



**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE REDES SEM FIO WI-FI E  
BLUETOOTH SOBRE UMA REDE BACNET/IEEE 802.15.4**

**HELGER AUGUSTO ACOSTA MUÑOZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE REDES SEM FIO WI-FI E  
BLUETOOTH SOBRE UMA REDE BACNET/IEEE 802.15.4**

**HELGER AUGUSTO ACOSTA MUNÓZ**

**ORIENTADOR: ADOLFO BAUCHSPIESS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 397/09**

**BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE REDES SEM FIO WI-FI E  
BLUETOOTH SOBRE UMA REDE BACNET/IEEE 802.15.4**

**HELGER AUGUSTO ACOSTA MUNÓZ**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Adolfo Bauchspiess, Ph. D. (ENE-UnB)**  
**(Orientador)**

---

**Prof. Geovany Araújo Borges, Dr. (ENE-UnB)**  
**(Examinador Interno)**

---

**Prof. Jacir Luiz Bordim, Ph. D. (CIC-UnB)**  
**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA, 7 DE AGOSTO DE 2009.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

MUÑOZ, HELGER AUGUSTO ACOSTA

Avaliação da Interferência de Redes Sem Fio Wi-Fi e Bluetooth Sobre uma Rede BACnet/IEEE 802.15.4. [Distrito Federal] 2009.

xvii, 91p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Protocolo ZigBee

2. Protocolo BACnet

3. Device BACnet/IEEE802.15.4

4. Desempenho

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

MUÑOZ, H A. A. (2009). Avaliação da Interferência de Redes Sem Fio Wi-Fi e Bluetooth Sobre uma Rede BACnet/IEEE 802.15.4. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-397/09 Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Helger Augusto Acosta Muñoz.

TÍTULO: Avaliação da Interferência de Redes Sem Fio Wi-Fi e Bluetooth Sobre uma Rede BACnet/IEEE 802.15.4.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Helger Augusto Acosta Muñoz  
SCLN 207, Bloco C. Apt. 107  
70.852-530 Brasília – DF – Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiro a Deus por estar sempre comigo, acompanhando as metas propostas em minha vida. A meu pai e minha avó pelas ensinanças que deixaram em mim. A minha mãe e irmãos que sempre ofereceram seu apoio incondicional em todo momento e são exemplo de excelência.

Ao meu orientador o Professor Adolfo Bauchspiess pela oportunidade e orientação em todo momento no desenvolvimento de minha pesquisa.

Ao Professor Geovany Araújo Borges e o pessoal do LARA pela ajuda. Ao pessoal do LASVI pela colaboração. Aos amigos, Marco, Marcos, Robson, Luís, Rodrigo, Raphael, José Luís, Flávio, Roberto, que sempre ficaram abertos a compartilhar seus conhecimentos, agradeço especialmente ao meu amigo Paulo Augusto pela ajuda, amizade e também pelas alegrias compartilhadas.

Agradeço a meus amigos Latino-americanos, Wladimir, Rodrigo, Bruno, Diego, Juliana, Juan, Sergio, Sebastian e todos os outros que direta ou indiretamente me ajudaram sempre. Finalmente quero agradecer a Lisandra e Edcélio os quais me ofereceram sua ajuda e amizade incondicional e foram a minha outra família no Brasil.

## **RESUMO**

### **AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE REDES SEM FIO WI-FI E BLUETOOTH SOBRE UMA REDE BACNET/IEEE 802.15.4**

**Autor: Helger Augusto Acosta Muñoz**

**Orientador: Adolfo Bauchspiess**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, Agosto de 2009**

Este trabalho utiliza o protocolo para Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) ZigBee/IEEE 802.15.4 para ser usado como uma nova solução de rede integrada com o protocolo BACnet (Building Automation and Control Networks), obtendo assim uma nova alternativa de meio de comunicação sem fio para a recepção e transmissão de dados BACnet, diferente aos meios convencionais com fio com que atualmente trabalha BACnet MS/TP (Master-Slave/Token-Passing). Diferentes parâmetros na qualidade da transmissão como o RSSI (Received Signal Strength Indicator) e a PER (Packet Error Rate), além dos atrasos no processamento dos serviços BACnet são testados para avaliar a resposta em desempenho e robustez deste novo dispositivo BACnet/IEEE 802.15.4, conhecendo assim sua resposta funcional em diferentes cenários com outros tipos de tecnologias sem fio como são Wi-Fi e Bluetooth, as quais funcionam na faixa de frequências ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2.4 GHz. Os resultados deste trabalho oferecem orientações para a utilização de novas tecnologias sem fio para o desenvolvimento ou aperfeiçoamento de novos meios de transporte de dados para redes BACnet usadas em sistemas de automação predial.

## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF INTERFERENCE FROM WIRELESS NETWORKS WI-FI AND BLUETOOTH ON A BACNET/IEEE 802.15.4 NETWORK**

**Author: Helger Augusto Acosta Muñoz**

**Supervisor: Adolfo Bauchspiess**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, August of 2009**

This work uses the protocol to Wireless Sensor Networks (WSN) ZigBee/IEEE 802.15.4 to be used as a new network solution integrated with the BACnet protocol (Building Automation and Control Networks), thus obtaining a new wireless data link for receiving and transmission BACnet packets, different to conventional wired communication that currently BACnet MS/TP (Master-Slave/Token-Passing) works. Different parameters on the quality of transmission as RSSI (Received Signal Strength Indicator) and PER (Packet Error Rate), also to delays in the processing of BACnet services are tested to evaluate the response in performance and robustness of this new device BACnet/IEEE 802.15.4, knowing its functional response to different scenarios with other types of wireless technologies such as Wi-Fi and Bluetooth, which operate in the frequency band ISM (Industrial, Scientific and Medical) 2.4 GHz. The results of this study provide guidelines for the use of new wireless technologies for the development or improvement of new data links to BACnet networks used in building automation systems.

## SUMÁRIO

|  |          |
|--|----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                 | <b>1</b> |
| 1.1 OBJETIVO DO TRABALHO .....                             | 3        |
| 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                            | 3        |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                          | 6        |
| <br>   |          |
| <b>2. REDES DE AUTOMAÇÃO PREDIAL SEM FIO .....</b>         | <b>7</b> |
| 2.1 SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO PREDIAL .....                    | 8        |
| 2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO ( RSSF ).....                | 10       |
| 2.3 ZIGBEE ALLIANCE .....                                  | 11       |
| 2.3.1 ZigBee .....   | 13       |
| 2.3.2 Arquitetura do protocolo ZigBee.....                 | 14       |
| 2.3.3 IEEE 802.15.4 .....                                  | 15       |
| 2.3.3.1 Camada de enlace de dados .....                    | 16       |
| 2.3.3.2 Camada Física .....                                | 18       |
| 2.3.4 Dispositivos ZigBee e Topologias de Rede.....        | 19       |
| 2.4 OUTROS PROTOCOLOS SEM FIO .....                        | 20       |
| 2.4.1 Protocolo Bluetooth.....                             | 20       |
| 2.4.2 Protocolo Wi – Fi .....                              | 21       |
| 2.4.3 Protocolo Wi-Max .....                               | 22       |
| 2.5 PROTOCOLOS PARA REDES DE AUTOMAÇÃO PREDIAL .....       | 23       |
| 2.5.1 Protocolo BACnet .....                               | 23       |
| 2.5.1.1 Objetos BACnet.....                                | 25       |
| 2.5.1.2 Serviços BACnet .....                              | 26       |
| 2.5.1.3 Redes Locais.....                                  | 27       |
| 2.5.2 Arquitetura do protocolo BACnet .....                | 28       |
| 2.5.2.1 Rede MS/TP .....                                   | 29       |
| 2.5.2.2 Atrasos em BACnet/MSTP .....                       | 30       |
| 2.6 QUALIDADE DA TRANSMISSÃO .....                         | 32       |
| 2.6.1 Nível da Intensidade do Sinal Recebido ( RSSI )..... | 32       |
| 2.6.2 Taxa de Erro de Pacotes ( PER ) .....                | 33       |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>3.</b> | <b>DEVICE BACNET/IEEE 802.15.4 LAVSI/UNB .....</b>              | <b>34</b> |
| 3.1       | DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....                                       | 34        |
| 3.2       | DEVICES BACNET/IEEE 802.15.4 IMPLEMENTADOS.....                 | 38        |
| 3.2.1     | Parâmetros do Device BACnet/IEEE802.15.4.....                   | 39        |
| 3.2.1.3   | Data Link Layer MS/TP .....                                     | 40        |
| <b>4.</b> | <b>REDE DE SENSORES SEM FIO IMPLEMENTADA .....</b>              | <b>43</b> |
| 4.1       | DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS EXPERIMENTAIS PARA OS TESTES .....        | 44        |
| 4.1.1     | Definição dos testes .....                                      | 45        |
| 4.2       | CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM IEEE 802.11/G..... | 46        |
|           | (WI-FI).....  | 46        |
| 4.3       | CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM BLUETOOTH .....    | 48        |
| 4.4       | CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM WI-FI E.....       | 49        |
|           | BLUETOOTH .....   | 49        |
| <b>5.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                            | <b>51</b> |
| 5.1       | RESULTADOS CENÁRIO BACNET/IEEE802.15.4 COM WI – FI.....         | 52        |
| 5.1.1     | Desempenho Wi – Fi .....  | 54        |
| 5.2       | RESULTADOS CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM.....    | 57        |
|           | BLUETOOTH .....   | 57        |
| 5.2.1     | Desempenho Bluetooth .....                                      | 59        |
| 5.3       | RESULTADOS CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM.....    | 61        |
|           | WI-FI E BLUETOOTH.....  | 61        |
| 5.3.1     | Desempenho BACnet/IEEE802.15.4 .....                            | 61        |
| 5.3.2     | Desempenho Wi – Fi .....  | 64        |
| 5.3.3     | Desempenho Bluetooth .....                                      | 67        |
| 5.4       | DESEMPENHO PARÂMETROS PROTOCOLO BACNET.....                     | 68        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>                      | <b>71</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Esquematização dos padrões para automação predial (Endo, 2005). .....                            | 9  |
| Figura 2.2 – Típica estrutura e exemplo de nó RSSF comparado em tamanho com moeda de 1 centavo de dólar. .... | 11 |
| Figura 2.3 – Alguns membros da ZigBee Alliance (www.zigbee.org). ....   | 12 |
| Figura 2.4 - Padrões de redes sem fio normalizados pelo IEEE (www.zigbee.org). ....                           | 12 |
| Figura 2.5 - Organograma dos padrões IEEE sem fio. ....   | 13 |
| Figura 2.6 - Arquitetura protocolo ZigBee. ....   | 15 |
| Figura 2.7 - Padrão IEEE 802.15.4 (Vunda, 2005). ....   | 16 |
| Figura 2.8 - Sub-divisões camada MAC (Vunda, 2005). ....  | 17 |
| Figura 2.9 - Espectro da camada física. ....  | 18 |
| Figura 2.10 - Topologias de rede ZigBee (www.zigbee.org). ....  | 19 |
| Figura 2.11 - Primitivas BACnet (www.bacnet.org). ....  | 24 |
| Figura 2.12 - Camadas Protocolo BACnet (Bushby, 1997). ....   | 28 |
| Figura 2.13 - Atraso para serviço de confirmação em BACnet/IEEE802.15.4. ....                                 | 31 |
| Figura 3.1 – Device BACnet/IEEE 802.15.4 no contexto da arquitetura BACnet. ....                              | 34 |
| Figura 3.2 - Nós do Sistema BACNET/IEEE 802.15.4 .....  | 35 |
| Figura 3.3 - CON-USBBEE (www.rogercom.com). ....  | 36 |
| Figura 3.4 – Software X-CTU. ....   | 37 |
| Figura 3.5 – Software CAS BACnet Explorer. ....   | 38 |
| Figura 3.6 – Topologia sem fio BACnet/IEEE 802.15.4. ....   | 39 |
| Figura 3.7 – Disposição física dos componentes BACnet/802.15.4 LAVSI/UnB. ....                                | 40 |
| Figura 3.8 – Máquina de estados modo receive MS/TP. (ANSI/ASHRAE, BACnet, 2004) .....                         | 41 |
| Figura 4.1- Ambiente da rede sem fio do LAC. ....   | 43 |
| Figura 4.2- Distribuição da rede sem fio proposta. ....   | 44 |
| Figura 4.3- Espectro de frequências sobrepostas entre ZigBee e Wi-Fi (Shin, 2007). ....                       | 46 |
| Figura 4.4 – Cenário BACnet/IEEE802.15.4 entre transmissões Wi-Fi. ....                                       | 47 |
| Figura 4.5 – Cenário BACnet/IEEE802.15.4 entre transmissões Bluetooth. ....                                   | 49 |
| Figura 4.6 – Cenário BACnet/IEEE802.15.4 entre transmissões Wi-Fi e Bluetooth. ....                           | 50 |
| Figura 5.1 – PER entre canais de transmissão BACnet/IEEE802.15.4 com canais de Wi-Fi. ....                    | 52 |
| Figura 5.2 – Sobreposição entre Wi-Fi e BACnet/IEEE802.15.4. ....   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.3 – RSSI BACnet/IEEE802.15.4 com Wi-Fi.....  | 54 |
| Figura 5.4 – Desempenho canal 6 de Wi-Fi com e sem interferência.....   | 55 |
| Figura 5.5 – Desempenho canal 3 de Wi-Fi com e sem interferência.....   | 56 |
| Figura 5.6 – Desempenho canal 11 de Wi-Fi com e sem interferência.....  | 56 |
| Figura 5.7 – PER entre os canais BACnet/IEEE802.15.4 e Bluetooth. ....  | 58 |
| Figura 5.8 – RSSI dos canais BACnet/IEEE802.15.4 em transmissões de Bluetooth. ....   | 59 |
| Figura 5.9 – Desempenho Bluetooth em transmissões dos canais de BACnet/IEEE802.15.4.<br>.....   | 60 |
| Figura 5.10 – PER para : (a) canal 3 de Wi-Fi, (b) canal 6 de Wi-Fi e (c) canal 11 de Wi-Fi<br>.....  | 63 |
| Figura 5.11 - RSSI BACnet/IEEE802.15.4 trabalhando com Bluetooth e Wi-Fi. ....  | 64 |
| Figura 5.12 – Desempenho dos canais de Wi-Fi (a) canal 11, (b) canal 6 e (c) canal 3,<br>entre transmissões BACnet/IEEE802.15.4 e Bluetooth. .... | 66 |
| Figura 5.13 – Desempenho Bluetooth entre transmissões Wi-Fi.....  | 67 |
| Figura 5.14 – Service Delay BACnet/IEEE802.15.4. ....   | 69 |
| Figura 5.15 - Token Rotation Time BACnet/IEEE802.15.4. ....   | 70 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Faixas de frequências ISM.....   | 8  |
| Tabela 2.2 - Características das tecnologias sem fio (www.zigbee.org).....              | 14 |
| Tabela 2.3 - Velocidades de transmissão de cada faixa de frequências IEEE 802.15.4..... | 18 |
| Tabela 2.4 – Extensões do padrão IEEE 802.11 .....                                      | 22 |
| Tabela 2.5 - Objetos padronizados do BACnet (Swan, 1998).....                           | 25 |
| Tabela 2.6 - Propriedades objeto analógico BACnet (Swan, 1998).....                     | 26 |
| Tabela 2.7 - Comparativo entre LANs BACnet. ....  | 27 |
| Tabela 2.8 - Parâmetros importantes de uma rede tipo MS/TP (Song, 2003).....            | 30 |
| Tabela 3.1 – Características XBee Series 1 (Digi International Inc).....                | 36 |
| Tabela 3.2 – Parâmetros dispositivos BACnet/IEEE802.15.4 .....                          | 39 |
| Tabela 3.3 – Parâmetros MS/TP dispositivo BACnet/IEEE802.15.4. ....                     | 41 |
| Tabela 4.1 – Frequências de transmissão Wi-Fi e ZigBee. ....                            | 48 |
| Tabela 5.1 – Médias da PER e RSSI dispositivo BACnet/IEEE802.15.4.....                  | 51 |
| Tabela 5.2 – Interferências entre BACnet/IEEE802.15.4 e Wi-Fi. ....                     | 53 |
| Tabela 5.3 – Média do RSSI entre BACnet/IEEE802.15.4 com Bluetooth. ....                | 58 |
| Tabela 5.4 – Médias do desempenho dos canais 3, 6 e 11 de Wi-Fi.....                    | 66 |
| Tabela 5.5 – Desempenho Bluetooth com Wi-Fi. ....                                       | 68 |
| Tabela 6.1 – Melhores canais para a transmissão do dispositivo BACnet/IEEE 802.15.4.    | 72 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

|         |   |
|---------|---|
| AI      | - Analog Input (Entrada analógica)  |
| ANSI    | - American National Standards Institute                                     |
| AO      | - Analog Output (Saída analógica)   |
| ASHRAE  | - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| BACnet  | - Building Automation and Control Networks                                  |
| BO      | - Binary Output (Saída binária)   |
| BI      | - Binary Input (Entrada binária)  |
| CAS     | - Chipkin Automation Systems  |
| CSMA-CA | - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance                    |
| ETSI    | - European Telecommunications Standardisation Institute                     |
| FCC     | - Federal Communication Commission  |
| FFD     | - Full Function Device  |
| HVAC    | - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning                                |
| I/O     | - Input / Output  |
| IEEE    | - Institute of Electrical and Electronics Engineers                         |
| ISM     | - Industrial, Scientific and Medical  |
| LARA    | - Laboratório de Robótica e Automação                                       |
| LAVSI   | - Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes                   |
| LED     | - Light Emitting Diode  |
| MAC     | - Media Access Control  |
| MSTP    | - Master Slave Token Passing  |
| NWR     | - Network Layer   |
| OSI     | - Open System Interconnection   |
| PAN     | - Personal Area Network   |
| PER     | - Packet Error Rate   |
| PHY     | - Physical Layer  |
| PTP     | - Point-to-Point  |
| RF      | - Radio Frequency   |
| RFD     | - Reduce Function Device  |
| RSSF    | - Redes de Sensores Sem fio   |
| RSSI    | - Received Signal Strength Indicator  |

|                     |  |
|---------------------|--|
| $T_{ATRASSO}$       | - Tempo de atraso na execução de um serviço BAcnet |
| $T_{TX}$            | - Tempo de Transmissão                             |
| $T_{RX}$            | - Tempo de Recepção                                |
| $T_{PROCESSAMENTO}$ | - Tempo de Processamento                           |
| WSN                 | - Wireless Sensor Networks                         |
| ZC                  | - ZigBee Coordinator                               |
| ZED                 | - ZigBee End Device                                |
| ZR                  | - ZigBee Router                                    |

# 1. INTRODUÇÃO

O avanço na área da automação predial tem trazido uma melhora considerável no gerenciamento e aproveitamento dos recursos, oferecendo a seus ocupantes um ambiente mais confortável, seguro, eficiente e econômico. A incorporação de novos elementos no sensoriamento e de tecnologias de comunicação sem fio tem estimulado o uso de sensores inteligentes em diferentes áreas de aplicação. As redes de sensores sem fio (RSSF) são uma ferramenta que facilita a otimização e realização de tarefas de controle, segurança, automação, entre muitas outras. Elas diferem das redes tradicionais por seu baixo custo e consumo de energia.

Tal e como acontece com muitas tecnologias, aplicações para defesa tem sido o condutor para o desenvolvimento das redes de sensores (Chong, 2003). Durante a Guerra Fria (ColdWar) o SOSUS (Sound Surveillance System), um sistema de sensores acústicos (hidrofonos) sobre o fundo do oceano, foi implantado em locais estratégicos para detectar os submarinos Soviéticos. O SOSUS é utilizado hoje em dia pela Administração Nacional Oceanográfica e Atmosférica (NOAA) para a monitoração de eventos sísmicos e atividade animal no fundo do oceano (Nishimura, 1994).

Os ambientes e habitats monitorados são um candidato natural para a aplicação das redes de sensores (Steere, 2000), o CENS (Center for Embedded Network Sensing) nos Angeles, Califórnia, tem como objetivo o monitoramento de habitats, sensores ambientais são utilizados para estudar a vegetação e doenças frente às variações climáticas (Charny, 2002). Em uma escala maior o SIVAM (Sistema de vigilância da Amazônia), prevê o monitoramento ambiental, o trafego de drogas e o controle aéreo da Bacia Amazônica. Este projeto patrocinado pelo governo do Brasil está constituído por uma grande rede de sensores de diferentes tipos interligada entre si, a qual inclui radares, sensores para imagem e sensores ambientais. Os radares são localizados nas aeronaves, e os sensores ambientais são distribuídos no solo. A rede de comunicação interconecta os sensores e opera a diferentes velocidades. Por exemplo, a alta velocidade de transmissão conecta os

sensores dos satélites e das aeronaves, enquanto a baixa velocidade de transmissão conecta as redes terrestres de sensores (Jensen, 2002).

Com a tecnologia de redes de sensores sem fio (especificamente, com redes de sensores embebidos), navios, aeronaves e prédios podem auto-detectar falhas estruturais (fadiga-fissuras induzidas), locais públicos podem ser instrumentados para detectar agentes atmosféricos, tais como toxinas ou fontes presentes de contaminação, além do mais, as redes de sensores podem ser orientados para localização de potenciais sobreviventes e avaliação de danos estruturais no caso de possíveis terremotos (Sohraby, 2007).

Dia a dia as RSSF estendem suas aplicações com o aumento de seu nível de integração com diferentes protocolos de comunicação utilizados em automação, garantindo assim uma melhor adequação, auto-configuração e confiabilidade na gestão dos recursos.

A diversidade dos diferentes protocolos de comunicação oferecem ao projetista excelentes ferramentas no desenvolvimento e implementação de novas soluções para diferentes tipos de redes. Hoje em dia os novos sistemas para automação predial procuram desenvolver suas aplicações em uma linguagem aberta para garantir maior interoperatividade. Protocolos para redes sem fio como ZigBee ou para redes com fio como BACnet têm se consagrado nos sistemas de automação predial, provendo os meios de acesso de dados entre sistemas de controle de diversos fornecedores.

A diretriz que está sendo seguida pelas tecnologias de comunicação na atualidade propõe a criação de novas plataformas que facilitem a conectividade, acessibilidade e interoperatividade dos sistemas em automação predial. Atualmente trabalha-se para se obter RSSF inteligentes, com a capacidade de gerenciar grandes quantidades de informação e executar tarefas de sensoriamento complexas que contribuam ao funcionamento ótimo dos processos, sempre tendo em mente o consumo de energia e a robustez na transmissão dos dados.



## **1.1 OBJETIVO DO TRABALHO**

O objetivo deste trabalho é avaliar a interferência que produzem as redes sem fio Wi-Fi e Bluetooth sobre uma rede que utiliza dispositivos que integram em um só dois protocolos utilizados em automação predial, no caso BACnet e ZigBee/IEEE802.15.4. Os testes são realizados em um ambiente predial real que possui diferentes tipos de interferências na banda de frequência de 2,4 GHz, conhecendo assim a resposta em desempenho dos novos dispositivos BACnet. Os dados coletados estão relacionados com o índice de sucesso de entrega de pacotes BACnet, atraso na execução de serviços BACnet e níveis de intensidade do sinal de radiofrequência dos dados BACnet recebidos. Os resultados deste trabalho servirão de referência para o desenvolvimento e melhoria de algoritmos no gerenciamento da energia e da informação em sistemas sem fio para automação predial.

## **1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Logo que se tornou público o padrão IEEE 802.15.4, em maio de 2003, vários estudos e simulações foram feitos para testar as camadas inferiores do ZigBee, tanto a camada física, PHY, como a camada de controle de acesso ao meio, MAC (Lee, 2005) (Petrova, M., Riihijärvi, J., Mähönen, P. e Labella, S., 2006), reafirmando sua viabilidade e utilização em variadas aplicações de RSSF em ambientes prediais.

No projeto de uma nova rede para automação predial, principalmente em instalações já existentes, a utilização de tecnologias sem fios oferece benefícios para seus usuários, como mobilidade, redução dos custos no momento da instalação e expansão da rede o que facilita o retrofitting predial (Muñoz, H.A., Baptista, R. e Bauchspiess, A., 2009). A difusão de tecnologias sem fio faz com que elas sejam consideradas cada vez mais no desenvolvimento de novas aplicações. A automação predial vem adotando este tipo de tecnologia em uma variedade de aplicações tanto em prédios como em casas (Reinisch, 2007). No início o ZigBee era comumente utilizado em ambientes prediais, mas suas características técnicas e resultados de testes realizados em uma variedade de cenários mostrou que esta tecnologia também satisfaz os requerimentos de um sistema sem fio no contexto de ambientes industriais (Wettergren, 2007) .

A vulnerabilidade no funcionamento das RSSF está ligada diretamente às interferências do ambiente externo onde ela trabalha e à utilização de diferentes tecnologias comerciais que funcionam na mesma frequência de transmissão (2.4 GHz), como Bluetooth e Wi-Fi, as quais afetam direta e consideravelmente os parâmetros de desempenho das RSSF influenciando a qualidade do enlace de comunicação e a propagação das ondas de rádio-frequência levando à perda de dados (Thelen, J., Goense, D. e Langendoen, K., 2005).

Estudos de desempenho feitos para as RSSF só mostram resultados em ambientes com variação climática, ambientes abertos ou ambientes especificamente definidos, analisando as perturbações no desempenho da rede sem fio que geram os diferentes processos que se desenvolvem no ambiente onde ela trabalha, mas não levando em conta a resposta do desempenho da rede quando submetida aos diferentes tipos de materiais característicos utilizados na construção de prédios, como metal, concreto e madeira, nem tampouco trabalhando no limite da cobertura ou alcance de funcionamento da rede. O nível de potência do sinal transmitido pelo transmissor sofre perdas consideráveis até chegar ao receptor devido ao material ou obstáculo que tem de transpor quando a comunicação está sendo feita entre os nós e segundo o alcance de transmissão dos dispositivos utilizados. Os diferentes materiais que são utilizados para a construção de um prédio representam um tipo de interferência crítica para a comunicação, em consequência leva a perda de informações neste tipo de rede (Muñoz, H.A., Couto, F.L. e Bauchspiess, A., 2008).

Em um projeto de redes sem fio é de vital importância para o projetista conhecer a resposta dos diferentes protocolos de comunicação quando os mesmos estão trabalhando em situações críticas ou em seus limites técnicos de funcionamento. Song, Hong e Bushby (2003) fizeram estudos com protocolos de comunicação para redes de automação predial, no caso o BACnet (Building Automation and Control Networks, 2004). Baseados em simulações identificaram parâmetros que influenciam o desempenho dos serviços de aplicação em três diferentes padrões para a transmissão de dados utilizados pelo BACnet: Master-Slave/Token-Passing (MS/TP), Attached Resource Computer Network (ARCNET), e ISO-8802-3 (Ethernet). Mais tarde, se estuda mediante simulações a relação entre demoras induzidas a uma rede BACnet no controle do desempenho da mesma (Song, W.S., Hong, S.H. e Park, T.J., 2006), baseados em um controle HVAC (Heating, Ventilating, and Air-Conditioning), concluindo-se que o BACnet MS/TP satisfaz os requerimentos de

desempenho deste tipo de controle, mesmo apresentando diferentes taxas de tráfego na rede, sendo que se o tráfego total na rede não excede o ponto de saturação, a utilização de MS/TP garante o desempenho do sistema de controle HVAC mesmo que seja gerado tráfego imprevisível (como alarmes, por exemplo).

No estudo da avaliação do desempenho do BACnet por Park, Kwon e Hong (2005), foi desenvolvido um modelo experimental para o protocolo BACnet MS/TP onde se avalia o TRT (Token Rotation Time) e os atrasos em executar um serviço BACnet, aplicando variações no tráfego dos dados de forma a procurar os parâmetros que afetam o desempenho da mesma.

A difusão dos sistemas abertos e dos protocolos não proprietários fornece a partida para a interoperatividade nas diferentes tecnologias de comunicação, a mudança é tomar a passada inovação dos sistemas com fio e aplicá-la cada vez mais no mundo wireless (Martocci, 2008). Em “BACnet over ZigBee” (Park, T.J., Chon, Y.J., Park, D.K. e Hong, S.H., 2007) se faz uma primeira implementação do protocolo BACnet trabalhando conjuntamente com um protocolo para redes de sensores sem fio, no caso ZigBee. Este estudo dá início a um novo meio de transmissão de dados diferente dos padrões com fio tradicionais com que BACnet trabalha (ARCNET, Ethernet, MS/TP, PTP e LonTalk). O estudo mostra a resposta desta nova solução, conseguindo a comunicação entre os dois protocolos usando os diferentes datagramas de uma tecnologia e da outra.

Os estudos feitos até o momento só mostram resultados para meios de transmissão com fio, no caso do protocolo BACnet os testes realizados tanto experimentais como em simulações, só avaliam BACnet MS/TP a diferentes taxas de transmissão em um meio físico de par trançado e não em meios de transmissão sem fio, por outra parte a implementação que foi desenvolvida do protocolo BACnet sobre ZigBee, só apresenta resultados na camada de rede, deixando de lado a resposta em desempenho da camada física e enlace de dados da nova aplicação em ambientes prediais reais, sem poder conhecer assim a funcionalidade do dispositivo frente a diferentes tipos de interferências que podem produzir outras tecnologias que trabalham na mesma banda de frequências que ZigBee (2,4 GHz).

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro deles esta introdução. No segundo capítulo são apresentados os fundamentos teóricos, como a descrição dos sistemas de automação sem fio, os conceitos do protocolo ZigBee, o padrão IEEE 802.15.4 e o protocolo BACnet, além do mais, as variáveis a serem avaliadas para quantificar o desempenho neste tipo de protocolo. No terceiro capítulo é feita uma descrição detalhada do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 desenvolvido, onde se mostra as características e propriedades de seus parâmetros e funcionamento. O quarto capítulo descreve a rede de sensores sem fio implementada, os diferentes cenários utilizados nos testes e os testes a serem realizados. No quinto capítulo se faz uma análise e comentários dos resultados obtidos. Finalmente, o capítulo seis traz as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REDES DE AUTOMAÇÃO PREDIAL SEM FIO

O desenvolvimento industrial do século XIX abriu as portas ao nascimento da automação, onde no início os sistemas podiam controlar e estabelecer sequencialmente os processos produtivos (Montebeller, 2006). Com o transcorrer do tempo e até a atualidade, os sistemas tem sido aperfeiçoados chegando ao ponto em que as indústrias implementam grande parte de suas fases de produção com tarefas autônomas.

Em um prédio, além das redes de dados que permitem o acesso à Internet, telefonia celular ou a outras redes privadas, os usuários dispõem de redes que podem ser utilizadas para o monitoramento e controle do prédio, oferecendo desta maneira mais serviços a seus usuários.

A incorporação da automação nas instalações prediais tem propiciado o gerenciamento e aproveitamento dos recursos, oferecendo uma estrutura mais confiável e um melhor conforto a seus ocupantes. Uma ferramenta que facilita o gerenciamento nos prédios são as redes *wireless* (sem fio), pois muitos dispositivos têm conectividade graças a esse tipo de sistema.

A utilização de redes sem fio para a automação não fica restrita à comunicação de dados entre duas entidades. Ela pode ser utilizada para gerir sensores, atuadores e equipamentos, normalmente em lugares onde o uso de cabos comumente não é conveniente.

As redes locais sem fio utilizam faixas de frequências de rádio não licenciadas. Essas faixas de frequência especiais foram liberadas pelo órgão regulador (International Telecommunications – ITU), portanto nenhuma licença é exigida para seu uso. O problema dessas frequências é a interferência causada por diversos equipamentos operando nas vizinhanças, por isso a transmissão desses dispositivos fica restrita a cerca de algumas centenas de metros (Miller, 2001).

A principal faixa de frequência não licenciada é a Industrial, Scientific and Medical (ISM). Essa faixa de frequência está reservada para equipamentos que emitem radiação de microondas, tais como fornos microondas e aparelhos médicos, e não estava destinada à comunicação. Mesmo assim, os fabricantes de equipamentos sem fio consagraram essa faixa de frequência para a comunicação em redes sem fio de pequeno alcance. As faixas ISM foram adotadas pelo European Telecommunications Standardisation Institute (ETSI) e pelo Federal Communication Commission (FCC) para a comunicação sem fio e os equipamentos que utilizam essas faixas devem seguir regulamentações para serem utilizadas na Europa, nos Estados Unidos, na Ásia ou América Latina, sem a necessidade de licenças. A Tabela 2.1 mostra as faixas de frequências determinadas para as faixas ISM (Dornan, 2001).

Tabela 2.1 – Faixas de frequências ISM.

| <b>Banda</b> | <b>Frequências FCC</b> | <b>Frequências ETSI</b> | <b>Utilização</b>          |
|--------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| ISM 900      | 902-928 MHz            | 890-906 MHz             | Processamento de Alimentos |
| ISM 2,4      | 2,4-2,4835 GHz         | 2,4-2,5 GHz             | Forno Microondas           |
| ISM 5,8      | 5,725-5,850 GHz        | 5,725-5,875 GHz         | Scanners Médicos           |

## 2.1 SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO PREDIAL

A produção de sistemas e dispositivos eletrônicos está crescendo rapidamente, mas muitos deles trabalham independentes e isolados em suas funções. Os sistemas de automação predial estão baseados no fato de integrar esta classe de dispositivos de forma a controlá-los, seja de maneira centralizada com um gerenciador central ou como um sistema de controle distribuído (inteligência local).

A necessidade de desenvolver novas tecnologias para atingir variadas aplicações e velocidades de transmissão fez surgir novos padrões, tanto para redes com fio, como para redes sem fio. A utilização de redes com fio beneficia o controle, a segurança e velocidade da rede, enquanto as tecnologias sem fio oferecem outros pontos fortes a seus usuários como mobilidade e redução de custos no momento da instalação. No entanto, a velocidade de transmissão, a interferência do ambiente externo, a perda de pacotes e a segurança são

fatores que fazem com que a utilização deste tipo de tecnologia não seja ainda viável em varias aplicações.

Os diferentes padrões para automação predial variam segundo o meio de comunicação utilizado, como mostrado na Figura 2.1.

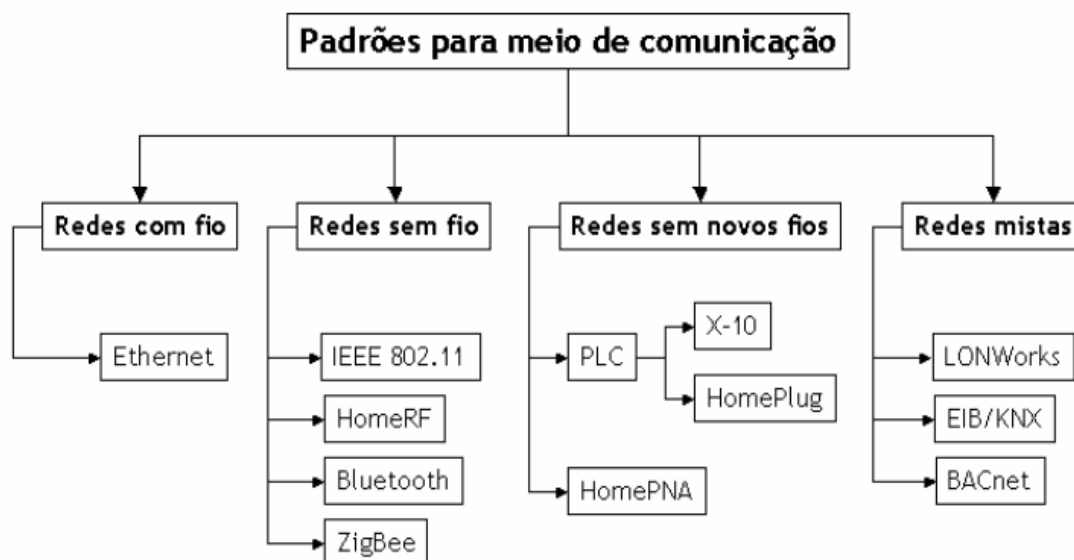


Figura 2.1 – Esquemática dos padrões para automação predial (Endo, 2005).

As redes com fio até á data são as opções mais baratas e mais seguras quando comparadas com as redes sem fio, cenário que está a alterar-se com o desenvolvimento de novos padrões e dispositivos sem fio mais robustos e confiáveis, a rede Ethernet é o grande destaque. As redes sem fio são normalmente utilizadas no ambiente residencial, pois não necessitam de uma nova infra-estrutura para sua implementação, nem a necessidade de proceder a obras em edifícios já construídos, podem ser representadas pelas redes IEEE 802.11, Bluetooth e ZigBee. As redes sem novos fios apresentam uma vantagem neste âmbito das redes domóticas, uma vez que conseguem utilizar o meio de transmissão já existente como os cabos da parte elétrica em um prédio, para realizar a comunicação entre os diversos dispositivos disponíveis na rede. Da união e desenvolvimento das tecnologias convencionais surgiram as redes mistas abrindo espaço às novas arquiteturas, estas redes se caracterizam por apresentar em sua própria arquitetura, opções de comunicação a partir de diferentes meios de transmissão, como par trançado, fibra óptica, rádio-freqüência e outros. (Endo, 2005).

## 2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO ( RSSF )

As RSSF são caracterizadas por um conjunto de elementos autônomos (nós) interligados através de uma comunicação sem fio. Este tipo de rede possui pouca capacidade de processamento por isso seu baixo consumo de energia e custo. Suas aplicações vão desde o sensoriamento de variáveis como iluminação, temperatura e umidade, até a integração com outras áreas tais como monitoração ambiental, automação predial, HVAC, automação industrial e gerenciamento de suprimentos, além da interação com diferentes tecnologias.

RSSF apresentam tipicamente:

- Facilidade para instalação;
- Elevada interação com o ambiente;
- Tamanho reduzido;
- Integração com outras redes de dados;
- Baixo consumo de energia;
- Operação sem manutenção durante vários meses ou anos.

Uma rede de sensores sem fio geralmente é composta por nós, estes nós possuem sensores que capturam do ambiente a informação de variáveis físicas e a convertem em sinais elétricos para depois serem processados. Os nós são dispositivos restritos tanto em memória, capacidade de processamento, área de cobertura e disponibilidade de energia.

A Figura 2.2 (Crossbow Technology, 2007) mostra a estrutura interna e tipos de nós tipicamente utilizados em diferentes aplicações de redes de sensores sem fio. Um nó sensor tipicamente consiste em um detector de hardware, memória, bateria, processador embutido e um transmissor-receptor.



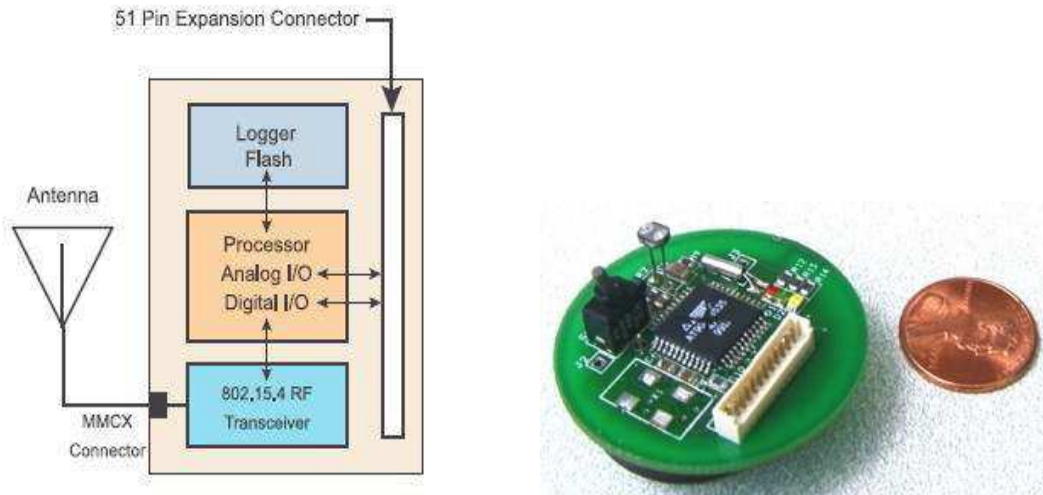


Figura 2.2 – Típica estrutura e exemplo de nó RSSF comparado em tamanho com moeda de 1 centavo de dólar.

As redes de sensores sem fio podem ser classificadas como homogêneas ou heterogêneas. No caso de redes homogêneas, todos os seus nós sensores possuem as mesmas funções e a mesma constituição. Nas redes heterogêneas, há diversos tipos de nós sensores, com diferentes características e capacidades de processamento, além da diferença em suas funções na rede.

### 2.3 ZIGBEE ALLIANCE

A ZigBee Alliance é uma associação que conta hoje em dia com mais de 150 empresas em sua maioria fabricantes de semicondutores, alguns de seus membros são mostrados na Figura 2.3. Estas empresas trabalham em conjunto para desenvolver um padrão capaz de possibilitar flexibilidade, mobilidade, com um controle seguro, de baixo custo e potência em redes sem fio para o monitoramento remoto e soluções no campo da automação. ZigBee foi proposto no ano 2003 e foi construído e homologado pelo padrão IEEE (Institute of Electrical and Eletronics Engineers) 802.15.4 o qual define a camada física e a camada de controle de acesso ao meio MAC (Media Access Control).



Figura 2.3 – Alguns membros da ZigBee Alliance (www.zigbee.org).

A Figura 2.4 mostra os padrões utilizados pelo IEEE com respeito às tecnologias sem fio e a classificação da tecnologia ZigBee dentro delas.

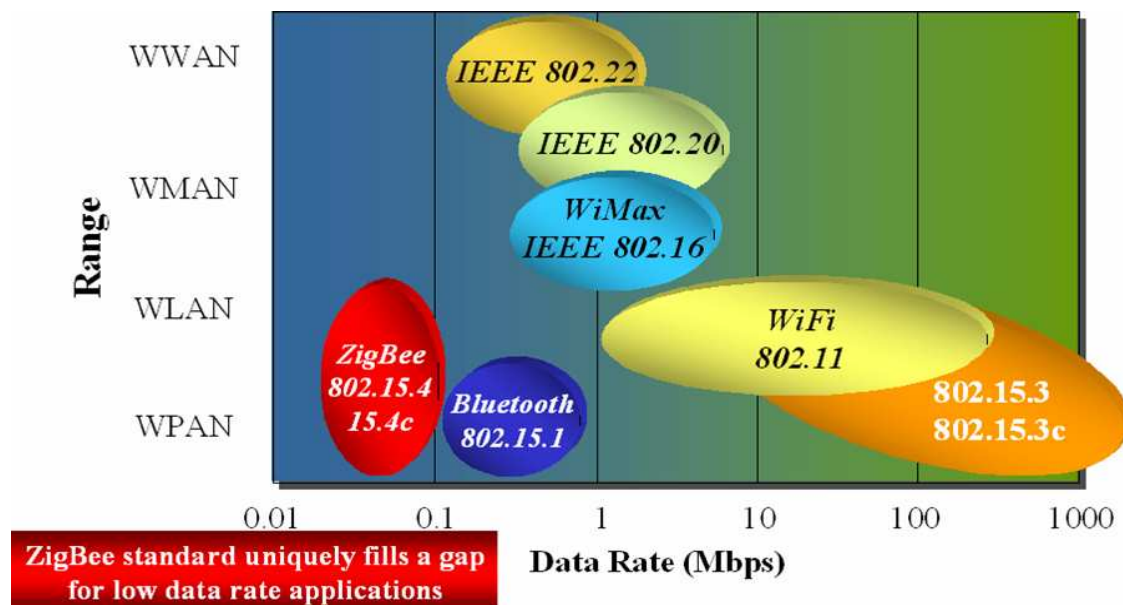


Figura 2.4 - Padrões de redes sem fio normalizados pelo IEEE (www.zigbee.org).

### 2.3.1 ZigBee

O protocolo ZigBee pertence ao grupo das WPAN (Wireless Personal Area Network) e foi criado para a comunicação sem fio de dispositivos em curtas distâncias e baixa taxa de transmissão, obtendo como resultado uma racionalização no consumo de energia.

O surgimento das WPAN resultou da necessidade de substituir os cabos de curta distância por um sistema sem fios que oferecesse a mesma qualidade e velocidade na transmissão. A Figura 2.5 mostra a classificação do ZigBee frente outras tecnologias de rede sem fio.

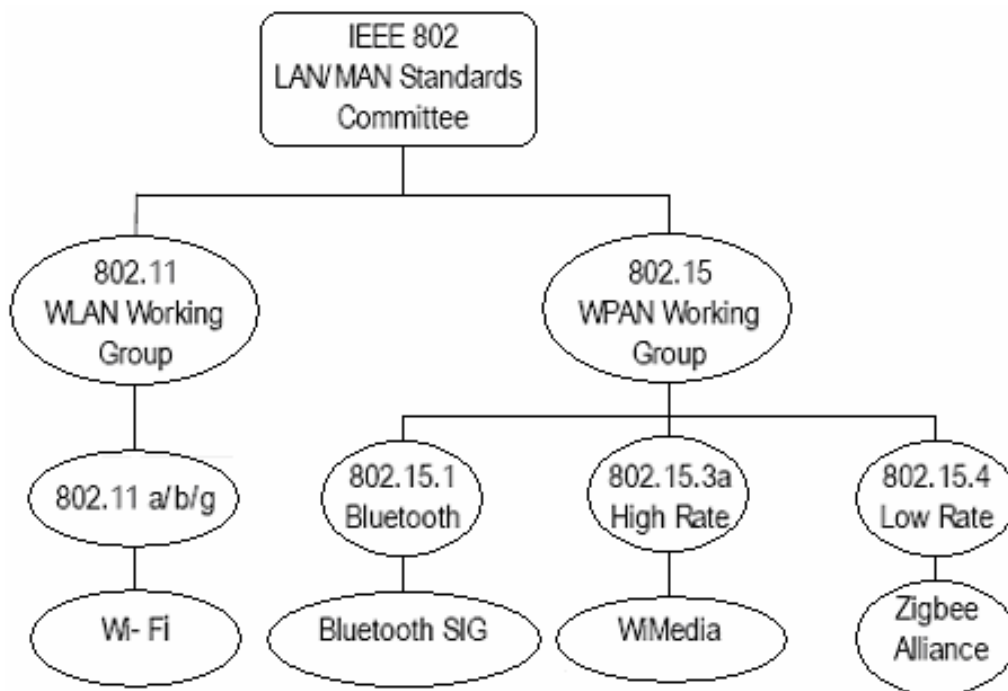


Figura 2.5 - Organograma dos padrões IEEE sem fio.

Por ZigBee pertencer ao grupo das WPAN em companhia de tecnologias como Bluetooth entre outras, pode apresentar certas semelhanças em suas características ou aplicações, mas por ser uma tecnologia desenvolvida para outros objetivos possui diferenças como as ressaltadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características das tecnologias sem fio (www.zigbee.org).

|                                    | <b>ZigBee™<br/>802.15.4</b>            | <b>Bluetooth™<br/>802.15.1</b> | <b>Wi-Fi™<br/>802.11b</b> | <b>GPRS/GSM<br/>1XRTT/CDMA</b> |
|------------------------------------|--|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| <b>Foco da Aplicação</b>           | Monitoramento e Controle               | Substituição de cabos          | Web, Vídeo, Email         | WAN, Voz/Dados                 |
| <b>Recursos do Sistema</b>         | 4KB-32KB                               | 250KB+                         | 1MB+                      | 16MB+                          |
| <b>Durabilidade Bateria (dias)</b> | 100-1000+                              | 1-7                            | .1-5                      | 1-7                            |
| <b>Nós por Rede</b>                | 255/65K+                               | 7                              | 30                        | 1,000                          |
| <b>Taxa de Transmissão</b>         | 20-250 Kbps                            | 720 Kbps                       | 11,000+ Kbps              | 64-128 Kbps                    |
| <b>Alcance (metros)</b>            | 1-75+                                  | 1-10+                          | 1-100                     | 1,000+                         |
| <b>Atributos</b>                   | Confiável, Baixa Potência, Baixo Custo | Custo, Conveniência            | Velocidade Flexibilidade  | Alcance, Qualidade             |

### 2.3.2 Arquitetura do protocolo ZigBee

A arquitetura ZigBee foi desenvolvida baseada no modelo OSI (Open Systems Interconnection) de sete camadas. O protocolo ZigBee possui cinco camadas onde cada uma executa serviços específicos como se fosse uma entidade de dados e gerência para servir à camada acima. O intercâmbio de serviços entre camadas é realizado por pontos de acesso ao serviço (SAP) e cada SAP suporta um número de primitivas de serviço para ativar a função solicitada.

A Figura 2.6 mostra as camadas do protocolo ZigBee onde as duas camadas mais baixas são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4, uma é a camada física PHY (Physical Layer) e a outra é a camada de controle de acesso ao meio MAC (Medium Access Control). A aliança ZigBee trabalha sobre essas camadas para desenvolver a camadas de rede (NWK) e o framework para a camada de aplicação, além de incluir a camada de aplicação que suporta as sub-camadas suporte à aplicação (APS), objetos de dispositivo ZigBee (ZDO) e os objetos de aplicação definidos pelo fornecedor (Application Object).

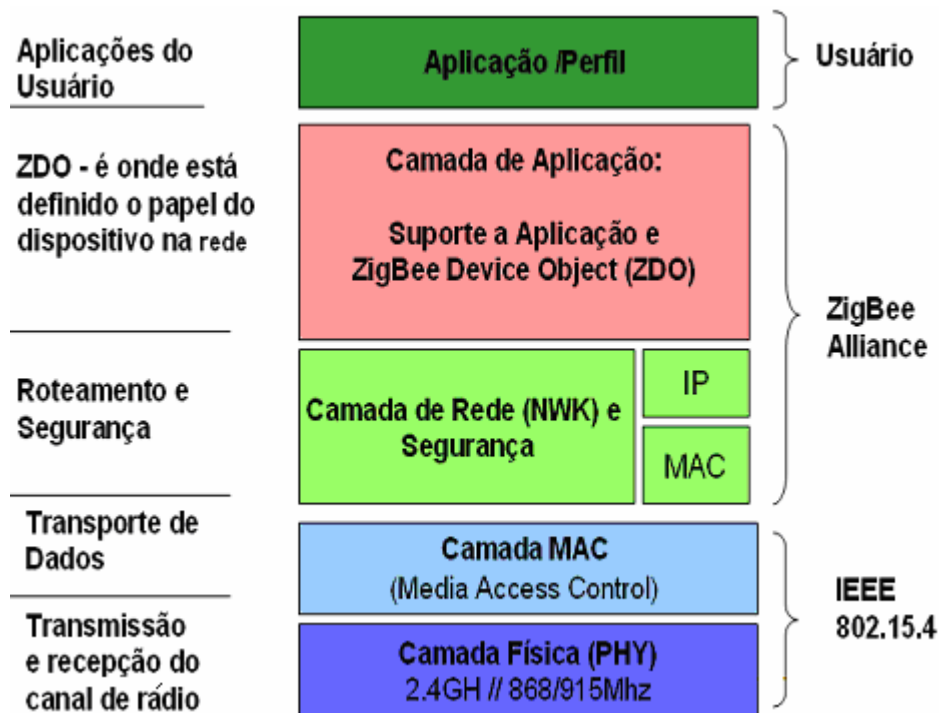


Figura 2.6 - Arquitetura protocolo ZigBee.

A camada de rede (NWR) faz o roteamento das mensagens, estabelecendo os novos endereços e membros da rede, além de possibilitar o crescimento da rede sem a necessidade de utilizar equipamentos de transmissão de potência elevada.

A camada APS faz o roteamento dos diferentes pontos de aplicação que funcionam no nó, mantendo as tabelas *binding* (ligação), estas tabelas mantêm as conexões compatíveis entre diferentes pontos finais.

O ZDO é responsável pela gerência do dispositivo total e da camada de segurança, também tem como função encontrar dispositivos na rede e determinar os tipos de serviços que estes dispositivos provêm à rede.

### 2.3.3 IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 define as duas primeiras camadas do protocolo ZigBee. São estas a Camada Física (PHY) e a camada de enlace, também denominada de Controle de Acesso ao Meio (MAC). Este padrão especifica uma rede de comunicação sem fio caracterizada por baixa taxa de transmissão de dados, baixo consumo de energia, curto alcance, baixa complexidade e custo reduzido.

### 2.3.3.1 Camada de enlace de dados

O padrão IEEE 802 divide a camada de enlace de dados DLL (Data Link Layer) em duas sub-camadas, a sub-camada de Controle de Acesso ao Meio Físico MAC (Media Access Control) e a sub-camada de Controle de Ligação Lógica (Logical Link Control, LLC). O LLC é comum a todos os padrões IEEE 802, embora a sub-camada MAC dependa do hardware e apresente variação na implementação de sua camada física. A Figura 2.7 mostra o padrão IEEE 802.15.4 baseado no modelo de referência para a Interconexão de Sistemas Abertos (OSI).

A subcamada LLC serve para fazer a interface entre a camada lógica e as camadas de nível superior tendo acesso a vários meios definidos pelo IEEE 802.15.4. O intercâmbio entre as informações de diferentes LLC's é feito através de primitivas.

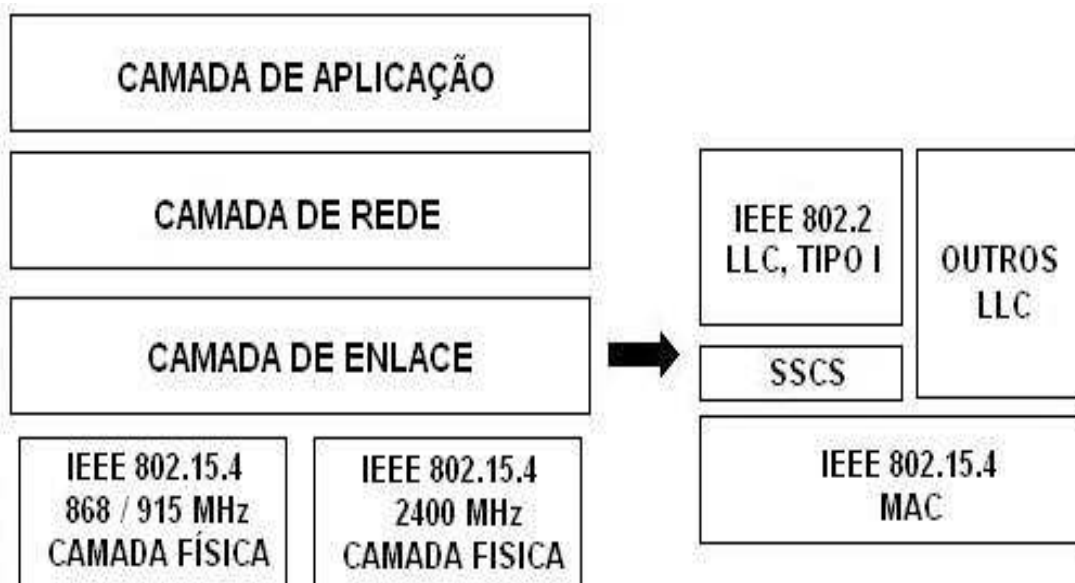


Figura 2.7 - Padrão IEEE 802.15.4 (Vunda, 2005).

A subcamada MAC serve como interface entre as camadas físicas e de aplicação, utilizando o algoritmo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) para se comunicar com a camada física, verificando se o canal de rádio está liberado antes de começar a transmitir.

Outras funções da subcamada MAC são:

- Acesso ao canal dos dispositivos;
- Determinação do tipo de dispositivo da rede;
- Gerenciamento de energia com baixa complexidade;
- Transporte viável de dados com envio e reconhecimento dos quadros;
- Manutenção da rede associando e desassociando dispositivos.

No entanto, a subcamada MAC é dividida por duas seções ou subcamadas que se comunicam entre si como mostrado na Figura 2.8. A seção MCPC (MAC Common Part Layer) e a seção MLME (MAC Sub Layer Management Entity) que acessam respectivamente a camada física inferior pelo PD-SAP (Physical Data Service Access Point) e pelo PLME (Physical Layer Management Entity). O MLME gerencia todos os comandos, respostas, indicações e confirmações usadas para gerenciar uma PAN, enquanto o MCPS trata os comandos relacionados aos dados como requisição de dados, indicação de dados e confirmação de dados (IEEE 802.15.4, 2003).

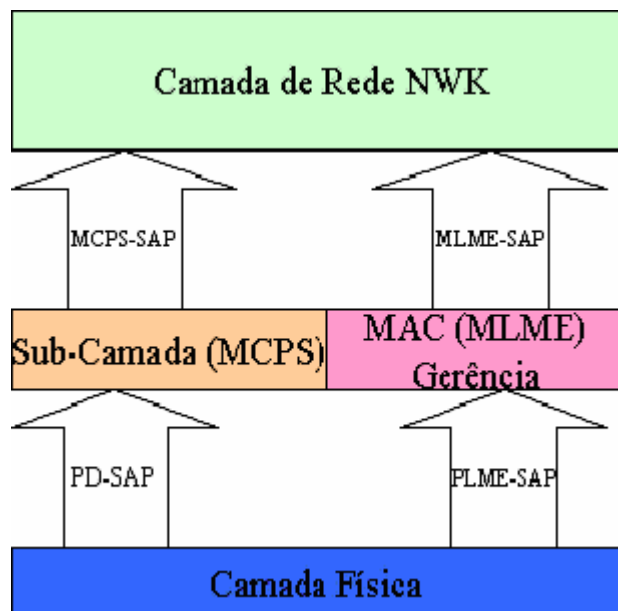


Figura 2.8 - Sub-divisões camada MAC (Vunda, 2005).

### 2.3.3.2 Camada Física

Esta camada é a responsável por permitir a transmissão e recepção dos pacotes através de ondas eletromagnéticas definindo como os dispositivos da rede se comunicam através do canal de comunicação sem fio.

A camada física foi projetada para acomodar as interfaces de baixo custo e utiliza técnica de transmissão de seqüência direta (DSSS), na qual os dados são transmitidos em várias frequências (canais) os mesmo tempo. Utiliza um canal na banda de 868 MHz, dez canais na banda de 915 MHz, e dezesseis canais na banda de 2.4 GHz, como mostrado na Figura 2.9.

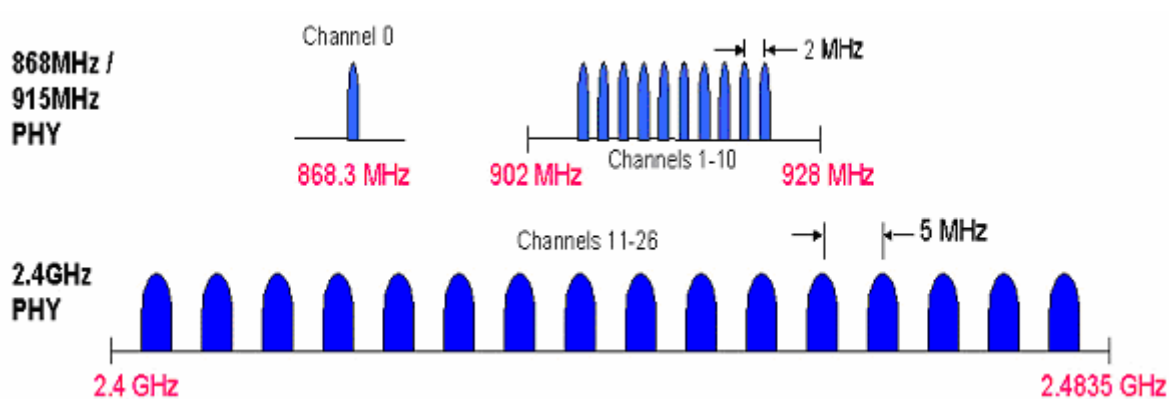


Figura 2.9 - Espectro da camada física.

Dependendo da frequência utilizada varia a velocidade de transmissão como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Velocidades de transmissão de cada faixa de frequências IEEE 802.15.4.

| Frequência | Kb/s |
|------------|------|
| 868 MHz    | 20   |
| 915 MHz    | 40   |
| 2.4 GHz    | 250  |



### 2.3.4 Dispositivos ZigBee e Topologias de Rede

Numa rede ZigBee podemos identificar dois dispositivos principais: O dispositivo de função completa FFD (Full Function Device) e o dispositivo de função reduzida RFD (Reduce Function Device).

- **FFD** : Este dispositivo pode ser utilizado como função de Coordenador ZigBee (ZC), ou como Roteador ZigBee (ZR). O coordenador contém toda a informação da rede para poder gerenciá-la, serve de ponte com outras redes para distribuir mensagens e armazena informações dos nós da rede. O roteador pode fazer intercâmbio de dados através de outros dispositivos, tem as características de um nó normal na rede, mas com capacidades extras para servir de intermediário entre nós. Por meio de um roteador uma rede ZigBee pode ser expandida, e assim ter um alcance maior.
- **RFD** : Geralmente se utiliza como dispositivo final (ZED - ZigBee End Device), sua função principal é coletar informações de variáveis por meio de sensores e permanecer em estado de *sleep* por longos períodos para diminuir seu consumo de energia.

A Figura 2.10 mostra as diferentes topologias utilizadas em redes ZigBee.

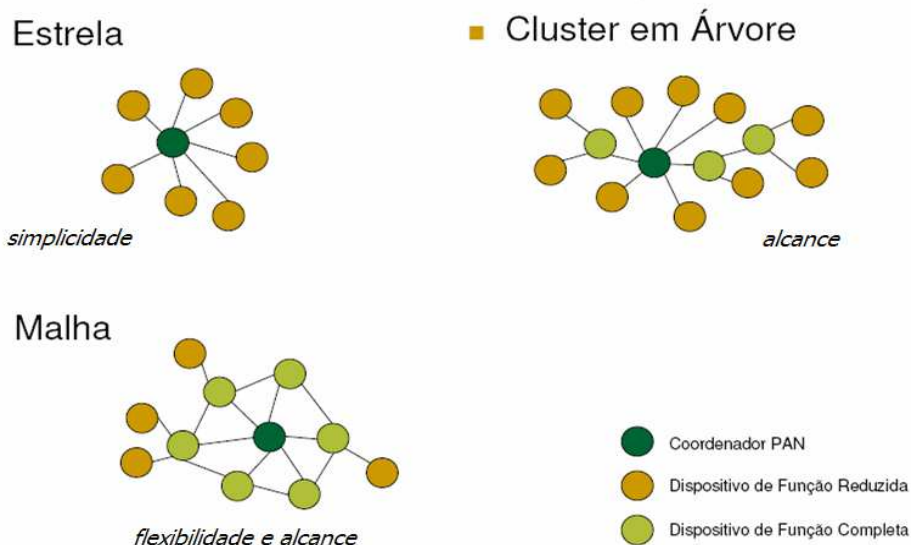


Figura 2.10 - Topologias de rede ZigBee ([www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)).

A camada de rede (NWK) do ZigBee suporta três tipos de topologia. Na topologia tipo estrela, a rede é controlada por um só dispositivo coordenador. O coordenador será responsável por manter os dispositivos de rede incluindo os dispositivos finais.

Nas topologias malha e estrela, o coordenador da rede Zigbee tem a tarefa de iniciar a rede e ter os parâmetros da rede, além de ficar supervisionando se a rede vai ser estendida com o uso de roteadores ZigBee. Em topologias do tipo árvore, os roteadores movem dados e controlam mensagens através do roteamento hierárquico.

## **2.4 OUTROS PROTOCOLOS SEM FIO**

As WLAN (Wireless Local Area Network) utilizam equipamentos os quais se comunicam entre si através de sinais de rádio. Essa característica torna as WLAN mais flexíveis permitindo uma maior mobilidade dentro de um prédio sem perder a conexão com a rede. Muitas tecnologias desenvolvidas procuraram focar o suporte para maiores taxas de dados com maior alcance, tendo um impacto direto nos requerimentos de potência, o que influencia no fator custo, tamanho e complexidade da rede.

Atualmente existem diversos padrões de comunicação sem fio, proprietários ou não. Duas ou mais tecnologias podem ocupar o mesmo ambiente e os usuários não precisam ficar “presos” a uma única solução.

### **2.4.1 Protocolo Bluetooth**

Bluetooth é um padrão de rede sem fio (IEEE 802.15.1) bem conhecido para aplicações de média taxa de dados. Trata-se de uma tecnologia de comunicação de pequeno alcance, planejada para substituir cabos e/ou dispositivos eletrônicos fixos. Suas características principais são robustez, baixa complexidade, baixa potência e tecnologia de baixo custo. Utiliza a banda de frequência ISM de 2.4 GHz, e o tipo de comunicação FH-CDMA (Frequency Hopping–Code Division Multiple Access) a qual fornece proteção, já que faz com que a frequência seja dividida em vários canais. O dispositivo que estabelece a conexão vai mudando de um canal para outro de maneira muito rápida, o que se conhece

como Frequency Hopping (Salto de Frequência), deste modo a largura de banda da frequência torna-se pequena. Bluetooth pode utilizar até 79 frequências ou 23 dependendo da faixa ISM adotada pelo país, sendo cada uma espaçada da outra por 1 MHz e utilizando pacotes de menor tamanho para sua transmissão. Um dispositivo se comunicando por Bluetooth pode tanto receber quanto transmitir dados (modo full-duplex). A transmissão é alternada entre slots para transmitir e slots para receber, isto é conhecido como FH/TDD (Frequency Hopping/Time-Division Duplex). Esses slots são canais divididos em períodos de 625  $\mu$ s. Cada salto de frequência deve ser ocupado por um slot, então em 1 segundo, tem-se 1600 saltos.

Neste padrão o alcance é em torno de 10 metros, podendo estendê-lo para 100 metros com um amplificador de potência. Ele pode transferir dados em uma taxa máxima de 1 Mbps. As especificações correntes definem Bluetooth como uma rede pequena chamada piconet, formada por sete dispositivos escravos e um coordenador mestre. Também algumas redes piconets podem ser unidas para formar uma grande rede (scatternets). Aplicações típicas incluem dispositivos inteligentes (PDAs, telefones celulares, PCs), periféricos de dados (mouses, teclados, joysticks, câmeras, impressoras) e periféricos de áudio (fones de ouvido, auto-falantes, receptores estéreo). A capacidade de transferência de dados é muito maior em Bluetooth, comparado com outras PAN, ela é capaz de transmitir áudio e gráficos sobre pequenas redes e fazer transferências de arquivos.

#### **2.4.2 Protocolo Wi – Fi**

O termo Wi-Fi (Wireless Fidelity) foi promulgado pela Wi-Fi Alliance, e é usado genericamente quando se refere a algum tipo de rede IEEE 802.11 /a/b/g. Para sua definição se utilizou como referência os protocolos da Ethernet convencional. O objetivo desta norma é apresentar uma especificação para o controle de acesso ao meio (MAC-Medium Access Control) para conexões sem fios entre estações fixas, portáteis e móveis dentro de uma área local.

IEEE 802.11 possui duas versões. A versão mais simples utiliza a tecnologia para alargamento de banda de salto de frequência FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), onde os canais transmitidos saltam por 79 frequências diferentes separadas por intervalos

de 1 MHz, varias vezes por segundo. Assim, mesmo que haja interferência em algumas frequências, as demais provavelmente estarão livres para comunicação. A taxa de comunicação chega a 1 Mbps. A outra versão é mais completa e utiliza a tecnologia para alargamento de banda de seqüência direta DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), onde os dados são transmitidos em várias frequências ao mesmo tempo juntamente com um sinal semelhante a um ruído aleatório. Esta técnica permite que os dados possam chegar ao destinatário com relativa segurança e com menor problema de interferência. O ruído é calculado de tal forma que possa ser eliminado depois da transmissão através de métodos semelhantes ao fenômeno de interferência destrutiva de ondas. A taxa de comunicação chega a 2Mbps (Miller, 2001; Torres, 2001).

Ao longo do tempo foram criadas várias extensões ao padrão IEEE 802.11 (Gast, 2002), onde foram incluídas novas características operacionais e técnicas. A Tabela 2.4 resume as principais extensões criadas com suas respectivas frequências e velocidades alcançadas.

Tabela 2.4 – Extensões do padrão IEEE 802.11

|                | 2.4 GHz | 5 GHz | 2 Mbps | 11 Mbps | 54 Mbps |
|----------------|---------|-------|--------|---------|---------|
| <b>802.11</b>  |         |       |        |         |         |
| <b>802.11b</b> |         |       |        |         |         |
| <b>802.11a</b> |         |       |        |         |         |
| <b>802.11g</b> |         |       |        |         |         |

### 2.4.3 Protocolo Wi-Max

Wi-Max, também chamado de Wi-MAX ou WiMAX, é um acrônimo para Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidade Mundial para Acesso por Microondas). Trata-se de uma tecnologia de banda larga sem-fio, capaz de atuar como alternativa a tecnologias como cabo e DSL na construção de redes comunitárias e provimento de acesso de última milha. Em teoria, espera-se que os equipamentos Wi-Max tenham alcance de até 50 Km e capacidade de banda passante de até 70 Mbps. Na prática, alcance e banda dependem do equipamento e da frequência usados, bem como da existência ou não de visada.

A tecnologia foi desenvolvida por várias empresas, liderada pela Intel e pela Nokia, com base na norma 802.16 da IEEE, estabelecida pelo grupo de trabalho em padrões de acesso sem-fio de banda larga (Working Group on Broadband Wireless Access Standards). Além de operar em uma ampla faixa de frequências de 2 a 66 GHz, as principais vantagens estão no tripé banda larga, longo alcance e dispensa de visada, o que não ocorre com outras tecnologias sem-fio. O Wi-Fi, por exemplo, baseado na IEEE 802.11, foi desenvolvido para funcionar em redes locais (LAN), tendo, portanto, curto alcance. Justamente o oposto do Wi-Max, que foi desenvolvido para funcionar em redes metropolitanas (Nicolitidis, 2003).

## **2.5 PROTOCOLOS PARA REDES DE AUTOMAÇÃO PREDIAL**

No mercado da automação industrial, muitos protocolos são utilizados e difundidos, entre eles Profibus, CAN, Fieldbus Foundation, cada um deles oferecendo características próprias de funcionamento nas diferentes aplicações (Belchor, 2007). Entretanto as redes de dados para sistemas de automação predial possuem certas dificuldades no desenvolvimento de protocolos de comunicação devido a fatores como a heterogeneidade das partes componentes de um sistema e o aumento constante de serviços para clientes, o que faz que cada sistema instalado seja personalizado com as necessidades do cliente e não com a necessidade de um sistema de automação predial. Esta idéia explica o surgimento de vários protocolos existentes no mercado da automação predial e, provavelmente, o surgimento de muitos outros no futuro próximo.

### **2.5.1 Protocolo BACnet**

BACnet (Building Automation and Control Network) é o termo comumente usado como referência pela ANSI/ASHRAE Standard 135-1995, adotada e suportada pela American National Institute (ANSI) e a American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). BACnet é um protocolo aberto de comunicação de dados não proprietário, concebido por um consórcio membros, usuários de sistemas e fabricantes.

Nas 600 páginas da especificação do protocolo está a descrição detalhada do funcionamento de um sistema BACnet. Esta identifica todas as regras para os componentes do sistema, como compartilhar dados entre eles, os meios de comunicação que podem ser utilizados, as funções que podem estar disponíveis e como a informação será interpretada. Em resumo coloca as regras de um jeito simples para que os sistemas possam se comunicar abertamente com outros indiferentemente do fabricante.

O modelo adotado pelo protocolo para descrever um sistema de automação e a relação entre os diferentes componentes é mostrado na Figura 2.11, este modelo está composto por:

- Objetos para representar o sistema de informação e a base de dados, com métodos para acesso das informações padronizadas e proprietárias;
- Serviços que permitem a um objeto acessar informações de outro objeto;
- LANs que permitem o transporte da informação através de vários tipos de redes e regras que permitem a construção de redes com diferentes tipos de LANs (*Internetworking*);
- Regras de interoperabilidade que forneçam mecanismos para que sistemas com componentes de diferentes fornecedores operem corretamente em conjunto, usando requisições padrão de serviço.

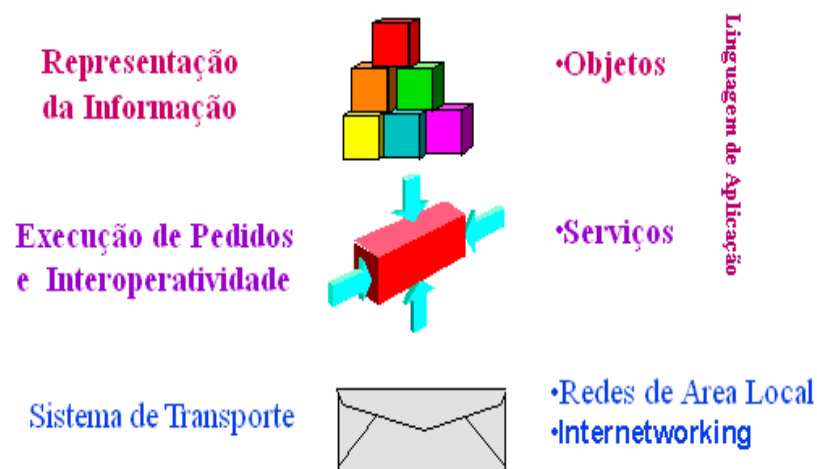


Figura 2.11 - Primitivas BACnet (www.bacnet.org).

### 2.5.1.1 Objetos BACnet

O modelo orientado a objetos para acesso e organização de dados do protocolo fornece um método mais robusto para ter controle, análise e modificação dos dados e interoperabilidade com diferentes tipos de informação em diferentes tipos de dispositivos, o que o torna independente de fornecedor e compatível com sistemas BACnet futuros.

Os objetos podem representar pontos físicos únicos ou agrupamentos lógicos ou conjuntos de pontos que desempenham uma função específica. Por exemplo, um objeto físico pode representar um dispositivo de entrada como um sensor de temperatura ou termostato, ou um dispositivo de saída como um ventilador ou bomba ou válvula posição. Os objetos também podem representar conceitos não-físicos como programa lógico, horários e dados históricos.

Todos os objetos em BACnet fornecem um conjunto de propriedades que são usados para obter informações a partir do objeto, ou dar informações e comandos de um objeto. A Tabela 2.5 mostra os objetos padronizados utilizados no BACnet (Swan, 1998).

Tabela 2.5 - Objetos padronizados do BACnet (Swan, 1998).

| OBJETO               | EXEMPLO DE USO  | OBJETO                    | EXEMPLO DE USO  |
|----------------------|---|---------------------------|---|
| <i>Analog Input</i>  | Entrada de um sensor  | <i>Event Enrollment</i>   | Descreve um evento que pode ser uma condição de erro ou um alarme que outro dispositivo de saber. Ele pode chamar um dispositivo ou usando um objeto <i>Notification Class</i> chamar múltiplos dispositivos. |
| <i>Analog Output</i> | Saída de um controlador   | <i>File</i>               | Permite acesso para ler e escrever arquivos de dados suportados pelo dispositivo.   |
| <i>Analog Value</i>  | <i>Setpoint</i> ou outro parâmetro de um controle analógico   | <i>Group</i>              | Fornecer acesso para múltiplas propriedades de múltiplos objetos em uma operação simples de leitura.  |
| <i>Binary Input</i>  | Entrada de um dispositivo tipo ON/OFF   | <i>Loop</i>               | Fornecer acesso padronizado para um " <i>control loop</i> ".  |
| <i>Binary Output</i> | Saída à relé  | <i>Multi-state Input</i>  | Representa o estado de um processo de múltiplos estado.   |
| <i>Binary Value</i>  | Parâmetro de controle binário (digital)   | <i>Multi-state Output</i> | Representa o estado desejado de um processo de múltiplos estado.  |
| <i>Calendar</i>      | Define uma lista de datas para agendamento.   | <i>Notification Class</i> | Contém a lista de dispositivos que devem ser informados por um objeto <i>Event Enrollment</i> sobre uma mensagem de alarme.   |
| <i>Command</i>       | Escreve múltiplos valores para múltiplos objetos em múltiplos dispositivos para atender um propósito específico (como um modo de emergência).                     | <i>Program</i>            | Permite que um programa possa ser iniciado, parado, carregado e descarregado e informa a situação atual do programa.  |
| <i>Device</i>        | Propriedades que informam que objetos e serviços o dispositivo suporta e outras informações específicas do dispositivo como fornecedor, revisão de firmware, etc. | <i>Schedule</i>           | Define um agendamento semanal de operações. Pode usar o objeto <i>Calendar</i> para tratar as exceções.   |

Cada objeto possui um conjunto de propriedades e é identificado por um código de 32 bits que faz com que sua identificação dentro de um dispositivo seja única. Todo objeto de um dispositivo BACnet sempre deve estar presente para fornecer as informações e suas capacidades a outros dispositivos da rede. A Tabela 2.6 mostra um conjunto de propriedades típicas em um objeto analógico de entrada (Analog Input Object).

Tabela 2.6 - Propriedades objeto analógico BACnet (Swan, 1998).

| PROPERTY          | BACnet   | EXAMPLE   | PROPERTY           | BACnet   | EXAMPLE  |
|-------------------|----------|---|--------------------|----------|--|
| Object_Identifier | Required | Analog Input #1                                   | Max_Pres_Value     | Optional | +300.0, maximum reliably read value                          |
| Object_Name       | Required | "AI 01"   | Resolution         | Optional | 0.1  |
| Object_Type       | Required | Analog Input                                      | COV_Increment      | Optional | Notify if Present_Value changes by increment: 0.5            |
| Present_Value     | Required | 68.0  | Time_Delay         | Optional | Seconds to wait before detecting out-of-range: 5             |
| Description       | Optional | "Outside Air Temperature"                         | Notification_Class | Optional | Send COV notification to Notification Class Object: 2        |
| Device_Type       | Optional | "10k Thermistor"                                  | High_Limit         | Optional | +215.0, Upper normal range                                   |
| Status_Flags      | Required | In_Alarm, Fault, Overridden, Out_Of_Service flags | Low_Limit          | Optional | -45.0, Lower normal range                                    |
| Event_State       | Required | Normal (vários estados para relatar problemas)    | Deadband           | Optional | 0.1  |
| Reliability       | Optional | No_Fault_Detected (várias condição de falhas)     | Limit_Enable       | Optional | Enable High-limit-reporting, Low-limit-reporting.            |
| Out_Of_Service    | Required | False   | Event_Enable       | Optional | Enable To_Offnormal, To_Fault, To_Normal change reporting.   |
| Update_Interval   | Optional | 1.00 (segundos)                                   | Acked_Transitions  | Optional | Flags indicating received acknowledgments for above changes. |
| Units             | Required | Degrees-Fahrenheit                                | Notify_Type        | Optional | Events or Alarms   |
| Min_Pres_Value    | Optional | -100.0, minimum reliably read value               |                    |          |  |

### 2.5.1.2 Serviços BACnet

Um serviço é um meio pelo qual um dispositivo adquire informações de um outro, comanda-o para realizar alguma tarefa ou anuncia para um ou mais dispositivos que algum evento ocorreu. Cada requisição de serviço (*service request*) enviada e cada confirmação de serviço (*service acknowledgment*) recebida torna-se um pacote de mensagem que é transferido através da rede, entre os dispositivos.

BACnet define 38 serviços e os classifica em cinco categorias, que são:

- *Alarm and event*: permite que os dispositivos comuniquem alarmes, mudanças de estado e outras condições de exceção;
- *File access*: permite aos dispositivos enviar e receber dados formatados tais como tendências históricas ou faça download de programas de controle;



- *Object access*: permite que os dispositivos leiam e modifiquem propriedades, criem e apaguem objetos, manipulem listas de dados e encontrem um objeto ou propriedade particular;
- *Remote device management*: permite que os dispositivos sejam controlados remotamente;
- *Virtual terminal services*: podem ser usados por um operador para estabelecer uma conexão baseada em texto bidirecional com programa de aplicação executando em um dispositivo remoto.

Cada dispositivo implementa os serviços adequados a sua função e a sua complexidade.

### 2.5.1.3 Redes Locais

A visão do BACnet tem sido gerar um sistema que forneça completamente a interoperatividade entre diferentes fabricantes de produtos de automação e controle. Alcançando esse objetivo, o comitê de BACnet definiu as normas para dados BACnet, controle e funções de comunicação. Em parte isso foi feito definindo vários tipos de redes de área local (LAN's) onde poderiam transmitir-se as mensagens BACnet.

Esta variedade de LANs define uma série de opções para qualquer projeto dado. Na Tabela 2.7 pode-se observar as características, vantagens e desvantagens de cada uma dessas redes.

Tabela 2.7 - Comparativo entre LANs BACnet.

| LAN                                       | custo por nó | velocidade   | vantagens  | desvantagens  |
|---|--------------|--------------|--|---|
| <b>Ethernet</b>                           | alto         | 10-100Mbps   | Padrão internacional (ISO8802-3)<br>Já existe na maioria dos prédios<br>Variedade de meios (UTP, coaxial, fibra ótica)<br>Velocidade alta<br>Interface fácil com PCs<br>Não necessita ferramentas de desenvolvimento especiais | Limitações de distância<br>Não determinístico   |
| <b>ARCNET</b>                             | médio        | 150K-7.5Mbps | Padrão ANSI<br>Resposta determinística<br>Velocidade escalável<br>Variedade de meios (UTP, coaxial, fibra ótica)<br>Velocidade alta<br>Não necessita ferramentas de desenvolvimento especiais                                  | Chip de um único fornecedor<br>Custo alto<br>Limitações de distância  |
| <b>MS/TP (master-slave/token-passing)</b> | baixo        | 9.6K-76Kbps  | Padrão ANSI<br>Baixo custo<br>Pode ser implementada em um único microprocessador<br>Resposta determinística  | Um único meio (EIA-485)<br>Velocidade limitada  |
| <b>PTP point-to-point</b>                 | baixo        | 9.6K-56Kbps  | Única escolha para rede discada<br>Especialmente desenvolvida para aplicações ponto a ponto<br>Trabalha com modems padrão (V.32bis, V.42)  | Somente conexão ponto a ponto<br>Velocidade limitada  |
| <b>LonTalk</b>                            | Médio-baixo  | 32K-1.25Mbps | Padrão ANSI<br>Variedade de meios (UTP, coaxial, fibra ótica RF, IR)<br>Velocidade escalável   | Não determinístico<br>Limitações de distância<br>Chip de um único fornecedor<br>Necessita ferramentas de desenvolvimento especiais<br>Tamanho da aplicação limitado |

## 2.5.2 Arquitetura do protocolo BACnet

O protocolo BACnet está baseado na versão do modelo de referência OSI de sete camadas. A Figura mostra a correspondência entre componentes BACnet e sua posição no modelo OSI. A camada de apresentação, seção e transportes é implementada na camada de aplicação do BACnet ou eliminada completamente, uma vez que não é necessária para aplicações BACnet.

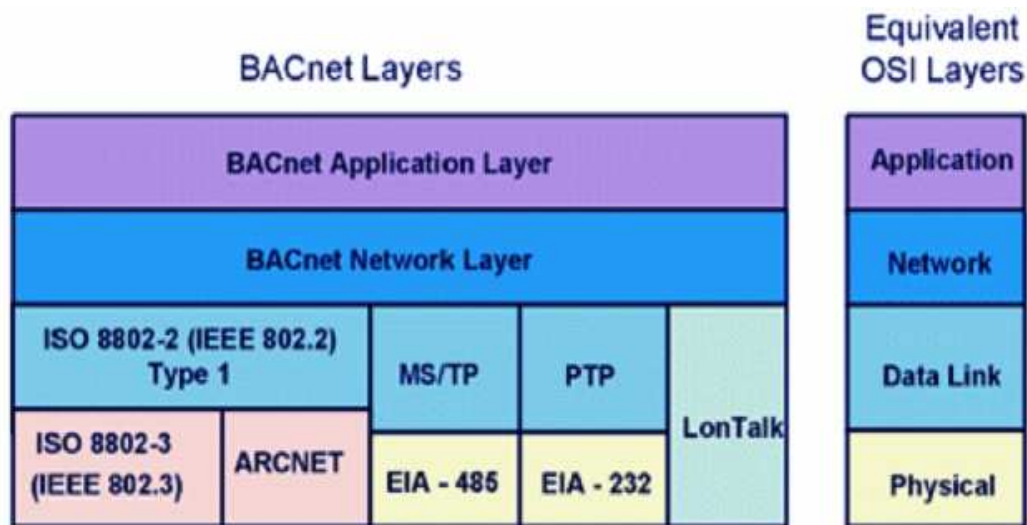


Figura 2.12 - Camadas Protocolo BACnet (Bushby, 1997).

- A camada Física e de enlace de dados BACnet oferece opções englobando as duas camadas. A camada física define a capacidade de desempenho médio do sinal elétrico, ao mesmo tempo em que a camada de enlace regula o acesso médio e o pacote de dados subjacentes para o meio físico.
- A camada de rede proporciona os meios através dos quais as mensagens podem ser trocadas de uma rede BACnet para outra, independentemente da tecnologia de dados BACnet em uso na rede. O BACnet simplifica o problema de roteamento ao declarar que há exatamente um caminho entre quaisquer dois nós ativos na rede. O BACnet suporta internetworking e, por isso, provê a tradução do endereço local, global, tradução da rede e sequenciamento de pacotes.
- A camada de aplicação fornece aplicações de acesso para tipos de dados BACnet, os quais são definidos nos Tipos de Objetos BACnet.

### 2.5.2.1 Rede MS/TP

Master-Slave/Token-Passing (MS/TP), é um tipo de LAN (Local Area Networks) em que BACnet pode transmitir suas mensagens. Este protocolo é o mais comumente utilizado para estabelecer a comunicação entre os níveis de campo dos dispositivos BACnet. MS/TP foi desenvolvido para trabalhar usando circuitos integrados ou microcontroladores com a UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Este tipo de LAN usa a sinalização EIA-485 sobre uma linha de par trançado. Além do mais, é uma opção de LAN de baixo custo. O nome é baseado no fato de que MS/TP pode ser configurado como uma rede Mestre/Escravo (Master/Slave), uma rede ponto a ponto de passagem de sinal (token passing), ou uma mistura das duas. MS/TP suporta taxas de transmissão de 9.6, 19.2, 38.4 e 76.8 Kbps.

Os nós mestres MS/TP controlam a passagem do token que regula o acesso ao meio. O token vai circulando de um nó mestre a outro segundo uma ordem predeterminada baseada nos endereços. O nó mestre que mantém o token pode transmitir mensagens até do `Nmax_info_frames` a qualquer outro mestre ou escravo antes de passar o token. `Nmax_info_frames` é um parâmetro de rede que pode ser fixado pelo projetista do sistema. Depois de receber o token 50 vezes, o nó mestre transmite um frame `Poll_For_Master` em ordem para descobrir a presença de outros nós mestres na rede que desejam entrar no anel. Se algum nó é encontrado, este se converte em um novo nó sucessor no anel de passagem (token ring). Se o sucessor já é o novo endereço disponível então este passo é omitido.

O espaço de endereçamento é dividido entre mestres e escravos. Pode se ter no máximo 128 mestres e seu endereçamento estará entre a faixa de 0 a 127. Escravos podem ter qualquer endereçamento na faixa de 0 a 254. Conseqüentemente pode-se ter no Máximo 255 dispositivos MS/TP em uma rede simples. O número de mestres e escravos são configuráveis e sujeitos à limitação de não mais que 128 mestres.

Os nós escravos nunca podem segurar o token, eles só retornam a resposta quando recebem um pedido do nó mestre. O nó mestre que recebe o pedido retorna a resposta imediatamente ou retorna um frame `Reply_Postponed`, indicando que a atual resposta será reenviada quando este possuir o token novamente.

A Tabela 2.8 resume os parâmetros mais importantes das redes MS/TP (Song, W.S., Hong, S.H. e Bushby, S.T., 2003). Também mostra os limites dos valores definidos na norma.

Tabela 2.8 - Parâmetros importantes de uma rede tipo MS/TP (Song, 2003).

| Parameter                | Description  | Specified Limits  | Typical Value |
|--------------------------|--|---|---------------|
| $N_{\max\_info\_frames}$ | The maximum number of information frames a node may send before it must pass the token.  | User defined<br>(If not writable, its value shall be 1) | 8 to 200      |
| $T_{frame\_gap}$         | The maximum idle time a transmitting node may allow to elapse between octets of a frame.   | 20 bit times  | 0 bit times   |
| $T_{turnaround}$         | The Minimum time after the end of the stop bit of the final octet of a received frame before a node may enable its EIA to 485 driver.                | 40 bit times  | 40 bit times  |
| $T_{usage\_delay}$       | The maximum time a node may wait after reception of the token or a Poll For Master frame before sending the first octet of a frame.                  | 15 msec   | 40 bit times  |
| $T_{reply\_delay}$       | The maximum time a node may wait after reception of a frame that expects a reply before sending the first octet of a reply or Reply Postponed frame. | 250 msec  | 40 bit times  |

### 2.5.2.2 Atrasos em BACnet/MSTP

Nas redes para sistemas de automação predial, vários tipos de dados de monitoração, controle, manutenção e gerenciamento são transmitidos na rede, sendo que, se os atrasos que vão apresentando estes dados na circulação pela rede ultrapassarem pré-determinados limites, os sistemas de automação predial que requerem controle e operação em tempo real (real-time) não poderão satisfazer seu desempenho e requerimentos funcionais (Song, W.S., Hong, S.H. e Bushby, S.T., 2003).

O desempenho de uma rede Bacnet é avaliado em termos de atraso no serviço (service delay). Atraso no serviço é definido como o lapso de tempo para completar uma transação de um serviço BACnet. Para um serviço de confirmação BACnet (BACnet confirmed service), o atraso do serviço é definido desde o instante quando a mensagem de pedido chega à fila do transmissor do cliente até o instante quando a mensagem de resposta transmitida pelo servidor chegou completamente à fila do receptor do cliente, conforme a Figura 2.13. Para um serviço sem confirmação BACnet (BACnet unconfirmed service), o

atraso é definido desde o instante quando a mensagem chega à fila do transmissor do cliente até o instante quando a mesma mensagem chegou completamente à fila do receptor do servidor.

A relação do atraso para uma serviço de confirmação BACnet está dada pela equação:

$$T_{\text{ATRASO}} = T_{\text{TX}} + T_{\text{RX}} + T_{\text{PROCESSAMENTO}} \quad (2.1)$$

Em que,

$T_{\text{TX}}$  = tempo quando a mensagem de pedido sai do Tx do cliente e chega ao Rx do servidor.

$T_{\text{RX}}$  = tempo quando a mensagem de resposta sai do Tx do servidor e chega ao Rx do cliente.

$T_{\text{PROCESSAMENTO}}$  = tempo que demora o device em processar a pilha do protocolo BACnet.

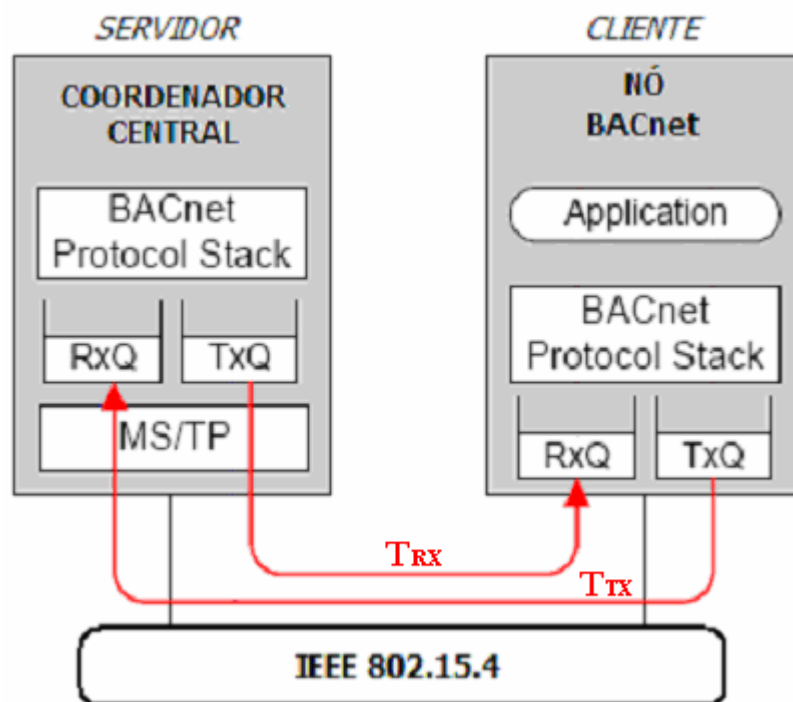


Figura 2.13 - Atraso para serviço de confirmação em BACnet/IEEE802.15.4.

## **2.6 QUALIDADE DA TRANSMISSÃO**

Nas redes de sensores sem fio (RSSF) parâmetros como o consumo de energia, qualidade do enlace e perda de pacotes se convertem em objetivos de estudo para que estas novas tecnologias se tornem viáveis. Para ter um gerenciamento eficiente da energia e garantir que o ambiente onde interagem as redes não vai influenciar o desempenho e a robustez na administração dos dados, é preciso dispor de um conhecimento prévio da qualidade dos enlaces entre os dispositivos que fazem parte da rede.

A qualidade e confiabilidade do enlace de comunicação e a propagação das ondas de rádio nas redes de sensores sem fio podem ser afetadas consideravelmente pelas condições ambientais e climáticas do lugar onde propaga a rede, além do número de nós, interferências, distância e atenuação do sinal por diferentes materiais encontrados dentro dos prédios.

### **2.6.1 Nível da Intensidade do Sinal Recebido ( RSSI )**

O conhecimento da potência do sinal eletromagnético recebido pelo rádio é de primordial importância em uma RSSF. Conhecendo este parâmetro podemos identificar a qualidade da ligação entre os nós sensores, a determinação da localização espacial dos nós e a coordenação do acesso ao canal de comunicação (Giacomin, J. C. 2006).

O indicador do nível do sinal recebido RSSI (Receive Signal Strength Indicator) é uma medida que mostra a força do sinal de rádio entrante ou recebido. É uma métrica genérica presente nos receptores de rádio comuns, tipicamente é invisível ao utilizador do receptor de rádio, mas bastante relevante para utilizadores de tecnologias de redes sem fio. O circuito básico é desenvolvido para encontrar sinais de radiofrequência (RF) e gerar uma saída proporcional à intensidade do sinal. A capacidade do receptor para encontrar o mais débil dos sinais de RF é referenciado como a sensibilidade do receptor. A sensibilidade do receptor decide quão forte e claro deve ser o sinal para que o receptor interprete corretamente a informação.

## 2.6.2 Taxa de Erro de Pacotes ( PER )

Packet Error Rate (PER) é um parâmetro utilizado para conhecer o desempenho e qualidade do serviço (QoS-Quality of service) em redes sem fio na transmissão dos dados (Khalili, R. e Salamatian, K, 2003). A PER pode ser definida como a fração de pacotes enviados e que foram recebidos corretamente pelo destinatário em uma janela temporal concreta. Além do mais, em relação a esse parâmetro se pode definir a taxa de erro de pacotes como a fração do tráfego transmitido o qual não é entregue corretamente em certo intervalo de tempo. Em alguns casos a PER é analisada a partir da taxa de erro de bit BER (Bit Error Rate) e o tempo da colisão. A BER é obtida a partir dos sinais de interferência e a relação sinal ruído SINR (Signal Interference Noise Ratio). O tempo de colisão é definido como o tempo em que um pacote de um tipo de tecnologia, neste caso sem fio, experimenta uma interferência com outra do mesmo tipo e trabalhando ao mesmo tempo. Por exemplo, para obter a interferência na banda de potência de rádio para IEEE 802.11 quando trabalha sobre IEEE 802.15.4, se calcula a densidade espectral de potência do IEEE 802.11 e o offset da frequência. O offset da frequência pode ser definido como a diferença entre os centros de frequência do IEEE 802.11 e do IEEE 802.15.4.

A PER é calculada pela equação:

$$PER = \frac{\text{Número de pacotes perdidos}}{\text{Número total de pacotes}} \quad (2.2)$$

Um incremento no valor da PER é uma perda de informação na transmissão dos pacotes. A taxa de erro em um nó pode diminuir se a potência de transmissão é incrementada para uma distância de separação fixa. Ao aumentar a distância entre nós a uma potência de transmissão fixa, a taxa de erro de pacotes deve aumentar. Para avaliar o êxito na entrega dos pacotes nas RSSF, deve-se levar em conta o tipo de aplicação para a qual a rede foi projetada e os requerimentos do projeto.

### 3. DEVICE BACNET/IEEE 802.15.4 LAVSI/UNB

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Um device BACnet se define segundo a norma BACnet (ANSI/ASHRAE, 2004.), como qualquer dispositivo real ou virtual, que suporta uma comunicação digital utilizando o protocolo BACnet. O dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 LAVSI/UnB é uma nova proposta que utiliza um meio de transmissão sem fio (IEEE 802.15.4), diferente dos meios de transmissão com fio convencionais com que trabalha BACnet (Brito, M.V. e Silva R.P.F, 2009). A Figura 3.1 exibe esta nova implementação dentro do contexto da arquitetura do protocolo BACnet.

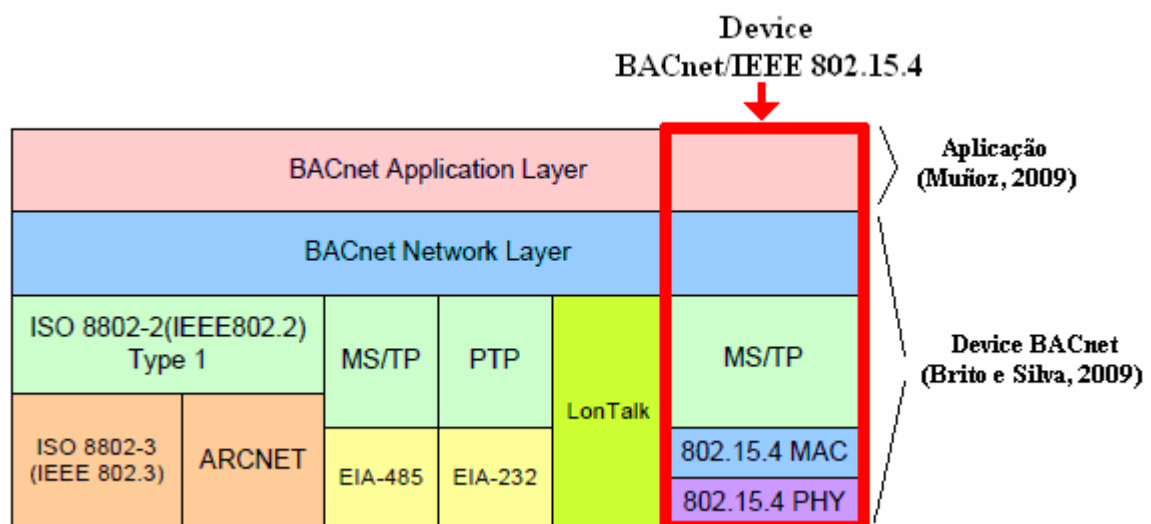


Figura 3.1 – Device BACnet/IEEE 802.15.4 no contexto da arquitetura BACnet

O sistema é composto por dois elementos principais, o primeiro elemento é o dispositivo (Device) ou nó BACnet/IEEE802.15.4. Este dispositivo é constituído internamente por dois grandes blocos, o primeiro é o bloco composto pelo microcontrolador Atmel ATmega32L com seu firmware de gerenciamento e processamento da pilha do protocolo BACnet. Os recursos da pilha são utilizados para a descrição das propriedades e funções dos objetos que fazem parte do dispositivo. A função principal deste bloco será entregar pacotes BACnet prontos com formatação no padrão de comunicação MS/TP, que serão entregues ao segundo bloco.



O segundo bloco do dispositivo é a parte da comunicação sem fio a qual utiliza o padrão IEEE 802.15.4 do módulo XBee da empresa Digi International Inc para sua comunicação RF (Rádio Frequency) no envio dos dados. Este bloco cumpre a função de transmitir os pacotes BACnet tipo MS/TP a seu destino em formatação IEEE 802.15.4 para depois serem processados. A Figura 3.2 mostra o diagrama dos nós no sistema implementado.

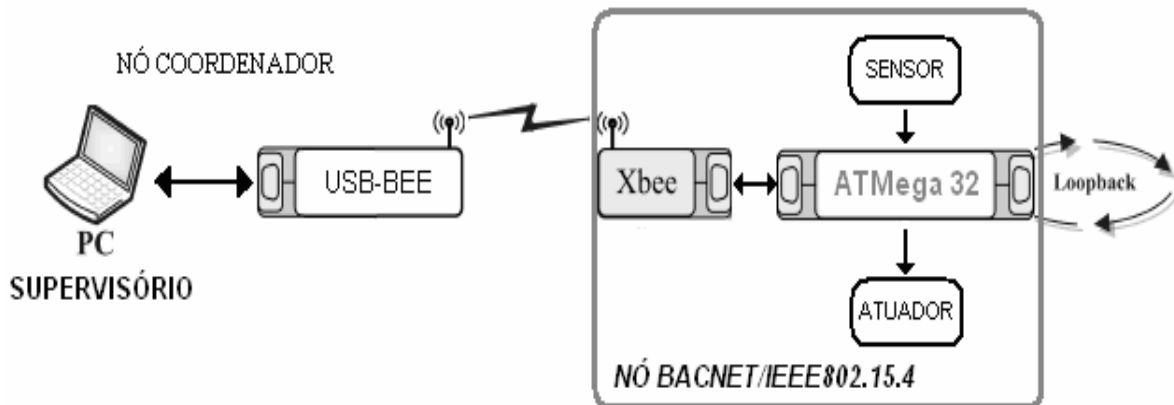


Figura 3.2 - Nós do Sistema BACNET/IEEE 802.15.4

O outro elemento que faz parte do sistema é a placa CON-USBBEE, Figura 3.3. Ela converte a interface serial 3.3 volts do módulo XBee para USB (Universal Serial Bus), com uma taxa de dados da interface (Data Rate) máxima de 115.200 bps e a uma taxa máxima de 250.000 bps para dados via RF. Esta placa possui um módulo XBee series 1, Tabela 3.1, e trabalha ligada a um computador onde tem como função receber os pacotes enviados pelos nós BACnet/IEEE802.15.4 para depois serem processados e analisados mediante softwares de supervisão.



Figura 3.3 - CON-USBEE (www.rogercom.com).

Tabela 3.1 – Características XBee Series 1 (Digi International Inc).

| Platform                       | XBee® 802.15.4 (Series 1)                 |
|--------------------------------|---|
| <b>Performance</b>             |   |
| RF Data Rate                   | 250 kbps                                  |
| Indoor/Urban Range             | 100 ft (30 m)                             |
| Outdoor/RF Line-of-Sight Range | 300 ft (100 m)                            |
| Transmit Power                 | 1 mW (+0 dBm)                             |
| Receiver Sensitivity (1% PER)  | -92 dBm                                   |
| <b>Features</b>                |   |
| Serial Data Interface          | 3.3V CMOS UART                            |
| Configuration Method           | API or AT Commands, local or over-the-air |
| Frequency Band                 | 2.4 GHz                                   |
| Interference Immunity          | DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)    |
| Serial Data Rate               | 1200 bps - 250 kbps                       |
| ADC Inputs                     | (6) 10-bit ADC inputs                     |
| Digital I/O                    | 8   |
| Antenna Options                | Chip, Wire Whip, U.FL, & RPSMA            |
| <b>Power Requirements</b>      |   |
| Supply Voltage                 | 2.8 - 3.4VDC                              |
| Transmit Current               | 45 mA @ 3.3VDC                            |
| Receive Current                | 50 mA @ 3.3VDC                            |
| Power-Down Current             | <10 uA @ 25° C                            |

Um programa utilizado é o chamado X-CTU fornecido pela Digi International Inc, onde é possível através deste fazer a configuração e os testes dos módulos XBee, como exibe a Figura 3.4. Ele possui uma ferramenta chamada Range Test, onde se pode verificar a resposta do pacote dentro de um prazo de tempo especificado, além do mais, fornece os parâmetros necessários para conhecer o desempenho da comunicação entre dois rádios (RSSI e PER).

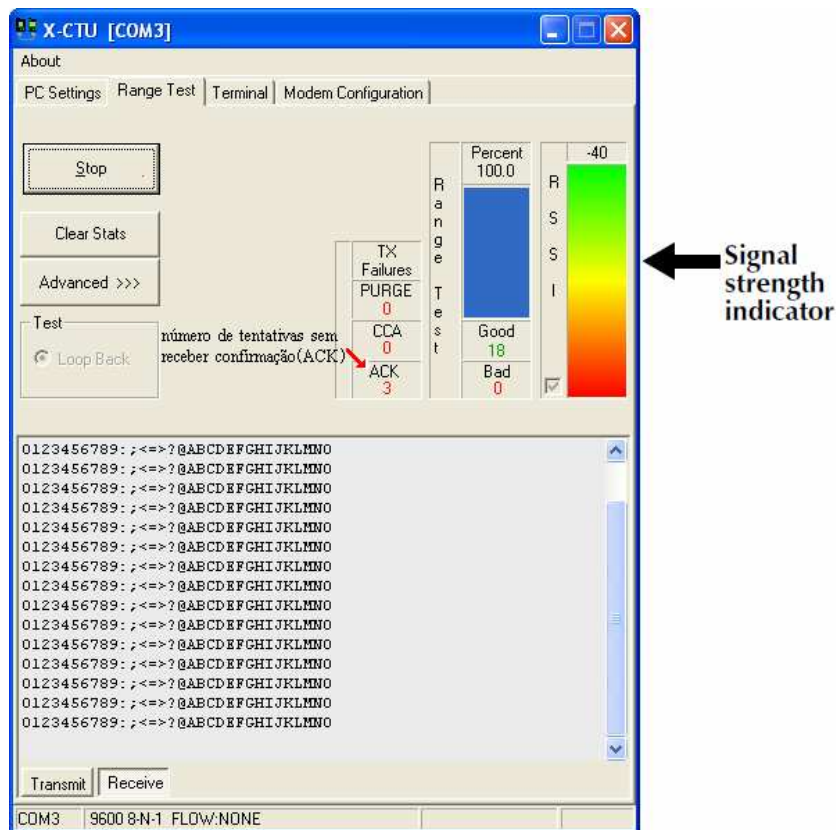


Figura 3.4 – Software X-CTU.

Um segundo programa que foi utilizado é o CAS BACnet Explorer da Chipkin Automation Systems, Figura 3.5. Este programa foi desenvolvido para explorar, testar e depurar redes e dispositivos BACnet, onde por meio de variadas ferramentas se pode conhecer as propriedades dos objetos implementados no dispositivo BACnet/IEEE802.15.4, além do mais, pode-se obter informação dos valores atuais das entradas e saídas do dispositivo e também pode-se gerar um relatório do atual funcionamento do dispositivo BACnet.

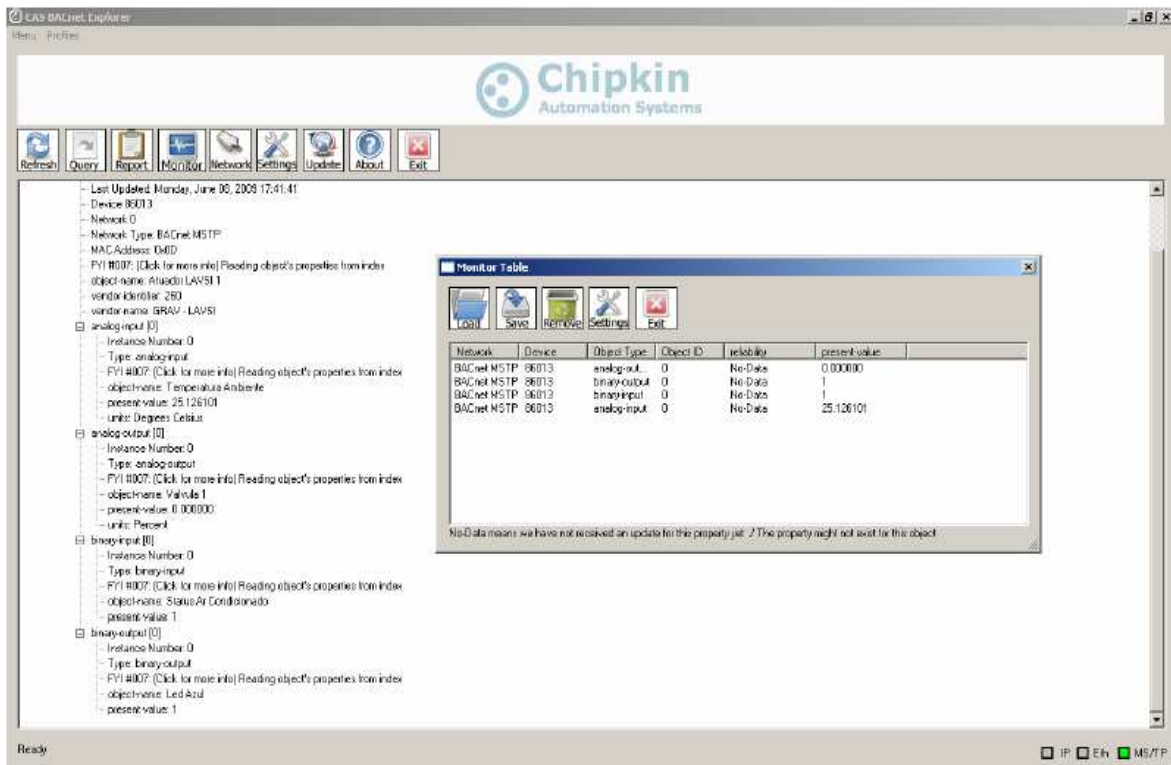


Figura 3.5 – Software CAS BACnet Explorer.

### 3.2 DEVICES BACNET/IEEE 802.15.4 IMPLEMENTADOS

Foram implementados dois tipos de dispositivos BACnet/IEEE802.15.4, um do tipo nó sensor, outro do tipo nó sensor/atuador. Estes nós BACnet/IEEE802.15.4 ao trabalharem em uma topologia de rede formam um tipo de barramento sem fio, o qual se liga a um nó do tipo coordenador, onde ocorre o processamento e análise dos pacotes transmitidos. A Figura 3.6 mostra o modelo dos nós BACnet trabalhando no mesmo ambiente.

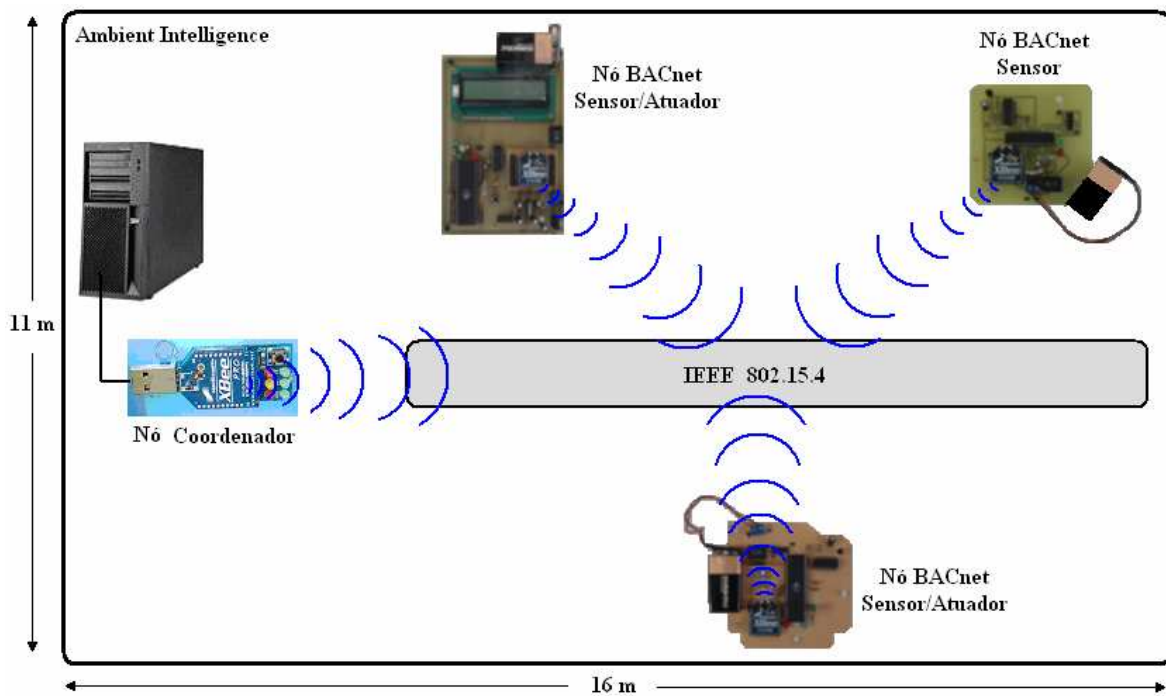


Figura 3.6 – Topologia sem fio BACnet/IEEE 802.15.4

### 3.2.1 Parâmetros do Device BACnet/IEEE802.15.4

Partindo do princípio dos sistemas embarcados, o desenvolvimento de cada um dos dispositivos BACnet/IEEE802.15.4 foi definido só para mostrar a funcionalidade necessária da rede de sensores sem fio proposta, definindo assim os tipos de objetos, serviços e o meio de comunicação que iriam ter. A Tabela 3.2 descreve os parâmetros utilizados para os dispositivos BACnet implementados e cada um dos respectivos microcontroladores utilizados.

Tabela 3.2 – Parâmetros dispositivos BACnet/IEEE802.15.4

| Tipo Device BACnet/IEEE802.15.4  | Objetos BACnet | Serviços BACnet                                 | Meio de Comunicação | Plataforma    | Requerimento MemóriaFlash   |
|--|----------------|---|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Sensor   | AI             | I-Am<br>Who-Is<br>ReadProperty                  | Sem fio<br>802.15.4 | Atmega<br>168 | 15808 bytes<br>(96.5% Full) |
| Sensor/Atuador   | AI<br>BO<br>BI | I-Am<br>Who-Is<br>ReadProperty<br>WriteProperty | Sem fio<br>802.15.4 | Atmega<br>32L | 25002 bytes<br>(76.3% Full) |
| AI: Analog Input, BI: Binary Input, BO: Binary Output, MS/TP: Master-Slave/Token-Passing |                |   |                     |               |                             |

A Figura 3.7, mostra a distribuição física do dispositivo BACnet e os componentes implementados no nó tipo Sensor/Atuador BACnet/IEEE802.15.4.

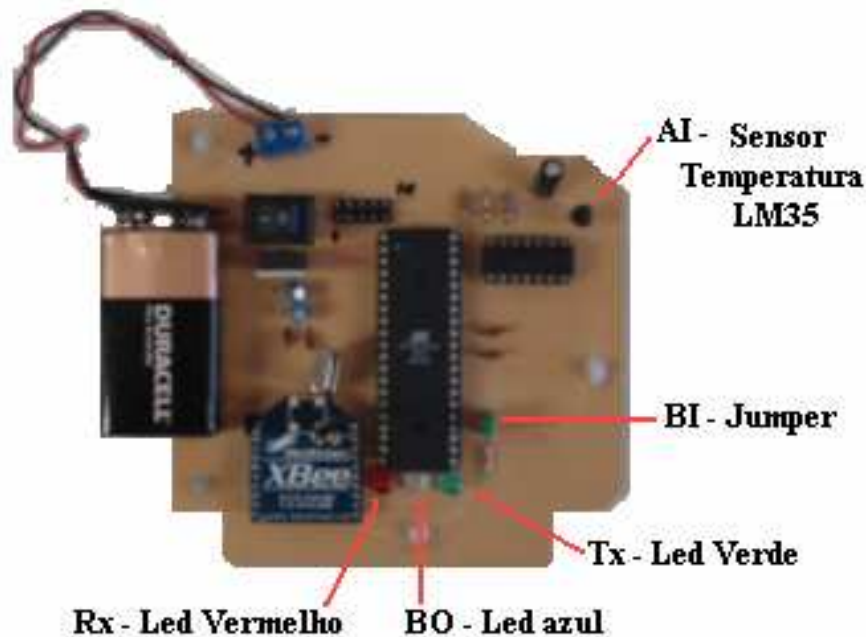


Figura 3.7 – Disposição física dos componentes BACnet/802.15.4 LAVSI/UnB.

### 3.2.1.3 Data Link Layer MS/TP

Em cada ciclo de atividades do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 se faz a chamada das funções de inicialização que configuram o controlador, configurando desta maneira os registradores de I/O e os LED's sinalizadores, além de chamar a função que configura os registradores de timer. Então a função para setar o valor do baud\_rate é chamada, sendo que esta chama a função de inicialização do RS-485, configurando seus registradores para iniciar a comunicação no padrão MS/TP. Outras funções são implementadas para configurar o máximo endereço que um nó master pode ter, em seguida atribui-se o número máximo de frames de informação que um nó pode enviar, também, mediante a função Poll\_for\_master, o dispositivo incrementa o endereço de destino à procura de algum mestre na rede, outras funções MS/TP configuradas são apresentadas na Tabela 3.3. Os dispositivos BACnet executam suas funções segundo o modo de operação, a máquina de estados finitos define o modo em que MS/TP trabalha, seja no modo Master, ou no modo Receive.

A Figura 3.8 exibe a máquina de estados do dispositivo BACnet no modo Receive.

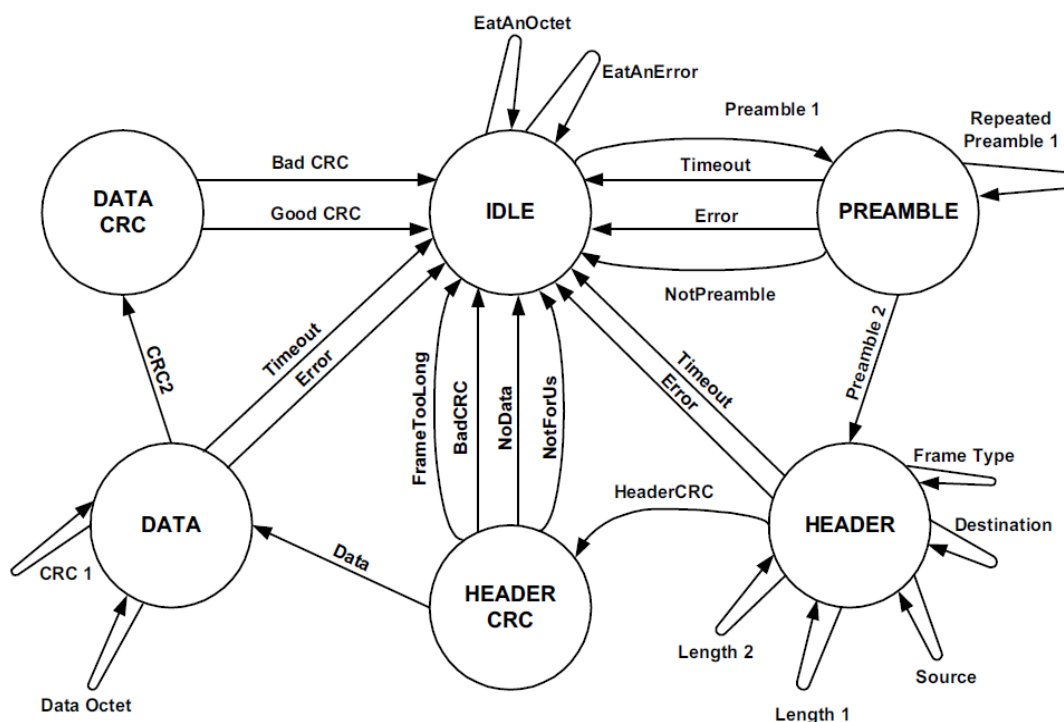


Figura 3.8 – Máquina de estados modo receive MS/TP. (ANSI/ASHRAE, BACnet, 2004)

O chamado das diferentes funções depende dos objetos que possuem cada dispositivo BACnet, por exemplo, no caso de se ter um AI (Sensor LM35) são feitas as chamadas das funções de leitura, conversão A/D (Análogica/Digital) e atribuição de valor à variável de temperatura lida.

Tabela 3.3 – Parâmetros MS/TP dispositivo BACnet/IEEE802.15.4.

| Parâmetros MS/TP | Descrição   | Valor |
|------------------|---|-------|
| Nmax_info_frames | Número máximo de frames de informação que o nó pode enviar, antes de passar o token.                                | 1     |
| Tframe_gap       | Máximo tempo de inatividade permitido que pode transcorrer no envio entre os octetos do frame do nó que transmite.  | 20 ms |
| Tturnaround      | Tempo mínimo depois da chegada do bit de parada do frame recebido antes que o nó permita a operação de seu EIA 485. | 40 ms |

|                |   |        |
|----------------|---|--------|
| Tusage_delay   | Máximo tempo que o nó pode esperar depois da recepção do token ou a captação de um mestre antes de enviar o primeiro octeto do frame.   | 15 ms  |
| Treply_delay   | Tempo máximo em que o nó pode esperar depois da recepção do frame que espera uma resposta antes de enviar o primeiro octeto de uma resposta, ou responder frame adiado.               | 250 ms |
| Tno_token      | Tempo sem algum evento de Dados Disponíveis (DataAvailable) ou Recepção de Erros (ReceiverError), antes da declaração da perda do token.  | 500 ms |
| Treply_timeout | Tempo mínimo sem algum evento de DataAvailable ou ReceiveError, que o nó deve esperar para que alguma estação comece a responder a uma confirmação de pedido.                         | 295 ms |
| Tusage_timeout | Tempo mínimo sem algum evento de DataAvailable ou ReceiveError, que um nó deve esperar para que um nó remoto comece a utilizar o token ou responda a uma captação de um frame mestre. | 95 ms  |
| Nretry_token   | Número de tentativas no envio do token.   | 1      |
| Npoll          | Número de tokens recebidos ou utilizados antes de uma captação para um ciclo de mestre que é executado.   | 50     |
| Tframe_abort   | Tempo mínimo sem algum evento de DataAvailable ou ReceiveError dentro de um frame antes de que o nó possa receber um frame descartado.  | 95 ms  |
| Tslot          | A largura da faixa de tempo em que um nó pode gerar um token.   | 10 ms  |

No próximo capítulo serão apresentados e descritos os diferentes cenários experimentais utilizados para testar o desempenho e robustez dos dispositivos BACnet/IEEE 802.15.4 desenvolvidos.



## 4. REDE DE SENSORES SEM FIO IMPLEMENTADA

A rede implementada está baseada no princípio de controle de um *Ambient Intelligence* (Ambiente Inteligente), visando o melhor nível de conforto térmico para o usuário. A rede sem fio possui tanto nós sensores como nós atuadores e toda a informação da rede é centralizada em um software supervisor. A Figura 4.1 mostra a distribuição geral e os elementos que compõe o espaço da rede sem fio do LAVSI (Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes), do LARA (Laboratório de Robótica e Automação), e do LCVC (Laboratório de Controle e Visão por Computador), laboratórios que atualmente encontram-se fusionados em um só com o nome de LAC (Laboratório de Automação e Controle), localizados na Universidade de Brasília (SG-11).

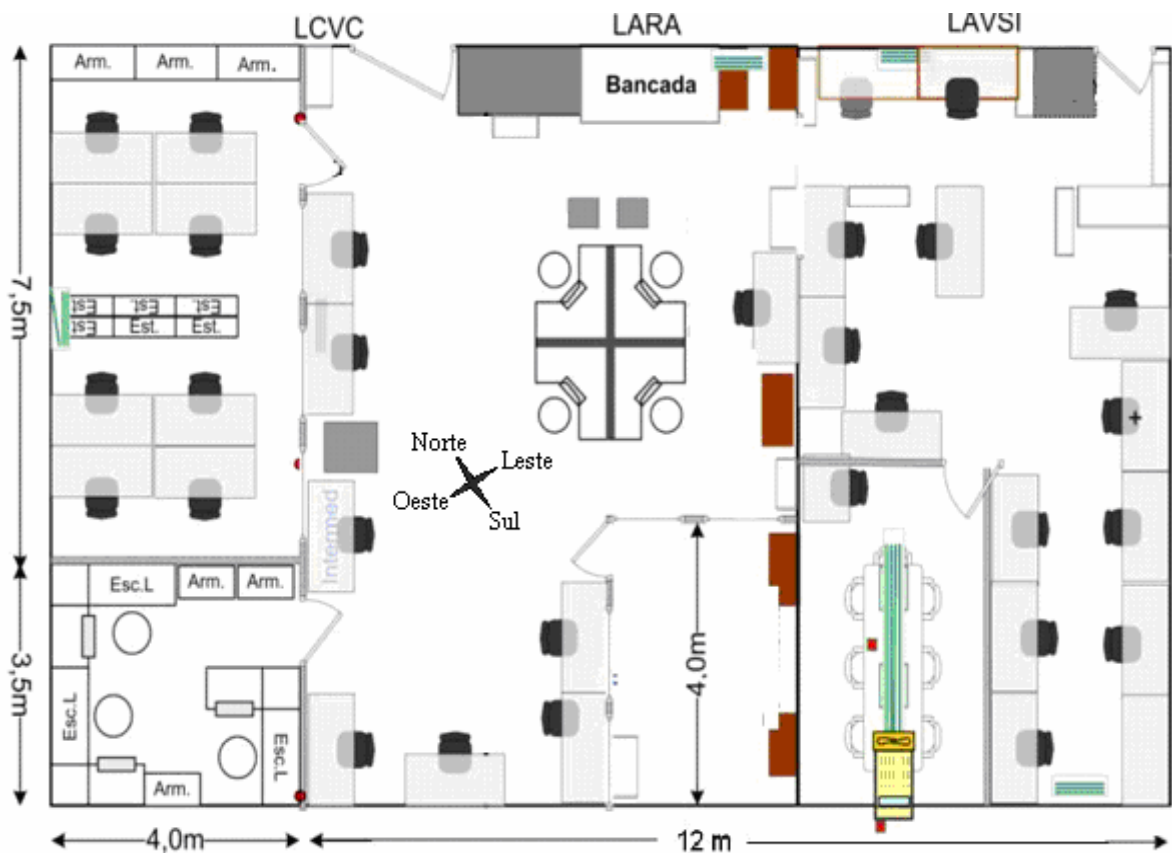


Figura 4.1- Ambiente da rede sem fio do LAC.

#### 4.1 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS EXPERIMENTAIS PARA OS TESTES

O desempenho e comportamento dos sistemas de rádio são afetados constantemente pelas interferências de outras tecnologias sem fio do ambiente onde trabalham, pela variação da altura e da distância entre os módulos, além da presença de obstáculos de diferentes materiais. Devido a estes fatores se fazem necessárias avaliações dos sistemas de rádio em ambientes internos (indoor), com a finalidade de conhecerem-se os principais fatores que degradam a transmissão neste tipo de tecnologias.

O ambiente onde trabalham os dispositivos BACnet/IEEE802.15.4 é apresentado na Figura 4.2. Este ambiente tem as características de um ambiente que possui variedade de interferências que devem ser avaliadas quanto a robustez e desempenho da rede sem fio proposta.

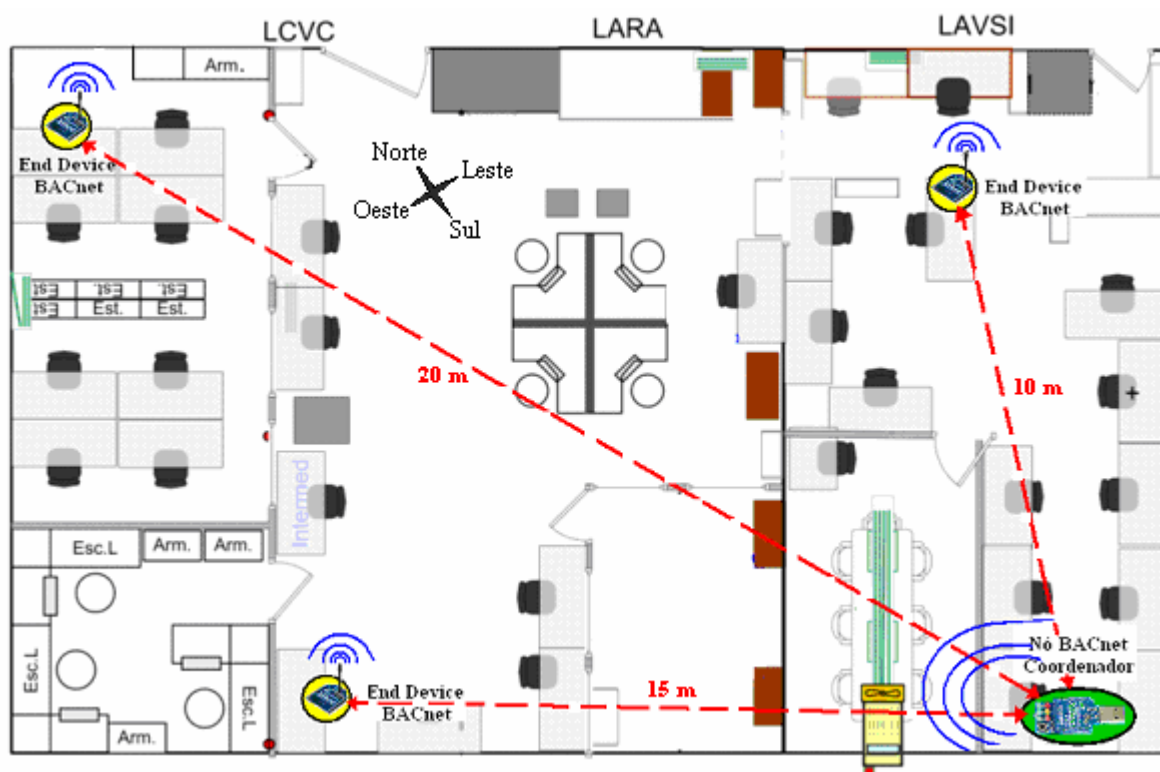


Figura 4.2- Distribuição da rede sem fio proposta.

O ambiente é dividido em diferentes cenários para testar o desempenho e robustez dos dispositivos BACnet/IEEE802.15.4 que serão submetidos a interferências como: redes Bluetooth, e redes Wi-Fi, em um ambiente real que possui diferentes obstáculos prediais.

Os parâmetros testados abordam tanto o desempenho do protocolo BACnet como do protocolo ZigBee, onde monitoram-se os atrasos de resposta da execução dos serviços Bacnet, além da medição da perda de pacotes e intensidade de potência do sinal recebida dos nós da rede sem fio.

#### **4.1.1 Definição dos testes**

Nos testes são utilizados um nó do tipo coordenador IEEE802.15.4 ligado em um computador central com os programas necessários para realizar o controle e avaliação dos dados coletados das variáveis analisadas. Os outros nós que fazem parte da rede são do tipo Dispositivo Final (End Device) BACnet/IEEE802.15.4. Estes tipos de nós são submetido a diferentes distâncias (metros) do nó coordenador sendo analisadoas sua resposta de alcance e desempenho em um ambiente real com obstáculos e interferências.

As variáveis são coletadas e analisadas em cada loop de comunicação entre o nó coordenador e o nós Dispositivos Finais, o loop é completado quando se faz um requerimento de serviço BACnet ao dispositivo final e este último responde com uma confirmação de que o serviço do tipo BACnet foi realizado com sucesso.

As variáveis testadas e analisadas no loop entre os nós da RSSF são:

- Número de pacotes perdidos: Este valor é o número de pacotes perdidos registrado por teste ao executar um serviço BACnet e através deste se calcula o valor da PER.
- Atraso BACnet: É o tempo gasto a partir do momento em que se faz um requerimento de serviço BACnet até receber a confirmação que completou uma execução do serviço com sucesso.
- Valor RSSI: Cada pacote que é recebido com sucesso depois de completar um serviço BACnet na rede é registrado com o valor da intensidade do sinal recebido mostrando assim a força do sinal de rádio com que se está recebendo.

## 4.2 CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE 802.15.4 COM IEEE 802.11/G (WI-FI)

A interferência da rede 802.11 pode ser caracterizada como uma faixa de perda de pacotes em redes 802.15.4. Ao estar as portadoras dos canais 802.15.4 espaçadas 5 MHz estima-se como interferência a faixa em que o sinal de outras portadoras 802.11 sobrepõem a largura de banda destes canais, como mostra a Figura 4.3 no espectro de frequências destas tecnologias a partir de 2,4 GHz .

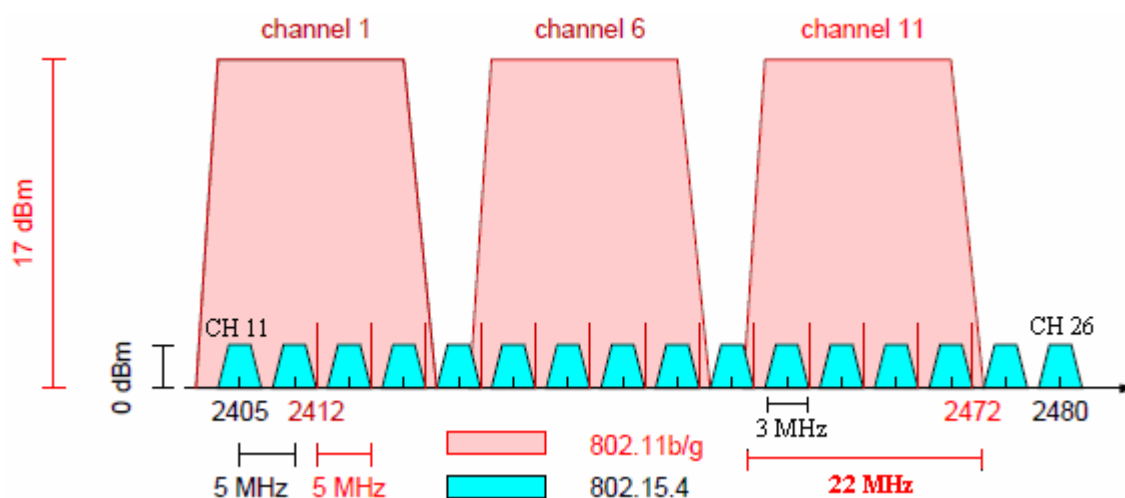


Figura 4.3- Espectro de frequências sobrepostas entre ZigBee e Wi-Fi (Shin, 2007).

No ambiente da rede avaliada se utilizou um roteador de banda larga com padrão de rede sem fio de 54 Mbps (wireless-G IEEE 802.11/G) da marca Linksys situado a 2 metros de altura do piso do laboratório, assim favorecendo a captação do sinal pelo ponto de rede sem fio é diminuir as possíveis interferências no sinal. O roteador está ligado a um computador tipo servidor onde se faz a supervisão do funcionamento da rede Wi-Fi entre o roteador e um Laptop tipo cliente com interface de comunicação IEEE 802.11/G, como mostra a Figura 4.4. Os testes realizados neste cenário foram feitos para todos os canais de transmissão do roteador. Tanto o cliente como o servidor possui o software ( Lan Traffic V2 ) para a geração e recepção de pacotes tipo TCP e que gera pacotes com tamanho fixo de 1460 bytes a cada 1 ms. O número de pacotes transmitidos entre os dois computadores da rede Wi-Fi para todos os testes é de 60.000 pacotes.

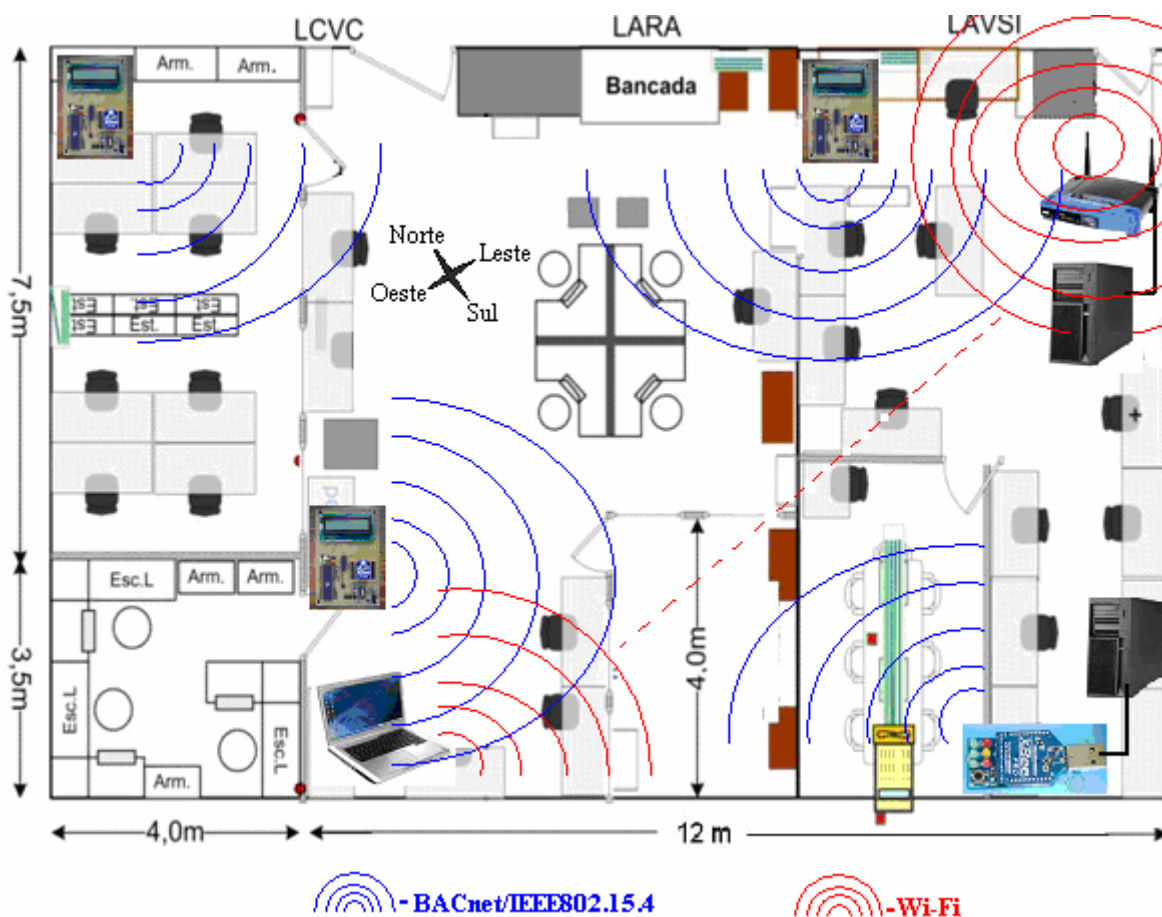



Figura 4.4 – Cenário BACnet/IEEE802.15.4 entre transmissões Wi-Fi.

Neste cenário, paralelo à utilização da tecnologia Wi-Fi, se utiliza o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4. Este dispositivo está constantemente transmitindo pacotes tipo BACnet MS/TP à CON-USBBEE ligada a um computador, onde se faz a supervisão dos pacotes BACnet com o software CAS BACnet Explorer, e se registra o número deles perdidos na transmissão mediante o software X-CTU. A transmissão dos pacotes BACnet foi feita supervisando cada um dos canais de transmissão em que trabalha o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4

Os testes realizados foram feitos para cada um dos três dispositivos BACnet/IEEE802.15.4 desenvolvidos, eles foram distribuídos dentro do cenário experimental a diferentes distancias do nó coordenador (5, 10, 15 e 20 metros).

A Tabela 4.1 mostra as diferentes frequências que utilizam as tecnologias sem fio utilizadas nas medições.

Tabela 4.1 – Frequências de transmissão Wi-Fi e ZigBee.

| Channel <i>XBee™ OEM RF Modules</i>  |                  |
|--|------------------|
| <br>Wireless Channel: | 1 - 2.412GHz     |
|  | 2 - 2.417GHz     |
|  | 3 - 2.422GHz     |
|  | 4 - 2.427GHz     |
|  | 5 - 2.432GHz     |
|  | 6 - 2.437GHz     |
|  | 7 - 2.442GHz     |
|  | 8 - 2.447GHz     |
|  | 9 - 2.452GHz     |
|  | 10 - 2.457GHz    |
|  | 11 - 2.462GHz    |
|  | Parameter Range: |
|  | 0x0C - 2.410 GHz |
|  | 0x0D - 2.415 GHz |
|  | 0x0E - 2.420 GHz |
|  | 0x0F - 2.425 GHz |
|  | 0x10 - 2.430 GHz |
|  | 0x11 - 2.435 GHz |
|  | 0x12 - 2.440 GHz |
|  | 0x13 - 2.445 GHz |
|  | 0x14 - 2.450 GHz |
|  | 0x15 - 2.455 GHz |
|  | 0x16 - 2.460 GHz |
|  | 0x17 - 2.465 GHz |
|  | 0x18 - 2.470 GHz |
|  | 0x19 - 2.475 GHz |
|  | 0x1A - 2.480 GHz |
| Default Parameter Value: 0x0C (12 decimal)   |                  |

#### 4.3 CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE 802.15.4 COM BLUETOOTH

Por Bluetooth trabalhar na banda ISM de 2.4 Ghz, pode ser uma possível fonte de interferência para o ZigBee. Os 79 canais de radiofrequência em que se transmite são numerados de 0 a 78 com um espaçamento entre si de 1 MHz, começando desde a frequência de 2.402 GHz . Neste cenário foi utilizada uma USB Bluetooth Wireless Adapter (Adaptador Bluetooth sem fio) da marca MSI, que cumpre com as especificações da norma Bluetooth v1.1, com velocidade máxima de transmissão de 723 Kbps e potência de saída classe 1 (+18dBm Max.) conseguindo um alcance de operação de 100 metros. Ela está conectada a um computador onde se criou uma LAN Bluetooth com um laptop que possui interface interna Bluetooth, sendo que os dois dispositivos da rede compartilham o software (Lan Ttraffic V2) para a geração e recepção de pacotes, a transmissão é feita a uma taxa de 700 Kbps. A Figura 4.5 mostra o cenário experimental implementado.

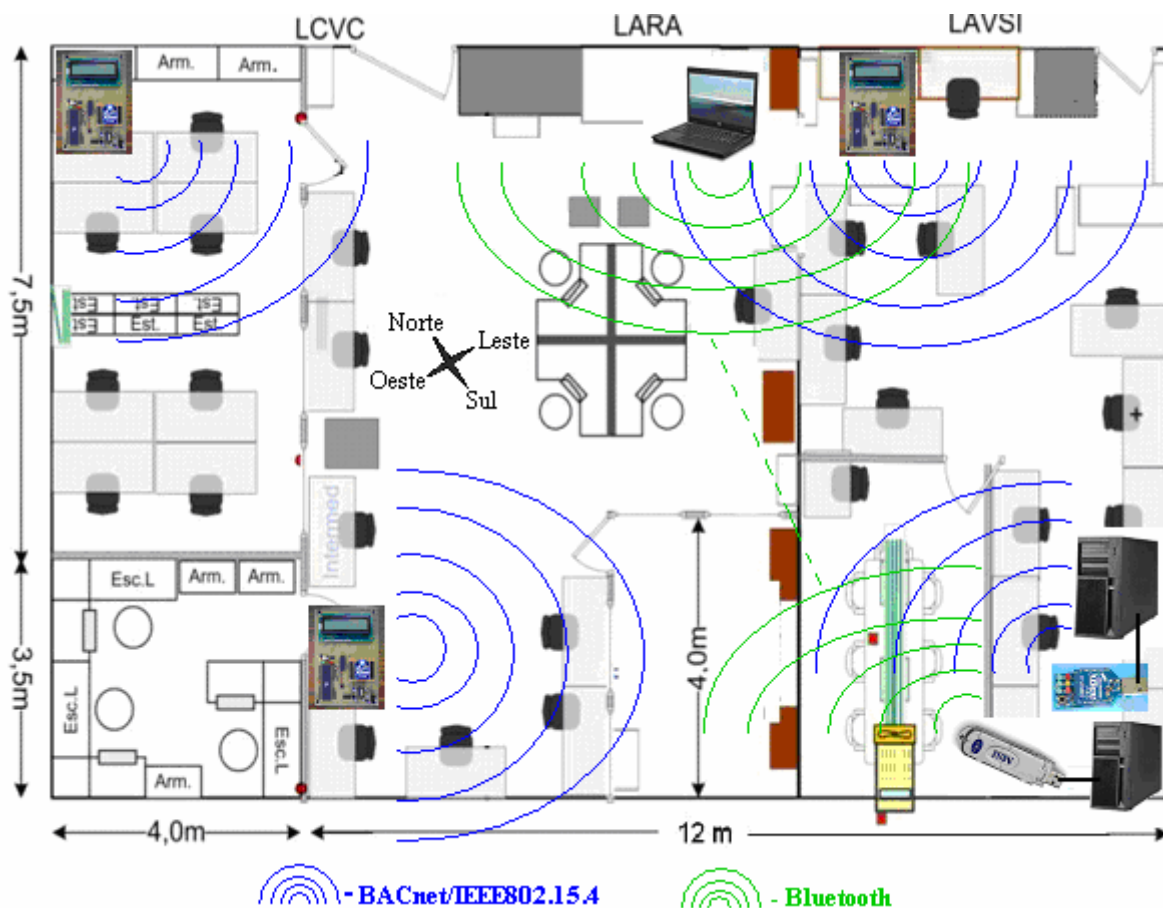


Figura 4.5 – Cenário BACnet/IEEE802.15.4 entre transmissões Bluetooth.

No cenário o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4, envia constantemente pacotes tipo BACnet MS/TP à CON-USBBEE, onde se faz a supervisão dos pacotes tanto do tipo BACnet como do tipo ZigBee. As medições se realizam para diferentes distâncias entre os dispositivos BACnet.

#### 4.4 CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE 802.15.4 COM WI-FI E BLUETOOTH

Sendo ZigBee, Wi-Fi e Bluetooth tecnologias que trabalham na banda ISM dos 2.4 GHz e cada uma desenvolvida para funcionalidades diferentes, a coexistência de uma tecnologia com a outra está potencialmente questionada. Neste cenário como se mostra na Figura 4.6 se utilizam as três tecnologias trabalhando ao mesmo tempo, para visualizar como seria a resposta do funcionamento do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 como membro principal

da RSSF proposta, conhecendo desta forma se as características de desempenho avaliadas nos cenários anteriores são as mesmas, ou se em algum caso se detecta algum aumento ou mudança das variáveis avaliadas devido a possíveis interferências que poderiam lhe produzir as outras tecnologias sem fio funcionando no mesmo ambiente.

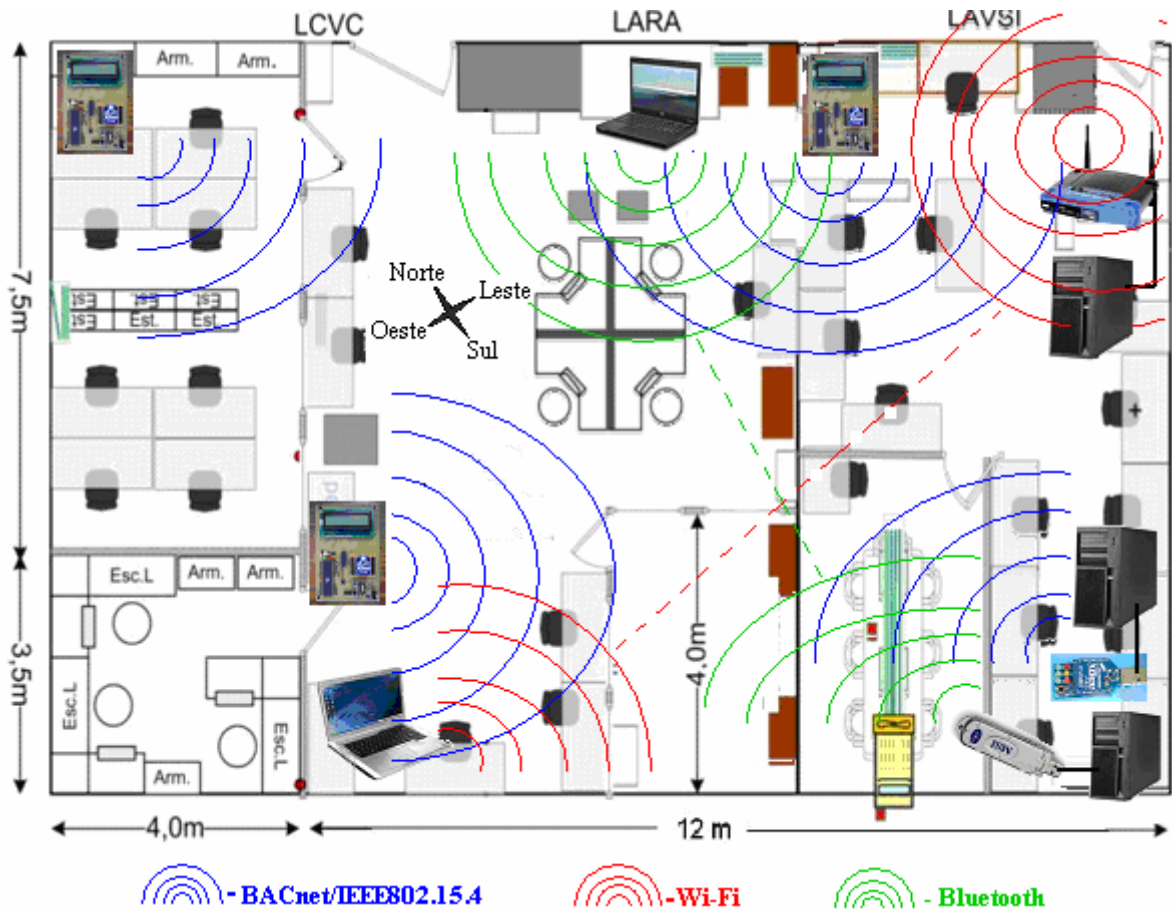


Figura 4.6 – Cenário BACnet/IEEE802.15.4 entre transmissões Wi-Fi e Bluetooth.

Monitoram-se os pacotes tanto do protocolo BACnet, como do protocolo ZigBee para cada uma das experiências realizadas.

No próximo capítulo serão mostrados os resultados dos testes feitos para cada um dos cenários experimentais propostos, analisando o desempenho e robustez tanto do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4, como das outras tecnologias sem fio utilizadas.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A monitoração da variável ACK (Acknowledgment Failures) do programa X-CTU mostra se o pacote BACnet chegou ou não a seu destino com sucesso. O valor desta variável se incrementa quando o módulo expira suas tentativas de transmissão (três tentativas) sem receber um ACK de confirmação na transmissão dos pacotes BACnet. Os testes realizados supervisionam se os pacotes BACnet foram recebidos com sucesso monitorando a variável ACK e por meio do programa CAS BACnet Explorer, o qual no momento de receber no nó coordenador os Frames do tipo BACnet dos dispositivos BACnet/IEEE802.15.4 reconhece efetivamente que são Frames BACnet e mostra imediatamente a descrição do dispositivo BACnet e suas propriedades dentro da rede.

Os resultados obtidos partem do princípio que o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 em um ambiente sem interferência alguma apresentou as propriedades necessárias para uma comunicação confiável (até 20 metros) em qualquer de seus 16 canais de transmissão. Os parâmetros de qualidade da transmissão cumprem os requerimentos mínimos para a rede de sensores sem fio implementada no cenário proposto (LAC). A Tabela 5.1 mostra em resumo a média nos parâmetros de desempenho do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 em um ambiente configurado para não ter interferências eletromagnéticas de outras tecnologias sem fio, tanto do LAC como dos laboratórios vizinhos .

Tabela 5.1 – Médias da PER e RSSI dispositivo BACnet/IEEE802.15.4.

| <b>CENÁRIO SEM INTERFERÊNCIAS</b> |            |                   |
|-----------------------------------|------------|-------------------|
| <b>Metros</b>                     | <b>PER</b> | <b>RSSI (dBm)</b> |
| 5                                 | 0.01       | -52               |
| 10                                | 0.01       | -64               |
| 15                                | 0.02       | -68               |
| 20                                | 0.03       | -73               |
| 25                                | 0.2        | -88               |

## 5.1 RESULTADOS CENÁRIO BACNET/IEEE802.15.4 COM WI - FI

O comportamento dos canais de transmissão do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 trabalhando em um meio compartilhado com Wi-Fi é visualizado na Figura 5.1.

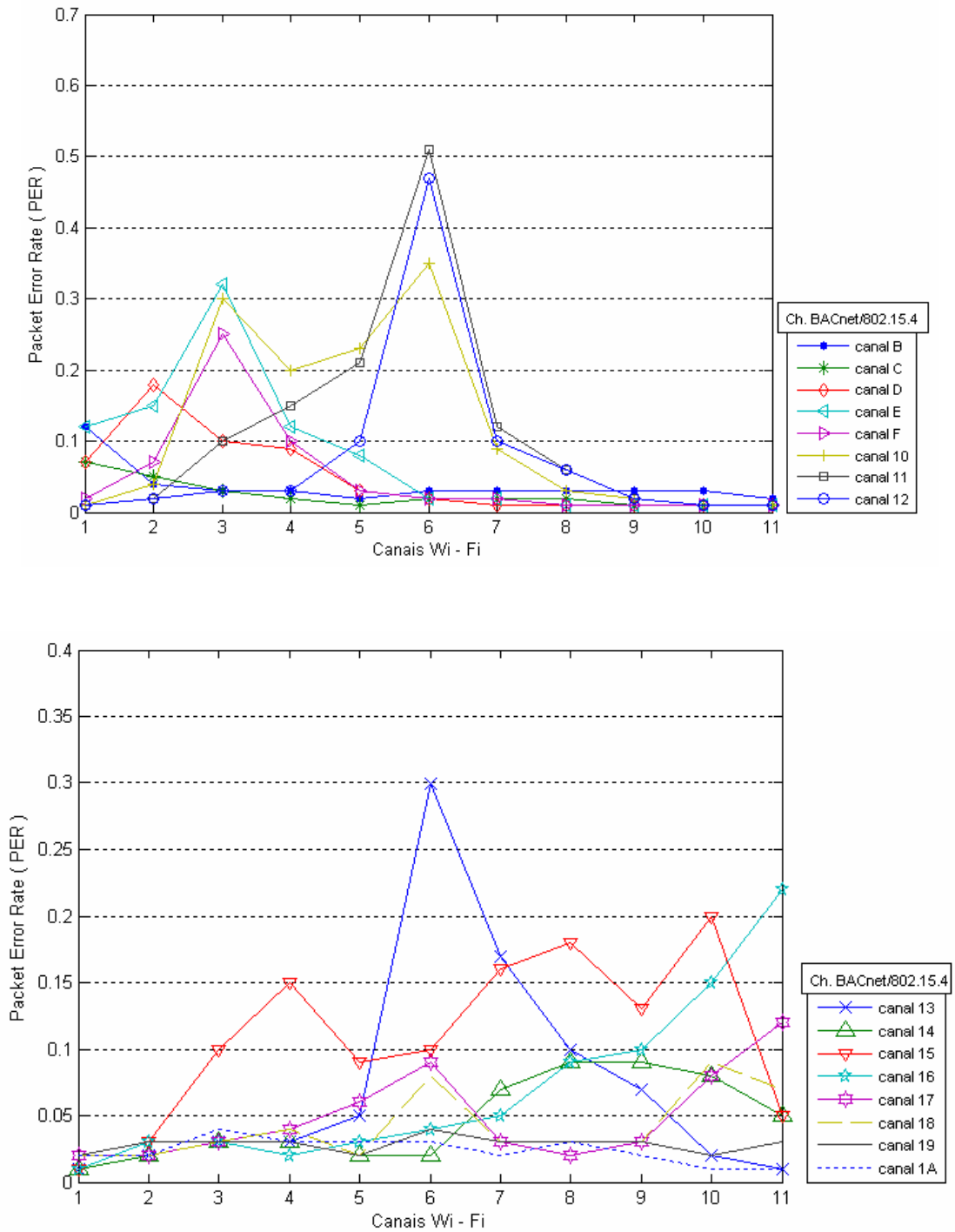


Figura 5.1 – PER entre canais de transmissão BACnet/IEEE802.15.4 com canais de Wi-Fi.

A Tabela 5.2 mostra os canais onde se apresenta o maior prejuízo e a maior perda de pacotes no dispositivo BACnet/IEEE802.15.4.

Tabela 5.2 – Interferências entre BACnet/IEEE802.15.4 e Wi-Fi.

| Canais Wi - Fi | BACnet/IEEE 802.15.4 |      |
|----------------|----------------------|------|
|                | Canal RF             | PER  |
| 3 – 2.422 GHz  | E – 2.420 GHz        | 0.32 |
|                | F – 2.425 GHz        | 0.25 |
|                | 10 – 2.430 GHz       | 0.30 |
| 6 – 2.437 GHz  | 10 – 2.430 GHz       | 0.35 |
|                | 11 – 2.435 GHz       | 0.51 |
|                | 12 – 2.440 GHz       | 0.47 |
|                | 13 – 2.480 GHz       | 0.29 |
| 10 – 2.457 GHz | 15 – 2.455 GHz       | 0.20 |
| 11 – 2.462 GHz | 16 – 2.460 GHz       | 0.22 |
|                | 17 – 2.465 GHz       | 0.12 |

O canal 6 do Wi-Fi apresenta a maior interferência com o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 no momento que ele utiliza o canal de RF 0x11 para a transmissão, isto se deve ao fato que alguns canais de comunicação IEEE802.15.4 sobrepõem aos canais Wi-Fi como mostra a Figura 5.2. Cada vez que a proximidade dos canais em frequência seja mais forte tem-se como resultado uma interferência, tendo como consequência uma perda da informação na rede.

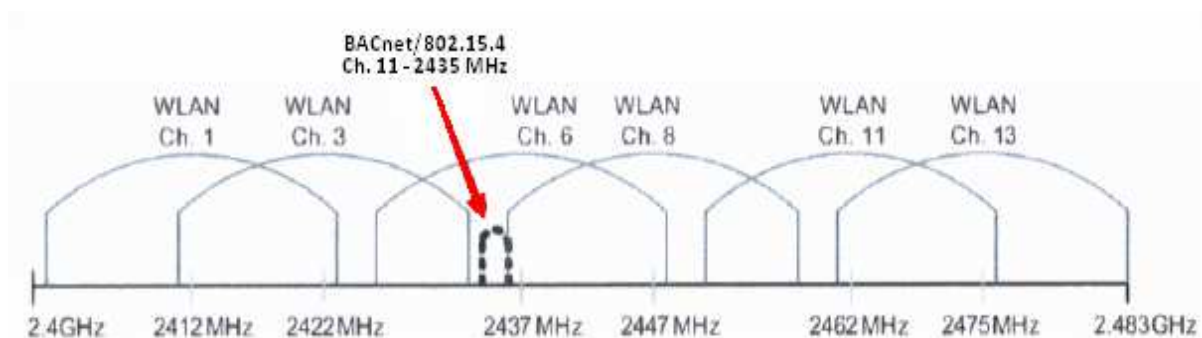


Figura 5.2 – Sobreposição entre Wi-Fi e BACnet/IEEE802.15.4.

O RSSI foi medido para os canais Wi-Fi que apresentaram baixa e alta interferência para conhecer seu comportamento no dispositivo BACnet/802.15.4 (Figura 5.3).

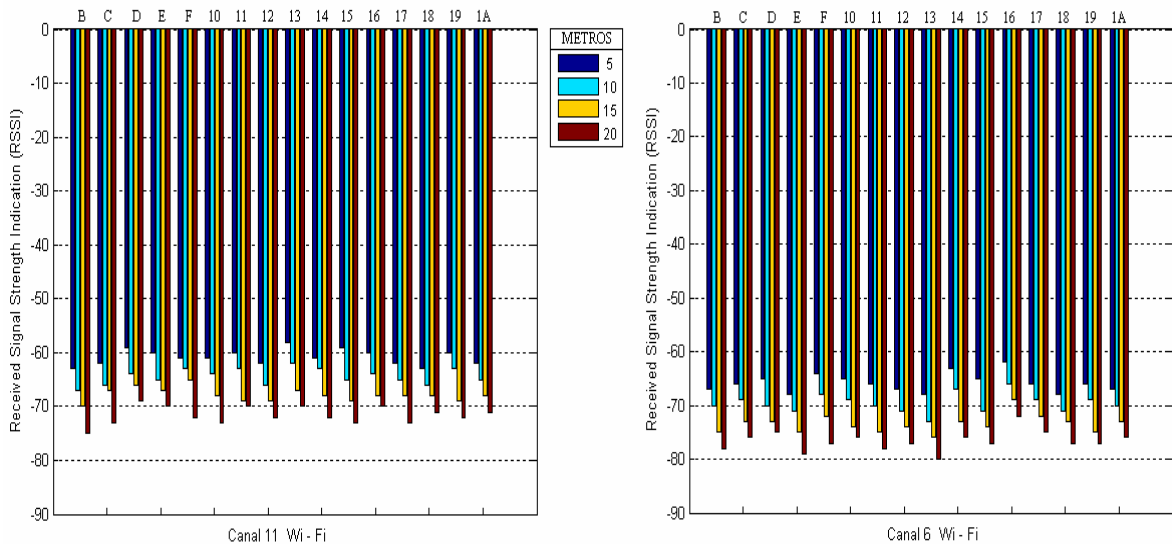


Figura 5.3 – RSSI BACnet/IEEE802.15.4 com Wi-Fi.

Como é característico neste tipo de tecnologia sem fio, a resposta do RSSI mostra um aumento diretamente proporcional com o aumento da distância (Lim, J.C. e Wong, K., 2006), mas para canais em que se apresentou uma interferência maior (canal 6 Wi-Fi), o RSSI apresentou um crescimento na média de 3% em seu valor, em comparação com o canal que apresentou uma interferência menor (canal 11 Wi-Fi). A média do RSSI para o canal com maior interferência (canal 6 Wi-Fi) e na maior distância testada (20 metros), foi na ordem de -79,3 dBm. Uma proximidade ou ultrapassagem do RSSI ao nível de sensibilidade do receptor (-92 dBm) pode levar à perda de pacotes ou a registro de valores não coerentes para a avaliação de uma RSSF ZigBee (Muñoz, H.A., Couto, F.L. e Bauchspiess, A., 2008).

### 5.1.1 Desempenho Wi – Fi

No caso do desempenho da rede Wi-Fi neste tipo de cenário, mostra-se a resposta quando se está transmitindo nos canais Wi-Fi que apresentaram uma interferência alta, média e baixa (canal 6, 3 e 11) com os canais do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4.

A Figura 5.4 exibe o desempenho do canal 6 do Wi-Fi (2,437 GHz) trabalhando sem interferência dentro do cenário experimental, também mostra-se este mesmo canal tendo uma interferência pela sobreposição em frequência com o canal 11 (2,435GHz) do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4.

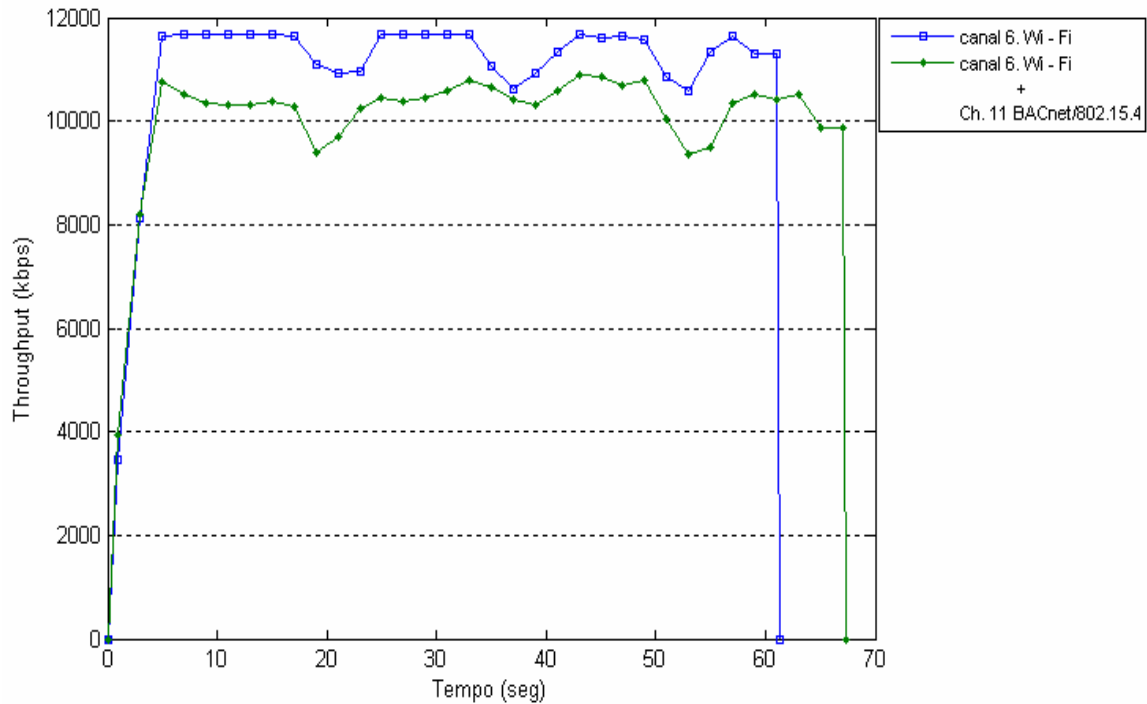


Figura 5.4 – Desempenho canal 6 de Wi-Fi com e sem interferência.

O resultado mostra uma queda aproximada de 8 % no desempenho do canal 6 do Wi-Fi, passando o rendimento médio do canal 6 sem interferência de 10360 Kbps para 9521 Kbps quando o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 está em funcionamento.

No caso do canal 3 do Wi-Fi (2,422 GHz), só apresentou uma queda de 2,6 % em seu desempenho quando o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 está trabalhando em uma frequência próxima à do canal 3, na ordem de 2,420 GHz (canal 0x0E) como pode ser visto na Figura 5.5.

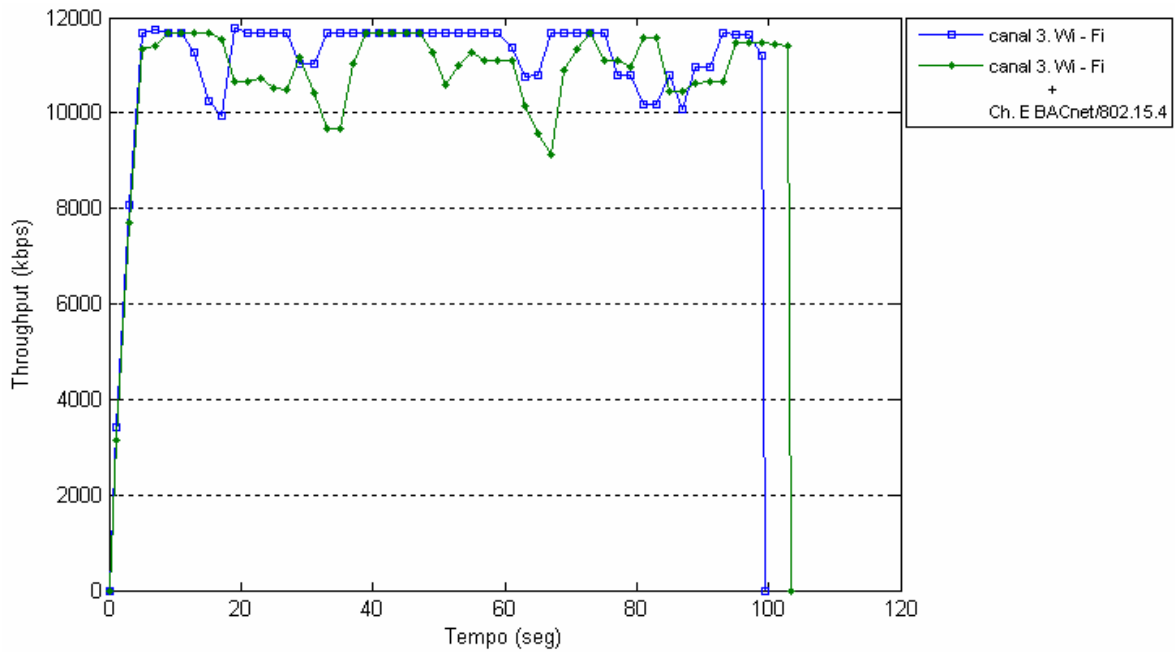


Figura 5.5 – Desempenho canal 3 de Wi-Fi com e sem interferência.

Na Figura 5.6 o canal 11 do Wi-Fi (2,462 GHz) apresentou uma queda quase insignificante na ordem de 1% no desempenho do Wi-Fi, mesmo trabalhando o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 na faixa de frequência de 2,460 GHz (canal 0x16) próxima à frequência do canal 11.

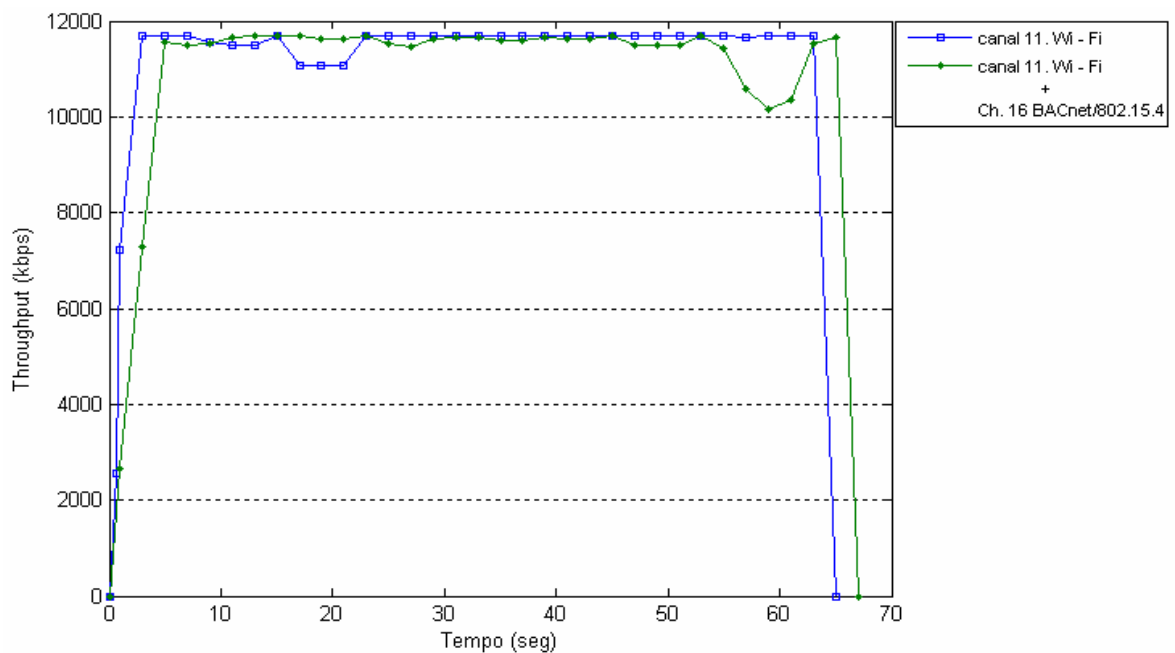
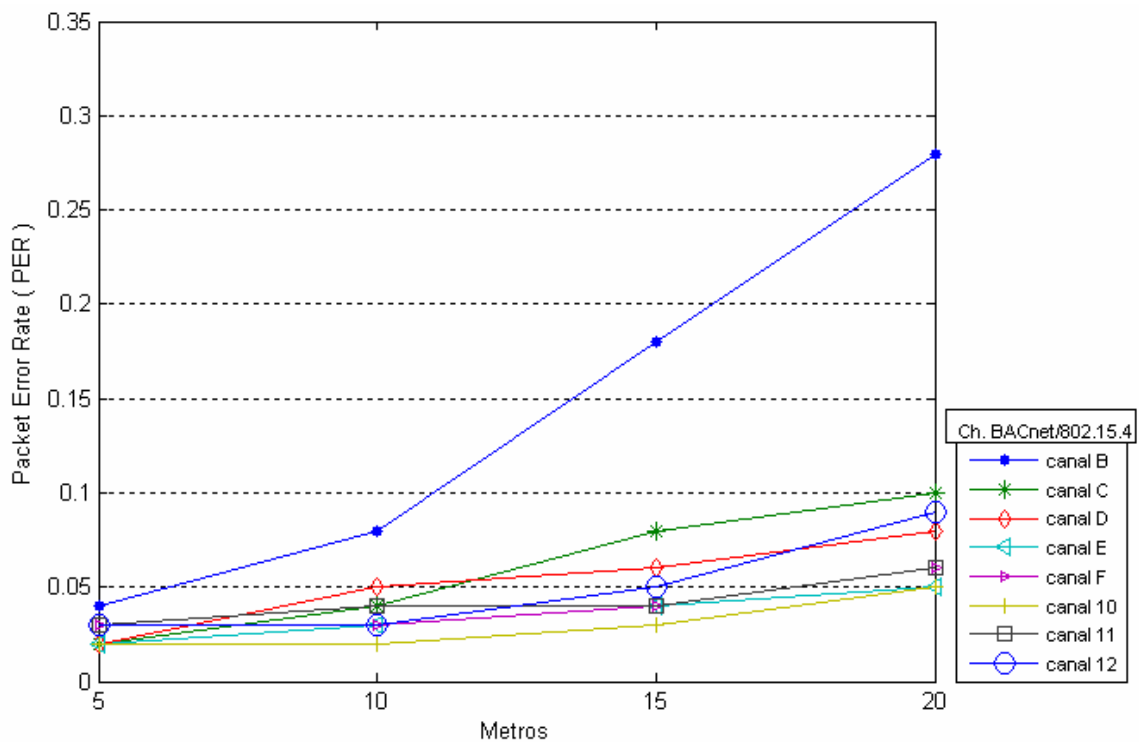


Figura 5.6 – Desempenho canal 11 de Wi-Fi com e sem interferência.

Para os outros canais em que a rede Wi-Fi transmitiu, não se apresentou uma queda significativa e sempre se manifestou uma média aproximada do seu desempenho, na faixa de 9800 Kbps.

## 5.2 RESULTADOS CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM BLUETOOTH

A tecnologia Bluetooth, mesmo tendo sido desenvolvida para trabalhar com um tipo de modulação e velocidade diferentes para não ocasionar interferência em outras tecnologias, ao compartilhar a faixa de frequências da banda ISM de 2,4 GHz com IEEE 802.15.4, ocasionou no dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 uma variação no desempenho do canal de comunicação RF 0x0B, mostrando assim um aumento na média da PER que mantém os demais canais do 0.05 para o 0,15, como mostra na Figura 5.7.



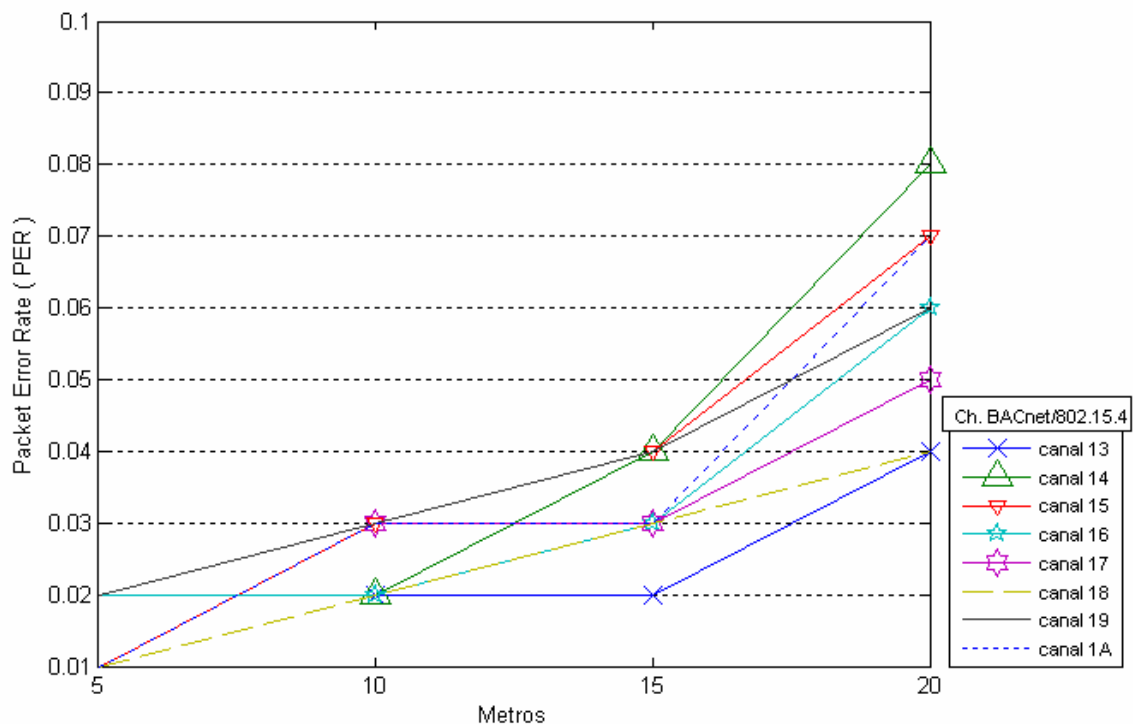


Figura 5.7 – PER entre os canais BACnet/IEEE802.15.4 e Bluetooth.

O RSSI médio obtido do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 submetido a varias distâncias em meio de transmissões da rede Bluetooth é mostrado na Tabela 5.3. Cada vez que a distância aumenta proporcionalmente na tecnologia ZigBee o RSSI vai aumentando. Os níveis do RSSI obtidos encontram-se entre os níveis normais, sem ultrapassar o limite da sensibilidade do receptor (-92 dBm) o que satisfaz uma condição para não ter perda de pacotes na comunicação (Figura 5.8).

Tabela 5.3 – Média do RSSI entre BACnet/IEEE802.15.4 com Bluetooth.

| <b>DISTÂNCIA<br/>(metros)</b> | <b>RSSI<br/>(dBm)</b> |
|-------------------------------|-----------------------|
| 5                             | - 57                  |
| 10                            | - 66                  |
| 15                            | - 69                  |
| 20                            | -76                   |



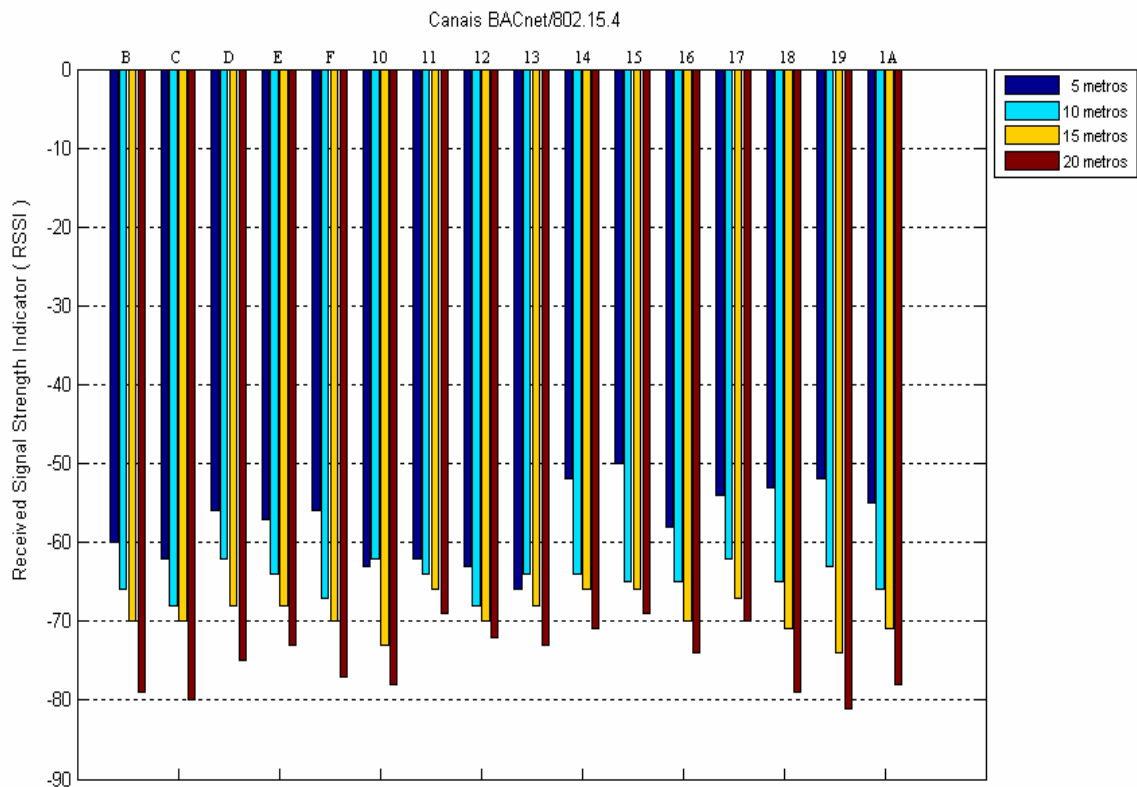


Figura 5.8 – RSSI dos canais BACnet/IEEE802.15.4 em transmissões de Bluetooth.

### 5.2.1 Desempenho Bluetooth

O desempenho da rede Bluetooth em meio a transmissões do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 mantém uma média de transmissão dos dados na ordem de 540 Kbps como pode ser visto na Figura 5.9, já os canais B e F do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 geram uma queda no desempenho da transmissão Bluetooth na média de 30 % como se observa na Figura 5.9.

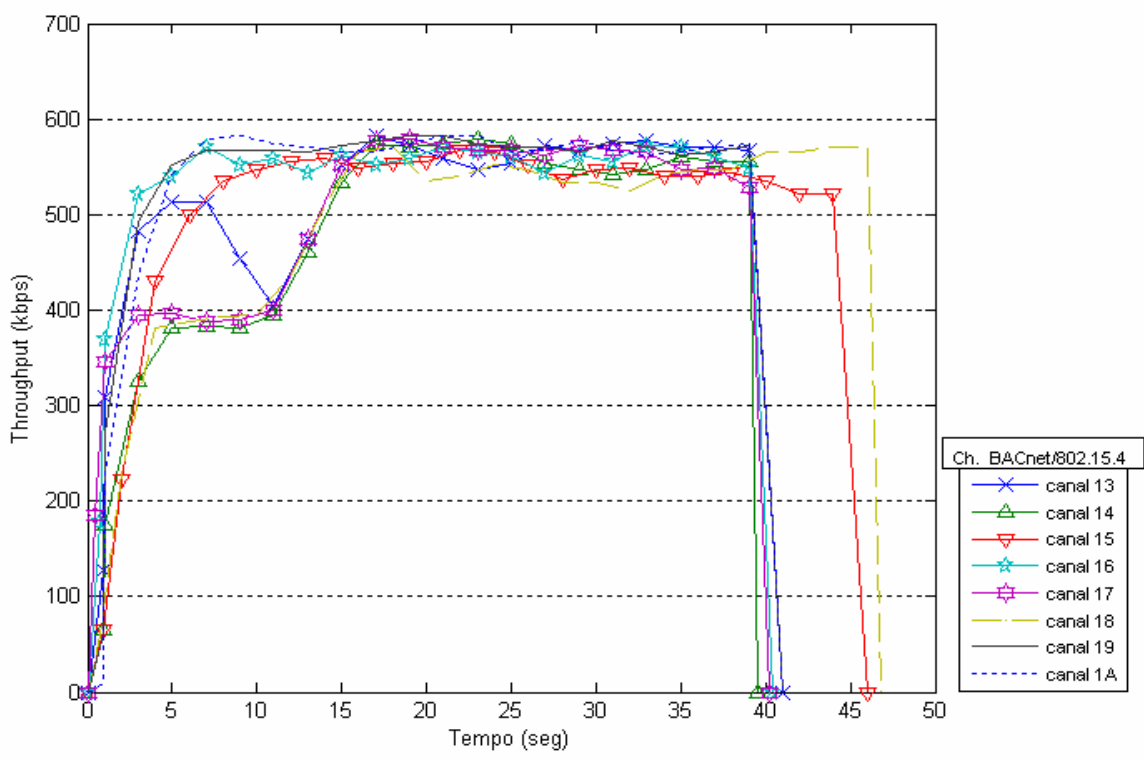
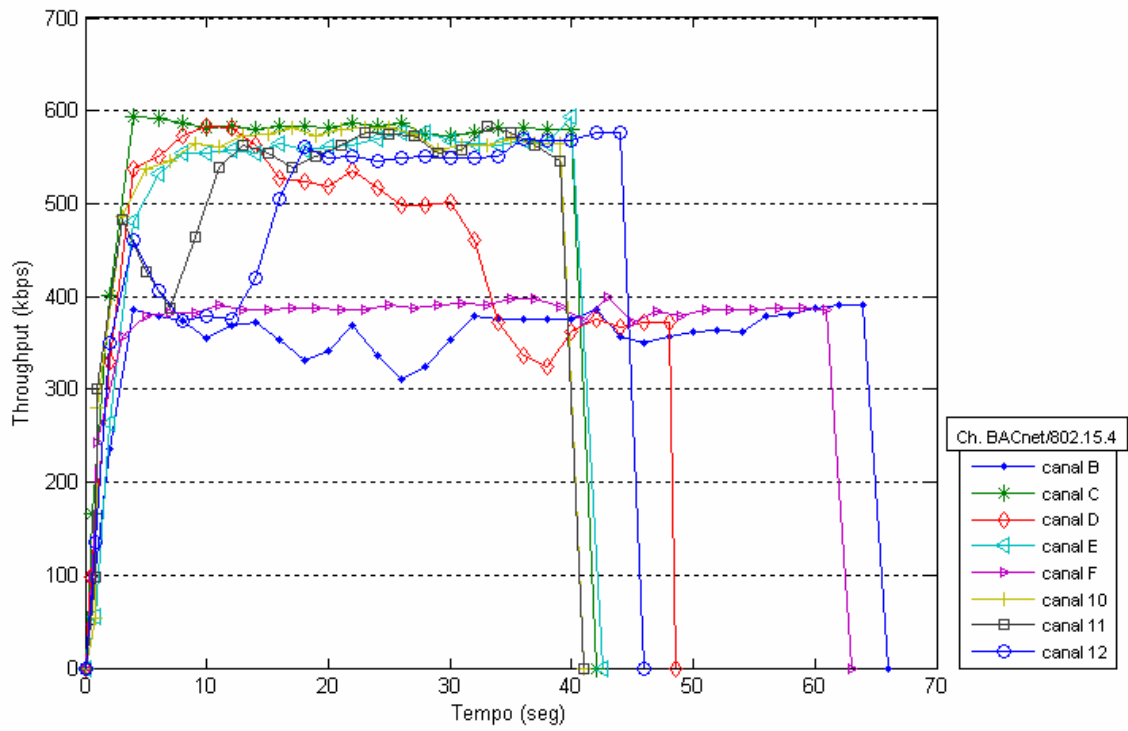


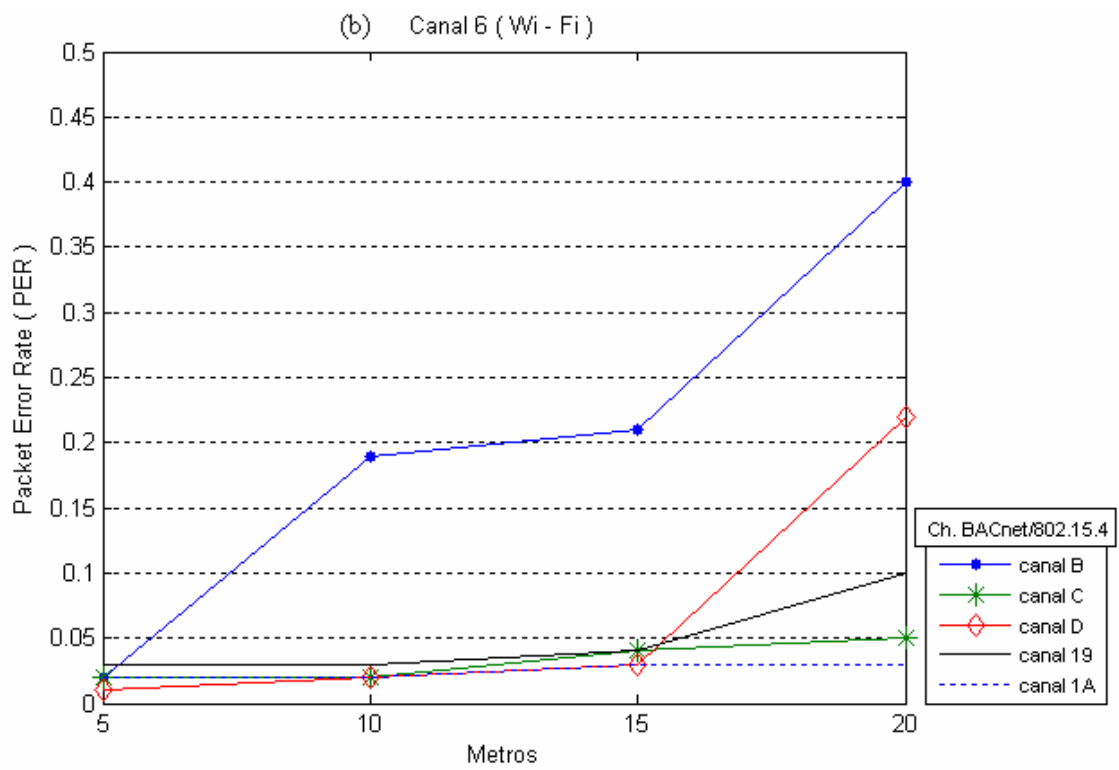
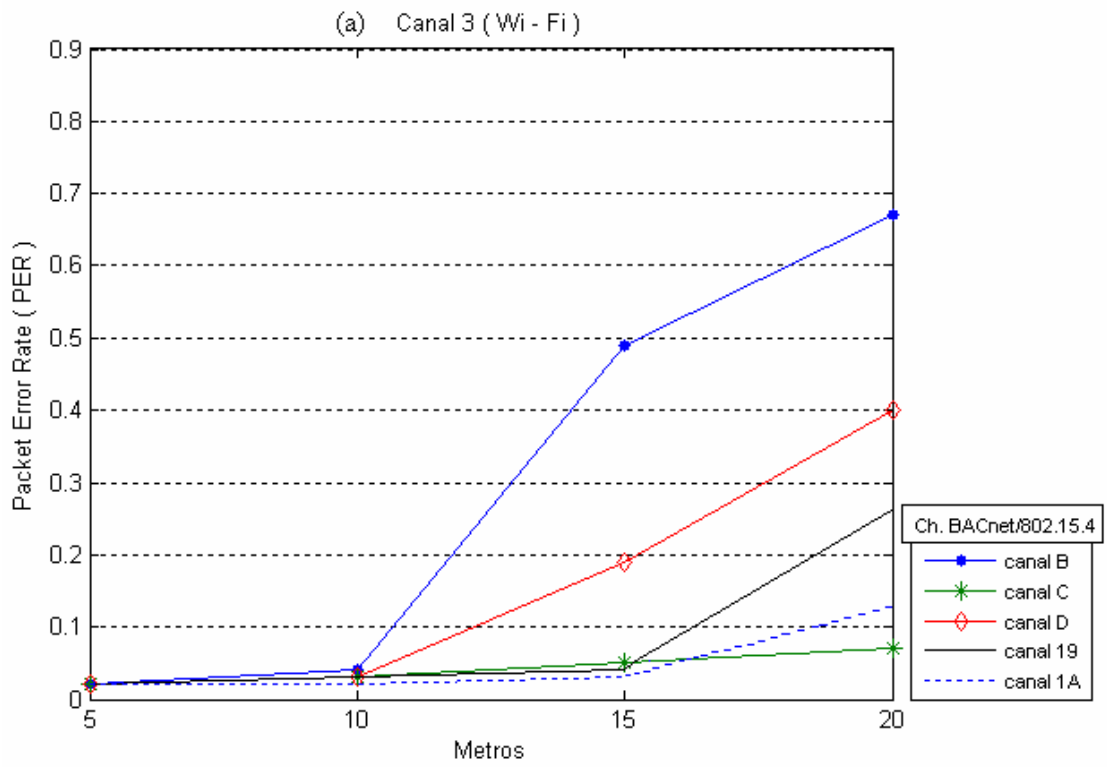
Figura 5.9 – Desempenho Bluetooth em transmissões dos canais de BACnet/IEEE802.15.4.

### **5.3 RESULTADOS CENÁRIO EXPERIMENTAL BACNET/IEEE802.15.4 COM WI-FI E BLUETOOTH**

Os resultados obtidos neste cenário utilizaram os canais de comunicação das tecnologias utilizadas nos testes anteriores, no caso da rede Wi-Fi se utilizou os canais que apresentaram características de desempenho boas, razoáveis e limitadas, os canais 11, 3 e 6 respectivamente. Para o caso do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 os canais utilizados foram os canais B, C, D, 19 e 1A, os quais apresentaram boas características de desempenho, além do mais, se utilizou um enlace Bluetooth. Todos os testes foram feitos com as três tecnologias trabalhando ao mesmo tempo, obtendo desta maneira respostas de desempenho do dispositivo BACnet/IEEE802.11.4 em um ambiente com estas características.

#### **5.3.1 Desempenho BACnet/IEEE802.15.4**

Como foi observado em testes anteriores o canal B de transmissão do dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 apresentou um aumento da PER em meio a uma transmissão Bluetooth, agora somando uma transmissão da rede Wi-Fi, a PER se faz mais significativa com o aumento da distância, como mostra a Figura 5.10. Para o caso do canal D (2.415 GHz), pela sua proximidade com a frequência do canal 3 do Wi-Fi (2.422 GHz) se faz mais representativo o aumento na PER em meio a uma transmissão da rede Bluetooth (Figura 5.10 (a)), porém, os canais de comunicação 1A e C do dispositivo BACnet apresentaram a melhor resposta em robustez neste tipo de cenário, mantendo os níveis adequados que garantem uma boa transmissão, portanto, uma menor perda da informação.



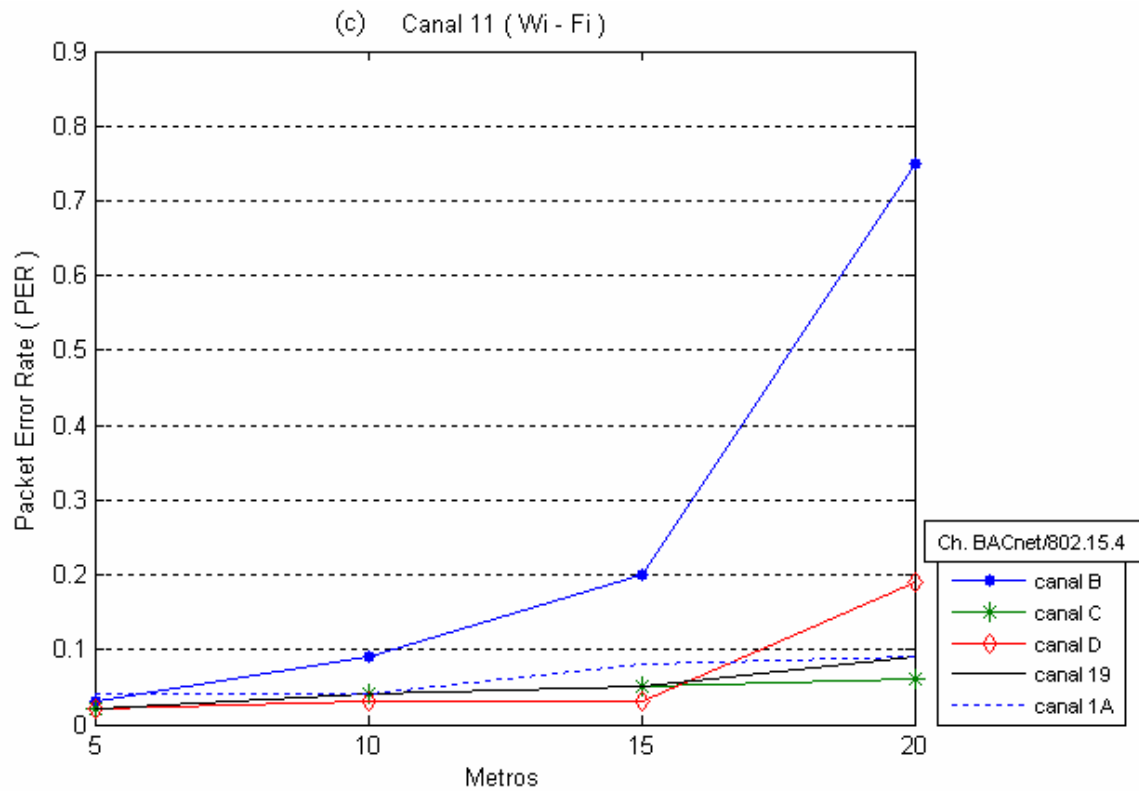


Figura 5.10 – PER para : (a) canal 3 de Wi-Fi, (b) canal 6 de Wi-Fi e (c) canal 11 de Wi-Fi trabalhando entre transmissões BACnet/IEEE802.15.4 e Bluetooth.

Na medição do RSSI (Figura 5.11), os maiores níveis se apresentaram no canal 6 do Wi-Fi. O valor máximo alcançado foi de -85 dBm, valor que se encontra perto do limite do nível de sensibilidade do receptor (-92 dBm), mas ainda dentro dos parâmetros válidos para um funcionamento correto da RSSF.

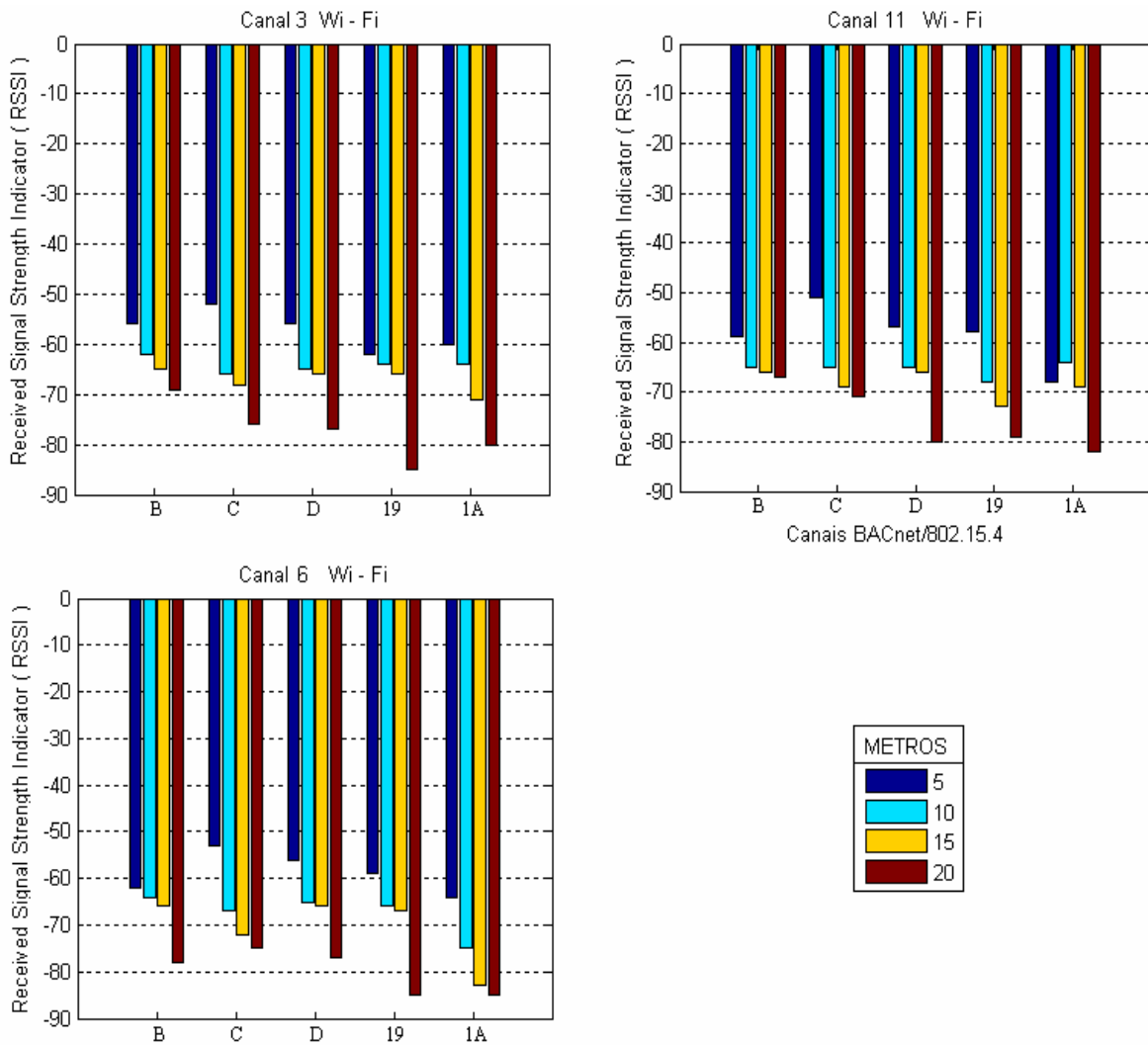
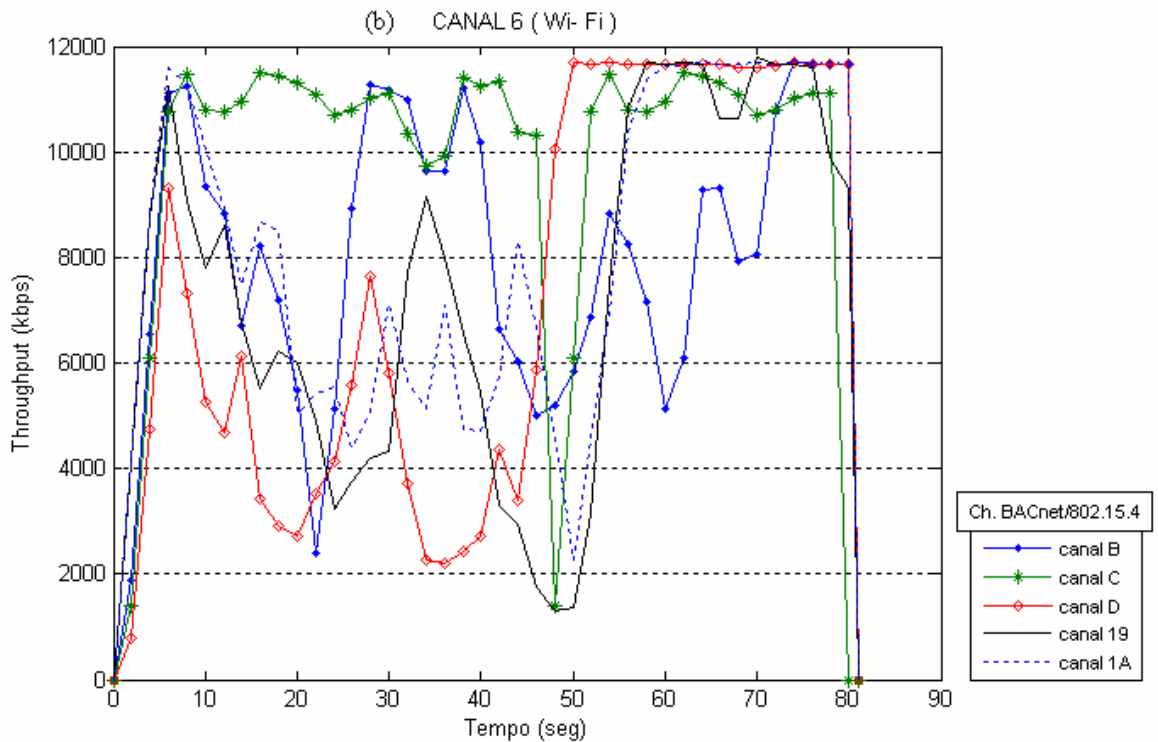
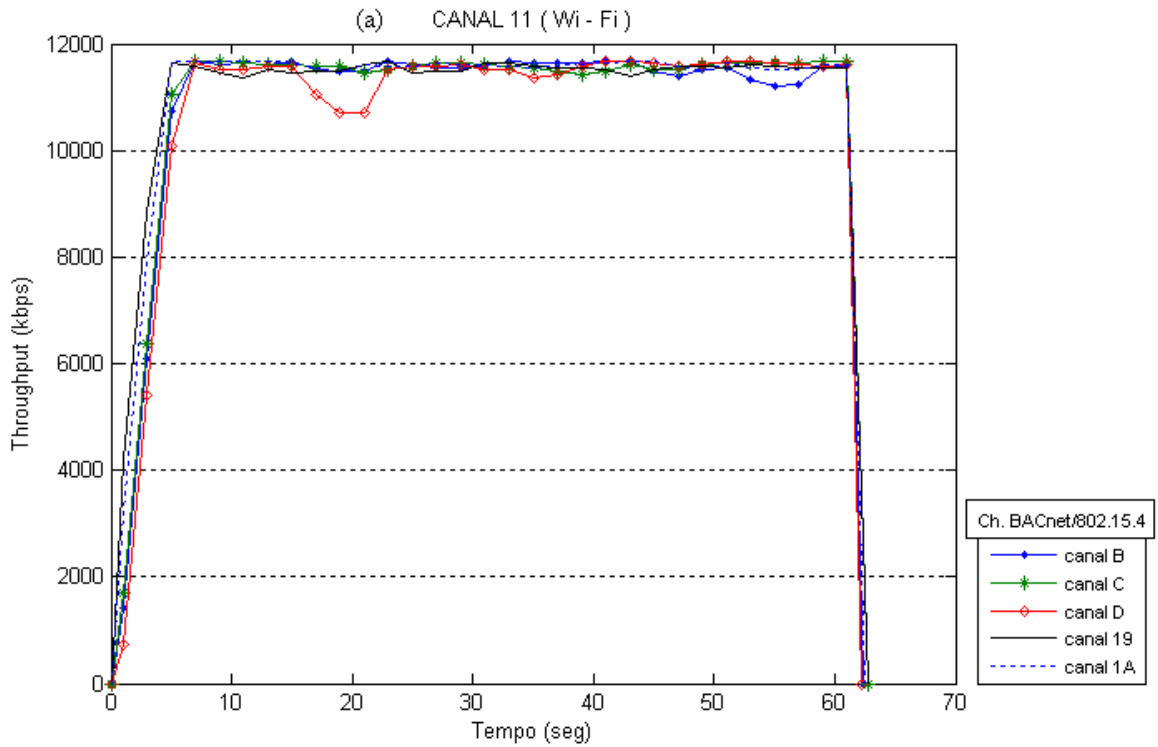


Figura 5.11 - RSSI BACnet/IEEE802.15.4 trabalhando com Bluetooth e Wi-Fi.

### 5.3.2 Desempenho Wi – Fi

Por compartilhar o mesmo espectro em frequência, e ter uma proximidade física de uma tecnologia com a outra, o desempenho da rede Wi-Fi poderia ser afetado pela transmissão de uma rede Bluetooth. As duas tecnologias são intrinsecamente resistentes a outros dispositivos sem fio, em virtude do uso de técnicas de modulação de espectro espalhado (Spread Spectrum), o que garante bons mecanismos para a comprovação e correção de erros, pedindo o reenvio dos pacotes danificados. Por isso o resultado ao aumento na interferência destas tecnologias se limita quase sempre a uma diminuição na velocidade de transmissão dos dados pelos pacotes que são reenviados.

A Figura 5.12 mostra a resposta da rede Wi-Fi em meio a uma transmissão da rede Bluetooth com o dispositivo BACnet/802.15.4 em funcionamento. Os canais 3 e 6 do Wi-Fi apresentaram a maior variabilidade no desempenho neste tipo de cenário.



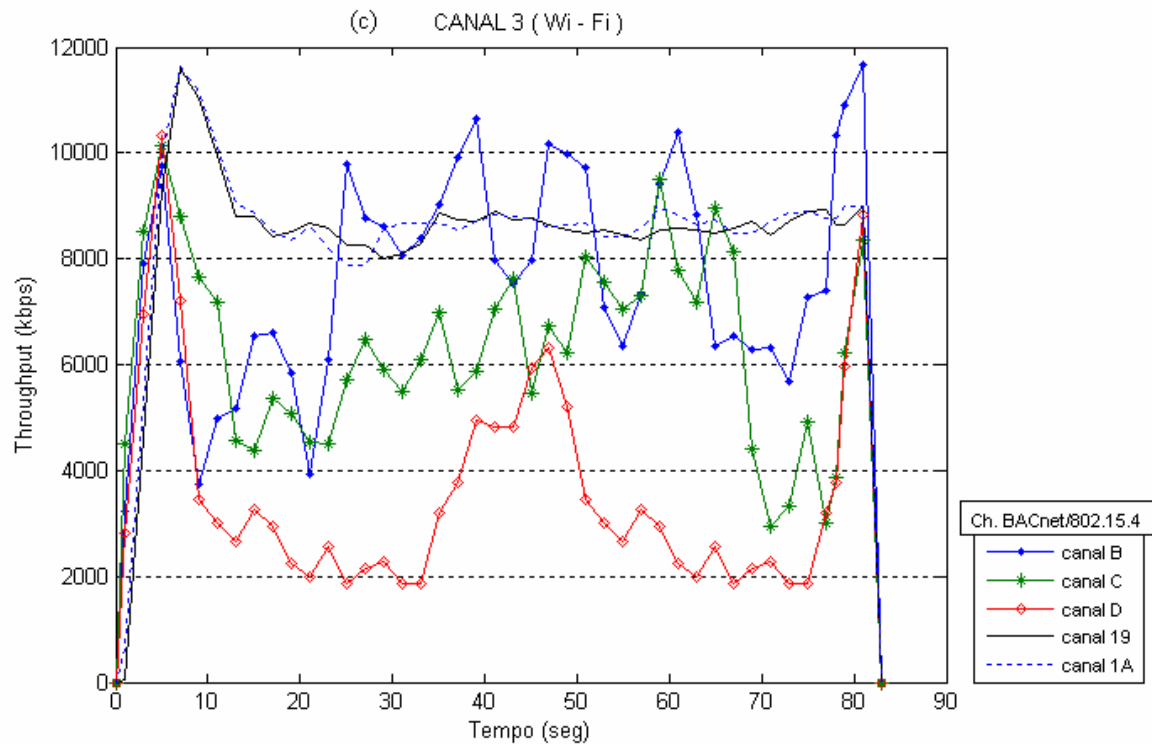


Figura 5.12 – Desempenho dos canais de Wi-Fi (a) canal 11, (b) canal 6 e (c) canal 3, entre transmissões BACnet/IEEE802.15.4 e Bluetooth.

Ao trabalhar a rede Wi-Fi frente a uma transmissão da rede Bluetooth se apresentou uma diminuição em seu desempenho. A taxa mais baixa de desempenho apresentado foi no canal 3 do Wi-Fi, devido à proximidade em frequência que tem com o canal D do dispositivo BACnet, o que ajuda acrescentar este valor. A Tabela 5.4 resume a resposta da média do desempenho que apresentou o Wi-Fi trabalhando conjuntamente com Bluetooth e BACnet/802.15.4 para as diferentes medições.

Tabela 5.4 – Médias do desempenho dos canais 3, 6 e 11 de Wi-Fi.

| Canais<br>BACnet/802.15.4 | Canais Wi - Fi (Throughput (Kbps)) |              |               |
|---------------------------|------------------------------------|--------------|---------------|
|                           | 3 (2.422GHz)                       | 6 (2.437GHz) | 11 (2.462GHz) |
| B (2.405 GHz)             | 7375                               | 7865         | 10360         |
| C (2.410 GHz)             | 6021                               | 9480         | 10411         |
| D (2.415 GHz)             | 3463                               | 7083         | 10250         |
| 19 (2.475 GHz)            | 8082                               | 7082         | 10533         |
| 1A (2.480 GHz)            | 8179                               | 7826         | 10531         |



### 5.3.3 Desempenho Bluetooth

A Figura 5.13 mostra a analogia do desempenho que a rede Bluetooth apresentou com a rede Wi-Fi, quando o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 estava em funcionamento ao compartilhar a mesma faixa de frequência ISM (2.4 GHz).

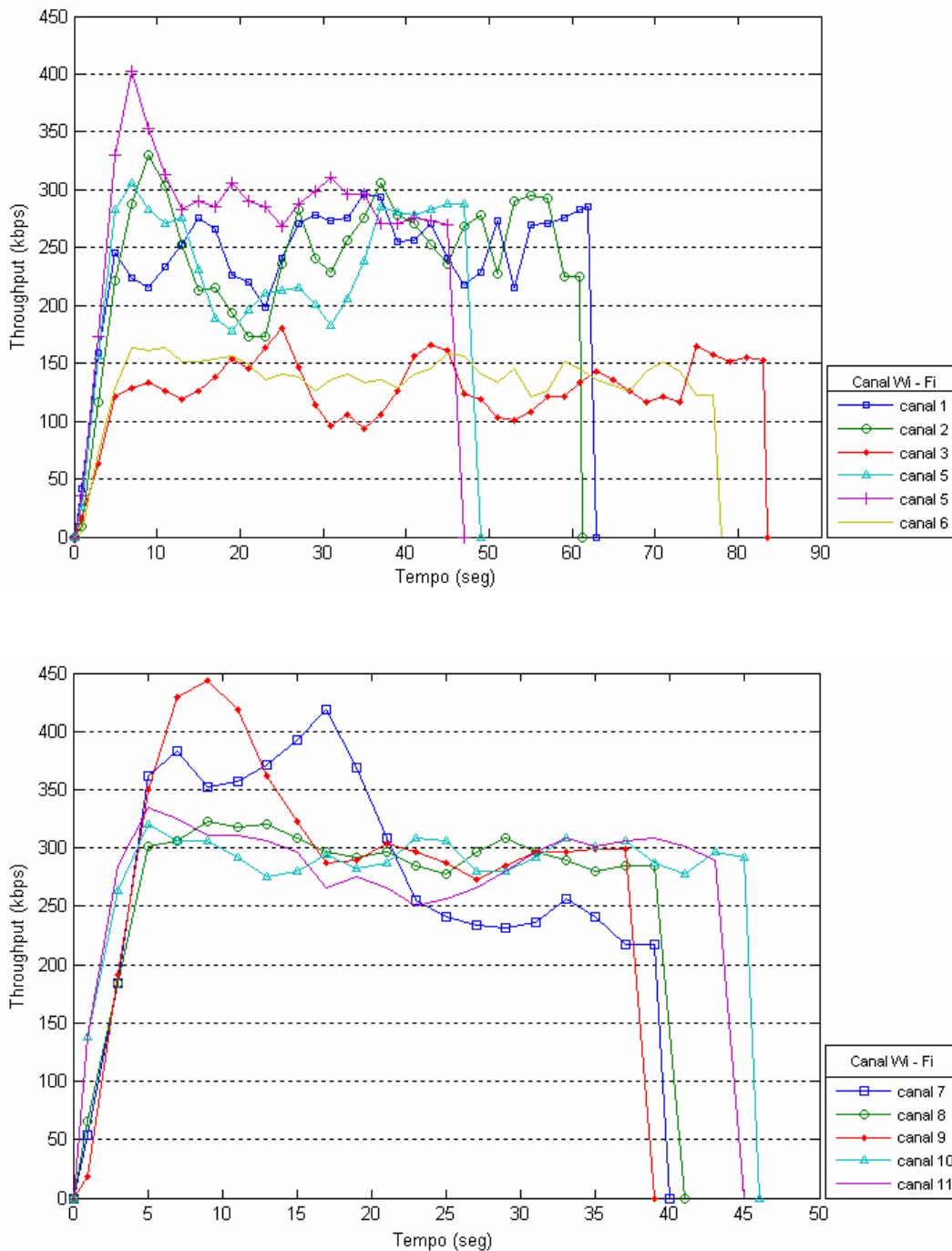


Figura 5.13 – Desempenho Bluetooth entre transmissões Wi-Fi.

Na Tabela 5.5 se exhibe em resumo a resposta da média em desempenho que apresentou a rede Bluetooth para cada um dos canais em que transmitiu a rede Wi-Fi.

Tabela 5.5 – Desempenho Bluetooth com Wi-Fi.

| <b>Canal Wi - Fi</b> | <b>Bluetooth (Throughput (Kbps))</b> |
|----------------------|--------------------------------------|
| 1                    | 230.3                                |
| 2                    | 225.9                                |
| 3                    | 121.7                                |
| 4                    | 213.8                                |
| 5                    | 258                                  |
| 6                    | 129.4                                |
| 7                    | 258.2                                |
| 8                    | 255.3                                |
| 9                    | 273.9                                |
| 10                   | 263.3                                |
| 11                   | 261.6                                |

A média no desempenho da rede Bluetooth que apresentou no segundo cenário e que apresenta normalmente está na ordem de 540 Kbps, mas acompanhado de uma transmissão da rede Wi-Fi a queda no desempenho do Bluetooth foi significativa, aproximadamente de 50 %.

#### **5.4 DESEMPENHO PARÂMETROS PROTOCOLO BACNET**

Para avaliar o desempenho do protocolo BACnet no dispositivo desenvolvido, foi utilizado o programa Device Monitoring Studio da HHD Software Ltd., este programa é uma ferramenta utilizada como analisador de protocolo e registrador de dados, uma de suas funções principais é o monitoramento do fluxo de dados da porta USB (Universal Serial Bus), podendo desta maneira capturar, ver, registrar, analisar e testar toda a atividade do tráfego do dispositivo USB ligado em alguma das portas USB do computador utilizado. Neste trabalho o dispositivo USB ligado ao computador supervisorio é a CON USB-BEE,

que serve como coordenador da rede recebendo todos os Frames BACnet que enviam os nós que fazem parte da rede no momento de executar um serviço BACnet.

O dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 é avaliado em termos de atrasos na execução de serviços (Service Delay) para cada um dos nós BACnet/802.15.4 desenvolvidos. O atraso na execução do serviço se define como o tempo transcorrido para completar uma operação de confirmação do serviço, neste caso foi avaliado o serviço mais comumente utilizado nos sistemas BACnet, o ReadProperty. Os resultados obtidos foram para um  $N_{max\_info\_frames} = 1$ , e taxa de transmissão de dados de 9600 bps (Figura 5.14). Com o fim de só medir o tempo de atraso na execução de um serviço BACnet de cada dispositivo BACnet na rede, os atrasos na fila do controlador central (coordenador BACnet) foram excluídos.

Outra variável utilizada para avaliar uma rede BACnet MS/TP é o tempo de rotação do token TRT (Token Rotation Time) e se define como o tempo transcorrido de um modo de circulação desde o nó de menor endereço ao nó de maior endereço (Figura 5.15).

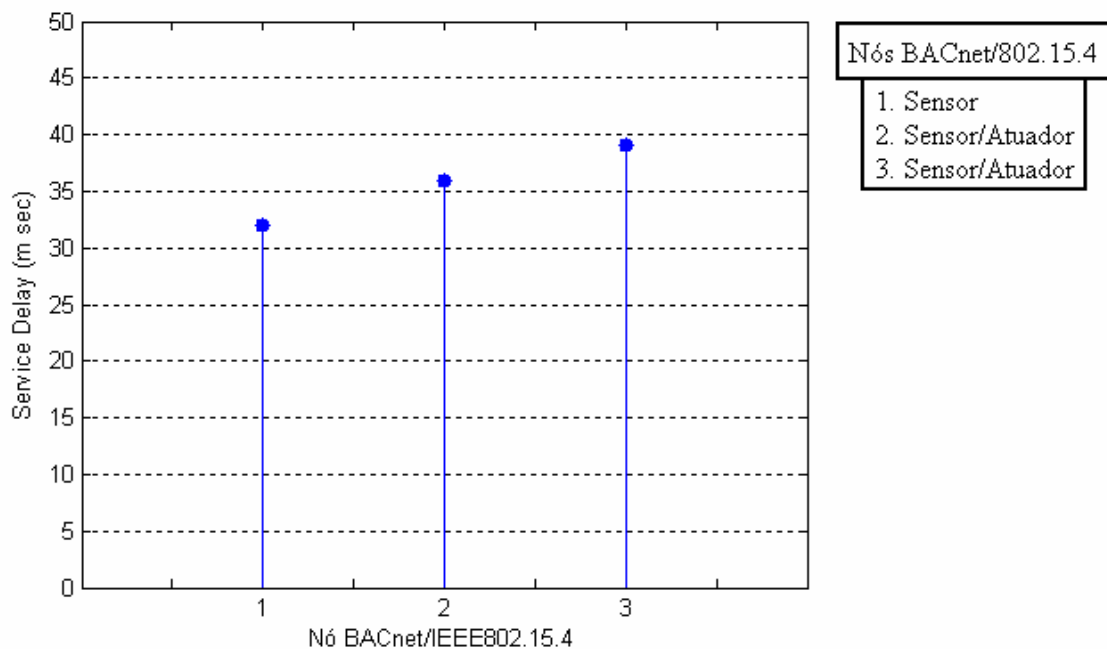


Figura 5.14 – Service Delay BACnet/IEEE802.15.4.

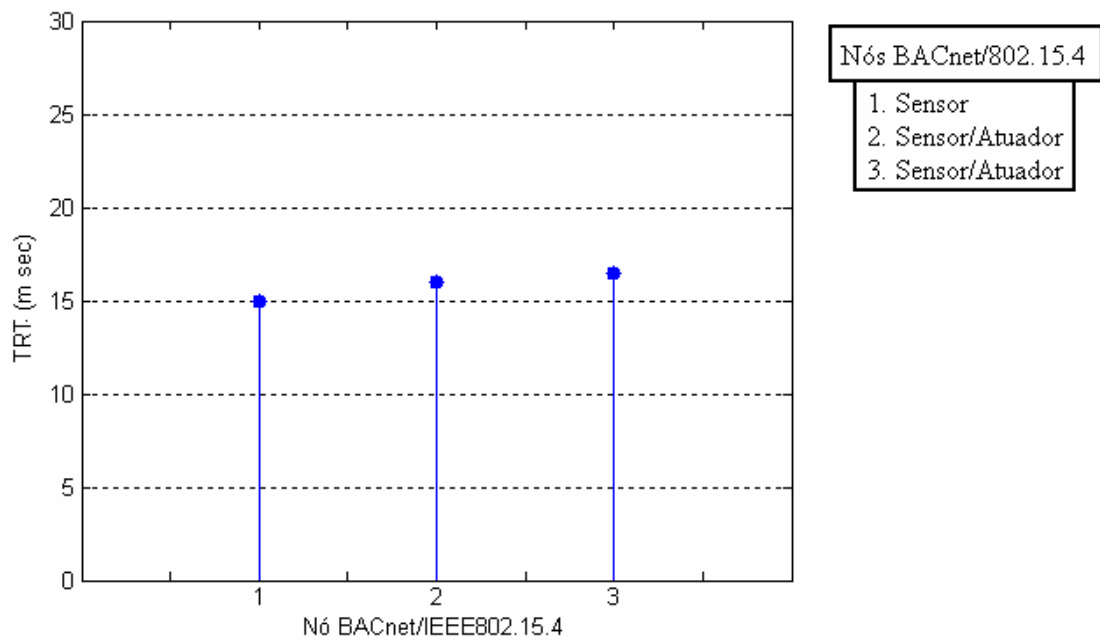


Figura 5.15 - Token Rotation Time BACnet/IEEE802.15.4.

Mostra-se que o tempo de demora para a execução de um serviço BACnet foi proporcional ao número de objetos BACnet que possuía o dispositivo. Muitos fatores podem afetar o desempenho em uma rede BACnet, neste caso os mais importantes foram o número de nós e o intervalo de geração de mensagens. O `Nmax_info_frames` utilizado satisfaz os requerimentos da RSSF proposta.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para testar um novo dispositivo BACnet/IEEE802.15.4. O objetivo principal foi avaliar se as funcionalidades que ele possui como dispositivo BACnet apresentaram uma resposta satisfatória ao comunicar-se utilizando um meio de comunicação sem fio. Os resultados obtidos demonstram que o método atingiu seus objetivos, permitindo conhecer suas características de desempenho e robustez em diferentes cenários.

Ao trabalhar o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4 no novo meio de transmissão sem fio proposto, mostra-se uma resposta satisfatória aos requerimentos funcionais. As variáveis avaliadas: atraso na execução de serviços (Service Delay) e a TRT (Token Rotation Time) se encontraram entre as faixas aceitáveis no desempenho dos sistemas MS/TP, comparado com os dispositivos BACnet tipo MS/TP que trabalham em meios de transmissão com fios (Park, T.J., Kwon, Y.C. e Hong, 2005), porém tem que ser levado em conta algumas recomendações quanto a utilização de seus diferentes canais de comunicação e ao uso de outras tecnologias sem fio que estejam funcionando no mesmo ambiente. No caso do Wi-Fi, deve-se evitar utilizar seus canais de transmissão 3 e 6, pois foram os que apresentaram as maiores interferências para o dispositivo BACnet/IEEE802.15.4, além disso estes canais em meio a uma transmissão Bluetooth apresentaram as maiores quedas em seus desempenhos.

Os canais de transmissão C, 19 e 1A do dispositivo BACnet/IEEE 802.15.4 mostraram e cumpriram os requerimentos mínimos para um sistema BACnet em BAS (Building Automation Systems). Na Tabela 6.1, mostra-se a média dos parâmetros testados no desempenho para o envio e recebimento de pacotes BACnet nos diferentes cenários onde foram avaliados estes canais. Os valores da PER e do RSSI encontram-se entre os níveis permitidos e requeridos para o correto funcionamento da rede de sensores sem fio proposta.

Tabela 6.1 – Melhores canais para a transmissão do dispositivo BACnet/IEEE 802.15.4.

| Canal RF | CENÁRIOS                |             |                              |             |                                     |             |
|----------|-------------------------|-------------|------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
|          | BACnet/802.15.4 – Wi-Fi |             | BACnet/802.15.4 -- Bluetooth |             | BACnet/802.15.4 – Bluetooth – Wi-Fi |             |
|          | <i>PER</i>              | <i>RSSI</i> | <i>PER</i>                   | <i>RSSI</i> | <i>PER</i>                          | <i>RSSI</i> |
| C        | 0.0255                  | -67         | 0.05                         | -68         | 0.0525                              | -69         |
| 19       | 0.0282                  | -65         | 0.0375                       | -67         | 0.05                                | -68         |
| 1A       | 0.0236                  | -66         | 0.035                        | -68         | 0.0625                              | -71         |

Os valores do RSSI que se encontram abaixo do nível de sensibilidade do receptor (-92 dBm) são considerados válidos para avaliação do desempenho e robustez do dispositivo BACnet/IEEE 802.15.4, além de garantir o bom funcionamento dele. Valores do RSSI iguais ou que ultrapassaram a sensibilidade do receptor, não apresentaram um grau de validade para sua utilização na avaliação do dispositivo BACnet, devido a inexistência de correlação com a PER testada, além disso, trabalhar nestes valores do RSSI levou a perda iminente de dados.

No desempenho dos parâmetros do protocolo BACnet, o incremento no valor de *Nmax\_info\_frames* diminuiria a demora na execução de um serviço BACnet e garantiria que com um aumento no tráfego ou dos nós na rede o valor do Service Delay através do tempo demoraria muito mais a ser incrementado. O projetista pode escolher valores para o parâmetro *Nmax\_info\_frames* de acordo com a distribuição das mensagens em sistemas MS/TP, e assim conseguir reduzir o tempo de demora na execução de um serviço BACnet.

Os altos custos de implementação e manutenção nos sistemas de automação predial podem ser reduzidos com a utilização das redes de sensores sem fio. O uso destas novas tecnologias de comunicação que originalmente não foram desenvolvidas para trabalhar com protocolos mais robustos como BACnet, se mostram como uma alternativa de solução para estes tipos de aplicações.

Para trabalhos futuros propõem-se testes mais extensos que envolvam a utilização de uma quantidade maior de dispositivos BACnet/IEEE802.15.4, conseguindo uma maior quantidade de tráfego pela rede, podendo assim avaliar a resposta em desempenho da transmissão de pacotes BACnet MS/TP sob IEEE 802.15.4. Além disso, a testabilidade da comunicação a diferentes taxas de transmissão que utiliza MS/TP (19.2, 38.4 e 76.8 Kbps), ajudarão a avaliar o desempenho do nó BACnet para escolher em qual destas taxas se apresenta o melhor desempenho. Por último, tendo uma rede com variedade de dispositivos BACnet/IEEE 802.15.4, poderiam-se testar diferentes valores para o parâmetro `Nmax_info_frames` na configuração do padrão MS/TP, encontrando assim o melhor valor para a redução do tempo na execução dos diferentes tipos de serviços que BACnet implementa. Sendo o dispositivo desenvolvido do tipo BACnet MS/TP, poderão ser testados outros parâmetros de configuração, como por exemplo o `Tusage_delay` ou o `Tframe_gap`, estes resultados servirão como referência no aperfeiçoamento deste tipo de sistemas em um meio de transmissão sem fio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI/ASHRAE Standard 135 (2004) *BACnet: A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks*, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- Belchor, S. R. (2007) Engenharia de Automação Industrial, LTC.
- Bengtsson, N. (2007) *Development and Implementation of a Low Power Wireless Sensor Network*, Dissertação de Mestrado, Department. of Electrical Engineering, Linköpings Universitet, 59pp.
- Brito, M.V. e Silva, R.P.F. (2009) *Implementação de BACnet sobre ZigBee para Redes de Automação Predial Wireless*, Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 61pp.
- Bushby, S. T. (1997) BACnet™: A standard communication infrastructure for intelligent buildings. National Institute of Standards and Technology. Automation in Construction, 6, 529–540.
- Charny, B. (2002) Wireless research senses the future. *ZDNet News* [Online]. Disponível em: <http://zdnet.com.com/2100-1105-976377.html>.
- Chong, C. Y. e Kumar, S. P. (2003) “Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges.” In: *Proceedings of the IEEE*.
- Crossbow Technology, Inc. (2007) Hardware Reference manual. United States.
- Dornan, A. (2001) Wireless communication: o guia essencial de comunicação sem fio, Rio e Janeiro, Campus.
- Endo, P.T. e Gonçalves, P.A. (2005) “Tecnologias de Comunicação para Redes Domiciliares.”, UFPE, Centro de Informática (CIn), Pernambuco, Brasil.
- Farahani S. (2008) *Zigbee Wireless Networks and Transceivers*. Elsevier Ltd.
- GAST, M. S. (2002) *802.11 Wireless Networks*, O’Reilly.
- Giacomin, J.C. (2006) “Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada Física.” In: *The 25th Conference on Computer Communications Sponsored by IEEE Communications Society, Barcelona, Catalunya, Spain*.
- Gislason, D. (2008) *Zigbee Wireless Networking*. Elsevier Inc.



- Hong, S.H. e Park, T.J. (2006) "Development of an Experimental Model of BACnet-based Lighting Control System." In: *Industrial Informatics IEEE 114-119*.
- IEEE 802.15.4. (2003) IEEE Standard for Information technology Part 15.4: *Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRW-PANs)*.
- Jensen, D. (2002) "SIVAM: Communication, navigation and surveillance for the Amazon." *Avionics Magazine*. [Online] Disponível em: <http://www.aviationtoday.com/reports/avionics/previous/0602/0602sivam.htm>.
- Karl, H. e Willig, A. (2007) *Protocols and architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Inc.
- Kastner, W., Neuschwandtner, G., Soucek, S., & Newman, H. M. (2005) *Communication systems for building automation and control Proceedings of the IEEE*, 93, 1178 – 1203.
- Khalili, R. e Salamatian, K. (2003) *Evaluation of packet error rate in wireless networks*, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.
- Lee, J.S. (2005) "An Experiment on Performance Study of IEEE 802.15.4 Wireless Networks." In: *Emerging Technologies and Factory Automation*.
- Lim, J.C. e Wong, K.D. (2006) "Wireless Sensor Networks: The Potential Use of Received Signal Strength in power Transmission Control for the MICA2", In: *Engineering e-Transaction*, Malaysia University of Science and Technology.
- Lönn, J. e Olsson, J. (2005) *ZigBee for wireless networking*, Dissertação de Mestrado, Department of Science and Technology, Linköpings Universitet, 73pp.
- MaxStream (2006) XBee OEM RF Modules, ZigBee/802.15.4.
- Martocci, J.P. (2008) "BACnet Unplugged, ZigBee and BACnet Connect" In : *ASHRAE Journal, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc*, ashrae.org.
- Miller, M. (2001) *Descobrimos Bluetooth*, Rio de Janeiro, Campus.
- Montebeller, S. J. (2006) *Estudo sobre o emprego de dispositivos sem fios - wireless na automação do ar condicionado e de outros sistemas prediais*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 130pp.
- Muñoz, H.A., Couto, F.L. e Bauchspiess, A. (2008) "Alcance y Robustez en una Red de sensores Inalámbrica ZigBee bajo Diferentes Tipos de Obstáculos Prediales " In: *XVII CBA Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora MG, Brasil.
- Muñoz, H.A., Baptista, R. e Bauchspiess, A. (2009) "Análise de Redes de Comunicação não Invasivas para Retrofitting Predial" In: *IX SBAI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Brasília DF, Brasil.

- Nicopolitidis, P., Obaidat, M.S., Papadimitriou, G.I. e Pomportsis, A.S. (2003) *WIRELESS NETWORKS*, John Wilwy & Sons, Ltda.
- Nishimura, C.E. e Conlon, D.M. (1994) "IUSS dual use: Monitoring whales and earthquakes using SOSUS." In: *Mar. Technol. Soc. J.*, vol.27.
- Österlind, F., Pramsten E., Roberth D., Eriksson J., Finne N. e Voigt T. (2007) "*Integrating Building Automation Systems and Wireless Sensor Networks.*", Swedish Institute of Computer Science. Suécia.
- Park, T.J., Kwon, Y.C. e Hong, S.H. (2005) "Performance evaluation of BACnet MS/TP protocol using experimental model." In: *Industrial Technology IEEE*.
- Park, T.J., Chon, Y.j., Park, D.K. e Hong, S.H. (2007) "BACnet over ZigBee, A new approach to wireless datalink channel for BACnet." In: *Industrial Informatics*.
- Petrova, M., Riihijärvi, J., Mähönen, P. e Labella, S. (2006) "Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations." In: *Wireless Communications and Networking Conference*.
- Ramazanali, H. (2006) *Characterization and evaluation of ZigBee modules*, Dissertação de Mestrado, Linköping Institute of Technology, Linköpings Universitet, 87pp.
- Reinisch, C. (2007) *Wireless Communication in Home and Building Automation*, Dissertação de Mestrado, Technischen Universität Wien, Alemanha, 125pp.
- Sohraby, K., Minoli, D. e Znati, T (2007) *Wireless Sensor Networks*. Wiley-Interscience.
- Steere, D., Baptista, A., McNamee, D., Pu, C. e Walpole, J (2000) "Research challenges in environmental observation and forecasting systems." In *Proc. 6th Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MOBICOMM)*.
- Swan, B. (1998) "The Language of BACnet-Objects, Properties and Services". In: Alerton Technologies, Inc.
- Shin, S.Y., Hong, S.P., e Wook, H.K (2007) "Mutual Interference Analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 8-2.11b." In: *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*.
- Song, W.S., Hong, S.H. e Bushby, S.T (2003) "A simulation Analysis of BACnet Local Area Networks." In: *National Institute of Standards and Technology*, NISTIR 7038, E.U.A.
- Song, W.S., Hong, S.H. e Park, T.J (2006) "The effects of service delays on a BACnet-based HVAC control system." In: *Control Engineering Practic*, 15, 209–217.
- Song, W.S. e Hong, S.H. (2003) "Study on the Performance Analysis of Building Automation Network" In: *Industrial Electronics IEEE*, volume 1, 9-11, 184 – 188.

- Song, W.S. e Hong, S.H. (2006) “Performance Evaluation of a BACnet-based Fire Detection and Monitoring System for use in Buildings” In: *International Journal of Control, Automation, and Systems*, volume 4, no. 1, 70-76.
- Thelen, J., Goense, D. e Langendoen, K. (2005) “Rádio Wave Propagation in Potato Fields”, In: *1st workshop on wireless network measurement, Riva del Garda, Italy*.
- Torres, S. (2007) *Redes de Sensores Sem Fio em Monitoramento e Controle*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Rio de Janeiro, 87pp.
- Vunda, F.J. (2005) *Protocolo de Comunicação IEEE 802.15.4 e ZigBee*, Disciplina de trabalho de integração, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Wettergren, A. (2007) *ZigBee in Industry*, Dissertação de Mestrado, Linköping Institute of Technology, Linköpings Universitet, 73pp.
- ZigBee Alliance. (2006) *ZigBee Document 053474r17 - ZigBee Specification*.