissão e recepção do pacote de mensagem de dados.

A norma IEEE 802.15.4-2003 tem duas camadas PHY que operam em duas faixas de frequências separadas: 868/915 MHz e 2.4 GHz. A camada PHY de menor frequência abrange tanto a banda de 868 MHz, utilizada na Europa, quanto a de 915 MHz, utilizada em países como os Estados Unidos e Austrália. A camada PHY de maior frequência é usada em todo o mundo. Para cada frequência um número de canais é disponibilizado: 2.4 GHz (16 canais) / 915 MHz (10 canais) / 868 MHz (1 canal) (ZIGBEE ALLIANCE, 2007).

Segundo Gutiérrez (2007), no padrão ZigBee o rádio é utilizado com modulação por Espalhamento Espectral por Sequência Direta (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS). O uso da técnica de transmissão DSSS permite que os equipamentos sejam simples, possibilitando implementações mais baratas. Nesta técnica, um sistema DSSS espalha os dados transmitidos através de uma banda ampla, multiplicando os dados por meio de um código de espalhamento. Isso permite que o sistema DSSS forneça imunidade ao ruído, bem como aos sinais de interferência. Utiliza-se modulação Bynary Phase Shift Keying (BPSK) nas duas bandas menores de frequências (868 MHz e 915 MHz) e Offset Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) ortogonal na banda de 2.4 GHz.

De acordo com Gutiérrez (2007), a modulação por chaveamento de fase a fase (Phase shift keying - PSK) é o chaveamento do sinal entre dois ou quatro estados diferentes para representar uns e zeros na sequência de dados. Quando a modulação PSK utiliza dois estados de fase é denominada modulação por chaveamento de fase binária (Binary phase shift keying - BPSK). Já quando a modulação PSK utiliza quatro estados de fase é denominada modulação por chaveamento de fase em quadratura (Quadrature phase shift keying - QPSK).

Na tabela 1 são apresentadas as bandas de frequências, os números de canais e as modulações utilizadas na camada PHY.

Frequência	Banda da Frequência	Canais	Taxa de bit	Parâmetros Spreading DSSS
				Modulação
868 MHz	868 – 868.6 MHz	1	20 kb/s	BPSK
915 MHz	902 – 928 MHz	10	40 kb/s	BPSK
2.4 GHz	2.4 – 2.4835 GHz	16	250 kb/s	O-QPSK

Tabela 1 – IEEE 802.15.4 banda de frequência e parâmetros da modulação
Fonte: Gutiérrez (2007).

2.3.2.2 A Camada de Controle de Acesso de Mídia (MAC)

Segundo Gutiérrez (2007), a subcamada MAC, em conjunto com a subcamada *Logical Link Control (LLC)*, compreende a camada de enlace de dados (também chamada de camada 2) do modelo ISO / OSI. A camada MAC fornece controle de acesso a um canal compartilhado e oferece uma entrega de dados confiável. No caso de WPANs, a otimização do uso dos meios de comunicação sem fio é vital, pois operam em bandas não licenciadas restritas, compartilhadas por várias outras tecnologias sem fio, incluindo as WLANs. A norma IEEE 802.15.4 usa um algoritmo (CSMA-CA), que exige ouvir o canal antes de iniciar a transmissão para evitar colisões com outras transmissões em curso (uma espécie de etiqueta do *wireless*). Suas responsabilidades também podem incluir a transmissão de quadros de sinalização e sincronização, proporcionando um mecanismo de transmissão confiável.

De acordo com Gutiérrez (2007), a subcamada MAC da norma IEEE 802.15.4 tem várias funções, tais como: acesso ao canal, geração de quadros de confirmação, de validação, de associação, de dissociação, controle de segurança e gerenciamento de farol (*beacon*). A subcamada MAC foi projetada para permitir a implementação de uma pilha de protocolos muito simples, facilitando o desenvolvimento rápido de aplicações que impactam diretamente na melhoria do consumo de energia.

2.3.2.3 A Camada de Rede (NWK)

Segundo Oliveira Filho (2010), a camada de rede (NWK) manipula os endereços de rede e o roteamento dos pacotes chamando as rotinas da camada MAC. As responsabilidades da camada NWK ZigBee incluem (OLIVEIRA FILHO, 2010):

- Iniciar uma rede: A capacidade de estabelecer com sucesso uma nova rede.
- Aderir e abandonar uma rede: A capacidade de ganhar a adesão (junção) ou renunciar membros (sair) de uma rede.

- Configurar um novo dispositivo: A capacidade de configurar a pilha suficientemente para operação conforme necessário.
- Endereçamento: A capacidade de um coordenador ZigBee para atribuir endereços para os dispositivos de ligação à rede.
- Sincronização dentro de uma rede: A capacidade de conseguir sincronização entre os dispositivos através de faróis (*beacons*) de varredura ou por votação.
- Segurança: Aplicação de segurança para os quadros de saída e de remoção dos quadros finalizados.
- Roteamento: Roteamento dos quadros para seus destinos.

De acordo com Oliveira Filho (2010), a camada NWK foi projetada para permitir que a rede tenha um crescimento espacial sem a necessidade de transmissores de alta potência, além de poder manipular grande quantidade de nós com baixa latência. A adição de um roteador entre os nós de interesse aumenta o alcance da comunicação sem a necessidade de grandes antenas e alta potência de transmissão.

2.3.2.4 A Camada de Aplicação (APL)

Segundo Kinney (2003), a camada de aplicação ZigBee consiste da subcamada Application Support (APS), do ZigBee Device Object (ZDO) e dos objetos de aplicação definidos pelo fabricante (Application Framework). As responsabilidades da subcamada APS incluem manutenção de tabelas para efetuar o *binding*, que é a capacidade de combinar dois dispositivos baseados em seus serviços, nas suas necessidades, e no encaminhamento de mensagens entre os dispositivos ligados. Outra responsabilidade da subcamada APS é a *discovery*, que é a capacidade para determinar quais são os outros dispositivos que estão operando no espaço operacional pessoal de um dispositivo. As responsabilidades do ZDO incluem a definição da função do dispositivo dentro da rede (por exemplo, ZigBee coordenador ou dispositivo final), iniciar e/ou responder a pedidos de ligação e estabelecer uma relação segura entre dispositivos de rede selecionando um dos métodos ZigBee de segurança, tais como chave pública, chave simétrica, etc. Os objetos de aplicação definidos pelo fabricante implementam as aplicações reais de acordo com as descrições de aplicativos definidos para o ZigBee.

2.4 COMPONENTES DE REDE

Uma rede padrão IEEE 802.15.4 é composta de exatamente um coordenador central de rede especializado, chamado de PAN *coordinator*. Somente o PAN *coordinator* pode estabelecer uma nova rede e definir sua estrutura e modo de operação. Outros dispositivos precisam de permissão do PAN *coordinator* para juntar-se a rede. Uma rede 802.15.4 consiste de um PAN *coordinator* e ao menos um dispositivo de rede (GUTIÉRREZ, 2007).

2.4.1 Tipos de Dispositivos

Segundo o IEEE (2011), na norma IEEE 802.15.4 são definidos para as redes ZigBee dois tipos de dispositivos: os de função completa (Full Function Device - FFD) e os de função reduzida (Reduced Function Device - RFD). Os dispositivos FFD são aqueles aptos a funcionarem em qualquer um dos modos de operação do padrão, coordenador, roteador ou dispositivo final. Podem se comunicar tanto com outros FFD quanto com dispositivos RFD. Já os dispositivos RFD somente se comunicam com dispositivos FFD. Dessa forma fica claro que os dispositivos RFD poderão atuar apenas como *end-pointings* da rede. São dispositivos mais simples e de menor custo, que são implementados com o mínimo de recursos e capacidade de memória.

2.4.2 Funções Lógicas dos Dispositivos

De acordo com Kinney (2003), a disponibilidade de funções do dispositivo (FFD ou RFD) e sua posição na rede classificam os nós como: coordenadores, roteadores ou dispositivos finais.

Coordenador: é o nó inicial da rede. Um dispositivo ao ser ligado pela primeira vez como coordenador iniciará sua rede selecionando um identificador PAN único no seu raio de influência. Na inicialização, todos os canais da frequência de operação são escaneados até esse PAN ID único ser encontrado. O coordenador opera em estado ativo para efetuar o controle da rede e costuma ser alimentado diretamente reduzindo o risco de falha no nó centralizador da rede.

Roteador: são usados em topologias em malha (*mesh*) e *cluster* para dar maior robustez à rede. Eles possuem tabelas de roteamento e, por serem FFD, permitem encontrar o menor caminho para se chegar ao destino. Caso o roteador não possua o endereço de destino requisitado, este fará o *broadcast* de uma requisição de rota (*route request*) e receberá do destino à rota mais eficaz atualizando sua tabela. Este mecanismo dá à rede a característica de auto regeneração caso ocorra à queda das funcionalidades de outros nós roteadores na rede.

Dispositivo final: são os nós folhas das topologias estrelas e cluster. Como são dispositivos RFD, não fazem função de roteamento nem coordenam a rede. Eles se comunicam diretamente com o roteador pai e podem ser implementados com microcontroladores ainda menores (em termos de memória e potência) passando quase todo o tempo em estado inativo. Um dispositivo RFD é a comum localização de sensores, atuadores e sistemas de controle.

Na figura 5 estão ilustrados os componentes do modelo de rede ZigBee.

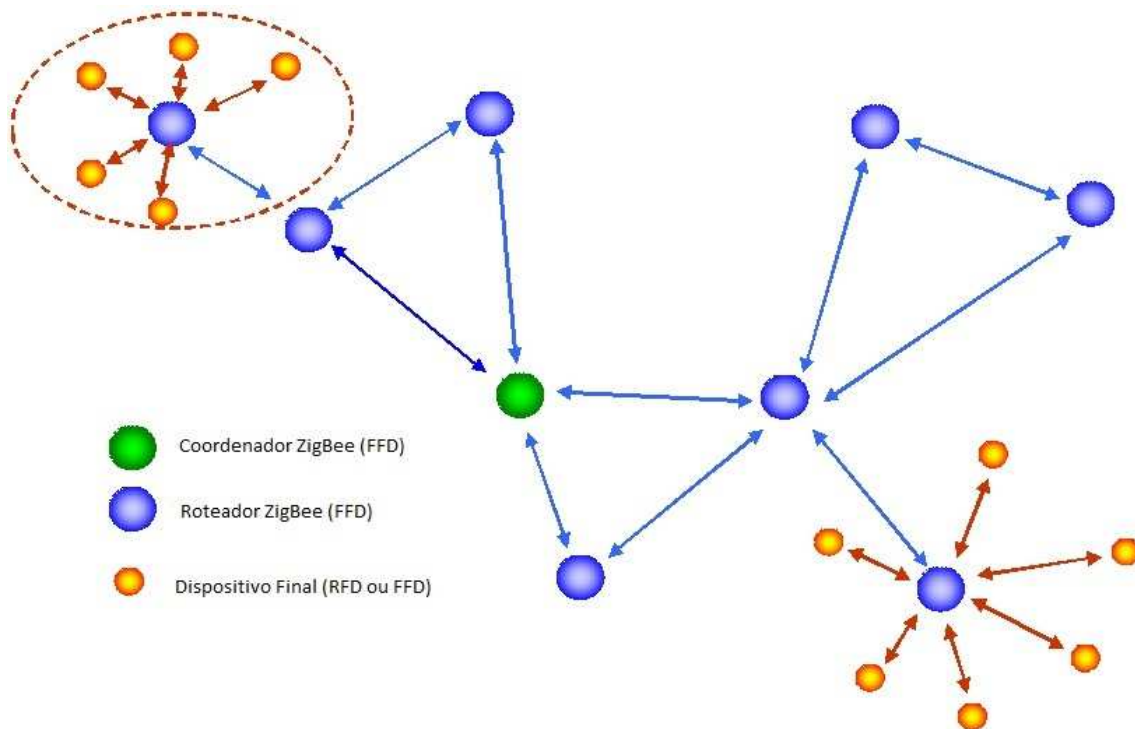


Figura 5 – Modelo de rede ZigBee
Fonte: Kinney (2003).

2.4.3 Topologia de Rede

Segundo a ZigBee Alliance (2007), a camada de rede ZigBee (NWK) suporta as topologias estrela, árvore e malha (*mesh*). Na topologia em estrela, a rede é controlada por um único dispositivo, denominado coordenador ZigBee. O coordenador ZigBee é responsável por iniciar e manter os dispositivos da rede. Todos os outros dispositivos, conhecidos como dispositivos finais, comunicam-se diretamente com o coordenador ZigBee. Nas topologias em árvore e em malha, o coordenador ZigBee é responsável por iniciar a rede e por escolher certos parâmetros principais da rede. A rede pode ser prorrogada por meio do uso de roteadores ZigBee. Em redes do tipo árvore, roteadores movem dados e mensagens de controle através da rede utilizando uma estratégia de roteamento hierárquico. Redes árvore podem empregar comunicação orientada por faróis (*beacons*), conforme descrito na especificação IEEE 802.15.4-2003. Redes mesh permitem a comunicação *peer-to-peer* completa.

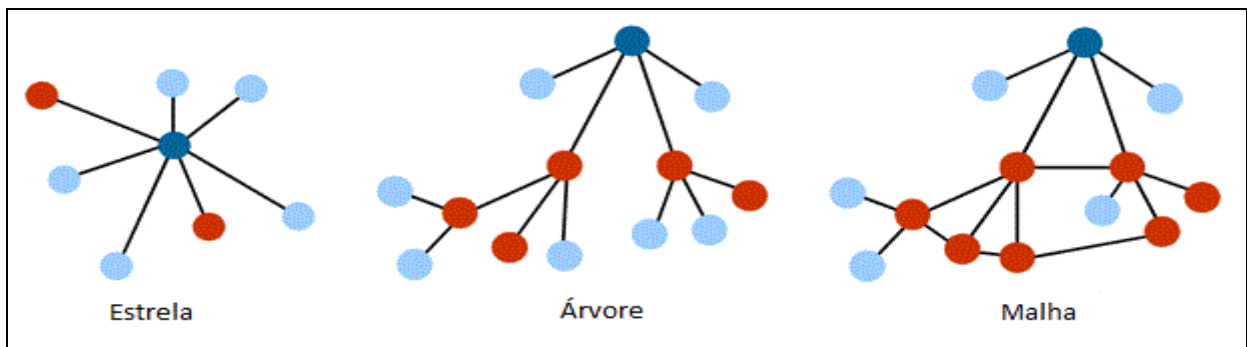


Figura 6 – Topologia de rede ZigBee
Fonte: Oliveira Filho (2010).

2.5 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP)

Segundo a NBR 5460 (ASSOCIAÇÃO..., 1992), “o Sistema Elétrico de Potência (SEP) é um conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica”.

As fontes de energia para a geração podem ser provenientes do combustível fóssil, nuclear ou hidrelétricas. A energia gerada é transferida da fonte para a carga através dos sistemas de transmissão e chegará ao consumidor final através da distribuição. As usinas geralmente estão situadas em locais afastados dos centros de consumo, nestes casos a energia percorre grandes distâncias para chegar aos usuários, sendo transformada nas subestações (ALDABÓ, 2001).

2.5.1 Subestação

Conforme a definição NBR 5460 (ASSOCIAÇÃO..., 1992): “Subestação é parte de um sistema de potência, concentrada em um dado local, compreendendo primordialmente as extremidades de linhas de transmissão e/ou distribuição, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo obras civis e estruturas de montagem, podendo incluir também transformadores, conversores e/ou outros equipamentos.” As subestações (SE's) têm por função garantir a máxima segurança de operação e serviço a todas as partes constituintes dos sistemas elétricos de potência.

Os principais elementos de uma subestação seguem abaixo (ASSOCIAÇÃO..., 1992):

- Transformadores de Potencial;
- Transformadores de Corrente;
- Transformadores de Potência;
- Relés de proteção;
- Disjuntores;
- Chaves seccionadoras;
- Para-raios e Fusíveis.



Fotografia 1 – Subestação Bateias 525 kV
Fonte: Autoria própria.

2.6 DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

Segundo Aldabó (2001), interferências em sistemas de rádios é um exemplo dos problemas que podem ser causados pelos distúrbios elétricos. O distúrbio de energia é um conjunto de distúrbios produzido pelos subsistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição. Os distúrbios são classificados em categorias: alta frequência, tensão, distorção e variação da frequência fundamental.

2.6.1 Interferência Eletromagnética (EMI)

De acordo com Aldabó (2001), a interferência eletromagnética, EMI, é qualquer tipo de sinal indesejado, conduzido ou radiado, gerado propositalmente ou não, e capaz de interferir no correto funcionamento de um equipamento sensível. Nos sistemas de potência, as interferências eletromagnéticas podem ter dois tipos de origem (ALDABÓ, 2001):

- Emissão de campos eletromagnéticos por elementos condutores do sistema de potência em operação, em regime permanente.
- Emissão de campos eletromagnéticos em regime de operação transitória, através de abertura de chaves seccionadoras e disjuntores.

2.6.2 Chaveamento do Sistema Elétrico de Potência

De acordo com Aldabó (2001), um transiente comum em subestações de energia elétrica é originado no chaveamento do sistema elétrico de potência quando se efetua manobra de uma linha de transmissão sem carga. Os arcos que ocorrem nas seccionadoras originam campos irradiados de alta frequência que podem atingir equipamentos eletrônicos sensíveis, principalmente em subestações com sistemas de supervisão e controle automatizados (subestações automatizadas).

A operação de disjuntores e interruptores nos sistemas de potência podem gerar campos eletromagnéticos com frequências de até 100 MHz. Campos elevados também são produzidos por operações de abertura de chave seccionadora em circuitos de 115 kV a 500 kV na subestação (ALDABÓ, 2001).

Segundo o autor, as principais fontes de emissão eletromagnética geradas no interior de uma subestação são (ALDABÓ, 2001):

- Manobra de linha de transmissão, gerando ruídos na ordem de 10 A/ns.

- Manobra de linha de transmissão ou distribuição com carga indutiva elevada, gerando tensões na ordem de 10 kV em frequências de 3 MHz.
- Corrente de falta monopolar circulando pela terra e gerando diferenças de potencial de até 30 kV.
- Abertura de disjuntor durante falta monopolar, gerando tensões elevadas em amplo espectro de frequências.
- Descarga atmosférica incidente na área da subestação ou nas linhas, gerando tensões induzidas e transferência de potenciais.
- Abertura de seccionadoras.
- Operação de intercomunicadores, gerando intensidade de campo eletromagnético na ordem de 10 V/m (até um metro de distância) em frequências de até 400 MHz.

2.6.3 Acoplamentos do Sistema Elétrico

Segundo Aldabó (2001), os acoplamentos no sistema elétrico de potência ou subestação de energia geram interferências eletromagnéticas. Os acoplamentos podem ser de dois tipos (ALDABÓ, 2001):

- Acoplamento indutivo (magnético): é o campo magnético produzido por um sistema que induz tensões numa instalação, sendo proporcional à taxa de variação da corrente e à indutância mútua entre circuitos.
- Acoplamento capacitivo (eletrostático): é a transferência de energia da instalação emissora para uma instalação localizada na sua vizinhança através de suas capacitâncias mútuas, sendo diretamente proporcional à taxa de variação de tensão e à impedância entre os circuitos emissor e receptor.

2.6.4 Efeito Corona

De acordo com Aldabó (2001), nas linhas de transmissão de alta tensão, o elevado gradiente de tensão produzido na superfície dos condutores aéreos acelera os elétrons do ar em torno deles, provocando o fenômeno da ionização. Ionização é a perda dos elétrons nas últimas camadas do átomo e a transformação em íon com carga elétrica positiva. O efeito corona se manifesta quando a gradiente de tensão supera um determinado valor (gradiente

crítico). O efeito visível e a luminosidade azulada em torno do condutor são percebidos no escuro. A manifestação é maior quando a tensão do sistema é elevada, sob determinadas condições atmosféricas e utilização de condutores com diâmetro pequeno e pouco afastados entre si.

As consequências do efeito corona são (ALDABÓ, 2001):

- Perdas elétricas no sistema de potência com valores em torno de 1,3 kW/km sob condições atmosféricas adversas.
- Interferências sobre equipamentos eletrônicos sensíveis, com intensidade proporcional à distância, e sobre equipamentos de rádio e televisão (rádio interferência).

Devido ao escopo deste trabalho ter como base a comunicação ZigBee foram tratados apenas os distúrbios na energia elétrica, que poderiam causar rádio interferência.

3 APLICAÇÃO PRÁTICA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os ensaios realizados tiveram como objetivo simular a comunicação do SASE - Sistema de Automação de Subestações da COPEL - Companhia Paranaense de Energia, com um equipamento de pátio utilizando rádios com tecnologia ZigBee. O SASE é empregado pela COPEL no controle e supervisão de subestações e redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. O SASE é o sistema supervisor que permite o monitoramento, a automatização e o controle da subestação de energia. As informações são coletadas através de unidades de aquisição e controle (UAC) e reportadas as unidades centrais de controle (UCC), em seguida são apresentadas em uma Interface Homem Máquina (IHM), através de páginas unifilares da planta, pontos analógicos, pontos digitais, funções elétricas automáticas e relatórios, propiciando ao operador um meio de controle e supervisão, local ou remoto. Sistemas como este também são conhecidos como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

Das diversas informações coletadas pelo SCADA podemos citar:

- Medidas analógicas: valores de grandezas do sistema elétrico, tais como corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, entre outras.
- Informações de estado: variáveis binárias, exemplos destas informações são estados de chaves e disjuntores (aberto ou fechado) e estado de pontos relacionados à equipamentos de proteção (atuado ou desatuado).

3.1 O PROTOCOLO DNP VERSÃO 3.0

O protocolo de comunicação pode ser definido como um conjunto de regras, padrões e especificações técnicas que regulam a transmissão de dados entre dois ou mais equipamentos por meio de programas específicos, permitindo a detecção e correção de erros. Em outras palavras, pode ser definido como o idioma falado na conversa entre dois dispositivos durante o estabelecimento de uma comunicação.

O protocolo de comunicação utilizado no SASE neste ensaio foi o Distributed Network Protocol (DNP). O DNP versão 3.0 é um protocolo de transmissão de dados do ponto A até o ponto B, através de um meio físico. O DNP é um protocolo aberto, que tem se consolidado como um padrão no setor elétrico, utilizado com frequência por concessionárias de energia.

A arquitetura do protocolo DNP pode ser dividida em 4 documentações básicas:

- **Data Link Layer:** Especifica os procedimentos de transmissão e recepção no meio físico, bem como o tratamento da utilização de modems, rádio-modems, etc;
- **Transport Functions:** Responsável pelo empacotamento dos dados para envio à camada de DataLink (Enlace) e verificação de erros;
- **Application Layer:** Onde é realizada a interface com o usuário, envio e recepção dos comandos;
- **Object Library:** Onde são descritos os tipos de dados suportados pelo protocolo, como E/S Digitais e Analógicas, contadores, arquivos, etc.

3.1.1 Padrão RS232

O padrão de comunicação utilizado pelo SASE neste ensaio é o serial RS232, que é do tipo ponto a ponto. Na porta de comunicação serial, os bits são enviados por um único pino de sinal.

A comunicação serial pode ser classificada como assíncrona e síncrona. Na interface assíncrona o sincronismo entre o transmissor e o receptor é feito por bits adicionais enviados junto com os dados (start e stop). Na interface síncrona existe um pino adicional de sinal por onde é enviado um clock para sincronização. O sistema de automação utiliza portas de comunicação serial síncronas.

A RS232 possui bits de início e de fim que sincronizam o começo e o final de um quadro ou um byte e é utilizada para a comunicação entre um equipamento microprocessado, Equipamento terminal de dados (ETD) e um modem, Equipamento de comunicação de dados (DCE). É definida para trabalhar em velocidades entre 60bps a pouco mais de 100Kbps.

Existem quatro parâmetros de comunicação série que é preciso definir:

- A velocidade de transmissão da porta (baud rate), que representa o número de bits transmitidos por segundo.
- O comprimento da palavra. Especifica o número de bits que irão compor cada unidade de dados.
- Verificação da paridade. Este bit de paridade serve para verificar se houve erros na transferência dos dados através de uma operação matemática sobre os bits de dados. O bit de paridade pode ser configurado como ímpar (odd), par (even) ou desconfigurado (none).

- Start / Stop bit. Indica o início e fim da transmissão de uma palavra de dados.

3.2 O ENSAIO DOS RÁDIOS ZIGBEE

A subestação escolhida para o ensaio foi a SE Bateias de 525 kV. Um dos motivos da escolha desta subestação foi o nível de tensão, pois a abertura de uma chave seccionadora em uma subestação deste porte gerar um arco voltaico considerável.

A primeira visita à subestação foi realizada no dia vinte e cinco de janeiro de dois mil e doze, nesta ocasião foram definidas a distância de atuação dos módulos de comunicação, local de instalação, equipamentos necessários e possíveis obstáculos para a realização dos testes. A distância que o sinal de rádio deverá transpor é de aproximadamente 50 metros.

3.2.1 EQUIPAMENTOS

Nos testes foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um computador industrial, Unidade de comunicação e controle (UCC), que será utilizado como o micro mestre, terá instalado o aplicativo SASE sobre plataforma Linux.
- Um computador industrial, simulando uma Unidade de aquisição e controle (UAC) na condição de micro escravo, que fará a aquisição dos dados do equipamento de pátio e irá repassá-los ao SCADA através do rádio.

Configuração básica de hardware do mestre e do escravo:

- CPU: HS870P
- Processador: Celeron 666 MHz
- Memória RAM: 512 MB
- HD: 80 GB



Fotografia 2 – Microcomputador industrial
Fonte: Autoria Própria.

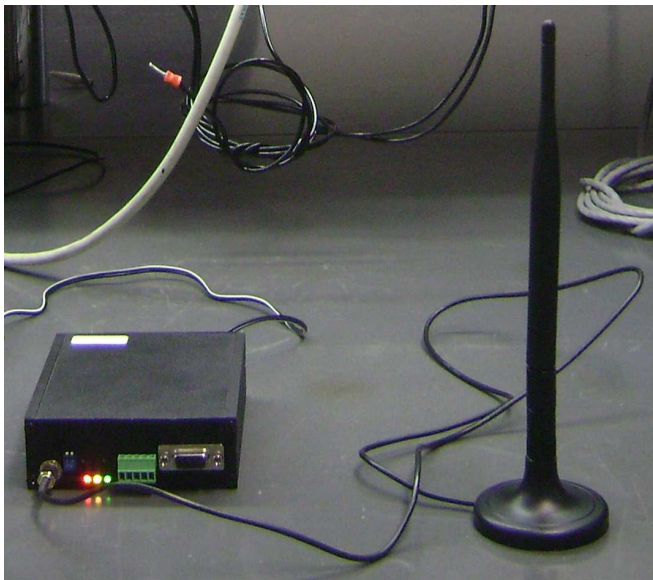
- Dois cabos diretos para ligar o ETD (computador industrial) ao ECD (rádios ZigBee).
- Dois Módulos conversores de dados sem fio - bidirecional (MCSF/DD) da FLEXMEDIA que tem como objetivo a conversão e transmissão de dados RS232 ou RS485 recebidos de uma porta serial, através de uma rede de comunicação sem fio utilizando a topologia de rede MESH, como também, realizar a recepção destes dados e enviar para uma porta serial de saída, ou ainda retransmitir para outros módulos que estiverem dentro da mesma rede até que cheguem ao destino final.

Ele é um dispositivo de rede ZigBee que tem a capacidade de operar em conjunto com equipamentos de outros fabricantes no nível da camada de rede. Além das habilidades de rede, o equipamento é diferenciado pela aplicação de porta serial, a qual funcionará apenas em conjunto com outros equipamentos MCSF/DD.

A rede formada pelo MCSF/DD elimina a necessidade de cabos para comunicação entre servidores, sensores e atuadores, podendo ser formada utilizando apenas 2 módulos (um coordenador e um roteador) e eventualmente ter a inserção de mais nós (roteadores) conforme desejado.

Características do MCSF/DD:

- Rede Mesh;
- Binding (União) configurável;
- Agrupa até 25 equipamentos em uma mesma sub-rede, dentro de uma rede MESH de até 30000 unidades;
- Alimentação de 5V até 30VDC;
- Indicação luminosa de status por meio de indicadores luminosos (led's): power, network (rede) e binding (sub-rede) ;
- Portas de comunicação RS232 ou RS485;
- Suporta pacotes de mensagens de até 510 bytes;
- O mesmo equipamento pode funcionar como coordenador ou roteador configurável por meio de Dip Switch;
- Formação de rede e sub-rede por meio de botões;
- Comunicação em até 50m de distância com antena externa.



Fotografia 3 – MCSF/DD (Módulo de comunicação sem fio – ZigBee)
Fonte: Autoria própria.

Configuração de fábrica do MCSF/DD:

- Porta ATIVA
- Baud Rate = 9600 bps

- Paridade = Nenhuma
- Bit's de dados = 8
- Bit de parada = 1
- Controle de Fluxo = Nenhum

3.2.2 CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

No SASE foram configurados os seguintes parâmetros para a comunicação:

Mestre:

- Tipo do canal = ativo
- Padrão de comunicação = serial RS232
- Baud Rate = 19200 bps
- Paridade = Nenhuma
- Bit's de dados = 8
- Bit de parada = 1
- Timeout = 5 s

Idem para o escravo mudando apenas o tipo do canal para passivo.

Nos rádios ZigBee as configurações gerais foram:

- Configurações da RS232 – Permite ler e/ou alterar: Ativar Porta, Baud Rate, Controle de Fluxo, Paridade e Stop Bit.
- Configurações da RS485 – Permite ler e/ou alterar: Ativar Porta, Baud Rate, Modo de Operação, Paridade e Stop Bit.
- Configuração PAN ID (Personal Area Network IDentification) – Permite ao usuário a troca do PAN ID da rede. O PAN ID é a identificação da rede Zig Bee, importante para a não interferência entre diferentes redes.
- Informação MAC Address – Solicita a leitura do MAC Address do equipamento.

4 RESULTADOS

A instalação dos equipamentos na subestação Bateias foi realizado no dia trinta de agosto e finalizado no dia onze de setembro do ano de dois mil e doze, no entanto para facilitar a análise dos dados serão adotadas as seguintes datas:

Início: 01/09/2012

Término: 10/09/2012

Os resultados práticos serão expostos através de dados obtidos pelo analisador de protocolos do SASE:

Uma das condições encontradas no analisador foi a presença de ruído no canal causando uma falha de comunicação:

```
<... ch00 0001<.0000 PRIMARY LINK HEADER - USER DATA, CONFIRM EXPECTED
                        FCV:1 FCB:1 DIR:1 Length:011 Retry:00
                        05 64 0B F3 01 00 00 00 51 DE
                        F4 C5 01 01 00 06 68 14
DNPPGER: 01

...> ch00 sync/noise 00 01 00 00 01 00 00 86 61
DNPPGER: 01

...> ch00 0001.>0000 SECONDARY LINK HEADER - CONFIRM ACK
                        DFC:0 DIR:0 Length:005
                        05 64 05 00 00 00 01 00 F9 C0
COMPDPNP: ERRO: timeout de recebimento de resposta expirado
SessionIndex (0) msg na fila de aplicacao AC:(C5) FC:(01)
DNPPGER: 01
Error Code: A08 Device Address: 1 Session: 0
Timeout waiting for application layer response fragment or restart.
DNPPGER: 01

<~~~ ch00 0001<~0000 APPLICATION HEADER - READ for user request:
                        STATUS DUMP - FALHA DE COMUNICACAO
                        First:1 Final:1 ReqCnfm:0 Sequence:06
```

Outra condição de falha de comunicação observada foi devido ao tempo de resposta:

Através do log (arquivo que guarda informações passadas - registros) é possível observar que o mestre faz uma requisição dos pontos de estado (digitais) para o escravo, no entanto como nenhuma resposta é obtida decorrido o tempo de timeout e o número de tentativas, ocorre a falha de comunicação:


```

<... ch00 0001<.0000 PRIMARY LINK HEADER - USER DATA, CONFIRM EXPECTED
                        FCV:1 FCB:0 DIR:1 Length:011 Retry:00
                        05 64 0B D3 01 00 00 00 0C C6
                        F5 C6 01 01 00 06 85 C4
DNPPGER: 01

...> ch00 0001.>0000 SECONDARY LINK HEADER - CONFIRM ACK
                        DFC:0 DIR:0 Length:005
                        05 64 05 00 00 00 01 00 F9 C0
COMPDPN: ERRO: timeout de recebimento de resposta expirado
SessionIndex (0) msg na fila de aplicacao AC:(C6) FC:(01)
DNPPGER: 01
Error Code: A08          Device Address: 1          Session: 0
Timeout waiting for application layer response fragment or restart.
DNPPGER: 01

<~~~ ch00 0001<~0000 APPLICATION HEADER - READ for user request:
                        STATUS DUMP - FALHA DE COMUNICACAO
                        First:1 Final:1 ReqCnfm:0 Sequence:07

```

4.1 RELATÓRIOS

Nesta etapa são demonstrados os relatórios com as falhas de comunicação entre mestre e escravo:

SAB 1 SET 2012 07:51:15

07:51:15:544	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
07:51:21:185	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:21:39:454	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:21:50:965	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:23:35:394	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:23:41:035	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:31:06:705	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:31:12:345	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:51:18:564	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:51:23:576	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:53:30:864	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:53:42:385	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:57:47:034	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:57:58:545	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:35:08:594	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:35:13:605	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:35:24:434	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:35:29:447	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:24:11:934	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:24:17:575	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:34:57:024	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:35:02:655	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:35:14:684	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:35:19:695	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

DOM 2 SET 2012 00:11:45

00:11:45:604	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:11:51:235	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
00:19:01:104	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:19:06:735	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

00:21:48:094	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:21:53:735	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
00:41:28:364	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:41:33:995	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:30:10:984	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:30:15:995	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:30:26:824	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:30:31:835	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:58:23:524	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:58:29:165	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
02:40:57:414	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
02:41:03:055	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
04:32:37:084	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
04:32:42:725	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
04:40:06:724	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
04:40:12:035	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
08:44:43:474	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
08:44:48:485	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
17:52:24:784	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
17:52:29:795	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:19:50:874	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:20:02:395	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:38:20:184	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:38:25:825	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:59:22:234	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:59:27:875	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
20:03:02:134	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
20:03:07:765	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
20:10:09:196	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
20:10:14:825	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

SEG 3 SET 2012 00:32:50

00:32:50:254	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:32:55:895	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:00:58:354	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:01:04:006	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:15:05:224	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:15:10:865	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:28:14:794	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:28:20:435	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:46:33:764	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:46:38:775	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:46:49:704	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:46:54:715	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
06:48:36:184	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
06:48:41:405	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
06:48:53:434	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
06:48:58:445	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
07:52:26:124	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
07:52:31:135	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
07:52:41:964	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
07:52:46:975	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
09:13:47:154	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
09:13:52:157	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
14:00:13:614	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
14:00:19:255	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
14:48:35:524	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
14:48:41:165	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:48:03:394	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:48:09:845	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

17:01:22:774	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
17:01:27:785	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:08:19:234	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:08:24:875	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:28:34:924	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:28:40:555	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
21:01:17:654	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
21:01:23:285	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
21:01:35:314	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
21:01:40:325	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
21:01:51:154	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
21:01:56:165	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

TER 4 SET 2012 11:36:07

11:36:07:254	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
11:36:12:141	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
11:36:22:284	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
11:36:27:265	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
15:59:21:264	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
15:59:26:275	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
15:59:37:104	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
15:59:42:115	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:12:54:394	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:12:54:785	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:48:53:504	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:48:59:135	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:08:11:984	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:08:16:995	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:10:44:614	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:10:49:502	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
22:14:28:644	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
22:14:34:285	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

QUA 5 SET 2012 00:14:46

00:14:46:894	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:14:52:535	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:04:34:484	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:04:39:495	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
11:28:57:324	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
11:29:02:965	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:10:59:494	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:11:05:135	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:36:17:244	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:36:22:885	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:58:59:954	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:59:05:585	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
13:49:56:144	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
13:50:01:155	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
14:13:52:904	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
14:13:58:535	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
15:27:16:784	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
15:27:22:415	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:38:55:154	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:39:00:795	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:27:07:184	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:27:12:195	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:27:23:024	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:27:28:036	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:39:20:094	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:39:25:735	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

21:16:03:274	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
21:16:08:915	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
21:28:23:744	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
21:28:29:385	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
22:54:10:594	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
22:54:16:235	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:13:56:204	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:14:01:845	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:24:41:504	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:24:47:145	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:36:37:544	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:36:43:185	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:51:21:244	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:51:26:885	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

QUI 6 SET 2012 00:08:17

00:08:17:614	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:08:22:625	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
00:08:33:454	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:08:38:465	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
11:50:52:784	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
11:50:53:175	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:04:04:034	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:04:09:675	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:04:21:694	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:04:26:705	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:52:02:074	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:52:02:815	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:52:12:964	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:52:13:365	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:53:18:394	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:53:29:915	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
13:33:26:714	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
13:33:27:125	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
13:34:36:104	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
13:34:47:615	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

SEX 7 SET 2012 12:06:33

12:06:33:504	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:06:37:765	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:07:42:484	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:07:54:007	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:09:18:044	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:09:29:565	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:10:40:514	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:10:52:025	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:35:59:514	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:36:00:245	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:36:10:394	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:36:10:805	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:38:13:244	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:38:24:765	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:42:29:344	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:42:40:855	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:49:49:744	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:50:01:265	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:51:49:344	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:52:00:867	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
17:48:17:534	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
17:48:22:545	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

SAB 8 SET 2012 07:48:40

07:48:40:834	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
07:48:46:465	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
07:58:54:064	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
07:58:59:705	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
09:18:27:414	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
09:18:33:055	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
09:18:45:084	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
09:18:50:085	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:26:59:584	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:27:05:225	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:41:18:824	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:41:24:465	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:53:14:814	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:53:20:455	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:52:37:134	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:52:42:775	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:53:52:454	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:53:57:376	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
15:37:02:934	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
15:37:07:936	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
15:39:20:444	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
15:39:31:955	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:34:02:234	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:34:07:245	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:34:18:074	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:34:23:085	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
20:47:06:584	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
20:47:11:585	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
22:30:37:374	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
22:30:37:805	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
22:31:30:564	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
22:31:35:575	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

DOM 9 SET 2012 00:39:44

00:39:44:084	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:39:49:725	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:02:43:534	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:02:49:165	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:21:02:144	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:21:07:775	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
02:46:03:134	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
02:46:08:775	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
02:58:40:494	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
02:58:46:135	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
03:41:19:674	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
03:41:25:305	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
05:36:14:024	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
05:36:19:665	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
06:47:18:664	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
06:47:24:305	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
06:47:36:334	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
06:47:41:345	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:00:44:884	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:00:49:895	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
13:02:33:134	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
13:02:38:775	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:15:54:914	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA

16:16:00:555	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:28:11:644	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:28:17:285	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:01:58:554	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:02:04:195	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:09:00:704	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:09:06:345	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:40:41:744	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:40:47:385	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:19:27:724	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:19:33:355	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:29:17:636	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:29:17:640	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:30:47:586	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:30:59:105	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:43:48:814	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:43:54:425	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
19:45:04:824	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
19:45:16:335	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
20:16:26:014	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
20:16:31:655	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
22:52:10:604	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
22:52:16:245	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:26:13:114	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:26:18:757	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:43:15:544	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:43:21:175	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

SEG 10 SET 2012 00:26:05

00:26:05:704	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
00:26:11:345	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:23:20:254	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:23:25:895	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:32:46:294	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:32:51:925	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:34:16:964	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:34:28:475	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:36:53:104	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:37:04:625	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
01:39:10:784	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
01:39:22:305	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
09:55:43:644	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
09:55:49:285	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:14:00:464	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:14:06:105	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:17:50:884	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:18:06:485	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
10:29:14:894	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
10:29:20:535	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
12:08:10:144	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
12:08:15:775	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
14:37:21:874	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
14:37:26:885	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
14:37:37:724	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
14:37:42:735	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:00:30:824	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:00:36:455	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:23:19:804	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
16:23:26:255	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
16:46:02:364	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA

16:46:08:006	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
17:01:52:304	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
17:01:57:935	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:09:52:914	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:09:58:555	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:29:19:294	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:29:24:935	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
18:29:36:964	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
18:29:41:966	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
22:50:04:014	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
22:50:09:655	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:59:34:754	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:59:39:755	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL
23:59:50:604	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	FALHA
23:59:55:615	TES	P	PTO	401	COMUNIC	C01	NORMAL

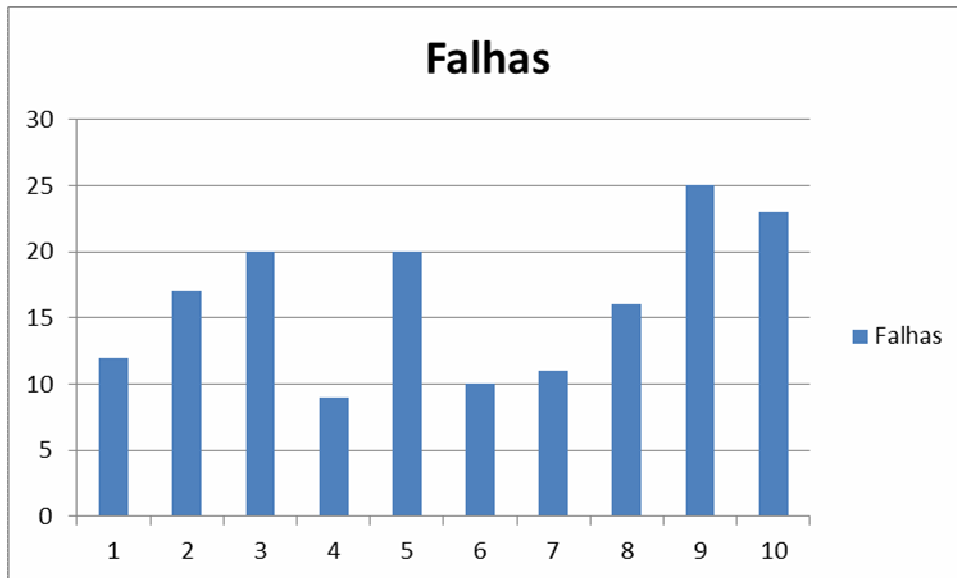


Gráfico 1 – Falhas de comunicação x Dias
Fonte: Autoria própria.

O sistema de comunicação com rádios ZigBee trabalhando em ambiente de subestação de energia apresentou diversas falhas de comunicação. As falhas de comunicação entre o mestre e o escravo foram causadas por ruídos presentes no canal e demora no envio da resposta. Notou-se um aumento do número de falhas em dias chuvosos.

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos neste ensaio é possível concluir que o ambiente do sistema elétrico está sujeito à grande presença de ruído. O sistema de comunicação montado com os rádios ZigBee apresenta-se muito susceptível ao ruído resultando em elevado número de falhas de comunicação.

A maioria dos sistemas de comunicação via rádio depende de um caminho com linha de visada direta entre os dispositivos de transmissão e recepção para estabelecer um link de comunicação confiável, com os rádios ZigBee não foi diferente, uma estrutura de antena na subestação atenuava o sinal de tal forma que foi necessário deslocar os equipamentos, sob pena de não se realizar os ensaios. Em sistemas de rádio mesmo com linha de visada a atenuação do sinal transmitido aumenta à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta. Esta atenuação do sinal com a distância é referida como perda de propagação ou perda no caminho.

Aparentemente o fator climático também influenciou na resposta dos rádios, em dias chuvosos notou-se um pequeno aumento no número de falhas.

Uma configuração no SASE no lado mestre poderia ter resultados positivos quanto à comunicação, infelizmente não foi possível testar em ambiente de subestação, mas um aumento do tempo de tolerância em obter a resposta (timeout) e um aumento entre o tempo de envio de requisições não causaria prejuízos a supervisão e contribuiria de forma positiva para a redução no número de falhas de comunicação, pois o escravo teria um tempo maior para responder.

O aplicação da tecnologia ZigBee para o sistema SASE da forma como foi exigida talvez mereça ser revista, pois o SCADA trabalha com varreduras contínuas de valores analógicos fazendo com que o dispositivo nunca durma (modo sleep), não utilizando um dos principais benefícios do ZigBee que é o baixo consumo de energia, forçando a alimentação dos módulos através de fontes de alimentação ao invés de baterias, dificultando a configuração de uma rede mesh.

Sistemas sem fio seguros e confiáveis requerem um trabalho inicial maior do que os sistemas com fio. A robustez e a resistência do rádio são importantes para uma operação segura e confiável. Os rádios usados nas aplicações em ambientes agressivos devem atender ou superar os requisitos da norma IEEE 1613, a qual relaciona todos os tipos de testes necessários para validar se um dispositivo é robusto o suficiente para ser usado na comunicação de subestações de energia elétrica. Um trabalho em conjunto com os fabricantes,

associado ao uso de normas e informações disponíveis sobre rádios, ajuda a garantir um desempenho aceitável dos sistemas de rádios.

Cabe concluir que a flexibilidade da comunicação *wireless* e o tempo curto de planejamento associados aos rádios ISM são bastante adequados às diferentes partes do sistema de fornecimento de energia elétrica, incluindo as aplicações de transmissão, distribuição e geração distribuída, guardados os devidos cuidados necessários ao SEP.

REFERÊNCIAS

- ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- ASSOCIAÇÃO brasileira de normas técnicas. **NBR 5460**: sistemas elétricos de potência: terminologia. Rio de Janeiro, 1992.
- FERNANDES, Ivo. **WLAN**. 2012. Disponível em:
<<http://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/WLAN/WLAN.html>>. Acesso em: 03 fev. 2013.
- GEIER, Jim. **Wireless networks: first-step**. EUA: Cisco Press, 2004.
- GOLDSMITH, Andrea. **Wireless communications**. EUA: Cambridge University Press, 2005.
- GUTIÉRREZ, José A. **Low-rate wireless personal área networks: enabling wireless sensors with IEEE 802.15.4**. EUA: IEEE Press, 2007.
- IEEE, Computer Society. **IEEE Standard for local and metropolitan area networks: Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**. 2011. Disponível em:
<<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2013.
- KINNEY, Patrick. **ZigBee technology: wireless control that simply works**. 2003. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/LearnMore/WhitePapers.aspx>>. Acesso em: 12 fev. 2013.
- MENDES, Douglas Rocha. **Redes de computadores: teoria e prática**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2007.
- MARTINS, Vagner. **Como criar uma rede Ad Hoc**. 2011. Disponível em:
<<http://info54.wordpress.com/tag/rede/>>. Acesso em: 03 fev. 2013.
- OLIVEIRA FILHO, José Carlito de. **Minicurso ZigBee**. 2010. Disponível em:
<<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1634>>. Acesso em: 04 fev. 2013.
- OLIVEIRA FILHO, José Carlito de. **Minicurso ZigBee**. 2010. Disponível em:
<<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1679>>. Acesso em: 04 fev. 2013.
- PINHEIRO, José Maurício S. **As Redes com ZigBee**. 2004. Disponível em:
<http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php>. Acesso em: 06 mar. 2012.
- SHARMA, Chetan. **Aplicações comerciais da internet sem fio: wireless technology**. São Paulo: Makron books, 2001.
- ZIGBEE ALLIANCE. **ZigBee Alliance**. 2013. Disponível em:
<<http://www.zigbee.org/Home.aspx>> . Acesso em: 10 fev. 2013.

ZIGBEE ALLIANCE. **ZigBee Specification**. 2007. Disponível em:
<<http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/download.aspx>>. Acesso em: 10 fev. 2013.