

Dissertação de Mestrado

Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio

Carlo Frederico Pereira de Siqueira Campos

Natal, fevereiro de 2010

Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio

Carlo Frederico Pereira de Siqueira Campos

Dissertação de Mestrado aprovada em 27 de Novembro de 2006 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Andrés Ortiz Salazar (Orientador) DCA/UFRN

Prof. Dr. Celso José Munaro (Examinador Externo) DEE/UFES

Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto (Examinador Interno) DCA/UFRN

Prof. Dr. Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira (Examinador Interno) DCA/UFRN

*Dedico este trabalho a memória do
mestre, professor e amigo, Judinor
Aguirres Guerra, o Bimbo.*

Agradecimentos

À Deus pela saúde e força de vontade que sempre me manteve firme nesta caminhada.

À minha mãe Dulce pelas orações, amor, carinho e compreensão. Ofereço-lhe esta vitória. Espero um dia poder pagar minha dívida de gratidão.

Ao meu filho Marcos Vinícius; você é a razão da minha luta.

Ao meu irmão Antonio que sempre me ajudou, com seus conselhos, experiência e amizade, muitíssimo obrigado.

Ao meu pai Carlos Alberto pelo apoio, palavras de incentivo e carinho.

À minha galega, sem sua paciência, amor e carinho não teria chegado até aqui. Te amo muito.

Ao meu orientador, professor Ortiz, sou grato pela orientação, apoio, críticas, sugestões e amizade.

Ao professores Affonso e Adrião pela ajuda na revisão deste modelo de dissertação, sugestões, críticas e amizade.

Aos colegas do LAMP, especialmente do projeto "Sem fio". Obrigado.

Aos amigos Aderson, Daniel e Dennis pelas incontáveis horas de convivência, estudo e ajuda, meu muito obrigado.

Aos demais colegas de pós-graduação, pelas críticas e sugestões.

À Agência Nacional de Petróleo (ANP) - PRH 14, pelo apoio financeiro.

Resumo

As redes de sensores sem fio (RSSS) já são uma realidade hoje em dia, pois a grande necessidade de conectividade entre os equipamentos existentes numa planta industrial impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de diversas tecnologias. O padrão LR-WPAN IEE 802.15.4 apresenta-se como uma solução viável, com baixo custo e baixo consumo de energia, requisitos importantes para a implantação de um sistema de sensoriamento remoto.

A contribuição deste trabalho consiste em propor um sistema de comunicação sem fio, que possa monitorar variáveis analógicas e/ou digitais (no caso do estudo em questão, a pressão) nos métodos de elevação artificial de petróleo e gás natural. Os pontos principais deste estudo são:

- Desenvolver um *software* baseado no Padrão *SMAC* com intuito de criar uma rede sem fio com fins de monitoramento de variáveis analógicas e/ou digitais;
- Avaliar o enlace de comunicação com relação a quantidade de pacotes perdidos em diferentes ambientes (ambientes internos (*Indoor*) e externos (*Outdoor*)) e,
- Propor um sistema de instrumentação utilizando tecnologia sem fio.

Palavras-chave: Tecnologias Sem Fio, Padrão IEEE 802.15.4, Protocolo *SMAC*, Sistema de Instrumentação Sem Fio, Métodos de Elevação Artificial de Petróleo, *Zigbee*.

Abstract

Wireless sensor networks are reality nowadays. The growing necessity of connectivity between existing industrial plant equipments pushes the research and development of several technologies. The IEEE 802.15.4 LR-WPAN comes as a low-cost and power-saving viable solution, which are important concerns while making decisions on remote sensing projects.

This study intends to propose a wireless communication system which makes possible the monitoring of analogic and/or digital variables (i. e., the pressure studied) involved on the artificial methods for oil and gas lifting. The main issues are:

- To develop a software based on SMAC Standard in order to create a wireless network to monitoring analogic and/or digital variables;
- To evaluate the communication link based on the number of lost packets tested in different environments (indoor and outdoor) and
- To propose an instrumentation system consisting of wireless devices.

Keywords: Wireless Technologies, IEEE 802.15.4 Standard, SMAC Protocol, Wireless Instrumentation System, Artificial Oil Lifting Methods, Zigbee.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vi
1 Introdução	1
1.1 Histórico das comunicações sem fio	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	4
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 Instrumentação para Sistemas de Elevação de Petróleo	6
2.1 Métodos de Elevação Artificial	6
2.1.1 Bombeio Mecânico - BM	6
2.1.2 Gás <i>lift</i> - GL	7
2.1.3 Bombeio por Cavidades Progressivas - BCP	9
2.1.4 <i>Plunger Lift</i>	10
2.2 Instrumentação Associadas e Variáveis Medidas em Poços <i>On shore</i> de Petróleo e Gás Natural	12
2.2.1 Instrumentação Atual, Limitações Inerentes e Possibilidades de Otimização através da Tecnologia <i>Wireless</i>	12
3 Tecnologias de Comunicação Sem Fio (<i>Wireless</i>)	15
3.1 Visão Geral das Tecnologias Sem Fio (<i>Wireless</i>)	15
3.2 Redes <i>LR-WPAN</i> (Padrão IEEE 802.15.4)	17
3.2.1 Dispositivos da rede LR-WPAN	17
3.2.2 Topologia de Rede	18
3.2.3 Pilha do Protocolo - Padrão <i>IEEE</i> 802.15.4	18
3.2.4 Camada Física - <i>PHY</i>	19
3.2.5 Camada MAC	23
3.2.6 Limitações do Padrão 802.15.4	24
3.3 Trabalhos Relacionados	24

4	Sistema Proposto	27
4.1	Fonte de Energia Alternativa	27
4.2	Sensor	28
4.3	Sistema de Comunicação Sem Fio	28
4.3.1	Padrão <i>SMAC - Simple MAC</i>	28
4.3.2	Estrutura do Pacote	29
4.3.3	Algoritmo de Checagem de Erros	29
4.3.4	Primitivas e Estruturas do <i>SMAC</i>	29
4.4	<i>Transceiver</i> MC13192	31
4.4.1	Modos de Operação do <i>Transceiver</i> MC13192	32
4.5	Microcontrolador MC9S08GT - Família HCS08	34
4.5.1	Módulo de conversão Analógico-Digital (<i>ATD</i>)	34
4.6	Supervisório - <i>Labview</i>	38
4.7	Plataforma de Desenvolvimento	39
4.8	Diagrama de Blocos do Sistema	40
4.8.1	Descrição das Trocas de Mensagens	41
5	Resultados	43
5.1	Metodologia	43
5.1.1	Variável Pacotes Transmitidos (TX) - <i>Labview</i>	43
5.1.2	Pacotes Recebidos (RX) - Placa Mestre	45
5.2	Testes Realizados	45
5.2.1	Testes em Ambiente Externo sem Obstáculos	45
5.2.2	Testes em Ambiente Externo com Obstáculos	49
5.2.3	Testes em Ambiente Interno	52
5.2.4	Testes com Sinais de Interferência	55
5.3	Discussão	56
6	Conclusões	58
6.1	Sumário e Contribuições	58
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	59
	Referências bibliográficas	61

Lista de Figuras

2.1	Movimentos das partes no BM.	7
2.2	Sistema de gás <i>lift</i>	8
2.3	Método de elevação artificial - GL contínuo.	9
2.4	Sistema BCP.	10
2.5	Etapas do processo de produção no método <i>plunger lift</i>	11
2.6	Diagrama de blocos da instrumentação associada ao processo de elevação artificial de petróleo.	13
2.7	Método de elevação (Bombeio Mecânico)	13
3.1	Áreas de aplicação das tecnologias sem fio.	16
3.2	Topologias de rede IEEE 802.15.4.	18
3.3	Modelo das camadas de rede - Padrão 802.15.4.	19
3.4	Canais do padrão <i>IEEE</i> 802.15.4.	20
3.5	Constelação (dbits,fase).	21
3.6	Atraso do bit <i>Q-Phase</i>	21
4.1	Diagrama de blocos do sistema de instrumentação proposto.	27
4.2	Estrutura do pacote.	29
4.3	Modos de operação.	33
4.4	Registrador ATDC.	35
4.5	Registradores de resultados (ATD1RH e ATD1RL).	35
4.6	Registrador ATD1SC.	37
4.7	Registrador ATDPE.	38
4.8	Tela do Supervisório.	38
4.9	Tela de programação do supervisório.	39
4.10	Placas da rede <i>Wireless</i>	39
4.11	Interface de desenvolvimento dos <i>Softwares</i> embarcados nas placas sem fio.	40
4.12	Diagrama de blocos do sistema proposto.	41
5.1	Fluxograma - <i>Labview</i>	44
5.2	Potência do sinal em ambiente externo com visada direta até $d = 50$ metros.	46
5.3	PP(%) em ambiente externo até 250 metros.	47
5.4	Potência do sinal em ambiente externo com visada direta até 250 metros.	48
5.5	Medições realizadas na distância de 250 metros.	48
5.6	Localização dos pontos de medição em ambiente externo - 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a Fases.	49
5.7	PP(%) em ambiente externo com obstáculos - 1 ^a fase.	50
5.8	PP(%) em ambiente externo com obstáculos - 2 ^a fase.	51

5.9	PP(%) em ambiente externo com obstáculos - 3 ^a fase.	52
5.10	Localização dos pontos de medição na planta baixa do LAMP.	53
5.11	PP(%) em ambiente interno - 1 ^o ponto de medição.	54
5.12	PP(%) em ambiente interno - 2 ^o ponto de medição.	54
5.13	PP(%) em ambiente interno - 3 ^o ponto de medição.	55
5.14	PP (%) em ambiente interno com presença de sinal de interferência(2,4 GHz).	56

Lista de Tabelas

1.1	Comparativo entre algumas tecnologias <i>wireless</i>	3
3.1	Quadro Comparativo.	16
3.2	Parâmetros da Camada Física (PHY).	19
3.3	Mapeamento Símbolo-Chip.	22
4.1	<i>SMAC</i> API.	30
4.2	Modos de Operação do Transceiver MC1319x.	32
4.3	Valores do <i>clock</i> do barramento e conversão ATD.	36
4.4	Significado dos <i>bits</i> do registrador	36
4.5	ATDCH.	37
4.6	Estados do <i>Transceiver</i>	41
5.1	Medições em ambiente externo com visada direta até 50 metros	46
5.2	Medições em ambiente externo com visada direta até 250 metros	47
5.3	Ambiente Externo com Obstáculo - Distância Variada	51
5.4	Medições em Ambiente Interno - Pacotes Perdidos (%)	53
5.5	Potência do sinal(dBm) em ambiente interno	55

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ATD	Analog to Digital
ATDC	ATD Control
ATDCH	Analog Input Channel Select
ATDCO	ATD Continuous Conversion
ATDIE	ATD Interrupt Enabled
ATDPE	ATD Pin Enable
ATDPU	ATD Power Up
ATDSC	ATD Status and Control
BCP	Bombeio por Cavidades Progressivas
BDM	Background Debug Module
BER	Bit error rate
BM	Bombeio Mecânico
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CCA	Clear Channel Assessment
CCF	Conversion Complete Flag
CLP	Controlador Lógico Programável
CRC	Cyclic Redundancy Code
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DJM	Data Justification Mode
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
EVB	Evaluation Boards

EVK	Evaluation Kit
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
FLI	Frame Length Indicator
FSK	Frequency Shift Keying
GL	Gás Lift
GTS	Guarantee Time Slots
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Índice de Produtividade
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LAMP	Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo
LLC	Logical Link Control
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate-Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control
MCPS-SAP	MAC common part sublayer-service access point
MLME-SAP	MAC sublayer management entity-service access point
O-QPSK	Off Set Quaternary Phase Shift Keying
OSI	Open Systems International
PER	Packet error rate
PRS	Prescaler Rate Select
PSDU	PHY Service Data Unit
PSK	Phase Shift Keying
RES8	ATD Resolution Select
RFD	Reduced Function Device
RSSS	Redes de sensores sem fio
RX	Recebidos

SFD	Start Frame Delimiter
SGN	Signed Result Select
SMAC	Simple Media Access Controller
SPI	Serial Peripheral Interface
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
TX	Transmitidos
UTR	Unidade de Transmissão Remota
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless World Area Network

Capítulo 1

Introdução

1.1 Histórico das comunicações sem fio

A idéia da comunicação sem fio através de transmissores e receptores via rádio frequência surgiu em meados do século XIX, a partir das teorias de dois físicos ingleses, Michael Faraday e James Clerk Maxwell. Em 1888, Heinrich Hertz aplicou essas teorias para construir um transmissor centelhador, um dispositivo que gerava ondas de rádio a partir de uma centelha elétrica. Em 1895 o engenheiro eletricista italiano Guglielmo Marconi ampliou o alcance dessas transmissões e adaptou a tecnologia para enviar e receber sinais telegráficos sem fio. Em 1901 Marconi construiu o primeiro transmissor telegráfico transoceânico, com uma ligação de 3.200 km, entre Poldhu, na Cornualha, Inglaterra, e St. John, em Terra Nova, Canadá. No início do século XX, os avanços na tecnologia de tubo de vácuo, desenvolvidos pelo professor inglês John Ambrose Fleming e pelo inventor norte-americano Lee De Forest, tornou possível modular e amplificar sinais sem fio para o envio de transmissões de voz. O alcance e a clareza das transmissões vocais aumentaram à medida em que se fizeram novos progressos na tecnologia. Em 1915 a American Telephone Telegraph Company transmitiu uma mensagem vocal por rádio entre os Estados Unidos e a França. Na década de 30, pequenos transmissores de rádio bidirecionais já eram usados por policiais e funcionários dos serviços de atendimento a emergências. Aperfeiçoamentos tecnológicos tornaram os sistemas de comunicação bidirecionais menores e mais leves, com alcance e capacidade ampliados [Geocities 2006].

Os avanços no campo da comunicação nos últimos anos possibilitaram o surgimento de várias tecnologias, que desde então, procuram atender a real necessidade de seus usuários, com a melhor qualidade possível. Visando obter maior flexibilização da comunicação, mobilidade dos equipamentos instalados em campo e um menor custo de instalação e manutenção destes, a tecnologia sem fio se apresenta como diferencial neste campo da indústria. São muitos os benefícios propiciados pelo uso desta tecnologia [Flowers et al. 2006].

Basta observar a evolução tecnológica ocorrida na última década na área das telecomunicações, enfocando aqui a telefonia celular, onde os aparelhos celulares que eram verdadeiras geringonças, tornaram-se hoje equipamentos bastante diversificados, não só recebendo e realizando ligações telefônicas, mas agregando à isso, serviços de mensa-

gens, e-mails, câmeras digitais (foto e/ou vídeo), etc... Além da melhoria significativa dos serviços oferecidos pelas operadoras, apesar dos problemas já conhecidos.

A comunicação sem fio avança em diversas áreas. Hoje, pode-se encontrar desde aparelhos eletrônicos, como por exemplo, um computador pessoal conectado à internet via *Wi-fi*, até redes de sensores sem fio (RSSS) aplicadas à automação e monitoramento em diversas áreas, como a industrial, médica, comercial e residencial. De acordo com pesquisas e estudos realizados em breve estas tecnologias poderão ser utilizadas até na área de controle de processos.

Para que se possa mensurar a velocidade de desenvolvimento destas tecnologias o padrão *Zigbee* é o mais recente membro da família *Wireless* a ser criado. Ele despontou a partir do ano de 1998 quando a Motorola iniciou seus estudos em um tipo de rede de baixo consumo, posteriormente denominadas de redes *mesh* [Baker 2005].

Já o padrão *IEEE 802.15.4*, o qual define as camadas *MAC* e *PHY* do *Zigbee*, foi baseado na proposta da Motorola em meados de 2001 e foi ratificado em outubro de 2003. No ano de 2002, algumas empresas uniram-se com intuito de pesquisar e desenvolver as camadas de rede, segurança e aplicação baseadas no padrão *IEEE 802.15.4* a qual denominou-se *Zigbee Alliance*, foram elas:

- Phillips
- Motorola
- Invensys
- Honeywell
- Mitsubishi

Após um período de pesquisas e desenvolvimento, foi apresentado em dezembro de 2004 a toda comunidade científica o padrão *Zigbee* [Ciardiello 2005]. O padrão *IEEE 802.15.4* e o *Zigbee* surgiram com o intuito de suprir a falta de uma solução voltada às redes de sensores sem fio aplicadas às áreas indústria e residencial [Baker 2005].

1.2 Motivação

A grande quantidade de sensores, atuadores, controladores, e supervisórios existentes, principalmente nas indústrias, além da necessidade de conectividade entre eles, tem alavancado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de transmissão de dados utilizando o ar como meio físico, que permitam uma elevada quantidade de dispositivos conectados a um baixo custo e com alto grau de confiabilidade. [Gessinger & Hennig 2005].

Nos métodos atuais de automação e controle, o monitoramento das variáveis envolvidas nos processos industriais, comerciais e/ou residenciais realiza-se através de fios e cabos. Entretanto, neste meio de transmissão físico os problemas como: desgaste do material, portabilidade, flexibilidade, confiabilidade dos dados obtidos, etc... estão sempre presentes com maior ou menor intensidade.

Diante disto, e sabendo-se que a indústria do petróleo caracteriza-se por ser, em quase toda sua totalidade, uma área com permanentes riscos de explosões, também denominada

de "Área classificada"; a retirada de cabos que interligam os sensores, atuadores, supervisórios, CLP's e microcontroladores torna-se de extrema importância além de tornar os sistemas mais flexíveis, portáteis, com uma maior confiabilidade dos dados trafegados e com um menor custo operacional de instalação e desinstalação destes equipamentos.

Surge então a possibilidade da utilização da tecnologia *wireless*. Entretanto, estes métodos de transmissão possuem suas características e seus limitantes, tornando de suma importância o devido equacionamento do problema para a otimização da solução a ser empregada. Na Tabela 1.1 pode-se observar uma breve descrição de algumas destas tecnologias [Denis 2004].

Tabela 1.1: Comparativo entre algumas tecnologias *wireless*

	<i>HomeRF</i>	<i>Bluetooth</i> (802.15.1)	<i>Zigbee</i> (802.15.4)	<i>802.11b (Wi-Fi)</i>
Aplicações	Redes residenciais	Conectividade pessoal	RSSS	Redes corporativas
Camada Física	FHSS	FHSS	DSSS	DSSS
Distância	50m	10 m	100 m	100 m
Frequência	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz
Topologia	Ponto a ponto	Ponto - multiponto	Ponto - multiponto	Ponto - multiponto
Max. Potência Transmitida	100 mW	(1-100) mW	(1-100) mW	100 mW
Taxa de dados	2 Mbps	1 Mbps	250 Kbps	11 Mbps
Tipos de dados	Voz e dados	Voz e dados	Dados	Dados
Tipos de redes	WLAN	WPAN	LR-WPAN	WLAN
Custo	US100 por computador	US5 por módulo	US3 por módulo	US100 por computador

Como trata-se, no presente estudo, da comunicação entre dispositivos (sensores, atuadores e supervisórios) presentes numa planta industrial onde basicamente trafegam dados; a taxa de transmissão de dados não necessita ser elevada, tornando mais relevante outros parâmetros, como por exemplo:

- baixo custo;
- baixo consumo de energia;
- alta eficiência utilizando poucos recursos de processamento;
- segurança dos dados;
- determinismo na rede.

Baker (2005) destacou algumas vantagens do *Zigbee* com relação as demais tecnologias, no que se refere a redes de sensores sem fio em ambientes industriais:

1. Alta escalabilidade, permite um elevado número de módulos trafegando informações pela rede - 2 à 65.000.
2. Alcance de até 100m para redes *indoor* e, em torno de 300m para redes *outdoor*
3. Alta flexibilidade. O *Zigbee* possui dois tipos de topologias de redes: ponto a ponto (*mesh*) e estrela. Em um mesmo ambiente pode-se estar utilizando diferentes arquiteturas de redes para solucionar problemas distintos.
4. Baixo consumo de energia. Através dos períodos de latência, onde os módulos após efetuar sua transmissão e/ou recepção (100mW) voltam ao estado *sleep* (1mW) economizando assim bastante energia.
5. Baixo período de latência dos módulos (medido em ms), como por exemplo: Mudança do estado *sleep* para o estado ativo - 15ms, ativação de um novo dispositivo na rede - 30ms
6. Três faixas de frequência na banda *ISM*, 868 MHz, 902-928MHz e 2,4GHz. Estas bandas não necessitam de licença para serem utilizadas.

1.3 Objetivos

A comunicação via *wireless* baseada no padrão *IEEE* 802.15.4, pode ser realizada desenvolvendo-se desde protocolos baseados nas camadas mais inferiores, como a camada *MAC* até as mais externas, que é o caso do padrão *Zigbee*[Flowers et al. 2006].

O objetivo principal deste trabalho consiste em estudar e analisar a utilização da tecnologia de comunicação sem fio que possa vir a ser utilizada nos métodos de elevação artificial de petróleo e, por fim, propor um protótipo de instrumentação integrado a esse sistema de comunicação. Para isto, será realizado um estudo comparativo entre as tecnologias existentes, visando selecionar a mais apropriada para o problema em questão. Por se tratar de uma área classificada, a faixa de frequência a ser utilizada, dentre as que são regulamentadas pela ANATEL, deverá estar relacionada ao tipo de protocolo a ser utilizado no estudo.

1.4 Estrutura da Dissertação

O capítulo 2 apresenta um resumo do funcionamento de alguns dos métodos de elevação mais comuns empregados na indústria petrolífera, assim como a instrumentação inerente aos seus respectivos métodos, limitações e sugestões de otimização em cada um, através de tecnologia sem fio. O capítulo 3 apresenta uma visão geral das tecnologias existentes, quadros comparativos entre elas e um resumo do motivo da escolha de determinada tecnologia para ser objeto deste estudo, assim como apresenta conceitos básicos a respeito do *Zigbee* e do padrão *IEEE* 802.15.4, detalhando características e limitações destas tecnologias, e também, os trabalhos relacionados com tema em estudo e uma breve

discussão desses trabalhos. O capítulo 4 descreve com detalhes o sistema de comunicação sem fio proposto, descrevendo um programa baseado nas premissas do *SMAC*, onde através deste será construída uma rede sem fio conectada à um PC através de uma interface serial onde há um supervisor desenvolvido em *Labview*, que monitora as variáveis da rede. O capítulo 5 apresentará a metodologia empregada e os resultados gerados com comentários a respeito destes. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Instrumentação para Sistemas de Elevação de Petróleo

Desde o surgimento da indústria do petróleo, os profissionais envolvidos nela procuram otimizar a extração de suas matérias primas, petróleo e gás natural. Na maioria dos poços de petróleo, sejam eles em terra (*on-shore*) ou no mar (*off-shore*), a pressão do reservatório é suficientemente elevada para fazer emergir os fluidos presentes em seu interior. Entretanto, com o passar do tempo e a produção contínua, a pressão decresce e os fluidos presentes em seu interior não conseguem elevar-se até a superfície. Os poços que produzem por elevação natural são denominados de poços surgentes (*flowing wells*). Quando isto não ocorre, faz-se necessário a utilização de métodos de elevação artificiais, sendo que estes, através do fornecimento de um diferencial de pressão sobre o reservatório, conseguem aumentar a vazão de um poço.

2.1 Métodos de Elevação Artificial

Nesta seção será apresentado de forma resumida o princípio de funcionamento de alguns métodos de elevação artificial mais utilizados no Brasil, bem como a instrumentação associada a esses métodos, seus limitantes e como este estudo pode contribuir para otimizá-las.

2.1.1 Bombeio Mecânico - BM

Logo após o início das atividades da indústria do petróleo, surgiu o método de elevação artificial denominado bombeio mecânico (*Sucker-rod Pumping*). Na quantidade total de poços produtores no mundo, 80% são de bombeio mecânico, o que lhe dá a posição de método mais utilizado no mundo, devido ao baixo custo com investimentos e manutenção, flexibilidade de vazão e profundidade, boa eficiência energética e a possibilidade de operar com fluidos de diferentes composições e viscosidades em uma larga faixa de temperatura [Nascimento 2005, Costa 2004].

De acordo com Filho (2002), o BM é responsável por cerca de 8% da produção diária de petróleo, onde é utilizado, praticamente, em poços de pouca profundidade e com pequena vazão.

Neste método de elevação artificial o movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio situada próximo à cabeça do poço, através de uma coluna de hastes até o fundo do poço, acionando uma bomba fazendo emergir na superfície os fluidos presentes nele [Thomas 2001], como pode visto na Figura 2.1.

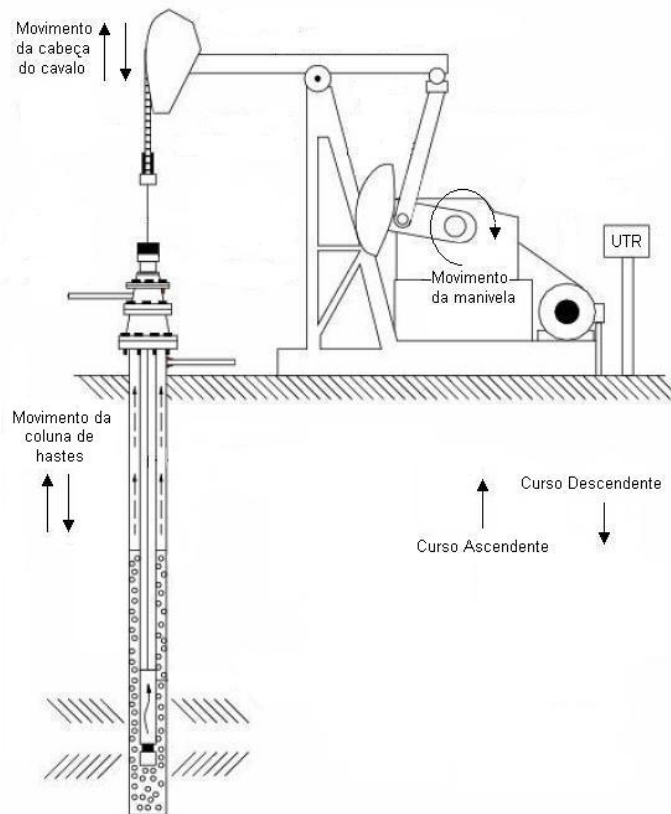


Figura 2.1: Movimentos das partes no BM.

O motor somente é solicitado a fornecer energia no curso ascendente, já no curso descendente a força da gravidade é responsável pelo movimento das hastes, uniformizando mais a distribuição de cargas durante o ciclo de bombeio, e exigindo continuamente o motor, prolongando sua vida útil. Este tipo de método é razoavelmente problemático para ser utilizado em poços onde há uma elevada produção de areia e/ou razão gás-óleo. A areia provoca um desgaste mais acentuado nas partes móveis devido a sua abrasividade e o gás, ao passar pela bomba reduz sua eficiência volumétrica.[Thomas 2001].

2.1.2 Gás lift - GL

É óbvio que o aumento da produção de petróleo não pode contar apenas com a descoberta de novos poços. Inúmeras iniciativas estão sendo realizadas para a melhoria da produtividade dos poços existentes, através do aumento da eficiência dos processos de produção de óleo e gás utilizando os métodos de elevação artificial anteriormente mencionados.

Nos últimos anos, a utilização do método de Gás *Lift*, Contínuo ou Intermitente, tem dado um maior aporte no aumento de produtividade. Este método de extração por elevação artificial aproveita o próprio gás obtido no processo de produção. Ao ser retirado do Poço, o petróleo é uma mistura de óleo, gás, água e impurezas.

A primeira etapa consiste em passar o fluido produzido por uma série de vasos separadores donde desta separação resultam o petróleo, a água, areia, gás e impurezas. O gás é posteriormente secado, filtrado e devidamente comprimido em pressurizadores, onde alcança pressões de até 1500 Psi, para ser novamente injetado no Poço extraindo, assim, o Petróleo, como pode ser visto na Figura 2.2. Nesta etapa do processo, encontramos as maiores exigências de automatização (Controle e monitoramento das variáveis inerentes ao processo). De acordo com Thomas (2001), este método é muito utilizado em poços que produzem fluidos com alto teor de areia e elevada razão gás-líquido.

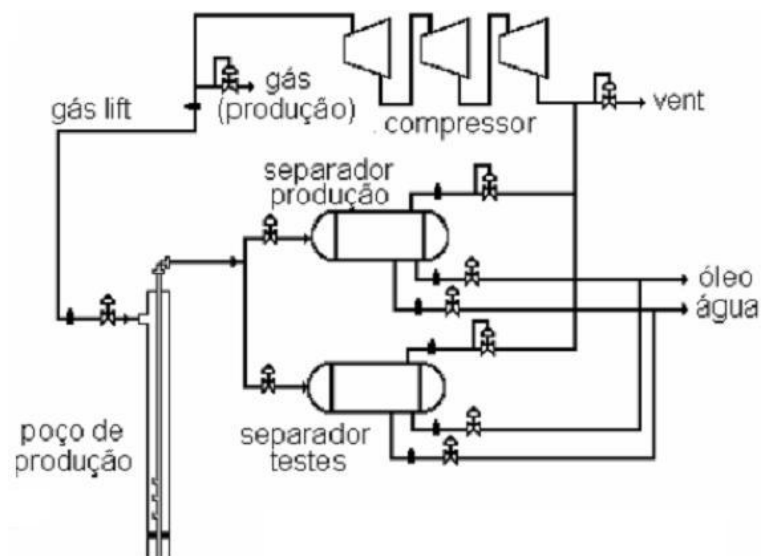


Figura 2.2: Sistema de gás *lift*.

Como mencionado anteriormente, há dois tipos de Gás *lift*. No método contínuo de Gás *lift*, como o próprio nome diz, a coluna de produção é gaseificada através da injeção contínua de gás, reduzindo as perdas de pressão existentes na coluna de produção. Assim, há um aumento da pressão do reservatório fazendo com que a mistura, gás-líquido, eleve-se até a superfície [Nascimento 2005, Takács 2002]. A Figura 2.3 mostra um poço equipado com Gás *lift* contínuo.

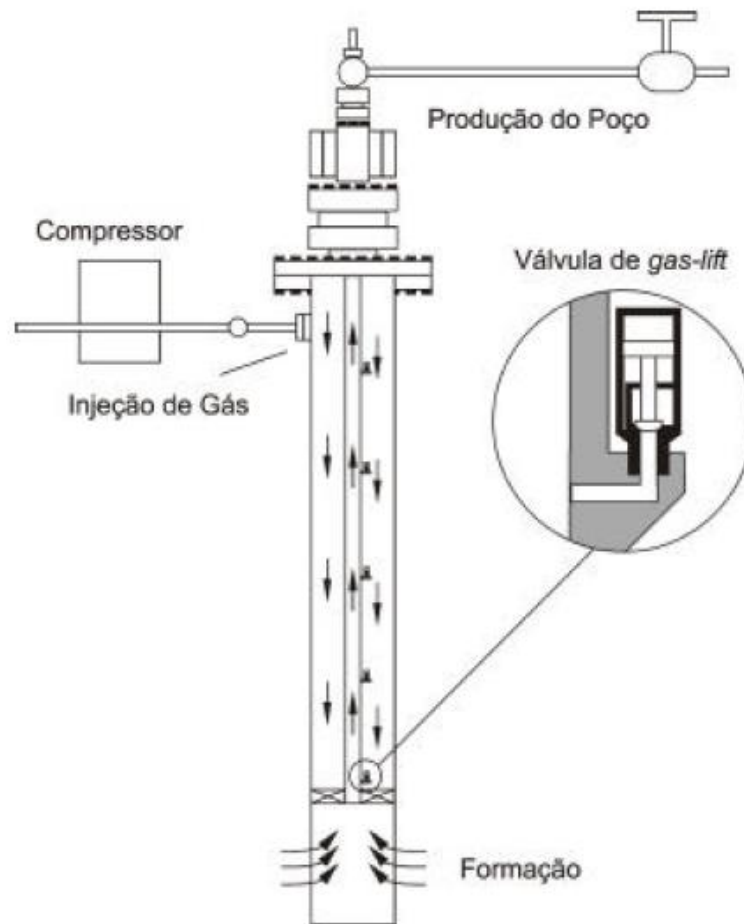


Figura 2.3: Método de elevação artificial - GL contínuo.

Já no método intermitente, existe o chamado "Ciclo de Intermitência", período que compreende o tempo decorrido entre duas aberturas da válvula operadora; ou seja, sempre que uma coluna de fluido atinge um nível razoável, acima do ponto de injeção, há a introdução de um jato de gás pressurizado, como este ponto situa-se na base desta coluna, a mesma será elevada através de uma golfada, e então, logo após isso, a válvula operadora será fechada para que uma nova coluna de fluidos possa ser formada. Este período entre uma abertura e outra, dependerá de vários fatores, podendo variar desde poucos minutos até horas. De acordo com Thomas (2001), o gás *lift* Intermitente tem sua aplicabilidade voltada à poços com baixa pressão de fundo (alto ou baixo índice de produtividade - IP) ou com alta pressão mais baixo índice de produtividade.

2.1.3 Bombeio por Cavidades Progressivas - BCP

O método BCP surgiu no Brasil em meados de 1980, em fase experimental, no campo da Fazenda Belém - CE. Este método consiste na transmissão de energia, através de um motor elétrico situado na cabeça do poço, em energia mecânica; onde esta movimentará um conjunto de hastes e uma bomba de cavidades progressivas no interior do poço, cons-

tituída por um rotor e um estator. A geometria deste conjunto forma cavidades herméticas idênticas. O rotor girando no interior do estator gera uma série de cavidades iguais que deslocam o fluido da sucção para a descarga. O princípio de funcionamento do BCP, é o mesmo de uma bomba de deslocamento positivo; onde, ao completar um giro completo em torno do seu eixo, há o deslocamento de um volume fixo de fluido, independentemente da pressão na saída. A Figura 2.4 mostra os componentes do BCP.

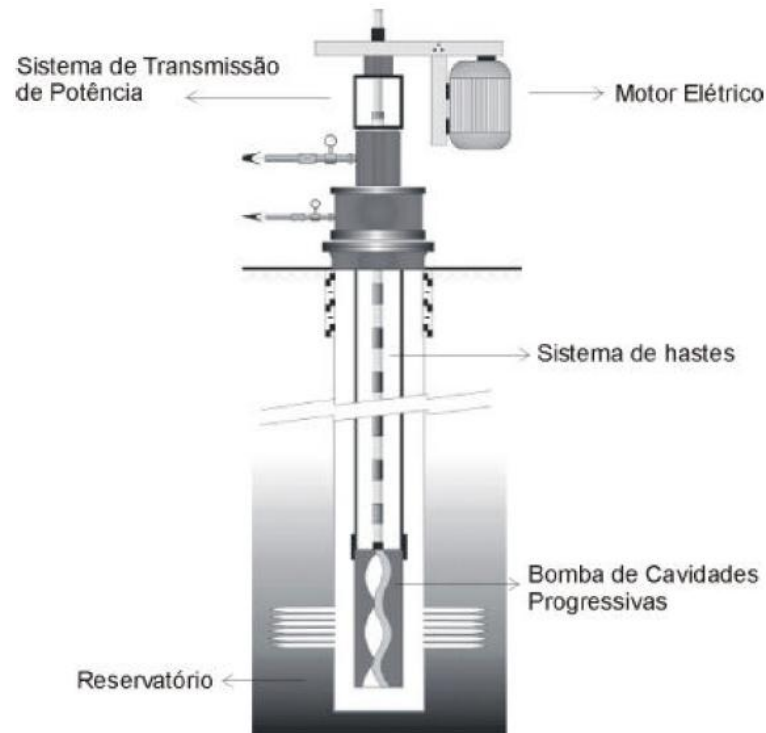


Figura 2.4: Sistema BCP.

De acordo com Thomas (2001), este método é utilizável em poços com pouca profundidade, devido ao diferencial de pressão à que é submetida a bomba, bem como, a maneira pela qual se transmite a energia da superfície ao fundo. O BCP possui uma boa eficiência ao produzir fluidos muito ou pouco viscosos, óleos parafínicos e com produção de areia.

2.1.4 *Plunger Lift*

O *Plunger Lift* é um método de elevação artificial intermitente, onde, uma coluna de fluidos é acumulada logo acima de um pistão (elemento principal deste método), e ao abrir uma válvula na superfície (*motor valve*) o gás presente no interior da formação se expande empurrando o pistão para cima, elevando com isso os fluidos presentes na coluna de produção (*tubing*).

Há duas variantes do *Plunger Lift*, que são:

- Método Natural - Neste método a formação produz gás com pressão suficiente para ser utilizado no processo
- Método Assistido - A formação não consegue produzir gás na pressão adequada e então, há a injeção de gás no anular, semelhante ao processo de *Gás Lift*

O processo de produção do método *Plunger Lift* subdivide-se, basicamente, em quatro etapas, como pode ser visto na Figura 2.5:

Buildup - Nesta etapa a válvula pneumática (*motor valve*) está fechada, isolando a pressão atmosférica da superfície da pressão do anular. A formação começa a produzir gás e óleo, como o gás é menos denso que o óleo, ele acumula-se dentro do anular forçando o óleo a entrar na coluna de produção (*tubing*).

Upstroke - Após um período de tempo determinado empiricamente, quando a pressão de revestimento na cabeça do poço é considerada adequada, a válvula (*motor valve*) então é aberta, expandindo o gás dentro do anular fornecendo energia necessária a subida do conjunto - Pistão, *liquid slug* e gás. Na subida desse pistão, devido à sua expansão, ele carrega parafinas que estão incrustadas no *tubing* e impede que haja um processo denominado *fallback*; ou seja, impede que o *liquid slug* desça para o fundo do poço.

Afterflow - Período em que a linha de produção é mantida aberta, após o pistão alcançar a superfície. Após este período, a *motor valve* é fechada.

Downstroke - Com o fechamento da válvula o pistão cai ao fundo do poço iniciando, assim, um novo ciclo (*Buildup*).

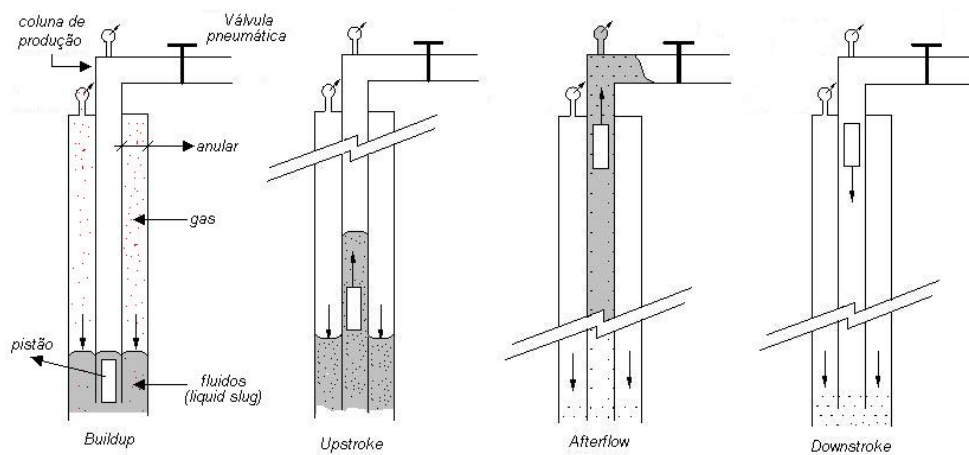


Figura 2.5: Etapas do processo de produção no método *plunger lift*.

2.2 Instrumentação Associadas e Variáveis Medidas em Poços *On shore* de Petróleo e Gás Natural

Do final da década passada até os dias atuais, houve, e ainda há, um crescimento na automatização nos poços de petróleo em terra (*On-shore*) e no mar (*Off-shore*). Todos os métodos, anteriormente mencionados, caracterizam-se por possuir instrumentos e sensores interligados a uma UTR - Unidade de transmissão remota, que tem por finalidade monitorar variáveis de interesse para o controle do método.

Em qualquer método em terra (*on-shore*) de elevação artificial de petróleo e gás natural, a interligação dos sensores com o sistema de supervisão (UTR e controle) é realizada através de fios que necessitam ser instalados através de tubulações de proteção, as quais necessitam de obras civis ou metalúrgicas para blindar essa fiação, já que a indústria do petróleo é considerada como uma área classificada. Estas obras, geralmente, possuem elevados custos em tempo de supervisão e mão de obra de instalação. Além disso, soma-se a quase impossibilidade de alterações após a instalação. Os fatos anteriores demonstram que a movimentação de uma unidade de bombeio equipada com diversos sensores, traz como conseqüências o aumento no trabalho em interligações e, em muitos casos, danos nas conexões e descalibração nos instrumentos que necessitam ser desinstalados, removidos do campo e instalados novamente.

Na automação dos métodos pneumáticos, a elevada quantidade de sensores responsáveis pelo monitoramento das condições de operação dos poços implica num exaustivo e minucioso trabalho de instalação e montagem, sendo este, o maior responsável pela dificuldade de implantação do sistema e pela grande incidência de não conformidades na pré-operação.

As variáveis monitoradas e controladas nos métodos de elevação artificial mais comuns são: pressão na cabeça do poço, pressão diferencial, temperatura e vazão.

2.2.1 Instrumentação Atual, Limitações Inerentes e Possibilidades de Otimização através da Tecnologia *Wireless*

No caso do bombeio mecânico, os sensores instalados monitoram, basicamente, duas variáveis, que são: sensores de carga e posição.

O diagrama de blocos que representa, de maneira geral, a instrumentação nos métodos de elevação artificial em terra (*on-shore*) pode ser visto na Figura 2.6. O objetivo principal deste estudo é aplicar a tecnologia *wireless* na transmissão de dados dos sensores à UTR, destacado na figura mencionada, com fins de monitoramento; ou seja, que estes dados enviados pelos sensores não retornem na função de uma ação de controle no processo, através dos atuadores, devido, ainda, aos problemas inerentes as tecnologias *wireless*; como por exemplo, interferências do meio que podem levar os equipamentos a perda da comunicação e invasões na rede. Por exemplo, aspectos de segurança estão sendo incorporados para tornar os sistemas sem fio mais seguros e confiáveis para desenvolver ações de controle.

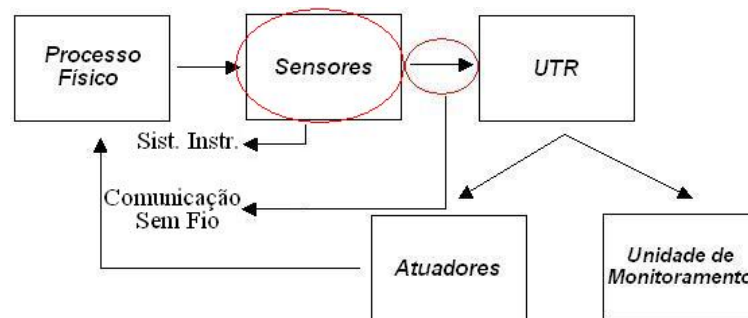


Figura 2.6: Diagrama de blocos da instrumentação associada ao processo de elevação artificial de petróleo.

O equipamento em destaque na Figura 2.7, é um sensor de pressão responsável pelo monitoramento do esforço que é submetido o conjunto de hastes do Bombeio mecânico. Os outros sensores, de posição, são chaves magnéticas, enviando pulsos para a UTR quando estas passam por determinadas posições. O constante movimento da cabeça do cavalo mecânico é um dos principais fatores de rompimento do cabo que envia os dados captados pelo sensor à UTR, fazendo com que o gerenciador do sistema perca o monitoramento e, por sua vez, o controle da variável, podendo ocasionar sérios danos à coluna de hastes quando esta for submetida a um esforço maior do que o projetado e isto não puder ser detectado à tempo para a tomada de decisão, parando o poço e interrompendo a produção. Além disso, na maioria das vezes, os poços se situam em lugares isolados e de difícil acesso, podendo haver a presença de roedores e outros animais que podem danificar os cabamentos. Então, uma boa aplicação neste método pode ser a utilização de um dispositivo que capte e transmita o valor desse sensor através de sinais de rádio frequência.

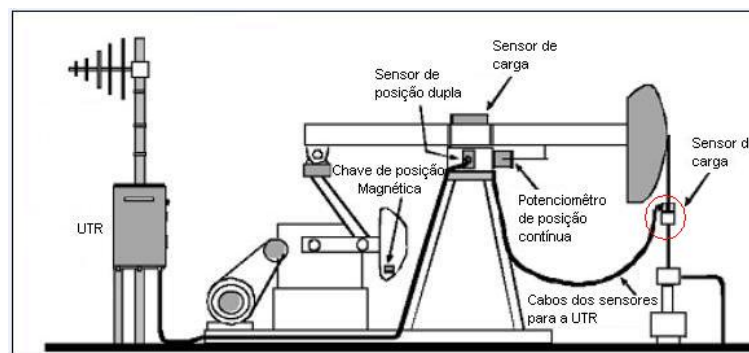


Figura 2.7: Método de elevação (Bombeio Mecânico)

No método Gás *Lift* há algumas variáveis que são monitoradas, como vazão, pressão na cabeça do poço, pressão diferencial e temperatura. Estes sinais podem ser monitorados através da placa de comunicação sem fio juntamente com o sistema de instrumentação que seriam energizados através de uma fonte alternativa de energia.

No método BCP, apenas a pressão na cabeça do poço é monitorada, assim como no

CAPÍTULO 2. INSTRUMENTAÇÃO PARA SISTEMAS DE ELEVAÇÃO DE PETRÓLEO 14

método *Plunger Lift*. Poderia-se então, instalar um sistema de instrumentação aliado à tecnologia *wireless* para realizar o monitoramento desta variável.

Capítulo 3

Tecnologias de Comunicação Sem Fio (*Wireless*)

3.1 Visão Geral das Tecnologias Sem Fio (*Wireless*)

Nos últimos anos, houve um desenvolvimento significativo das tecnologias *wireless*, principalmente devido à necessidade de conectividade entre dispositivos, hoje existente. Até então, as tecnologias focalizavam mais os serviços de voz (telefonia celular), Internet (*IEEE802.11b*) e a transferência de arquivos. Entretanto, em algumas áreas como a industrial; a médica; através do monitoramento de pacientes; a indústria veicular, e a residencial necessitavam de uma tecnologia que realizasse esta conectividade com um baixo consumo de energia, baixo custo, simplicidade do protocolo e padronização [Gutierrez et al. 2001].

De acordo com o alcance e a taxa de transferência empregada nas tecnologias sem fio, pode-se destacar a existência de quatro grandes grupos:

- *WPAN - Wireless Personal Area Network* - Neste grupo estão as tecnologias *wireless* de pequeno alcance (entre 10 e 100 metros) e baixa taxa de transmissão. É um padrão para redes que interligam dispositivos pessoais ou redes de sensores sem fio, definido pelo IEEE 802.15.
- *WLAN - Wireless Local Area Network* - Estão as tecnologias sem fio destinadas à interligação de redes locais com alcance entre 100 e 300 metros. Trata-se de padrão implementado como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional (par metálico ou fibra óptica).
- *WMAN - Wireless Metropolitan Area Network* - Neste grupo temos as tecnologias que tratam dos acessos de banda larga para última milha para redes em áreas metropolitanas, com alcance em torno de 6km;
- *WWAN - Wireless Wide Area Network* - Neste grupo estão as tecnologias voltadas para redes de longa distância em telecomunicações, atendendo aos serviços de voz e alguns serviços de dados.

Como o objeto deste estudo refere-se basicamente, a transmissão de dados à curtas distâncias (~ 300m), serão apresentados a seguir alguns comparativos de tecnologias *wireless* relacionadas com esses parâmetros, que são as pertencentes aos grupos *WPAN* e

WLAN. A Figura 3.1 mostra a área de aplicação de algumas destas tecnologias com relação ao alcance e taxa de transmissão.



Figura 3.1: Áreas de aplicação das tecnologias sem fio.

Nas redes de automação industrial, onde há aplicações com sensores (de temperatura, de umidade, de vazão e de pressão) e dispositivos de controle (chaves, relés), não há a necessidade de uma largura de banda elevada para funcionarem, mas necessitam de uma baixa latência e consumo de energia igualmente baixo para preservar a vida útil das baterias [Malafaya et al. 2005]. A Tabela 3.1 compara as tecnologias que atendem aos requisitos expostos neste parágrafo.

Tabela 3.1: Quadro Comparativo.

Aspectos	IEEE 802.11b	Bluetooth	Zigbee	LR-WPAN 802.15.4
Consumo de Bateria	Horas	Dias	Anos	Anos
Complexidade	Alta	Média	Baixa	Muito Baixa
Quantidade de Dispositivos	32	7	6400	255
Alcance	~ 100m	~ 10m	70 – 300m	70 – 300m
Taxa de Transmissão	11Mbps	1Mbps	250Kbps	250Kbps
Custo	Alto	Médio	Baixo	Muito Baixo

O que se busca é uma tecnologia que ofereça confiabilidade, a um baixo custo com baixo consumo de energia, uma taxa de transmissão de dados apropriada, simples de ser implementado e com um alcance que supra as necessidades impostas pela automação industrial. Diante de tudo isto, foi escolhido como objeto deste estudo o padrão LR-WPAN 802.15.4 por possuir, dentre as pesquisadas, as características que melhor se encaixaram nestes requisitos, como pode ser visto na Tabela 3.1 e na Figura 3.1.

3.2 Redes LR-WPAN (Padrão IEEE 802.15.4)

Os avanços recentes das tecnologias de redes sem fio possibilitaram o surgimento de várias alternativas e padrões de implementação, mas até recentemente a grande maioria tinha como premissa principal prover um conjunto de protocolos que garantissem a qualidade para a transmissão de voz ou de dados com altas taxas de transferência, o que tornava os equipamentos bastante caros e pouco atraentes para outras aplicações mais simples.

Em meados de 2000, dois grandes grupos de empresas (*Zigbee*, a *HomeRF spinoff*, e o *IEEE 802 Working Group 15*) uniram esforços para desenvolver um padrão que atendesse tais necessidades. Ao fim daquele ano o *IEEE New Standard Committee (Nescom)* anunciou oficialmente o novo grupo de pesquisa (*The task Group 4*), responsável pelo desenvolvimento do padrão *LR-WPAN* chamado 802.15.4. O objetivo deste grupo era definir as especificações das camadas *PHY* e *MAC* [Callaway et al. 2002, Middleton 2000].

Em outubro de 2003 foi apresentado o padrão *IEEE 802.15.4*. A seguir serão apresentadas algumas de suas principais características:

- Taxa de transmissão de 250Kbps, 40Kbps, 20Kbps;
- Topologia de rede estrela ou ponto a ponto;
- Endereços de 16 ou 64 bits (Extendidos);
- Tempo de Alocação de *Slot* garantidos - *GTS*;
- Protocolo *CSMA-CA*;
- Baixo consumo de energia;
- Detecção de Energia - *ED*;
- Indicação da qualidade do canal - *LQI* e
- 16 canais na faixa de frequência de 2450 MHz, 10 canais na banda de 915 MHz e 1 canal na banda de 868 MHz.

3.2.1 Dispositivos da rede LR-WPAN

Numa rede *LR-WPAN*, existem três classes de dispositivos lógicos: coordenador, roteador e dispositivo final; sendo os dois primeiros implementáveis com base em dispositivos físicos da classe *FFD (Full Function Device)* e o terceiro com base em dispositivos físicos da classe *RFD (Reduced Function Device)* [IEEE 2003].

O coordenador, como o próprio nome indica, é responsável pela criação e manutenção da rede, armazenando informação de gestão interna relevante para o seu funcionamento e podendo também funcionar como meio de ligação ou *bridge* entre diferentes redes *LR-WPAN*. O roteador além de servir como um nó normal tem como funcionalidade extra o roteamento de pacotes da rede, permitindo a comunicação entre nós sem a intervenção do coordenador; o dispositivo final apenas se comunica com a rede não tendo nenhuma função de gestão; logo, eles podem ser implementados utilizando poucos recursos de programação, baixo consumo de energia e pequena capacidade de memória [Malafaya et al. 2005].

Como os dispositivos *RFD's* não possuem comunicação ponto-a-ponto, estes, por sua vez, só podem fazer parte de redes do tipo "estrela". Entretanto, em uma rede *mesh* que

é uma variação de uma rede ponto-a-ponto, pode-se encontrar todas as três classes de dispositivos lógicos pertencentes à *LR-WPAN*.

Todos os dispositivos possuem um endereçamento de 64 bits, entretanto, um dispositivo *RFD* pode obter endereços de apenas 16 bits do coordenador da rede (*FFD*) [Willig et al. 2005].

3.2.2 Topologia de Rede

O padrão *IEEE 802.15.4* pode operar em duas topologias de rede. Na topologia estrela, a comunicação é realizada entre os dispositivos e um controle central denominado coordenador da PAN. Já na topologia de rede ponto a ponto, onde também há um coordenador da PAN, todos os dispositivos podem comunicar-se entre si. Um exemplo desta topologia é a chamada rede *mesh*, onde nesta há a presença do coordenador, roteadores e dispositivos finais. Na Figura 3.2 pode-se verificar alguns tipos de rede *LR-WPAN*.

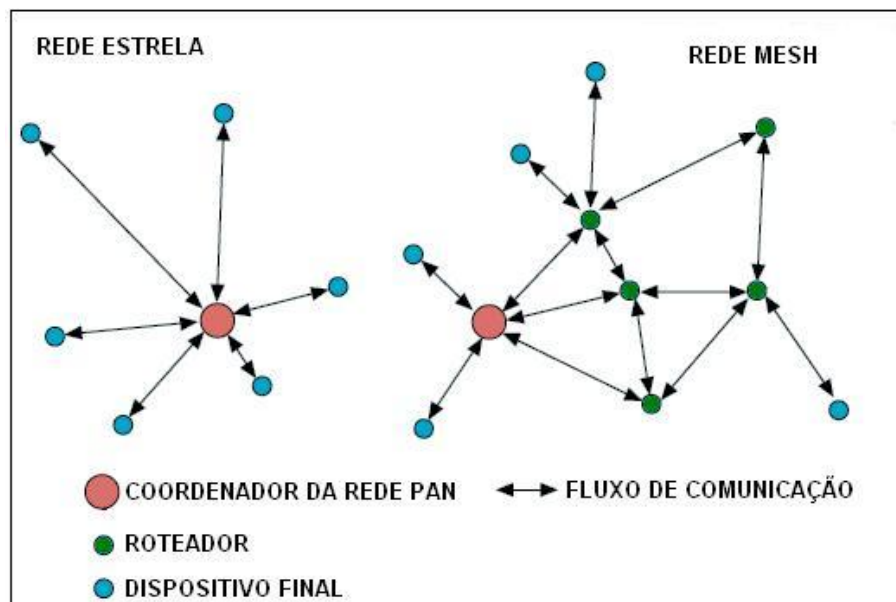


Figura 3.2: Topologias de rede IEEE 802.15.4.

As topologias de rede são configuradas através da camada de rede (*Network Layer* - Modelo OSI) que não faz parte do padrão *IEEE 802.15.4*; pois este, configura apenas as camadas *PHY* e *MAC* [Howitt & Gutierrez 2003].

3.2.3 Pilha do Protocolo - Padrão IEEE 802.15.4

A arquitetura da pilha de protocolo do padrão *IEEE 802.15.4* é baseada em camadas onde cada qual desenvolve uma função específica fornecendo serviços às camadas superiores [IEEE 2003]. Sua pilha é baseada no modelo *OSI-ISO* de sete camadas, como pode ser visto na Figura 3.3, porém, no caso não há a necessidade da utilização das camadas 4,5 e 6 do modelo *OSI-ISO*.

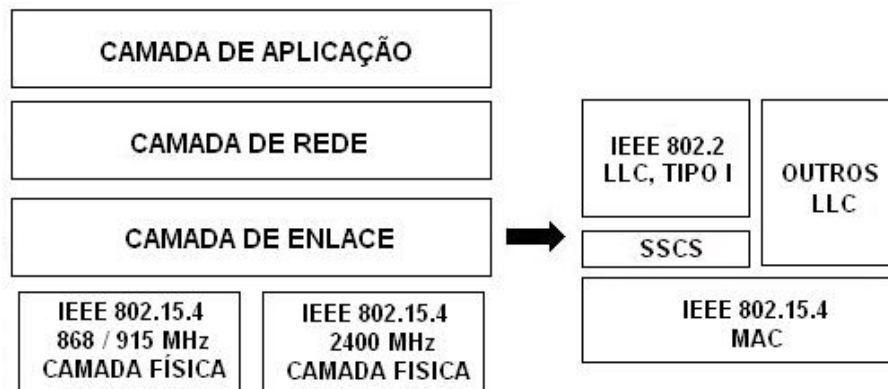


Figura 3.3: Modelo das camadas de rede - Padrão 802.15.4.

Um dispositivo *LR-WPAN* compreende a camada física (*PHY*), que contém o *transceiver* de rádio frequência com seus mecanismos de controle, e a camada *MAC* que fornece o elo de ligação entre a camada física e a camada de enlace (SSCS, IEEE 802.2 LLC) realizando as transferência de dados.

3.2.4 Camada Física - *PHY*

A camada física é responsável por desempenhar as tarefas abaixo relacionadas:

- Ativação e desativação do rádio transceiver;
- Medição da energia do sinal dentro do canal especificado (ED);
- LQI para pacotes recebidos;
- seleção da frequência do canal;
- CCA para CSMA-CA e
- Transmissão e recepção de dados.

Parâmetros da Camada *PHY*

Os módulos de rádio *transceivers* pertencentes ao padrão 802.15.4 operam em faixas de frequência não licenciadas (*ISM - Industrial, Scientific and Medical*), como mostra a Tabela 3.2. De acordo com a taxa de transmissão desejada utiliza-se uma das três frequências utilizadas pelas redes *LR-WPAN*.

Tabela 3.2: Parâmetros da Camada Física (*PHY*).

Faixa de Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Transmissão (Kbps)	Número de Canais
868 - 868,6	BPSK	20	1
902 - 928	BPSK	40	10
2400 - 2483,5	O-QPSK	250	16

Numeração dos Canais

Como visto anteriormente, dependendo da faixa de frequência utilizada, teremos uma quantidade maior ou menor de canais onde poderá ser realizada a comunicação entre os dispositivos da rede. A frequência central de cada canal é calculada de acordo com a equação 3.1.

$$\begin{aligned} F_c &= 868 \text{ em MHz, para } k=0 \\ F_c &= 906 + 2(k - 1) \text{ em MHz, para } k=1, 2, \dots, 10 \\ F_c &= 2405 + 5(k - 11) \text{ em MHz, para } k=11, 12, \dots, 26 \end{aligned} \quad (3.1)$$

A partir deste ponto será dado ênfase à faixa de frequência objeto deste estudo (2,4GHz).

Baseado na equação acima, fazendo k variar de 11 até 26, obtêm-se as 16 frequências centrais (F_c) relacionadas à cada canal. De acordo com IEEE (2003), a banda passante destes canais é definida em 2MHz e o espaçamento entre cada F_c de 5MHz, conforme pode ser visto na Figura 3.4.

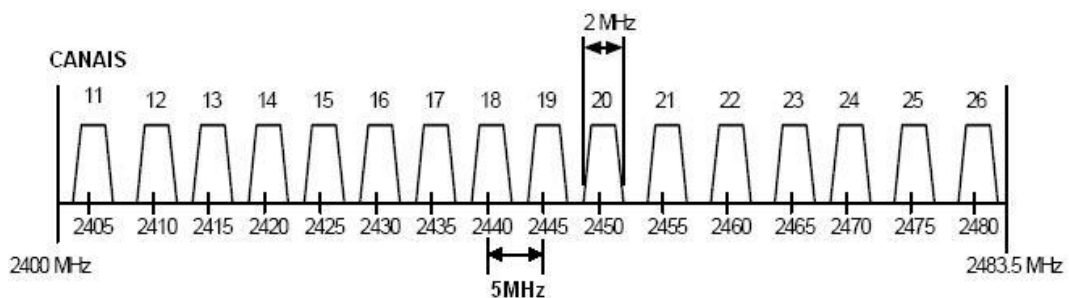


Figura 3.4: Canais do padrão IEEE 802.15.4.

Especificações dos Módulos de Rx/Tx

De acordo com o IEEE (2003), a potência de transmissão dos módulos *wireless* na faixa de 2,4GHz não ultrapassaria 1W; e de acordo com as condições abaixo relacionadas, foi medido a sensibilidade nos módulos de recepção presentes numa rede LR-WPAN -85dbm.

- Tamanho do pacote PSDU = 20 Octetos;
- *Packet Error Rate* - PER < 1%;
- Potência medida nos terminais das antenas e
- Sem interferência.

Modulação e Técnica de Espalhamento Espectral

Toda a troca de informações entre os dispositivos de uma rede sem fio faz-se mediante um sinal modulado em rádio frequência. A modulação empregada neste estudo é a uma

variante do QPSK, que é uma técnica de modulação derivada do PSK. Na técnica de modulação QPSK, são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal a ser transmitido, logo, existem mais tipos possíveis de símbolos nesta constelação, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo. Por exemplo, se quisermos transmitir dois bits por símbolo, ao invés de um bit como no caso da modulação PSK, teremos 4 tipos de símbolos possíveis, logo a portadora pode assumir 4 valores de fase diferentes, cada um deles correspondendo a um dabit, como mostrado na Figura 3.5, onde a mesma ilustra em um diagrama de fase e quadratura (IQ) os quatro possíveis símbolos gerados pela modulação QPSK usando 2 bits por símbolo.

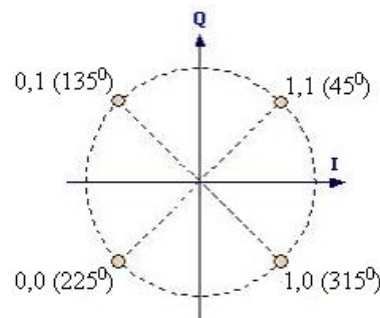


Figura 3.5: Constelação (dabits,fase).

Sendo assim, a modulação QPSK permite enviar duas vezes mais bits por mudança de fase que a modulação PSK. Logo, esse tipo de modulação possui melhor aplicação em sistemas de transmissão de dados de alta velocidade por portadora modulada. Além disso, a técnica QPSK utiliza a metade da banda passante que a BPSK ou FSK transmitindo a mesma quantidade de bits de informação.

Modulação O-QPSK

A modulação O-QPSK (*Off-set Quaternary PSK*) é realizada de maneira semelhante ao QPSK, exceto pelo fato de que o segundo dos bits, *Q-Phase*, que entra no registrador de deslocamento serial, é atrasado no período de meio símbolo antes de ser aplicado ao seu modulador de inversão de fase, como mostrado na Figura 3.6.

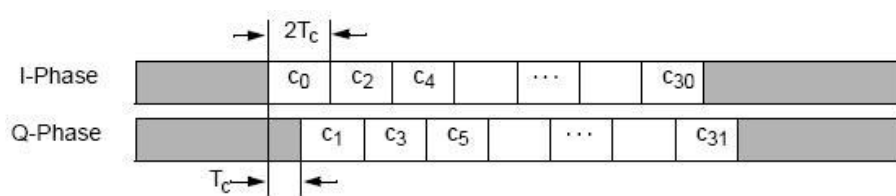


Figura 3.6: Atraso do bit *Q-Phase*.

Isso resulta em transições de fase da portadora de apenas 0° , ou $\pm 90^{\circ}$ do estado de fase anterior, comparado com os 0° , $\pm 90^{\circ}$ e 180° do QPSK. Sendo assim, o O-QPSK não tem os transientes de reversão de fase completos (e nulos profundos no envelope) do

QPSK quando limitado em banda passante. Essa limitação da variação da fase tem como objetivo a redução das transições de fase do sinal modulado, limitando-as a um máximo de 90^0 possibilitando assim, a sua utilização com amplificadores não lineares [Young 2006].

Espalhamento Espectral - DSSS

O DSSS - (*Direct Sequence Spread-Spectrum*) é uma técnica de modulação que gera um padrão redundante de bits para cada bit transmitido. O padrão de bits, chamado chip ou código de chip, permite aos receptores filtrar sinais que não utilizam o mesmo padrão, incluindo ruídos ou interferências. O código de chip cumpre duas funções principais:

1. Identifica os dados para que o receptor possa reconhecê-los como pertencentes a determinado transmissor. O transmissor gera o código de chip e apenas os receptores que conhecem o código são capazes de decifrar os dados.
2. O código de chip distribui os dados pela largura de banda disponível. Os chips maiores exigem maior largura de banda, mas permitem maior probabilidade de recuperação dos dados originais.

Os bits são primeiramente codificados da seguinte maneira: Dentro de cada octeto, os quatro bits menos significativos são associados à um símbolo e depois os quatro mais significativos, iniciando no preâmbulo do pacote e finalizando nos bits finais do *PSDU*. Após isso, estes símbolos são "mapeados" conforme a Tabela 3.3 e só então modulados para serem transmitidos.

Tabela 3.3: Mapeamento Símbolo-Chip.

Símbolos (Dados) (<i>b0,b1,b2,b3</i>)	Valores (CHIPS) (<i>c0,c1,...,c30,c31</i>)
0000	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1000	1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
0100	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
1100	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
0010	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1
1010	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0
0110	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
1110	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
0001	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
1001	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
0101	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
1101	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
0011	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
1011	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
0111	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
1111	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

3.2.5 Camada MAC

Como mostrado na Figura 3.3, a camada de enlace do padrão IEEE 802.15.4 divide-se em duas sub camadas: a *MAC* e a *LLC*. A camada responsável pelo controle do link lógico (*LLC*) é padrão para todas as redes sem fio, enquanto que a camada *MAC* relaciona-se com o hardware com o qual ela vai trabalhar [Callaway et al. 2002, IEEEStandard 802.2-1998].

Esta camada oferece diversos serviços que estão abaixo relacionados:

- Geração de pacotes de *beacons*, caso o dispositivo seja um coordenador da rede;
- Gerenciamento e manutenção do mecanismo *GTS* - *Guarantee Time Slots*;
- Sincronização da rede (através dos *beacons*);
- Utilização do *CSMA-CA* para o acesso dos canais;
- Fornecer um *link* confiável entre duas entidades *MAC*;
- Suporte para a segurança da rede e
- Suporte à associação e desassociação dos dispositivos na PAN.

Serviços da Camada *MAC*

A camada *MAC* é responsável por estabelecer uma interface de comunicação entre a sub camada *SSCS* e a camada física - *PHY*, além de fornecer serviços as camadas superiores (IEEE 802.2 tipo I *LLC*) através da supracitada *SSCS*, ou diretamente, através de outros tipos de *LLC* proprietárias. Essa interface é possível devido a dois serviços, conhecidos como *SAP* - *Service Access Points*, que são:

- *MCPS-SAP*, onde há o acesso dos dados da camada *MAC* e
- *MLME-SAP*, onde há o gerenciamento dos serviços desta camada.

Alguns dos serviços acima mencionados só serão realizáveis com a utilização dos comandos e primitivas da camada *MAC*, entretanto o objeto deste estudo é o *SMAC* - *Simple MAC*, neste caso o estudo detalhará os parâmetros da *SMAC* no Capítulo 4.

Mecanismo *CSMA*

O *CSMA* é um protocolo de acesso ao meio que funciona basicamente da seguinte maneira: quando um dispositivo deseja iniciar uma transmissão, ele inicialmente "escuta" o meio para determinar se alguma transmissão já está ocupando aquele canal, caso contrário ele transmitirá seus dados. Caso dois dispositivos "escutem" o meio simultaneamente e não percebam a presença de portadoras pode haver a transmissão de pacotes em ambos os dispositivos e assim, pode haver uma colisão de pacotes, uma vez que os transmissores não detectam colisões. Os receptores, por sua vez, não conseguem distinguir colisões de outros pacotes de erros, confiando-se apenas na habilidade dos módulos de comunicação em detectar e tratar pacotes corrompidos através de algum mecanismo de correção de erros.

No protocolo *CSMA-CA*, cada nó deverá informar aos outros nós participantes da rede a sua intenção em iniciar uma transmissão; ou seja, antes de transmitir um pacote o nó transmissor notifica os outros componentes da rede que iniciará uma transmissão

evitando as colisões. Entretanto, ainda pode haver colisões, só que as conseqüências serão minimizadas com relação ao CSMA puro.

3.2.6 Limitações do Padrão 802.15.4

De acordo com Pekheryev et al. (2005), apesar de, na maior taxa de transferência existente no padrão 802.15.4, que é a de 250Kpbs, a camada física suporta apenas a transferência de pequenos pacotes limitados em 127 Bytes. Além disso, devido à capacidade da rede, as camadas *PHY* e *MAC* não devem trafegar dados com pacotes superiores a 89 bytes. Em aplicações, como a transferência de imagens isto pode ser um problema, entretanto o objeto deste estudo concentra-se na transferência de dados e não na de imagens e/ou voz, que ficaria prejudicada devido a estas limitações.

3.3 Trabalhos Relacionados

Em Gutierrez & Durocher (2005) foi realizado um estudo para a utilização do padrão *IEEE* 802.15.4 na ativação de uma rede de sensores sem fio aplicada na indústria de celulose. Neste trabalho foram feitas algumas observações para se adequar corretamente o uso das redes sem fio nesse tipo de indústria. O artigo não apresenta nenhum resultado de desempenho e atuação das redes sem fio aplicadas à área industrial, apenas há comentários gerais.

Em Pekheryev et al. (2005) foram destacadas algumas limitações inerentes à tecnologia *Zigbee* para a transmissão de imagens. Foi discutido os prós e os contras entre dois tipos de formatação de imagens (*JPEG vs. JPEG-2000*) para a sua transmissão utilizando a tecnologia *Zigbee*. De acordo com o artigo, os dois tipos de imagens diferenciam-se em alguns aspectos, como por exemplo, a eficiência da compressão. As imagens são decompostas em diversos níveis de resolução através da ferramenta *wavelet*. Na metodologia empregada foram utilizados quatro dispositivos *Zigbee*. Os dispositivos receberam implementações na camada de rede, na camada de enlace e na camada física. De maneira a suportar a transferência de imagens, alguns aspectos foram adicionados à camada de aplicação de modo que a mesma realizasse a fragmentação e a reconstituição das imagens comprimidas. Um dispositivo é conectado a um PC via *RS-232* e age como um coordenador da rede captando dados dos dispositivos, como informações das rotas e topologia da rede. O programa que é executado no PC é bastante simples, requisitando a transferência de imagens de um dispositivo na rede para o mesmo. Nesse sistema, as imagens são previamente armazenadas nos dispositivos e a rota percorrida por esta imagem ficará disponível no PC. As imagens são transferidas de um ou dois dispositivos até o PC, seguindo rotas distintas, onde há a medição de dois parâmetros: o número de bytes errados por imagem recebida e o *PSRN (Peak Signal Ratio Noise)*. O primeiro parâmetro corresponde ao *Status* do link e o segundo ao tipo de complexidade de compressão da imagem. O experimento mostrou que a formatação *JPEG-2000* é mais resistente a erros, tornando-se mais apropriada para redes com baixa taxa de transferência. Não foi possível obter uma boa avaliação para o caso dos múltiplos percursos (*mult-hop*) na transferência de imagens *JPEG-2000* devido aos problemas adversos do ambiente como interferências.

Em Ramakrishnan et al. (2004) foi realizado um estudo sobre o impacto no desempenho do protocolo MAC causado pelos períodos de latência dos dispositivos de uma RSSS (rede de sensores sem fio). Neste artigo um modelo aproximado de enfileiramento de mensagens para o SMAC é desenvolvido e analisado através da distribuição de *Poisson*, onde as equações de troca de mensagens e períodos de latência para condições de não saturação, são derivadas para analisar estatisticamente o tempo de atraso do estado *Sleep*. Para o estudo em questão foi considerado uma rede com n nós, e que o tráfego de mensagens recebidas na rede é baseado na distribuição de *Poisson* com uma taxa de recepção de dados de λ por nó. Desta maneira a taxa de chegada de mensagens em cada nó é igual à $n\lambda$. Após uma modelagem matemática, descrita no artigo, foi realizada uma avaliação do desempenho do protocolo baseado nas equações acima mencionadas e nos seguintes parâmetros: Taxa de transmissão do canal (20Kbps), quantidade de nós(5) e número de *bytes* transmitidos (50). Conclui-se que, a medida que aumentava-se o *Duty Cycle*(período ativo), aumentava-se também o consumo de energia pelo nó e diminuía-se o valor médio de latência por pacote recebido. Como os nós permaneciam em um maior período de "sono"(*Sleep*) eles geravam um maior atraso de tempo (*delay*), e à proporção que o nó permanecia em um estado *Listen*, ele consumia uma maior quantidade de energia do sistema. Para validar estes resultados foi simulado um ambiente com determinados parâmetros, onde os resultados de simulação foram comparados às curvas geradas pelas equações acima mencionadas. De acordo com o artigo, os valores analíticos e de simulação foram bastante coerentes. Foi verificado também que para pequenos valores do *Duty Cycle* a diferença no período de latência entre redes com um $\lambda = 12$ e outra com $\lambda = 25$ são grandes; isto porque, com um aumento da demanda de chamadas recebidas por canal aumenta-se, conseqüentemente, as filas de mensagens a serem recebidas por um nó, diminuindo assim o desempenho do padrão. Entretanto, a medida que o período ativo aumenta, a diferença de latência entre as duas redes praticamente desaparece. Isto sugere que, para redes com altas taxas de transferências faz-se necessário um *Duty Cycle* maior e vice-versa. Já o consumo de energia aumenta para altas taxas de transferência (λ), a medida que o *Duty Cycle* também aumenta, pois o nó permanece pouco tempo no estado *Sleep*.

Em Misic et al. (2005) foi realizado um estudo a respeito dos "gargalos" existentes na camada MAC das redes WPAN-LR 802.15.4, bem como pequenas modificações sugeridas nas funções do coordenador que permitirá a rede, suportar maiores taxas de transmissão de dados. Alguns problemas foram identificados através do uso do algoritmo CSMA-CA, e outros através da própria rede 802.15.4. Apesar do padrão 802.15.4 permitir diferentes topologias e mecanismos de acesso ao meio, para fins de estudo, neste artigo adotou-se a topologia estrela e o CSMA-CA. Em redes habilitadas com *beacons*, o tempo do canal é dividido em *superframes* que são limitados pela transmissão de *beacons* enviados pelo coordenador. Todas as trocas de mensagens são realizadas no período ativo, enquanto que no período inativo os dispositivos entram em modo de economia de energia ou realizam outras atividades. A parte ativa de cada *superframe* é dividida em *slots*, e estes, subdivididos em períodos de *backoff*, que é a unidade básica de tempo onde todas as transmissões da rede deverão ser sincronizadas. Após uma breve descrição do funcionamento do algoritmo CSMA-CA e dos tipos de transmissão que foram estudadas no artigo (transmissão

do coordenador para o dispositivo e vice-versa (*Uplink e downlink communication*)), o artigo apresentou alguns problemas inerentes à estas configurações. O primeiro problema apresentado foi o congestionamento de mensagens para o tipo de transmissão *Uplink communication*, onde dois ou mais dispositivos retardaram suas transmissões devido ao tempo restante do *superframe* ser insuficiente para realizá-las. O segundo problema identificado foi a sub-utilização de certas partes do *superframe*.

Capítulo 4

Sistema Proposto

O diagrama de blocos da Figura 4.1, ilustra os módulos propostos neste estudo. Será realizado um estudo bem mais aprofundado e detalhado do sistema de comunicação sem fio, a fonte alternativa de energia e o sensor serão apenas comentados.

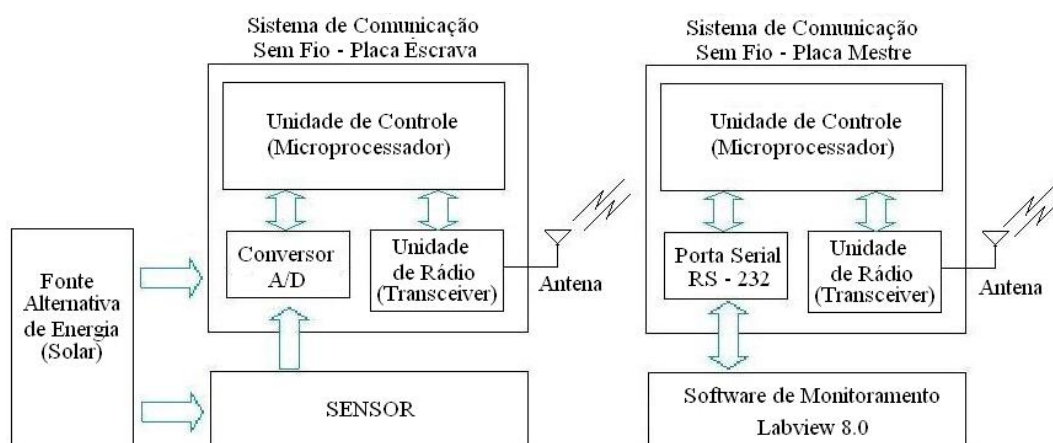


Figura 4.1: Diagrama de blocos do sistema de instrumentação proposto.

4.1 Fonte de Energia Alternativa

Como fonte de energia alternativa foi escolhida a energia solar, devido a pouca potência exigida pelos módulos do sistema e pelo baixo custo comparado a um sistema eólico. O módulo fotovoltaico gera uma corrente elétrica através do choque dos fótons presentes na luz solar, em uma placa de silício, material utilizado para a fabricação dos módulos. Esta corrente elétrica é armazenada numa bateria, que, entre outras finalidades, mantém o nível de tensão estável no sistema.

As baterias utilizadas neste tipo de sistema são denominadas baterias de descarga profunda (*Deep Cycle*). Este tipo de bateria permite ciclos de carga e descarga mais profundos e com uma maior frequência, onde uma bateria comum não suportaria tal regime de funcionamento. Foi realizada uma pesquisa comercial e não encontramos baterias que

possuísse a característica de descarga profunda (*Deep Cycle*) e com dimensões compactas.

O controlador de carga é o dispositivo responsável pelo "controle" da energia produzida e seu respectivo armazenamento. Ele impede, por exemplo, que a bateria sofra uma descarga acentuada ou então, em períodos de intensa insolação e baixo consumo, que a mesma sofra uma sobrecarga. Como o que se pretende é otimizar o sistema existente e, como o consumo dos equipamentos relacionados à tecnologia sem fio é baixo (em torno de mwatts), este sistema será o mais compacto possível.

Foi realizada uma pesquisa comercial, e o menor painel solar existente no Brasil foi o do fabricante *Kyocera Solar* de 5 watts, medindo 206 mm de comprimento por 352 mm de largura.

4.2 Sensor

A variável física escolhida para o estudo em questão foi a pressão, devido a sua existência em todos os métodos de elevação artificial. O sensor de pressão converte a variável física de entrada em outra forma mais utilizável. Geralmente o sensor encontra-se em contato direto com o processo, fornecendo a saída proporcional à variável medida. Foi escolhido um sensor piezoelétrico por apresentar características de baixo consumo, pequenas dimensões físicas e boa precisão.

Este tipo de sensor converte a variável do processo medido em uma variação de voltagem, (tipicamente em mvolts) quando submetido a esforço mecânico aplicado ao cristal, que sofre uma deformação elástica. A relação entre a pressão exercida e a milivoltagem produzida é linear. O cristal existente dentro deste tipo de sensor (piezoelétrico) geralmente é o quartzo, podendo-se utilizar também a turmalina. Estes sensores são projetados de acordo com a norma ISA que padroniza o trabalho de dispositivos em áreas classificadas (Indústria do petróleo).

4.3 Sistema de Comunicação Sem Fio

Diante do problema exposto no Capítulo 3, foi proposto um *software* baseado nas primitivas do protocolo *SMAC - Simple MAC*, desenvolvido a partir das placas de comunicação sem fio do *kit* de desenvolvimento da *freescall* - MC13193EVK. Nesta seção serão detalhados o *software* e *hardware* que compuseram o desenvolvimento e construção da rede sem fio.

4.3.1 Padrão *SMAC - Simple MAC*

O *SMAC* é uma linguagem de programação *C ANSI* que pode ser usada para desenvolver aplicações proprietárias para os *transceivers* utilizando os circuitos integrados dos módulos *MC13192X* existentes nas placas sem fio do *Kit* acima mencionado. Este protocolo foi desenvolvido para trabalhar com qualquer processador HCS08 realizando a comunicação entre ele e o transceiver através do módulo *SPI - Serial Peripheral Interface*.

Abaixo relacionadas, estão algumas características do *SMAC* consideradas de maior relevância para o estudo em questão.

1. Aspectos compactos
 - 2K de memória *Flash*
 - *Clock* do barramento de no mínimo 16KHz
 - 10 bytes (+ máximo do tamanho do pacote) de memória RAM
2. Baixo consumo, *software* proprietário e link de comunicação RF bidirecional;
3. Baixa prioridade de interrupções - IRQ;
4. Recursos para a transferências de pacotes;
 - Até 123 *bytes* de dados em um simples pacote;
 - Algoritmo de correção de erros automático (*FCS - Frame Check Sequence*);
5. Período automático de transição entre estados automática - *Sleep* para o *Wakeup*;
6. No protocolo *SMAC* a *Freescale* adicionou dois bytes de código (*Code Bytes*) em cada pacote enviado, de maneira a evitar interferências de outros protocolos *SMAC*;

4.3.2 Estrutura do Pacote

A estrutura do pacote no protocolo *SMAC* é composta por quatro *bytes* do preâmbulo (*Preamble*), um *byte* de delimitador de início de quadro (*Start Frame Delimiter - SFD*), um *byte* de indicador de tamanho do quadro (*Frame Length Indicator - FLI*), até 125 *bytes* do quadro de dados (*Payload Data*) e dois *bytes* do quadro de checagem de erros (*Frame Check Sequence - FCS*), como mostra a Figura 4.2.

4 bytes	1 byte	1 byte	2 bytes	até 123 bytes	2 bytes
Preamble	SFD	FLI	Code bytes	Dados	FCS

Figura 4.2: Estrutura do pacote.

A estrutura do protocolo *SMAC* permite, no quadro de dados, até 125 bytes, entretanto, destes, a solução proprietária da *Freescale* reserva o quadro *Code Bytes* com dois bytes, para prevenir interferências do/para *SMAC* com relação à outros protocolos similares [Semiconductor 2005].

4.3.3 Algoritmo de Checagem de Erros

A sub-camada *MAC* dispõe de vários mecanismos para garantir a confiabilidade do link entre dois dispositivos de uma rede *LR-WPAN* 802.15.4, entre eles pode-se citar a verificação de erros através do algoritmo *CRC - Cyclic Redundancy Code* de 16 bits.

4.3.4 Primitivas e Estruturas do *SMAC*

Como mencionado na Seção 3.2.5, há dois tipos de serviços que são manipuláveis pelo usuário para desenvolver projetos baseados na camada *MAC*, que são: MCPS e o

MLME. No *SMAC* há dezenove primitivas, das quais duas relacionadas ao serviço MCPS e dezessete ao MLME, como mostra a Tabela 4.1. As primitivas que foram utilizadas para o desenvolvimento do *firmware* serão detalhadas posteriormente.

Tabela 4.1: *SMAC* API.

Primitivas	Descrição
MCPSDataRequest	Transmissão de pacotes
MCPSDataIndication	Permite a manipulação dos dados recebidos pelo transceiver MC13192
MLMEHibernateRequest	Comuta o MC13192 para o modo <i>hibernar</i> ¹
MLMEWakeRequest	Retorna o transceiver MC13192 para o modo livre (<i>idle</i>)
MLMSESetChannelRequest	Seleciona o canal, e conseqüentemente, a frequência que será utilizada
MLMEEnableRequest	Põe o transceiver em modo de recepção de acordo com o canal selecionado pela primitiva <i>acima</i> ²
MLMEDisableRequest	Comuta o MC13192x do modo de recepção para o modo livre (<i>idle</i>)
MLMSESetMC13192ClockRate	seleciona o clock desejado para o transceiver MC13192
MLMEEnergyDetect	Mede o nível de energia do canal corrente
MLMEMC13192SoftReset	Reinicia o transceiver
MLMEMC13192XtalAdjust	Ajusta o valor do gatilho do clock de referência do transceiver
MLMELinkQuality	Indica o valor da potência (em dBm) da última mensagem recebida
MLMSESetMC13192TmrPrescale	Muda os <i>timers</i> que trabalham os <i>transceivers</i> MC13192x
MLMEMC13192FEGainAdjust	Ajusta o ganho do transceiver de acordo com o retorno da primitiva <i>MLMEEnergyDetect</i>
MLMEDozeRequest	Comuta o transceiver para o modo <i>doze</i> ³
MLMEMC13192PAOutputAdjust	Ajusta a potência de saída do transmissor
MLMEGetRficVersion	Retorna o número da versão do MC1319x
MLMETestMode	Testa o transceiver MC1319x
MLMEMC13192ResetIndication	Primitiva chamada quando um <i>soft-reset</i> ocorre

O protocolo *SMAC* possui duas estruturas de dados que podem ser manipuladas pelas camadas superiores que são:

- tTxPacket
 - u8DataLength - Tamanho da mensagem a ser transmitida;
 - *pudata - Estrutura que contém os dados

- tRxPacket
 - u8MaxDataLength - Tamanho máximo do pacote;
 - u8DataLength - Tamanho do pacote dos dados recebidos;
 - *pu8Data - Dados recebidos;
 - u8status - Estado da mensagem recebida

De acordo com IEEEStandard (802.2-1998), o tTxPacket define as variáveis que serão transmitidas pelo *SMAC*, e o tRxPacket define as variáveis que serão recebidas pelo protocolo.

As primitivas *MCPS* são utilizadas para tratar e manipular os dados recebidos pelo protocolo, enquanto que as do tipo *MLME* são usadas para gerenciar o estado da comunicação, como por exemplo; a energia do canal ativo, o estado do *link*(LQI) e o modo de operação em que se encontra o transceiver. Posteriormente estarão detalhados os estados de operação do MC13192 [Semiconductor 2005].

4.4 Transceiver MC13192

Os *transceivers* MC13192 são fabricados especialmente para trabalhar a curtas distâncias, com baixo consumo e na faixa de frequência não licenciada *ISM - Industrial, Scientific and Medical* - 2,4GHz. Eles contêm a camada física do padrão *IEEE* 802.15.4 podendo trabalhar nas seguintes topologias de rede: Ponto a ponto, estrela e redes *mesh*.

O MC1319x possui a camada *MAC* do padrão *IEEE* 802.15.4 para trabalhar conjuntamente com os microcontroladores da família *HCS08*. O MC13193 possui, também, a pilha do protocolo *Zigbee* disponível, entretanto não é o caso do sistema proposto por este estudo. Apesar disso, ambos funcionam da mesma maneira.

Quando combinados com um microcontrolador apropriado o *transceiver* MC1319x fornece uma solução de baixo custo para curtas distâncias. A interface que realiza a comunicação entre o MCU e o MC1319x é o módulo *SPI-Serial Peripheral Interface*, além de uma via de interrupções que permite ao usuário uma variedade de processadores. As aplicações envolvendo estes componentes vão desde simples redes ponto a ponto até complexas redes *Zigbee*.

O *transceiver* MC13192 suporta uma taxa de transmissão de dados em 250Kbps, com modulação *O-QPSK* em canais com banda passante de 2MHz e 5MHz de separação entre as frequências centrais dos 16 canais existentes.

Além destes aspectos pode-se citar outros:

- Fonte de alimentação - 2.0 até 3,4 V;
- Potência de saída do transmissor em 0dBm, podendo ser programado até 4dBm;
- Três modos de operação com baixo consumo de energia:
 - < 1 μ A no modo *Off*
 - 2,3 μ A no modo *Hibernate*
 - 35 μ A no modo *Doze*

- Sensibilidade do receptor de -92dBm para uma *PER* - *Packet Error Rate* em torno de 1%
- Possui quatro *timers* de comparação internos para otimizar os recursos do microcontrolador
- Programa-se a frequência do *clock* de saída para uso do MCU
- Faixa de temperatura operacional: -40°C a 85°C

4.4.1 Modos de Operação do *Transceiver* MC13192

O transceiver MC13192x possui alguns modos de operação, como pode ser visto na Tabela 4.2, que possibilitam o baixo consumo de energia e uma otimização da comunicação entre as placas do *kit* MC13193-EVK da *Freescale*.

Tabela 4.2: Modos de Operação do Transceiver MC1319x.

Modos	Definição	Tempo de Transição
Desligado (<i>Off</i>)	Todas as interrupções e funções desligadas, os <i>buffer's</i> do banco de dados são perdidos	25ms para o estado livre (<i>idle</i>)
Hibernar (<i>Hibernate</i>)	O sistema SPI ¹ é desativado, assim como o <i>clock</i> de referência do <i>transceiver</i> . A saída deste modo é realizada através do pino \overline{ATTN}	20ms para o estado livre (<i>idle</i>)
Cochilar (<i>Doze</i>)	O <i>clock</i> de referência do <i>transceiver</i> permanece ativo, entretanto o $CLKO$ ² só é disponível se, no registrador 7 (<i>Control B</i>), o <i>bit</i> 9 estiver <i>setado</i> em 1 para frequências iguais ou menores a 1MHz (Sistema SPI desativado). Assim como no modo <i>Doze</i> , a saída deste modo, também, é realizada através do pino \overline{ATTN} e pode ser programado para comutar para o modo livre (<i>Idle</i>) através de um <i>timer</i> interno de comparação.	$(300 + 1/CLKO\mu\text{s})$ para o estado livre (<i>idle</i>)
Livre (<i>Idle</i>)	<i>Clock</i> de referência ativado com <i>clock</i> de saída ($CLKO$) disponível. Sistema SPI ativo	
Recepção (<i>Receive</i>)	<i>Clock</i> de referência e receptor ativos	144 μs do estado livre (<i>Idle</i>)
Transmissão (<i>Transmit</i>)	<i>Clock</i> de referência e transmissor ativos	144 μs do estado livre (<i>Idle</i>)
CCA / Detecção de Energia	<i>Clock</i> de referência e receptor ativos	144 μs do estado livre (<i>Idle</i>)

¹O sistema *SPI* - *Serial Peripheral Interface* é responsável pela interface de comunicação entre o transceiver MC13192 e o microprocessador HCS08

²O transceiver MC1319x fornece um *clock* de saída para o microcontrolador como fonte de frequência, frequência de teste, ou ainda, como referência para outras finalidades. O *clock* de saída fica disponível a partir da ativação do $CLKO$

É interessante conhecer a maneira como cada modo se comporta e como eles podem comutar entre si de maneira a evitar *loops* infinitos no algoritmo. A Figura 4.3 mostra um exemplo de como ocorre a comutação entre os modos de operação do *transceiver* e quais os bits que são ativados ou desativados nesta comutação. Observa-se que, sempre que há a mudança de um modo para outro há a passagem obrigatória pelo modo livre (*Idle*); ou seja, praticamente todos os modos derivam dele.

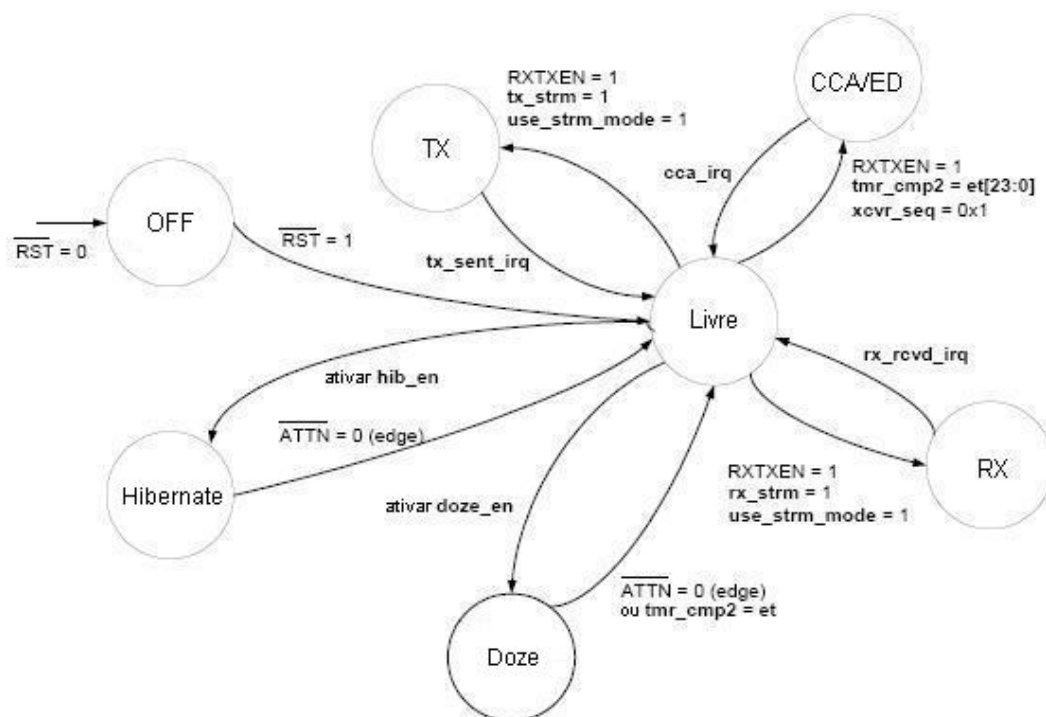


Figura 4.3: Modos de operação.

O transceiver MC13192/93 possui, através do sistema *SPI*, duas formas de transferência de dados para o microcontrolador (MCU): O *Streaming Mode*³ e o *Packet mode*⁴. A Figura 4.3 ilustra o diagrama de estados do *Streaming mode* com os *timers* de interrupção desabilitados. O protocolo utilizado no estudo em questão (*Freescale 802.15.4*) só permite, para a transferência de arquivos, o uso do *Streaming mode*. Para aplicações proprietárias o *Packet mode* pode ser utilizado para conservar os recursos do microcontrolador.

³*Streaming Mode* - Os dados são enviados palavra por palavra (*word by word*) para o microcontrolador

⁴*Packet mode* - Os dados são armazenados na memória RAM e transferidos de uma vez (em um pacote) para o MCU

4.5 Microcontrolador MC9S08GT - Família HCS08

O MC9S08GB/GT é membro da família de microcontroladores HCS08 de 8 *bits*. Nas placas utilizadas neste estudo, este MCU é utilizado em conjunto com o *transceiver* MC13192.

O microcontrolador possui alguns aspectos, que foram utilizados, e serão detalhados posteriormente neste estudo:

- Aspectos da família HCS08
40MHz HCS08 MCU;
Suporta até 32 fontes de interrupção/*resets*;
- Aspectos da Série MC9S08GB/GT de MCUs
4k de memória *RAM*;
60K de memória *flash*
8 canais para conversão Analógico-digital com até 10 *bits* de resolução;
Dois módulos de comunicação serial (*SCI*);
Sistema *SPI - Serial Peripheral Interface*, responsável pelo comunicação entre MCU e *transceiver*;
Até 56 canais de entrada/saída (*I/O*);
8 canais *PWM*

4.5.1 Módulo de conversão Analógico-Digital (*ATD*)

O módulo *ATD* é um conversor que, basicamente, funciona da seguinte maneira: O sinal é amostrado, "segura-se" esse valor e converte-se para ser tratado e/ou transmitido (*sample and hold*) [Semiconductor 2004].

O módulo *ATD* possui as seguintes características:

- Resolução de 8 ou 10 *bits*;
- 14 μ s para converter uma amostra em 10 *bits* de resolução, a uma frequência de 2MHz;
- Resultado da conversão justificado à direita ou à esquerda (no registrador);
- Fim de conversão indicada através de um *flag* ou uma interrupção;
- Multiplexador de até 8 canais analógicos de entrada;
- Modos de conversão simples ou contínua;

Registadores do módulo ATD

O módulo ATD possui 7 registradores responsáveis pelo controle das funções.

Registrador de controle - ATDC

A Figura 4.4 representa o registrador responsável pelo controle do módulo de conversão analógico/digital do microcontrolador. Abaixo serão descritos os bits e suas respectivas funções neste registrador.

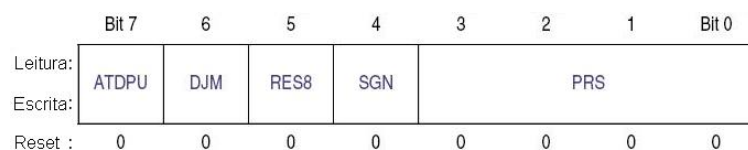


Figura 4.4: Registrador ATDC.

O bit ATDPU é responsável por ligar e desligar o módulo de conversão, evitando assim, o consumo desnecessário de energia. Quando este bit é *setado* em 0 o módulo aborta qualquer conversão que esteja em progresso.

O bit DJM realiza o posicionamento do resultado da conversão dentro do registrador de 16 bits ATDIR, conforme pode ser visto na Figura 4.5.



Figura 4.5: Registradores de resultados (ATD1RH e ATD1RL).

O bit RES8 indica qual será a resolução da conversão analógica/digital, 8 ou 10 bits).

O bit SGN determina se o resultado terá ou não um sinal. Este bit só tem significado quando o resultado é justificado à esquerda (*DJM* = 0). Quando este bit é *setado* em 1 a faixa de conversão vai de -512 a 511 para uma resolução de 10 bits, e de -128 a 127 para uma resolução de 8 bits.

O campo PRS indica o fator de pré-escala que será multiplicado pela frequência máxima de conversão e resultará na frequência do *clock* do barramento, como mostra a Tabela 4.3. Como pode ser visto nesta tabela, a partir de um determinado valor (*PRS* = 0100) o *clock* do barramento atinge um valor máximo, e apesar do PRS continuar crescendo ele não mais se alterará ($1 < f_{Bus} < 20MHz$).

Tabela 4.3: Valores do *clock* do barramento e conversão ATD.

PRS	$Fator = (PRS + 1) \times 2$	<i>Clock Max</i> do Barramento (MHz) (2MHz Max <i>Clock</i> ATD)	<i>Clock MIN</i> do Barramento (MHz) (500KHz Min <i>Clock</i> ATD)
0000	2	4	1
0001	4	8	2
0010	6	12	3
0011	8	16	4
0100	10	20	5
0101	12	20	6
0110	14	20	7
0111	16	20	8
1000	18	20	9
1001	20	20	10
1010	22	20	11
1011	24	20	12
1100	26	20	13
1101	28	20	14
1110	30	20	15
1111	32	20	16

A Tabela 4.4 mostra o conteúdo e a influência que tem cada campo no registrador *ATDC*. O campo referente ao *PRS* já foi descrito separadamente por ter quatro *bits* que o identificam [Semiconductor 2004].

Tabela 4.4: Significado dos *bits* do registrador

<i>bits</i>	Descrição	
	0	1
ATDPU	Conversor Desativado	Conversor Ativado
DJM	Justificado à esquerda	Justificado à direita
RES8	Resolução de 10 <i>bits</i>	Resolução de 8 <i>bits</i>
SGN	Valor sem sinal	Valor com Sinal

Registrador - ATD1SC

O campo *CCF* do registrador *ATDSC*, conforme mostra a Figura 4.6, é apenas de leitura. Quando uma conversão é finalizada este *bit* é *setado* em 1. Este *bit* é limpo sempre que os registradores de resultado (*ATD1RH* ou *ATD1RL*) são lidos ou o próprio *ATD1SC* é escrito.



Figura 4.6: Registrador ATD1SC.

O ATDIE é responsável pela geração de interrupções; ou seja, quando este *bit* é *setado* (ATDIE=1) e uma conversão é finalizada, é gerada uma interrupção. Neste momento o resultado da conversão é escrito nos registradores de resultado. Caso esta interrupção seja desabilitada (ATDIE = 0) faz-se necessário uma verificação constante do *bit* CCF para verificar se a conversão foi finalizada. Lembrando que, sempre que há uma reinicialização do sistema este *bit* é limpo (ATDIE = 0).

O ATDCO determina qual o tipo de conversão a ser adotada: Por exemplo, para que haja uma conversão contínua das entradas analógicas e o resultado seja sempre atualizado nos registradores ATD1RH e/ou ATD1RL, este *bit* deverá ser ativado (ATDCO=1); caso contrário (ATDCO=0), tem-se apenas uma simples conversão a cada período de escrita do registrador ATDSC.

Os *bits* do campo ATDCH indicam qual, ou quais, os canais analógicos que serão utilizados para serem convertidos em códigos digitais, como mostra a Tabela 4.5 [Semiconductor 2004].

Tabela 4.5: ATDCH.

ATDCH	Canal Analógico
00	0
01	1
02	2
03	3
04	4
05	5
06	6
07	7
08 – 1D	Reservado (<i>default para o V_{REFL}</i>)
1E	V_{REFH}
1F	V_{REFL}

O registrador ATDPE (Figura 4.7) configura quais serão os pinos dedicados à conversão ATD. Se algum campo deste registrador estiver desabilitado (ATDPE_x = 0), mas o canal de entrada correspondente a este pino é habilitado, através do registrador ATDCH, a conversão deste canal não se iniciará, mas o módulo ATD, ao invés de realizar a conversão, colocará zeros nos registradores de resultado do módulo conversor. Os registradores de resultado foram mencionados anteriormente.

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Leitura:	ATDPE7	ATDPE6	ATDPE5	ATDPE4	ATDPE3	ATDPE2	ATDPE1	ATDPE0
Escrita:								
Reset :	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.7: Registrador ATDPE.

4.6 Supervisório - Labview

Para a monitoração e captura dos dados trafegados na rede *Wireless* foi utilizado um ambiente gráfico que possibilitasse uma interface amigável entre o usuário e o sistema. O *software* empregado foi o *Labview 8.0*.

O *Labview 8.0* é um *software* em linguagem gráfica que possibilita uma gama de aplicações envolvendo diversos parâmetros. Não é objetivo deste estudo entrar em detalhes a respeito deste *software* e sim, apresentar, nesta seção, as telas utilizadas para monitorar e armazenar os dados que posteriormente serão tratados e analisados.

A Figura 4.8 mostra a tela de um supervisório onde três placas 13192-EVB enviam dados referentes a três canais analógicos que são capturados, convertidos e transmitidos via *Wireless*.

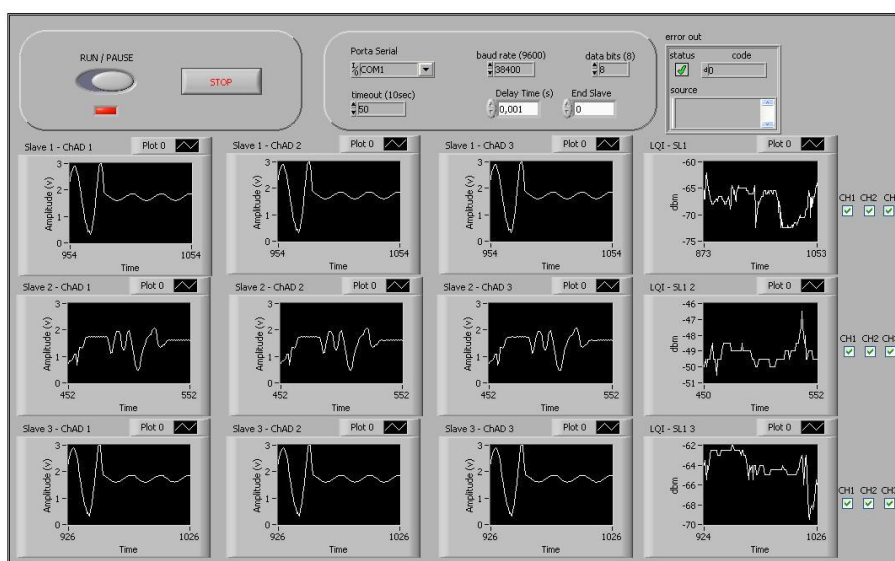


Figura 4.8: Tela do Supervisório.

Esta tela é o resultado da programação em blocos gráficos, como pode ser visto na Figura 4.9.

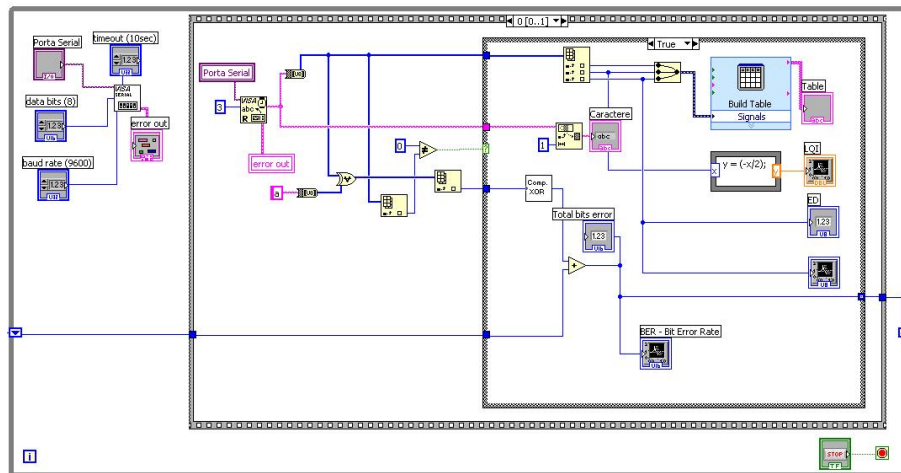


Figura 4.9: Tela de programação do supervisor.

4.7 Plataforma de Desenvolvimento

O equipamento utilizado como plataforma de desenvolvimento dos *softwares* empregados na construção de uma rede sem fio foi o kit da *Freescale MC13193-EVK*. A rede sem fio (*Wireless*) foi montada a partir das placas 13192-EVB e 13192-SARD, conforme ilustra a Figura 4.10.



Figura 4.10: Placas da rede *Wireless*.

A linguagem utilizada para a programação e desenvolvimento dos softwares que fizeram parte da rede sem fio pode ser ANSI C ou C++, entretanto neste estudo optou-se pela programação em ANSI C. Os *softwares* foram desenvolvidos no ambiente de desenvolvimento "*Code Warrior Development Studio v.5.7.0*" conforme ilustra a Figura 4.11.

A interface utilizada para carregar os *softwares* nas memórias *flash* das placas sem fio foi o *BDM USB Multilink* sendo que esta, conectava-se ao PC através da porta *USB* e às placas através de um cabo tipo *flat*.

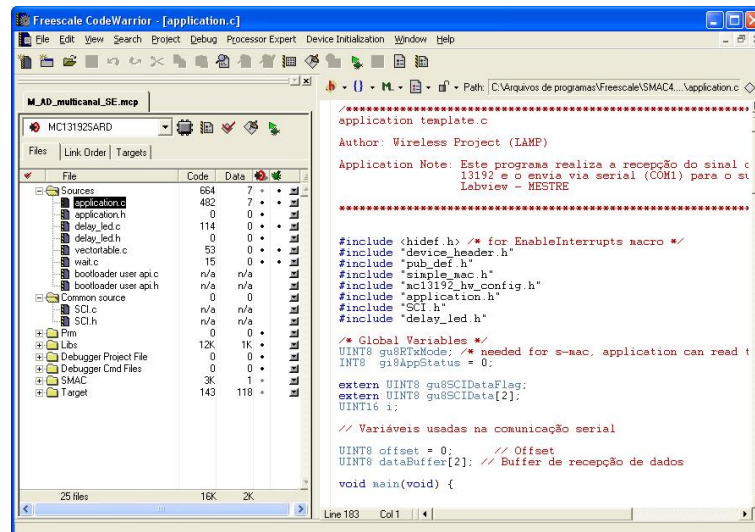


Figura 4.11: Interface de desenvolvimento dos *Softwares* embarcados nas placas sem fio.

4.8 Diagrama de Blocos do Sistema

A comunicação entre os dispositivos do sistema pode ser dividida em quatro etapas. A primeira e quarta etapas da comunicação, são realizadas através da interface serial RS-232, enquanto que na segunda e terceira etapas a comunicação é realizada via *Wireless*.

Na primeira etapa o supervisorio (*Labview*) envia dois *bytes* para a placa mestre que representam o endereço da placa escrava e o canal A/D. Ao receber estes dados, a placa mestre monta um pacote de dados, e envia-os via *wireless* para a placa escrava, finalizando assim a segunda etapa. Na terceira etapa, a placa escrava enviará à placa mestre um pacote de dados contendo seu endereço, o endereço da placa mestre e o valor dos canais analógicos lidos e convertidos. Na quarta etapa, após a placa "mestra" receber a resposta contendo os dados referentes ao solicitado, ela os enviará via interface serial ao supervisorio (*Labview 8.0*), como pode ser visto na Figura 4.12.

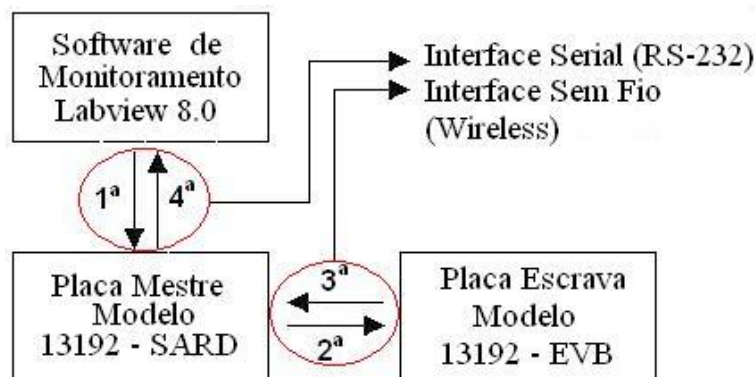


Figura 4.12: Diagrama de blocos do sistema proposto.

4.8.1 Descrição das Trocas de Mensagens

Como mencionado na Seção 4.4.1, os *Transceivers*, tanto da placa mestre como a da escrava, possuem alguns estados que são ajustados no algoritmo conforme a ação a ser realizada pelos mesmos. A Tabela 4.6 identifica os estados que foram utilizados pelas placas mestre e escrava neste estudo.

Tabela 4.6: Estados do *Transceiver*.

Placa Mestre	Placa Escrava
<i>Idle State</i>	<i>Idle State</i>
<i>Reset State</i>	<i>Reset State</i>
<i>Transmit Always On</i>	<i>Receiver Always On</i>
<i>Receive Slave</i>	<i>Transmit Data</i>
<i>Receive Sci</i>	

Labview → **Placa Mestre**

O programa gerenciador do sistema (*Labview*) envia à placa mestre, via interface serial RS-232, dois bytes que representam o endereço identificador da placa escrava e qual canal analógico deverá ser lido. Na placa mestre um *software* embarcado já está em execução em um *loop* infinito, sempre verificando o valor da variável *gi8AppStatus*, variável esta responsável pelo estado do *Transceiver*. Ao receber os dados anteriormente mencionados, é gerada uma interrupção que ativa o *flag* - *gu8SCIDataFlag*. Quando este *flag* é ativado o programa, ao passar por uma condição "se", muda o estado da variável *gi8AppStatus* para *Receive Sci*. Neste estado o programa principal chama uma rotina externa para ler e armazenar os dados provenientes da interface serial, após isso o valor da variável *gu8SCIDataFlag* é mudado novamente para o estado *Transmit Always On*.

Placa Mestre → Placa Escrava

No estado *Transmit Always On* o modo de recepção do *transceiver* é desativado. Com os dados recebidos (Endereço da placa escrava e o canal A/D a ser lido) é montado um pacote e enviado via *Wireless* à placa escrava. Após isso, a variável *gu8SCIDataFlag* assume o estado *Receive Slave* com intuito de receber os dados solicitados pela placa mestre, e por último o *flag gu8SCIDataFlag* é desativado.

Placa Escrava → Placa Mestre

Nesta etapa da comunicação o *software* mencionado refere-se ao embarcado na placa escrava. Da mesma maneira que na placa mestre, este programa executa um *loop* infinito comparando o valor da variável *gi8AppStatus*. Entretanto, ao ser executado, esta rotina mantém o estado da placa escrava em *Receiver Always On*; ou seja, a ela sempre "escuta" o meio afim de receber alguma ordem da placa mestre para executar determinada tarefa. Caso a mensagem recebida tenha o ID correspondente ao da placa escrava esta mudará o valor da variável *gi8AppStatus* para *Transmit Data*. Neste estado a rotina verificará qual canal A/D foi solicitado, realizando a conversão e montando o pacote, para ser enviado logo em seguida. Após isso, a variável *gi8AppStatus* assume novamente o valor *Receiver Always On*, esperando nova mensagem.

Placa Mestre → Labview

A rotina da placa mestre encontrava-se no estado *Receive Slave* com intuito de receber a mensagem solicitada por ela no início deste ciclo. Entretanto, ao acionar este estado é posto, também, um *timeout* que indicará o tempo de espera para o recebimento da resposta da placa escrava, caso esse tempo seja excedido a variável *gu8SCIDataFlag* assumirá o valor *Transmit Always On* aguardando nova ordem de transmissão do gerenciador do sistema (*Labview*). Quando uma resposta é recebida com sucesso no tempo devido, a rotina do programa verifica os endereços das placas mestre e escrava, para se certificar se a resposta corresponde ao solicitado. Um contador responsável pela mensagens recebidas com sucesso (Pacotes RX) é decrementado, após isso uma rotina externa é chamada para enviar os dados, *byte a byte*, para o *Labview*. Estes dados são os seguintes:

1. Endereço da placa mestre - 0xFF;
2. Endereço da placa escrava - 0x01;
3. Valor do canal 1 medido;
4. Potência do sinal recebido - LQI;
5. *Byte* menos significativo da variável Pacotes RX;
6. *Byte* mais significativo da variável Pacotes RX;

Ao final deste ciclo a variável *gu8SCIDataFlag* assume o estado *Initial State*, onde permanecerá nesse modo até receber outro pedido de leitura enviado pelo gerenciador do sistema via interface serial, iniciando um novo ciclo.

Capítulo 5

Resultados

Foi desenvolvido uma arquitetura de rede tipo ponto-a-ponto onde uma placa 13192–EVB (placa escrava) captava os sinais analógicos, convertia e os enviava via interface sem fio a uma placa 13192–SARD (placa mestre), conectada a um programa supervisorio (*Labview*) via interface serial, que os apresentava em uma tela gráfica.

O padrão utilizado para o desenvolvimento deste sistema foi o *SMAC* versão 4.1a. A comunicação entre dispositivos que utilizam a tecnologia *wireless* realizam a transmissão de mensagens via *broadcast*; ou seja, ao transmitir uma mensagem todos os dispositivos existentes na área de cobertura daquela placa poderão recebê-la [Semiconductor 2005]. Para distinguir se a mensagem recebida por uma placa era endereçada a ela mesma, foi posto no pacote de dados um endereço identificador - ID. Todos os resultados foram gerados a partir do canal "0", na frequência de 2405 MHz e com a potência de transmissão máxima em ambas as placas.

5.1 Metodologia

Foi utilizado, como parâmetro para avaliação do desempenho do sistema, a confiabilidade do enlace de comunicação com relação à taxa de erros de *Bits* (BER - *Bit Error Rate*) ou à taxa de erros de pacotes (PER - *Packet Error Rate*). Para se avaliar corretamente foram realizados diversos testes em situações e ambientes diferentes; como por exemplo, em um ambiente externo com a presença de obstáculos entre as placas de comunicação.

Devido a falta de dispositivos (equipamentos) que pudessem realizar a medição da BER e/ou PER, optou-se por fazer a medição através de um método de comparação entre os pacotes enviados, via *Labview* e recebidos via placa mestre, com isso obter-se a quantidade de pacotes perdidos, parâmetro esse que corresponde ou contorna as condições inicialmente mencionadas e produziu os resultados descritos e explanados neste capítulo.

5.1.1 Variável Pacotes Transmitidos (TX) - *Labview*

O programa *Labview* funciona como um gerenciador do sistema, pois é através dele que as ordens para leitura de determinado canal A/D de uma placa escrava partem até a placa mestre, e é nele que os dados provenientes desta solicitação são armazenados e monitorados.

A Figura 5.1 ilustra o algoritmo do programa que realizava o gerenciamento do sistema.

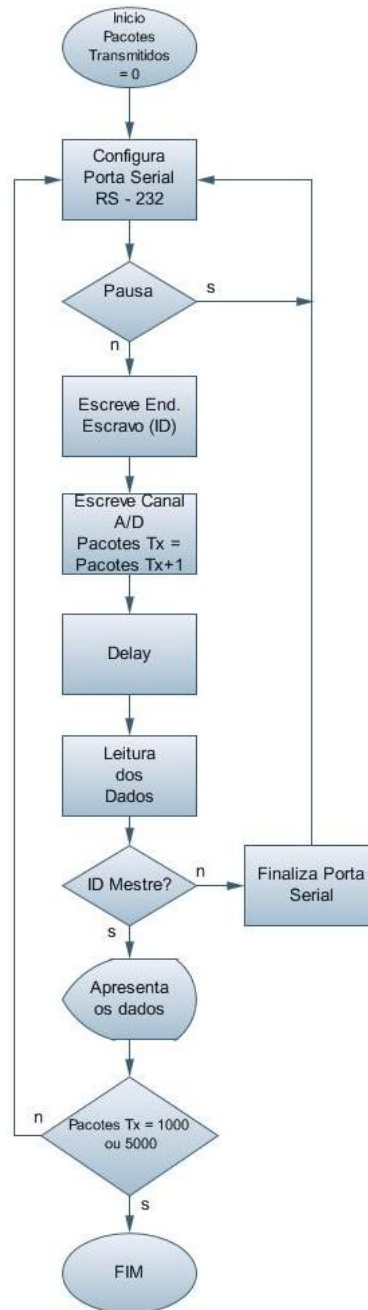


Figura 5.1: Fluxograma - Labview.

O programa é executado continuamente através da utilização de um *loop*, onde todos os blocos funcionais estão inseridos neste. No início da rotina, é configurada a porta serial que transmitirá e receberá os dados, assim como é iniciada a variável que medirá a quantidade de pacotes transmitidos. Após isso, são escritos (*Visa Write*) dois *bytes* que correspondem ao endereço da placa escrava e o canal A/D que será lido nesta placa in-

crementando a variável de pacotes transmitidos (Pacotes TX). Após isso havia um retardo de tempo (*Delay*) e em seguida o programa lia (*Visa Read*) o que estava sendo escrito na porta serial e por fim comparava a quantidade de pacotes que haviam sido transmitidos. Em alguns testes eram enviados 5000 pacotes e em outros, 1000 pacotes. A ordem de recebimento dos dados foi a seguinte:

1. Endereço da placa mestre - $0xFF$;
2. Endereço da placa escrava - $0x01$;
3. Valor do canal analógico 1 - $0x01$;
4. Potência do sinal recebido - LQI;
5. *Byte* menos significativo da variável *pacl*;
6. *Byte* mais significativo da variável *pacl*;

5.1.2 Pacotes Recebidos (RX) - Placa Mestre

A porta serial entende como fim de transmissão um *byte* de zeros; ou seja, $0b00000000$. Devido a esse fato foi idealizado um contador dentro da rotina principal da placa mestre, que medisse a quantidade de pacotes recebidos com sucesso, da seguinte maneira: Quando a placa mestre recebia uma mensagem com sucesso e que era endereçada a ela, era decrementada a variável *pacl*, onde seu valor, no início da rotina principal, era igual a 65535. Foi definido, aleatoriamente, um valor de 5000 pacotes para transmissão; ou seja, eram necessários dois *bytes* para representar a perda, caso isso acontecesse em sua totalidade nos testes a serem realizados. Como a interface serial só envia um *byte* por vez, o *pacl* foi separado em *bytes* mais e menos significativos. A variável *pacl* era decrementada e separada na rotina da placa mestre, ao chegar no *Labview* esses *bytes* eram novamente juntos e esse valor era subtraído do valor 65535, com isso obteve-se a número de pacotes recebidos com sucesso pela placa mestre. Com a diferença entre a número pacotes transmitidos (TX) e recebidos (RX) era possível quantificar, e por conseguinte, qualificar o desempenho do sistema.

5.2 Testes Realizados

Para se obter a taxa de erros de pacotes foram realizadas diversas transmissões em diferentes ambientes. Os testes foram realizados considerando-se os seguintes ambientes:

1. Ambiente Externo (*Outdoor*)
 - Sem obstáculos
 - Com obstáculos
2. Ambiente Interno (*Indoor*)

5.2.1 Testes em Ambiente Externo sem Obstáculos

Inicialmente, foram realizados os testes em ambiente externo, onde a placa mestre enviava a cada $1ms$ uma ordem de leitura à placa escrava, no total de 5000 pacotes transmitidos. A distância inicial entre as placas foi de 10 metros e a final de 50 metros, com

um incremento de dez metros a cada grupo de três medições realizadas. Ambas as placas estavam situadas a uma mesma altura com relação ao solo ($\sim 1,30\text{m}$) e com suas antenas direcionadas uma para a outra.

De acordo com a Tabela 5.1, pode-se notar que, apesar do aumento da distância e, como consequência, da diminuição da potência atingindo níveis menores que a sensibilidade mínima dos receptores, não foi perdido nenhum pacote em qualquer das medições realizadas em um mesmo local e em nenhuma das distâncias.

Tabela 5.1: Medições em ambiente externo com visada direta até 50 metros

Distância (m)	Média - Potência do Sinal (dBm)	Pacotes Perdidos (%)
10	-66,38	0
20	-78,70	0
30	-80,02	0
40	-85,30	0
50	-78,54	0

A Figura 5.2 mostra que houve um decréscimo na potência do sinal dos pacotes recebidos a medida que se aumentava a distância, entretanto, na distância máxima entre as placas (50 metros), o valor médio da potência (dBm), apresentou um valor maior que as médias das medições realizadas em 30 e 40 metros.

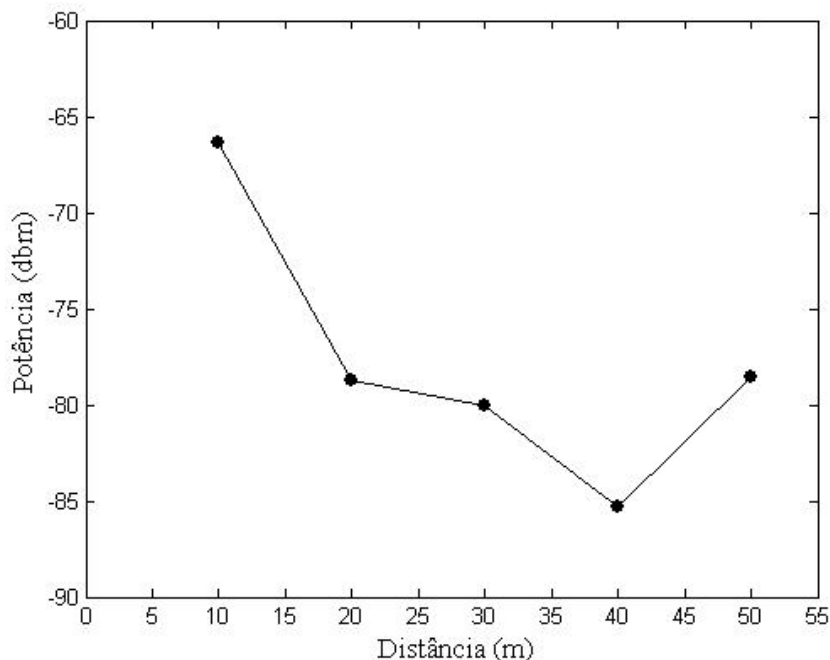


Figura 5.2: Potência do sinal em ambiente externo com visada direta até $d = 50$ metros.

Isto ocorreu devido a pequena inclinação existente no terreno que, nesta distância ($d = 50$ m), posicionou a placa escrava a altura um pouco superior em relação as distâncias anteriores.

Após essas primeiras medições, foram realizadas uma segunda bateria de testes, ainda em ambiente externo, entretanto com distâncias superiores as consideradas no teste anterior e com a transmissão de 1000 pacotes a cada 50 metros. A distância inicial entre as placas foi de 50 metros, como mostra a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Medições em ambiente externo com visada direta até 250 metros

Distância (m)	Pacotes Perdidos (%)	Potência (dBm)
50	0	-80,35
100	0	-80,11
150	0	-83,25
200	0,1	-88,92
250	45,22	-94,64

De acordo com Baker (2005), a confiabilidade do enlace de comunicação pode atingir a marca dos trezentos metros em ambiente externo com visada direta, entretanto nos testes realizados, como mostra a Figura 5.3, a partir dos 200 metros foi verificado uma perda significativa dos pacotes transmitidos. De acordo com a Figura 5.4 pode-se notar um decréscimo da potência com relação à distância, fato já esperado.

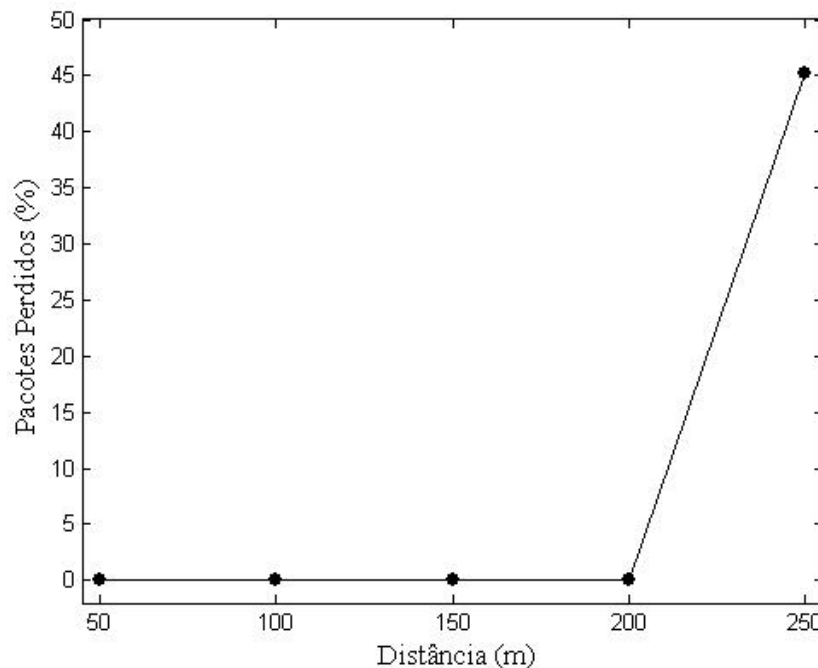


Figura 5.3: PP(%) em ambiente externo até 250 metros.

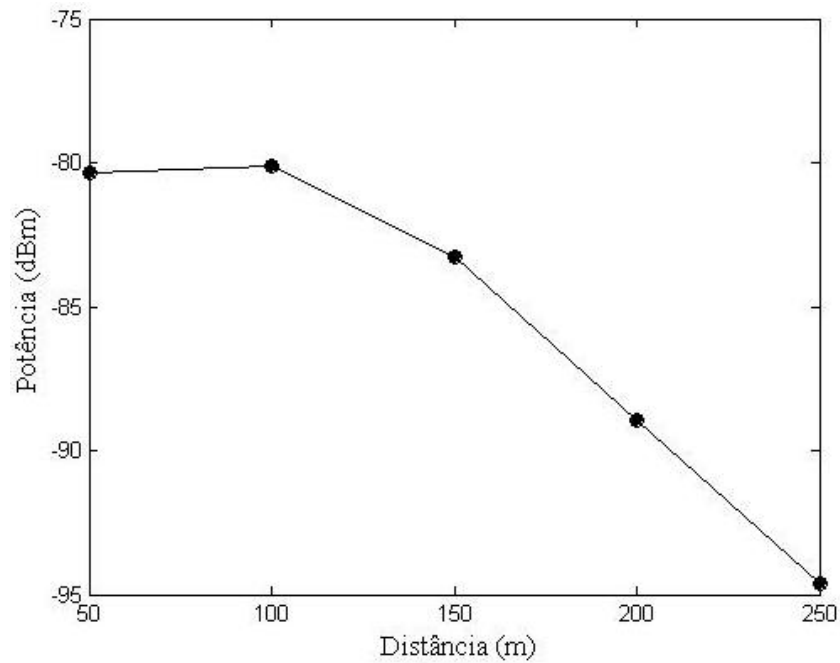


Figura 5.4: Potência do sinal em ambiente externo com visada direta até 250 metros.

Como a quantidade de pacotes perdidos mostrou-se bastante elevada para $d = 250$ metros, foram realizadas cinco medições nesta mesma distância e os resultados são apresentados na Figura 5.5.

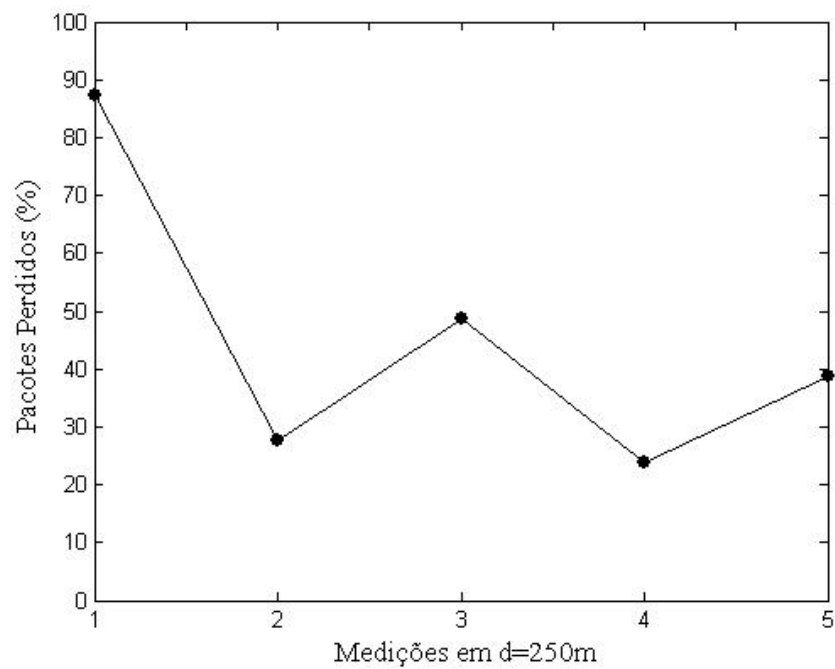


Figura 5.5: Medições realizadas na distância de 250 metros.

O desvio padrão calculado para estas cinco medições foi de 25,48%. Este valor de desvio padrão, aliado a média de pacotes perdidos (%) torna o enlace de comunicação inapropriado até para processos mais simples como o de monitoramento.

5.2.2 Testes em Ambiente Externo com Obstáculos

Os testes com obstáculos foram realizados na planta de equipamentos do laboratório LAMP - Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo, em três fases distintas. Na primeira fase a placa escrava estava situada a uma distância de aproximadamente 21 metros, por trás do tanque de água. Na segunda fase a placa escrava situava-se dentro da casa do compressor a uma distância de aproximadamente 23 metros. Nestas fases foram realizados 10 (dez) medições com a transmissão de 5000 pacotes cada. Na terceira fase a distância entre as placas foi variada e em cada uma delas foi realizada a transmissão de 5000 pacotes. A distância inicial foi de vinte metros e a final de cinquenta metros. A Figura 5.6 ilustra a localização das placas na planta baixa do LAMP.

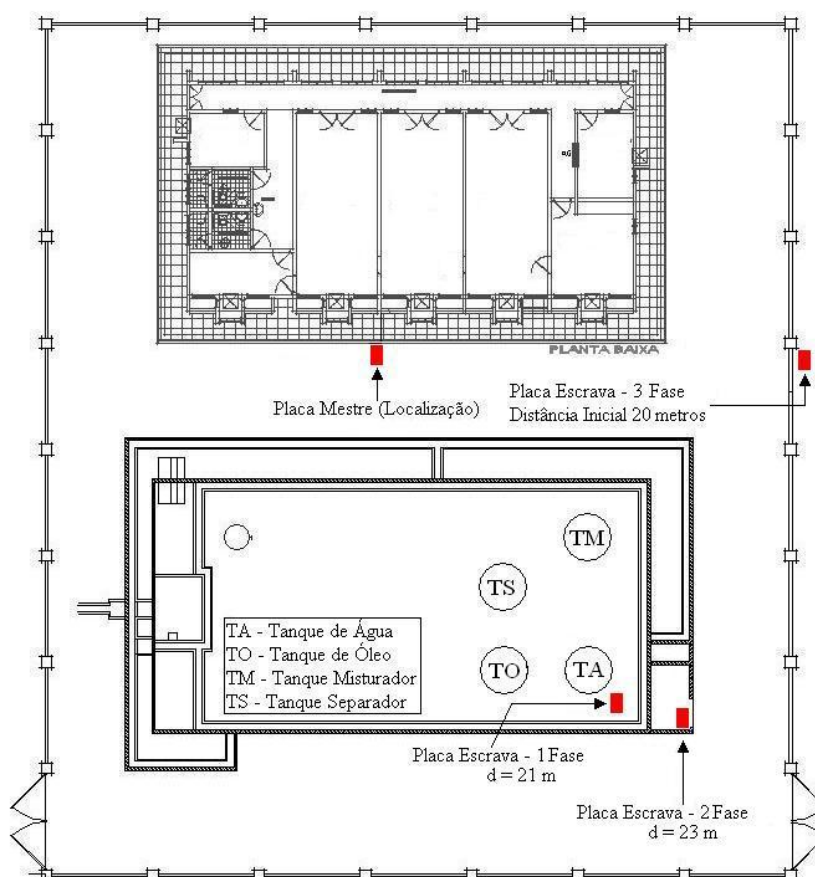


Figura 5.6: Localização dos pontos de medição em ambiente externo - 1ª, 2ª e 3ª Fases.

Testes na 1ª e 2ª Fase

Como pode ser visto na Figura 5.6, na primeira fase de testes as placas não estavam em visada direta, havia tanques, entre as mesmas, mesmo assim, de acordo com a Figura 5.7, foi verificado uma pequena perda de pacotes (%) com uma potência média de $P = -79,35$ dBm.

Na segunda fase pode-se constatar que, apesar da distância entre as placas ser superior a da primeira fase, pelo fato da placa escrava estar situado dentro de um ambiente fechado (Casa do Compressor) e o nível de potência do sinal ter apresentado um valor menor que na primeira fase ($P = -83,96$ dBm), o sistema apresentou um melhor desempenho. A Figura 5.8 ilustra a quantidade de pacotes perdidos nas medições realizadas para esta distância.

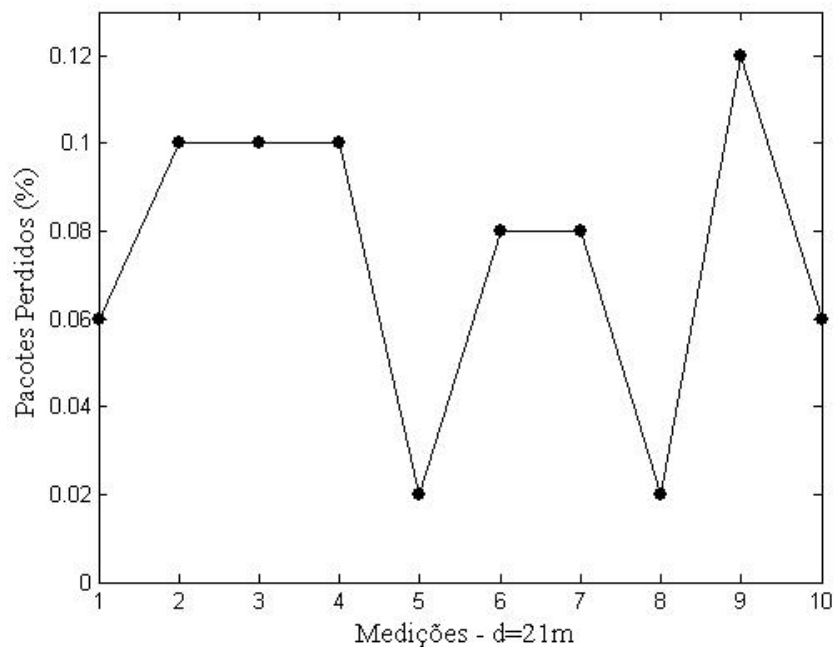


Figura 5.7: PP(%) em ambiente externo com obstáculos - 1ª fase.

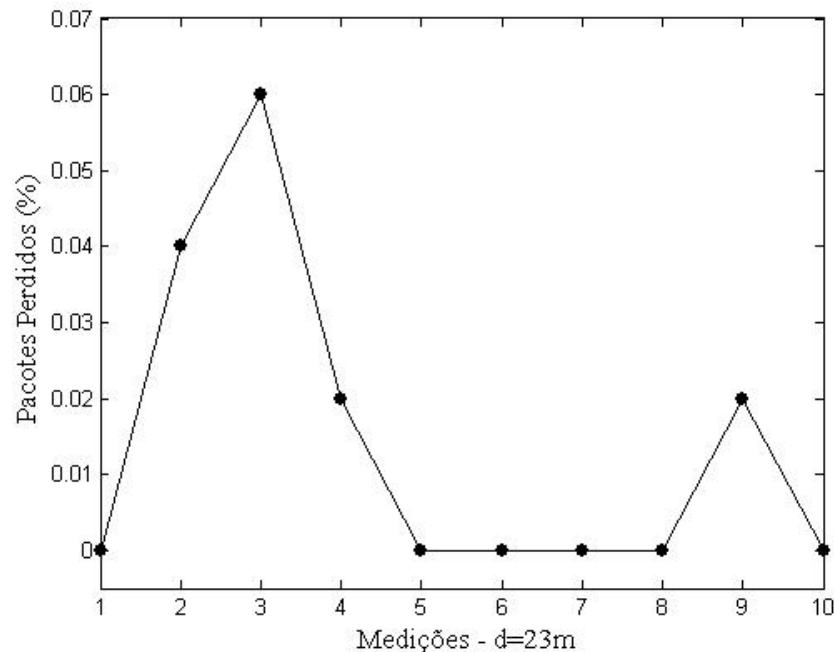


Figura 5.8: PP(%) em ambiente externo com obstáculos - 2^a fase.

Pode-se verificar, através dos gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 que o valor máximo de PP(%) na segunda fase corresponde ao segundo menor nível de PP(%) na primeira fase. Isso deveu-se ao fato da placa escrava estar localizada dentro da casa do compressor ao lado dos tanques, fazendo com que o sinal não sofresse a ação direta da difração e, por consequência, da maior degradação do sinal (Figura 5.6).

3^a Fase de Testes

Nesta fase de testes foram realizadas seis medições com o envio de 5000 pacotes cada (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Ambiente Externo com Obstáculo - Distância Variada

Distância (m)	Pacotes Perdidos (%)	Potência (dBm)
20	0,02%	-84,20
30	0,04%	-88,94
40	0,12%	-81,70
45	0,46%	-88,72
47	87,82%	-90,95
50	94,62%	-92,72

Como pode-se observar na Tabela 5.3, até uma distância de 45 metros não foram detectadas perdas significativas de pacotes, entretanto, a partir deste valor as perdas cresceram exponencialmente, como ilustra a Figura 5.9.

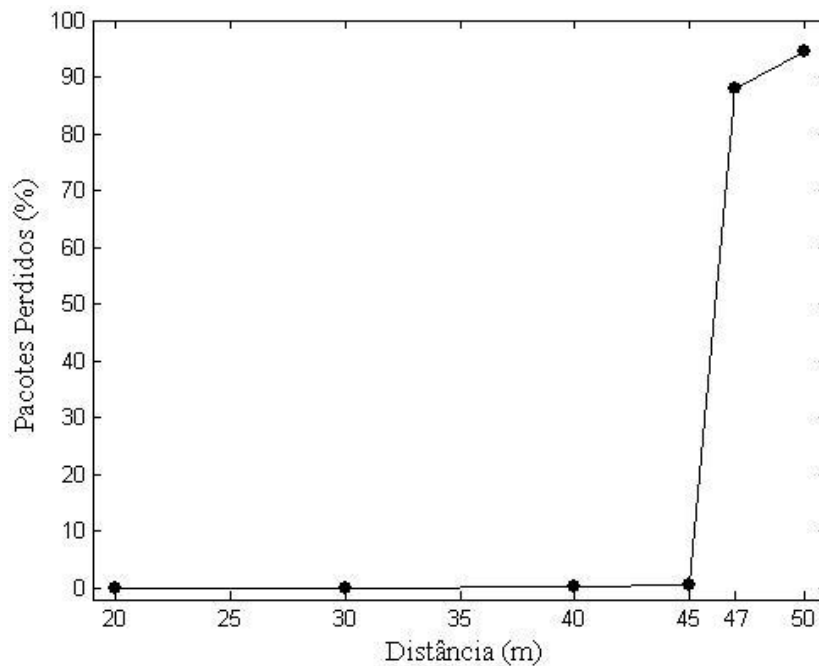


Figura 5.9: PP(%) em ambiente externo com obstáculos - 3ª fase.

Pôde-se observar na Tabela 5.3 que na distância de 40 metros, houve uma melhora do nível de potência do sinal ($P = -81,70$ dBm), isto ocorreu devido à irregularidade do terreno em que foram realizadas estas medições, o qual posicionou a placa escrava a uma altura superior a das outras medições melhorando o nível de recepção do sinal.

5.2.3 Testes em Ambiente Interno

Os resultados nesta seção foram gerados dentro do prédio do LAMP com procedimento similar aos do ambiente externo, entretanto, o ponto principal foi a geração de resultados entre ambientes, e não utilizando a distância como premissa; ou seja, o que foi objetivado nestes resultados foi mostrar a degradação do sinal em um ambiente com várias paredes, computadores, armários e pessoas transitando, a distância foi uma consequência da mudança de ambientes onde estava localizada a placa escrava.

Foram determinados três pontos de medição onde seriam gerados os resultados, como mostra a Figura 5.10. Em cada ponto foram realizadas dez medições com a transmissão de 5000 pacotes cada em aproximadamente 60 segundos.

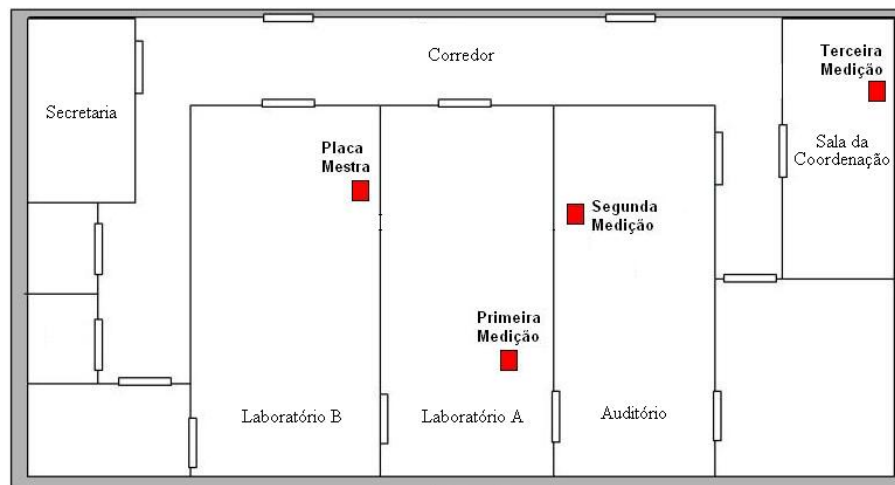


Figura 5.10: Localização dos pontos de medição na planta baixa do LAMP.

De acordo com Paksuniemi et al. (2005) o alcance dos módulos em ambiente interno (*Indoor*) pode variar entre 10 – 75 metros, entretanto, Pekhteryev et al. (2005) assume que a faixa de transmissão entre módulos fica em torno de 30 metros.

Os resultados gerados a partir dos pontos de medição mencionados na Figura 5.10, apresentaram valores significativos de perdas de pacotes para o terceiro ponto de medição (~ 15 metros), conforme ilustra a Figura 5.13. A Tabela 5.4 mostra a quantidade de Pacotes Perdidos - PP(%) nos três pontos de medição.

Tabela 5.4: Medições em Ambiente Interno - Pacotes Perdidos (%)

	PP% (5m)	PP% (10m)	PP% (15m)
1	0,08%	0,00%	0,02%
2	0,16%	2,48%	0,04%
3	0,38%	0,10%	4,44%
4	0,06%	0,54%	0,20%
5	0,00%	0,42%	2,80%
6	0,00%	0,02%	1,60%
7	0,00%	0,00%	2,96%
8	0,12%	0,04%	0,90%
9	0,02%	0,04%	3,44%
10	0,00%	0,36%	0,30%

Nos dois primeiros pontos de medição, constatou-se uma pequena perda de pacotes conforme ilustram as Figuras 5.11 e 5.12, apesar da grande quantidade de obstáculos existentes nos ambientes. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, as medições realizadas no terceiro ponto de medição apresentaram valores significativos de perdas de pacotes (Figura 5.13). Neste tipo de ambiente, a rede LR-WPAN sofreu mais com a presença de obstáculos do que no ambiente externo, devido a problemas de recepção através de multi-caminhos.

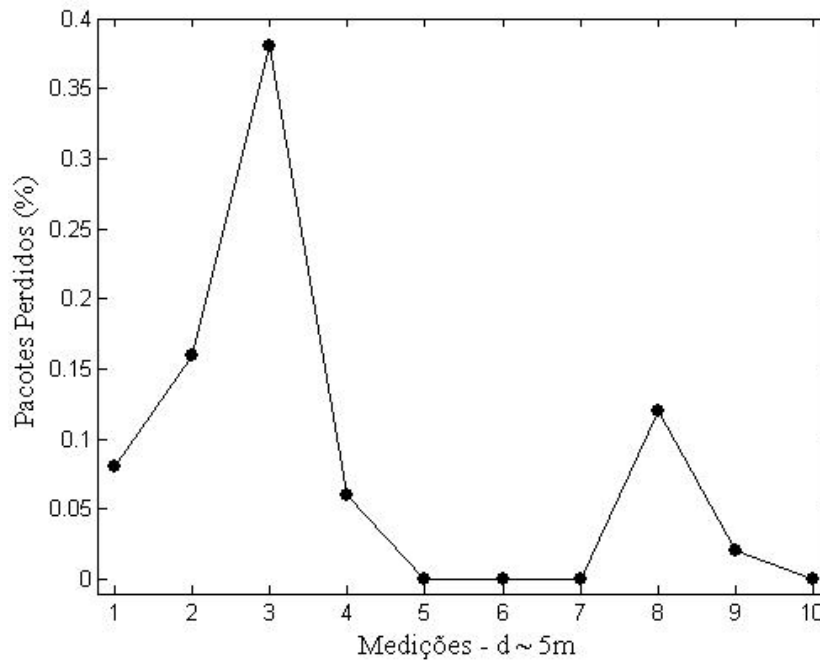


Figura 5.11: PP(%) em ambiente interno - 1° ponto de medição.

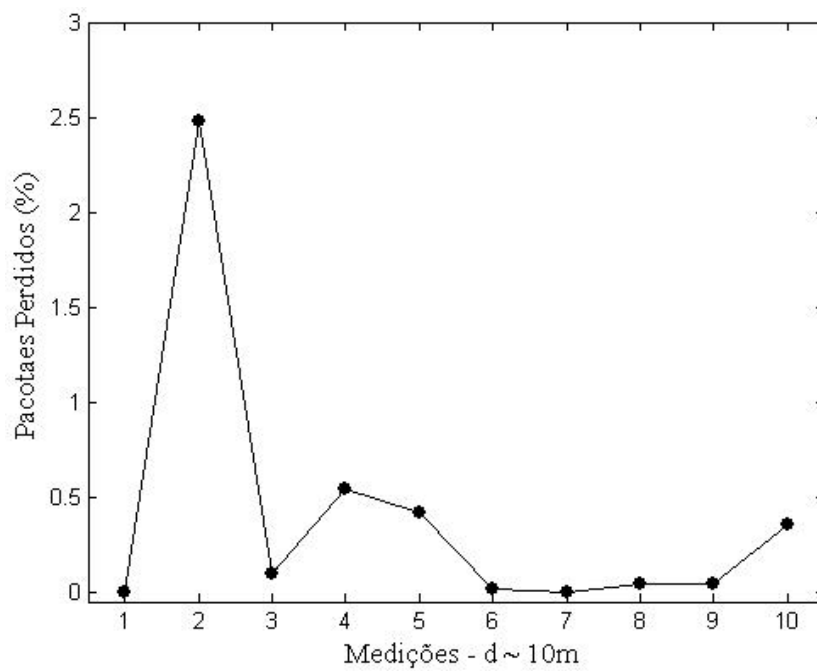


Figura 5.12: PP(%) em ambiente interno - 2° ponto de medição.

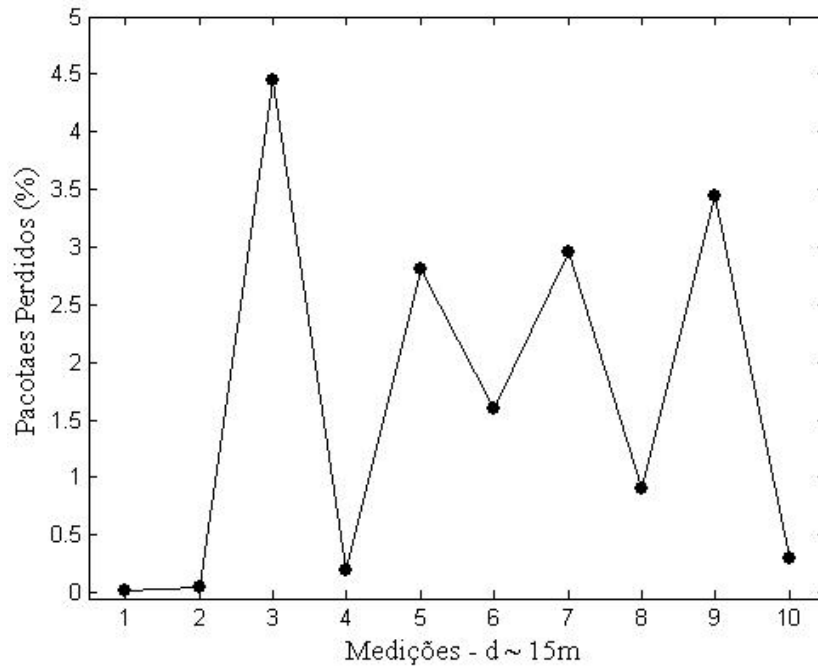


Figura 5.13: PP(%) em ambiente interno - 3º ponto de medição.

A Tabela 5.5 ilustra o nível de potência de cada ponto de medição. Pôde-se verificar que mesmo estando abaixo do valor de referência para o padrão LR-WPAN 802.15.4, as perdas foram consideradas pequenas, o que não comprometeu o desempenho do sistema.

Tabela 5.5: Potência do sinal(dBm) em ambiente interno

	Pot.(dBm) $d \sim 5m$	Pot.(dBm) $d \sim 10m$	Pot.(dBm) $d \sim 15m$
1	-88,5	-88,13	-94,49
2	-90,13	-94,8	-94,54
3	-93,18	-94,81	-94,81
4	-92,97	-94,8	-94,63
5	-93,48	-94,81	-94,77
6	-93,12	-94,65	-94,78
7	-89,1	-88,85	-94,7
8	-88,14	-90,02	-94,8
9	-88,24	-89,4	-94,8
10	-84,66	-89,33	-93,96

5.2.4 Testes com Sinais de Interferência

Como não havia dispositivos que enviassem um sinal ruidoso na faixa de frequência utilizada pelas placas do *kit* de desenvolvimento da *Freescale* foi realizado um teste utilizando como sinal de interferência um aparelho de telefone sem fio (2,4GHz). As antenas

do telefone sem fio e da placa mestre estavam em visada direta.

As perdas de pacotes foram consideradas desprezíveis e, com isso, não foi possível obter nenhuma conclusão com relação a este tipo de teste. Como ilustrado na Figura 5.14 o desempenho do sistema não foi afetado pelo sinal do telefone sem fio.

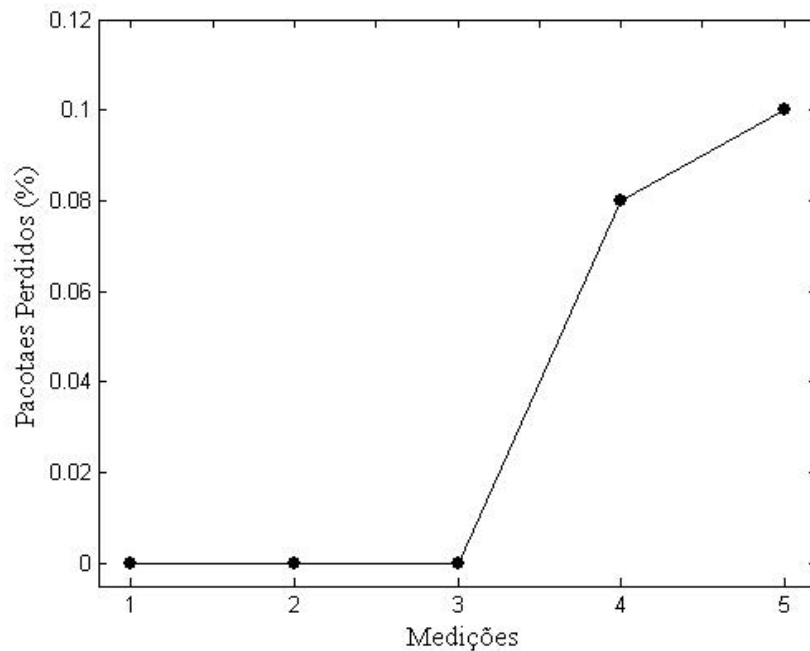


Figura 5.14: PP (%) em ambiente interno com presença de sinal de interferência(2,4 GHz).

Os resultados apresentados foram considerados satisfatórios, visto que o se buscava era um estudar e avaliar o desempenho do enlace de comunicação do padrão IEEE - 802.15.4 aplicado a uma rede de sensores sem fio para monitoramento de variáveis.

Mesmo em ambientes considerados problemáticos, como o caso da planta de tanques do LAMP, onde havia diversos equipamentos se interpondo entre as placas de comunicação sem fio, houve pouquíssimas perdas de pacotes. E, nos casos em que a perda foi extremamente elevada o padrão ainda conseguia manter o *link* de comunicação.

5.3 Discussão

De acordo com a Seção 2.2, pode-se observar que há a possibilidade do uso da tecnologia *wireless* aplicada aos métodos de elevação artificial de petróleo e gás natural; ou seja, a captação e envio dos sinais dos sensores até a UTR.

De acordo com Nascimento (2005) a maior distância encontrada entre um ponto de medição e a UTR nos métodos relacionados no Capítulo 2, fica em to não é superior a 50 metros com visada direta não havendo obstáculos se interpondo entre o sensor e a UTR.

Como pode-se observar na Tabela 5.1, as medições realizadas até uma distância de 50 metros com visada direta, não apresentaram nenhuma perda de pacotes. De acordo com

a Figura 5.9, onde foram realizadas as medições com a presença de obstáculos, o *link* mostrou-se confiável até uma distância de 45 metros, com uma pequena perda de pacotes.

Nos métodos aqui relacionados, onde as distâncias entre os pontos de medição e a UTR não ultrapassam os 50 metros, o padrão IEEE 802.15.4 baseado nas primitivas do SMAC pode ser implementado para realizar o monitoramento de variáveis.

O método BM foi escolhido por ser o método mais utilizado na bacia potiguar. Como pode ser visto na Figura 2.1, o sensor de pressão localizado na cabeça do cavalo mecânico, em constante movimento, pode ser substituído por um sensor piezoelétrico, onde este, por ter um baixo consumo de energia, pode ser alimentado por uma pequena bateria, e, conectado a ele, uma placa de comunicação sem fio alimentada por uma bateria de 9 volts. Este sistema seria bastante compacto e poderia captar os dados do esforço ao qual é submetido o conjunto de hastes enviando assim, esta informação a UTR sem haver a necessidade de cabos.

Um ponto a ser observado é o tipo e a faixa do sinal que é gerado pela sensor piezoelétrico; pois o conversor ATD da placa de comunicação sem fio trabalha com uma faixa de tensão de 0 – 3 volts. Caso seja necessário haverá um circuito conversor para adequar o sinal de saída do sensor à entrada do conversor ATD.

Em outros métodos de elevação artificial, como no caso do gás *lift*, poderiam ser realizados o monitoramento de diversas variáveis, como por exemplo: pressão na cabeça do poço, pressão diferencial, vazão e temperatura. Cada placa sem fio possui até oito canais ATD, logo apenas uma placa seria suficiente para captar e enviar os sinais destas variáveis. Caso o número de variáveis fosse superior a quantidade de canais de conversão seriam utilizadas duas ou mais placas, onde estas poderiam ser alimentadas por um sistema de energia alternativa (energia solar), concentrando os pontos de medição próximos uns aos outros.

Os resultados aqui apresentados foram gerados a partir da topologia ponto a ponto, entretanto é possível desenvolver uma rede com estes mesmos parâmetros, pois um dos dados enviados pelo *software* de gerenciamento era o endereço identificador da placa escrava, com isso pode-se desenvolver uma rede com n nós, levando-se em conta alguns aspectos importantes para um bom funcionamento desta: número máximo de nós na rede, roteamento de mensagens, segurança da rede, checagem de erros e ré-transmissões de mensagens.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Sumário e Contribuições

Esta dissertação propôs uma tecnologia de comunicação sem fio, que possibilitasse a transmissão de dados, de maneira simples, confiável e com baixo consumo de energia abrindo a possibilidade do uso em diversos cenários para diversas aplicações, principalmente na área industrial, onde há grandes problemas com a automação de processos. Este estudo experimental consistiu:

- Estudo e escolha da tecnologia de comunicação sem fio que se adequaria as premissas do problema;
- Desenvolvimento de um dispositivo para quantificar as perdas de comunicação existentes no enlace desta tecnologia;
- Avaliação do desempenho desta tecnologia frente aos ambientes internos (*Indoor* e externos (*Outdoor*) onde possivelmente seria aplicada;
- Escolha de um tipo de fonte alternativa de energia para alimentar o sistema como um todo e
- Escolha do tipo de sensor que também teria um baixo consumo de energia;

O objetivo principal deste estudo foi avaliar e propor um sistema de comunicação sem fio que possuísse as seguintes características: simplicidade, baixo consumo de energia, flexibilidade e taxa de transferência adequada aos problemas do sensoriamento remoto. Dentre as tecnologias pesquisadas foi escolhido o padrão IEEE 802.15.4 por possuir tais características e destacar-se das outras com relação a aplicação em redes de sensores sem fio (RSSH)

Como objetivo secundário, foi proposto um sistema de instrumentação integrado ao sistema de comunicação sem fio que pudesse ser utilizado para monitoração da pressão, escolha desta variável realizada devido a sua existência em todos os métodos de elevação artificial de petróleo.

Como não era objetivo deste estudo avaliar o desempenho do sistema como um todo ou das partes relacionadas ao objetivo secundário, realizou-se um breve comentário a respeito destas tecnologias e o porque da escolha delas.

A partir de uma compacta estrutura computacional, como a utilizada para a realização dos testes, pode-se verificar a robustez e confiabilidade apresentada pelo sistema de comunicação proposto.

Como o monitoramento de variáveis (pressão) de sensores era o objetivo deste estudo, não havia a necessidade de uma alta taxa de transmissão de dados, desta forma o padrão IEEE 820.15.4 pôde-se ser totalmente aplicável já que o mesmo trabalha na faixa entre 10 e 250 Kbps e com isso a largura de banda dos seus canais poderia ser menor, trazendo como consequência um baixo consumo de energia [Gessinger & Hennig 2005].

O enlace de comunicação entre as placas sem fio mostrou-se confiável no quesito pacotes perdidos. Como não havia um equipamento que realizasse a medição da BER ou PER, foi necessário o desenvolvimento de um sistema que quantificasse as perdas de dados neste enlace, frente a utilização em ambiente distintos, com o objetivo de se qualificar o mesmo. Com isso pode-se afirmar que o padrão IEEE 802.15.4, com um simples desenvolvimento de *software* baseado nas primitivas do SMAC, é capaz de realizar um monitoramento de variáveis de maneira apropriada.

No ambiente externo (*Outdoor*) com visada direta, o alcance com o qual o enlace de comunicação mantivesse confiável atingiu a marca dos duzentos metros, a partir daí existiram perdas consideráveis, entretanto como as antenas utilizadas foram as impressas na própria placa, com a utilização de antenas externas conectadas as mesmas, esse alcance pudesse ser acrescido. Da mesma maneira que no ambiente interno (*Indoor*). Todavia, o sistema mostrou-se robusto e confiável em qualquer dos dois ambiente onde foi testado.

Uma das vantagens do sistema de comunicação sem fio é a portabilidade, e os componentes do sistema solar que forneciam os menores valores de potência, disponíveis no mercado nacional, possuem dimensões pouco compactas. Logo, o sistema alternativo de energia solar só seria utilizado quando houvesse uma quantidade de dispositivos (placas de comunicação sem fio e sensores) que gerassem um consumo de energia mínimo que pudesse ser alimentado por esse sistema. Caso contrário, os sensores e placas de comunicação poderiam ser alimentados através de pequenas baterias (Ex: 9 volts), pois estes, como mencionado anteriormente, consomem pouca energia.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Seguem abaixo algumas sugestões como trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um programa utilizando as primitivas da camada MAC, onde nesta há uma maior quantidade de recursos a serem utilizados, como outros tipos de topologia de rede e questões de segurança;
- Implementar um sistema de segurança que minimize os efeitos das invasões na rede, problema freqüente nas redes sem fio, através das primitivas da camada MAC;

- Avaliar a transmissão de dados em um ambiente com fontes geradoras de ruído na faixa de frequência utilizada pelo padrão IEEE 802.15.4 de modo a prejudicar a transmissão de dados em termos de PER ou BER, banda passante e confiabilidade no enlace;
- Sobrepor redes do mesmo padrão (IEEE 802.15.4) se comunicando entre si e avaliar o desempenho destas quanto a interferência sofrida por ambas;

Referências Bibliográficas

- Baker, Nick (2005), 'Zigbee and bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications', *IEE Computing and Control Engineering* pp. 20–25.
- Callaway, Ed, Paul Gorday, Lance Hester, Jose A. Gutierrez, Marco Naeve, Bob Heile & Venkat Bahl (2002), 'Home networking with ieee 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks', *IEEE Communications Magazine* pp. 70–77.
- Ciardiello, Tony (2005), 'Wireless communications for industrial control and monitoring', *IEE Computing and Control Engineering* pp. 12–13.
- Costa, R. O. (2004), Curso de bombeio mecânico, Relatório técnico, Petrobrás UNRNCE/ST/ELV.
- Denis, Everson (2004), Avaliação da tecnologia bluetooth para transmissão de vídeo em tempo real com qualidade de serviço(qos), Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Filho, Jaime Barros (2002), Ajuste automático e otimização do tempo de espera (*Idle Time*) em bombeio mecânico de petróleo, Dissertação de mestrado, UFRN.
- Flowers, David, Kim Otten & Nilesh Rajbharti (2006), Microchip stack for the zigbee^Ž protocol, Relatório Técnico AN965, MICROCHIP TECHNOLOGY Inc.
- Geocities, Yahoo (2006), 'Comunicação sem fio', <http://www.geocities.com/zyxbbb/>, acessado em 27/04/2006.
- Gessinger, Armando Koerig & Carlos Henrique Hennig (2005), Zigbee - conectividade wireless para automação e controle. Artigo obtido no Congresso ISASHOW/2005, São Paulo-SP.
- Gutierrez, Jose A., Marco Naeve, Ed Callaway, Monique Bourgeois, Vinay Milter & Bob Heile (2001), 'IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks', *IEEE Networking* **15**(5), 12–19.
- Gutierrez, José A. & David B. Durocher (2005), 'On the use of ieee 802.15.4 to enable wireless sensor network in pulp and paper industry', *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2005. Conference Record of 2005 Annual* pp. 105–110.

- Howitt, Ivan & Jose A. Gutierrez (2003), 'Ieee 802.15.4 low rate - wireless personal area network coexistence issues', *IEEE* .
- IEEE (2003), *IEEE Standard Specification 802.15.4*, IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.
- IEEEStandard (802.2-1998), *Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 2: Logical Link Control*, IEEE.
- Malafaya, Hugo, Luís Tomás & João Paulo Sousa (2005), 'Sensorização sem fios sobre zigbee e ieee 802.15.4', *JETC'05 - Terceiras Jornadas de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa .
- Middleton, S. (2000), Ieee 802.15 wpan low rate study group par, Relatório Técnico P802.15-00/248r3, IEEE.
- Misic, Jelena, Shairmina Shafi & Vojislav B. Misic (2005), 'Avoiding the bottlenecks in the mac layer in 802.15.4 low rate wpan', *Proceedings of the 2005 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'05)* .
- Nascimento, João Maria Araújo (2005), Simulador computacional para poços de petróleo com método de elevação artificial por bombeio mecânico, Dissertação de mestrado, UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Paksuniemi, M., H. Sorvoja, E. Alasaarela & R. Myllylä (2005), 'Wireless sensor and data transmission needs and technologies for patient monitoring in the operating room and intensive care unit', *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference* pp. 5182–5185.
- Pekhteryev, Georgiy, Zafer Sahinoglu, Philip Orlik & Ghulam Bhatti (2005), 'Image transmission over ieee 802.15.4 and zigbee networks', *IEEE International Symposium on Circuits and Systems - ISCAS* .
- Ramakrishnan, Subah, Hong Huang, Manikanden Balakrishnan & John Mullen (2004), 'Impact of sleep in a wireless sensor mac protocol', *IEEE 60th Vehicular Technology Conference* 7, 4621–4624. Digital Object Identifier 10.1109/VE-TECF.2004.1404966.
- Semiconductor, *FreescaleTM* (2004), *MC9S08GB/GT Data Sheet*, rev.2.31 edição, *FreescaleTM* Semiconductor, Technical Information Center, CH370 - 1300 N. Alma School Road Chandler, Arizona 85224.
- Semiconductor, *FreescaleTM* (2005), *Simple Media Access Controller (SMAC) - User's Guide*, *FreescaleTM* Semiconductor. Document Number: SMACRM, Rev. 1.2.
- Takács, Gábor (2002), *Sucker-rod Pumping Manual*, Penn Well Books.

Thomas, José Eduardo (2001), *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2ª edição, Editora Interciência.

Willig, Andreas, Kirsten Matheus & Adam Wolisz (2005), 'Wireless technology in industrial networks', *Proceedings of the IEEE* **93**(6), 1130 – 1151.

Young, Paul H. (2006), *Técnicas de Comunicação Digital*, Prentice Hall.