
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE
PETRÓLEO-PPGCEP

Desenvolvimento de Sistemas Embarcados para Redes de
Sensores e Atuadores Sem Fio aplicadas em Unidades de
Elevação de Petróleo do Tipo *Plunger-Lift*

Jefferson Doolan Fernandes

Natal, RN - Brasil

Novembro de 2010

Jefferson Doolan Fernandes

Desenvolvimento de Sistemas Embarcados para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio aplicadas em Unidades de Elevação de Petróleo do Tipo *Plunger-Lift*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Área de Concentração: Automação na Indústria de Petróleo e Gás Natural), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Orientador:

Prof. Dr. Sc. Andrés Ortiz Salazar

Natal, RN – Brasil

2010.

Jefferson Doolan Fernandes

Desenvolvimento de Sistemas Embarcados para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio aplicadas em Unidades de Elevação de Petróleo do Tipo *Plunger-Lift*

Dissertação de Mestrado aprovada em 22 de Novembro de 2010 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Prof. Dr. Glaucio Bezerra Brandão (Examinador Interno) DEB/UFRN

Prof. Dr. Alexandre Magnus Fernandes Guimarães (Examinador Externo). IFBA

Natal, RN – Brasil

2010

Resumo

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) aplicadas aos métodos de elevação de petróleo se apresentam como uma área com crescente demanda técnico-científica tendo em vista as otimizações que podem ser realizadas frente aos processos existentes. Este trabalho tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento de sistemas embarcados dedicados a uma rede de sensores sem fio baseada no padrão IEEE 802.15.4, onde se aplica o protocolo ZigBee, entre os sensores, atuadores e o CLP (Controlador Lógico Programável), visando solucionar os problemas presentes nas fases de implantação e manutenção da comunicação física atual das unidades de elevação de petróleo baseadas no método *Plunger-Lift*. Os sistemas embarcados desenvolvidos para essa aplicação serão responsáveis por interpretar as informações dos sensores e comandar os atuadores dos dispositivos presentes no poço, como também utilizar o protocolo Modbus para fazer com que essa rede se torne transparente para o CLP responsável pelo controle da produção e envio das informações para o supervisor SISAL.

Palavras-chave: Rede de Sensores Sem Fio, IEEE 802.15.4, ZigBee, Modbus, *Plunger-Lift*.

Abstract

The Wireless Sensor Networks (WSN) methods applied to the lifting of oil present as an area with growing demand technical and scientific in view of the optimizations that can be carried forward with existing processes. This dissertation has as main objective to present the development of embedded systems dedicated to a wireless sensor network based on IEEE 802.15.4, which applies the ZigBee protocol, between sensors, actuators and the PLC (Programmable Logic Controller), aiming to solve the present problems in the deployment and maintenance of the physical communication of current elevation oil units based on the method Plunger-Lift. Embedded systems developed for this application will be responsible for acquiring information from sensors and control actuators of the devices present at the well, and also, using the Modbus protocol to make this network becomes transparent to the PLC responsible for controlling the production and delivery information for supervisory SISAL.

Keywords: Wireless Sensor Network, IEEE 802.15.4, ZigBee, Modbus, Plunger-Lift.

Agradecimentos

Agradeço e dedico esse trabalho:

A Deus por ter me dado saúde e força para mais um desafio na minha vida.

Agradeço aos meus queridos pais, Assis Carlos Fernandes e Catherine Amelia Mary Doolan Fernandes, que me ensinaram a entender a importância do conhecimento e sempre incentivaram os meus estudos.

As minhas adoráveis irmãs, Dilia Doolan Fernandes e Catarina Doolan Fernandes, que sempre me fizeram achar que sou inteligente.

Agradeço aos meus amáveis avôs Manuel Fernandes de Assis e Maria Alba Fernandes que sempre se importaram com a educação dos seus netos.

A minha grande família Fernandes que sempre unida mostra bons exemplos a serem seguidos.

Agradeço a minha linda noiva Aline Braga Galvão Silveira que nos momentos mais difíceis e estressantes dessa dissertação esteve ao meu lado me apoiando e oferecendo ajuda, sempre carinhosa e compreensiva.

Ao meu eterno orientador, professor Andrés Ortiz Salazar, por me convidar para participar do projeto “Sem Fio II”. Sempre serei grato por todo seu ensinamento e atenção nesses dois anos de mestrados mais 4 anos de convivência.

Aos meus bons amigos de trabalho, Rodrigo, Judson, Hundson, Felipe, Walci, Coelho, Alvaro e Leonardo, pela ajuda e apoio nesses dois anos.

Agradeço

Sumário

Capítulo 1 - Introdução geral.....	1
1.1 - Motivação.....	3
1.2 - Objetivo.....	3
1.2.1 - Objetivos específicos.....	4
1.3 - Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo 2 - Aspectos teóricos.....	6
2.1 - <i>Plunger-Lift</i>	7
2.1.1 - Equipamentos.....	9
2.1.2 - Etapas do <i>Plunger-Lift</i>	10
2.1.3 - Layout da instrumentação na superfície de um poço com <i>Plunger-Lift</i>	12
2.2 - Áreas classificadas	14
2.2.1 - Normalização internacional – IEC	15
2.2.1.1 - Comitê Técnico TC-31 da IEC.....	15
2.2.2 - Normalização brasileira – ABNT.....	16
2.2.2.1 - Classificação de áreas	17
2.2.2.1.1 - Zonas	18
2.2.2.1.2 - Tipos de proteção	18
2.2.2.1.3 - Grupos.....	19
2.2.2.1.4 - Temperaturas.....	19
2.2.3 - Classificação de área em um poço com <i>Plunger-Lift</i>	20
2.3 - RSSF utilizando o padrão IEEE 802.15.4/ZigBee.....	21
2.3.1 - O padrão IEEE 802.15.4.....	22
2.3.1.1 - Dispositivos da rede LR-WPAN	22
2.3.1.2 - Topologias da rede LR-WPAN	23
2.3.1.2.1 - Topologia estrela	23
2.3.1.2.2 - Topologia ponto-a-ponto.....	24
2.3.1.2.3 - Topologia <i>cluster tree</i>	24

2.3.1.3 - Mecanismo de controle de acesso ao meio físico	25
2.3.2 - O protocolo de rede ZigBee	26
Capítulo 3 - Estado da arte	27
Capítulo 4 - Metodologia experimental	30
4.1 - Estrutura	31
4.2 - A RSSF <i>Plunger-Lift</i>	32
4.3 – Hardwares	34
4.3.1 - Kit de desenvolvimento MC13192.....	34
4.3.2 - Módulos XBee©	35
4.3.2.1 - Comunicação serial	37
4.3.3 - Microcontrolador PIC18F2550 da Microchip.....	38
4.3.4 - Circuitos desenvolvidos	39
4.3.4.1 - Placa de comunicação.....	40
4.3.4.2 - Placas de adaptação de sinais	40
4.3.4.2 - Placa ZigBee/Modbus.....	41
4.4 - Firmwares	42
4.4.1 - Lógica dos sistemas sensores/atuadores	42
4.4.2 - Lógica do sistema coordenador ZigBee/Modbus	42
4.5 - Energia	44
Capítulo 5 - Resultados e discussões	47
5.1 - Análise do QoS da RSSF	48
5.2 - Coexistência com WiFi	52
5.3 - Economia de energia	53
5.4 - Teste de campo	54
Capítulo 6 - Conclusão	57
Referências Bibliográficas	61

Lista de Figuras

Figura 2.1. Partes de um poço com <i>Plunger-Lift</i>	8
Figura 2.2. Equipamentos em um <i>Plunger-Lift</i>	9
Figura 2.3. Etapas de <i>buildup</i> (a esquerda) e <i>upstroke</i> (a direita) do processo de produção no método <i>Plunger-Lift</i>	11
Figura 2.4. Etapas de <i>afterflow</i> (a esquerda) e <i>downstroke</i> (a direita) do processo de produção no método <i>Plunger-Lift</i>	12
Figura 2.5. Comunicação física entre os instrumentos e o CLP de um <i>Plunger-Lift</i>	13
Figura 2.6. Fotos da Unidade Remota e os instrumentos conectados a mesma... ..	13
Figura 2.7. Nova disposição dos equipamentos do <i>Plunger-Lift</i> com a RSSF.....	14
Figura 2.8. Organograma da ABNT.	17
Figura 2.9. Classificação de área do <i>Plunger-Lift</i>	21
Figura 2.10. Topologias do padrão IEEE 802.15.4.	23
Figura 2.11. Topologia de rede <i>cluster tree</i>	25
Figura 4.1. Partes principais dos sistemas embarcados.	31
Figura 4.2. Diagrama de blocos dos Sistemas Embarcados Sem-Fio.....	32
Figura 4.3. RSSF <i>Plunger-Lift</i>	33
Figura 4.4. Placa de desenvolvimento da Freescale.	34
Figura 4.5. Módulos com protocolo ZigBee.	35
Figura 4.6. Comunicação serial entre o Xbee e o microcontrolador.	38
Figura 4.7. Dimensões do PIC18F2550.....	39
Figura 4.8. Placas componentes do módulo de comunicação.	39
Figura 4.9. Placa de Comunicação, vistas superior e inferior.	40
Figura 4.10. Placa de adaptação de sinais.	41
Figura 4.11. Portas de comunicações do coordenador ZigBee.	41
Figura 4.12. Fluxograma dos <i>Firmwares</i> dos RFDs.....	43
Figura 4.13. Fluxograma do coordenador ZigBee.....	44
Figura 4.14. Packs de baterias Lithium-Ion para os sistemas embarcados RFDs.	45
Figura 4.15. Montagem de cada sistema embarcado.....	46

Figura 5.1. Variação de tempo entre amostras.	548
Figura 5.2. Montagem da RSSF para análise de QoS.....	49
Figura 5.3. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo PCab.....	50
Figura 5.4. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Pistão.....	50
Figura 5.5. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo I/P.....	50
Figura 5.6. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Pls.....	51
Figura 5.7. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Prev.....	51
Figura 5.8. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Solenóide.....	51
Figura 5.9. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Vazão.....	52
Figura 5.10. Comparação WiFi x WiFi+RSSF.....	52
Figura 5.11. Consumo de energia.....	54
Figura 5.12. Imagem de satélite da planta do LAMP.....	55
Figura 5.13. Relatório do SISAL.....	56
Figura 6.1. a) Configuração em campo; b) Configuração em laboratório.....	58
Figura 6.2. Imagem de satélite dos poços em Lorena.....	59

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Tipos de proteção.	19
Tabela 2.2. Classificação das temperaturas máximas de superfície para equipamentos elétricos do Grupo II.....	20
Tabela 4.1. Comparativos entre tecnologias para RSSF.	35

Nomenclaturas, Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CLP - Controlador Lógico Programável

COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Telecomunicações e Iluminação

CONMETRO - Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

CSMA-CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSS - Chirp Spread Spectrum

ED - Energy Detection

FFD - Full-Function Device

GTS - Guaranteed Time Slots

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE – Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica

I-P - conversor corrente-pressão

LAMP - Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo

LQI - Link Quality Indication

LR-WPAN - Low Rate-Wireless Personal Area Network

MAC - Medium Access Control

OMC/WTO - Organização Mundial de Comércio/World Trade Organization

PHY - Physical Layer

PCab - Pressão na Cabeça do poço

Pls - Pressão na linha de surgência

Prev - Pressão no revestimento

PT - sensores de pressão

QoS - Quality of Service

RCAC - Ritmo de Crescimento Anual Composto

RFD - Reduced-Function Device

RGL - Razão Gás Líquido

RSSF - Redes de Sensores Sem Fio

S - válvula solenóide

SMAC - Simple Media Access Controller

TBT - Technical Barriers to Trade (Barreiras Técnicas para o Comércio)

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UHF - Ultra High Frequency

UR - Unidade Remota

VDC - Venture Development Corporation

Capítulo 1

Introdução Geral

Nas indústrias, é crescente a necessidade da utilização de uma comunicação sem fio entre seus controladores, sensores e atuadores, devido a um grande aumento na quantidade desses ativos, o que implica em uma maior dificuldade na disposição dos fios que os interligam. Essa rede baseada em tecnologia sem fio facilita também a retirada de equipamentos para a manutenção dos mesmos, modificações de *layouts*, entre outros.

Durante muito tempo, e até nos dias atuais, essa idéia tem sido desprezada por alguns acharem que as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) não possuem a confiabilidade suficiente para as aplicações de controle e monitoramento dos sistemas industriais.

Segundo Willig et al. (2005), para sistemas industriais com fio, tempo de resposta e confiabilidade das informações são importantes características encontradas nas redes *Fieldbus*¹. Quando em aplicações sem fio, a confiabilidade e o tempo de resposta das informações se tornam mais difíceis de cumprir, devido às propriedades adversas dos rádios. Porém, nesse mesmo artigo, Willig et al. (2005) diz que com a criação de mecanismos de protocolos e esquemas de transmissão apropriados, juntamente com uma cuidadosa combinação desses esquemas, pode-se dar passos importantes para o aumento da aceitação das tecnologias sem fio nas aplicações industriais.

Devido a essas críticas condições de funcionamento, mas especificamente em aplicações de tempo-real, esse conceito existente sobre as redes sem fio de “chão de fábrica” acabou sendo imposta a qualquer aplicação industrial. Todavia, esse conceito vem mudando rapidamente com publicações de excelentes pesquisas que mostram a viabilidade da implementação de uma rede desse tipo, desenvolvendo algoritmos de roteamento redundantes, utilizando novas tecnologias sem fio, com redes determinísticas, utilizando técnicas de conservação de energia, bem como formas inovadoras que tiram proveito das características do ambiente para a geração de energia.

No entanto outra questão, no que tange à dificuldade de se implementar uma RSSF na indústria, deve ser levada em consideração que é a implementação dessa rede em áreas classificadas². A necessidade da utilização de caixas a prova de explosão para acomodar os

¹ tecnologia madura criada para permitir a comunicação entre controladores digitais e os sensores e atuadores em um processo físico industrial

² Termo que define um local ou ambiente sujeito à probabilidade da formação (ou existência) de uma atmosfera explosiva pela presença normal ou eventual de gases/vapores inflamáveis ou poeiras/fibras combustíveis.

rádios, os circuitos de adaptação dos sinais de leitura, ou sinais de comando, dos sensores e atuadores e as baterias, trazem novos desafios que serão detalhados do decorrer dessa dissertação.

1.1 - Motivação

A presente dissertação partiu da necessidade da PETROBRAS montar uma RSSF em um poço de elevação de petróleo equipado com *Plunger-Lift*, que por sua vez gerou um projeto de pesquisa em conjunto com a UFRN.

A motivação para esse projeto nasceu de alguns incômodos provenientes das conexões elétricas e pneumáticas existentes entre o CLP (Controlador Lógico Programável) e os sensores e atuadores nos poços de petróleo da PETROBRAS.

Gessinger et al. (2005) disse que a grande quantidade de sensores, atuadores, controladores, e supervisórios existentes, principalmente nas indústrias, além da necessidade de conectividade entre eles, têm 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.

Segundo Taylor (2007), um estudo de mercado realizado mundialmente pela *Venture Development Corporation (VDC)*, *Intrinsic Safety Devices: Global Market Assessment*, segunda edição, estimou que em 2006 transferências para dispositivos sem fios intrinsecamente seguros seriam de 271,5 milhões de dólares, e a previsão de aumento dessas transferências em um ritmo de crescimento anual composto (RCAC) seria de 9,8%, chegando a 432,7 milhões de dólares em 2011.

1.2 - Objetivo

O objetivo principal dessa dissertação é desenvolver sistemas embarcados³ para os dispositivos que farão parte da rede de sensores sem fio que será aplicada no *Plunger-Lift*, deixando assim o CLP responsável por monitorar as variáveis físicas (pressão, vazão, entre

³ Sistema microprocessado dedicado ao dispositivo que ele controla.

outros) do mesmo e controlar seus atuadores – fisicamente independente dos instrumentos do poço, o que irá facilitar as eventuais intervenções rotineiras deste.

Como consequência desse trabalho espera-se contribuir com a obtenção de mais informações práticas sobre o comportamento de uma RSSF em equipamentos e ambientes industriais.

1.2.1 - Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são todas as atividades realizadas a fim de alcançar o objetivo principal do trabalho, apresentadas a seguir:

- Pesquisa e compra de equipamentos para desenvolvimento da RSSF;
- Implementação e ajustes da RSSF em laboratório, realizando testes de confiabilidade do sistema;
- Projeto de circuitos eletrônicos para a interface entre os sensores/atuadores e os kits de desenvolvimento;
- Pesquisa e compra de caixas adequadas para áreas classificadas;
- Comunicação Modbus entre a RSSF e o CLP;
- Implementação da RSSF na planta de automação do LAMP (Laboratório de Análise e Medição de Petróleo).

1.3 - Estrutura da dissertação

O capítulo 2 traz a fundamentação teórica adequada para o entendimento dos assuntos que envolvem o desenvolvimento dos sistemas embarcados envolvidos na rede de sensores sem fio em questão. Para isso será visto o funcionamento do método *Plunger-Lift* bem como os sensores e atuadores presentes no mesmo, mostrando também como estão atualmente conectados ao CLP e como esse trabalho pretende modificar essa comunicação. Essa seção apresenta também as normalizações (nacionais e internacionais) sobre os critérios de classificação de áreas que possuem instalações em atmosferas explosivas, enfatizando a classificação em poços com *Plunger-Lift*, onde a rede será aplicada. Outro assunto de extrema importância para o desenvolvimento desse trabalho é o entendimento de tudo que envolve uma rede de sensores sem

fi, suas características, vantagens, desvantagens, o protocolo que será aplicado nessa rede, entre outros.

O capítulo três faz uma análise de trabalhos científicos, que possuem relação direta com o que está sendo proposto nessa dissertação.

O quarto capítulo mostra a metodologia envolvida na implementação dos sistemas embarcados para essa rede, apresentando as características dos componentes que integram todo o sistema, tanto *hardwares* quanto *softwares*.

No capítulo seguinte serão apresentados alguns resultados de testes realizados em laboratório bem como testes realizados em uma planta de avaliação de medições de petróleo, onde podemos obter resultados mais próximos dos esperados em uma unidade de elevação de petróleo.

O último capítulo traz as conclusões obtidas da realização do trabalho levantando algumas considerações do aprendizado envolvido com a implementação da rede, as dificuldades e o que pode ser melhorado em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Aspectos teóricos

Essa seção fará uma explanação nos assuntos que foram importantes para o desenvolvimento desse trabalho e que facilitaram o entendimento dos procedimentos tomados para a montagem da RSSF.

2.1 - Plunger-Lift

Desde o surgimento da indústria petrolífera, 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, esses poços são denominados surgentes. Entretanto, com o passar do tempo e a produção contínua, a pressão decresce e os fluidos presentes em seu interior não conseguem mais elevar-se até a superfície. Quando isto ocorre, faz-se necessário a utilização de métodos de elevação artificiais, onde os mesmos, através do fornecimento de um diferencial de pressão sobre o reservatório, conseguem aumentar a vazão de um poço (Campos, 2006).

Um dos métodos de elevação utilizado é o *Plunger-Lift* que será detalhado no decorrer dessa seção, pois o trabalho realizado por essa dissertação será aplicado nesse método.

Algumas características de vazão de muitos poços de gás e petróleo tornam impossível produzi-los sem algum tipo de elevação artificial. Conforme as taxas de pressão mudam, torna-se necessário considerar as opções para o prosseguimento da produção. Dos muitos tipos de métodos de elevação-artificial disponível, o *Plunger-Lift* é claramente o mais econômico. O problema é que não é apropriado para todos os poços. Existem limitações que proíbem o uso deste tipo de elevação em muitos deles. Limitações como:

- Requer uma Razão Gás Líquido⁴ (RGL) mínima para a operação (normalmente maior que $70 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para cada 300 m de profundidade);
- Requer colunas de produção sem restrições ou interferências;
- Desvios de trajetória e profundidade dos poços são fatores a serem considerados para sua aplicação;

⁴ Razão, em bases volumétricas, entre as quantidades de gás e líquido, onde essas pertencem a uma condição termodinâmica padrão.

- Necessidade de ter um sistema de controle automático para operar;
- Apresentar complexidade na otimização do modo de operação.

O *Plunger-Lift* é um método intermitente que se aplica a poços onde há disponibilidade de gás para elevação (proveniente de uma fonte externa, ou do próprio reservatório), especialmente indicado quando a formação produtora se apresenta depletada (com baixas pressões estáticas). Consiste, basicamente, da instalação de um pistão que trafega livremente na coluna de produção, atuando em cada etapa de subida (ciclo de produção) como uma interface mecânica entre o gás, que irá elevá-lo, e o líquido a ser produzido.

Enquanto o fluido é acumulado no fundo do poço, como pode ser observado na Figura 2.1, a válvula na linha de produção é mantida fechada. A pressão, tanto na coluna de produção quanto no anular, sobe continuamente, pois cada vez mais gás é acumulado nestes espaços. Ao ser atingida certa pressão no anular, a válvula de produção é aberta e a coluna de fluido é produzida pela expansão do gás acumulado no anular. Esse tipo de funcionamento do *Plunger-Lift* é o convencional, que só necessita do gás proveniente do próprio poço (formação), porém existe também o tipo assistido que é utilizado quando o gás proveniente da formação não é suficiente para erguer o fluido, nesse caso abre-se a válvula de injeção de gás até que a pressão interna do poço eleve-se ao necessário (Baruzzi,1994).

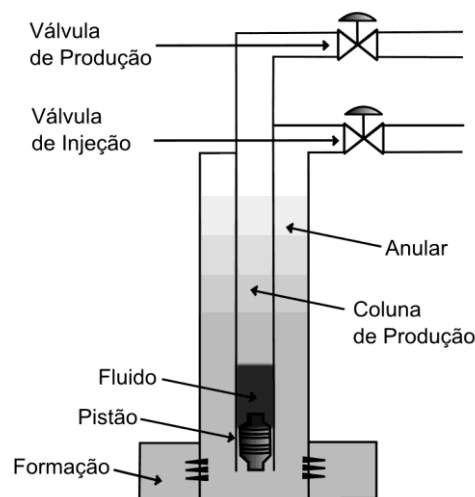


Figura 2.1. Partes de um poço com *Plunger-Lift*.

2.1.1 - Equipamentos

Para um bom entendimento do funcionamento do *Plunger-Lift* serão listados e detalhados a seguir os equipamentos que constituem esse método.

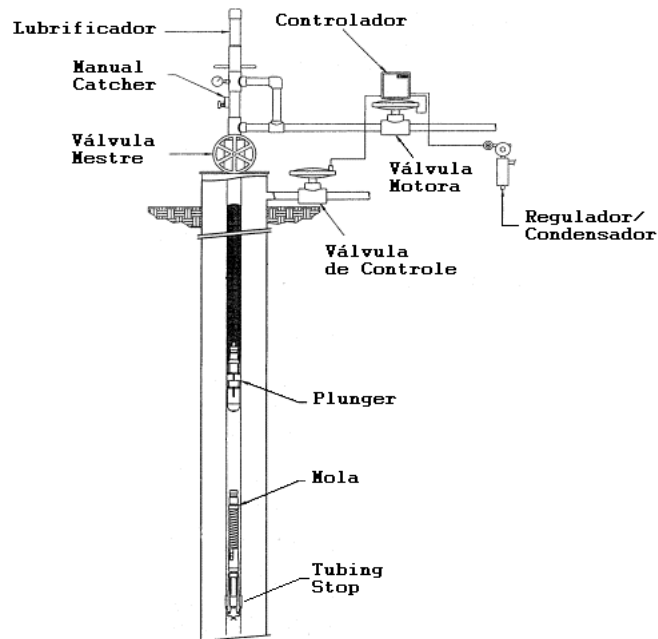


Figura 2.2. Equipamentos em um *Plunger-Lift*.

Na Figura 2.2 podemos observar os seguintes equipamentos:

- Conjunto Tubing-Stop + Mola – Instalado na extremidade inferior da coluna de produção, sua função é de oferecer amortecimento à queda do pistão.
- Pistão – É a parte móvel do sistema e tem a função de agir como interface mecânica entre o gás e o líquido produzido.
- Lubrificador – Instalado no topo da “árvore de natal”⁵, possui internamente uma mola para amortecer os impactos do pistão no final de curso ascendente. A tampa rosca para permitir acesso ao interior da coluna para colocação e retirada do pistão.

⁵ Termo usado na indústria de petróleo que define o conjunto de equipamentos instalados na superfície de um poço de petróleo.

- Manual Catcher – Instalado entre a válvula mestre e a conexão de fluxo, permite sempre que necessário, prender o pistão na superfície no momento de sua chegada, de modo a possibilitar sua retirada para manutenção ou substituição.
- Válvula Motora – Tipo ON-OFF, instalada na linha de produção, tem por função a abertura e o fechamento cíclico de poço, possibilitando assim a movimentação do pistão no interior da coluna de produção.
- Válvula de controle – Instalado com atuador pneumático e conversor I/P (Corrente/Pressão), possibilita a regulação da RGL total necessária para o melhor desempenho do sistema.
- Controlador – Tem a função de gerenciar a abertura e o fechamento da válvula de produção, o controle da válvula de injeção de gás na superfície, a aquisição de dados do poço, a comunicação com sistemas supervisores, entre outros.

Além dos equipamentos citados acima, que atuam sobre o processo, encontra-se também no poço com *Plunger-Lift*, instrumentos de medição que inferem certos parâmetros como pressão e vazão para que se possa obter uma produção ótima a partir de um controle otimizado. Os principais sensores presentes em um *Plunger-Lift* são:

- Sensor de presença – Instalado entre a válvula mestra e a linha de produção, tem a função de detectar a chegada do pistão à superfície de modo que quando o pistão passa por ele, um sinal é enviado ao controlador.
- Sensores de pressão – Situados na cabeça do poço (Pcab), na linha de produção, também conhecida como linha de surgência (Pls) e na coluna de revestimento (Prev).
- Sensor de vazão – Situado na linha de injeção de gás, informa a quantidade de gás que esta sendo injetado no *Plunger-Lift* assistido.

2.1.2 - Etapas do *Plunger-Lift*

O processo de produção do método *Plunger-Lift* subdivide-se, basicamente, em quatro etapas, controladas pelo CLP por meio, principalmente, da determinação da abertura e o fechamento da válvula na linha de produção. As etapas são as seguintes:

- *Buildup* - Nesta etapa, vista na Figura 2.3, a válvula pneumática (válvula motora) está fechada, isolando a pressão atmosférica da superfície da pressão do espaço anular. A formação

começa a produzir gás e óleo; como o gás é menos denso que o óleo, ele acumula-se dentro do espaço anular, forçando o óleo a entrar na coluna de produção.

- *Upstroke* - Após um período de tempo determinado empiricamente, quando a pressão de revestimento na cabeça do poço é considerada adequada, a válvula motora, então, é aberta, expandindo o gás dentro do espaço anular fornecendo energia necessária à subida do conjunto - Pistão, fluido (óleo e água) e gás. Na subida desse pistão, devido à sua expansão, ele carrega parafinas que estão incrustadas na coluna de produção e impede que haja um processo denominado *fallback*, ou seja, impede que o fluido desça para o fundo do poço.

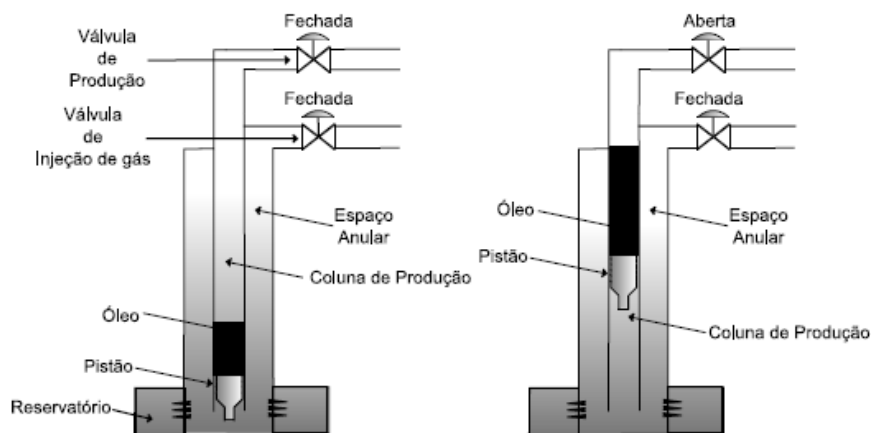


Figura 2.3. Etapas de *buildup* (a esquerda) e *upstroke* (a direita) do processo de produção no método *Plunger-Lift*.

- *Afterflow* - Período em que a linha de produção é mantida aberta, após o pistão alcançar a superfície. Decorrido este período, a válvula motora é fechada.

- *Downstroke* - Com o fechamento da válvula, o pistão cai ao fundo do poço iniciando, assim, um novo ciclo (*Buildup*). Etapas mostradas na Figura 2.4.

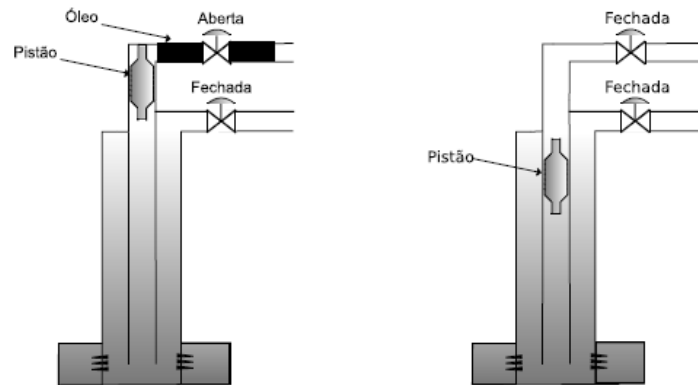


Figura 2.4. Etapas de *afterflow* (a esquerda) e *downstroke* (a direita) do processo de produção no método *Plunger-Lift*.

2.1.3 - Layout da instrumentação na superfície de um poço com *Plunger-Lift*

Estando a par do processo e instrumentos envolvidos na extração de petróleo utilizando o método de elevação *Plunger-Lift*, pode-se melhor compreender o objetivo dessa dissertação que se destina a tornar os instrumentos e sensores do poço, independentes fisicamente do controlador, que se trata de um CLP, situado nas proximidades do poço.

Na Figura 2.5 pode-se observar a configuração física para a comunicação entre os instrumentos de um *Plunger-Lift* e o seu CLP que por sua vez está situado na Unidade Remota (UR) juntamente com um rádio (UHF) – que se comunica com a sala de monitoramento – e um conjunto de baterias e célula solar para energizar os equipamentos da UR.

Logo abaixo da UR, ainda na Figura 2.5, encontram-se, em amarelo, os sensores de pressão (PT), uma válvula solenóide (S) e um conversor corrente-pressão (I-P). Utilizando tubos capilares de inox com 10 mm de diâmetro, os PTs verificam as pressões dos seus referidos pontos, a válvula solenóide libera a passagem de gás – quando comandada pelo CLP – para o atuador da válvula pneumática ON/OFF na linha de produção e o conversor libera a passagem de gás para a válvula de controle na linha de injeção de gás, porém a quantidade do gás liberado será proporcional a corrente elétrica injetada no conversor pelo CLP. A Figura 2.6 mostra fotos da disposição dos instrumentos e suas conexões junto a Unidade Remota.

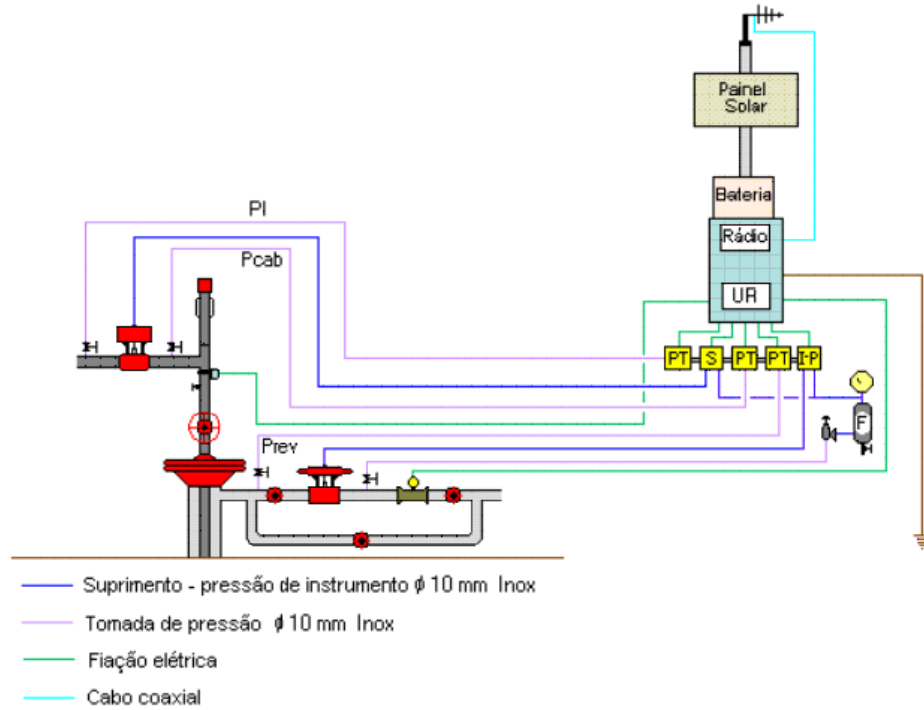


Figura 2.5. Comunicação física entre os instrumentos e o CLP de um *Plunger-Lift*.



Figura 2.6. Fotos da Unidade Remota e os instrumentos conectados a mesma.

Após as modificações propostas para a RSSF teremos o CLP fisicamente independente do poço, como mostrado na Figura 2.7, facilitando as intervenções para manutenção que ocorrem regularmente no local.

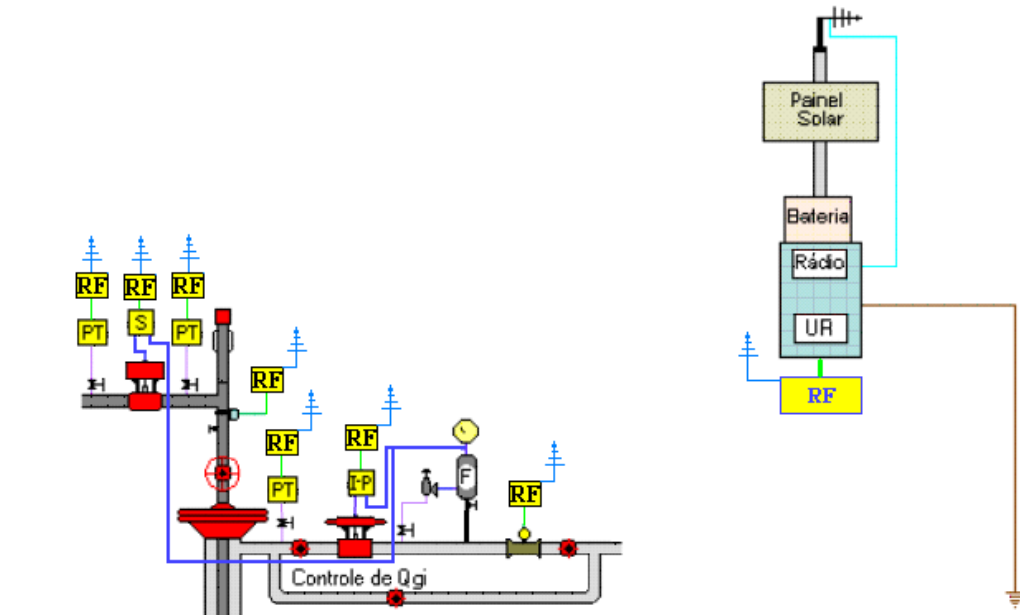


Figura 2.7. Nova disposição dos equipamentos do *Plunger-Lift* com a RSSF.

2.2 - Áreas classificadas

As instalações dos poços de extração de petróleo em geral apresentam a existência de áreas classificadas e, portanto necessitam possuir um plano de classificação de áreas, de forma a mapear as extensões das áreas que apresentam o risco devido a possibilidade de existência de misturas potencialmente explosivas.

Segundo Bega et al. (2006), devido as responsabilidades envolvidas e às graves conseqüências de um eventual acidente, todas as etapas e atividades relacionadas com este tipo de instalação de equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação em áreas classificadas, devem ser acompanhadas por uma gestão de risco. Desde os estudos de classificação de áreas, passando pela especificação dos equipamentos e o projeto de instalação, incluindo os serviços rotineiros de inspeção, manutenção e reparos, devem ser realizadas por pessoal treinado e qualificado, e em total concordância com as normas técnicas e legislações aplicáveis.

A seguir serão apresentadas as principais normas técnicas aplicáveis a instalações em atmosferas explosivas. A partir do domínio do assunto será possível adquirir as caixas mais adequadas para a RSSF aplicada nessa dissertação.

2.2.1 - Normalização internacional – IEC

A IEC (International Electrotechnical Commission) é a principal organização global que prepara e publica normas internacionais para todos os equipamentos elétricos, eletrônicos e tecnologias correlatas. Estas normas servem de base para normalizações nacionais bem como referências na elaboração de contratos e propostas internacionais.

As normas da IEC representam o núcleo dos acordos da OMC/WTO (Organização Mundial de Comercio/*World Trade Organization*) nas Barreiras Técnicas para o Comércio (TBT – Technical Barriers to Trade). Sobre tais acordos, mais de 100 governos de países membros explicitamente reconhecem que as normas internacionais IEC agem como um papel chave para o incremento da eficiência industrial e para o desenvolvimento do mercado mundial. A quantidade de organismos de normalização (total de 119, em 2002), que têm aceitado o Código de Boas Práticas para a preparação, adoção e aplicação de Normas ISO/IEC, ressalta a importância e o alcance deste acordo. O Brasil é representado pelo INMETRO neste TBT/WTO – Comitê sobre Barreiras Técnicas para o Comércio da OMC (Bega et al., 2006).

2.2.1.1 - Comitê Técnico TC-31 da IEC

O Comitê Técnico TC-31 da IEC – Equipamentos para Atmosferas Explosivas (*Equipment for Explosive Atmospheres*), foi fundado em julho de 1948 e tem o objetivo de preparar e manter as normas internacionais referentes aos equipamentos para utilização onde existe o risco devido à possibilidade da presença de atmosferas explosivas de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis. No Brasil existe um Subcomitê da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas que segue o TC-31 da IEC, e será citado a seguir (Bega et al., 2006).

2.2.2 - Normalização brasileira – ABNT

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, fundada em 1940, é o órgão responsável pela normalização técnica no país. É uma entidade privada sem fins lucrativos, reconhecida como único Fórum Nacional de Normalização através da Resolução nº07 do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – CONMETRO, de 24/08/1992.

A ABNT é a única e exclusiva representante da IEC no Brasil e possui os seguintes objetivos:

- Economia – Proporcionar a redução da crescente variedade de produtos e procedimentos;
- Comunicação – Proporcionar meios mais eficientes na troca de informação entre o fabricante e o cliente, melhorando a confiabilidade das relações comerciais e de serviços;
- Segurança – Proteger a vida humana e a saúde;
- Proteção do consumidor – Prover a sociedade de meios eficazes para aferir a qualidade dos produtos;
- Eliminação de barreiras técnicas e comerciais – Evitar a existência de regulamentos conflitantes sobre produtos e serviços em diferentes países, facilitando assim, o intercâmbio comercial.

A estrutura organizacional da ABNT está demonstrada na Figura 2.8, onde o Conselho Técnico é o órgão colegiado pelos superintendentes dos Comitês Brasileiros (CB), com as atribuições previstas no estatuto.

Cada comitê (45 ao todo) é responsável pela normalização de uma área específica. O CB-03, por exemplo, atua no campo da eletricidade, eletrônica e telecomunicações compreendendo geração, transmissão e distribuição de energia; instalações elétricas e equipamentos eletro-eletrônicos, inclusive para atmosferas explosivas; dispositivos e acessórios elétricos; instrumentação; bens de consumo; condutores elétricos; iluminação; compatibilidade eletromagnética, no que concerne a terminologia, requisitos, métodos de ensaio e generalidades (Bega et al., 2006).

O CB-03 é gerenciado pelo COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Telecomunicações e Iluminação, que se trata de uma sociedade civil de direito privado, sem fins

lucrativos, com a missão de mobilizar empresas e entidades do complexo eletroeletrônico e afins, visando apoiar as atividades de normalização do setor no país.

Esse comitê, por sua vez, possui um Subcomitê denominado SB-31 com a missão de elaborar e manter as normas brasileiras referentes aos equipamentos e instalações onde exista o risco devido à presença de atmosferas explosivas de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis. Normas estas baseadas em texto consensados pelos integrantes do grupo, no formato ABNT / NBR – IEC e baseada na respectiva norma IEC, sem desvios, seguindo os trabalhos efetuados pelo TC-31 (Bega et al., 2006).

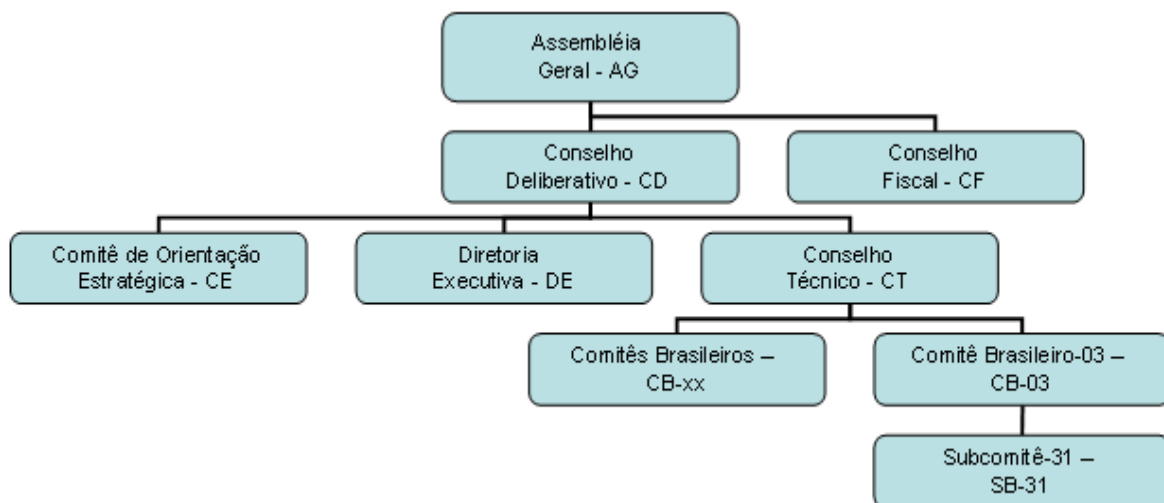


Figura 2.8. Organograma da ABNT.

2.2.2.1 - Classificação de áreas

A classificação de áreas é um método de análise e do ambiente onde possa existir uma atmosfera explosiva, de modo a facilitar a seleção adequada e instalação de equipamentos a serem usados com segurança em tais ambientes, levando em conta os grupos de gás, assim como as respectivas classes de temperatura.

A classificação das áreas perigosas é feita usando o conceito de:

- Zonas – usadas para definir a probabilidade da presença de materiais inflamáveis;
- Tipos de Proteção – que denota o nível de segurança para um dispositivo;

- Grupos – que caracterizam a natureza inflamável do material.
- Temperaturas – máxima temperatura de superfície de um equipamento elétrico.

2.2.2.1.1 - Zonas

A determinação dos tipos de zonas das áreas classificadas é baseada na frequência ou na probabilidade estatística de ocorrência e duração de uma atmosfera explosiva na área de processo considerada no estudo.

- Zona 0 – área na qual uma atmosfera explosiva de gás consistindo de uma mistura com ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa continuamente presente ou por longos períodos ou frequentemente.
- Zona 1- área na qual uma atmosfera explosiva de gás consistindo de uma mistura com ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa que pode ocorrer ocasionalmente em condições normais de operação.
- Zona 2 - área na qual uma atmosfera explosiva de gás consistindo de uma mistura com ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa que não é previsto ocorrer em condições normais de operação, mas, se ocorrer, irá persistir somente por um curto período (Bega et al., 2006).

2.2.2.1.2 - Tipos de proteção

Os tipos de proteção e suas simbologias estão listados na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1. Tipos de proteção.

Tipo de proteção	Simbologia
Equipamento à Prova de Explosão	Ex d
Equipamento Pressurizado	Ex p
Equipamento Imerso em Óleo	Ex o
Equipamento Imerso em Areia	Ex q
Equipamento Imerso em Resina	Ex m
Equipamento de Segurança Aumentada	Ex e
Equipamento Não Acendível	Ex n
Equipamento Hermético	Ex h
Equipamento de Segurança Intrínseca	Ex i
Equipamento Especial	Ex s

2.2.2.1.3 - Grupos

A determinação do grupo é feita em função dos gases explosivos presentes no ambiente, sendo subdividido em Grupo I e Grupo II.

- Grupo I – Instalações subterrâneas, como nas minas de carvão, onde se encontra basicamente a presença do gás metano.
- Grupo II – Instalações de superfície, sendo subdividido em Grupo IIA, IIB e IIC, de acordo com o gás representativo do local da instalação.
 - Grupo IIA: Propano.
 - Grupo IIB: Etano.
 - Grupo IIC: Hidrogênio (Bega et al., 2006).

2.2.2.1.4 - Temperaturas

A mais baixa temperatura de ignição das superfícies explosivas que possam dar origem a atmosfera explosiva, deve ser superior à temperatura máxima de superfície dos equipamentos elétricos a serem instalados nesta área, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Classificação das temperaturas máximas de superfície para equipamentos elétricos do Grupo II.

Classe de Temperatura	Máxima temperatura de superfície do equipamento elétrico
T1	450°C
T2	300°C
T3	200°C
T4	135°C
T5	100°C
T6	85°C

2.2.3 - Classificação de área em um poço com *Plunger-Lift*

Com base no que foi exposto com relação às normas e as formas de classificação de áreas para ambientes potencialmente explosivos, pode-se determinar a classificação destinada ao poço que utiliza o método de elevação *Plunger-Lift*.

Também foi utilizado como consulta o plano interno de classificação de áreas para instalações elétricas em regiões de perfuração e produção da PETROBRAS que segue, obrigatoriamente, as normas da ABNT utilizando-as em ambientes específicos.

Pôde-se observar que para um poço de elevação de petróleo utilizando o *Plunger-Lift*, as partes que estarão delimitadas como trabalhando em uma região classificada como Zona 1 serão os atuadores das válvulas pneumáticas e o condensador, onde essa região possuirá uma delimitação de raio de 0,45 metros e ao seu redor a área de raio 0,90 metros será considerada região de Zona 2, como mostrado na Figura 2.9.

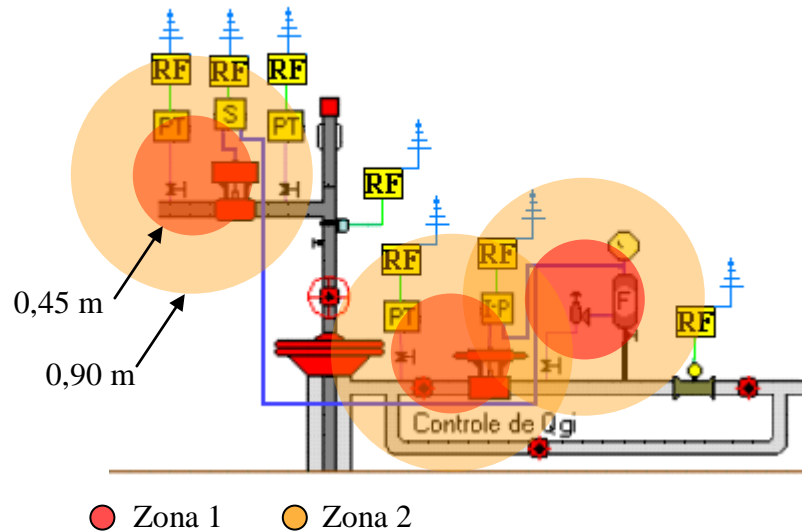


Figura 2.9. Classificação de área do *Plunger-Lift*.

2.3 - RSSF utilizando o padrão IEEE 802.15.4/ZigBee

De acordo com a documentação do IEEE 802.15.4, 2003, redes WPAN de baixa taxa de transferência de dados (*Low Rate – Wireless Personal Area Network – LR-WPAN*), são redes sem fio de curta distância, construídas com dispositivos pequenos, operando com baterias, baixa complexidade de implementação, consumo ultra baixo de energia, e baixa taxa de transmissão, sendo assim o padrão ideal a ser utilizado em uma RSSF. Sendo portanto, apropriado na aplicação a que se destina essa dissertação, pois segundo Malafaya et al. (2005) 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, atuadores em geral), 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.

Essa seção mostrará as características do padrão IEEE 802.15.4, bem como, as do protocolo de comunicação escolhido para essa RSSF, conhecido como ZigBee. Mostrando também o que há no mercado atual para as RSSF industriais, mais especificamente para o setor de Petróleo e Gás (P&G).

2.3.1 - O padrão IEEE 802.15.4

O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE) finalizou o padrão IEEE 802.15.4 em outubro de 2003. O padrão cobre as camadas Física (*PHY*) e de Controle Acesso ao Meio (*MAC*), do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), em uma rede WPAN de baixa taxa de transferência de dados. Muitas pessoas confundem esse padrão com o ZigBee, um protocolo desenvolvido pela ZigBee Alliance. O ZigBee utiliza os serviços oferecidos pelo IEEE 802.15.4 e adiciona os de rede, segurança, aplicação, entre outros (Willig & Karl, 2005). O mesmo será detalhado mais à frente nessa seção.

Algumas das características, apresentadas na documentação do IEEE 802.15.4, 2007 (revisão), de uma LR-WPAN utilizando o padrão IEEE 802.15.4:

- Taxa de transmissão de dados de 250 kbps, 100 kbps, 40 kbps e 20 kbps;
- Topologia estrela e ponto-a-ponto;
- Endereçamentos de 16 bits ou 64 bits;
- Alocação de *slots* garantidos no tempo (*Guaranteed Time Slots – GTS*);
- Acesso ao canal implementado com *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA)*;
- Baixo consumo de energia, (após a transmissão, os dispositivos entram em stand-by reduzindo, assim, o consumo de energia);
- Detecção de energia (*ED – Energy Detection*);
- Indicação da qualidade da conexão (*Link Quality Indication – LQI*);
- 16 canais na banda de 2,4 Ghz, 30 na banda de 915 Mhz e 3 na banda de 868 Mhz (revisão 2006), 16 canais em 3 bandas *UWB* (3 a 5 Ghz, 6 a 10 Ghz e menos de 1 Ghz) e 14 canais operando em *Chirp Spread Spectrum (CSS)* a 2,4 Ghz.

2.3.1.1 - Dispositivos da rede LR-WPAN

Existem dois diferentes tipos de dispositivos que podem participar em uma rede IEEE 802.15.4; o com todas as funções disponíveis (*FFD – Full-Function Device*) e o dispositivo com funções reduzidas disponíveis (*RFD – Reduced-Function Device*). O FFD pode operar em três modos servindo como coordenador de uma rede de área pessoal (*PAN*), um simples coordenador, ou um dispositivo final. Um FFD pode falar com RFDs ou outros FFDs, enquanto um RFD pode

falar com apenas um FFD. Um RFD é destinado a aplicações extremamente simples, como ligar e desligar uma lâmpada, pois esse tipo de aplicação não tem a necessidade de enviar grandes quantidades de dados e só poderão se associar com um único FFD por vez. Conseqüentemente, o RFD pode ser implementado utilizando poucos recursos e capacidade de memória.

2.3.1.2 - Topologias da rede LR-WPAN

Segundo a documentação do padrão IEEE 802.15.4, dependendo do tipo de aplicação, o padrão LR-WPAN pode operar em duas topologias: estrela e ponto-a-ponto. Elas são mostradas na Figura 2.10.

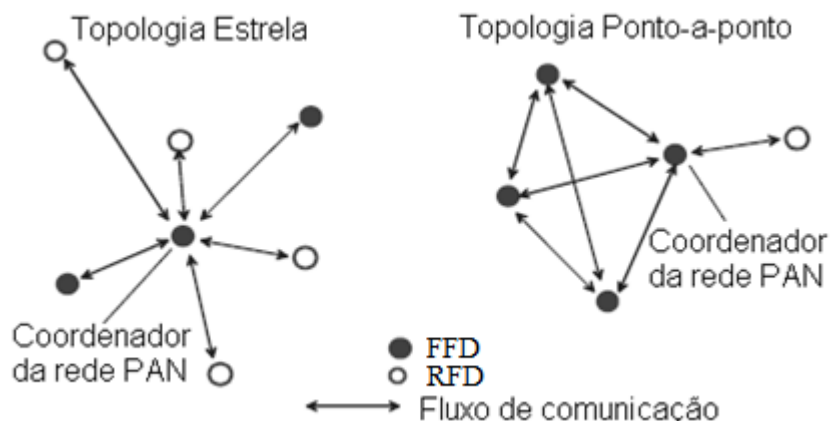


Figura 2.10. Topologias do padrão IEEE 802.15.4

2.3.1.2.1 - Topologia estrela

Conforme visto na Figura 2.10, depois de um FFD ser ativado, ele estabelece sua própria rede e se torna um coordenador da rede PAN. A topologia estrela opera independentemente de todas as outras topologias estrelas que estejam em operação ao seu redor. Isto ocorre pela escolha de um identificador da rede PAN que não esteja sendo atualmente utilizado por nenhuma outra rede de mesma topologia, no raio de abrangência da mesma. Uma vez que o identificador PAN é escolhido, o coordenador da rede PAN permite que outros dispositivos façam parte desta rede, aos quais poderemos chamar de escravos, e que podem ser tanto FFDs quanto RFDs (IEEE 802.15.4, 2003).

2.3.1.2.2 - Topologia ponto-a-ponto

Na topologia ponto-a-ponto, cada dispositivo é capaz de comunicar-se uns com os outros dentro do raio de abrangência da rede. Um dispositivo é nomeado como coordenador da rede PAN, em virtude de ser o primeiro dispositivo a comunicar-se no canal (IEEE 802.15.4, 2003).

2.3.1.2.3 - Topologia *cluster tree*

A topologia de rede *cluster tree* é derivada da comunicação ponto-a-ponto. Na rede *cluster tree* vários dispositivos são FFDs. Um RFD conecta-se a rede como um dispositivo escravo, no fim do ramo, pois os RFDs não permitem outros dispositivos se associarem a ele. Qualquer um dos FFDs pode agir como um coordenador e prover serviços de sincronização com outros dispositivos ou outros coordenadores. Apenas um desses coordenadores pode ser o coordenador da rede PAN principal, o qual tem mais recursos computacionais do que qualquer outro dispositivo desta rede. O coordenador da rede PAN forma o primeiro *cluster* através da escolha de um identificador da rede que não esteja sendo usado e propaga quadros de *beacon* (sinalização) aos dispositivos vizinhos. Um mecanismo de contenção é requerido se dois ou mais FFDs simultaneamente desejarem ser, eles mesmos, os coordenadores da rede PAN. Um dispositivo candidato recebendo um quadro de *beacon* pode desejar se associar a esta rede. Se o coordenador da rede PAN permitir, ele adiciona o novo dispositivo como dispositivo filho na lista de vizinhos. Então, o novo dispositivo, adiciona o coordenador da rede com seu pai na lista de vizinhos e começa a transmitir *beacons* periódicos; outros dispositivos candidatos podem, então, se associarem a rede através daquele dispositivo. Se o dispositivo candidato original não estiver disponível a se associar à rede através do coordenador, ele procurará por outro dispositivo pai.

Essa topologia permite a criação de malhas de redes *cluster tree*. Uma vez que os requerimentos da rede para determinada aplicação são conhecidos, o primeiro coordenador irá instruir um dispositivo a se tornar o coordenador de um novo *cluster* adjacente ao primeiro. Outros dispositivos gradualmente se conectarão e formarão uma estrutura de rede *multicluster*, conforme visto na Figura 2.11. As linhas da figura representam os relacionamentos pai-filho dos dispositivos e não o fluxo de comunicação. A vantagem da estrutura *multicluster* é o aumento

substantial da área de cobertura, enquanto sua desvantagem é o incremento do tempo de latência na rede.

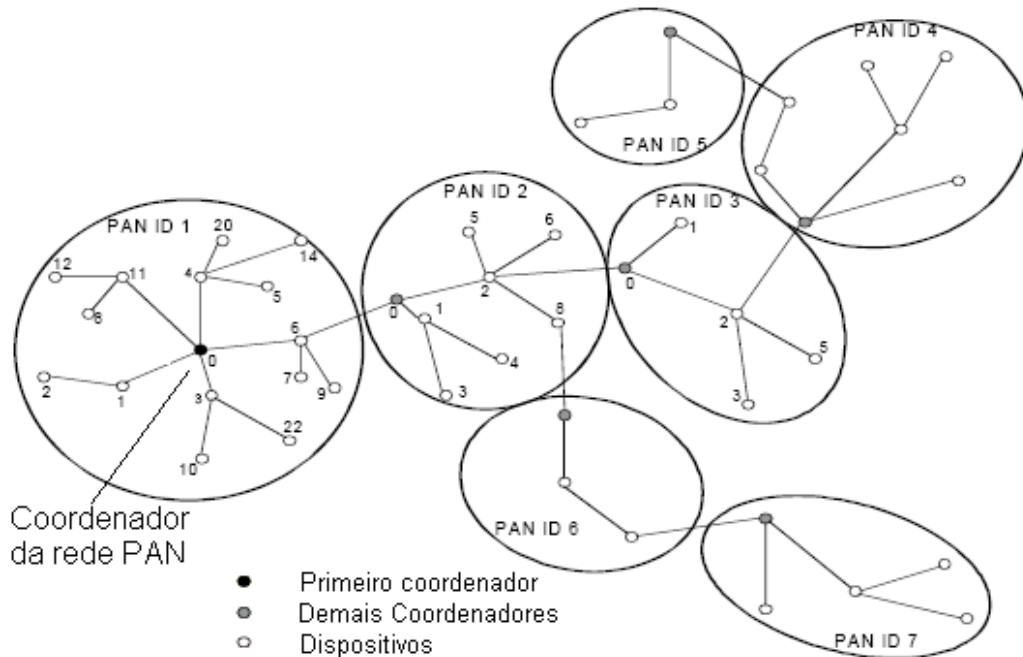


Figura 2.11. Topologia de rede *cluster tree*

2.3.1.3 - Mecanismo de controle de acesso ao meio físico

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 outras 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 (Campos, 2006).

2.3.2 - O protocolo de rede ZigBee

Em dezembro de 2004 foi definido o padrão ZigBee por uma aliança de empresas de diferentes segmentos do mercado chamada "ZigBee Alliance". Este protocolo foi projetado para permitir comunicação sem fio confiável com baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão para aplicações de monitoramento e controle. Para implementar as camadas MAC (Medium Access Control) e PHY (Physical Layer) o ZigBee utiliza a definição 802.15.4 do IEEE que opera em bandas de frequências livres, como visto em tópicos anteriores. Os rádios IEEE 802.15.4 operam nas faixas de frequência de 868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos e 2.4 GHz nos outros lugares do mundo (dos Santos, 2007).

Capítulo 3

Estado da arte

Existe uma grande quantidade de trabalhos relacionados à rede de sensores sem fio os quais muitos são voltados à indústria. Os seguintes se destacaram:

Campos (2006), em “Estudo e Especificação de um Sistema de Instrumentação para Unidades de Elevação de Petróleo Utilizando Tecnologia sem Fio”, propôs a criação de um sistema de instrumentação utilizando tecnologia sem fio, com o desenvolvimento de um software baseado no protocolo *Freescall* SMAC (IEEE 802.15.4) aplicado ao monitoramento de variáveis analógicas e/ou digitais de unidades de elevação de petróleo e gás natural, mais particularmente, o método de Bombeio Mecânico. Para avaliar o enlace de comunicação com relação a quantidade de pacotes perdidos em diferentes ambientes (ambientes internos (Indoor) e externos (Outdoor)), foi montado um protótipo composto por duas placas da Freescale chamadas, respectivamente, de placa mestre e placa escrava, em topologia e comunicação ponto-a-ponto. A placa escrava era responsável por enviar à placa mestre as informações provenientes da leitura dos sensores de carga e posição e a placa mestre recebia essas informações e as enviava para um supervisor desenvolvido em software Labview. Os resultados apresentados foram considerados satisfatórios, visto que o objetivo era 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 de locais 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.

Oliveira (2009), em “Desenvolvimento de um Software de Comunicação sem Fio Aplicado à Instrumentação de Unidade de Elevação de Petróleo Tipo *Plunger-Lift*”, desenvolveu um software aplicado a um sistema de comunicação de uma RSSF, para monitoramento de variáveis analógicas, digitais e comando de válvulas de passagem do fluxo de gás em unidades de elevação artificial de petróleo e gás natural do tipo *Plunger-Lift*. Foi utilizado o método de comunicação *polling*, através do protocolo *SMAC* (padrão IEEE 802.15.4), no ambiente *CodeWarrior*, ao qual gerou um *firmware*, carregado nas placas de monitoramento da RSSF, presentes no kit MC13193-EVK, (todos os itens descritos acima são proprietários da *Freescall Semiconductors Inc.*). O monitoramento e parametrização da rede utilizou uma aplicação, desenvolvida no software *LabVIEW*, da *National Instruments*.

Yanfei et al. (2009), em “*Research on ZigBee Wireless Sensors Network Based on ModBus Protocol*”, apresentam uma rede de sensores sem fio utilizando o protocolo ZigBee e monitorando, em tempo real, as informações dessa rede por meio do protocolo Modbus. O artigo mostra as vantagens e desvantagens de se utilizar o Modbus para o monitoramento de uma rede ZigBee e mostra também que é totalmente viável a utilização dessa rede no sistema de monitoramento proposto no mesmo.

Petersen e. al. (2007), em “*Requirements, Drivers and Analysis of Wireless Sensor Network Solutions for the Oil & Gas Industry*”, realizaram uma análise das RSSF, e a sua aplicação na indústria de petróleo e gás natural, estudando os benefícios do sensoriamento remoto (eliminação de cabos, comunicabilidade em ambientes hostis, e expansibilidade da rede). Conceitos relacionados ao consumo de energia dos dispositivos, bem como padronização da RSSF foram estudados e considerados primordiais para sua implementação. Experimentos foram feitos para determinar a eficiência das RSSF baseadas no IEEE 802.15.4 e onde as RSSF deste padrão não poderiam ser utilizadas. A conclusão do estudo é a recomendação de uma topologia aberta, com tratamento eficiente de energia entre os dispositivos, padronização da RSSF para que, desta forma, ela possa ser aplicada na indústria de petróleo e gás.

Capítulo 4

Metodologia Experimental

Para o desenvolvimento da RSSF que interligará os sensores, atuadores e o CLP de um poço de petróleo, equipado com *Plunger-Lift*, foi utilizado o protocolo de comunicação ZigBee.

Nesta seção serão detalhados os equipamentos utilizados na implementação desses sistemas, mostrando suas principais características bem como os circuitos necessários para o funcionamento desses. Também serão mostradas as principais características da comunicação sem-fio para um melhor entendimento do desenvolvimento de cada sistema embarcado dessa rede.

4.1 - Estrutura

Os sistemas embarcados para comunicação sem-fio desenvolvidos nesse trabalho são compostos por: um sensor/atuador ou CLP; um módulo de comunicação, que realiza a troca e o gerenciamento das informações da rede; e uma estrutura de fornecimento de energia composto por baterias, controlador de carga e painel solar. As partes principais do sistema desenvolvido estão demonstradas na Figura 4.1.

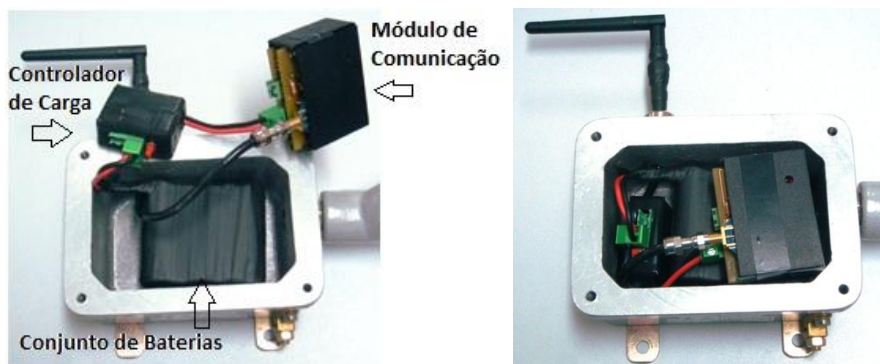


Figura 4.1. Partes principais dos sistemas embarcados.

Essa estrutura fica confinada em uma caixa a prova de explosão para instalações em áreas classificadas. Na Figura 4.2 é ilustrado um diagrama de blocos que demonstra a estrutura dos sistemas.

Integrado a essa estrutura física encontra-se o *software* embarcado no microcontrolador (*firmware*) que será responsável por gerenciar as informações da rede, tratar as leituras analógicas e digitais e comandar o acionamento de atuadores.

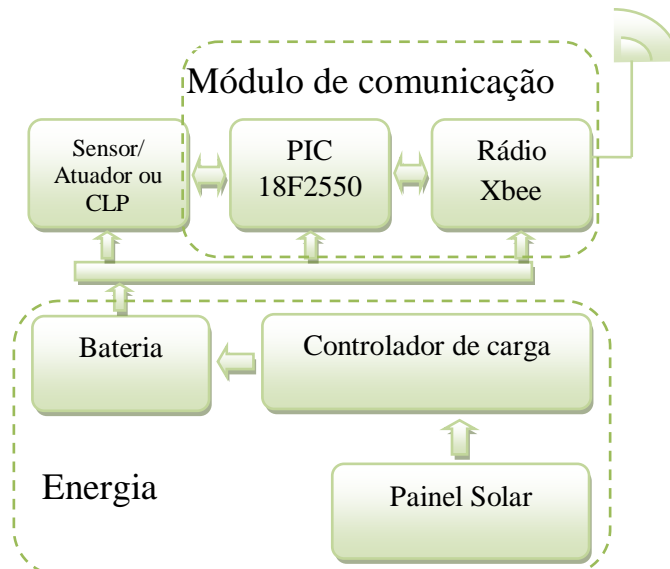


Figura 4.2. Diagrama de blocos dos sistemas.

4.2 - A RSSF *Plunger-Lift*

A comunicação entre o CLP do poço e seus sensores e atuadores se dará por sistemas embarcados desenvolvidos nesse trabalho ilustrados na Figura 4.3 representados por quadrados amarelos identificados com a sigla “RF”.

Na RSSF *Plunger-Lift*, a comunicação entre os sensores e o coordenador da rede será feita por meio do protocolo ZigBee incorporado no Xbee adquirido para esse experimento. Já a comunicação entre o coordenador e o CLP será por meio do protocolo Modbus, facilitando assim a adaptação dessa rede para qualquer CLP que utilize o Modbus.

Uma das vantagens desses sistemas embarcados desenvolvidos é a opção de redução do seu consumo de energia colocando-o em estado de hibernação. Como cada sistema será alimentado por bateria, sendo recarregada com a utilização de painel solar, o consumo dos mesmos deverá ser o mínimo possível para que a bateria suporte o máximo de ocorrências seguidas sem sol. Com isso, as transmissões de dados de cada sistema ocorrerão em um período

determinado previamente pelo CLP para que durante o momento em que o mesmo não tiver transmitindo ele entre no estado de hibernação.

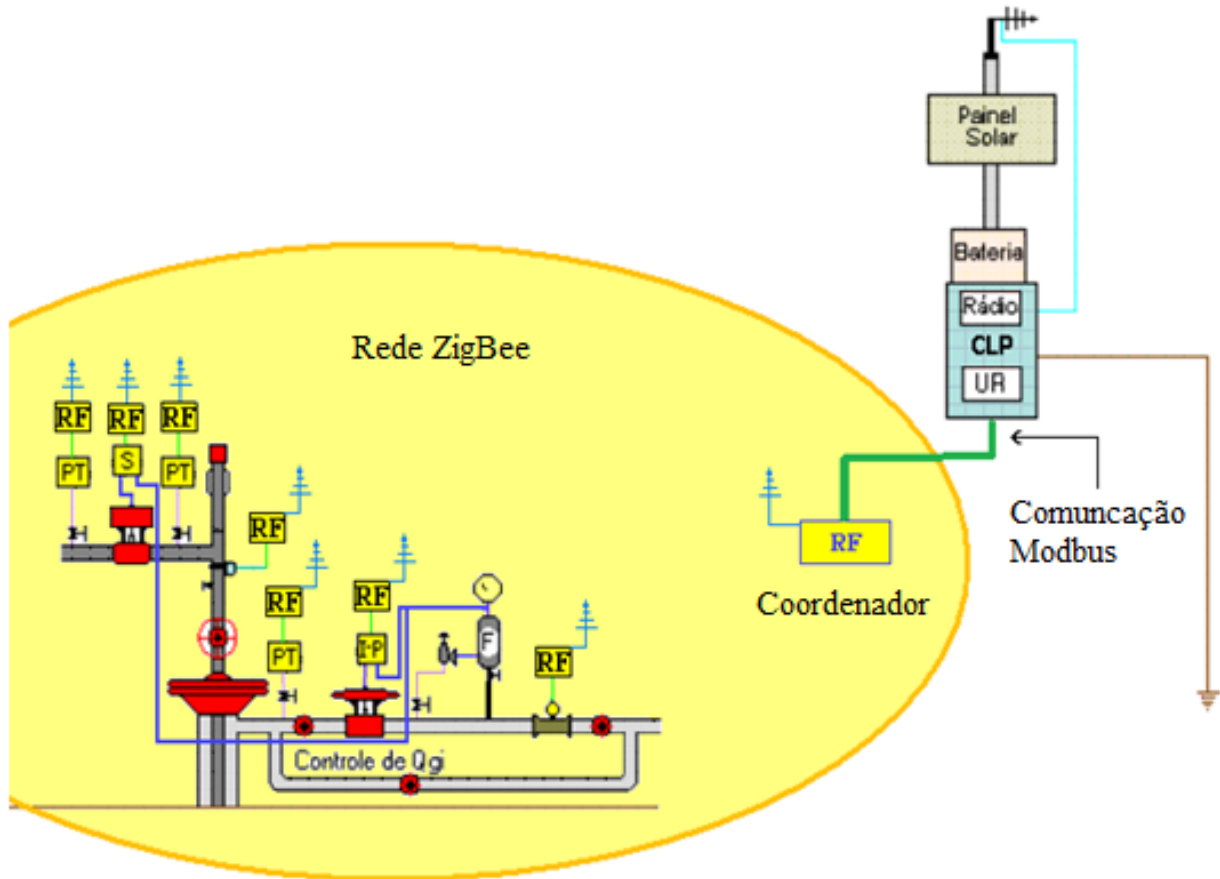


Figura 4.3. RSSF Plunger-Lift.

De acordo com as características da dinâmica do poço foi verificado que um período de latência de até 5 segundos para cada transmissão das informações dos sensores e atuadores, não afetaria o controle do mesmo. Então inicialmente foi fixado o intervalo de 5 segundos para cada transmissão, ou seja, todos os sistemas embarcados passaram 5 segundos em hibernação e terão mais 1 segundo para transmitir suas informações para o coordenador da rede, que por sua vez irá organizar essas informações em uma lista que será lida pelo CLP a todo instante.

4.3 – Hardwares

4.3.1 - Kit de desenvolvimento MC13192

Inicialmente foi adquirido um kit de desenvolvimento da Freescale para a realização de testes para observar viabilidade de se utilizar a tecnologia que o fabricante oferece, na Figura 4.4 é ilustrada uma placa de desenvolvimento desse kit. O mesmo oferece o *Simple Media Access Controller* (SMAC), que se trata de um conjunto de primitivas (funções) para facilitar o desenvolvimento de uma rede sem fio utilizando o transceiver da Freescale com o padrão IEEE 802.15.4.



Figura 4.4. Placa de desenvolvimento da freescale.


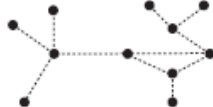
A rede foi implementada utilizando-se o protocolo de comunicação *Pooling* (Oliveira, 2009).

A implementação dessa rede obteve sucesso, todavia, algumas desvantagens foram encontradas, como:

- Limitação da rede em 256 dispositivos: a ideia é que a partir desse projeto seja possível interligar as redes dos poços, utilizando a topologia mesh;
- Tamanho das placas de desenvolvimento: por serem placas fabricadas para testes, possuem dimensões maiores do que aquelas feitas para aplicações dedicadas;
- Dificil acessibilidade no mercado local: foi tentado acordo com o fabricante para o desenvolvimento de placas para aplicações dedicadas, sem sucesso;
- Custo relativamente elevado: o preço de um Kit de desenvolvimento que possui três placas de comunicação equivale a compra de, aproximadamente sete módulos de comunicação XBee Série 2, do fabricante Digi International.

O módulo XBee Série 1 também utilizava a tecnologia fornecida pelo fabricante Freescale e passou para o fabricante Ember no módulo da Série 2, utilizando neste o protocolo ZigBee. Na Tabela 4.1 observa-se um comparativo feito pela Digi International, das séries 1 e 2 dos módulos Xbee.

Tabela 4.1. Comparativos entre tecnologias para RSSF.

Product Selection Guide	Series 1		Series 2	
Silicon	Freescale		Ember	
Firmware	802.15.4		ZigBee	
Network Topologies	Point-to-point, peer-to-peer, point-to-multipoint (star)		Mesh	
	XBee™ (Series 1)	XBee-PRO™ (Series 1)	XBee™ (Series 2)	XBee-PRO™ (Series 2)*
Indoor/Urban range	100 ft (30 m)	300 ft (90 m)	133 ft (40 m)	n/a
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	300 ft (90 m)	1 mi (1.6 km)	400 ft (120 m)	n/a
	 <p>802.15.4 – Star</p>		 <p>ZigBee – Mesh</p>	

4.3.2 - Módulos XBee©

Os módulos RF (Rádio Frequência) escolhidos para a implementação da RSSF foram o XBEE OEM RF Serie 2 e o XBEE-PRO OEM RF Serie 2, mostrados na Figura 4.5.



Figura 4.5. Módulos com protocolo ZigBee.

Os módulos XBee Serie 2 foram desenvolvidos para operarem com o protocolo ZigBee e suportar as características peculiares de uma Rede de Sensores Sem Fio.

A escolha desses módulos se deve ao fato de os mesmos já virem com o protocolo robusto de comunicação, integrado a eles, o que facilita bastante a montagem da rede; e também por serem de fácil acesso no mercado local, terem um custo acessível e o mais importante, possuírem um tamanho reduzido que facilita a sua montagem nas caixas a prova de explosão, onde serão acondicionados junto aos outros circuitos.

Esse módulos são encontrados em dois tipos, o XBEE e o XBEE PRO. O primeiro é utilizado como um RFD enquanto o XBEE-PRO pode ser usado tanto como RFD quanto FFD. Abaixo estão listadas as suas características principais.

Performance

- Rendimento da Potência de saída: 1 mW (XBEE), 100mW (XBEE-PRO);
- Alcance em ambientes internos/zonas urbanas: 30m (XBEE), 100m (XBEE-PRO);
- Alcance de RF em linha visível para ambientes externos: 100m(XBEE), 1,6Km (XBEE-PRO);
- Sensibilidade do receptor: -92 dBm (XBEE), -100 dBm (XBEE-PRO);
- Frequência de operação: ISM 2.4 GHz;
- Taxa de dados de RF: 250.000 bps;
- Taxa de dados da Interface (Data Rate): 115.200 bps.

Alimentação

- Tensão de alimentação: 2.8 à 3.4v;
- Corrente de transmissão (típico): 45 mA (XBEE), 215mA (XBEE-PRO) @ 3.3 V;
- Corrente de Recepção (típico): 50 mA (XBEE), 55mA (XBEE-PRO);@ 3.3 V;
- Corrente de Power-down Sleep: <10 µA.

Propriedades físicas

- Dimensões: (2.438cm x 2.761cm) (XBEE), (2.438cm x 3.294cm) (XBEE-PRO);
- Peso: 0.10 oz (3g);
- Temperatura de operação: -40 to 85° C (industrial);

- Opções de antena: Conector U.FL RF, Chip ou Chicote (whip).

Rede

- Tipo de espalhamento espectral: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum);
- Manipulação de erro: Retransmite novamente (Retries) & reconhecimento (acknowledgements);
- Topologia de Rede: Peer-to-peer(Par-a-par), ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto e malha;
- Endereçamento: 65.000 endereços de rede disponíveis para cada canal;
- Opções de filtros: PAN ID, canais e endereços;
- Criptografia: 128-bit AES;
- Número de canais selecionáveis via software: 16 canais de seqüência direta.

Geral

- Faixa de frequência: 2,4000 – 2,4835 GHz. [Digi International, 2007]

4.3.2.1 - Comunicação serial

Os módulos Xbee podem se comunicar com um dispositivo por meio da interface serial assíncrona (UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Dessa forma é possível conectar um microcontrolador ao mesmo para gerenciar as informações que serão enviadas e recebidas pelo módulo Xbee, como mostrado na Figura 4.6.

Essa comunicação serial pode ser configurada para funcionar em modo transparente, onde toda a informação da UART recebida no pino DI é colocada em espera para ser transmitida pela antena. Quando a informação da antena é recebida é transmitida através do pino DO. Em modo de comando, os caracteres recebidos são interpretados como comandos. Existem dois tipos de modo de comando, o modo de comando API e o modo de comando AT. O modo de comando API possibilita a configuração do módulo ao nível da camada de aplicação que tem de criar os respectivos pacotes com dados, endereços, identificadores, e de modo a estabelecer comunicação com outros dispositivos. O modo de comando AT possibilita modificar e ler os parâmetros do módulo através do envio de caracteres específicos (Digi International, 2007).

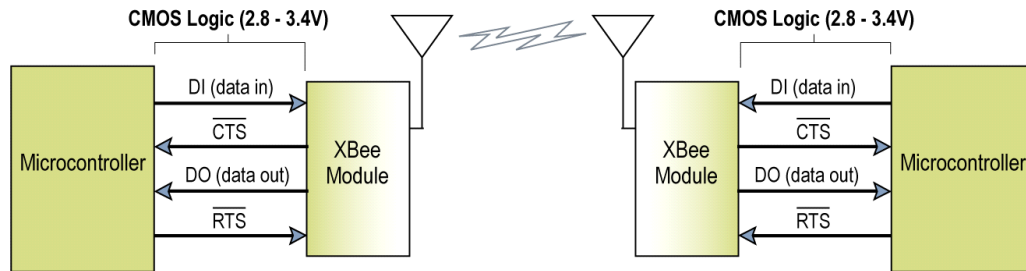


Figura 4.6. Comunicação serial entre o Xbee e o microcontrolador.

Como interface de comunicação entre os sensores, atuadores e CLP e seus respectivos módulos XBee (estrutura apresentada na Figura 4.1) foram utilizados microcontroladores PIC18F2550 comunicando-se via UART. Nessa comunicação o microcontrolador terá as seguintes funções:

- Conversor A/D: para os sensores de pressão e verificação do nível de tensão da bateria;
- Comando: para os atuadores (Solenóide, I/P);
- Verificar entradas digitais: nos casos do sensor de presença do pistão e do de vazão;
- Formar o pacote a ser enviado para o Coordenador ZigBee;
- Interpretar os pacotes recebidos pelo Coordenador ZigBee;
- Armazenar as últimas leituras dos sensores e atuadores;
- Empacotar as informações da rede ZigBee no protocolo Modbus (Coordenador);
- Fornecer uma comunicação USB para o Coordenador (Verificação de erros).

4.3.3 - Microcontrolador PIC18F2550 da Microchip

O microcontrolador da Microchip foi escolhido para essa aplicação pois oferece as seguintes características que serão necessárias para os sistemas embarcados desenvolvidos:

- Memória flash de 32 Kbytes;
- Conversores A/D de 10 bits;
- Portas para comunicação USB;

- Portas para comunicação Serial USART;
- Consumo de $0.1\mu\text{A}$ em modo SLEEP;
- Tamanho reduzido (Microchip, 2006).

Na Figura 4.7 pode-se observar as dimensões do microcontrolador em questão:

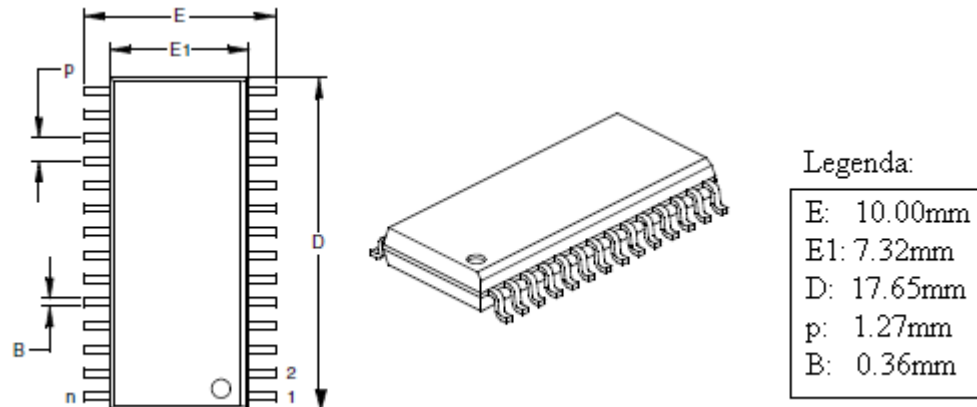


Figura 4.7. Dimensões do PIC18F2550.

4.3.4 - Circuitos desenvolvidos

Para o desenvolvimento das placas de circuito impresso dos sistemas embarcados foi determinado que cada sistema deverá ser composto por duas placas, uma com um circuito que será comum a todos e outra com os circuitos de adaptação do sinal dos sensores, atuadores ou CLP. A montagem final das duas placas citadas pode ser observada na Figura 4.8 abaixo.



Figura 4.8. Placas componentes do módulo de comunicação.

4.3.4.1 - Placa de comunicação

Primeiramente foi padronizado a placa de comunicação, colocando dispositivos que seriam comuns a todos os sistemas embarcados, podendo então fabricá-las em série, sendo produzidas 7 placas ao todo. Observado na Figura 4.9.

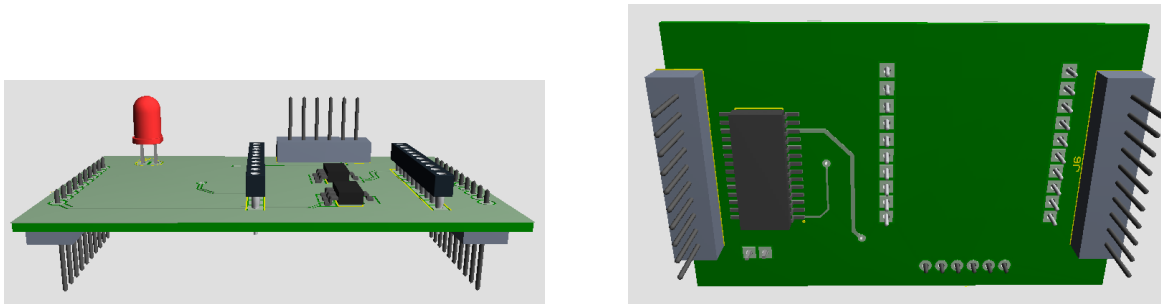


Figura 4.9. Placa de comunicação, vistas superior e inferior.

A placa é composta basicamente por um microcontrolador PIC18F2550, situado na camada inferior da placa de comunicação (Figura 4.9); um módulo Xbee (na Figura 4.9 pode-se observar o seu encaixe na parte superior da placa); reguladores de tensão para 5 e 3 volts (o microcontrolador trabalha com 5v e o Xbee com 3v); 6 pinos disponíveis, na parte superior, para a programação do microcontrolador; além dos pinos que interligam a placa de comunicação à placa de adaptação dos sinais dos equipamentos de campo (sensor, atuador e CLP).

4.3.4.2 - Placas de adaptação de sinais

Essas placas são as encontradas, em cada sistema embarcado, logo abaixo das placas de comunicação, onde constará o circuito de leitura da variável do sensor, de acionamento do atuador ou de comunicação serial e USB do Coordenador. Além desses circuitos, nas placas de adaptação de sinais dos sensores serão encontrados também os de leitura da tensão da bateria e a entrada para energização do sistema vinda do controlador de carga. Na Figura 4.10 temos uma das placas de adaptação de sinais dos sensores de pressão.

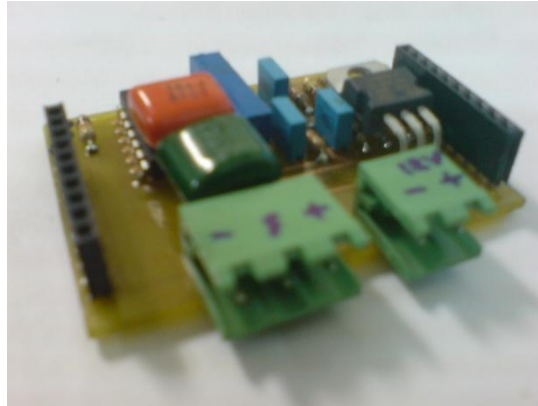


Figura 4.10. Placa de adaptação de sinais.

4.3.4.2 - Placa ZigBee/Modbus

Toda informação da RSSF será enviada e recebida pelo coordenador da rede que está conectado ao CLP. Porém, além da comunicação serial RS-232 utilizando o protocolo Modbus, foi colocado também uma comunicação USB para a opção de acessar as informações do poço por meio de um notebook quando o operador estiver na unidade de elevação, facilitando também a solução de eventuais problemas que venham a ocorrer na rede. A Figura 4.11 mostra as conexões em questão.

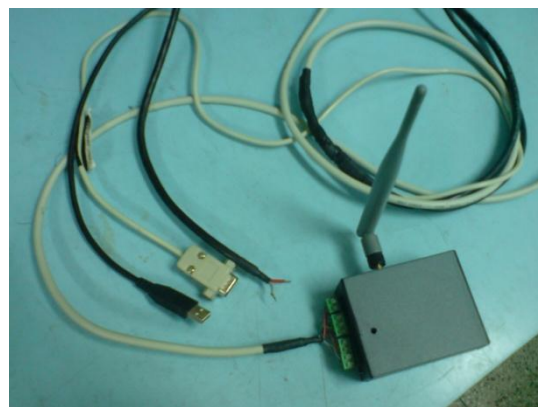


Figura 4.11. Portas de comunicações do coordenador ZigBee.

4.4 - Firmwares

Cada sistema embarcado possui um *firmware* composto por um microcontrolador (μC) (PIC18F2550) e o software embarcado no mesmo para cada aplicação. Nos sub-tópicos seguintes será detalhado a lógica envolvida nos dois principais tipos de sistemas embarcados envolvidos nesse trabalho, os sistemas dos sensores e atuadores e o do coordenador ZigBee/Modbus.

4.4.1 - Lógica dos sistemas sensores/atuadores

Todos os sistemas embarcados dos dispositivos RFDs, que nessa rede são os sistemas embarcados dos sensores e atuadores, terão uma lógica representada pelo fluxograma da Figura 4.12.

4.4.2 - Lógica do sistema coordenador ZigBee/Modbus

O coordenador ZigBee estará sempre aguardando um evento, da rede ZigBee ou do CLP (Modbus) ou de algum dispositivo conectado a USB. Além da espera por um evento o programa do coordenador também fica verificando se houve alguma alteração nos estados das válvulas (atuadores), modificados pelo CLP. Quando ocorre é enviado para a rede ZigBee a informação de mudança de estado da válvula. A Figura 4.13 mostra o fluxograma dessa lógica do programa encontrado no *firmware* do coordenador ZigBee.

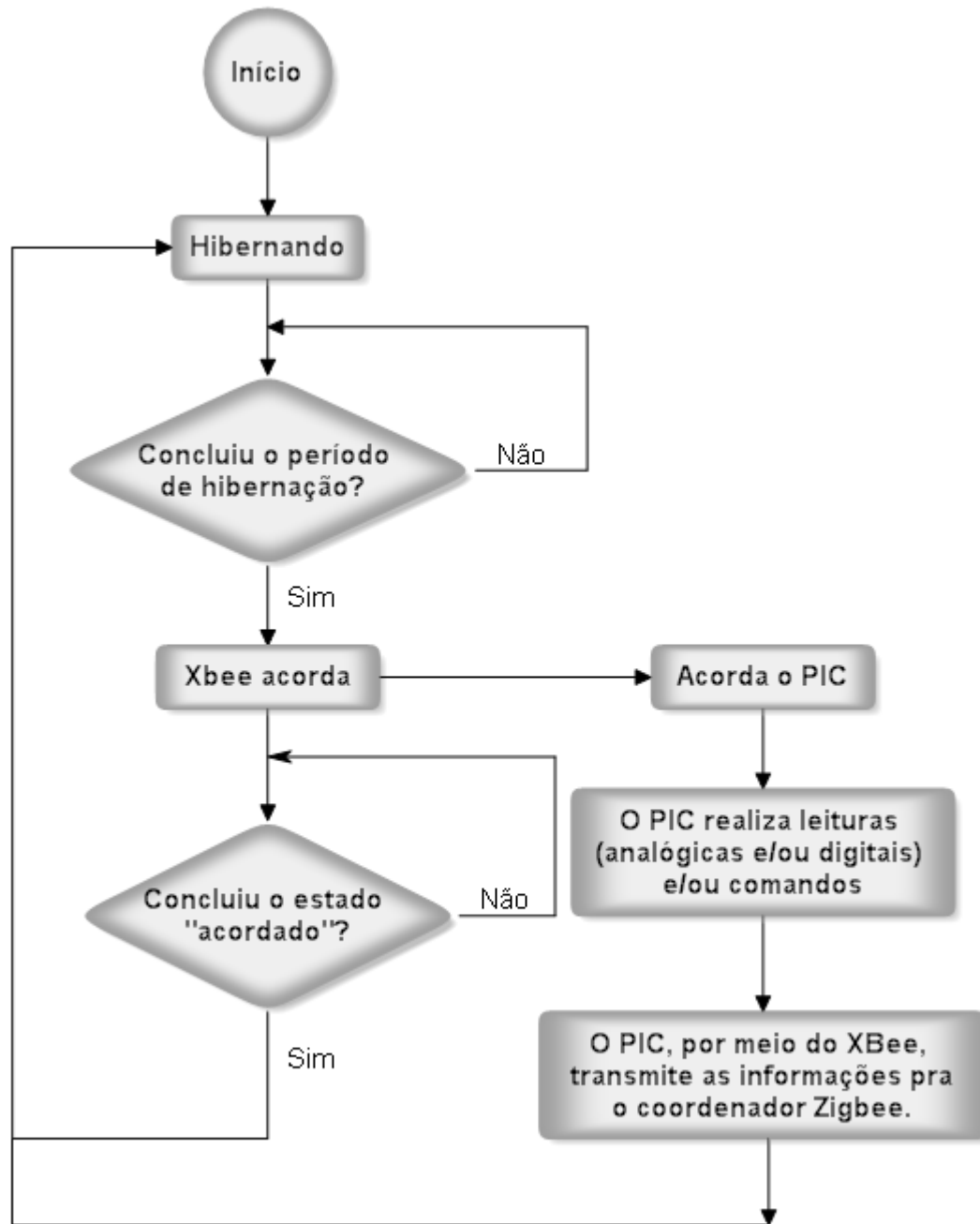


Figura 4.12. Fluxograma dos *firmwares* dos RFDs.

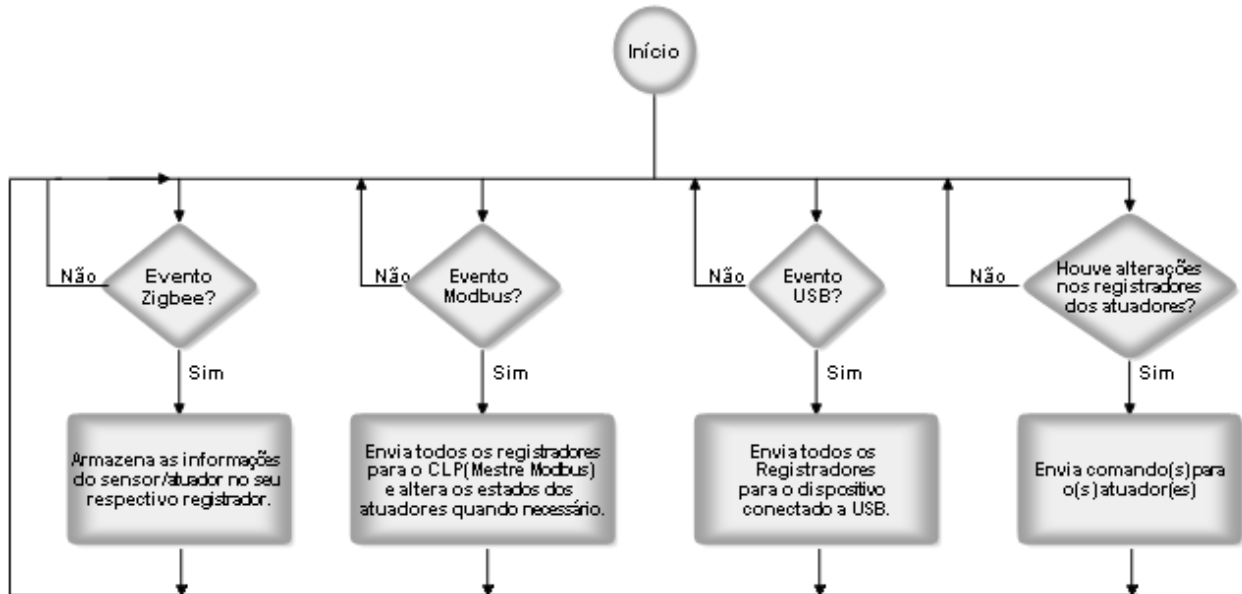


Figura 4.13. Fluxograma do coordenador ZigBee.

4.5 - Energia

Para a energização dos sistemas embarcados foi feito um levantamento do consumo de cada sistema levando em consideração o consumo das partes que o constitui (sensor/atuador + módulo de comunicação). Em seguida foi pesquisada a bateria a ser utilizada buscando uma autonomia máxima para as limitações da caixa a prova de explosão no dimensionamento da mesma. Com isso foi constatado que existe uma necessidade de utilização de painel solar, para cada sistema, para a recarga da bateria.

4.5.1 – Baterias

As baterias utilizadas para a energização dos sistemas embarcados dos sensores e atuadores foram escolhidas levando em consideração a relação entre a limitação do espaço na caixa a prova de explosão e a autonomia em mA/h. Pensando nisso foram adquiridos *packs* (conjunto) de baterias Lithium-Ion recarregáveis com autonomia de 2200mA/h (a 3,7 volts) cada célula (bateria) do *pack*.

Outro fator limitante foi a tensão mínima para o funcionamento de certos sensores/atuadores, como por exemplo, a válvula solenóide não funciona corretamente a um nível

de tensão inferior a 10 volts, portanto foi verificado que a melhor configuração para o Pack de baterias Lithium-Ion seria a mostrada na Figura 4.14. Dessa forma, a melhor configuração encontrada foi fazer *packs* com 4 células em série (tensão do *pack* de aproximadamente 15 volts) em paralelo com mais 4 células, obtendo então uma tensão de aproximadamente 15 volts e uma autonomia de 4400 mA/h por *pack*.

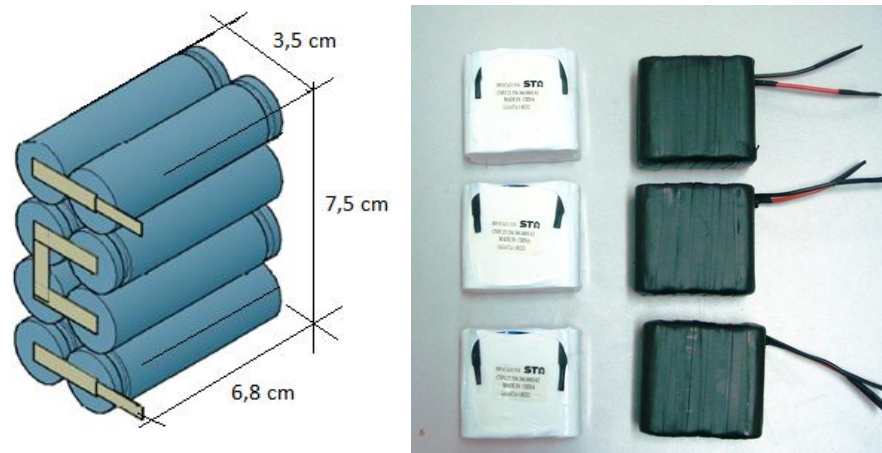


Figura 4.14. Packs de baterias Lithium-Ion para os sistemas embarcados RFDs.

4.5.2 – Painéis Solares

Visto que a média de consumo dos sistemas foi de 30 mA, nos equipamentos que entram no estado de hibernação, e 85 mA nos que não entram (testes demonstrados no capítulo seguinte), no pior caso (85mA) a bateria dura 48h, com isso se torna necessário a utilização de painel solar.

O dimensionamento do painel solar levou em consideração dois fatores, o primeiro é que o mesmo deverá recarregar a bateria com uma corrente de carga acima da de descarga (150 mA), diminuindo o tempo de carga e minimizando a necessidade de luz solar. O segundo é que o painel também forneça corrente para o sistema, mantendo a bateria apenas carregando. Assim temos 150 mA para a recarga da bateria mais 85 mA para a energização do sistema, ou seja, o painel solar deverá fornecer o mínimo de 235mA, a uma tensão de 20 volts (a tensão de carga deve ser maior que a da bateria a ser carregada), tem-se 4,7 Watts.

Foram adquiridos 7 painéis solares de 5 Watts para auxiliar a energização dos sistemas embarcados.

A montagem de cada sistema embarcado, após a junção de todos os componentes citados nesse capítulo, pode ser visto na Figura 4.15.



Figura 4.15. Montagem de cada sistema embarcado.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante a elaboração deste trabalho na realização de testes de: análise de QoS (*Quality of Service*); coexistência com WiFi, economia de energia e o teste de campo. Os testes foram realizados utilizando como ferramentas de análises o analisador de espectro, para os testes de coexistência entre redes, o osciloscópio para medição do consumo de energia, um supervisor desenvolvido em Labview que armazena as informações da rede ao longo do tempo, para análise de QoS e o supervisor SISAL desenvolvido pela UFRN em parceria com a PETROBRAS, a qual utiliza o mesmo no controle e gerenciamento das variáveis envolvidas nas suas unidades de elevação de petróleo e gás natural, para análise da comunicação ZigBee/Modbus e do comportamento da rede em ambientes industriais.

5.1 – Análise do QoS da RSSF

Para a análise do QoS (*Quality of Service*) da rede foram observados os parâmetros de *Jitter*, retransmissões e pacotes perdidos, onde o *Jitter* representa a diferença da variação de tempo entre duas amostras consecutivas, como mostram a Equação (1) e a Figura 5.1.

$$Jitter = \Delta t_n - \Delta t_{n-1} \quad (1)$$



Figura 5.1. Variação de tempo entre amostras.

Para a coleta dos tempos de recepção de cada módulo de comunicação (Pcab, PRev, Pls, I/P, Vazão, Pistão, Solenóide) foi desenvolvido um supervisor em Labview, composto, basicamente, de um contador em milissegundos e um banco de dados para armazenar o valor desse contador toda vez que o coordenador receber alguma informação da rede. Essa montagem para testes pode ser observada na Figura 5.2.

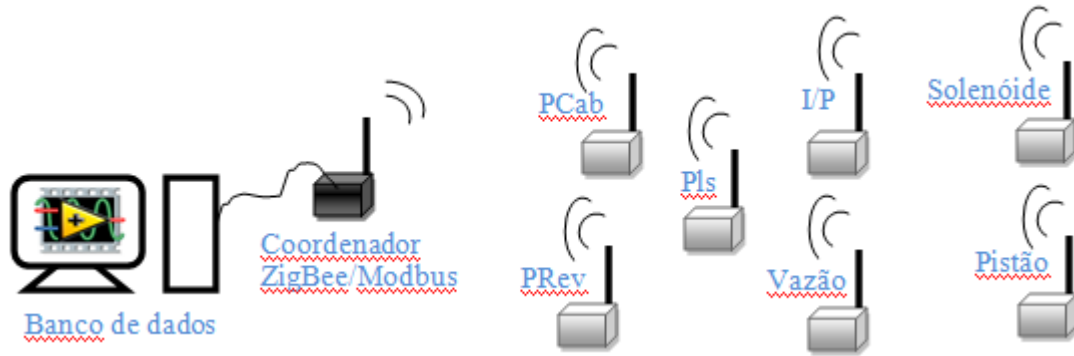


Figura 5.2. Montagem da RSSF para análise de QoS.

Foram coletadas mais de 10.000 amostras para cada módulo. Com essas amostras foram gerados dois gráficos para cada módulo, onde a partir deles, pode-se observar o *Jitter*, as retransmissões e os pacotes perdidos.

Para esse teste, os tempos de envio de cada módulo para o coordenador foram configurados da seguinte forma: o módulo de PCab, PIs, PRev e Pistão enviavam a cada 6 segundos; o I/P a cada 2,85 segundos; o da Solenóide a cada 8 segundos e o de Vazão a cada 5 segundos.

Nas Figuras de 5.3 a 5.9 (à esquerda) pode-se observar que o comportamento do *Jitter*, para todos os casos, possuiu uma variação entre 0 e 100 ms. A média do *Jitter* de cada módulo variou de 5 à 22,3 ms, sendo a média geral entre todos os módulos igual a 15,24 ms, valor esse que mostra a confiabilidade da rede, pois existe uma regularidade no tempo de recepção dos dados de cada sensor, uma das características de uma rede em tempo real.

Nos gráficos de Tempo de Recepção (ms) x Amostra (Figuras de 5.3 a 5.9, à direita) podemos perceber que quando o tempo ultrapassa o valor de 2 vezes o valor predeterminado para cada envio, caracteriza-se a perda de um pacote, onde apenas no gráfico do Pistão pode-se observar que houve perda de pacotes (0.02%), nos demais gráficos observa-se apenas retransmissões.

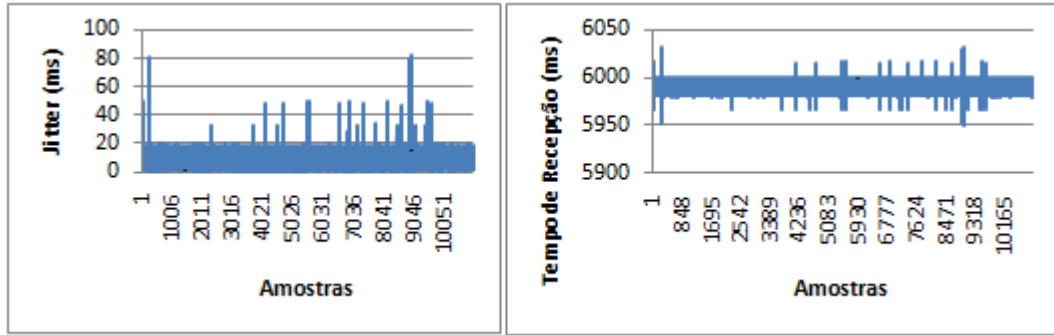


Figura 5.3. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo PCab.

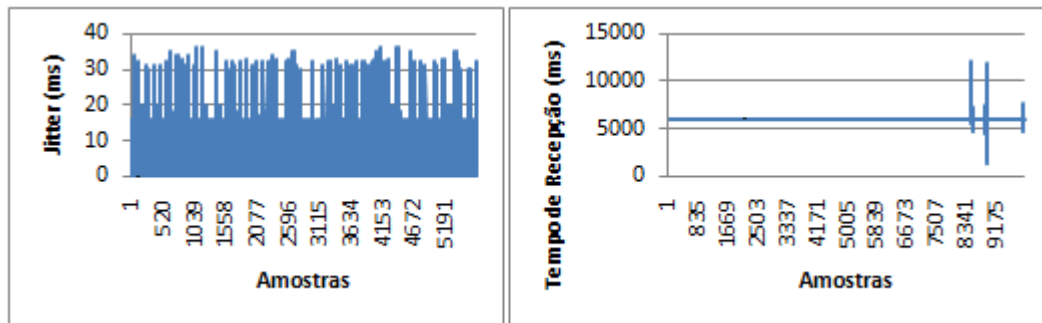


Figura 5.4. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Pistão.

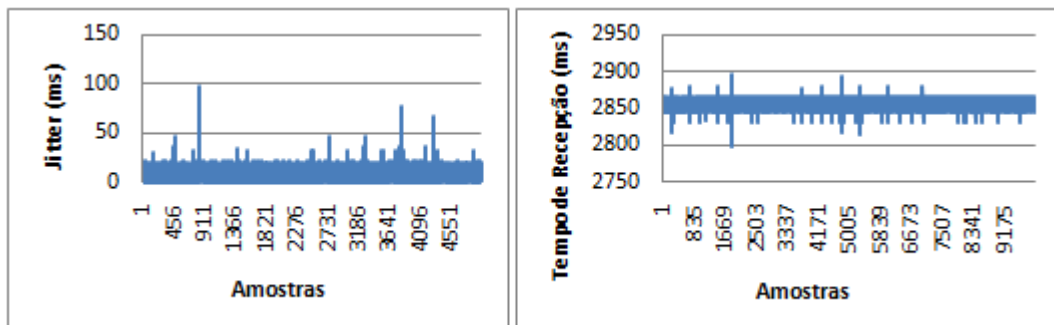


Figura 5.5. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo I/P.

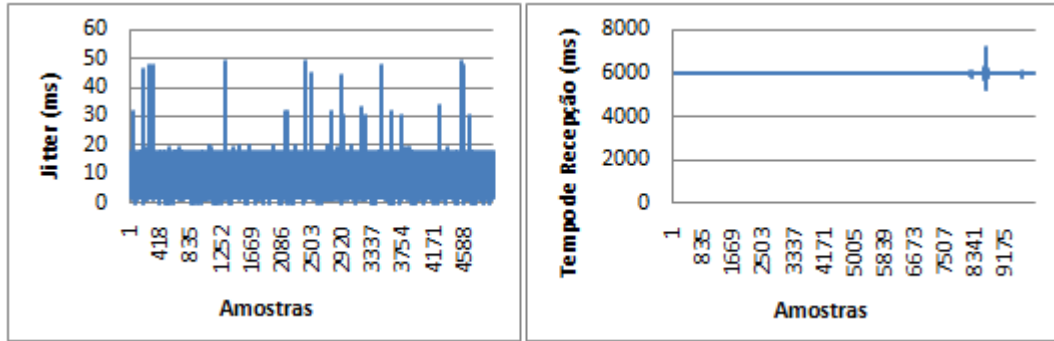


Figura 5.6. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Pls.

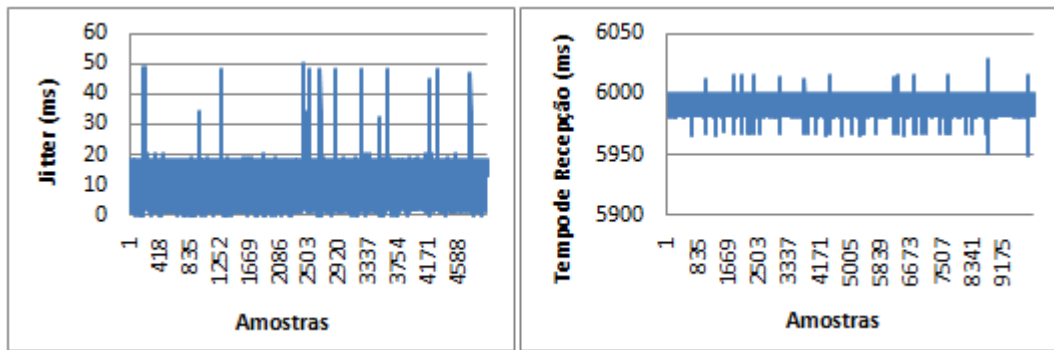


Figura 5.7. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Prev.

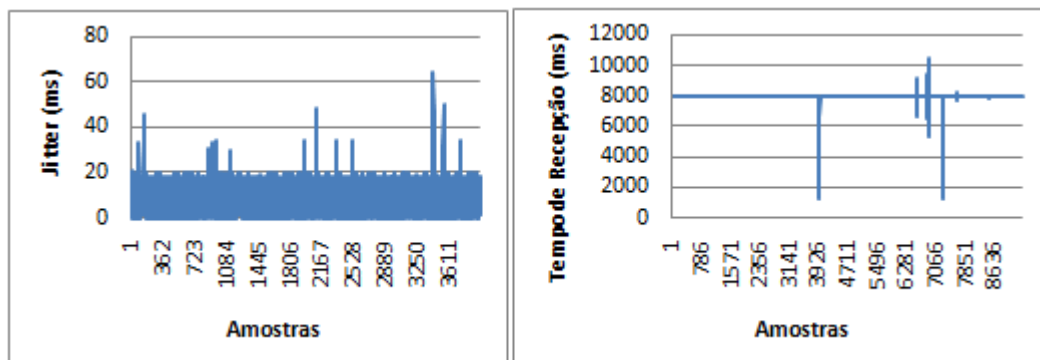


Figura 5.8. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Solenóide.

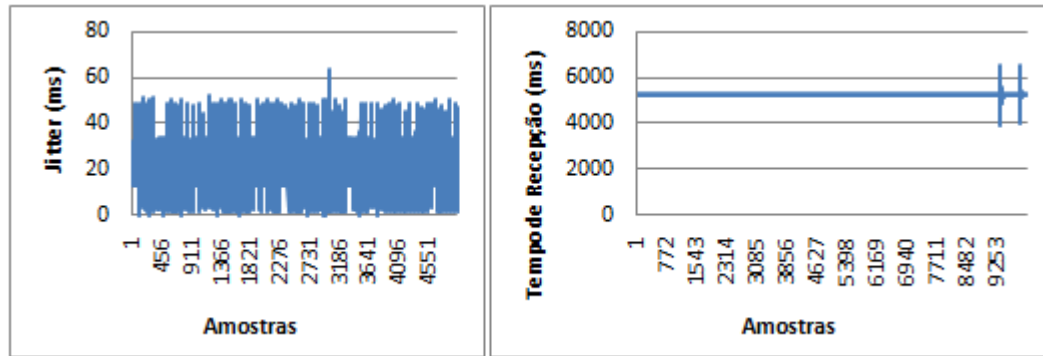


Figura 5.9. Gráficos de análise de pacotes enviados pelo módulo Vazão.

5.2 - Coexistência com WiFi

Existe uma preocupação no comportamento das RSSF (IEEE 802.15.4) que utilizam a frequência de 2,4GHz, pois é a mesma utilizada pelas redes WiFi (IEEE 802.11), portanto foi realizado um teste de coexistência utilizando-se um analisador de espectro. Nesse teste foram feitas duas amostras dos níveis de sinal da faixa de frequência do WiFi (2.410 MHz – 2474MHz), a primeira, vista na Figura 5.10 à esquerda, mostrando os níveis de sinais com apenas a rede WiFi conectada e a segunda (Figura 5.10 à direita) com a WiFi e a RSSF em um mesmo ambiente.

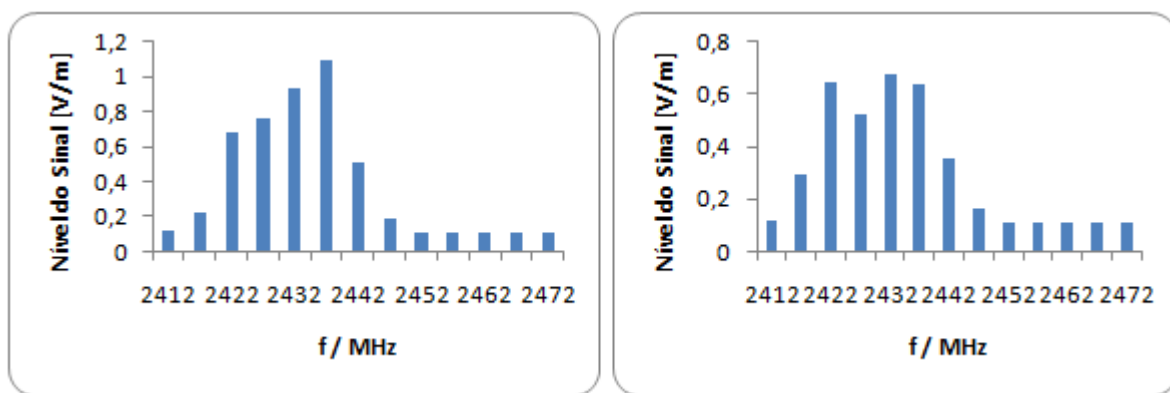


Figura 5.10. Comparação WiFi x WiFi+RSSF.

Analisando os dois gráficos pode-se perceber uma pequena queda nos níveis do sinal na maioria das frequências, mas nada que venha a prejudicar a comunicação das redes.

5.3 - Economia de energia

Inicialmente o teste de comunicação foi realizado sem utilizar o estado de hibernação, com isso o consumo medido do sistema foi de aproximadamente 85 mA, para o sensor de pressão, com a bateria de 4400mA/h o tempo de duração foi de 48h. Após colocar o XBee para hibernar o consumo instantâneo baixou para 50 mA, com o microcontrolador também em modo de hibernação o consumo chegou a 30 mA.

Como a transmissão das informações dos sistemas embarcados só serão transmitidas a cada 5 segundos, foi configurado no XBee que o mesmo irá hibernar por 5 segundo e terá 1 segundo para concluir a transmissão. O XBee possui um pino de saída que quando ele acorda de uma hibernação esse pino passa a ficar em nível lógico alto e ao retornar da hibernação volta para nível lógico baixo, foi utilizado então esse pino para ser a interrupção externa do microcontrolador acordando-o do seu modo de hibernação para a leitura da variável do sensor e encaminhar o pacote a ser transmitido para o XBee que por sua vez o enviará para o coordenador da rede.

Após essa nova configuração para a redução do consumo da bateria foi utilizado um osciloscópio para a observação de consumo de corrente durante o período de hibernação e transmissão do sistema. Para isso foi colocado em série com a fonte de alimentação do sistema, um resistor de 1 ohm fazendo com que a corrente que passará pelo resistor seja igual a tensão dissipada no mesmo. Essa diferença de tensão equivalente a corrente instantânea do sistema embarcado foi capturada no osciloscópio, imagem mostrada na Figura 5.11, no momento em que o sistema sai do modo de hibernação (consumo aproximado 30mA), efetua a transmissão (consumo entorno de 80mA), aguarda o termino de 1 segundo (consumo entorno de 50mA) e volta a hibernar.

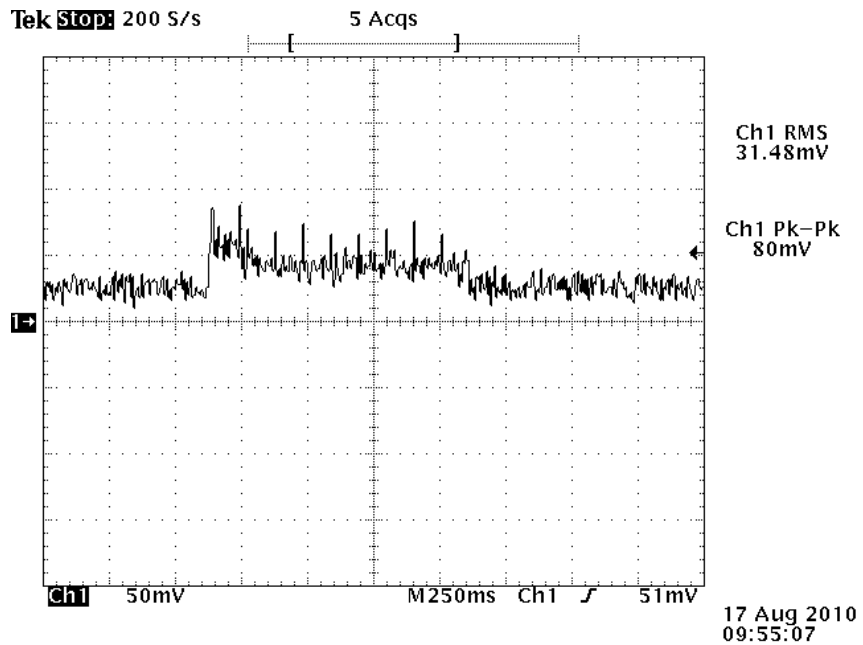


Figura 5.11. Consumo de energia.

5.4 - Teste de campo

Para a análise da comunicação ZigBee/Modbus foi realizado um teste de comunicação entre o sistema embarcado de um dos sensores de pressão conectado a um ponto de pressão na planta do LAMP, mostrado na Figura 5.12, e o coordenador da rede conectado ao CLP ZAP-500 situado, em uma sala no prédio ao lado da mesma, a uma distância de aproximadamente 25 metros da planta. O CLP, por sua vez, está conectado a um computador com o SISAL armazenando as informações disponibilizadas pelo CLP.

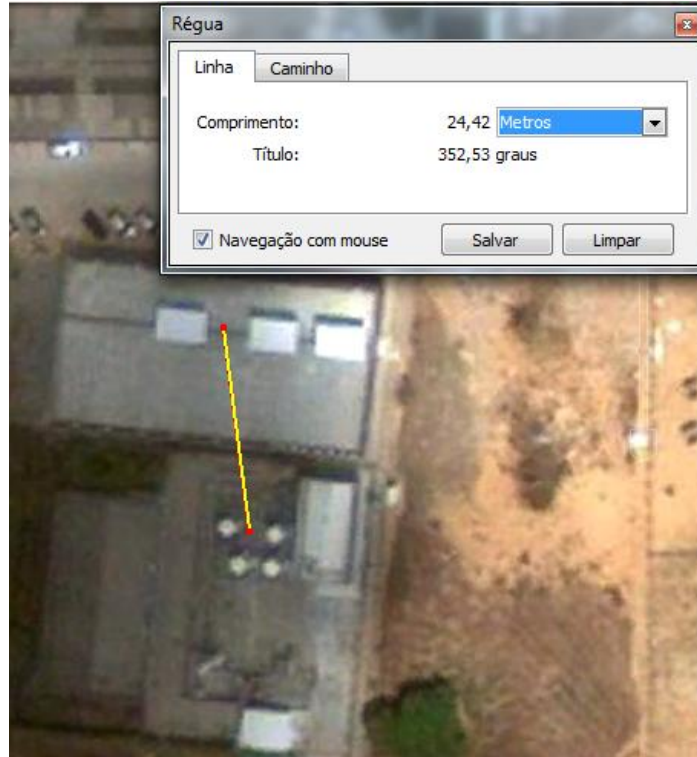


Figura 5.12. Imagem de satélite da planta do LAMP.

Essa informação da relação entre pacotes recebidos e enviados (PPR), dos nós da rede, nos dá uma noção de qualidade da informação da rede, qualidade essa que varia entre 0 e 100%, conforme visto na Equação (2).

$$PPR(\%) = \frac{PacotesRecebidos}{PacotesEnviados} * 100 \quad (2)$$

No teste citado podemos observar no gráfico da Figura 5.13 que durante grande parte a PPR se mantém em 100%. Nessa mesma figura pode-se observar também, na tabela da cor verde, coluna de nome “Último Valor”, o monitoramento de três variáveis do sistema embarcado em teste: a tensão da bateria, aproximadamente 12 Volts; a taxa de comunicação, 100%; e o status, no qual “1” indica que o sistema embarcado está conectado e “0” quando desconectado.

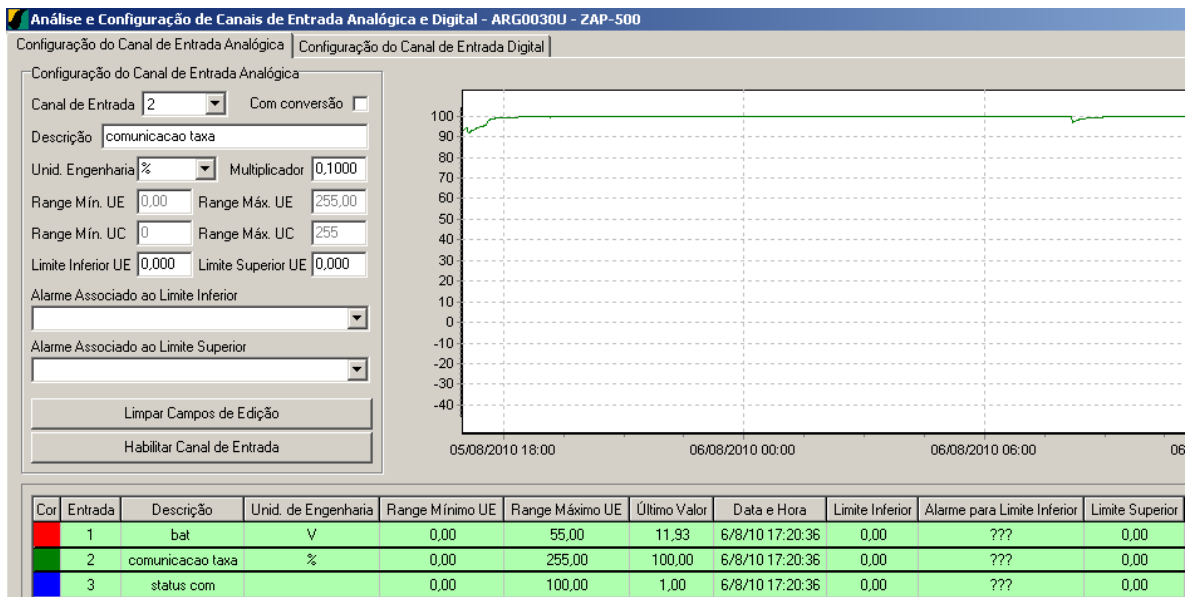


Figura 5.13. Relatório do SISAL.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho propõe o desenvolvimento de sistemas embarcados a serem aplicados em uma unidade de elevação artificial de petróleo e gás natural *Plunger-Lift* visando a transmissão de dados remota entre os sensores existentes nesta e o CLP responsável pelo controle da produção.

Para a realização desse trabalho foram adquiridos dois módulos de comunicação para transmissão de dados de fabricantes diferentes o qual se destacou o módulo XBee pelas características citadas anteriormente. Foram projetadas 8 placas de circuito impresso (1-Módulo de Comunicação; 5-Sensores de tipos diferentes; 1-Coordenador da Rede; 1-Controlador de Carga) e confeccionadas 23 (8-Módulos de Comunicação; 7-Sensores; 1-Coordenador da Rede; 7-Controladores de Carga). Foram desenvolvidos 5 firmwares dedicados aos seus respectivos sensores e atuadores e 1 firmware de interface de comunicação entre uma rede ZigBee e um equipamento Modbus.

Os testes realizados até o momento mostram a viabilidade do funcionamento adequado da rede. Todos os sensores da rede já estão se comunicando com o SISAL numa estrutura montada em laboratório, a mesma encontrada no poço a ser instalado, como mostra a Figura 6.1.

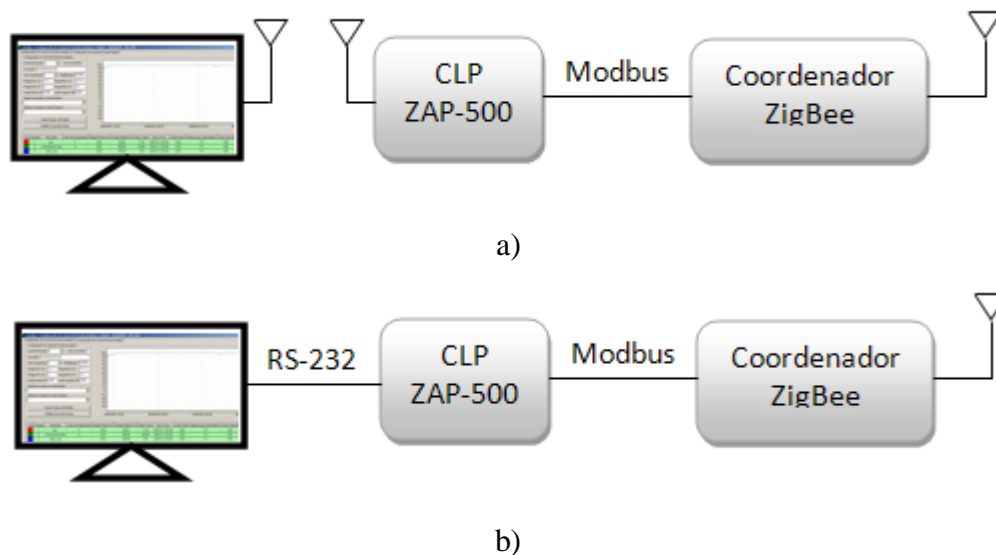


Figura 6.1. a) Configuração em campo; b) Configuração em laboratório.

Dois trabalhos que mostram a viabilidade da proposta deste já foram publicados em anais de congressos:

- OLIVEIRA, F. D. M. et al. Rede de sensores sem fio utilizando o padrão IEEE 802.15.4 em unidade de elevação de petróleo com o método Plunger-Lift. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COMUNICACIONES, 13, 2008. Valdivia, Chile. *Anais do XIII Congresso Internacional de Comunicaciones*.
- FERNANDES, J. D. et al. Projeto e implementação de uma rede de sensores sem fio aplicada ao método Plunger-Lift baseada no padrão ieee 802.15.4. In: CONGRESSO RIO AUTOMAÇÃO, 5, 2009. Rio de Janeiro. *Anais do V Congresso Rio Automação*.

Outra dissertação, nesta linha de pesquisa, está sendo desenvolvida por Rodrigo Soares Semente e visa implementar a segurança da informação na RSSF com um baixo consumo de energia.

Uma realidade que pode ser alcançada a partir da evolução desse trabalho é a criação de uma grande rede de sensores sem fio a partir da interconexão das redes de cada poço. Esta possibilidade se percebe na imagem da Figura 6.2, retirada do *Google Earth* onde a distância entre os poços possibilita a comunicação entre dois rádios Xbee-PRO, que serão os coordenadores das redes.

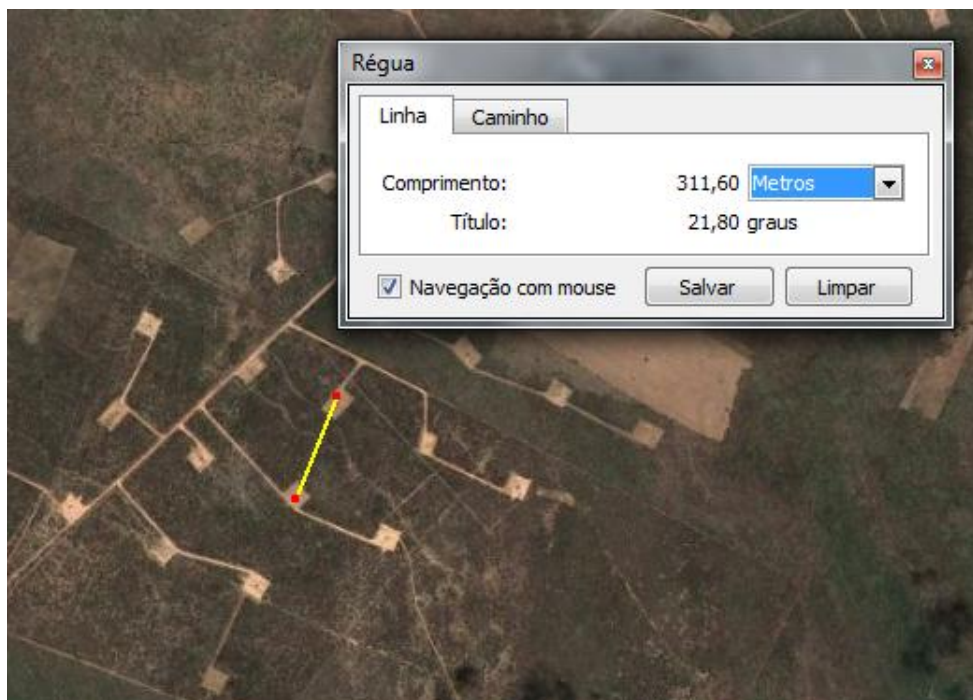


Figura 6.2. Imagem de satélite dos poços em Lorena.

Dificuldades foram encontradas durante a implementação da rede, como:

- Dimensionamento e escolha das baterias: como as caixas a prova de explosão devem possuir um tamanho reduzido (para justificar a portabilidade), o tamanho reduzido das baterias limita a autonomia do sistema. Com isso o tipo de bateria escolhido foi o de Lithium-ion, pois possui uma densidade de carga elevada (Whrs/Kg). Porém esse tipo de bateria exige um controlador de carga bem dimensionado para uma recarga correta da mesma, cada célula do Pack deve ser monitorada individualmente.

- Com um espaço reduzido para a acomodação do módulo de comunicação na caixa a prova de explosão, as placas de circuito impresso foram confeccionadas com dimensões pequenas dificultando a montagem.

- As antenas tiveram que ficar expostas, pois no interior da caixa (metálica) elas não propagam sinal (gaiola de Faraday). Essa exposição facilitou a quebra de algumas, problema solucionado com a adaptação de canos PVC para protegê-la, essa proteção pode ser vista na figura 4.15.

Algumas modificações futuras podem melhorar a RSSF proposta, como:

- Utilizar um circuito integrado SoC (*System on Chip*), ou seja, que possui um microcontrolador e um rádio IEEE 802.15.4 encapsulado no mesmo chip, reduzindo montagem e custo;

- Aumentar a autonomia das baterias para situações com longos períodos de chuva das seguintes formas: melhorar o controlador de carga, diminuir ainda mais o consumo do sistema, utilização de outras fontes de energia alternativa, entre outras opções;

- Pesquisar ou confeccionar, caixas a prova de explosão que facilitem a troca da bateria no local.

- Implementação da segurança da informação.

Referências bibliográficas

BARUZZI, J. O. A. *Modelagem do Plunger-Lift convencional*. 1994. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Petróleo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BEGA, E. A. et al. *Instrumentação Industrial, 2 ed.* Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 584p.

CAMPOS, C. F. P. S. *Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio*. 2006. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

DIGI INTERNATIONAL, Inc. *XBee Series 2 OEM RF Modules: Product Manual v1.x.2x – ZigBee Protocol*©. 2007.

FERNANDES, J. D. et al. Projeto e implementação de uma rede de sensores sem fio aplicada ao método Plunger-Lift baseada no padrão ieee 802.15.4. In: CONGRESSO RIO AUTOMAÇÃO, 5, 2009. Rio de Janeiro. *Anais do V Congresso Rio Automação*.

GESSINGER, A. K.; HENNIG, C. H. Conectividade wireless para automação e controle. In: CONGRESSO ISASHOW, 2005. São Paulo. *Anais do Congresso ISASHOW*.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, Inc. *IEEE 802.15.4a Standard Report: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate and UWB Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. New York, EUA, 2007.

MALAFAYA, H.; TOMAS, L.; SOUSA, J. P. Sensorização sem fios sobre ZigBee e IEEE 802.15.4. In: JORNADA DE ENGENHARIA DE ELETRÔNICA E TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES, 3, 2005. Lisboa, Portugal. *Anais da Terceira Jornada de Eletrônica e Telecomunicações e de Computadores*.

MICROCHIP. *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology*. 2006.

OLIVEIRA, F. D. M. et al. Rede de sensores sem fio utilizando o padrão IEEE 802.15.4 em unidade de elevação de petróleo com o método Plunger-Lift. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COMUNICACIONES, 13, 2008. Valdivia, Chile. *Anais do XIII Congresso Internacional de Comunicaciones*.

OLIVEIRA, F. D. M. *Desenvolvimento de um software de comunicação sem fio aplicado à instrumentação de unidade de elevação de petróleo tipo Plunger-Lift*. 2009. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

PETERSEN S. et al. Requirements, drivers and analysis of wireless sensor network solutions for the Oil & Gas Industry. In: EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION. 2007. *IEEE*, 2007. p. 219 -226.

TAYLOR J. K. Wireless intrinsically safe devices and equipment: emerging markets. *Industrial Automation and Control Practice*, julho 2007. Disponível em: <http://www.vdcresearch.com/_documents/pressrelease/press-attachment-1371.pdf>. Acesso em: 15 dezembro 2008.

DOS SANTOS, S. T. *Redes de sensores sem fio em monitoramento e controle*. 2007. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia,

Departamento de Engenharia elétrica, Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WILLIG A.; MATHEUS, K.; WOLISZ, A. Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 6, p. 1130-1151, 2005.

WILLIG, A.; KARL H. *Protocols architectures for wireless sensor networks*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., 2005. 435p.

YANFEI, L. et al. Research on ZigBee wireless sensors network based on ModBus protocol. In: INTERNATIONAL FORUM ON INFORMATION TECHNOLOGY AND APPLICATION. 2009. Chengdu, China. *IEEE*, 2009. p. 487-490.