

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALGORITMO ADAPTATIVO PARA TRANSMISSÕES DE REDES SEM FIO EM
AMBIENTE INDUSTRIAL

PUC-CAMPINAS
2013

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALGORITMO ADAPTATIVO PARA TRANSMISSÕES DE REDES SEM FIO EM
AMBIENTE INDUSTRIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como exigência para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica
Área de concentração: Gestão de Redes e Serviços
Orientador: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Discente: José Luís Pagotto

PUC-CAMPINAS
2013

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3851
P139a

Pagotto, José Luís.

Algoritmo adaptativo para transmissões de redes sem fio em ambiente industrial / José Luís Pagotto. - Campinas: PUC-Campinas, 2013.
133p.

Orientadora: Lia Toledo Moreira Mota.

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui anexo e bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Algoritmos de computador. 3. Pesquisa metalúrgica. 4. Arquitetura de redes de computador. I. Mota, Lia Toledo Moreira. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

22. ed. CDD – t621.3851

JOSÉ LUÍS PAGOTTO

"ALGORITMO ADAPTATIVO PARA TRANSMISSÕES DE REDES SEM FIO EM AMBIENTE INDUSTRIAL"

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Lia Toledo Moreira Mota

Dissertação defendida e aprovada em 18 de dezembro de 2013 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof^a. Dr^a. Lia Toledo Moreira Mota
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta
USF/UNICAMP

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota,

Orientadora e incentivadora dos meus trabalhos realizados no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pelo apoio, atenção, incentivo à pesquisa e amizade.

À Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota,

Pelo apoio e brilhantes idéias aplicadas neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho,

Pelo estímulo e colaboração técnica nos assuntos relacionados à rede de sensores sem fio aplicados nos experimentos.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas,

Pela bolsa concedida durante o período do curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP),

Pela disponibilização de recursos, necessários para a realização do estudo desenvolvido neste trabalho.

Agradeço em especial à minha querida esposa Marlene Ap. D. de Carvalho Pagotto e minhas adoradas filhas Bianca Cristina de Carvalho Pagotto e Bruna Louise de Carvalho Pagotto, sem vocês nada disso seria possível.

Em especial agradeço ao meu orgulho, minha filha querida Aline Maria de Carvalho Pagotto, doutoranda em História pela UNESP de Franca, pela paciência e dedicação com que me atendeu neste aflito período de conclusão deste curso.

Obrigado a todos.

José Luís Pagotto

Capivari, 4 de Novembro de 2013

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais
voltará ao seu tamanho original.”
Albert Einstein

“Se o conhecimento pode criar problemas, não
é através da ignorância que podemos
solucioná-los”
Isaac Asimov

RESUMO

PAGOTTO, José Luís. Proposta de algoritmo adaptativo para transmissões de rede de sensores sem fio em ambiente industrial de manufatura metalúrgica. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2013.

A propagação do sinal entre os nós de uma rede de sensores sem fio em um ambiente industrial pode sofrer interferências do meio. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo realizado para definir um algoritmo que seja capaz de adequar o comportamento de uma rede de sensores sem fio operando dentro de um ambiente industrial. Este estudo foi realizado em ambientes com características específicas, sendo que os resultados permitiram o desenvolvimento de um algoritmo para adequação da comunicação à variabilidade do ambiente. Um possível benefício advindo deste algoritmo consiste em um aumento da confiabilidade da comunicação em relação ao ambiente.

Palavras-chave: Rede de sensores sem fio; Ambiente industrial; Algoritmo.

ABSTRACT

PAGOTTO, José Luis. Proposal for adaptive algorithm for network transmissions of wireless sensors in industrial manufacturing metalworking environment. In 2013. Dissertation (Master in Electrical Engineering) - Graduate Program in Management of Telecommunication Networks, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2013.

The signal propagation between nodes of a network of wireless sensors in an industrial environment can suffer interference from the environment. In this context, the present work shows a study to define an algorithm that is able to adapt the behavior of a wireless sensor network operating within an industrial environment. This study was conducted in environments with specific characteristics, and the results led to the development of an algorithm to adapt communication according to the variability of the environment. A possible benefit of this algorithm is the increase of the reliability of communication in such environments.

Keywords: Wireless Sensor Network; Industrial Environment; Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arquitetura a Rede de Sensor Sem Fio.....	19
Figura 2: Estrutura do Software da Rede de Sensor Sem Fio.....	19
Figura 3: Módulo BE 900.....	20
Figura 4: Base de programação USART.....	20
Figura 5: Diagrama da configuração de comunicação.....	20
Figura 6: Camadas de <i>software</i> de controle da rede do Nó sensor.....	22
Figura 7: Estrutura das camadas de <i>software</i> entre as pontas de comunicação.....	22
Figura 8: Difração do sinal.....	27
Figura 9: Configuração de comunicação ponto a ponto.....	29
Figura 10: Configuração em árvore, com a figura do Proxy ou do roteador, intermediando a entrega de dados coletados e mensagens transmitidas pela base.....	29
Figura 11: Configuração em malha (mesh), da mesma forma que a anterior com o elemento de intermediação de comunicação de dados, mas agora com a garantia da redundância entre os proxies ou roteadores.....	30
Figura 12: NIST Framework.....	32
Figura 13: Funções desempenhadas por um sistema de automação de distribuição.....	35
Figura 14: Empresa A, trefiladeiras.....	46
Figura 15: Empresa A.....	46
Figura 16: Empresa A – Pontes elevatórias	47
Figura 17: Empresa A – Lado contraposto da fábrica	47
Figura 18: Empresa A – Vista do chão de fábrica.....	48
Figura 19: Empresa A Visão Lateral.....	48
Figura 20:.. Empresa B – Visão geral do chão de fábrica.....	49
Figura 21: Empresa B – Máquinas estampadeiras	49
Figura 22: Empresa B – Máquina dobradeira no centro da área de fabricação.....	50
Figura 23: Empresa B – Produto em processo de fabricação.....	50
Figura 24: Empresa B – Produto acabado na expedição.....	51
Figura 25: Empresa B – Visão do sensor no chão de fábrica.....	51
Figura 26: Empresa B – Localização da base.....	52
Figura 27: Empresa B – Visão superior da Antena Yagi.....	52
Figura 28: Empresa B – Visão do módulo de coleta de dados.....	53
Figura 29: Empresa B – Visão genérica da visada da antena da base ao sensor.....	53
Figura 30: Sensor de corrente.....	55
Figura 31: Diagrama esquemático.....	55
Figura 32: Circuito auxiliar ao sensor de corrente.....	55
Figura 33: Diagrama esquemático do circuito sensor de tensão.....	56
Figura 34:Onda totalmente retificada e sem a tensão de <i>Ripple</i> e com tensão de saída de 1,6 volts para entrada de 127 V.....	57
Figura 35: Módulo Base UART.....	57
Figura 37:.. Kit DK 101.....	58
Figura 38: Kit DK 102.....	58
Figura 40: Cálculo do RSSI Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2011).....	61

Figura 41: Vista da direção da localização do sensor.....	62
Figura 42: Variação do sinal + fading em função da distância.....	63
Figura 43: Slow e fast fading.....	64
Figura 44: Modelo Log-normal Shadowing.....	66
Figura 45: Distribuição Gaussiana cumulativa.....	67
Figura 46: função densidade de probabilidade.....	68
Figura 47: Função de distribuição Gaussiana.....	68
Figura 48: Distribuição Gaussiana para desvio padrão 5 dB.....	69
Figura 49: Densidade de probabilidade.....	69
Figura 50: Diagrama da inicialização da comunicação.....	75
Figura 51: Diagrama de blocos do treinamento.....	76
Figura 52: Fluxo de cálculo e ajuste de potência de transmissão.....	78
Figura 53: Fluxo do regime de comunicação.....	79
Figura 54: Ajustes da janela de comunicação.....	80
Figura 55: Processamento no sensor.....	83
Figura 56: Simulação do sensor de corrente no PSPICE.....	85
Figura 57: Protótipo do sensor de corrente.....	86
Figura 58: Protótipo do sensor.....	86
Figura 59: Onda totalmente retificada e sem a tensão de Ripple e com tensão de saída de 1,6 volts.....	87
Figura 60: Onda totalmente retificada e sem a tensão de Ripple e com tensão de saída de 3,3 volts.....	87
Figura 61: Dispersão caracterizando níveis de potência do sinal recebido.....	88
Figura 62: Transmissão a + 10 dBm em horário de expediente, RSSI Uplink.....	92
Figura 63: Comportamento do sinal a 0 dBm.....	93
Figura 64: Comportamento da média móvel a 0 dBm.....	94
Figura 65: Comportamento do Desvio padrão móvel.....	94
Figura 66: Adaptação da potência do sinal + 5 dBm.....	95
Figura 67: Adaptação em três etapas.....	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Identificação das terminologias utilizadas.....	33
TABELA 2: Resumo dos requisitos das tecnologias sem fio(wireless).....	39
TABELA 3: Adequação das tecnologias sem fio (wireless).....	39
TABELA 4: Classes de Uso ISA-100.....	42
TABELA 5: Desvio padrão da log-normal em função do ambiente.....	66
TABELA 6: Resultados medidos em laboratório.....	85
TABELA 7: Classes de Uso ISA-100 Aplicável ao teste Empresa A.....	90
TABELA 8: Médias calculadas nos ensaios Empresa B.....	92

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Contextualização do problema.....	14
1.2 Justificativa.	15
1.3 Objetivo do trabalho.....	16
1.4 Resultados obtidos	16
1.5 Delimitação da pesquisa.....	16
2. REDES DE SENSORES SEM FIO	17
2.1 Software para aplicações embarcadas.....	17
2.2 Estrutura das redes de sensores sem fio.....	18
2.3 O padrão IEEE 802.15.4.....	20
2.4 Arquitetura de <i>hardware</i> da rede (Radiuino).....	20
2.5 A arquitetura de <i>software</i> da rede.....	21
2.6 RSSI, potência de transmissão e recepção.	23
2.7 Programação em ambientes fechados.	24
2.8 Estrutura da rede aplicada ao ambiente.	28
3. COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS EM AMBIENTE INDUSTRIAL E <i>SMART GRIDS</i>.....	30
3.1 Comunicação em <i>Smart grids</i>	30
3.1.1 Comunicação no sistema de distribuição.....	33
3.1.2 Comunicação dentro da premissa do cliente.....	35
3.1.3 Comunicação entre instalações do cliente e o local do Centro de distribuição.....	36
3.1.4 Matriz da Comunicação <i>Wireless</i>	37
3.2 Comparação entre as Tecnologias	38
3.3 O ambiente industrial	40
3.4 <i>International Society of Automation (ISA)</i>	41
3.4.1 Níveis de Criticidade (ISA 100.11a).....	41
4. MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DO SINAL EM AMBIENTE INDUSTRIAL.....	42
4.1 Modelo de propagação Long-normal <i>shadowing</i>	42
5. METODOLOGIA.....	45
5.1 Empresa A	45
5.2 Empresa B	49
5.3 Implementação dos Medidores.....	53
5.3.1 Sensor de corrente experimental.....	54
5.3.2 Sensor de tensão experimental.....	56
5.4 Método de medição das potências de <i>downlink e uplink</i>	57
5.5 Coleta de dados	61
5.6 Margem de Fading.....	63
5.7 Proposta de algoritmo adaptativo.....	70
6. RESULTADOS.....	93
6.1 Testes de Funcionamento dos Medidores (bancada).....	93
6.1.1 Sensor de corrente.	93
6.1.2 Sensor de tensão.....	94
6.1.3 Cálculo das médias e desvios padrões na empresa B.	96

7. CONCLUSÃO.....	97
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
9. APÊNDICES.....	102

1. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio (RSSF) vêm sendo amplamente empregadas tanto no meio acadêmico quanto no meio corporativo, devido ao conceito de aplicação abrangente nas mais diversas áreas de monitoramento residencial, comercial e industrial (CHOY, 2012). Podem ser tanto usadas para monitorar quanto controlar dispositivos das mais diversas aplicações. Aplicações de RSSF podem ser encontradas em monitoramento de luminosidade, temperatura e consumo de energia em ambientes construídos (CAMILO, 2012). Em diversas aplicações do conceito de *Smart Grid*, as RSSF são muito exploradas e podem oferecer diversas configurações para atender a particularidade de cada utilização (CPQD, 2012). O conceito de *Smart Grid* é caracterizado pela aplicação da tecnologia da informação no sistema elétrico de potência, onde elementos de comunicação (como as RSSF) transmitem informações de dispositivos instalados nas redes de energia elétrica, coletando informações de operação e desempenho, que também podem servir de base para sistemas de automação (LUIZ, 2010).

As RSSF também podem ser empregadas em ambientes industriais e nesse contexto, antes da instalação, deve-se atentar para os seguintes aspectos:

- Existência de obstáculos móveis e fixos
- Distância entre base e sensor

A análise desses aspectos visa garantir uma comunicação estável, neste ambiente. Desta maneira, o reconhecimento do ambiente pela rede e de suas possíveis variações, pode determinar o desempenho da mesma, seus níveis de segurança na entrega da informação, seu alcance e o nível de importância da aplicação no processo de fabricação, a quantidade de sensores ou *proxies* necessários à comunicação e o tipo de antena adequada ao local.

1.1. Contextualização do problema

Os modelos de propagação em ambientes fechados mais difundidos na literatura (RAPPAPORT,2005) prevêm comunicação com mobilidade, ou seja, transmissores ou receptores que podem se movimentar. Entretanto, em um ambiente industrial, mais

especificamente, de manufatura metalúrgica, objeto deste trabalho, os transmissores e receptores são fixos, enquanto que o ambiente no qual a RSSF será inserida pode variar bastante, incluindo a movimentação de equipamentos e peças na linha de montagem.

Assim é então necessário estabelecer um modelo para este tipo de comunicação. Uma forma de determinar se a comunicação em uma RSSF está adequada consiste em analisar o RSSI (*Received Signal Strength Indication*) nos nós sensores, uma vez que essa grandeza indica o valor de intensidade do sinal recebido, que pode ser medido a partir do sinal enviado da base para o nó sensor (*uplink*), assim como, a partir do sinal do nó sensor recebido pela base (*downlink*).

1.2. Justificativa

O limiar de sensibilidade de recepção tanto do sensor como da base é definido pelo nível de potência mais baixo, no qual ainda é possível a recepção dos dados.

Como o RSSI é o indicador que representa o nível de potência do sinal recebido, pode-se afirmar que um valor de RSSI muito baixo pode ficar aquém do limiar de sensibilidade do sensor (ou sensores), podendo comprometer a confiabilidade de uma RSSF, mesmo que o RSSI refira-se à energia e não à qualidade do sinal (FLORIDO, 2008).

O objetivo deste trabalho, então é observar indiretamente o comportamento dos sinais de rádio frequência, sobretudo, pela leitura do RSSI dentro do ambiente industrial. A observação do RSSI da RSSF tornará possível uma modelagem da comunicação no ambiente e o desenvolvimento de um algoritmo de tratamento do ambiente via *software*, de forma a permitir que a capacidade de processamento da base e do sensor seja utilizada para adequação à variação do ambiente, podendo diminuir não somente o custo, como também o tempo com a instalação e os testes necessários à montagem da RSSF. Mais ainda, o algoritmo a ser desenvolvido deverá garantir níveis adequados de integridade dos dados no processo de comunicação.

1.3. Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo adaptativo de forma a garantir a comunicação adequada em uma RSSF dentro de um ambiente industrial. Para tanto, é necessário identificar o comportamento de variáveis do ambiente que podem alterar ou influir na comunicação entre base e sensor, como por exemplo, o desvanecimento ou *Fading*, que, por ser aleatório, pode trazer efeitos imprevisíveis à comunicação.

Dentro deste propósito, foram estabelecidos quatro objetivos específicos:

- Estabelecer comunicação entre dois nós, formando uma RSSF, dentro do padrão IEEE 802.15.4;
- Medir e utilizar o RSSI como referência de estudo do sinal transmitido entre os dois pontos;
- Aplicar a rede em um ambiente industrial de manufatura metalúrgica, e coletar os dados da leitura em horários diversos dentro do período de trabalho da empresa;
- Desenvolver e implementar computacionalmente um algoritmo adaptativo de forma a haver uma adequação da comunicação à variação do ambiente.

1.4. Resultados obtidos

Como resultados obtidos, pode-se destacar:

- Formação de uma base de dados com o RSSI coletado a partir de uma RSSF inserida em um ambiente industrial;
- Desenvolvimento de um algoritmo adaptativo de forma a garantir a comunicação adequada em uma RSSF dentro de um ambiente industrial (com alto grau de variabilidade);
- Implementação computacional deste algoritmo adaptativo.

1.5. Delimitação da pesquisa

Neste trabalho, tanto base como sensores utilizam equipamentos BE 900, que possuem suas características e limitações específicas (BE 900, 2013). Os ambientes

onde foram realizados os experimentos consistem em duas empresas de manufatura metalúrgica, cujos nomes não serão identificados, por questões de sigilo industrial de processos de fabricação, sendo que as medições foram devidamente autorizadas pelos seus diretores.

2. REDES DE SENSORES SEM FIO

2.1. Software para aplicações embarcadas

A economia hoje em dia é movida principalmente pela informação e pelo conhecimento (Taurion,2005). A partir desse pressuposto, pode-se afirmar que o desenvolvimento de *software* é indiscutivelmente um segmento bastante dinâmico da indústria de computadores. Sua produção, que começou como um mero apêndice dessa mesma indústria, atualmente representa um setor dinâmico de crescente especialização (Taurion, 2005).

Ultimamente em diversas atividades realizadas no cotidiano, é possível identificar a presença de aplicações embarcadas – os *softwares* embarcados. Os exemplos são muitos, pois aparecem em tarefas cotidianas, como: nos celulares, nos automóveis, nas catracas eletrônicas e nos elevadores inteligentes.

Com a rápida evolução tecnológica, mais e mais equipamentos e dispositivos utilizarão sistemas de *software* embarcado, sistemas estes que também se tornarão mais sofisticados e complexos (TAURION, 2005).

Neste contexto, este trabalho aborda a inteligência que o *software* pode agregar às redes de sensores sem fio, uma vez que é o responsável pelo processamento das funções e algoritmos nas camadas do protocolo da rede e gerenciamento da leitura dos sensores.

2.2. Estrutura das Redes de Sensores sem Fio

A estrutura da rede é constituída a partir dos componentes de *hardware*, que interligados estabelecem a comunicação que desempenha as funções de sensoriamento remoto.

A Figura 1 ilustra uma rede de sensores sem fio, com a comunicação entre os nós sensores e a base. A função dos sensores é a leitura de dados através de transdutores eletrônicos, por exemplo, temperatura umidade, corrente, tensão, etc., processando os dados e formatando para a transmissão para o nó base, que por sua vez os encaminha a um computador convencional para o processamento da aplicação.

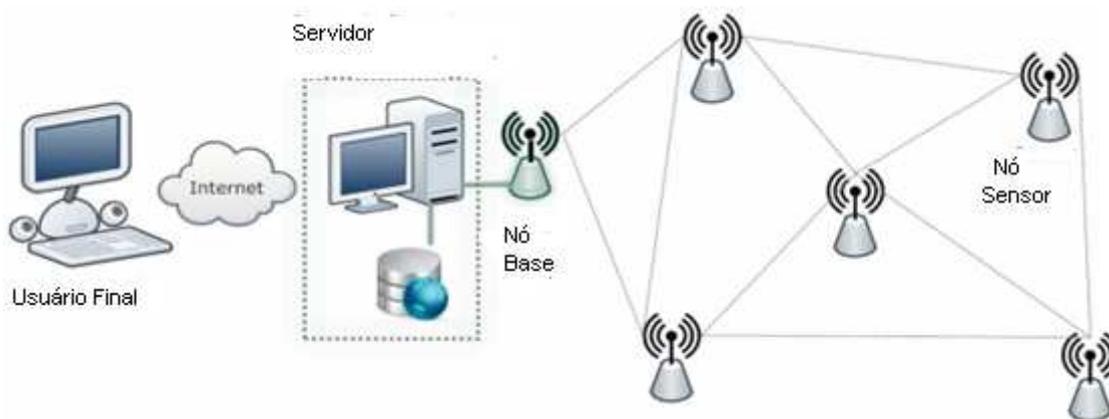


Figura 1 – Arquitetura da Rede de Sensor Sem Fio

A rede de sensor sem fio é implementada de forma a atender uma determinada aplicação, o que influencia diretamente sua arquitetura, configuração de *hardware*, consumo de energia, tempo de vida e atuação dos elementos de rede, protocolo de comunicação e função de cada nó da rede (FLORIDO, 2008). Esses fatores, portanto, compõem uma “macro-arquitetura” representada por três blocos de *software*, conforme ilustra a Figura 2 a seguir:

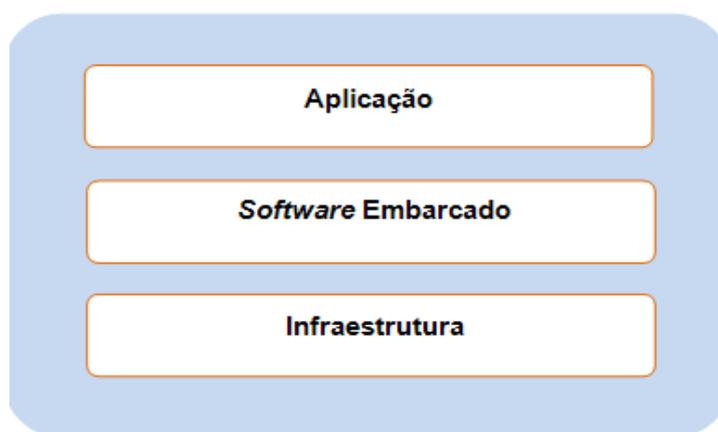


Figura 2 – Estrutura do *software* da Rede de Sensor Sem Fio
 Fonte: modificado de (FLORIDO, 2008)

A estrutura de *software* de comunicação é dividida em camadas, para assim, estabelecer a comunicação entre seus elementos. Um padrão que pode ser utilizado é o IEEE 802.15.4 (IEEE, 2001)

2.3. O Padrão IEEE 802.15.4

As redes de sensores sem fio – RSSF ou *Wireless Sensor Networks* (WSNs) –, no padrão IEEE 802.15.4, foram concebidas, em 2003, como redes padrão *Personal Area Network* (PAN), com baixo consumo, custo e velocidade.

Esse padrão define as especificações da camada física da rede (PHY) e o método de acesso para dispositivos de baixo consumo, inclusive, podendo operar na faixa *Industrial Scientific Medical* (ISM), com permissão para três frequências: 2.4 GHz (16 canais) a 250 Kbps, 915 MHz (10 canais) a 40 Kbps e, por fim, 868 MHz (01 canal) a 20 Kbps. As aplicações deste tipo de rede se expandiram para as mais variadas áreas incluindo a indústria e aplicações médicas (LUQUETA, 2012). Neste trabalho o foco é a indústria.

A principal vantagem da aplicação das RSSF no ambiente industrial está na mobilidade, pois não há necessidade de fiação, permitindo o deslocamento de sensores dentro da fábrica. As WSNs podem ainda ser compostas por um ou vários nós sensores estabelecendo uma comunicação plena entre eles, permitindo, assim, uma distribuição dos mesmos pelo ambiente visando garantir que a comunicação seja feita de forma adequada e com redundância.

2.4. Arquitetura de *hardware* da rede (Radiuino)

A Plataforma Radiuino (RADIUINO, 2012) foi criada, em 2010, por iniciativa do professor Dr. Omar Carvalho Branquinho ao tomar por base o ambiente de desenvolvimento Arduino (ARDUINO, 2011). Consiste em uma biblioteca preparada para realizar transmissões sem fio na banda de 915 MHz por intermédio do transceptor CC1101 da *Texas Instruments* (TEXAS,2012), integrada a um módulo Arduino via *Serial Peripheral Interface Bus* (SPI) e pinos de interrupção.

A plataforma utilizada é constituída pelo *firmware* do Arduino, um microcontrolador *Atmega 328* (ATMEL, 2012), e um conjunto de componentes que tem por base o transceptor CC1101. Para os testes em campo foram utilizados módulos BE 900 (BE900,2013) que possuem homologação Anatel para operação em território brasileiro.

A Figura 3 ilustra um BE 900.



Figura 3 – Módulo BE 900 (RADIOIT, 2012)

A Figura 4 a seguir ilustra a base de programação USART, utilizada para carregar no módulo BE 900, a programação desenvolvida em uma interface própria e idêntica à do ARDUINO.



Figura 4 - Base de programação USART (RADIOIT, 2012)

A Figura 5 a seguir ilustra o diagrama de blocos da operação conjunta entre a base e o receptor, sendo a base interligada a um computador pela interface serial (USB) que se comunica do o nó sensor, conforme citado anteriormente.



Figura 5 – Diagrama da configuração de comunicação

2.5. Arquitetura de *Software* da rede

A estrutura do *software* do Radiumo possui uma pilha de protocolos, que se dividem em camadas, de forma semelhante aos modelos existentes, como por exemplo, o

TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) (COMER,1998), cada uma com suas funcionalidades específicas.

A base possui apenas as camadas físicas, MAC e rede, já que as aplicações com os dados recebidos são tratados por um microcomputador conectado à mesma ou por USB ou por rede de comunicação Ethernet, WAN, WEB, etc.. Já o nó sensor possui as camadas: física (MAC), rede (Net), transporte e Aplicação, camada esta onde são processados e tratados os dados coletados para posterior transmissão.

A Figura 6 ilustra em diagrama de blocos esta divisão em camadas e a Figura 7 as camadas aplicadas ao sensor e à base:

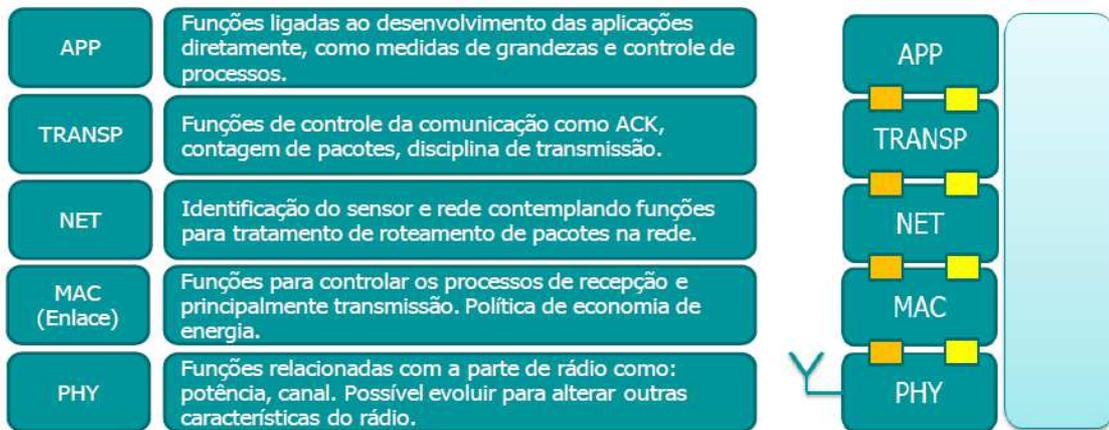


Figura 6 Camadas de *software* de controle da rede do Nó Sensor (RADIOINO, 2012)

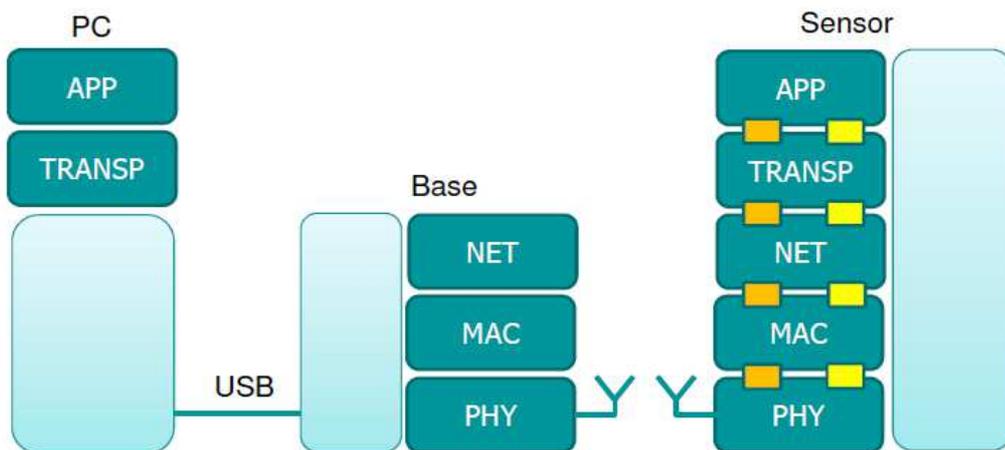


Figura 7. Estrutura das camadas de *software* aplicadas à base e as do sensor (RADIOINO, 2012).

2.6. RSSI, Potência de transmissão e Recepção.

Transmissões em rádio frequência por sua própria natureza têm limitações que não podem deixar de ser analisadas, principalmente para o desempenho em sistemas de comunicação de dados sem fio. Na literatura foram desenvolvidos muitos modelos que tentam expressar o funcionamento dos canais de rádio em vários tipos de ambientes. A modelagem destes canais se dá por uso de métodos empíricos bastante difundidos (RAPPAPORT, 2005).

O tratamento matemático da potência de transmissões de redes de sensores sem fio (rádio frequência) é estabelecido por equações expressas em decibéis. A potência do sinal transmitido é inicialmente expressa em miliWatts (mW) por se tratarem de equipamentos alimentados por baterias. (GIACOMIN; VASCOCELOS, 2006).

Em eletrônica trata-se a relação de potências de entrada e saída de um equipamento em decibel (dB), com a finalidade de acompanhar uma escala exponencial de variação dos sinais elétricos de forma linear, conforme a Equação (1):

$$P[\text{dB}] = 10 \left(\frac{P_{\text{saída}} (\text{W})}{P_{\text{entrada}} (\text{W})} \right) \log \quad (1)$$

A partir da Equação (1), pode-se observar que é possível encontrar, como resultado da mesma, valores positivos e negativos, de acordo com a relação entre as potências do transmissor ou receptor. Em razão dos níveis de potência serem tratados em mW, é possível definir uma unidade para o tratamentos desta razão de potências, o dBm (decibel miliWatt) conforme Equação (2):

$$P[\text{dbm}] = 10 \left(\frac{P (\text{mW})}{1 \text{ mW}} \right) \log \quad (2)$$

No contexto de rádio frequência, os nós sensores possuem circuitos integrados específicos, com capacidade para coletar informação da intensidade do sinal recebido *Radio Signal Strength Indicator* (RSSI). O RSSI é um valor estimado do nível de potência recebido pelo receptor e, assim essa informação sobre o sinal é armazenado em um

registrador de trabalho do processador de sinais até que seja recebido um novo sinal. Os valores apresentados no pacote de transmissão já são convertidos em dBm (*TEXAS INSTRUMENTS*, 2011).

O RSSI vem sendo muito utilizado em pesquisas aplicadas em RSSF nas mais diversas áreas, como estudo de diferentes meios de propagação, análise de desempenho de *hardware*, estudo de posicionamento dos nós que formam a rede e localização dinâmica dos nós (GRACIOLI, 2011).

2.7. Propagação em ambientes fechados (*Indoor*)

Em qualquer sistema de comunicação, o sinal recebido é diferente do sinal transmitido, devido a vários fenômenos que interferem na transmissão. Para sinais analógicos, estas interferências introduzem alterações aleatórias, que degradam a qualidade do sinal. No caso de dados digitais, são introduzidos erros de bits: o binário 1 pode ser transformado no binário 0, e vice-versa (STALLINGS, 2005). Estes fenômenos serão descritos a seguir assim como os efeitos que podem causar na comunicação por rádio frequência.

- **Atenuação**

A intensidade de um sinal cai com a distância ao longo de qualquer meio de transmissão. Para meios não guiados, a atenuação é uma função mais complexa da distância e da composição da atmosfera. A atenuação apresenta três características que devem ser analisadas:

- a) Um sinal recebido deve ter potência suficiente de modo que os circuitos eletrônicos do receptor possam detectar e interpretar o sinal.
- b) O sinal deve manter um nível de potência suficientemente mais elevado do que o ruído (relação sinal-ruído) para que seja recebido sem erro.
- c) A atenuação é maior em frequências mais altas, causando distorção no sinal recebido.

Os dois primeiros efeitos são em relação à potência de transmissão e à possibilidade de uso de amplificadores ou repetidores. Para uma transmissão ponto a ponto (um transmissor e um receptor), a intensidade do sinal do transmissor tem de ser

suficientemente forte para o sinal ser recebido de forma inteligível, mas não tão forte a ponto de causar sobrecarga do circuito do transmissor ou do receptor, provocando erros na interpretação dos dados recebidos. Além de certa distância, a atenuação torna-se excessiva, e os repetidores ou amplificadores são utilizados para aumentar o sinal em intervalos regulares. Estes problemas são mais complexos quando há múltiplos receptores, onde a distância entre o transmissor e o receptor é variável. O segundo elemento é dependente dos ruídos elétricos presentes no ambiente. Quando a diferença de magnitude, em termos de potência de sinal, entre ruído e sinal de dados é muito próxima, o receptor pode não conseguir separá-los, gerando erros na recepção e retransmissões por pacotes de dados perdidos.

A terceira característica é conhecida como a distorção de atenuação. Devido à atenuação variar como uma função da frequência, o sinal recebido é distorcido, reduzindo sua inteligibilidade. Especificamente, os componentes de frequência do sinal recebido têm diferentes potências e, para resolver este problema, as técnicas disponíveis são métodos de equalizar a atenuação através de uma banda de frequências. Uma abordagem possível é usar amplificadores que amplificam altas frequências (STALLINGS, 2005).

No espaço livre, o modelo de propagação proposto por Harald Trap Friis em 1946, considera que a potência recebida por um dispositivo é diretamente proporcional à potência transmitida, à abertura das antenas de transmissão e recepção e inversamente proporcional atenuação no espaço livre (em função da distância entre o transmissor e receptor e da frequência de operação) (HAYKIN; MOHER, 2008). Matematicamente, esse modelo pode ser dado pela Equação (3):

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{L_{EL}} \quad (3)$$

Onde:

P_{RX} = Potência no receptor (W)

P_{TX} = Potência no transmissor (W)

G_{TX} = Ganho da antena de transmissão (W)

G_{RX} = Ganho da antena de recepção (W)

λ = comprimento de onda do sinal (m)

d = distância entre as antenas (m)

L_{EL} = atenuação no espaço livre (dB)

A mesma equação pode ser apresentada em dBm pela Equação (4), como consequência das propriedades matemáticas do logaritmo:

$$P_{RXdBm} = P_{TXdBm} + G_{TXdBi} + G_{RXdBi} - L_{ELdB} \quad (4)$$

P_{RXdBm} = Potência de recepção em dBm

P_{TXdBm} = Potência de transmissão em dBm

G_{TXdBi} = Ganho da antena no transmissor em dBi

G_{RXdBi} = Ganho na antena no receptor em dBi

L_{ELdB} = Perdas no sinal causadas pelo meio em dB

A medida de potência da antena em dBi é o ganho relativo a uma antena isotrópica que utiliza uma construção teórica chamada irradiador isotrópico, o qual representa uma fonte esférica de energia de RF que irradia igualmente bem em todas as direções. (MUNDO WIFI, 2013)

- **Reflexão**

A reflexão é outro fenômeno que pode ocorrer no sinal transmitido, dependendo do material dos obstáculos que se encontram na direção do sinal. Ocorre a reflexão quando o sinal entra em contato com superfícies existentes na área de propagação e não consegue atravessá-las. O sinal refletido segue a trajetória com o mesmo ângulo do sinal transmitido, em relação a uma linha perpendicular à superfície do obstáculo (PERES, 2010).

Com a reflexão pode ocorrer um fenômeno chamado de multipercurso entre emissor e receptor, no qual o sinal chega ao receptor replicado mas com fases diferentes causando interferências no sinal recebido devido à defasagem no momento da reflexão. Mas o fenômeno de reflexão também pode ser utilizado para contribuir no percurso de transmissão do sinal, com a instalação de superfícies refletivas em pontos estratégicos quando são utilizadas antenas direcionais (PERES, 2010).

- **Refração**

A refração é um fenômeno que interfere na direção do sinal quando o sinal propagado passa de um meio para outro com densidade diferente, causando uma diferença no ângulo de propagação do sinal, que pode comprometer as características do sinal transmitido de acordo com a diferença de densidade dos materiais no meio de propagação.

- **Difração**

A difração é um fenômeno que ocorre na propagação do sinal, quando são geradas novas ondas de acordo com a colisão de obstáculos presentes no meio. Essas novas ondas podem preencher áreas que não estão na linha de visada entre emissor e receptor. Com isso, o sinal pode ser recebido, mas com alterações geradas pelas condições do meio. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 8.

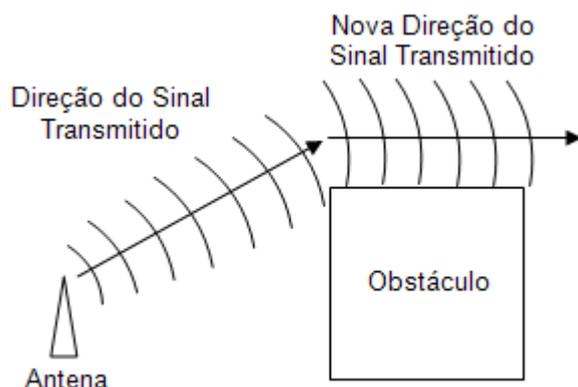


Figura 8 – Difração do sinal.

- **Desvanecimento (Fading)**

As flutuações rápidas do sinal são denominadas desvanecimento em pequena escala, associadas ao multipercurso. À variação mais suave e lenta dá-se a denominação de desvanecimento em larga escala, associada ao sombreamento por obstáculos. Aliado aos dois comportamentos do sinal há, ainda, naturalmente, a tendência de queda do nível segundo algum expoente de atenuação com a distância, variante conforme o ambiente. A seguir, serão agora detalhados os desvanecimentos em larga e pequena escala (RAPPAPORT, 2005).

- **Desvanecimento em larga escala**

O desvanecimento em larga escala está relacionado às características de propagação que manifestam seus efeitos no sinal ao longo de médias e grandes

distâncias, comparadas com o comprimento de onda do sinal. Mesmo sem movimentação do receptor, o desvanecimento em larga escala pode ocorrer devido a alterações significativas no ambiente como, por exemplo, variações temporais no índice de refração da atmosfera.

Esse tipo de desvanecimento é também conhecido por sombreamento (*shadowing*), pois ele está mais relacionado a obstruções naturais (relevo e vegetação) e a construções, como casas e edifícios, que fazem com que o dispositivo de comunicação móvel fique em uma região de sombra eletromagnética (ou de nível de sinal bastante reduzido) quando há obstrução. Quando é obstruído, o sinal chega ao receptor basicamente através de difração e espalhamento, e a amplitude do sinal assim recebido segue uma função de densidade de probabilidade (fdp) Normal (ou log-normal, em dB), ou Gaussiana (RODRIGUES, 2000).

- **Desvanecimento em pequena escala**

O desvanecimento em pequena escala (*small fading*) é definido como uma rápida flutuação do sinal por um pequeno período de tempo. Sua causa é a chegada de duas versões do sinal transmitido ao receptor com uma pequena diferença de tempo. Estes sinais são chamados de ondas multi caminhos (*multipath waves*) que têm como resultante sinais cujas amplitudes e fases podem variar. Causam mudanças rápidas na intensidade do sinal, para curtas distâncias ou pequenos intervalos de tempo (RAPPAPORT,2005)

2.8. Estrutura da rede aplicada ao ambiente

A arquitetura das redes de sensores sem fio pode ser construída em estruturas heterogêneas e seu projeto pode ser adequado às condições do ambiente influenciado por fatores como:

- Meio de transmissão (obstáculos, ruídos, relação sinal ruído, etc.).
- Tolerância a falhas (nível de criticidade da informação coletada, correção de erros, redundância, etc.).
- Topologia que melhor se adéqua ao ambiente, limites do *hardware*, etc.
- Escalabilidade
- Consumo de energia

- Latência
- Precisão

Estas redes podem ser do tipo ponto a ponto ou multiponto. Neste trabalho, por se tratar de ambiente hostil a este tipo de comunicação (muito ruído eletromagnético causado por equipamentos elétricos, movimentação de pessoas e componentes metálicos) e considerando o aspecto de relevância da leitura do sensor, pode-se pensar em configuração de malha (*mesh*) com redundância em caso de aplicação crítica.

A Figura 9 ilustra a estrutura da comunicação ponto a ponto utilizada nos testes deste trabalho em ambiente industrial de manufatura metalúrgica.

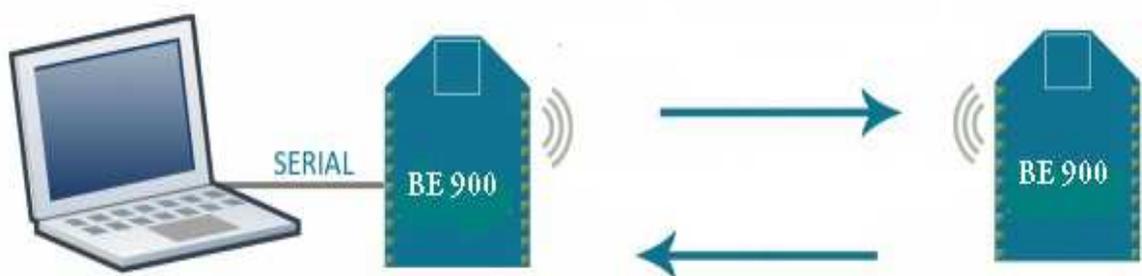


Figura 9 - Configuração de comunicação ponto a ponto

Podem ser projetadas outras estruturas de redes, conforme já citado de acordo com as necessidades da aplicação desenvolvida. As figuras a seguir ilustram essas possibilidades. A Figura 10 ilustra uma configuração estrela, onde a base é o ponto central da comunicação.

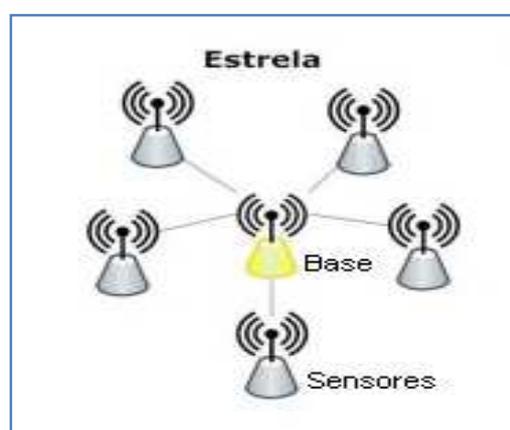


Figura 10 - Configuração em árvore, com a figura do Proxy ou do roteador, intermediando a entrega de dados coletados e mensagens transmitidas pela base.

Neste caso, o método de acesso aos sensores pode ser o de requisição ou *polling*, admitindo aplicações críticas, mas de uma latência da ordem de segundos (DOE-2010)

A figura seguinte apresenta possibilidades de configurações que podem ser implementadas com um elemento fazendo a intermediação entre sensores e base, podendo atuar simplesmente com proxies ou roteando dados (RODRIGUES,2010).

A Figura 11 ilustra uma arquitetura de comunicação em malha (*mesh*), onde existem elementos intermediários operando com agentes intermediários da comunicação (proxies)

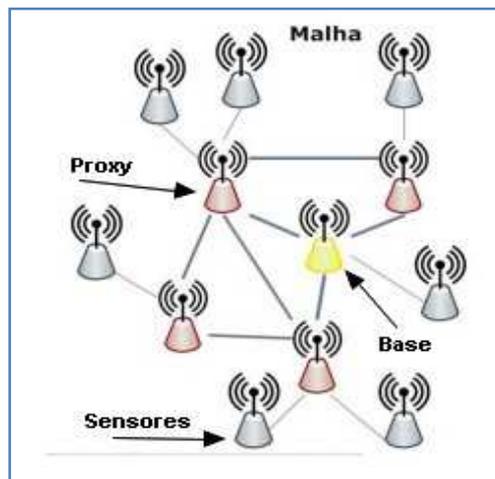


Figura 11 - Configuração em malha (*mesh*), da mesma forma que a anterior com o elemento de intermediação de comunicação de dados, mas agora com a garantia da redundância entre os proxies ou roteadores.

3. COMUNICAÇÃO SEM FIO EM AMBIENTE INDUSTRIAL E SMART GRIDS

O objetivo deste capítulo é situar a RSSF dentro do conceito de *Smart Grids* e descrever as características da comunicação em ambientes industriais através de duas abordagens: a primeira considerando o ponto de vista da *International Society of Automation* (ISA) e outra considerando o ponto de vista do *Department of Energy* (DOE) dos Estados Unidos baseado no *National Institute for Standards and Technology* (NIST). Além disto, este capítulo tem por objetivo descrever os locais onde foram realizados os testes.

3.1 Comunicações em *Smart Grids*

O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, o *National Institute for Standards and Technology* (NIST), publicou o *framework* de interoperabilidade para *Smart Grids* (redes inteligentes) em setembro de 2009. Os elementos que formam o *Smart Grid* são ilustrados pelo na Figura 12.

Esta figura mostra o fluxo conceitual de informação no *Smart Grid*. Informações de monitoramento se originam na casa do consumidor, as redes de transmissão e distribuição, e nas estruturas de recursos. Esta informação é então fornecida para as operações e aplicações de negócios. Tráfego de comando e controle origina-se na estrutura da rede que controla aplicações de operações e flui através da rede de comunicação para o centro de controle de transmissão e distribuição.

No sistema de energia elétrica, a quantidade de dados de monitoramento (aquisição de dados) normalmente excede a quantidade de dados relativos a comandos e controles em uma razão significativa, principalmente pela quantidade de dispositivos monitorados. Isto significa que o volume do tráfego de comunicação será dominado pela de aquisição de dados. Por outro lado, a exigência de comunicações confiáveis e rápidas é uma necessidade para dados de comandos e controle ou tráfego de saída do centro de operações, embora seu volume seja bem menor.

Dados de comandos, controle e faturamento requerem alto grau de segurança no canal. Já as informações geradas nos consumidores, não necessitam de alto grau de segurança, por se tratarem de apenas leitura da dados (não envolvem comandos que

poderiam ser críticos em caso de interferência externa à rede). A Figura 12 ilustra em diagrama de blocos as divisões dos setores operacionais, na visão do NIST, em DOE, 2013 ela pode ser visualizada com mais detalhes.

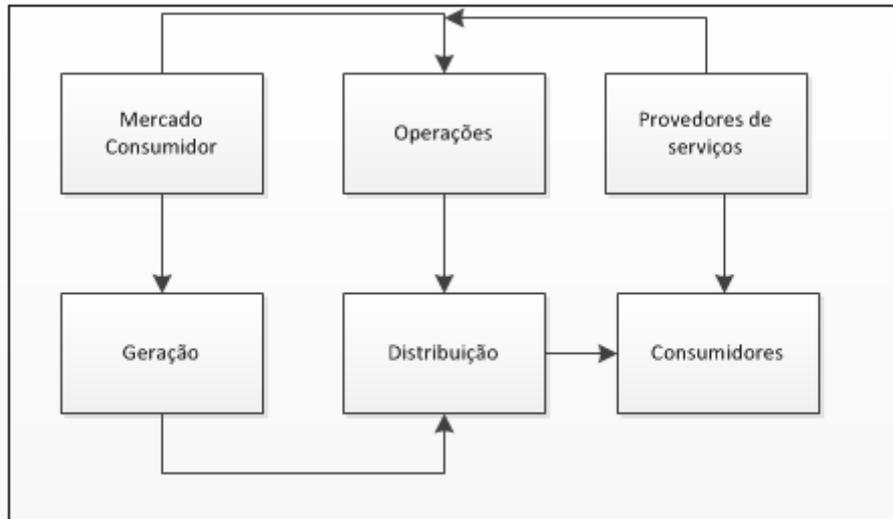


Figura 12 – NIST Framework (DOE, 2013) Modificado

A Tabela 1 define os requisitos da comunicação entre as várias partes no processo identificado no Framework da NIST. Estes requisitos são aplicados nas áreas de aplicação como: residencial, sistema de distribuição, subestações, sistema de transmissão e geração.

Tabela 1. Identificação das terminologias utilizadas (DOE, 2013)

Área de identificação	Taxa de transmissão (média)	Latência (média)	Confiabilidade	Segurança	Distância	Escalabilidade
Baixa	< 500 Kbps	< 250 ms	A perda de pacotes é aceitável. Espera-se que as aplicações sejam capazes de recuperar estes pacotes, ainda que haja atrasos na comunicação	Texto puro. Verificações de integridade pode ou não ser utilizada.	< 100 metros	< 100 Nós / Backhaul Node
Moderada	500 Kbps – 1500 Kbps	250 – 1 s	Perda mínima de pacotes é aceitável	Confidencialidade, pode ser necessário. Verificação de integridade é exigida.	100 a 1000 metros	100 – 1000 nós / Backhaul nodes
Alta	> 1500 Kbps	> 1s	Comunicações totalmente confiáveis com recuperação de erros na camada de enlace de dados.	Confidencialidade e integridade são exigidas.	>1000 metros	> 1000 nós / Backhaul nodes

Na tabela 1, *Backhaul* é a porção de uma rede hierárquica e telecomunicações responsável por fazer a ligação entre o núcleo da rede, ou *backbone*, e as sub redes periféricas. Por exemplo, em uma rede de telefonia celular, enquanto uma única torre de célula constitui a sub rede local, a conexão dessa torre ao restante do mundo é feita por um link *backhaul* ao núcleo da rede a companhia telefônica (TELECO 2013).

Latência é o tempo que leva para um pacote trafegar desde a origem até o destino e retornar à origem. Exclui-se o tempo de processamento no destino. Latência, ainda, inclui o tempo de acesso à mídia, quaisquer filas e atrasos de propagação (IME USO 2013)

3.1.1 Comunicação no sistema de distribuição

Fora da subestação, a maior parte do sistema de distribuição opera sem ser monitorado e sem automação. No entanto, no contexto do conceito de *Smart Grid*, a

tendência é a de que o sistema de distribuição torne-se mais monitorado com a conseqüente incorporação de mais controles.

As aplicações de controle na parte média e na baixa tensão do fornecimento de energia são normalmente chamadas de “automação de distribuição”, sendo compostas por funções do tipo:

- Gerenciamento da carga dos consumidores
- Monitoramento do desempenho do sistema
- Leitura dos medidores de consumo várias vezes por hora
- Detecção dos desvios de energia
- Controle da tensão do sistema
- Detecção de interrupções no fornecimento de energia
- Reconfiguração do sistema após falhas
- Balanceamento de cargas
- Coletas de dados para o sistema de planejamento

Cada uma destas funções tem seus próprios requisitos de comunicação. Com o propósito de discutir comunicações, a automação da distribuição pode ser dividida em três partes:

1. A subestação de distribuição, incluindo os transformadores, condutores e disjuntores que permitem a distribuição da energia para fora da subestação.
2. Os alimentadores de baixa tensão e transformadores, ou seja, o equipamento até o medidor de energia do consumidor.
3. O equipamento do lado do medidor do cliente, incluindo o equipamento de controle de carga e de geração do próprio cliente.

A Figura 13 ilustra algumas das funções desempenhadas por um sistema de automação de distribuição.

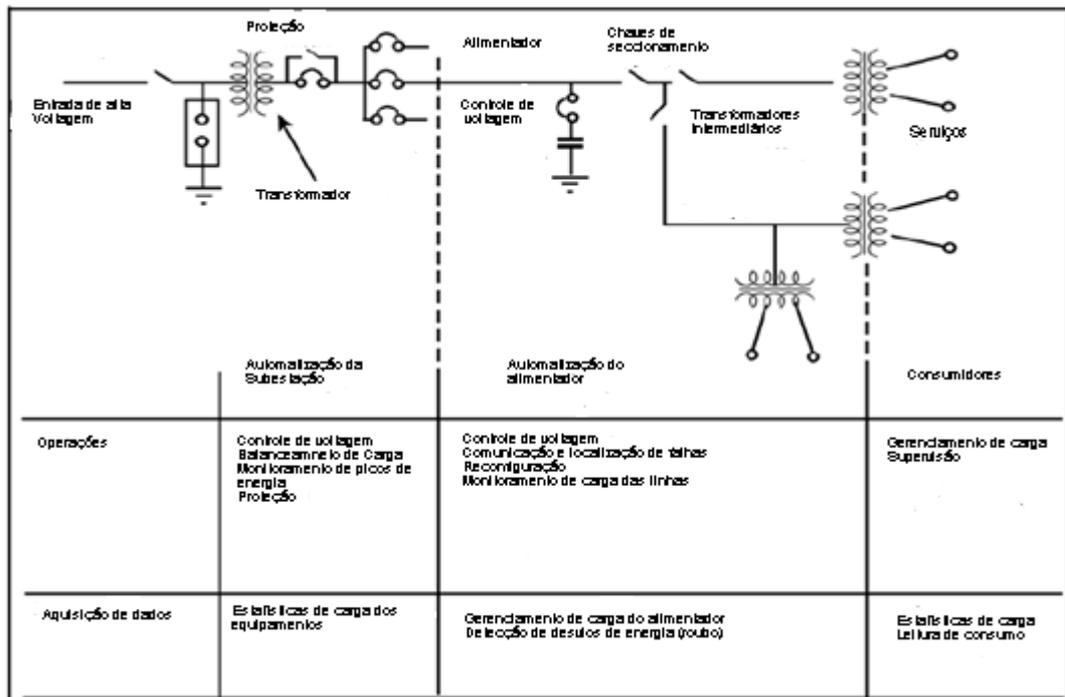


Figura 13 - Funções desempenhadas por um sistema de automação de distribuição, (Modificado:DOE, 2010)

3.1.2 Comunicação dentro de uma premissa do cliente

Este tópico ilustra comunicações dentro de uma premissa do cliente no contexto de implantação de uma rede inteligente. Os nós de redes inteligentes *Smart Grids Nodes* (SGNs) em uma premissa de clientes incluem grandes e pequenos eletrodomésticos como ventilação e ar condicionado, aquecedores de água, aparelhos de entretenimento, *plug-in* de carregadores de veículo, computadores e o medidor inteligente. O medidor inteligente se comunica com os SGNs para coletar informações e para distribuir os dados de medição. Esta aplicação requer baixas taxas de dados porque a quantidade de informações trocadas não é grande, mas precisa de alta segurança para proteger as informações dos clientes. O requisito de confiabilidade é moderado. É aceitável perder alguns pacotes de vez em quando, mas o sistema precisa para funcionar bem o suficiente para trazer benefícios para ambos o cliente e a concessionária.

Nessa condição, pode haver interferência entre uma série de dispositivos *wireless*, incluindo redes locais sem fio e celulares, controles remotos de rádio frequência, *Bluetooth*, microondas, etc. As opções de comunicação disponíveis incluem *wireless* e

comunicação através dos circuitos de transmissão (*powerline*). Redes com fio, como *Ethernet* são demasiadamente restritivas para serem usadas na maioria das residências para SGNs devido à falta de conexão *Ethernet* nos equipamentos. Neste caso, comunicações de alta latência são aceitáveis. Note-se que qualquer esquema de comunicação usado dentro de uma residência deve permitir que o proprietário da residência decida quais dispositivos estão "em rede" e quais não estão. Especificamente, em áreas de alta densidade populacional, o medidor inteligente deve ser capaz de diferenciar SGNs que pertencem a cada proprietário residência. A rede sem fio deve atender a todos estes requisitos, e de fato *Home Area Network* (HANs), estão sendo construídos com base nos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4. Há também residências que utilizam a própria fiação de energia para a comunicação (DOE, 2010).

3.1.3 A comunicação entre as instalações do cliente e o local do Centro de Controle de Distribuição

Nessa aplicação, ocorre a conexão de SGNs à concessionária de energia. Inicialmente previa-se que um dispositivo habilitado para SGNs na residência devia se comunicar diretamente de com o centro de operações de distribuição, mas esta abordagem não é usada atualmente (DOE, 2010). Ao invés disso, o medidor inteligente no local do cliente atua como um *gateway* que traduz, resume e agrega os dados do local e entrega para a concessionária de energia local. Este tráfego pode ser enviado através de uma rede com ou sem fio para o centro de operações. Além disso, o medidor inteligente transfere os dados de custo da concessionária de energia aos dispositivos locais. Está previsto que as taxas de dados para esta aplicação podem ser de baixa a moderada, dependendo do número de dispositivos na rede (DOE, 2010). Uma sessão individual pode apresentar uma baixa taxa de dados, dependendo da frequência de comunicação, mas a rede tem de suportar centenas de sessões simultâneas. A rede deve ser bastante confiável e altamente segura, uma vez que irá conter dados de faturamento. Este exemplo também requer robustez no que diz respeito à perda de nós intermediários e de interferência.

As interferências esperadas podem ser provenientes de redes celulares e sem fio, frequência de rádio, *Bluetooth*, microondas, etc. As opções de comunicação são redes

com fio (DSL, *cable modem powerline*) e redes sem fio, como celulares, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 redes. Já a latência não é um fator importante neste exemplo, pois se tratam de aplicações que o tempo para a recepção dos dados não é crítico, uma vez que as leituras são acumulativas e o fechamento da leitura final é mensal.

3.1.4 Matriz da Comunicação *Wireless*

Esta seção define onde a comunicação wireless pode ser empregada de forma satisfatória. Uma observação interessante, sobre a comunicação em sistemas elétricos é a variedade de ambientes (regiões geográficas), área de cobertura e densidade populacional. Portanto a implementação da comunicação *wireless* deve ser baseada em uma análise de requisitos específicos, considerando a região geográfica, área de cobertura e a densidade populacional do local onde a rede será implementada.

Neste contexto, latência, largura de banda, segurança, escalabilidade, cobertura e expectativa de vida da tecnologia são critérios que devem ser usados no contexto de sistemas elétricos. Estes critérios serão definidos nos parágrafos que se seguem.

Latência, tal como definido anteriormente, é o tempo de ida e volta que é observada quando há comunicação entre dois pontos, transmissor e receptor, e é medida em segundos (s ou ms).

A Largura de banda é a capacidade de transferência de informação do canal. A largura de banda de uma rede sem fio pode ser muito diferente da observada na realidade, devido a diversas causas, como por exemplo, falta de disponibilidade momentânea do canal e congestionamento e é medida em número de bits úteis por unidade de tempo. Enquanto uma rede sem fio pode oferecer transferência confiável de informações por meio de um mecanismo de recuperação, o uso de recuperação de erros via retransmissões pode afetar a latência total e rendimento observado por um aplicativo.

A Resiliência de uma rede sem fio é a resistência à interferência que pode ser aleatória ou dirigida (ou ambas). Inclui também o comportamento de recuperação durante um evento catastrófico, tal como um tremor de terra.

A Segurança de uma rede sem fio inclui a resistência à adulteração de mensagens, preservando a confidencialidade das informações e impedindo o acesso não autorizado à rede. Para ser considerada segura, uma rede sem fio deve ter a capacidade de fazer a

autenticação mútua de clientes e servidores, protocolos seguros e chaves de criptografias também seguras.

A Área de cobertura e a Escalabilidade de uma rede sem fio determina onde se encaixa no SGNs, pois, em caso de expansão a tecnologia deve permitir esta possibilidade. A tecnologia sem fio em áreas residenciais, como *ZigBee*, pode não ser adequada para uso em instalações de transmissão de monitoramento que poderia abranger centenas de quilômetros quadrados de uma área de cobertura. A Escalabilidade é um requisito importante para a infraestrutura de medição. As concessionárias devem ser capazes de sondar seus medidores com frequência e rapidez, demonstrando eficiência de mercado.

A expectativa de vida da tecnologia é especialmente importante para a implementação do SGNs. Algumas redes sem fio evoluem muito rapidamente. Por exemplo, o primeiro padrão de telefonia celular digital implantado foi descontinuado depois de apenas alguns anos, em virtude do aumento da demanda e do aparecimento de novas tecnologias que permitiram um aumento substancial no número de conexões e largura de banda (TECMUNDO, 2013). Como o equipamento implantado no sistema de alimentação tem uma expectativa de vida de dezenas de anos ou mais de vida, os desenvolvedores devem considerar a expectativa de vida da tecnologia antes de tomar uma decisão.

3.2 Comparação entre as Tecnologias

A Tabela 2 define os limites para os requisitos na comunicação sem fio para este tipo de aplicação: *Smart Grids*. Os limiares para as tecnologias estão ilustrados na Tabela 2 como *low* (L – baixo) e *high* (H, alto) de forma a orientar a escolha dos ambientes onde serão usadas.

Resumo das Tecnologias Wireless

	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e	IEEE 802.17a	IEEE 802.17b	IEEE 802.17g	IEEE 802.17n	WirelessHART	ISA 100.11a	Zigbee	GPWS/EDGE	TD-RTT	HSPA/UMTS	EVDO	LTE/HSPA+
	WIMAX	WIFI				IEEE 802.15.4	2.5G		3G		4G			
Latência	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	M	M	M	L
Taxa de dados	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	M	M	H
Resiliência	H	H	M	L	L	M	M	M	M	H	H	H	H	H
Segurança	H	H	M	M	M	M	H	H	M	H	L	H	L	H
Distância (alcance)	H	H	L	L	L	M	L	L	L	H	H	H	H	H
Escalabilidade	H	H	M	L	L	M	M	M	L	M	M	H	H	H

Tabela 2 - Resumo dos requisitos das tecnologias sem fio (*wireless*) (DOE, 2013)

A Tabela 3 a seguir, estabelece onde cada tecnologia de comunicação pode ser aplicada. No conceito *Smart Grid* há, dentro da aplicação, aspectos definidos na tabela, como, por exemplo, reconfiguração dos alimentadores (*Feeder Reconfiguration*), que são comandos de configuração da distribuição de energia que exigem parâmetros de comunicação que a tecnologia tem que suprir.

Tabela 3 – Adequação das tecnologias sem fio (*wireless*)

	WIMAX	WIFI	Wireless Hart	ISA 100.11a	Zigbee	HSPA/EDVO	LTE/HSPA+UMTS
				IEEE 802.15.4			
Reconfiguração do alimentador	Aplicável (1)	Não aplicável (2,4)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2,3)	Aplicável (1)	Aplicável (1)
No consumidor	Não aplicável (5)	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Não aplicável (5)	Não aplicável (5)
Do consumidor para o controle	Aplicável (1)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2)	Aplicável (1)	Aplicável (1)
Na planta da geração	Não aplicável (5)	Monitoramento e Agregação de sensores	Rede de sensores	Rede de sensores	Não aplicável (3)	Não aplicável (5)	Não aplicável (5)
Do sistema de transmissão para controle	Aplicável (1)	Não aplicável (2,4)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2,3)	Aplicável (1)	Aplicável (1)
Da geração para o controle	Aplicável (1)	Não aplicável (2,4)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2)	Não aplicável (2,3)	Aplicável (1)	Aplicável (1)

1. Redes *WANs* (*Wide Area Networks*) podem ser sobrecarregadas por eventos catastróficos ou até por eventos de grande público.
2. Esta tecnologia não possui a área de cobertura geográfica necessária.

3. Esta tecnologia não oferece a segurança necessária.
4. Espectro não licenciado é suscetível a interferência significativa.
5. Tecnologia não adequada para uso área restrita.

3.3 O ambiente industrial

Dentro do conceito de *Smart Grids* o monitoramento de um ambiente industrial aparece como outra possibilidade da aplicação. Neste sentido, uma RSSF utilizada para trafegar informações associadas a dados utilizados pelas redes inteligentes pode também ser empregada para monitorar grandezas de interesse no ambiente industrial como temperatura, umidade, etc..

Neste contexto, o ambiente industrial, objeto de estudo deste trabalho, pode ser considerado como um ambiente hostil a comunicações via rádio frequência em virtude da forte presença de fontes de interferência eletromagnética e da alta mobilidade de recursos humanos e materiais.

É importante ressaltar que nesses ambientes agressivos, os produtos químicos, vibrações, ou translados de produtos em processos de fabricação podem danificar qualquer tipo de cabeamento. Em termos de flexibilidade das plantas fabris, sistemas estacionários sem fios podem ser acoplados a sistemas celulares inclusive móveis, (robôs, por exemplo) a fim de conseguir conectividade, que de outra forma seria improvável.

Foram realizados testes em chão de fábrica em duas empresas do ramo metalúrgico. A primeira, aqui chamada de empresa A, caracteriza-se pelo processo de fabricação de tubos e conexões para a indústria automobilística onde foram encontradas máquinas fixas (trefiladeiras, fornos, tratamento eletro-químico, etc.), pontes móveis, transportando o produto em processo e movimentação constante de pessoas. A segunda, chamada de empresa B, fabrica componentes para elevadores, tendo como principais características de fabricação, relevantes para este trabalho, estampadeiras, dobradeiras e máquinas de solda de alto consumo de energia (segundo especificações picos de corrente de 250 A).

3.4 International Society of Automation (ISA)

Fundada em 1945, a Sociedade Internacional de Automação (ISA ORG, 2013) é uma organização sem fins lucrativos que está definindo padrões para automação, auxiliando mais de 30.000 membros em todo o mundo e outros profissionais a solucionar problemas técnicos. Com base no *Research Triangle Park* (centro de pesquisas, na Carolina do Norte nos Estados Unidos), a ISA desenvolve padrões, certifica profissionais da indústria, oferece treinamentos, publica livros e artigos técnicos e organiza conferências e exposições para profissionais de automação, sendo patrocinadora fundadora da Federação de Automação (AUTOMATIONFEDERATION, 2013)

A recomendação ISA 100.11a, que é o escopo de um grupo de trabalho da organização, define especificações de segurança, monitoramento e gerenciamento para dispositivos sem fio em 05 (cinco) classes de utilização, explicitadas na Tabela 4.

Ainda são objetivos do projeto ISA.100.11a:

- baixo consumo de energia, mas com a possibilidade de atuação em grandes instalações;
- robustez na presença de interferência em ambientes industriais;
- plataforma aberta permitindo compatibilidade entre equipamentos e redes.

3.4.1 Níveis de Criticidade (ISA 100.11a)

Em relação às classes ISA-100 dadas na Tabela 4, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Segurança - Classe 0, não é recomendado o uso de conexão sem fio ou de somente um cabeamento, por ser uma classe de emergência
- Controle – Classes 1,2 e 3 – a recomendação é para classes 1 e 2 usar rede sem fio quando não há alternativa. A classe três por permitir interferência humana pode ser sem fio.
- Monitoramento – Classes 4 e 5, onde o uso de rede sem fio é uma alternativa recomendável

Tabela 4 – Classes de Uso ISA-100

Classes de uso ISA 100				
	Categoria	Classe	Aplicação	Descrição
ISA 100.11a	Segurança	0	Ação de emergência	Extremamente Crítico
		1	Circuito fechado - controle regulatório	frequentemente crítico
	Controle	2	Circuito fechado - controle supervisorio	usualmente não é crítico
		3	circuito aberto- controle	há interferência humana
	Monitoração	4	Alertas	
		5	Registro de eventos	

Na classe 1, há a possibilidade de parada do processo produtivo, o que pode causar danos a determinadas máquinas (fornos industriais, que demoram para reaquecer ou processos eletroquímicos que necessitam de preparação e não podem ser interrompidos). Já a classe 2 não é tão crítica, mas indica uma possibilidade de parada do processo produtivo (indicando necessidade de manutenção na linha ou equipamento produtivo). Na classe 3, há a possibilidade de intervenção humana no ciclo produtivo; por consequência, é de menor criticidade. Nos processos de monitoração (classe 4 e 5), a rede sem fio é bem vinda pois a criticidade do processo é menor do que nas outras classes.

Assim, considerando a recomendação ISA, propõe-se neste trabalho que as classes 1 e 2 devem ser usadas com conexão sem fio quando houver baixas probabilidades de erro, ou seja, para condições que permitam pelo menos 99,7% de probabilidade de recepção do sinal sem erro.

4 MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DO SINAL EM AMBIENTE INDUSTRIAL

4.1. Modelo de Propagação Log-normal *Shadowing*

Devido à dinâmica inerente ao ambiente industrial, o modelo Log-Normal *Shadowing* (desvanecimento em larga escala) foi adotado neste trabalho para representar as condições locais, pois explicita dois parâmetros, um dos quais está diretamente ligado à configuração geral do ambiente (β) e o outro, ligado à variabilidade do ambiente (X). No modelo de Espaço Livre, a potência recebida em um determinado ponto do ambiente pode ser definida pela seguinte equação:

$$P_{RXdBm} = P_{TXdBm} + G_{TXdBi} + G_{RXdBi} - L_{ELdB} \quad (4)$$

P_{RXdBm} = Potência de recepção em dBm

P_{TXdBm} = Potência de transmissão em dBm

G_{TXdBi} = Ganho da antena no transmissor em dBi

G_{RXdBi} = Ganho na antena no receptor em dBi

L_{ELdB} = Perdas no sinal causadas pelo meio em dB

Já o modelo Log-Normal *Shadowing* considera outras variáveis, como a variação do ambiente quando a distância entre transmissor e receptor é constante (RAPPAPORT, 2005). Isso permite modelar sequência de medidas que são muito diferentes das previstas por outros modelos. Nesse sentido, o *fading* ou desvanecimento do sinal se relaciona com o *shadowing* (sombreamento) causado pelo ambiente que acrescenta variações aleatórias na recepção do sinal, podendo causar erros na recepção dos dados.

O chamado de “*slow fading*” (o desvanecimento lento) é de grande importância para prever a probabilidade de ocorrência de erros de transmissão, ainda mais se for considerado o nível de criticidade das medidas dos sensores.

A expressão representativa da perda no percurso (*path loss* PL) desse modelo é a que se segue, Equação 5:

$$PL(d) [dB] = \overline{PL}(d) + X_{dB} = \overline{PL}(d_0) + 10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (5)$$

Onde:

- PL (*path loss*) é a perda total no caminho causado pelo ambiente, distância e desvanecimento. (É igual a L_{el})
- $\overline{PL}(d)$ é a perda pela distância d/d_0
- $\overline{PL}(d_0)$ é a perda na distância d_0
- d é a distância entre transmissor e receptor
- d_0 é uma distância padrão tomada como referência (1 m)
- β é uma variável constante do ambiente (a ser determinada)
- X_{dB} é uma variável estocástica (aleatória) gerada pelo sombreamento de obstáculos

Dado que X_{dB} é uma variável aleatória log-normal com média zero e distribuição Gaussiana de realizações, pode-se verificar que todos os fatores previstos na Equação 5 são determinísticos à exceção dela. Então dado o modelo no espaço livre é acrescentada a variável aleatória X_{dB} , característica de ambientes fechados (*indoor*) (RAPPAPORT, 2005). Generalizando, tem-se a Equação 6:

$$P_{RX_{dBm}} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dBi}} + G_{RX_{dBi}} - L_{EL_{dB}} + X_{dB} \quad (6)$$

Aplicando-se o operador matemático Esperança, tem-se a Equação 7:

$$E(P_{RX}) = E(P_{TX}) + E(G_{TX}) + E(G_{RX}) - E(L_{EL}) + E(X_{dB}) \quad (7)$$

Considerando o modelo matemático de determinação do *Path-Loss*, tem-se as Equações 8, 9 e 10:

Como ,

$$E(X) = \overline{X}_{dB} = 0 \quad (8)$$

$$\bar{P}_{RX} = \bar{P}_{TX} + \bar{G}_{TX} + \bar{G}_{RX} - \bar{L}_{EL} + \bar{X}_{dB} \quad (9)$$

$$L_{ELdB} = f(\beta, d, d_0) \quad (10)$$

Considerando as outras variáveis determinísticas e a aleatória com média zero, pode-se então determinar a variável β relativa ao ambiente (determinística) através das perdas de percurso:

$$\bar{L}_{EL} = (\bar{P}_{TX} + \bar{G}_{TX} + \bar{G}_{RX}) - \bar{P}_{RX} \quad (11)$$

Considerando-se a Equação 5, para $d_0 = 1 m$, tem-se a seguinte equação:

$$L_{EL} = 10 * \beta * \log d \quad (12)$$

Igualando a Equação (11) com a Equação 12, tem-se:

$$\beta = L_{EL} / (10 * \log d) \quad (13)$$

Assim a partir de coleta de dados na prática, leitura de RSSI em período de atividade da indústria, na Empresa A (vide fotos e descrições no capítulo Metodologia) é possível calcular o β estimado para o ambiente industrial específico de manufaturas metalúrgicas.

5. METODOLOGIA

Neste capítulo, estão descritas as etapas e procedimentos adotados na realização dos ensaios nos ambientes de estudo.

5.1 Empresa A

A Figura 14 ilustra o ambiente da Empresa A, (o chão de fábrica) mais especificamente as duas principais trefiladeiras, com motores elétricos de potência.



Figura 14. Empresa A, Trefiladeiras.

A Figura 15 ilustra a visão do local onde foi colocada a base do Rádiuino, no andar superior de um escritório de onde se pode ver o tratamento de banho eletroquímico ao fundo.



Figura 15 - Empresa A, visão de onde foi instalada a base.

A Figura 16 ilustra as pontes rolantes e elevadiças de transporte de matéria prima ou produto em processo e a máquina de verificação de integridade dos tubos metálicos por indução eletromagnética. Ao fundo foi colocado um módulo sensor.



Figura 16 - Empresa A – Pontes elevadiças.

A Figura 17 ilustra a outra posição onde foi colocado também um módulo sensor para coleta dos dados. O sensor foi colocado atrás da posição de onde foi tirada a fotografia



Figura 17 - Empresa A – Lado contraposto da fábrica.

A Figura18 ilustra a movimentação de pessoas no chão de fábrica.



Figura 18 - Empresa A – Vista do chão de fábrica

A Figura 19 ilustra a visão lateral do local onde foi instalada a base do Radiuino e de onde se visualizam os fornos elétricos para tratamento térmico de produtos semi acabados.



Figura 19 – Empresa A Visão lateral

5.2 Empresa B

A Figura 20 ilustra a movimentação no chão de fábrica da Empresa B



Figura 20 - Empresa B – Visão geral do chão de fábrica

A Figura 21 ilustra as máquinas estampadeiras.



Figura 21 - Empresa B – Máquinas estampadeiras.

A Figura 22 ilustra a posição no chão de fábrica onde foi colocado o sensor.



Figura 22 - Empresa B – Máquina dobradeira no centro da área de fabricação

A Figura 23 ilustra os processos de fabricação da empresa, que dependo do produto tem uma organização apropriada.



Figura 23 - Empresa B – Produto em processo de fabricação

A Figura 24 ilustra um tipo de produto acabado da Empresa A, com a observação que devido ao seu porte, seu traslado no chão de fábrica pode causar interferência nas transmissões de radio frequência.



Figura 24 - Empresa B – Produto acabado na expedição

A Figura 25 ilustra a colocação do módulo sensor na máquina dobradeira.



Figura 25 - Empresa B – Visão do sensor no chão de fábrica

A Figura 26 ilustra a posição do módulo base e a antena.



Figura 26 - Empresa B – Localização da base

A Figura 27 ilustra o modelo de antena utilizado na coleta de dados.

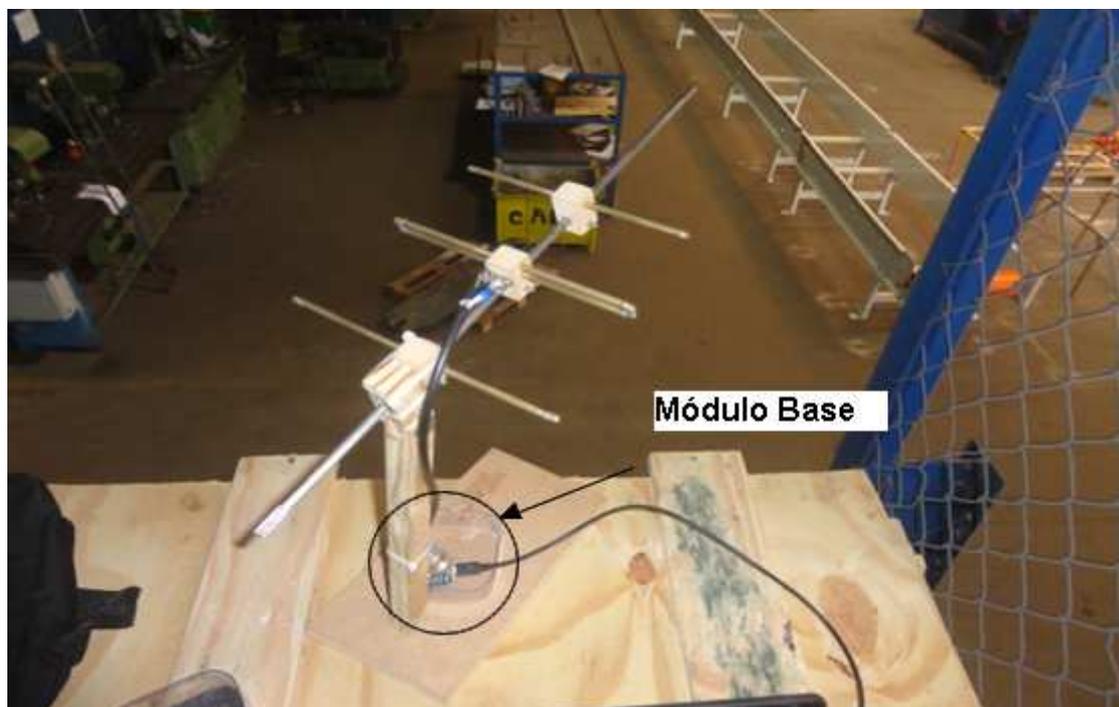


Figura 27 - Empresa B – Visão superior da Antena Yagi

A Figura 28 ilustra o conjunto utilizado para coleta dos dados, computador, módulo base, conexão USB e a antena.



Figura 28 - Empresa B – Visão do módulo de coleta de dados

A Figura 29 ilustra a distância entre módulo base e módulo sensor.



Figura 29 - Empresa B – Visão genérica da visada da antena da base ao sensor

5.3 Implementação dos Medidores

Em se tratando de leitura de consumo de máquinas elétricas, encontram-se no mercado sensores de corrente por efeito *Hall*, que convertem a corrente que passa em um condutor em tensão elétrica, com certa proporcionalidade, permitindo a determinação da intensidade da corrente no condutor com a tensão de saída senoidal. E no caso de leitura de tensão, o método mais utilizado é o uso de transformadores, que implicam em volume peso e geração de mais ruídos eletromagnéticos.

Visando coletar informações associadas ao consumo de energia das máquinas nas Empresas A e B, utilizando a mesma RSSF empregada para coletar dados de RSSI e desenvolver o algoritmo adaptativo, objetivo deste trabalho, foi proposta a utilização de sensores eletrônicos que simplificassem as leituras tanto de tensão como de corrente. A seguir, serão apresentados os sensores de corrente e de tensão desenvolvidos em conjunto com bolsistas de Iniciação Científica e de Inovação da PUC-Campinas.

5.3.1 Sensor de corrente experimental

A utilização de um sensor de corrente em sua forma tradicional seria a inserção de um circuito de *offset* de tensão, pois a porta analógica do Rádium não tem capacidade de leitura de tensão negativa (até mesmo por sua alimentação ser por bateria). Então o circuito de *offset*, deve adicionar um componente de tensão DC (*Direct Current*), de forma que o pico negativo da senóide esteja acima do zero Volt.

A idéia principal, neste caso, foi a partir de um sensor de corrente, padrão de mercado, conforme especificado a seguir e, então, desenvolver um circuito auxiliar que transformasse os valores RMS (*root mean square - valor eficaz da corrente alternada*) de tensão AC em tensão contínua, facilitando a leitura dos valores e diminuindo o tempo de processamento dos sinais no micro controlador.

Na Figura 30, tem-se o *design* do transdutor e na Figura 31 o diagrama esquemático com a concepção eletrônica de utilização do transdutor, sendo que dependendo do modelo ele pode apresentar na saída de tensão e de corrente (acima de 100 A). Nos testes realizados, foram utilizados sensores com retorno de tensão.

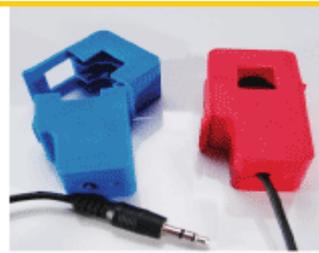


Figura 30 - Transdutor de corrente

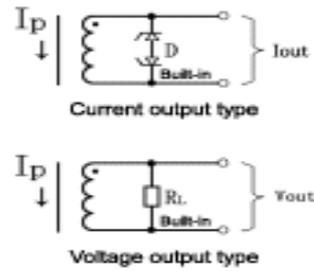


Figura 31 – Diagrama esquemático

O transdutor de corrente utilizado é o modelo SCT- 013-030 (BE 900, 2013), sendo que sua entrada possui a variação de 0 – 30 A e saída de, no máximo, 1 V. Sua resistência de amostragem é de 62 Ω , sua rigidez dielétrica de saída é de 1,500 V AC/1min 5mA, e a tensão de saída é proporcional à corrente que passa através do condutor.

Dado o transdutor, foi desenvolvido um circuito auxiliar baseado em amplificadores operacionais com funções de retificação em onda completa e integração, de forma que a saída apresente tensões contínuas proporcionais às correntes lidas. A Figura 32 ilustra o diagrama elétrico do sensor de corrente.

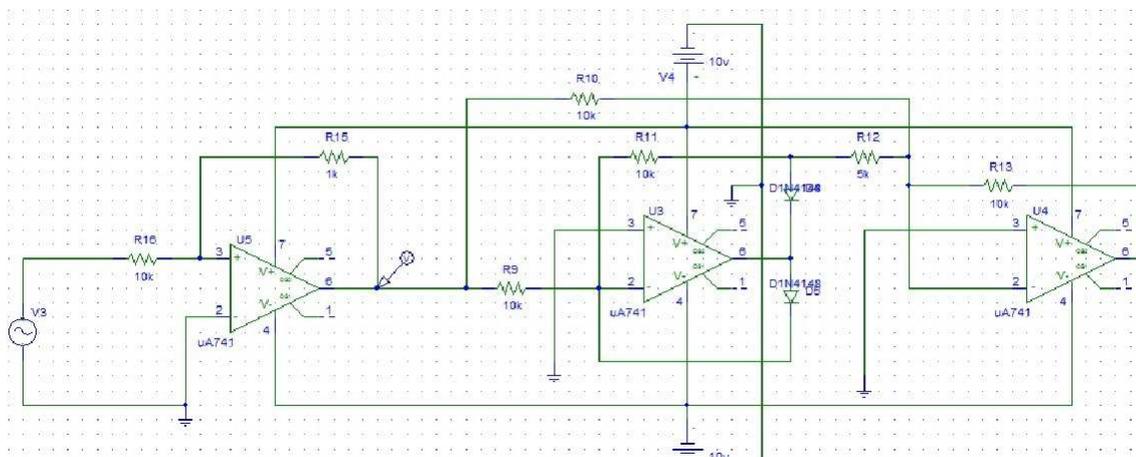


Figura 32 - Circuito auxiliar ao sensor de corrente.

Com o circuito retificador – Integrador, as tensões de saída do transdutor de corrente foram condicionadas para tornar possível a leitura de sua tensão final tornando-o compatível com os limites da entrada da porta analógica do micro controlador (Radiuino – BE 900).

Os resultados experimentais em laboratório serão descritos no Capítulo Resultados deste trabalho.

5.3.2 Transdutor de tensão experimental

O transdutor de tensão em sua forma tradicional é composto de um transformador, 127 V – 12 V, com um divisor resistivo ajustando a tensão de pico a pico na faixa de 5 Vpp, compatível com a porta de entrada analógica do Radiuino (limite de 5 V), além de um circuito de offset para acrescentar um componente DC, evitando tensão do ciclo negativo da senóide. A Figura 33 ilustra o diagrama elétrico do circuito

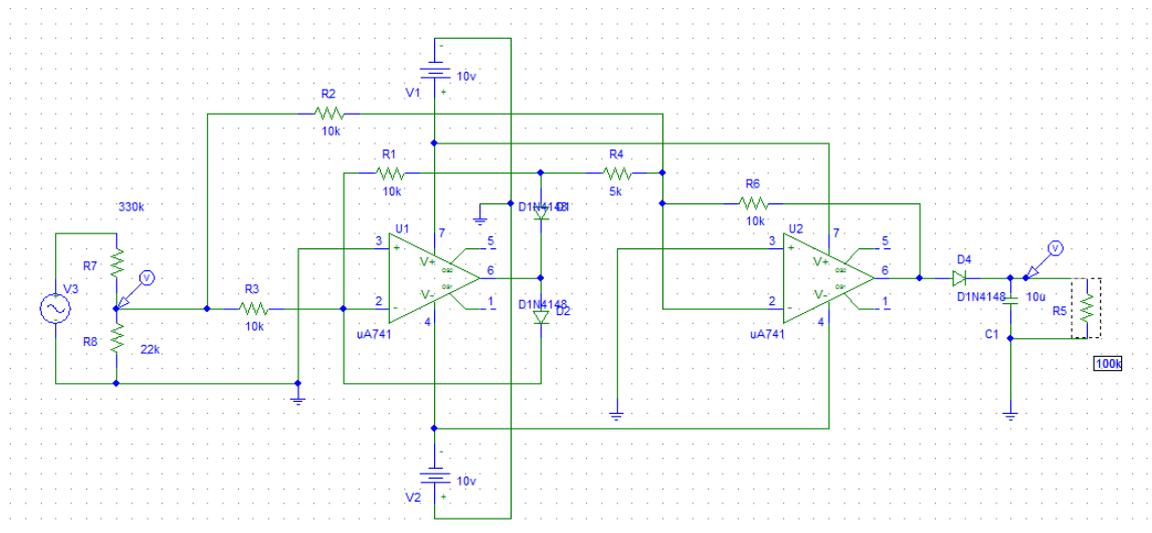


Figura 33 - Diagrama esquemático do circuito transdutor de tensão.

Então, foi desenvolvido um circuito de forma a ler a tensão da rede, sem o uso de transformador e sem circuito de offset, compatibilizando as funções de redução da tensão de entrada por meio de um divisor resistivo, um circuito retificador e um circuito integrador (anulando os efeitos de *ripple* da retificação), tornando a leitura mais simples, mais exata e diminuindo o tempo do tratamento dos sinais senoidais pelo micro controlador.

Os testes em laboratório foram feitos com tensões de 127 V, saída de 1,6 V e 220 V com saída de 3,3 V. Podem-se visualizar os resultados no simulador PSPICE, na Figura 34.

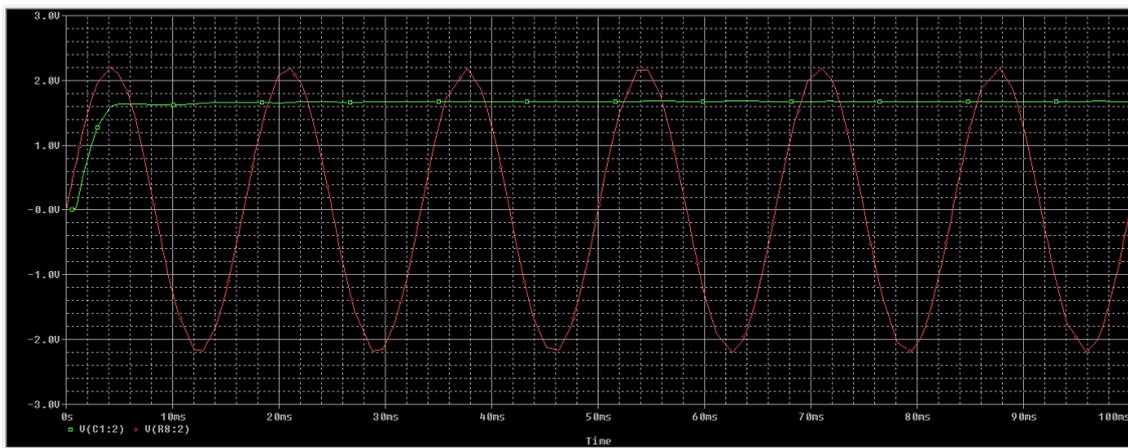


Figura 34- Onda totalmente retificada e sem a tensão de *Ripple* e com tensão de saída de 1,6 volts para entrada de 127 V

5.4 Método de medição das potências de *downlink* e *uplink*

Para realizar o estudo do comportamento da RSSF em manufaturas metalúrgicas é necessário estabelecer a comunicação entre pelo menos dois pontos e analisar o sinal de comunicação entre eles. Para esta análise, foi definido, neste trabalho, a realização de testes em duas empresas, conforme a disponibilidade permitida pela direção das empresas, estabelecendo a comunicação entre um nó sensor e um nó base, sendo que este último estava conectado a um computador através de um cabo USB (Universal Serial Bus).

As Figuras 35, 36, 37 e 38 ilustram os equipamentos utilizados, conforme descrições a seguir.



Figura 35 – Módulo Base UART



Figura 36 – Módulo BE 900

O módulo base é utilizado para programação do Rádiumo, tanto o nó base como o nó sensor; também quando em operação, é ele que faz a conexão com o computador via USB.

O módulo BE900 é o que contém o processador compatível com Arduino e o CC1101 da Texas, responsável pela comunicação em rádio frequência.



Figura 37 - Kit DK 101 (RADIOIT, 2012)

O dispositivo da Figura 37 contém sensores de temperatura e intensidade de luz, foi utilizado apenas como suporte, para ser alimentado por bateria. Foi utilizado na Empresa A (já comentada anteriormente).

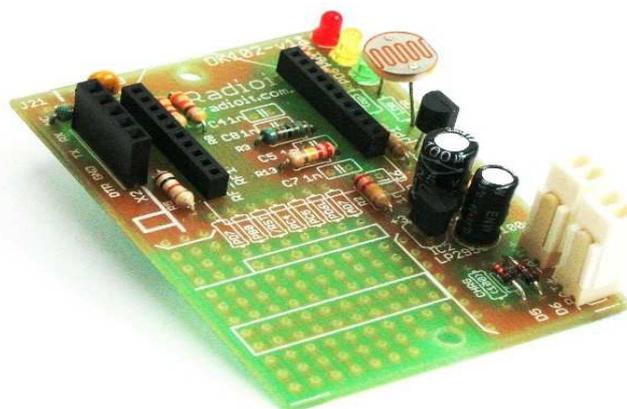


Figura 38 - Kit DK 102

O dispositivo da Figura 38, da mesma forma que o DK 101, contém sensores, mas neste trabalho foi utilizados como suporte apenas, e na Empresa B, por termos testes mais longos (durabilidade da bateria é maior).

Os módulos BE 900 são compostos por uma plataforma de *hardware* livre compatível com a plataforma Arduino. O Arduino é uma plataforma que vem sendo muito

utilizada em projetos eletrônicos pela facilidade que apresenta em *hardware*, por possuir portas de entrada e saída (I/O) disponíveis para conexão, e em *software*, com uma linguagem amigável, muito parecida com C/C++ (ARDUINO, 2012). Também pode ser encontrada uma grande quantidade de tutoriais de projetos e aplicações disponíveis em veículos de comunicação, como revistas e Internet (GAIER, 2011).

O BE900 é um módulo com microcontrolador e transceptor integrado, que possibilita aplicações de monitoração e controle, podendo ser totalmente programado. É também um módulo de comunicação extremamente flexível que utiliza o processador AVR Atmega328 e o transceptor TI CC1101 RF com filtro passa-faixa para maior sensibilidade e imunidade a interferência a ruído, ajustado para operar na banda não licenciada ISM de 915 MHz (902 até 928 MHz). O módulo possui modos de operação com baixo consumo de potência e um relógio de tempo real (RTC) baseado em cristal de 32 kHz. Também, atende à regulamentação ANATEL e FCC.

Sua principais características são :

- IDE Arduino: o BE900 pode ser programado utilizando a IDE Arduino e usufruir da maioria do *software* de bibliotecas desenvolvida para esta plataforma;
- E/S do Arduino: os 15 pinos de E/S disponíveis podem ser mapeados como pinos Arduino;
- Microcontrolador: AVR Atmega 328, microcontrolador de 8 bits com alto desempenho e baixo consumo, com 32k de ROM, 2k de RAM, 1k de EEPROM e *clock* de 8MHz (ATMEL, 2013));
- Comunicação sem fio: o módulo possui um TI CC1101, transceptor de RF em um único chip para bandas não-licenciadas ISM com filtro passa-faixa para maior sensibilidade e menor interferência de ruídos, ajustado para operar na banda de 915 MHz (902-907,5MHz e 915-928MHz). A placa possibilita a soldagem de um conector SMA para uso profissional;
- Refinamento do RF: Todos os módulos passam por um processo de calibração de fábrica para o correto ajuste do deslocamento de frequência do circuito de RF. O valor do ajuste é informado ao usuário em cada módulo e deve ser utilizado para melhorar a qualidade de comunicação;

- Flexibilidade de programação: Apesar de poder ser programado via Arduino, o módulo também pode ser programado utilizando a interface AVR, com a vantagem de já ter o transceptor embarcado.

Para mais especificações técnicas, consultar os Anexos.

Com o nó sensor alimentado e instalado em um local estratégico e o nó base conectado ao computador, é possível iniciar o estudo da propagação do sinal entre estes dois pontos. A análise foi feita levando em conta os parâmetros do sinal transmitido e do sinal recebido no ambiente industrial em plenas condições de produção.

Os parâmetros da configuração dos sinais emitidos pelos nós devem ser definidos nos programas gravados nos módulos. Para este estudo foram definidos os parâmetros, tanto para o nó base quanto para o nó sensor, listados na Figura 39 a seguir.

Parâmetro	Configuração utilizada
Potência do sinal transmitido	10 mW
Modulação do sinal	2-FSK
Frequência de operação	915 MHz

Figura 39 – Configuração do BE 900 utilizada nos testes em fábrica

Estes valores de parâmetros foram escolhidos por serem os valores padrão fornecidos pela referência [RADIUINO, 2013].

Depois dos parâmetros definidos para o *hardware*, foram definidas formas de como coletar informações da transmissão. Neste estudo, o valor coletado foi o RSSI, mas como existiam dois nós foram coletados os valores de RSSI dos dois pontos, classificados da seguinte forma:

- RSSI de *downlink*: valor de RSSI medido pelo nó base referente ao sinal transmitido pelo nó sensor;
- RSSI de *uplink*: valor de RSSI medido pelo nó sensor referente ao sinal transmitido pelo nó base.

O CC1101 é o responsável por medir o RSSI, sendo que o sinal é recebido no canal escolhido e calculado com 0,5 dBm de resolução. O cálculo do RSSI neste CI é feito conforme o fluxograma apresentado na Figura 40 (TEXAS INSTRUMENTS, 2011):

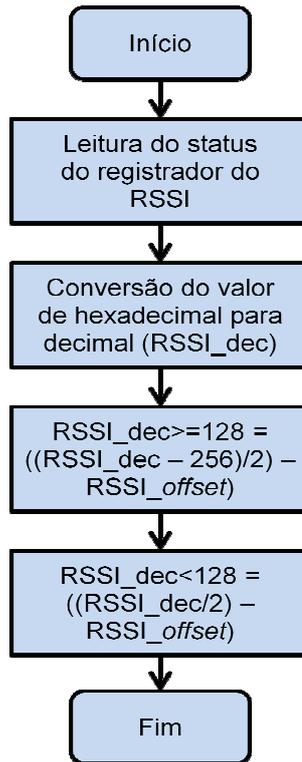


Figura 40 – Cálculo do RSSI Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2011)

O $RSSI_offset$ é apenas um valor utilizado pelo CI 1101 para efetuar os cálculos do sinal recebido. Este sinal é amostrado e, às amostras, é acrescentado o valor de offset para que os cálculos sejam feitos com valores positivos.

O *software* embarcado, que foi carregado tanto na base, como no sensor foi um padrão encontrado na referência [RADIUINO, 2013]. No módulo de leitura e processamento de dados (RSSI) desenvolvido em *Python*, foram utilizadas duas formas de leitura: uma com leituras de segundo em segundo (Empresa A e B) e outra com modo *sleep*, com intervalos de leitura de minuto a minuto, com a finalidade de economia de energia da bateria dos sensores. A programação dos dois módulos de leitura encontram-se no Anexos Apêndice B.

5.5 Coleta de Dados

Este trabalho caracteriza um ambiente industrial onde os pontos de comunicação são fixos (distancia Transmissor Receptor constante) e onde o chão de fábrica, além das

máquinas fixas (trefiladeiras, fornos, tratamento eletro-químico, etc.), apresenta pontes móveis, transportando o produto em processo e também com pessoas em movimento. Os dados colhidos foram armazenados em arquivos tipo “txt”, por serem de fácil utilização por utilizá-los para cálculo.

Por questões de disponibilidade das empresas A e B, os dados foram colhidos da forma descrita a seguir:

A Empresa A possui menor disponibilidade e limites de acesso. O ambiente dos ensaios é de uma empresa metalúrgica, e situa-se em um galpão de aproximadamente 6000 m² de construção, onde o nó sensor foi colocado em um ponto a aproximadamente 80 m do transmissor sem visada direta, por causa de um contorno na construção, conforme ilustrado na Figura 41, onde podem-se observar inclusive, os obstáculos entre transmissor e receptor.

Por serem de maior interesse neste trabalho e para efeito de testes práticos, foram utilizados, no primeiro teste, uma base e dois sensores, utilizando o método de requisições de sensores ou *polling* (ponto a ponto) e, no segundo teste, uma base e um sensor também com *polling*, sendo que os testes foram divididos em duas etapas, uma coleta inicial sem tempo de espera e outra etapa com tempo entre leituras de 1 minuto e utilizando a função de *sleep* do sensor.



Figura 41 - Vista da direção da localização do sensor (Empresa A)

As medidas foram feitas das 9:30 às 14:00 horas do dia 28/03/2013, quando foram observado três períodos distintos de atividade industrial, às 10:00 h, (fábrica em plena atividade) às 11:00 h (período de diminuição da atividade, mas sem parada, por causa do início dos turnos do almoço), e a retomada plena da produção a partir da 13:00 h. Foram coletadas aproximadamente 8500 medidas de RSSI de *Uplink*.

Já na Empresa B, mais acessível, os dados forma colhidos durante duas semanas, assim organizados:

- De 09/09/2013 a 10/09/2013, durante o horário comercial, com a antena tipo Yagi, colocada no nó sensor.
- De 10/09/2013 a 13/09/2013, com a antena colocada na base.
- De 23/09/2013 a 27/09/2013 com a antena na base.

5.6 Margem de *fading*

Quando um sinal é transmitido através de um canal de rádio, ele sofre atenuações que ocorrem durante a comunicação. A este fenômeno denominamos *fading* ou desvanecimento. A Figura 42 ilustra o desvanecimento.

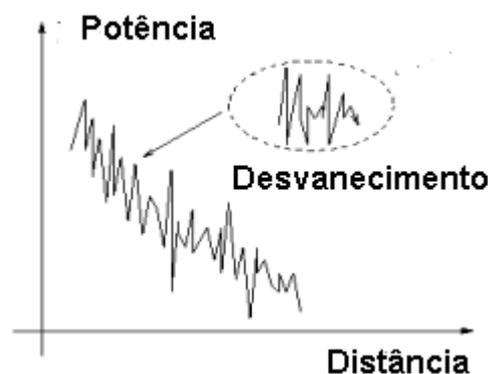


Figura 42 - Variação do sinal + *fading* em função da distância (Modificado RAPPAPORT, 2005)

O canal de comunicação móvel é caracterizado por três componentes:

- Perda de propagação dependente da distância (*path loss*): um componente determinístico dependente da distancia d onde o *path loss* PL é função de d^n . O valor do expoente do *path loss* é dependente do tipo do ambiente.
- *Slow (long-term) fading* ou *Log-Normal fading*: componente randômico representando o efeito de grandes obstruções no caminho de propagação, i.e., devido ao relevo, prédios, árvores, etc. Também é conhecido como *Shadowing fading* ou *Log-Normal fading*, uma vez que este tipo de fenômeno obedece a distribuição *Log-Normal*.
- *Fast (short-term) fading* ou *Rayleigh fading*: componente randômico que ocorre devido ao efeito multipercurso onde os sinais chegam de diferentes caminhos e diferentes fases e a soma de vários sinais refletidos causam a variação do sinal para mais (soma dos sinais) ou para menos (diferença entre os sinais), é ilustrado na Figura 43.

É denominado também de *Rayleigh fading* pelo fato deste fenômeno comportar-se de acordo com a distribuição de probabilidade de *Rayleigh*. É ilustrado na Figura 43.

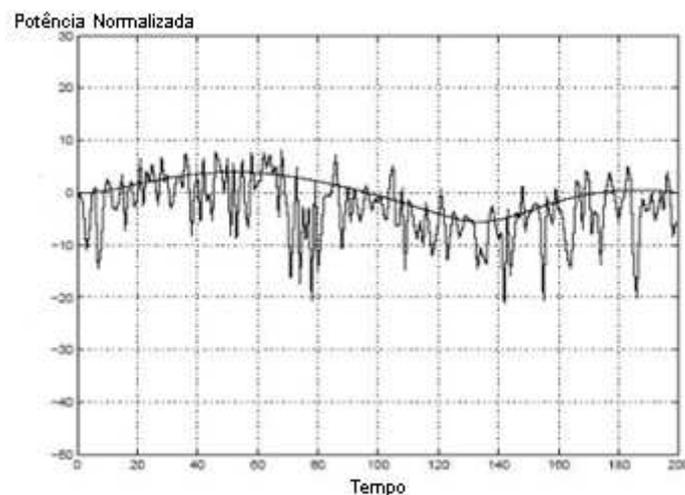


Figura 43 - Slow e fast fading (RAPPAPORT, 2005)

Como mostra a figura 43 o canal com *fading* pode ser visto como um processo estocástico com a média do sinal variando no tempo. A componente lenta do sinal deve-

se ao *long-term fading* ou *shadowing fading* e a componente rápida deve-se ao *short-term fading* (LINK BUDGET FADING, 2013).

Os cálculos da atenuação do sinal em função do ambiente utilizaram parâmetros fixos como potência, ganho de antena, fator de atenuação. Estes são parâmetros determinísticos e dependem essencialmente do tipo de ambiente, gerando um fator de atenuação. Entretanto, como mostrado em existe um grau de incerteza em relação a potência recebida (RAPPAPORT, 2005).

Para completar a caracterização do ambiente é necessário considerar a variação em função de cada ponto devido às condições do ambiente. Com isto chega-se na expressão do modelo de *Shadowing* (Equação 5) , apresentada no Capítulo 4 e repetida, aqui, por conveniência.

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d) + X_{dB} = \overline{PL}(d_0) + 10 * \beta * \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} \quad (5)$$

Onde:

- PL é a perda total no caminho causado pelo ambiente, distância e desvanecimento.
- $\overline{PL}(d)$ é a perda pela distância d/d_0
- $\overline{PL}(d_0)$ é a perda na distância d_0
- d é a distância entre transmissor e receptor
- d_0 é uma distância padrão tomada como referência (1 m)
- β é uma variável constante do ambiente (a ser determinada)
- X_{dB} é uma variável estocástica (aleatória) gerada pelo sombreamento de obstáculos

Onde X_{dB} é uma variável aleatória *log-normal* com média zero cujo desvio padrão caracteriza diversos tipos de ambientes.

A principal característica desta variável aleatória *log-normal* é trazer uma incerteza para a rede, uma vez que torna também incerta a taxa de transmissão de estações que

estejam próximas à fronteira entre os níveis de modulação. A Tabela 5 apresenta um exemplo de desvio padrão da variável estocástica em função do ambiente.

Ambiente	σ_{dB} (dB)
Ao ar livre (externo)	4 to 12
Escritório espaço livre	7
Escritório com divisórias	9.6
Indústria, com visada direta	3 to 6
Indústria com obstruções	6.8

Tabela 5 - Desvio padrão da log-normal em função do ambiente (RAPPAPORT, 2005)

A Figura 44 apresenta a curva log-normal com diferentes valores de desvio padrão σ_{β} . O desvio padrão pode ser calculado na própria estação uma vez que estão disponibilizados nas estações dados das potências recebidas e transmitidas (RSSId e RSSlu).

Probabilidade de recepção

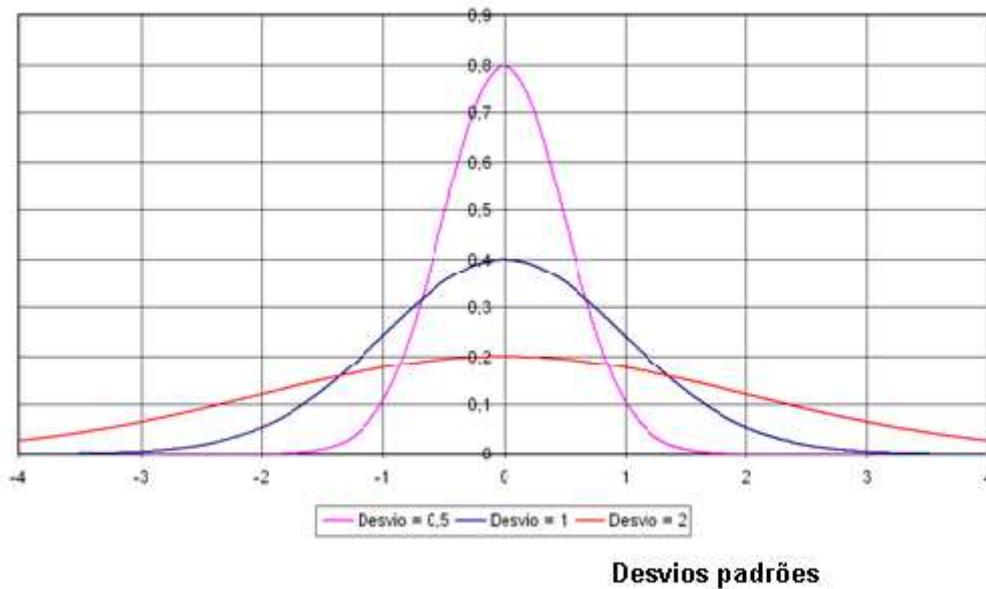


Figura 44 – Modelo Log-normal Shadowing

A Figura 45 ilustra a função distribuição Gaussiana cumulativa. Nessa figura o eixo das ordenadas indica a probabilidade de recepção do sinal (ou grau de incerteza) e o das abscissas indica o desvio padrão. Fica evidente que o aumento do desvio padrão se reflete em uma curva mais aberta e a diminuição do desvio padrão se reflete em uma curva mais fechada, variando desta forma a probabilidade de recepção do sinal.

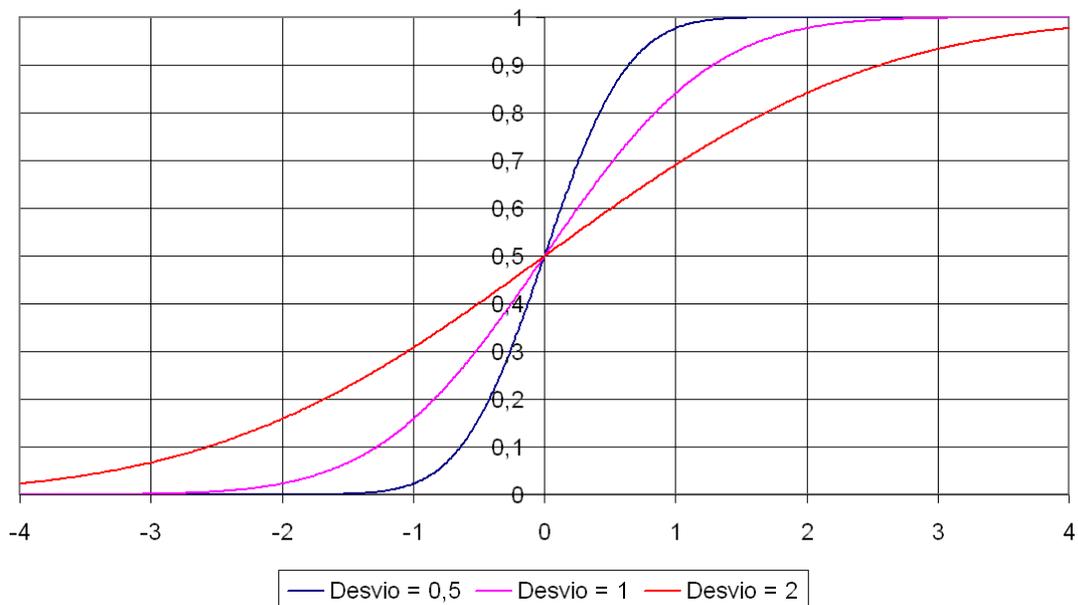


Figura 45 - Distribuição Gaussiana cumulativa

Considerando a análise do modelo de *Shadowing*, pode-se determinar a probabilidade de um enlace de rádio funcionar ou não, considerando uma margem de *fading*. Para exemplificar, considere-se que um sistema não possui margem de *fading* e que o enlace foi projetado para atender exatamente à sensibilidade. O ambiente apresentado é modelado como *Shadowing* com desvio padrão igual a um (1). A Figura 46 apresenta a função densidade de probabilidade.

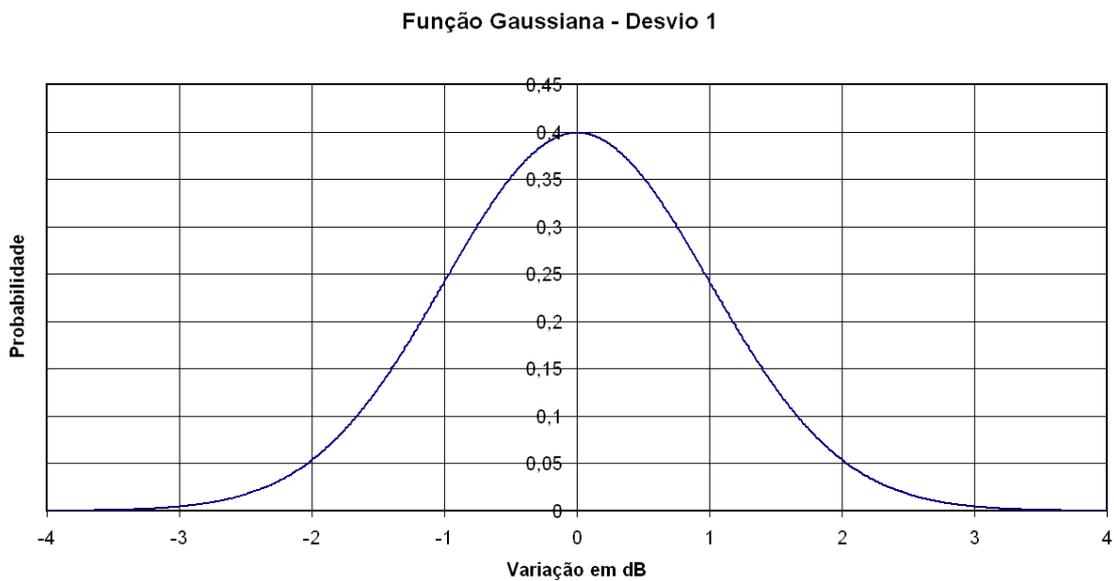


Figura 46 - Função densidade de probabilidade

Assumindo que o sinal varia conforme essa distribuição Gaussiana pode-se afirmar que a probabilidade da intensidade de sinal estar acima da sensibilidade será de 50%. Para melhor esclarecimento considere-se a Figura 47 que apresenta a função distribuição Gaussiana. Fica claro que no ponto de variação de 0 dB tem-se exatamente a probabilidade de 50%.

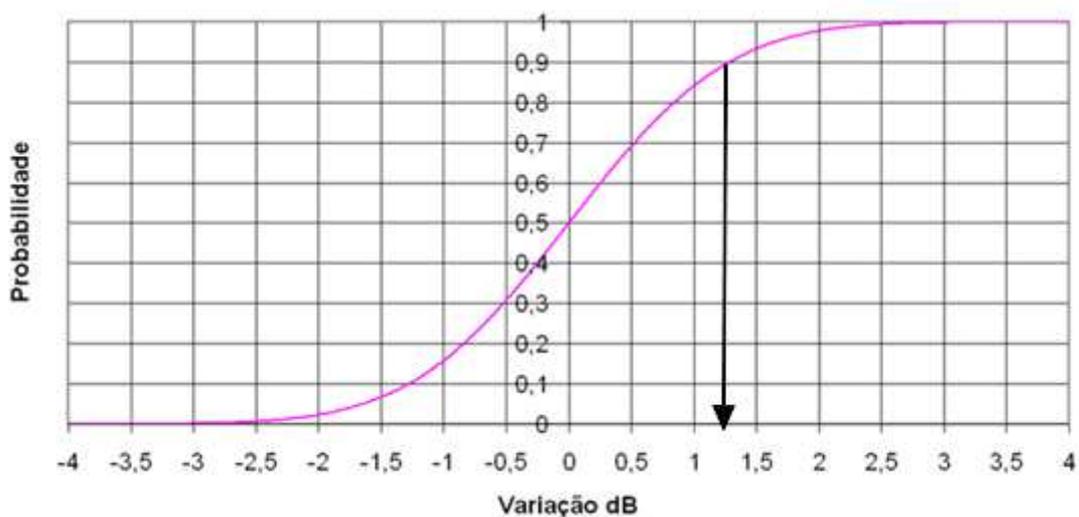


Figura 47 – Função de distribuição Gaussiana

Para garantir que o enlace funcione com 90% de probabilidade tem-se que ter uma margem de *fading* de 1,3 dB, como pode-se ver (vide seta indicativa) no gráfico da Figura 47.

Para um desvio padrão de 5 dB será necessária uma margem de *fading* de 6,5 dB para que a probabilidade do sinal não cair abaixo da sensibilidade seja de 90%, como ilustra a Figura 48.

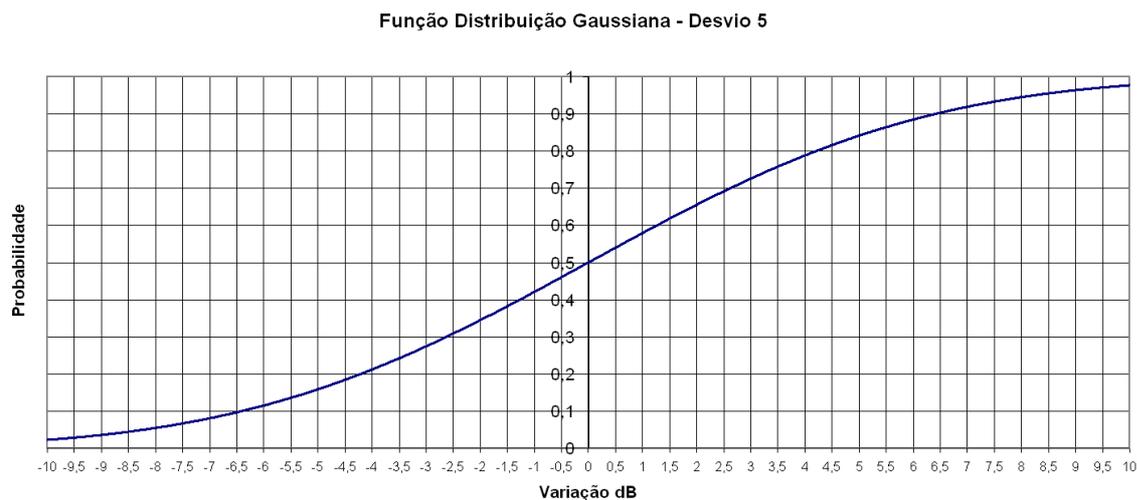


Figura 48 – Distribuição Gaussiana para desvio padrão 5 dB

A Figura 49 apresenta a função densidade de probabilidade Gaussiana para um desvio padrão de 5 dB.

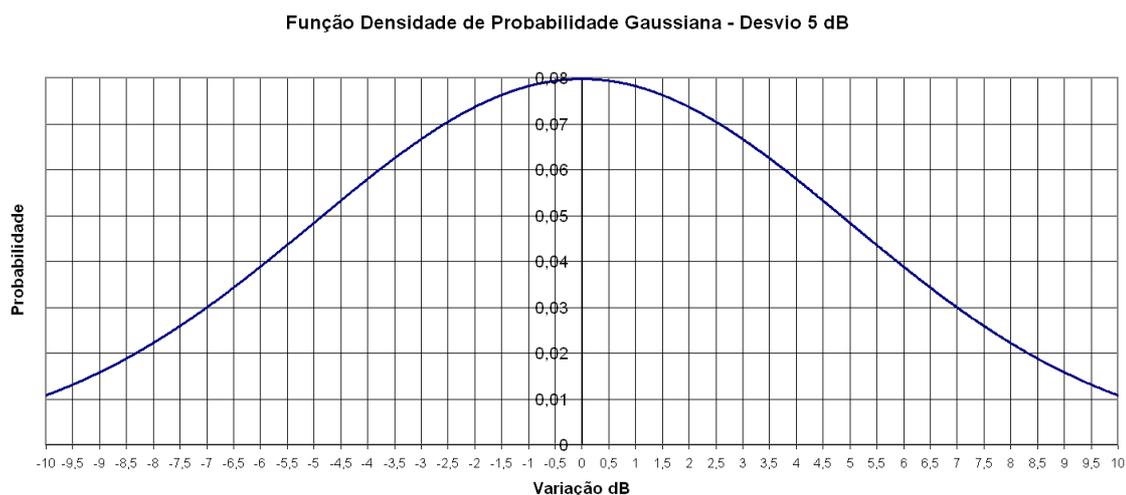


Figura 49 – Densidade de probabilidade

Estes valores podem ser determinados através de tabelas. Seja a expressão da função densidade de probabilidade Gaussiana, conforme Equação 14:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/2\sigma^2} \quad (14)$$

Onde σ é o desvio padrão e m a média. Neste caso $m=0$.

É possível determinar a função distribuição cumulativa de probabilidade utilizando a função $Q(y)$. Portanto, a FDC (função de densidade cumulativa) poderá ser calculada pela Equação 15:

$$F(x) = 1 - Q\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) \quad (15)$$

5.7 Proposta de algoritmo adaptativo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um algoritmo, para ser utilizado nas comunicações em RSSF em ambiente industrial, que seja capaz de adaptar a potência de transmissão entre base e nós sensores. Essa adaptação é feita analisando e adaptando uma janela de leitura de dados, ou seja, o número de leituras de RSSI, para cálculo de uma média móvel. Esse algoritmo permite que a comunicação realizada pela RSSF se adeque às variações da margem de desvanecimento (*fading*) no chão de fábrica, de acordo com as variações da movimentação de pessoas e máquinas nos horários de maior ou menor atividade industrial, além de eventos específicos que podem ocorrer na manufatura metalúrgica, como por exemplo, mudanças físicas na linha de produção, conforme o produto fabricado.

Assim, o algoritmo foi dividido em sub-processos, de forma a melhorar a inteligibilidade e se adequar a um futuro desenvolvimento deste conjunto de atividades em *software* de computadores embarcados e microcomputadores.

Os sub-processos estão divididos como se segue:

A. Conjunto de parâmetros de inicialização (*Startup*)

Estes parâmetros servem tanto para as etapas de operação da base, regime de comunicação, treinamento e cálculos de ajustes de potência de transmissão, que serão descritas no próximo item deste tópico. Em termos de criação da aplicação, pode-se considerar que eles podem ser criados tanto no *software* embarcado como no microcomputador ligado a eles, com a consideração do espaço ocupado, no caso do *software* embarcado.

Os parâmetros e suas justificativas são:

- **Frequência de operação:** magnitude da frequência da onda portadora do sinal de RF (neste caso 915 MHz).
- **Canal de comunicação:** no padrão IEEE 802.15.4 são indicadas a possibilidade de até 65 canais espaçados de 200 kHz, com a ressalva que a conversão entre base e sensor deve ser feita no mesmo canal, deve-se indicar tanto na base como no sensor o canal que será utilizado.
- **Sensibilidade de recepção:** o valor padrão é de (-112 dBm).
- **Taxa da comunicação:** número de pacotes recebidos por minuto (este valor será utilizado para ajuste da janela conforme algoritmo que será descrito no item 5.6, sub-item B deste trabalho).
- **Identificação da base:** número que identificará a base na rede de sensor.
- **Identificação dos sensores:** números que identificarão cada sensor, individualmente, para que a base possa acessá-los por meio da técnica de varredura (Polling). Aqui cabe uma observação: os números podem não ser seqüenciais; sugere-se que seja usado um elemento com característica de vetores para que o acesso seja seqüencial. Assim, justifica-se o próximo parâmetro como o número total de sensores na rede.

- **Número total de sensores na rede:** a rede pode conter mais de um sensor, o algoritmo deve prever esta condição.

- **Número de tentativas de comunicação:** em caso de perda de sinal, este parâmetro indica o número de tentativas de resgate da comunicação (sigla: NTenta).

- **Tempo de espera para resposta da comunicação** (*Time-out* de comunicação, sigla: TOut)

- **Número de início da tabela de níveis de potência** de transmissão, no caso do BE900, de 0 a 7 com incremento de um (1), zero (0) corresponde a - 30 dBm e 7 equivale a 10 dBm (na seguinte faixa: 0= -30 dBm, 1= -20dBm, 2= -15 dBm, 3= -10 dBm, 4= 0 dBm, 5= 5 dBm, 6= 7 dBm, 7= 10 dBm, [fonte datasheet Texas CC1101]).

- **Número final da tabela de níveis de transmissão** ou potência máxima de transmissão. (No BE900, é sete (7) , que corresponde a + 10 dBm).

- **Tempo mínimo para atualização da comunicação** (determina o número mínimo de amostras para cálculo da média e desvio padrão móveis, conforme algoritmo detalhado mais adiante neste trabalho).

- **Tempo máximo de atualização da comunicação** (determina o número máximo de amostras para cálculo da média e desvio padrão móveis, conforme algoritmo detalhado adiante neste trabalho).

- **Percentual de probabilidade de recepção** (vide curva de probabilidade acumulada normalizada apresentada anteriormente) de acordo com análise da tabela de criticidade ISA.

- **Aumentar a potência de transmissão;** (Comando)

- **Diminuir a potência de transmissão:** (Comando)
- **Potência crítica de transmissão:** mínima potência que estabelece a comunicação.
- **Percentual do nível de tensão da bateria do sensor para emissão de alarme.**
- **Alarmes:** sinalização de pontos críticos na comunicação requer intervenção humana (inclui data, hora e identificação do emissor).
- **Número corrente de amostras:** padrão de leituras para cálculo da média, em regime de comunicação.
- **Posição de mudança de potência de tx da base e do sensor,** última alteração de aumento ou diminuição da potência.
- **Posição de número de amostras:** indica a posição anterior do número de amostras, se houve aumento ou diminuição na janela corrente..

Alguns destes parâmetros têm que ser repassados da base ao sensor na inicialização, de forma a estabelecer quais os melhores parâmetros para iniciar a coleta de dados.

- **Conjunto de comandos para atuar nas configurações tanto do módulo base como módulo sensor.**
 - a. Iniciar modo de treinamento
 - b. Ajuste de potência (aumento ou diminuição)
 - c. Resposta de reconhecimento de comando recebido (*Acknowledge*, ou ACK)
- **Alarmes emitidos pelo módulo base ao computador, que pode ser recebido do sensor.**

- a. Bateria fraca
- b. Máxima potência atingida pelo módulo sensor
- c. Máxima potência atingida pelo módulo base
- d. Potência recebida próxima do limiar de recepção no sensor
- e. Potência recebida próxima do limiar de recepção da base

B. Conjunto de procedimentos do módulo base

Neste tópico é descrita a rotina de comunicação que um módulo base deve executar para que possa se adequar às variações do ambiente industrial específico de manufaturas metalúrgicas.

Antes de iniciar a comunicação, a base envia ao sensor, um comando para iniciar o treinamento de forma a se adequar ao ambiente e que escolherá a melhor potência (potência crítica) de transmissão proporcionando eficiência no consumo de energia elétrica e evitando causar interferência em outros módulos sensores que possam estar no ambiente. Esta negociação entre base e sensor tem como princípio receber amostras de RSSI tanto de *Uplink* como de *Downlink*, e calcular a média e o desvio padrão dessas medidas, tomando como base o nível mínimo de recepção de -112 dBm do BE900 e ajustando para o percentual de probabilidade de recepção que a aplicação exige, de acordo com níveis de criticidade da tabela ISA, destacado nos parâmetros de inicialização. Durante o treinamento, a média não é móvel e o número de amostras para este cálculo deve ser definido nos parâmetros de inicialização.

A Figura 50 ilustra o diagrama do inicio da comunicação, que ocorre da seguinte forma:

- A base lê os parâmetros de inicialização necessários para o processo começar, envia um sinal para o primeiro sensor e aguarda um reconhecimento. Se não o receber, tenta certo número de vezes (tabela de inicialização), aguarda o tempo de espera também pré-definido, fica em *loop*, aumentando a potência de Tx (transmissão) passo a passo. Se a comunicação não ocorrer, e for o primeiro sensor, ele diminui a potência ao mínimo (só em caso do primeiro sensor) e emite um alarme requerendo

intervenção humana, e passa para o próximo sensor repetindo os passos citados.

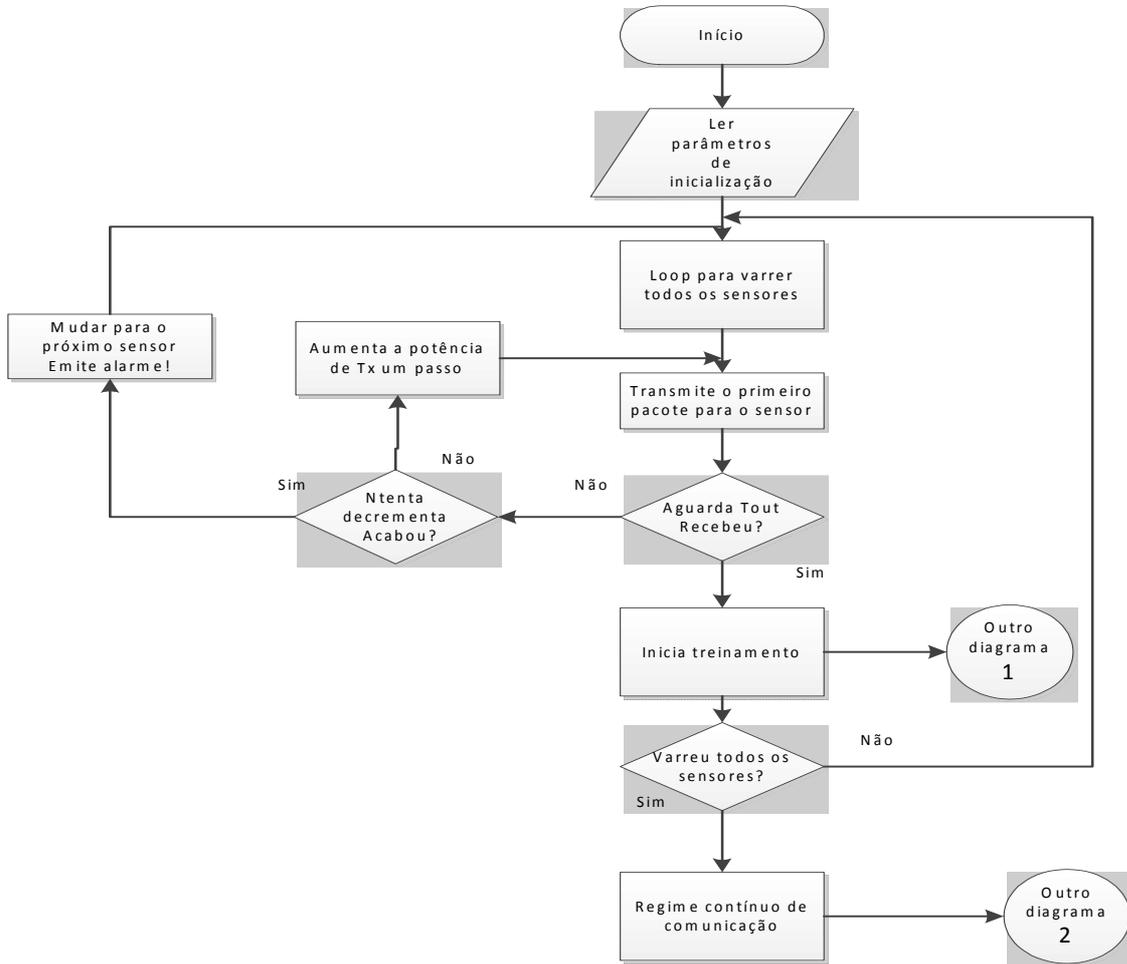


Figura 50 – Diagrama da inicialização da comunicação

- Caso a comunicação ocorra, o nível de potência que estabeleceu esta comunicação é marcado como potência crítica, que é a menor potência com que se estabelece a comunicação. Então, a base envia um comando para o sensor pedindo para iniciar o treinamento, que vai estabelecer, (conforme descrito a seguir), a potência ideal para se comunicar com este sensor. Ao final verifica todos os sensores da rede e inicia o regime contínuo de comunicação.

Na Figura 51 é ilustrado o processo de treinamento. A base aguarda receber o número de pacotes estabelecido na inicialização (*startup*). Se não receber, realiza o procedimento de tentativas e tempo de espera (*timeout*). Se ainda assim não receber, emite alarme para intervenção externa. Se receber, processa o fluxo de cálculo de média, desvio padrão e ajustes de comunicação conforme descrito no diagrama 4, Figura 52.

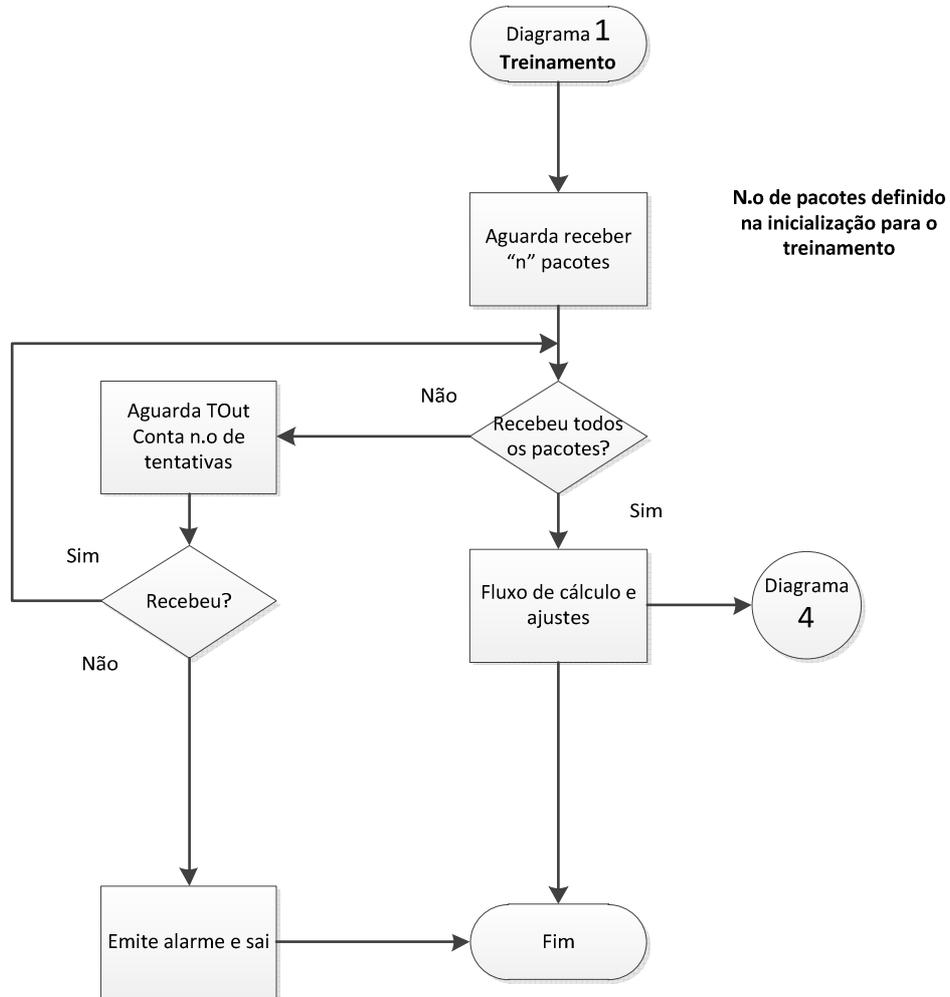


Figura 51 – Diagrama de blocos do treinamento

Na Figura 52, o diagrama de blocos 4 descreve o fluxo de cálculo durante o treinamento e os ajustes que podem ser feitos de acordo com os resultados da média e desvio padrão. Após o recebimento do número de amostras esperado, calcula-se a média e desvio padrão, compara com o parâmetro da inicialização, para saber se está dentro das margens de probabilidade de recepção do sinal. Por exemplo, de acordo com a curva de probabilidade acumulada normalizada, se for definido o parâmetro em 90 % de

probabilidade de recepção, aumentar a potência de transmissão em um número de vezes o desvio padrão para garantir a recepção, conforme citado anteriormente.

As variáveis envolvidas nesse processo são:

- Variável para ajuste = Var (se maior que zero ajusta, se não diminui)
- Desvio Padrão = Despad
- Média = media
- Sensibilidade = Sensib (-112 dBm *default*)
- Limiar de probabilidade = Limiar (1,3 ; 90 % probab. de recepção)

A lógica que realiza este processo é:

Se $\{(Sensib - media) / Despad\}$ é maior que Limiar
Var = 1 // comando para aumentar a potência

Senão
Var = 0 // mantém a potência.

Aqui há que se ressaltar que o algoritmo deve armazenar o status anterior da alteração de potência, procurando um equilíbrio entre as alterações, se aumentou a potência tenta diminuir, se não mantém. Este trabalho, como visa aspectos práticos, recomenda que este processo seja testado na prática de acordo com o ambiente e com as classes de criticidade ISA, pois diminuir a potência pode significar perda de dados e se a aplicação for crítica isto pode causar danos graves à indústria. Então este algoritmo deve ser aplicado de acordo com a criticidade ISA da aplicação e com o ambiente. Por exemplo, se a potência for muito alta pode interferir em outros sensores ou até causar riscos ao ambiente por excesso de radiação eletromagnética.

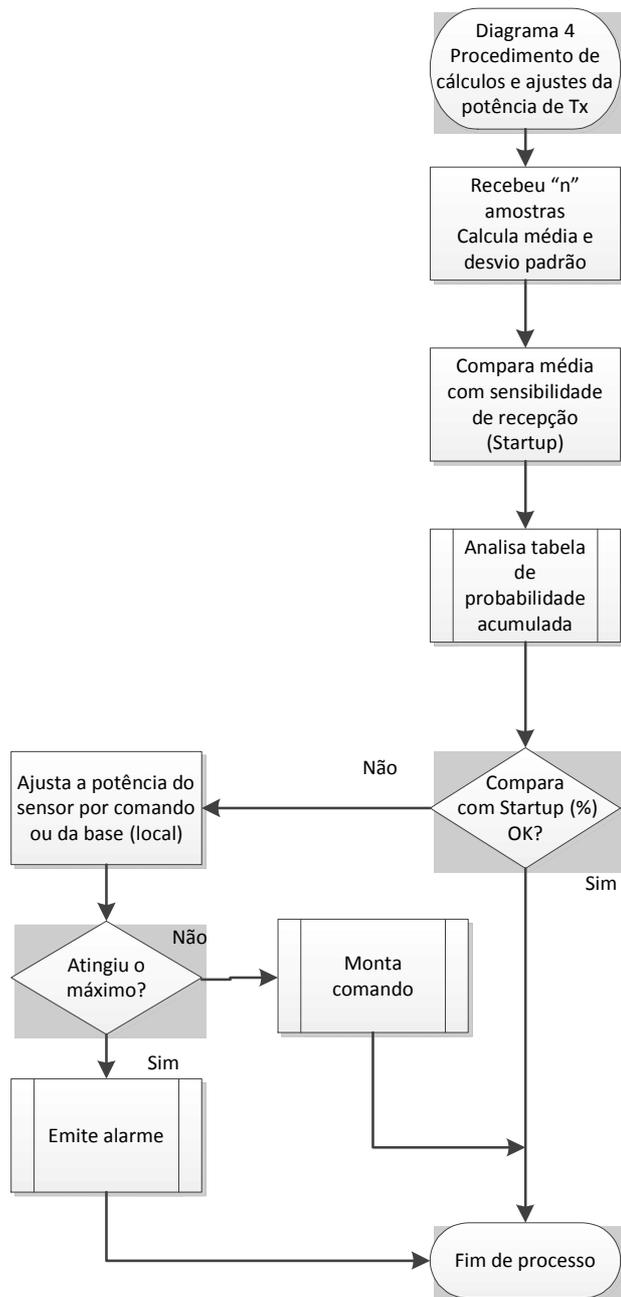


Figura 52 – Fluxo de cálculo e ajuste de potência de transmissão

A Figura 53, o diagrama 3, descreve o fluxo contínuo de informação, o processamento da aplicação e os ajustes que podem ser feitos na comunicação.

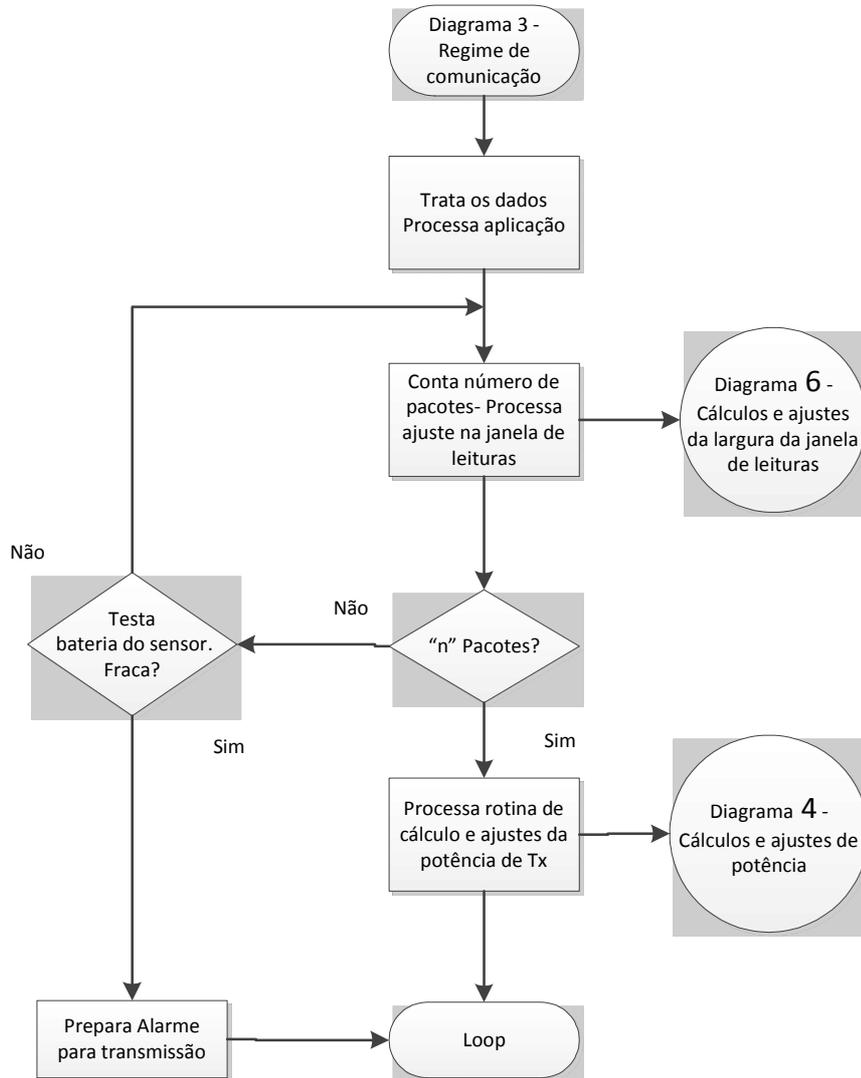


Figura 53 - Fluxo do regime de comunicação

O regime contínuo de comunicação, inicialmente trata os dados da aplicação, a seguir vai para a rotina de análise da janela de leitura de comunicação que processa e ajusta a largura da janela, ou seja, ajusta o número de leitura para o cálculo da média móvel, como será descrito, mais adiante neste trabalho. Depois executa a rotina de cálculo e ajuste da potência de transmissão conforme já descrito. Neste ínterim analisa a bateria do sensor para ver seu nível de tensão e emite alarme para a intervenção externa de troca de bateria. O nível de tensão para considerar a bateria baixa é definido nos parâmetros de inicialização.

A Figura 54 ilustra o ajuste da janela de leitura.

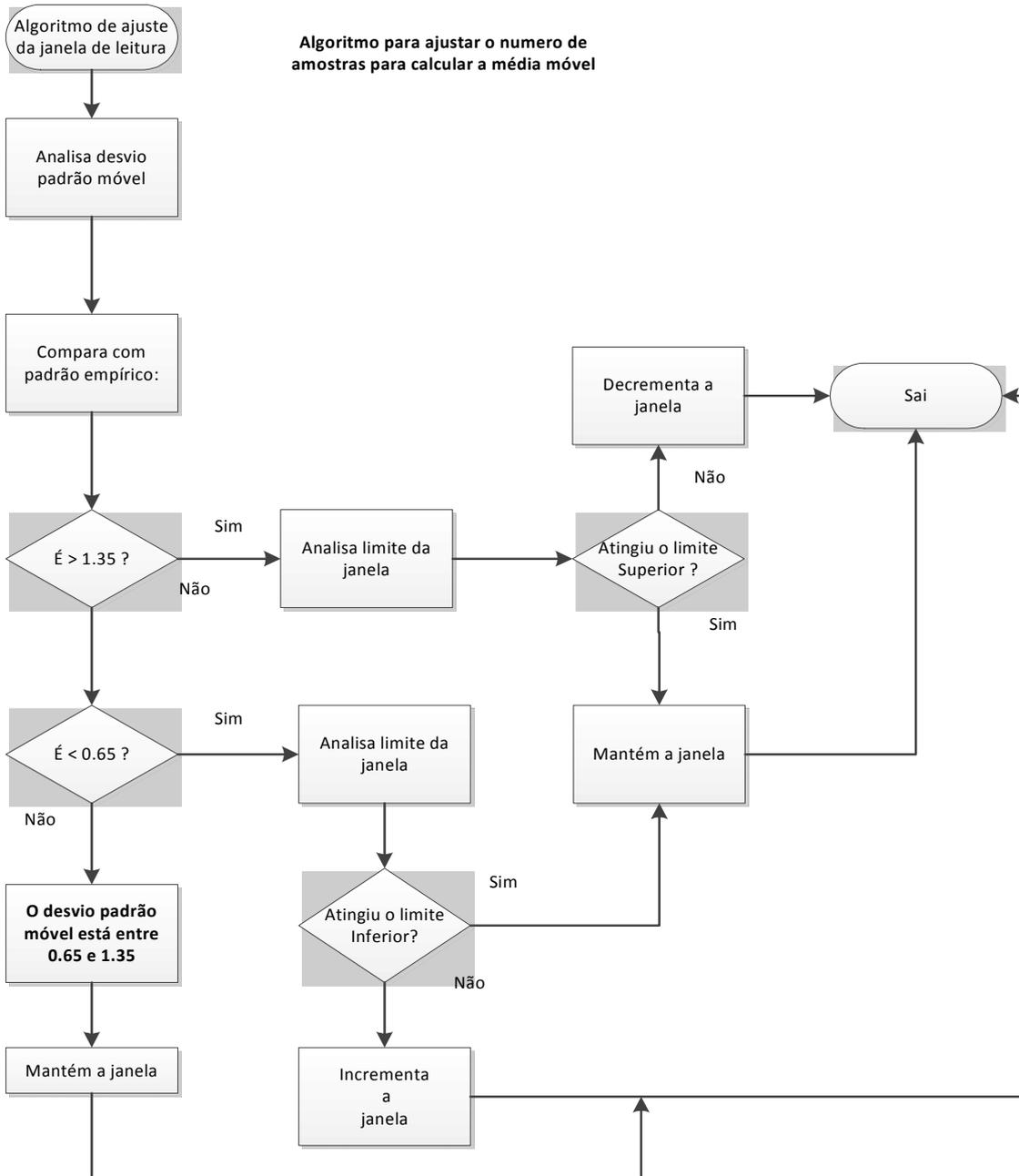


Figura 54 – Ajustes da janela de comunicação

Este processo se desenvolve por meio de uma sequência de cálculos e testes, além de algoritmos para realizar os ajustes.

O primeiro algoritmo é uma forma de processamento da faixa de variação da janela de leitura, isto é, o número mínimo e máximo de amostras para o cálculo da média e desvio padrão móvel. O algoritmo funciona da seguinte forma: dado na inicialização dois tempos, que de acordo com a aplicação e seu nível de criticidade além de características específicas do ambiente devem ser determinados empiricamente, ou seja, realizando testes e estabelecendo quais são os níveis críticos para estes parâmetros antes de colocar a comunicação em funcionamento pleno. Dado um tempo mínimo em que se deseja que a comunicação seja analisada, basta multiplicar este tempo pelo número de leituras por minuto. Teremos o número de leituras mínimo para calcular média móvel e desvio padrão móvel, por exemplo, se a comunicação está ocorrendo a uma velocidade de três pacotes por minuto e o tempo mínimo determinado na inicialização for dez minutos, faz-se a seguinte cálculo:

$$\text{Número de amostras} = 3 \times 10 = 30.$$

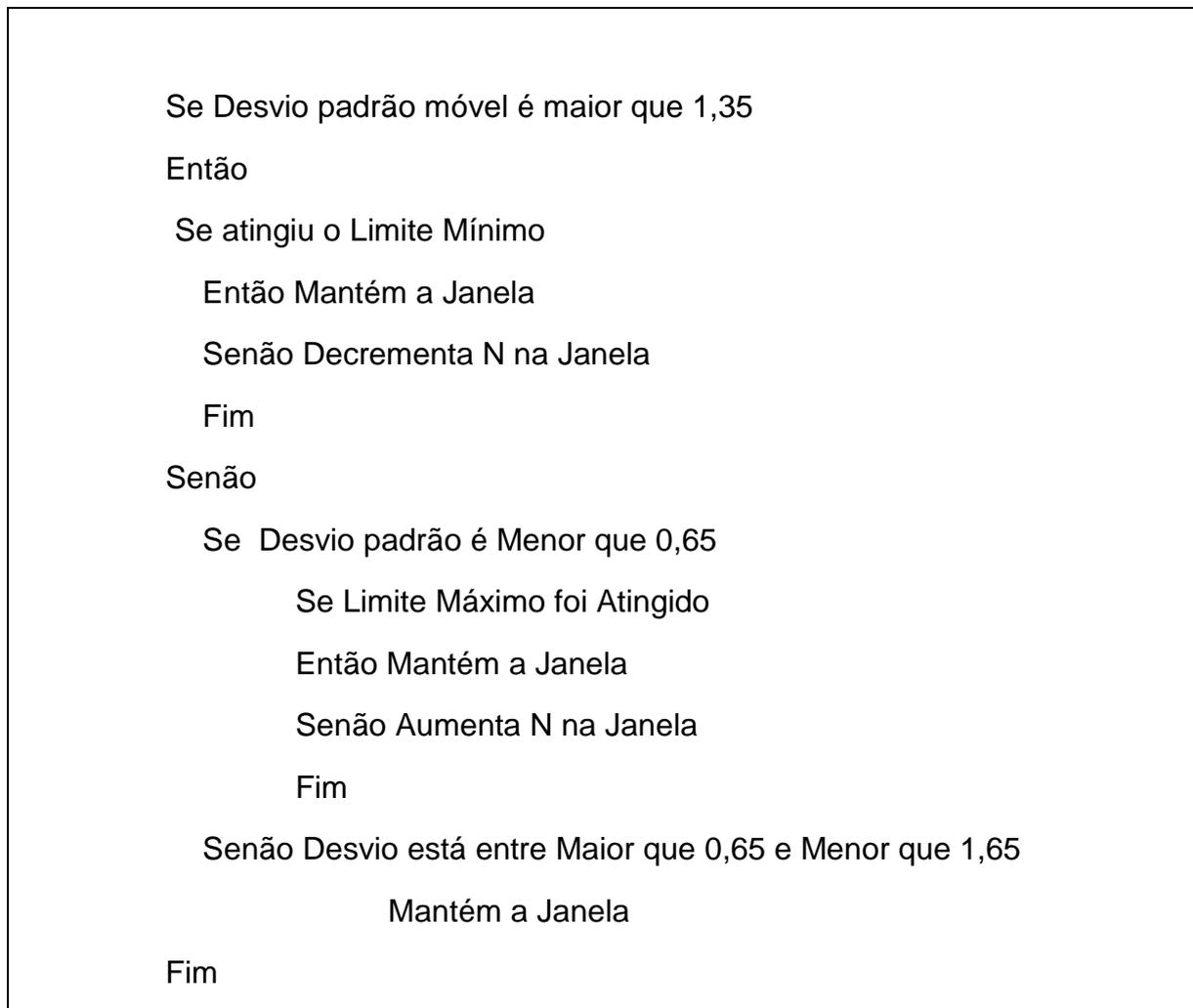
Então a cada trinta pacotes recebidos calculam-se a média, recursivamente, e passa-se ao processo de decisão de manter ou não a janela atual de leitura. Se houver um ajuste para aumento da janela, deve-se analisar o valor máximo estabelecido na tabela de inicialização, realizando o mesmo cálculo. Os passos de incremento ou decremento da janela vêm da tabela de inicialização, também depende de critérios empíricos citados anteriormente.

As médias e o desvio padrão serão calculados a cada janela, se deslocando matematicamente de acordo com as variações do ambiente industrial. Neste caso recomendam-se como padrão para *softwares* embarcados, processos recursivos com a finalidade de economia de espaço de memória.

Neste trabalho, após testes práticos em campo, foi determinado um valor empírico como limiar para disparar o aumento do número de leituras para cálculo do desvio padrão (aumento da janela), valores mínimos e máximo, tomado como referência para ajustes da janela de leitura. A faixa de valores dos limiares do desvio padrão:

- (1,35) como padrão de limiar máximo de variação do desvio padrão móvel.
- (0,65) como padrão de limiar mínimo de variação do desvio padrão móvel.

Desta forma o algoritmo ilustrado no diagrama de blocos na Figura 54, utiliza a seguinte lógica:



Onde N é o incremento da janela definido na tabela de inicialização.

Por outro lado, no módulo sensor, Figura 55, há o reflexo dos comandos recebidos e o processamento da aplicação. Como este trabalho tem como foco a tabela de criticidade ISA, ressalta-se que a diminuição da potência de transmissão é um tópico crítico, pois pode ameaçar a integridade da comunicação em detrimento da aplicação. De acordo com observações nos ensaios realizados na prática em ambiente real, nota-se que a potência de comunicação deste tipo de transmissão é frágil, considerando que o algoritmo de treinamento já estabeleceu a potência mínima de transmissão, os ajustes para potências superiores são realmente necessários, mesmo que em circunstâncias específicas, garantindo a comunicação. Concluindo, os aumentos de potência de transmissão se adequam perfeitamente ao ambiente e suas especificidades sendo

portanto inadequada qualquer diminuição de potência de transmissão sob o risco de perda de contato entre base e sensor.

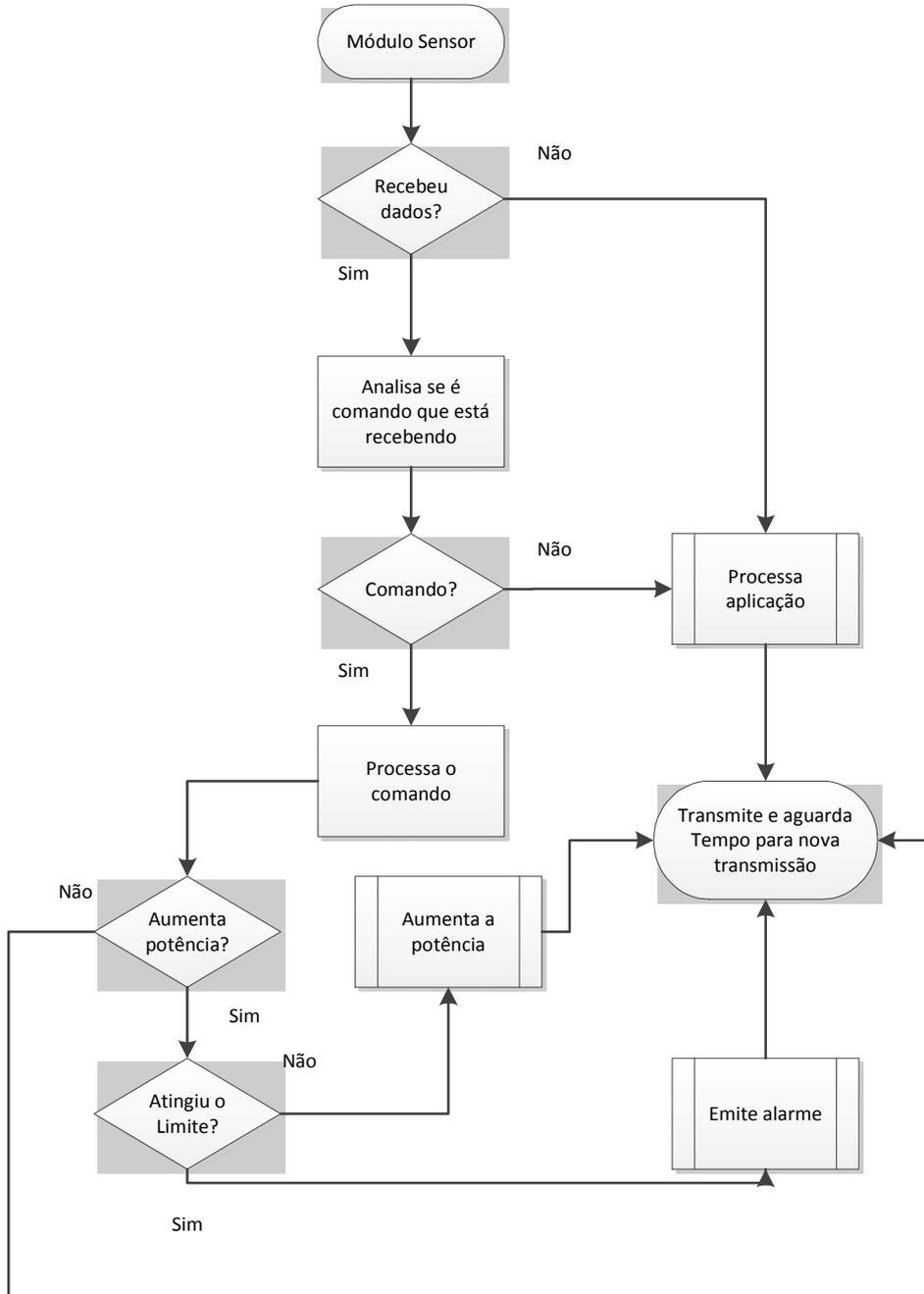


Figura 55 – Processamento no sensor

O sensor primeiramente processa a aplicação e a transmite à base em tempos determinados pelo desenvolvedor do *software* aplicativo; este tempo é baseado nos critério da tabela ISA, conforme já descrito anteriormente.

Na relação de processamento do protocolo de adaptação da comunicação, o sensor aguarda receber comandos. Se o pacote recebido for um comando ele o processa, analisa limiares, e se necessário, emite alarmes para a base. Este processo pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 55.

6. RESULTADOS

6.1. Testes de Funcionamento dos Sensores Implementados

6.1.1 Sensor de corrente

Os resultados experimentais em laboratório estão relacionados na Tabela 6 a seguir, onde podemos ver os as leituras de corrente, certificadas por um amperímetro e a saída do circuito convertidas em mV.

Corrente	Tensão
0.1 A	6.0 mV
0.2 A	9.3 mV
0.3 A	17.4 mV
0.4 A	29.2 mV
0.5 A	37.0 mV
0.6 A	53.2 mV
0.7 A	3.0 V
0.8 A	3.2 V
0.9 A	4.5 V
1.0 A	5.0 V

Tabela 6 – Resultados medidos em laboratório

Pode-se constatar na Figura 56 os resultados no simulador PSPICE. E nas Figuras 57 e 58 os protótipos montados.

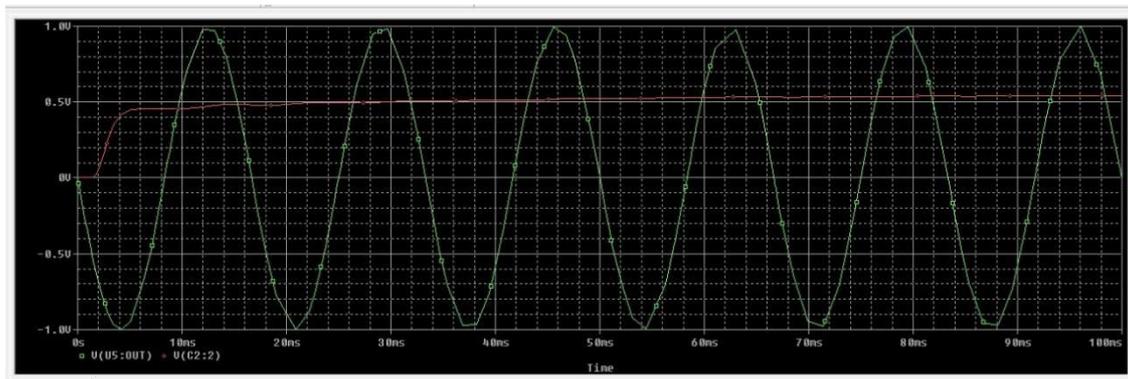


Figura 56 - Simulação do sensor de corrente no PSPICE.

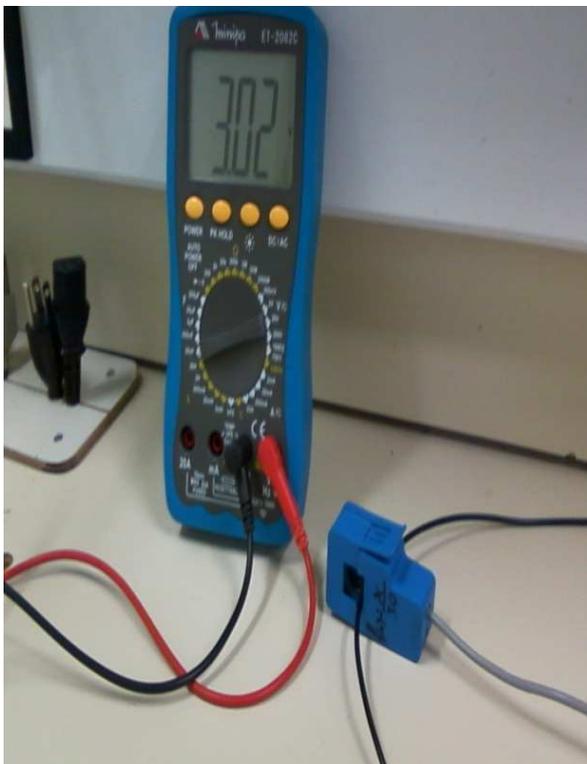


Figura 57 – Protótipo do sensor de corrente

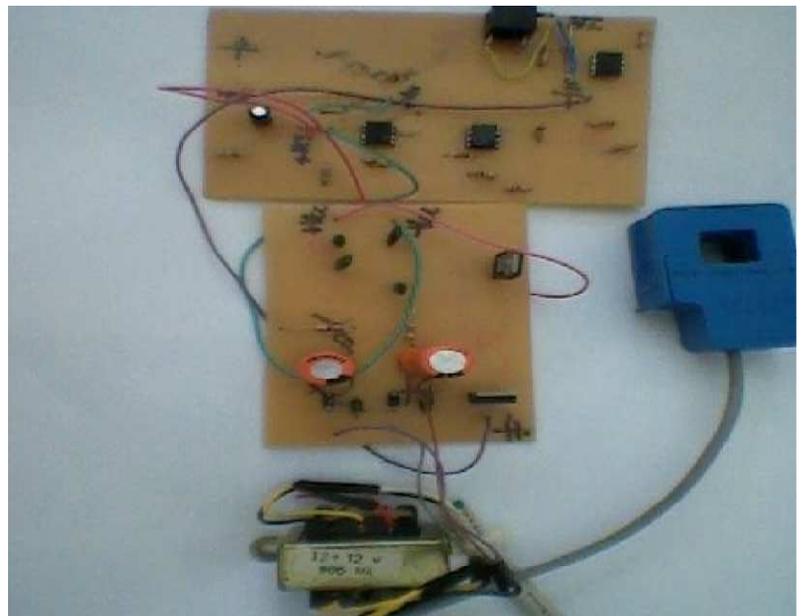


Figura 58 – Protótipo do sensor

Como se pode observar na simulação o circuito comporta-se como retificador e integrador, entregando um sinal retificado à entrada analógica do Rádiuino e evitando a necessidade de circuitos suplementares de *offset*, para evitar a porção negativa do sinal senoidal.

6.1.2 Sensor de tensão

A Figura 59 ilustra o resultado do funcionamento do circuito integrador retificador, demonstrando a onda retificada em onda completa. A entrada simulada com 127 volts foi retificada completamente e a tensão de saída reduzida para aproximadamente 1,6 volts em corrente contínua.

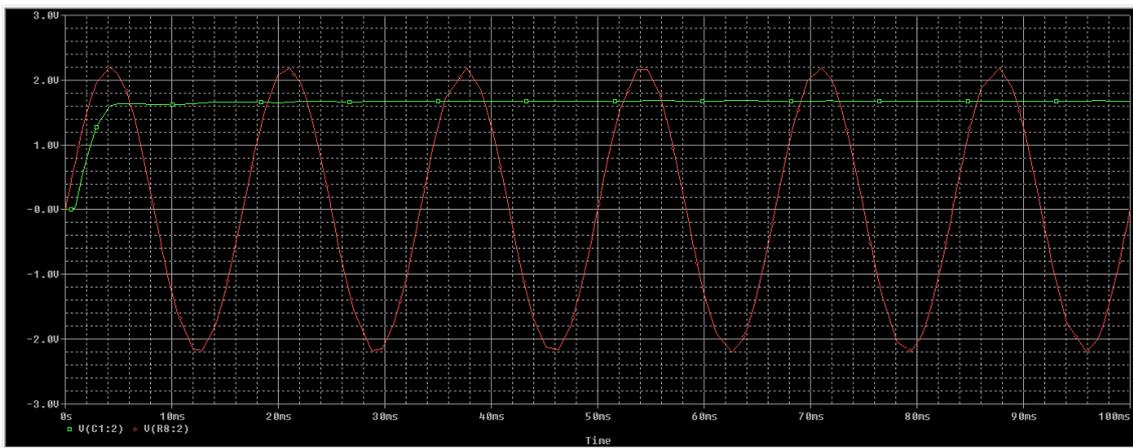


Figura 59 – Onda totalmente retificada e sem a tensão de Ripple e com tensão de saída de 1,6 volts.

Na Figura 60 tem-se a entrada simulada com 220 volts que teve uma retificação de onda completa e a tensão de saída reduzida para aproximadamente 3,3 volts.

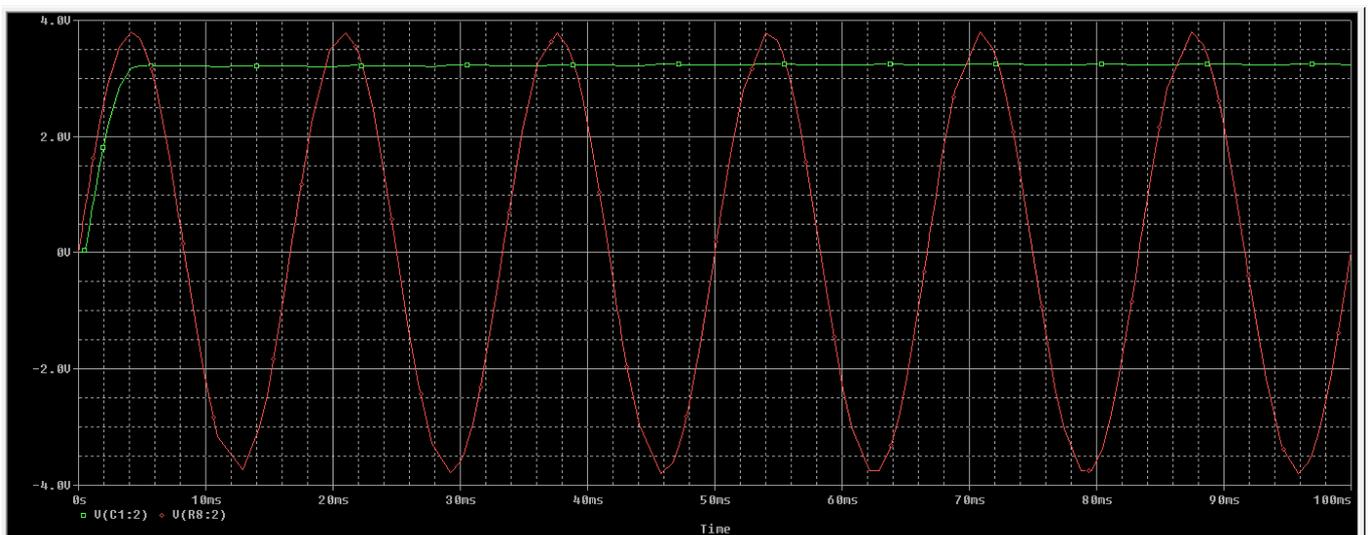


Figura 60 – Onda totalmente retificada e sem a tensão de ripple e com tensão de saída de 3,3 volts.

Tanto para o sensor de corrente como o de tensão, os limites que devem ser amostrados pelo processador de sinais das entradas analógicas do Rádiumo (BE900), por especificação técnica, não devem ultrapassar cinco (5) volts positivos.

6.3 Cálculo da Variável de ambiente β Empresa A

Conforme citado anteriormente, os dados de RSSI foram coletados durante a plena operação de produção da fábrica. Foram escolhidos dados das situações mais críticas onde a variabilidade da potência recebida foi grande e em níveis mais baixos, com uma variação entre -85 dBm e -102 dBm.

O período escolhido foi das 13:09 as 13:19 horas, de retomada da produção, conforme detalhado na Figura 61. Onde o eixo das ordenadas é a potência do sinal recebido e o eixo das abscissas é um número acumulativo de amostras lidas durante os ensaios.

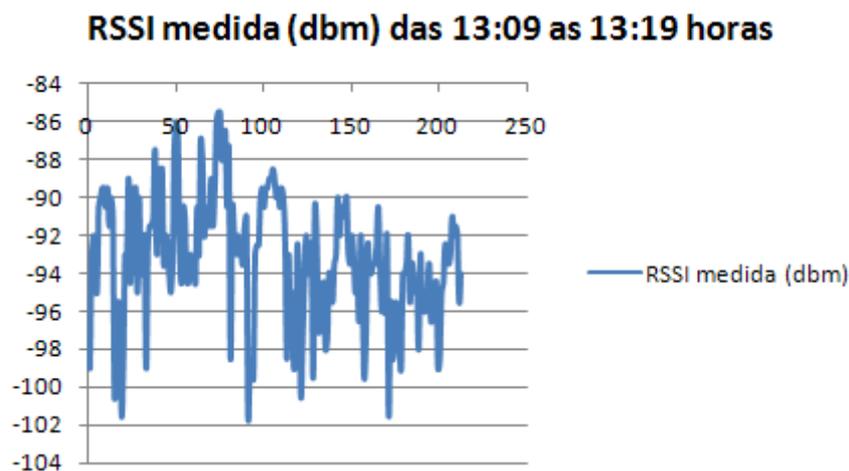


Figura 61 – Dispersão caracterizando os níveis de potência do sinal recebido

Nessa figura, foram escolhidas aproximadamente 250 medidas, com as seguintes características calculadas:

- Média da potência recebida - $\overline{P_{Rx}} [dB] = -93.15$ dB
- Desvio padrão - $\sigma_{dB} = 3.34$ dB

Então, conforme já demonstrado anteriormente:

$$\bar{P}_{RX} = \bar{P}_{TX} + \bar{G}_{TX} + \bar{G}_{RX} - \bar{L}_{EL} + \bar{X}_{dB} \quad (6)$$

Matematicamente, pode-se fazer:

$$L_{EL} = (P_{TX} - G_{TX} - G_{RX}) - \bar{P}_{RX} \quad (11)$$

$$L_{EL} = (10 \text{ dBm} + 6.5 \text{ dBi} + 0 \text{ dBi}) - (-93.15 \text{ dB}) \quad (14)$$

$$L_{EL} = 109.15 \text{ dB} \quad (15)$$

Como, $d = 76$ metros, têm-se:

$$\beta = L_{EL} / (10 * \log d) \quad (16)$$

$$\beta = 109.15 / (10 * \log 76) \quad (17)$$

$$\beta = 5.81 \quad (18)$$

O valor calculado está dentro do que foi estabelecido na Tabela 5, retirado de (RAPPAPORT, 2005)

Pelo Teorema do limite central (TEOREMA, 2013), o desvio padrão da potência recebida, com o aumento do número de dados (população) tende a se aproximar do desvio padrão das médias das amostras ou da variável estocástica; assim, pode-se afirmar que:

$$\sigma_{Pr} = \sigma_{XdB} = 3,34 \text{ dB} \quad (19)$$

Como o modelo *Log-Normal Shadowing* segue uma distribuição *log-normal*, têm-se as probabilidades de recepção de dados variando de acordo com o modelo.

- Até 1σ da média tem-se 63 % de probabilidade de recepção (+ ou - 3.34 dB da média)

- Até 2σ da média tem-se 95 % de probabilidade de recepção (+ ou - 6.68 dB da média)
- Até 3σ tem-se 99,5 % de probabilidade de recepção (+ ou - 10 dB da média)

De acordo com os resultados obtidos, pode-se avaliar soluções para garantia da utilização de RSSF nas classes 1,2 e 3 de criticidade, através do aumento da potência de transmissão. Garantir 99,5 % de probabilidade de recepção dos dados significa aumentar em 3σ o nível de potência de transmissão (ou aproximadamente 10 dBm), o que poderia ser feito de duas maneiras, já que os testes realizados foram feitos com a máxima potência de transmissão do Radiuino:

- Através de ganhos maiores de antenas de recepção e transmissão
- Por meio de repetidores a distâncias menores, com antenas direcionais.

Neste caso específico, a proposta de trabalho é atender as classes da ISA, as características de transmissão poderiam ser esperadas como na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Classes de Uso ISA-100 aplicáveis ao teste

Classes de uso ISA 100 - Aplicável aos testes							Importância da contra ação
Categoria	Classe	Aplicação	Desvio padrão/ Intervalo de confiança	β estimado	Potência de Tx para cada classe		
ISA 100.11a	Segurança	0	Ação de emergência	Cabeamento	Não aplicável	Não aplicável	
	Controle	1	Circuito fechado - controle regulatório	$3\sigma / 99,7\% / 10$ dB	≈ 5.81	20 dBm	
		2	Circuito fechado - controle supervísório	$3\sigma / 99,7\% / 10$ dB	≈ 5.81	20 dBm	
		3	circuito aberto- controle	$2\sigma / 95\% / 6.68$ dB	≈ 5.81	16.68 dBm	
	Monitoração	4	Alertas	$1\sigma / 68\% / 3.34$ dB	≈ 5.81	13.34 dBm	
5		Registro de eventos	$1\sigma / 68\% / 3.34$ dB	≈ 5.81	13.34 dBm		

A potência estimada de transmissão para cada classe (última coluna da tabela) vem da multiplicação do β calculado pelo número de desvios padrões que a classe solicita. Por exemplo, a Classe 1 requer $5.81 \times 3.34 = 19.40$ dBm, nesse caso aproximado para 20 dBm.

Considerando que o limite de recepção especificado pelo fabricante do circuito integrado CC1101 é de -112 dBm, pode-se afirmar que, sendo a média da potência do sinal recebido igual a -93.15 dBm e o desvio padrão 3.34 dB, ainda assim no nível mais crítico, -103 dBm (-93.15 dBm -10 dB), seria possível o enquadramento na faixa de 99.7% da probabilidade de recepção das Classes 1 e 2 da ISA, e que as Classes 3,4 e 5 seriam plenamente atendidas.

Dentro das recomendações a ISA 100.11^a, a utilização de RSSF, quando não é possível utilizar cabeamento, o algoritmo estabelece a variabilidade do ambiente, compensando, garantindo a integridade do recebimento dos dados do sensor.

6.4 Cálculo das médias e desvios padrões na Empresa B

Cálculos dos resultados medidos na empresa B. A Tabela 8, contém os resultados dos cálculos das amostras de RSSI coletadas na Empresa B, com suas datas e a divisão dos períodos dentro de cada dia.

Tabela 8 – Média de ensaios na Empresa B

Data/ Período	RSSI (dBm)			
	Uplink (Média)	Desvio Padrão	Downlink(Média)	Desvio padrão
23/09/2013	-98,68	3,24	-93,16	3,35
7:00 às 10:59	-98,68	3,75	-93,76	3,76
11:00 às 12:59	-101,37	1,67	-95,94	1,70
13:00 às 17:00	-97,56	2,65	-91,99	2,83
25/09/2013	-95,47	2,52	-89,36	2,64
7:00 às 10:59	-96,34	3,04	-90,24	3,08
11:00 às 12:59	-94,66	1,53	-88,47	1,59
13:00 às 17:00	-95,06	2,07	-88,99	2,33
26/09/2013	-89,01	4,18	-83,80	2,90

7:00 às 10:59	-89,60	3,48	-84,01	2,52
11:00 às 12:59	-83,65	1,17	-80,76	0,72
13:00 às 17:00	-91,18	3,33	-85,16	2,81
27/09/2013	-96,77	2,76	-90,76	2,90
7:00 às 10:59	-97,79	2,73	-91,73	2,82
11:00 às 12:59	-96,49	2,32	-90,59	2,48
13:00 às 17:00-	-94.41	1,85	-88,31	2,27

Os gráficos com os resultados dos testes em campo serão apresentados na sequência, com a observação que foram realizados nas datas citadas na Tabela 8 e que para demonstração foi utilizado o dia 23/09/2013, por ser o de maior movimentação na empresa (observado na prática). Os gráficos dos outros dias estão em anexo neste trabalho inclusive com a separação por períodos do horário de funcionamento da Empresa B.

A Figura 62 ilustra a variação do sinal durante o todo expediente da Empresa B na data de 23/09/2012, com potência de transmissão configurada para +10 dBm.

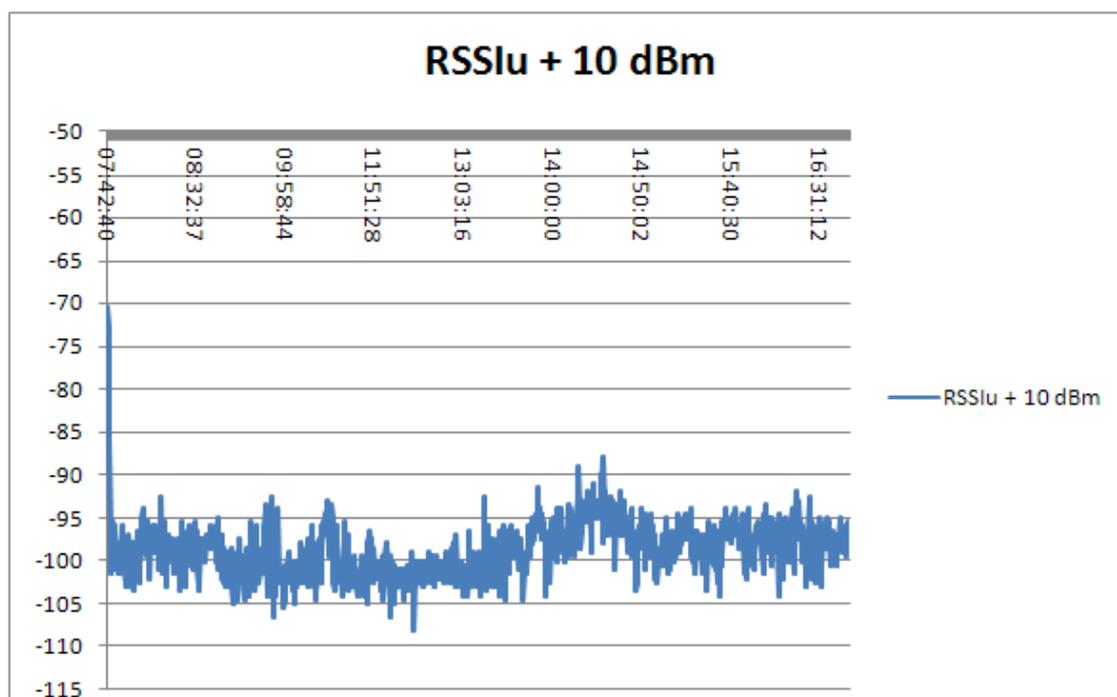


Figura 62 – Transmissão a + 10 dBm em horário de expediente, RSSI Uplink

A Figura 63 ilustra a transmissão durante o expediente na mesma data com potência de 0 dBm.

Neste caso pode-se observar que o limiar de recepção (-112 dBm), foi ultrapassado, o que indica claramente, a necessidade de aumento de potência de transmissão, que poderia ser realizado automaticamente por um algoritmo adaptativo.

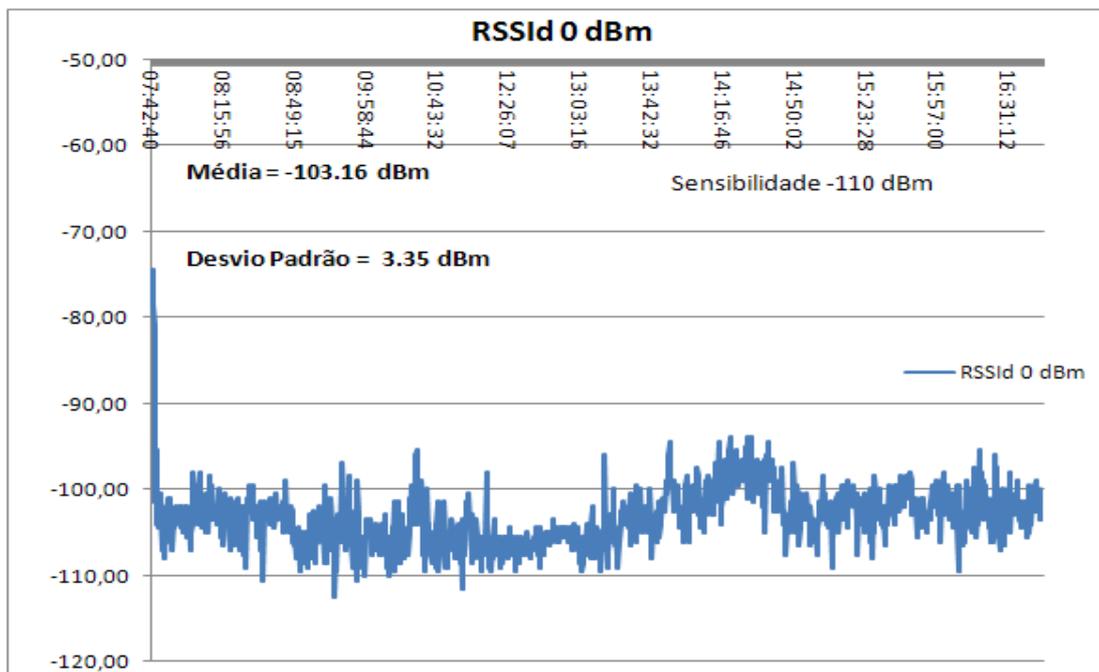


Figura 63 – Transmissão a 0 dBm

A Figura 64 ilustra uma transmissão a 0 (zero) dBm, mas com cálculo de média móvel, dada uma janela de leitura de amostras, a média é calculada em um número fixo de leituras desprezando a primeira recebida, incluindo a mais recente. Pode-se observar que a média móvel suaviza a violação dos limiares. Mas também se pode notar que no período entre 12:30 e 12:55 horas há uma clara discrepância no comportamento do sinal, atingindo o limiar de recepção do Radiuino em -112dBm.

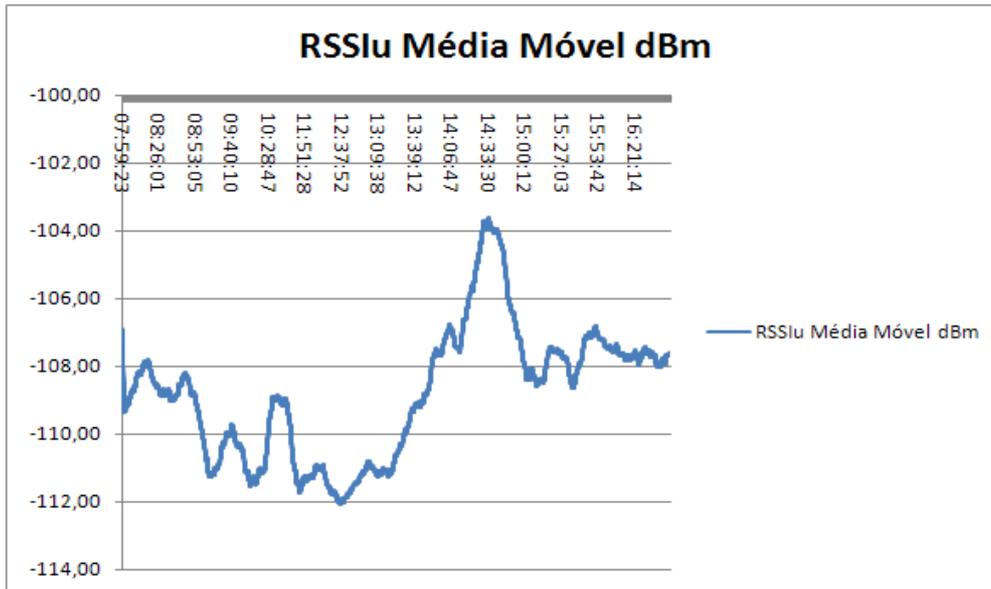


Figura 64 – Comportamento da média móvel a 0 dBm

A Figura 65 ilustra o comportamento do desvio padrão calculado a partir da média móvel e é interessante observar sua variação durante o expediente da produção, fato que demonstra a necessidade de um algoritmo adaptativo na comunicação.

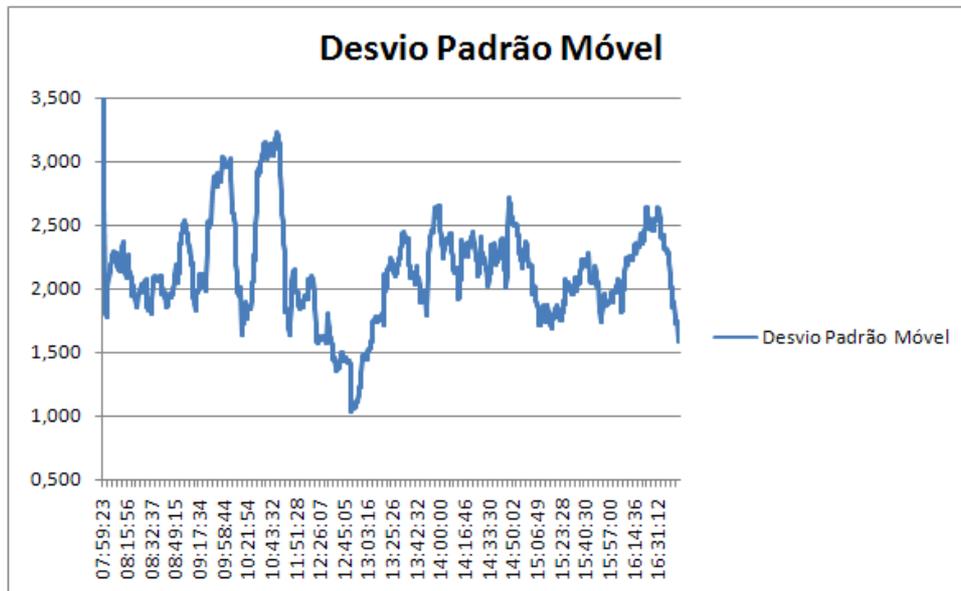


Figura 65 – Comportamento do Desvio padrão móvel.

No mesmo período que o caso anterior também denota uma anormalidade no sinal.

Exemplo de adaptação: aumento de potência via algoritmo adaptativo:

A seguir, na Figura 66, são apresentados resultados provenientes da aplicação do algoritmo adaptativo proposto neste trabalho. O algoritmo foi aplicado no período de anormalidade no sinal, com aumentos de potência de transmissão de +5 dBm.

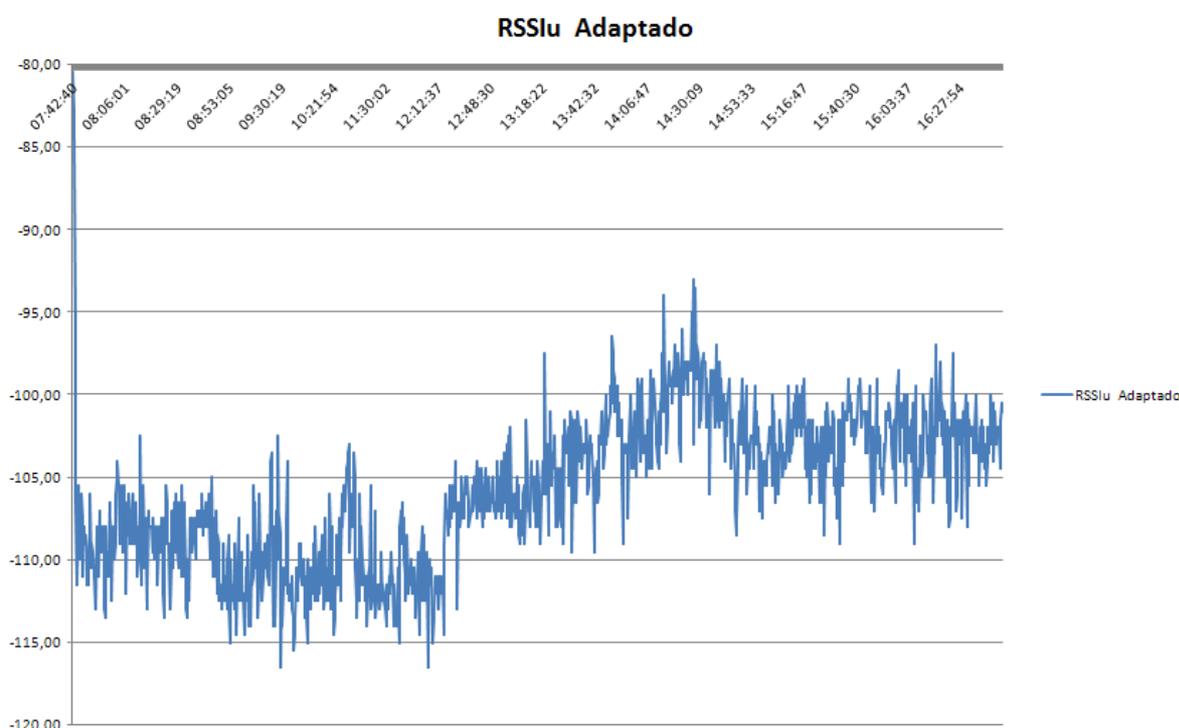


Figura 66 - Adaptação da potência do sinal + 5 dBm

O processo de adaptação ocorreu a partir do ponto crítico 12:25 horas, somando 5 dBm na potência do sinal transmitido pelo sensor. Observa-se claramente que, considerando o limiar de sensibilidade em -110 dBm, a comunicação está normal. O algoritmo neste caso não poderia considerar possibilidade de diminuição de potência, visto que com 0 dBm (zero) não houve sucesso na transmissão. A diminuição da potência deve ser considerada, conforme já foi citado neste trabalho, mas com critérios de acordo com o histórico do que ocorreu nas comunicações anteriores.

Na próxima aplicação do algoritmo, cujos resultados estão ilustrados na Figura 67, considera-se o limiar de recepção em -100 dBm. O algoritmo então procederá um ajuste

no próximo passo superior permitido pelo dispositivo de + 7 dBm. Neste caso, o ponto crítico já ocorreria nas primeiras transmissões do dia no horário a partir da 08h00min. Após uma janela de 20 leituras o algoritmo atua. O comportamento do sinal então fica conforme a Figura 67:

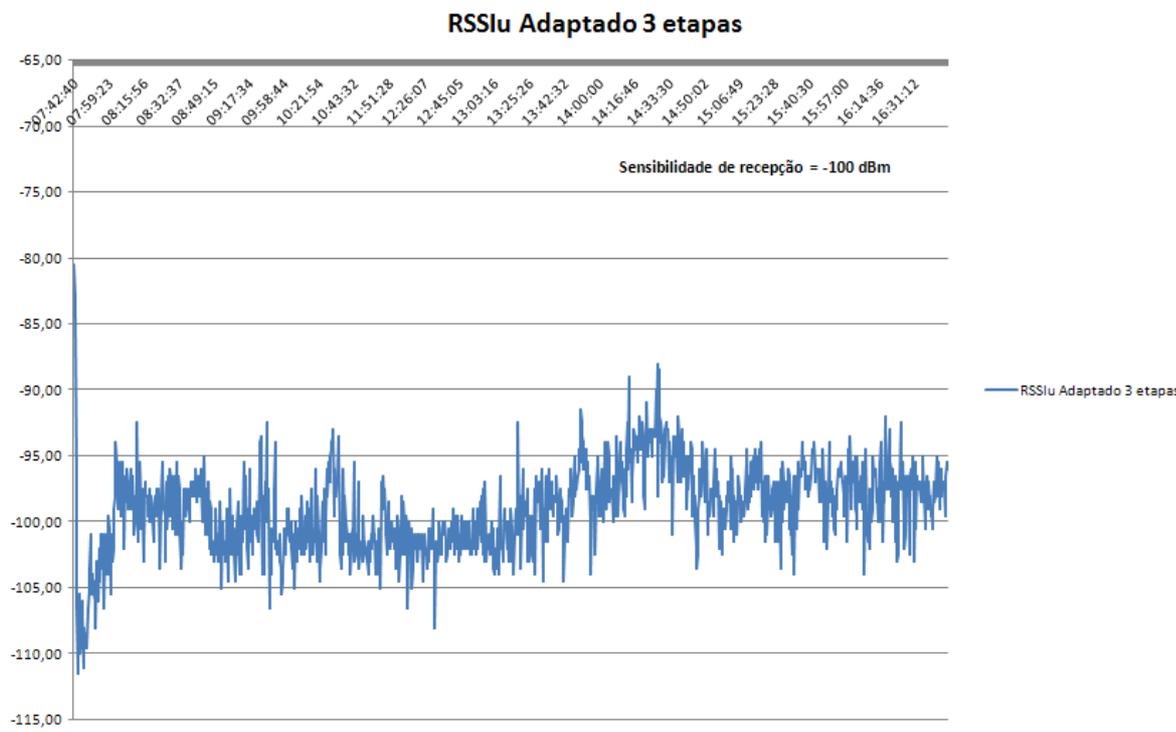


Figura 67 – Adaptação em três etapas.

Ao adotar a sensibilidade de recepção, pode-se observar que neste ambiente é necessária uma intervenção externa, como troca da antena, colocação de elemento intermediário, ou seja, soluções que o protocolo não tem alcance. Já no início de transmissão, o limiar de -100 dBm foi atingido, o algoritmo adaptou-se e corrigiu a potência de transmissão para + 5 dBm, vinte leituras depois, o limiar foi atingido, nova adaptação ocorreu para + 7 dBm e ainda assim houve violação do limiar. A última instância foi a correção para + 10 dBm, que ainda assim não impediu sinais abaixo de -100 dBm. Então o algoritmo reage e emite um alarme pedindo intervenção externa.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho focou as redes de sensores sem fio, suas especificações e possíveis aplicações em um ambiente industrial considerado hostil a este tipo de comunicação.

As redes deste tipo tem uma ampla gama de aplicações em vários setores desde a finalidade educativa, aplicações residenciais, automação comercial e aplicações industriais de missão crítica.

No início, este trabalho seria dirigido para ambientes industriais de manufaturas metalúrgicas, com a finalidade de levantar o custo de energia elétrica em operações produtivas por máquina. Com o desenvolvimento da análise dos requisitos, novos desafios se apresentaram, relacionados às transmissões de rádio frequência em ambientes hostis elétrica e fisicamente para ondas de rádio. Após um estudo dos efeitos de um ambiente com motores, máquinas, movimentação de pessoas e equipamentos, na comunicação sem fio, foram realizados testes e implementado um algoritmo adaptativo que mostraram ser possível compensar e superar os problemas associados à variabilidade do chão de fábrica.

A seguir, encontram-se descritos os desafios e limites observados:

- As características do ambiente fechado industrial, onde há movimento de pessoas, máquinas e equipamentos foram levantadas por cálculos sobre os dados colhidos na Empresa A, conforme foi descrito por Rappaport (RAPPAPORT, 2005), comprovou-se com o β estimado em seu livro dentro dos parâmetros no local dos testes.
- Não foram observadas interferências eletromagnéticas na frequência de 915 MHz, que se houvessem teriam se traduzido em erros na comunicação ou perda de pacotes que pudessem ser observados no nível da camada de rede de aplicação..
- A relação sinal ruído pode ser aumentada pelo aumento da potência do sinal, assim como o alcance da transmissão.
- Foram utilizados dois tipos de Antenas, verificando-se que o ganho de cada tipo de antena tem fator preponderante na transmissão. No primeiro caso, com uma antena direcional dipolo com painel refletor, houve um desempenho, em termos de alcance, superior à antena tipo Yagi.

- Restaria analisar a velocidade de transmissão, que como parâmetro da comunicação poderia ser utilizado de forma a minimizar erros, já que a taxa de transmissão de dados pode não ser crítica. Mas para implementar um algoritmo em *software* para realizar estes ajustes, bem como possíveis alterações em canais de transmissão, deveriam ser consideradas as barreiras associadas à arquitetura do equipamento. Deve-se acrescentar que esta impossibilidade deve-se ao fato de que haveria a necessidade de interromper a comunicação de dados em uma fase de reconhecimento de canais e velocidade o que inviabilizaria aplicações com missão crítica.

Após testes, coleta de dados e cálculos, foi demonstrado que é possível implementar um algoritmo via *software* que primeiro estabelece os parâmetros do ambiente, através de um método chamado de treinamento. Depois, de acordo com níveis de criticidade estabelecido para o tipo de aplicação, considerando os níveis de criticidade ISA, define-se um conjunto de parâmetros variáveis que garantem um processo adaptativo de ajuste da potência de transmissão ao longo da comunicação. Os limites percebidos ao longo do trabalho foram específicos do equipamento e do ambiente. Por exemplo, existem modelos BE990 (BE900, 2013) que podem transmitir até + 20 dBm de potência, mas é preciso usar critérios para esta análise, pois podem ocorrer interferência em outros sensores ou mesmo saturar o ambiente com radiações eletromagnéticas.

Por fim, pode-se concluir que é perfeitamente viável a utilização de redes de sensores sem fio em ambiente industrial, considerando os níveis críticos da aplicação, sem necessidade de fiação e proporcionando mobilidade.

Uma possibilidade para estudos futuros, seria o acréscimo estratégico de módulos sensores, funcionando como Proxy (agente de desvio de comunicação) em estado de dormência, que seria ativada em caso de situações críticas da comunicação, funcionando assim, como uma ligação redundante para a chegada da comunicação à base.

O observado na prática, foi que realmente o que interfere na comunicação são os obstáculos físicos e seus movimentos, coisa comum em um ambiente de manufatura, como por exemplo, movimento de matéria prima em processo (objetos metálicos) por meio de pontes rolantes ou veículos tipo empilhadeiras. Por este motivo, a colocação do Proxy deve ser bem estudada e testada em situações de movimento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, I. F. et al. *Wireless sensor networks: a survey*. Computer Networks, Atlanta, n.38, p. 393-422, December 2001.

ATMEL. *8-bit AVR^R Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash*. 2004. 2545DS AVR 07/04. Disponível em: <http://www.datasheetcatalog.org/data/sheets/228/219592_DS.pdf>. Acesso em: 15 Jul. 2013.

ARDUINO. 2013. Disponível em: < <http://arduino.cc/en/Guide/HomePage> >. Acesso em: 25 set . 2013.

AVR 28 Pin 20MHz 16K 6A/D: ATmega168. *Robotronic: components, parts, kits,2012* Disponível em: <http://www.robotronic.co.nz/index.php?main_page=product_info&products_id=5>. Acesso em: 15 set. 2013.

BE900 2013. Disponível em < <http://www.radioit.com.br/> > Acesso em 15 set 2013

CAMILO, T. et al. Redes de Sensores Sem Fios, considerações sobre a sua instalação em ambiente real. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS COMPUTING (UBICOMP), 14., 2012, Pittsburgh, PA. *Proceedings...* Pittsburg: CSMU, 2006 Disponível em: <<http://ubicomp.algoritmi.uminho.pt/csmu/proc/camilo-125.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2013.

CHOY, A. Research and Markets Adds Reports on Wireless Sensor Network Technology. *Azosensors.com*, 28 Mar. 2012. Disponível em: <<http://www.azosensors.com/news.aspx?newsID=4000>>. Acesso em: 15 set. 2013.

CPQD. *SMART GRID: A Caminho da Rede Inteligente*. 2012. Disponível em: <<http://www.cpqd.com.br/highlights/4368-smart-grid-a-caminho-da-rede-inteligente.html>>. Acesso em 21 fev. 2013.

DOE - BA Akyol,H Kirkham,SL Clements,MD Hadley US Department of Energy - A Survey of Wireless Communications for the Electric Power System, 2010, disponível em <http://www.pnnl.gov/nationalsecurity/technical/secure_cyber_systems/pdf/power_grid_wireless.pdf > Acesso em 28 ago 2013

FLORIDO, I. R. *Rede de Sensores Sem Fio em Ambientes Veiculares Baseada no Padrão ZigBee*. 2008. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-19082008-171044/pt-br.php>>. Acesso em: 01 mar. 2013.

GIACOMIN, J. C.; VASCONCELOS, F. H. Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada

Física. *INFOCOMP: Journal of Computer Science*, v. 5, n.2, p. 83-92, 2006. Disponível em: <<http://www.dcc.ufla.br/infocomp/artigos/v5.2/art11.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2013.

GRACIOLI, Giovanni et al. Evaluation of an RSSI-based Location Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Revista IEEE América Latina*, v. 9, p. 830-835, 2011. Disponível em: <http://www.revistaieeela.pea.usp.br/ieee/issues/vol9issue1March2011/9TLA1_15PereiraPires.pdf>. Acesso em: 15 set. 2013.

HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas Modernos de Comunicacao Wireless*. Tradução de Glayson Eduardo de Figueiredo e Jose Lucimar Nascimento. Porto Alegre: Bookman, 2008

IEEE 2001 -INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERING, 2001-802.15.4: *A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks* - Jose A. Gutierrez, Marco Naeve, Eaton Corporation, Ed Callaway, Monique Bourgeois, Motorola Labs, Vinay Milter, Qualcomm Inc. ,Bob Heile, consultant

IEEE 2006 - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERING, 2006 Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, Jin-Shyan Lee.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGENEERING, 2005 *Wireless Technology in Industrial Networks*, ANDREAS WILLIG, MEMBER, IEEE, KIRSTEN MATHEUS, MEMBER, IEEE, AND ADAM WOLISZ, SENIOR MEMBER, IEEE

IEEE Std 802.15.4TM, *IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 2003.

IEEE Std 802.15.4TM, *IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 2006.

ISA ORG 2013 Disponível em <[http://www.isa.org/MSTemplate.cfm?](http://www.isa.org/MSTemplate.cfm?MicrositeID=1134&CommitteeID=6891)

[MicrositeID=1134&CommitteeID=6891](http://www.isa.org/MSTemplate.cfm?MicrositeID=1134&CommitteeID=6891)>-.ISA100, *Wireless Systems for Automation* - Acesso em 15 jun 2013

MUNDO WIFI, Disponível em <http://www.mundowifi.com.br/forum/showthread.php/35902-Tudo-sobre-Dbi-e-a-rela%C3%A7%C3%A3o-de-pot%C3%Aancia-e-ganho-de-Antenas-Wireless> Acesso em 12/11/2013 8:45 hrs.

JACINTO, R. M. P. *Modelação da Propagação numa Rede de Sensores sem Fios*. 2012. 84f. Dissertação (Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012). Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/8162/1/Jacinto_2012.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2012.

LINK BUDGET FADING Disponível em <http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/webes/link_budget_12.html> acesso em 27/10/2013 às 12:00 horas

LUIZ, F.C. *O que é Smart Grid?* Smartgrid news. 2010. Disponível em: <<http://smartgridnews.com.br/o-que-e-smart-grid/>>. Acesso em: 15 jul. 2013.

LUQUETA GERSON R., BRANQUINHO OMAR C., BIANCHINI DAVID – “Caracterização da propagação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais utilizando RSSI como parâmetro de avaliação” - Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, São Paulo – SP, 2012.

PERES, A. *Mecanismo de Autenticação Baseado na Localização de Estações Sem Fios Padrão IEEE 802.11*. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18634/000729269.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 26 jul. 2013.

RADIUINO. 2013. Disponível em: <<http://radiuino.cc>>. Acesso em: 25 set . 2013.

RAPPAPORT, THEODORE S. “Wireless Communication – Principles and Practice”, Prentice Hall PTR – 2005

RODRIGUES, Márcio E.C., Parte da Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Elétrica PUC – Rio, Abril de 2000 (http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/marcio_rodrigues/propagacao/pro_p_01.html (09042013))

SEIDEL, S. Y.; RAPPAPORT, T. S. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 40 Issue 2, February 1992.

STALLINGS, W. WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKS, Pearson Prentice Hall, 2005

TAURION, CEZAR Software Embarcado: Oportunidade e potencial de mercado, Rio de Janeiro: Brasport, 2005

TECMUNDO, 2013. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/celular/2140-historia-a-evolucao-do-celular.htm>> Acesso em 06/11/2013 às 13:00 horas

TEOREMA 2013 , Teorema do limite central. Disponível em <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE001/node38.html>> acesso em 04/11/2013 as 11:00 horas.

TEXAS. *Transceptor CC1101 Datasheet*. Texas Instruments, 2012. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>>. Acesso em: 12 Jun 2013.

9. Apêndices

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NO VII WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO PAULA SOUZA EM 2012

Medidor de energia embarcado para máquinas industriais implementado em rede de sensor sem fio

Edson T. Procopio,
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil
ed_taira@hotmail.com

José Luís Pagotto,
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil
Centro Universitário Nossa Senhora do Patrocínio – SÃO PAULO - Brasil
pagotto.jl@gmail.com

Alexandre de A. Mota
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil
amota@puc-campinas.edu.br

Lia T. M. Mota
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil
lia.mota@puc-campinas.ed.br

Resumo - Este artigo apresenta uma proposta de dispositivo medidor de energia embarcado para monitorar individualmente o consumo de energia elétrica de máquinas produtivas em manufatura. As informações obtidas pelo dispositivo podem oferecer condições de análise de custo em operações produtivas, manutenção e análise do dimensionamento de componentes (motores). A metodologia de trabalho utilizada é a implementação de redes inteligentes de sensores sem fio, com plataforma aberta de *hardware*, o módulo RFBee. O principal objetivo deste trabalho é através de uma rede de sensores sem fio obter resultados relevantes para a empresa, racionalizando a eficiência do consumo de energia elétrica na indústria de manufatura.

Palavras-chave - *Redes de Sensores Sem Fio; Medição de Energia; Eficiência Energética; Hardware Livre.*

a) Introdução

O ambiente industrial é caracterizado pela produção contínua. Assim, eventos que geram paradas na linha de produção e custos adicionais embutidos no processo produtivo podem causar efeitos comprometedores na condição financeira de uma indústria. Uma forma de conseguir controlar, e reduzir, os impactos que esses fatores podem causar é monitorar, de forma individual, os equipamentos que compõem a linha de produção no que diz respeito ao seu consumo de energia elétrica individual. Através dessas medições, é possível, posteriormente:

- Analisar o custo associado ao consumo de energia elétrica em operações produtivas com máquinas de grande consumo;
- Avaliar o dimensionamento de motores, em meios produtivos;
- Prevenir o aumento do custo associado ao consumo de energia elétrica por falta de manutenção preventiva.

A análise individual do consumo de energia elétrica dos meios de fabricação permitirá a separação clara do custo embutido em seu funcionamento nas operações de fabricação.

Os resultados desta análise poderão fornecer subsídios para outros aspectos pontuais da indústria, como intervenção de manutenção antes de uma parada inesperada de uma máquina.

Na prática, a manutenção destes meios ocorre de forma corretiva, ou seja, após algum evento que impossibilite o funcionamento. Em alguns casos, não é aplicada a precisão necessária no momento da substituição dos componentes comprometidos, por conta da necessidade de restabelecer o funcionamento da linha de produção o mais rápido possível, o que pode resultar em novos problemas, como super

dimensionamento, principalmente de motores, em virtude da necessidade urgente da continuidade da produção.

Para realizar a medição individualizada, este trabalho propõe a utilização de redes de sensores sem fio segundo o padrão IEEE 802.15.4[1].

As redes de sensores sem fio têm sido muito discutidas tanto no meio acadêmico como na indústria, devido ao conceito de aplicação abrangente nas mais diversas áreas de monitoramento, tanto no uso residencial como no uso industrial [2]. A idéia de utilizar uma rede de sensores inteligentes sem fio no ambiente industrial, complementada com serviços de telecomunicações para monitoração de consumo individual de energia elétrica por máquina produtiva pode trazer benefícios relevantes para a indústria no que concerne ao conceito de redes inteligentes (Smart Grids) [3].

O trabalho desenvolvido está apresentado da seguinte maneira: na Seção **b** é detalhada a arquitetura de *hardware* e na Seção **c** a arquitetura de *software* proposta. Na Seção **d** são apresentados os benefícios a serem adquiridos com esta arquitetura para a indústria e as dificuldades que podem se apresentar em um ambiente industrial e uma discussão/conclusão sobre propostas de melhorias do dispositivo.

b) Arquitetura de *Hardware*

O dispositivo medidor é composto por elementos com funções específicas de condicionamento de sinal e transmissão de dados. No condicionamento de sinal existem funções do circuito medidor de tensão, circuito medidor de corrente e leitura do micro controlador no módulo sensor do RFBee. Na transmissão de dados, através de comunicação sem fio, estão os módulos sensores e módulo base do RFBee e uma unidade computacional que recebe as informações que chega no módulo base. A arquitetura do conjunto está representada na Figura 1.

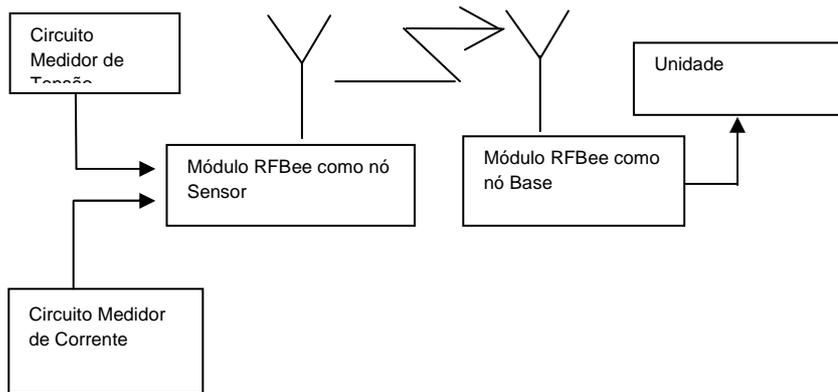


Figura 1. Arquitetura de *hardware*

Sensores de Tensão e Corrente

Para realizar a medição da potência consumida nos equipamentos foram desenvolvidos circuitos para fazer a medição de tensão e corrente que alimentam este equipamento.

O circuito medidor de tensão, apresentado na Figura 2, tem na sua configuração um transformador de potencial (TP), isolando o dispositivo da alimentação do equipamento monitorado, resistores R1 e R2 formando um divisor de tensão e um nível de tensão DC, atuando como offset do sinal que será recebido pelo micro controlador contido no módulo RFBees. O sinal AS1 na Figura 2 representa o sinal da porta de leitura analógica do módulo.

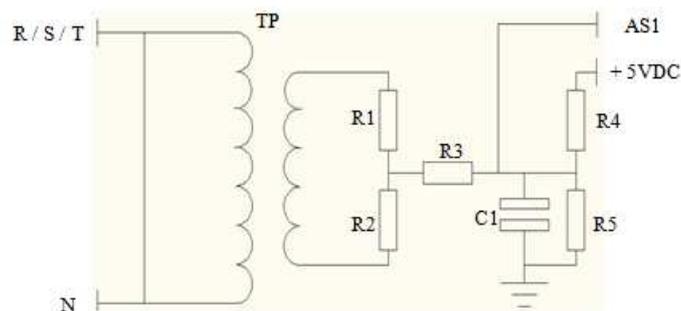


Figura 2. Circuito medidor de tensão

O circuito medidor de corrente, apresentado na Figura 3, é composto de um transformador de corrente (TC) e também um nível de tensão, atuando como offset do nível de tensão obtido na saída do TC.

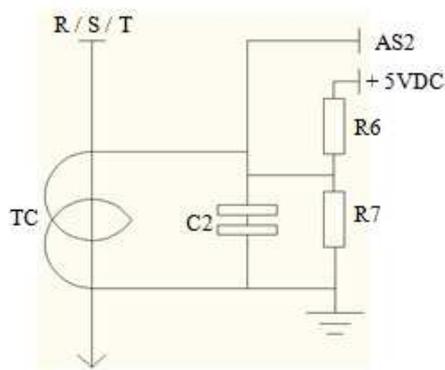


Figura 3. Circuito medidor de corrente

O offset introduzido nos sinais recebidos pelo micro controlador tem a função de torná-los positivos para a leitura dos níveis dos sinais em sua porta analógica.

Como o trabalho realizado destina-se a monitorar o consumo de energia elétrica de equipamentos industriais, foi necessário desenvolver um circuito medidor de tensão e um circuito medidor de corrente para cada uma das fases (R, S e T) que alimenta o equipamento, considerando que sejam equipamentos trifásicos.

Rede de Sensores

A rede de sensores é formada pelos módulos RFBee sensor e módulo RFBee base.

O RFBee é uma plataforma de *hardware* livre, compatível com a plataforma Arduino, que vem sendo muito utilizada em projetos de eletrônica, utilizando *hardware* com *software* embarcado, devido possuir uma linguagem de programação simples[4]. A Figura 4 demonstra um módulo sensor RFBee e a Figura 5 apresenta uma base, onde é acoplado o módulo RFBee, tornando-se um nó base em uma rede de sensores sem fio.



Figura 4. Módulo sensor RFBee [5]



Figura 5. Base para módulo RFBee [6]

O RFBee possui um microcontrolador Atmega168, da Atmel, que pode ser programado de acordo com a aplicação necessária, e também possui o circuito integrado (CI) CC1101, da Texas Instruments[7]. O C1101 é um CI recomendado para aplicações com redes de sensores sem fio, controle e monitoramento industrial, que está alinhado com os objetivos do trabalho desenvolvido. Todos os parâmetros de transmissão são implementados na programação deste CI[8].

O indicador da intensidade do sinal recebido, ou RSSI (Received Signal Strength Indicator), é um parâmetro indicado pelo CC1101, que é muito importante, ainda mais em se tratando de ambientes industriais, que possuem diversos componentes que interferem no sinal que trafega entre sensor e base. A sensibilidade dos módulos, operando na frequência de 915 MHz, é de -112 dBm, de acordo com especificação do fabricante.

c) Arquitetura de Software

A programação para o funcionamento da transmissão foi estruturada em pilha de protocolo, organizada em cinco camadas: física, MAC(Media Access Control), rede, transporte e aplicação. O objetivo dessa forma de estruturação é possibilitar a escalabilidade da rede de acordo com o interesse de monitoramento, ou mesmo a expansão da linha de produção. Outra vantagem na pilha de protocolo é a possibilidade de implementar um sistema de gerenciamento da rede, quantificando parâmetros que demonstrem a estabilidade e a confiabilidade da rede.

Na aplicação deste trabalho, os parâmetros recebidos no módulo base e enviados para a unidade computacional são os valores proporcionais à tensão, corrente e potência Instantânea da carga monitorada, e o nível de RSSI entre os módulos sensor e base. O

RSSI é um parâmetro muito importante no auxílio à tomada de decisão sobre em qual local instalar o módulo sensor e a base.

Com relação à medição das grandezas elétricas envolvidas, são feitas tratativas no próprio nó sensor, onde são amostrados os níveis de tensão proporcionais ao nível de tensão e corrente analógicos, convertidos em digitais e transmitidos para o módulo base. Esses valores somente são tratados de forma que representem o valor real da potência consumida pela carga monitorada na unidade computacional, que é onde são concentradas as informações que podem servir para fazer uma análise mais detalhada dos dados adquiridos pelo dispositivo medidor.

A aquisição dos valores de tensão e corrente feita pelo módulo sensor é obtida através de amostragens em portas de leitura analógicas do micro controlador Atmega. Neste trabalho, são utilizadas seis portas analógicas, correspondentes a três níveis de tensão e três níveis de corrente, se referindo às três fases que alimentam um equipamento trifásico.

Como a aquisição de tensão e corrente é feita de forma instantânea, é possível obter valores de potência instantânea demandada pelo equipamento; porém, o monitoramento desejado é sobre a potência ativa, estimada a partir da potência média [9]. A valor da potência ativa é obtido aplicando a Equação 1.

$$P_i = U \cdot I$$

Na Equação 1, U é o valor instantâneo de tensão, I é o valor instantâneo de corrente em uma determinada medida i.

A energia E_i consumida ou fornecida pela carga durante o intervalo de amostragem na medida i é dada pela Equação 2.

$$E_i = P_i \cdot \Delta t$$

Onde o intervalo de tempo entre duas amostras. Portanto, a energia total consumida pela carga será dada por:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i$$

Onde N é o número total de amostras.

Para obter os valores médios de tensão e corrente o programa gravado no módulo sensor faz quinhentas leituras do sinal analógico de tensão e corrente, calcula a média e aplica a Equação 1 para cada fase da alimentação do equipamento. Esses valores são transmitidos para o módulo base, constantemente, onde são encaminhados para a unidade computacional que pode armazená-las em um banco de dados para que possa ser feita uma análise aprofundada e definir ações para reduzir os gastos e evitar possíveis paradas no processo produtivo.

A Figura 6 apresenta os processos executados desde a aquisição dos níveis de tensão e corrente até o recebimento dos valores pela unidade computacional ligada à base.

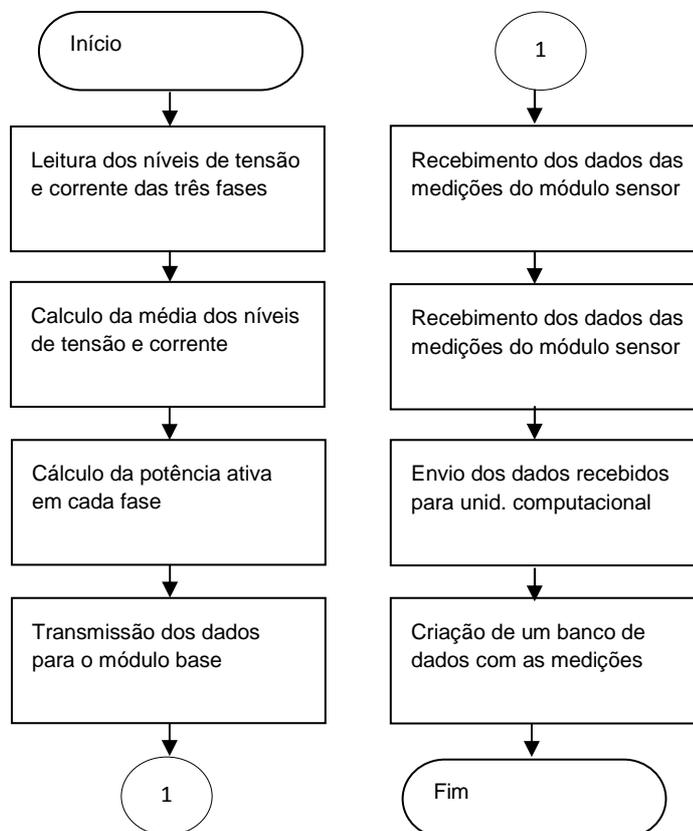


Figura 6. Processos comandados por **software**

d) Discussões e Conclusão

A idéia da construção deste dispositivo tem uma abordagem que abrange áreas de apontamento de custos industriais de produção e de manutenção, pontos críticos no processo produtivo. A energia elétrica compõe os custos de produção de forma quase que indireta, por rateio, pois não há hoje meios de medir consumos individuais das máquinas e por operação, o que causaria inclusive uma aumento de custo de estrutura de uma empresa industrial. A proposta deste artigo visa racionalizar a leitura do consumo com um medidor de uma determinada máquina produtiva, visando dois pontos primordiais:

- O consumo por operação em um processo produtivo (um produto pode ter em seu processo de fabricação várias operações e passar por várias máquinas, até seu acabamento e conclusão).
- Obter uma visão do estado geral da máquina comparando seu consumo nominal (especificado pelo fabricante e seu consumo real) podendo, assim, apontar discrepâncias de funcionamento operacional.

Esta abordagem pode trazer as seguintes estratégias para utilização do dispositivo:

- Mobilidade dentro do chão de fábrica. Por não ser necessário cabeamento, transmissão dos dados via radio frequência , pode-se ter acessos a pontos dentro de um ambiente fabril que ofereceriam dificuldades para passagem de cabos, permitindo que praticamente qualquer máquina possa ser monitorada. Ainda pode-se citar aqui que, com a mobilidade, pode-se monitorar máquinas em intervalos de tempo mudando o sensor quando a medição for completada dentro do período estabelecido.
- Leitura de consumo direto, permitindo uma visualização do peso do custo da energia elétrica na etapa de fabricação da peça, sem que haja uma distorção no cálculo do custo devido aos tradicionais rateios de consumo entre máquinas produtivas ou total de energia consumida na produção (de forma global)

- Comparação entre consumo nominal especificado pelo fabricante ou quando a máquina é construída na própria empresa e o consumo real. Isto pode identificar dois fatores, que se não houver medição, passam despercebidos:

- Máquinas com componentes substituídos fora de especificação que podem gerar excesso de consumo

- Máquinas com componentes defeituosos ou desgastados (correias, polias, mancais, etc..) podem ser identificadas pela leitura de consumo

Sob o aspecto da implementação do dispositivo em ambiente industrial há o aspecto do ruído eletromagnético presente no chão de fábrica. A proposta é abordar duas estratégias para minimizar os efeitos do ruído:

- Aumentar a potência de transmissão para aumentar a relação sinal ruído.

- Antenas no sensor e base para direcionar a transmissão e com isto conseguir distâncias maiores dentro do ambiente.

e) Referências

[1]IEEE, "IEEE STANDARDS ASSOCIATION, IEEE 802.15™: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS (PANs)", <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>, Mar 26, 2012

[2]ANDY CHOI, "Research and Markets Adds Reports on Wireless Sensor Network Technology. A report titled 'WTRS Wireless Sensor Network Technology Trends Q1 2012 – Subscription' has been added by Research and Markets to its offering". AZOSENSORS.COM Published on March 28, 2012 at 3:03 AM, <http://www.azosensors.com/news.aspx?newsID=4000>, Mar 26, 2012

[3]REPORTLINKER, "Smart Grid Networking and Communications, MARKETWATCH", Published on March 22, 2012, 7:36 a.m. EDT, <http://www.marketwatch.com/story/smart-grid-networking-and-communications-2012-03-22>, Mar 27, 2012.

[4]RADIUINO,"Sobre o Radiuino", <http://radiuino.cc/node/8>, Mar 27, 2012.

[5]RADIOIT, "Módulo RFBee V1.1", <http://www.radioit.com.br/products/rfbee>, Mar 27, 2012.

[6]JOHN BOXALL, "RF Wireless Data with the Seeedstudio RFBee", TRONIXSTUFF.COM, Published on March 19, 2012, 2:10 a.m., <http://tronixstuffads.blogspot.com.br/2012/03/rf-wireless-data-with-seeedstudio-rfbee.html>, Mar 26, 2012.

[7]WWW.ALLDATASHEET.COM, "ATMEGA168 - 8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash -ATMEL Corporation",<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/257015/ATMEL/ATMEGA168.html>, Mar 26, 2012.

[8] WWW.ALLDATASHEET.COM,"CC1101 - Low-Cost Low-Power Sub-1GHz RF Transceiver - Texas Instruments", <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/191432/TI/CC1101.html>, Mar 26, 2012

[9]Mário Ferreira Alves, "ABC dos Circuitos Eléctricos em Corrente Alternada", Instituto Politécnico do Porto, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Fevereiro de 1999, http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/PubDid/ABC_CECA.PDF, August,15,2012.

Contatos

Edson Taira Procopio, aluno do curso de mestrado profissional da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Opções de contato:
e-mail: ed_taira@hotmail.com / edsontaira@yahoo.com.br
celular: (19) 9798 2776

Jose Luís Pagotto, aluno do curso de mestrado profissional da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Opções de contato:
e-mail: pagotto.jl@gmail.com
celular: (19) 9151 0562

Alexandre de A. Mota, PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil ,amota@puc-campinas.edu.br

Lia T. M. Mota, PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil ,lia.mota@puc-campinas.ed.br

APÊNDICE B – PROGRAMA FONTE EM LINGUAGEM PYTHON UTILIZADO NA COLETA DOS DADOS

Código fonte em Python, utilizado para nas leituras de dados.

```
# PROGRAMA PARA APLICAÇÃO DO AP1
import serial
import math
import time
import datetime
import struct
from time import localtime, strftime

# Configura a serial
# para COM# o número que se coloca é n-1 no primeiro parâmetro. Ex COM9 valor 8
n_serial = 4 # raw_input("Digite o número da serial = ") #seta a serial
n_serial1 = int(n_serial) - 1
ser = serial.Serial(n_serial1, 9600, timeout=0.5,parity=serial.PARITY_NONE) # seta
valores da serial

RSSlu1=rssi1=RSSld1=rssid1=RSSlu2=rssi2=RSSld2=rssid2=0

# Identificação da base
#ID_base = raw_input('ID_base = ')
ID_base = 0

# Cria o vetor Pacote
Pacote = {}

# Cria Pacote de 52 bytes com valor zero em todas as posições
for i in range(1,53): # faz um array com 52 bytes
    Pacote[i-1] = 0
j=0
while True:
    try:
```

```

# Identificação do sensor a ser acessado
#ID_sensor = raw_input('ID_sensor = ')
ID_sensor1 = 1
#ID_sensor2 = 2

# Imprime na tela o menu de opções
print 'Escolha um comandos abaixo e depois enter'
print '1 - Realiza medidas:'
print 's - Para sair:'

Opcao = raw_input('Entre com a Opção = ')

# Limpa o buffer da serial
ser.flushInput()

# Coloca no pacote o ID_sensor e ID_base

Pacote[10] = int(ID_base)

# Leitura de temperatura e luminosidade
if Opcao == "1":
    #num_medidas = raw_input('Entre com o número de medidas = ')
    #w = int(num_medidas)+1

    filename1 = strftime("Sensor_%Y_%m_%d_%H-%M-%S.txt")
    print "Arquivo de log: %s" % filename1
    S = open(filename1, 'w')

# novo loop infinito
Vten =0
Bat = 0
Flag =0 # indica se dorme ou transmite
vbat = 0

```

```

while True:
    try:
        j=j+1

        # Limpa o buffer da serial
        ser.flushInput()
        Pacote[8] = int(ID_sensor1)
        Pacote[34] = 0 # apaga led vermelho
        Pacote[40] = 0 # apaga led amarelo
        Pacote[49] = 0 # apaga led verde
        if Flag == 0: # transmissão
            # Não Dormir
            Pacote[34] = 0 # apaga led vermelho
            Pacote[40] = 0 # apaga led amarelo
            Pacote[49] = 0 # apaga led verde
            Pacote[4] = 0
            Pacote[5] = 0
            Pacote[6] = 0 # segundos
        else:
            #Dormir
            Pacote[34] = 1 # apaga led vermelho
            Pacote[40] = 1 # apaga led amarelo
            Pacote[49] = 1 # apaga led verde
            Pacote[4] = 1
            Pacote[5] = 0
            Pacote[6] = 20 # segundos

        for k in range(1,53): # transmite pacote
            TXbyte = chr(Pacote[k-1])
            ser.write(TXbyte)
        # Aguarda a resposta do sensor
        if Flag == 0:
            time.sleep(0.5)

```

```

else:
    time.sleep(5)

COM
line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que recebe da serial pela

if len(line) == 52:
    #===== RSSI sensor 1
    rssid1 = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
    # ++++++++ Conversão de byte para potência recebida em dBm
    if rssid1 > 128:
        RSSId1=((rssid1-256)/2.0)-74
    else:
        RSSId1=(rssid1/2.0)-74

    #===== RSSI sensor 2
    rssi1 = ord(line[2]) # RSSI_DownLink

    if rssi1 > 128:
        RSSlu1=((rssi1-256)/2.0)-74
    else:
        RSSlu1=(rssi1/2.0)-74

    #print ord(line[26])
    #print ord(line[27])

    Vten = round((0.003223 * (ord(line[17]) *256 + ord(line[18]) ) * 100) - 53,2) #
temperatura
    Bat = round((0.003223 * (ord(line[26]) *256 + ord(line[27]) ) * 11) ,2) # tensão
da bateria
    vbat = Bat
    if vbat > 0:

        print time.asctime(), j,' RSSlu 1 = ',RSSId1,' RSSId 1 = ',RSSlu1, 'Tensão
bat=', Bat # 'Temp = ', Vten ,

```

```

        print >>S, time.asctime(), j ', RSSlu 1 = ',RSSld1,', RSSld 1 = ',RSSlu1,
'Tensão bat=', Bat #'Temp = ', Vten
        RSSlu1=rssi1=RSSld1=rssid1=0
        Flag = 1 # le dado válido e manda dormir
    else:
        Flag =0 # espera próximo dado válido
        time.sleep(0.5)

    #S.close()

    if Opcao == "s" or Opcao == "S":# caso o caracter digitado for s
        ser.close() # fecha a porta COM
        print 'Fim da Execução' # escreve na tela
        break
except KeyboardInterrupt:
    S.close()
    ser.close()
    break

except KeyboardInterrupt:
    S.close()
    ser.close()
    break

```

APÊNDICE C – GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DO RSSI COLETADOS NA EMPRESA B COM DATAS E HORÁRIOS ESPECIFICADOS.

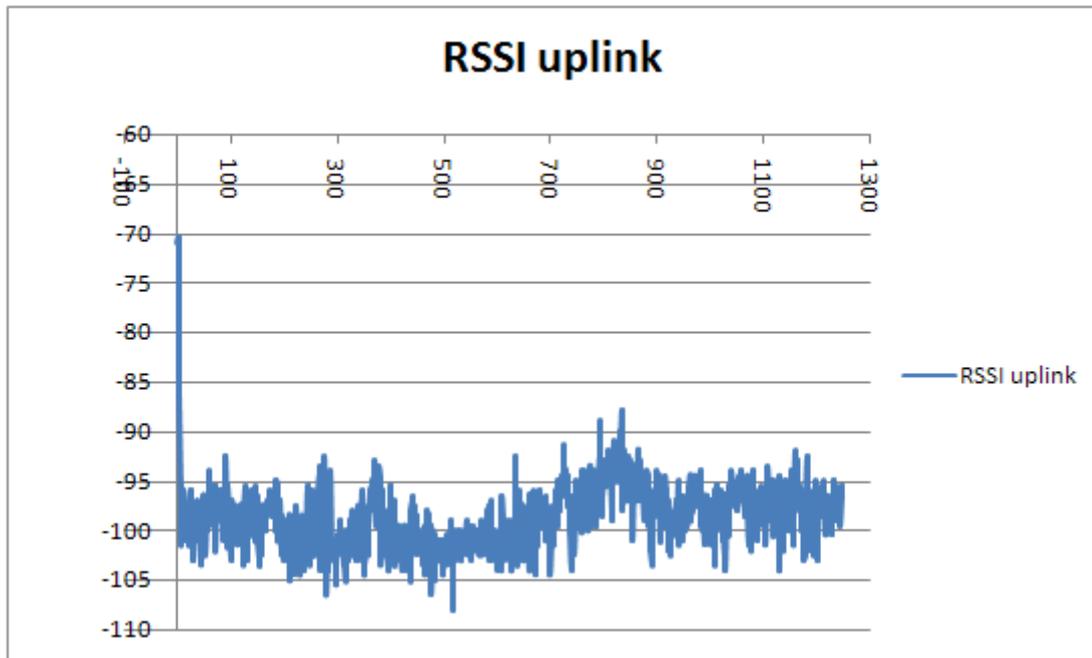


Figura 68 - Dia 23/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

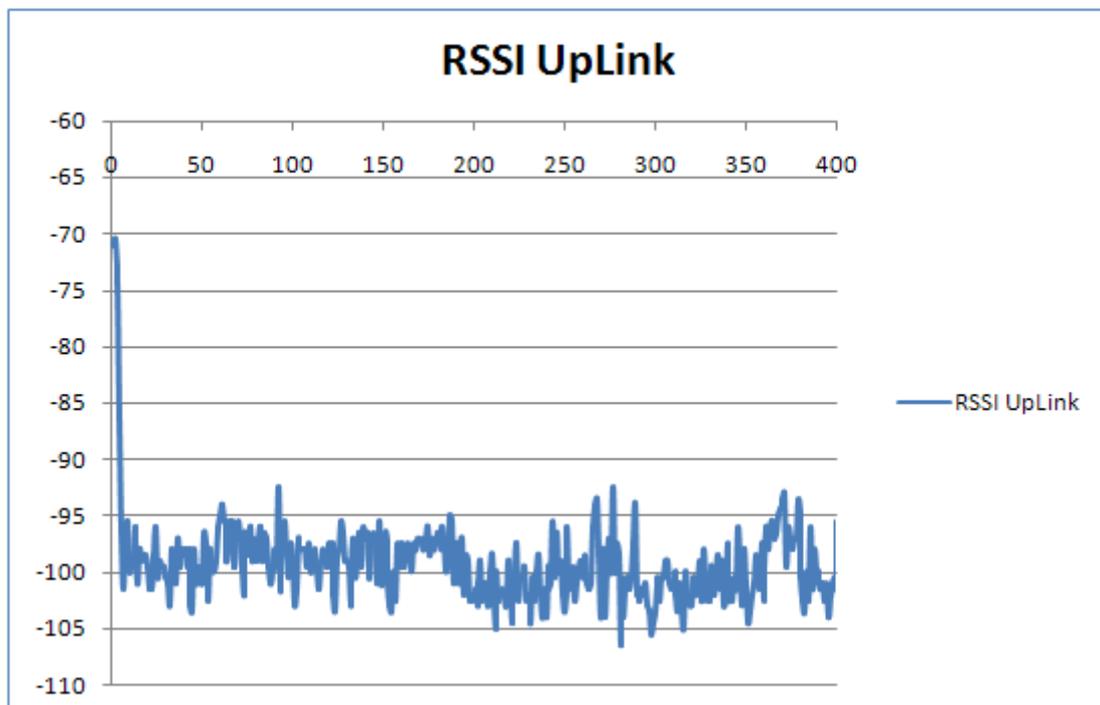


Figura 69 - Dia 23/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

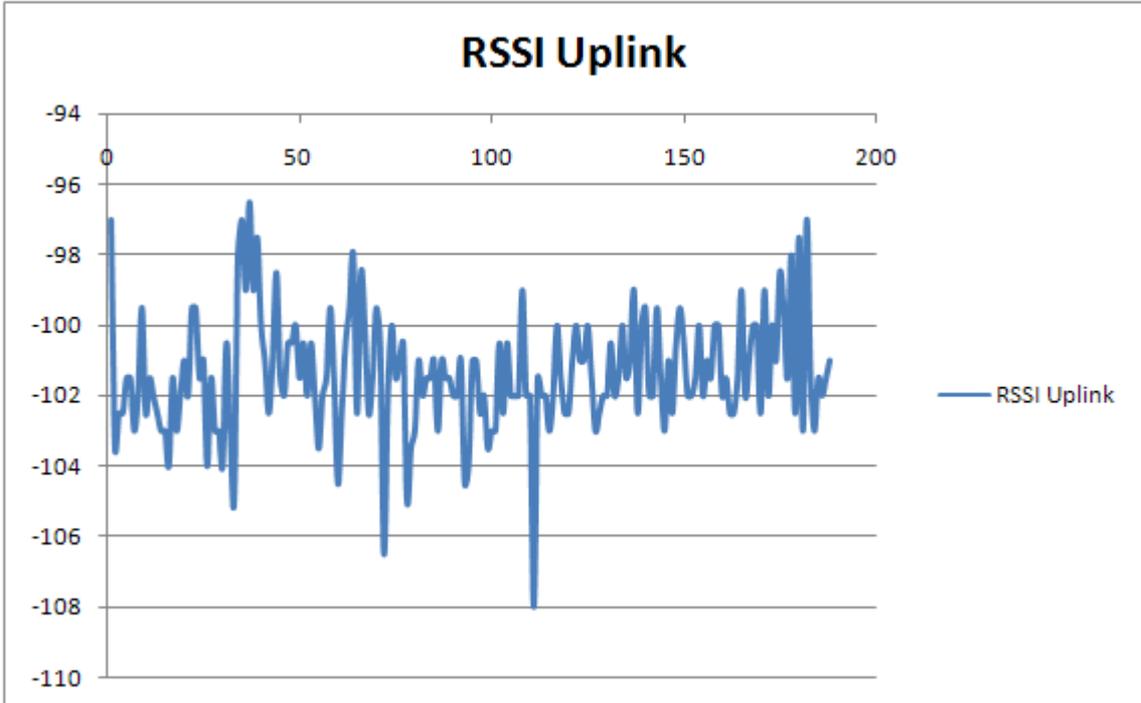


Figura 70 - Dia 23/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

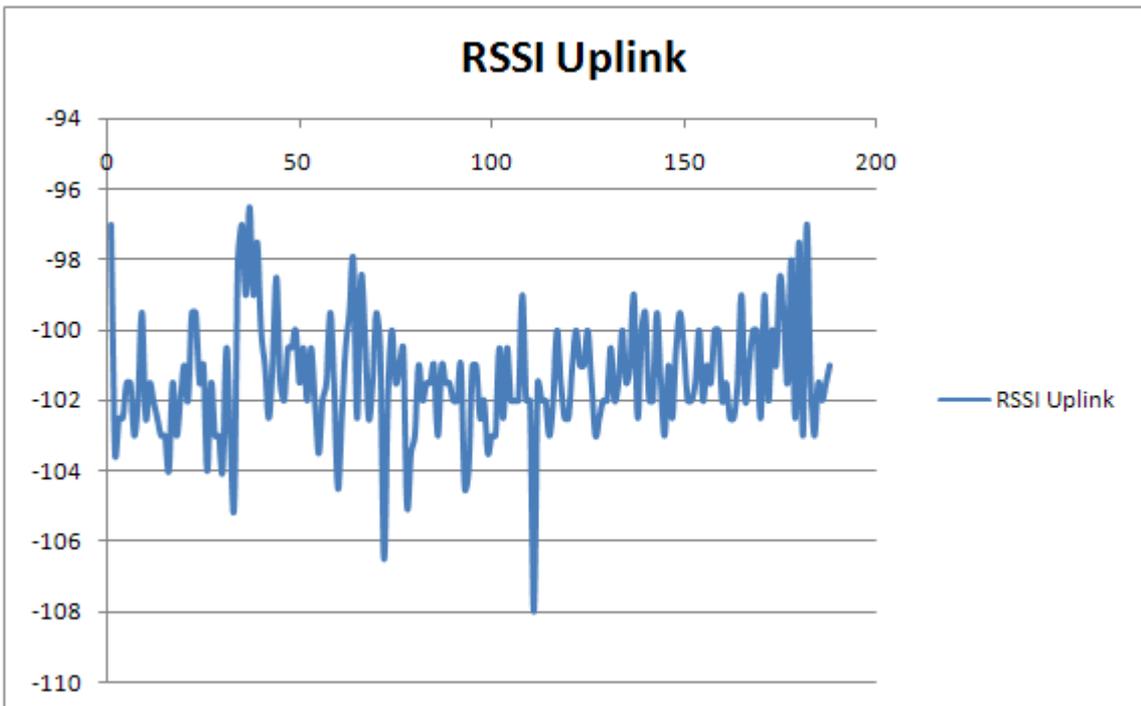


Figura 71 - Dia 23/09/2013 – das 13h00min às 17h00min

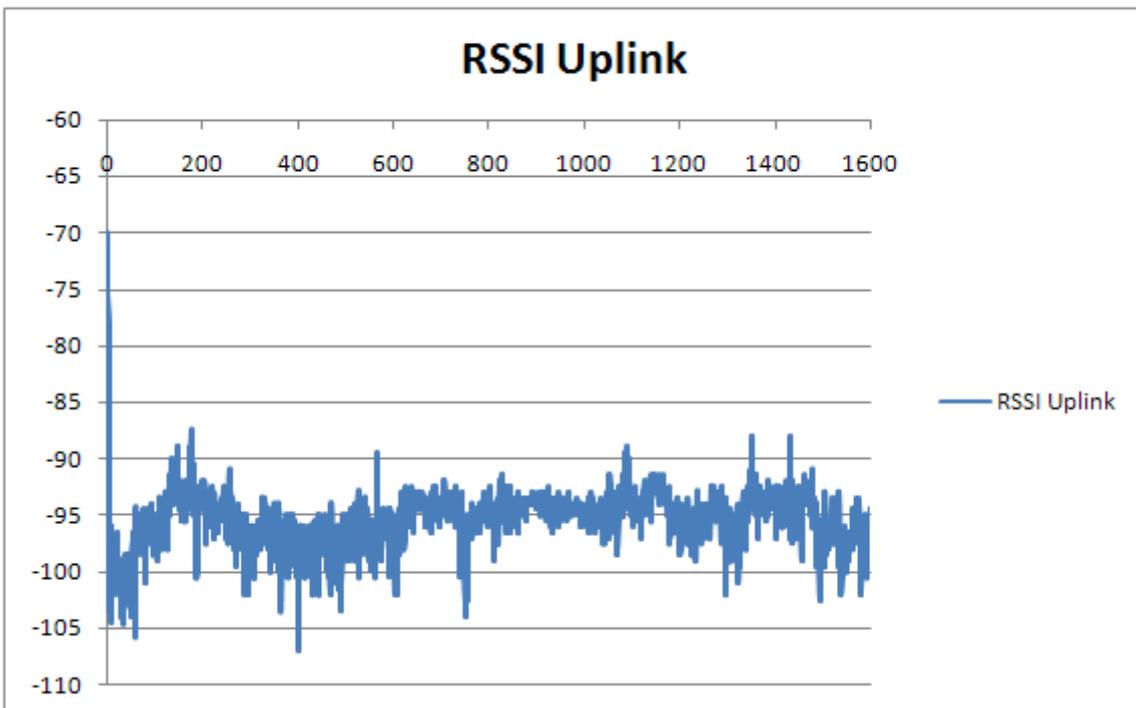


Figura 72 - Dia 25/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

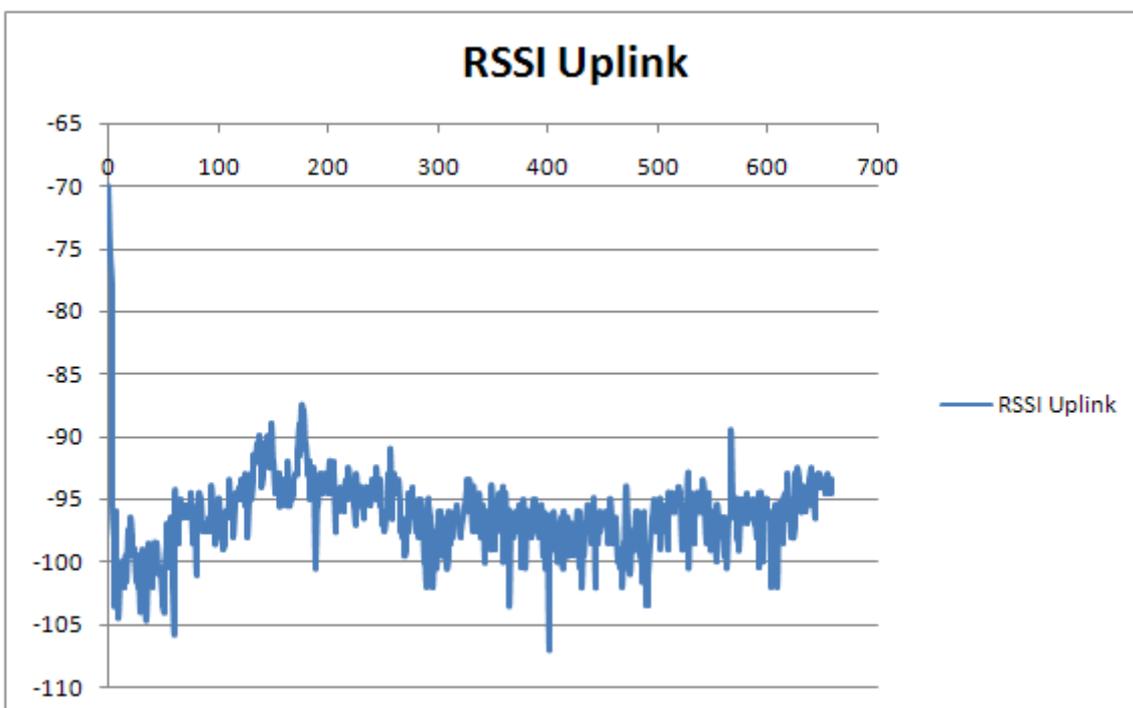


Figura 73 - Dia 25/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

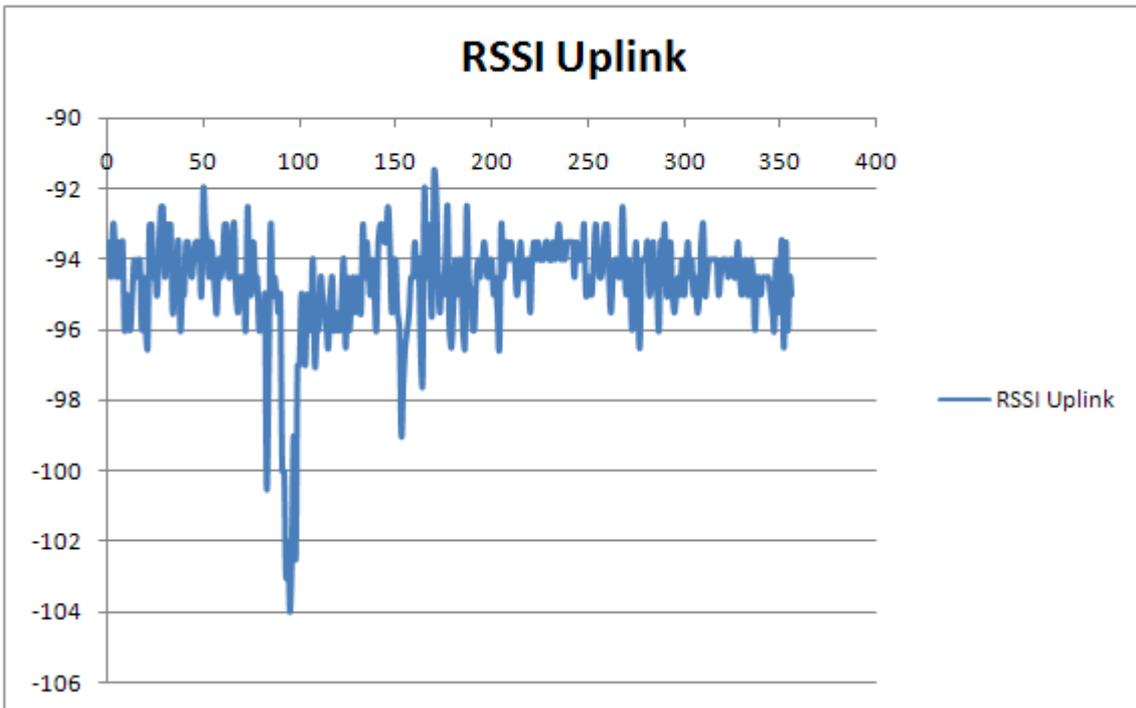


Figura 74 - Dia 25/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

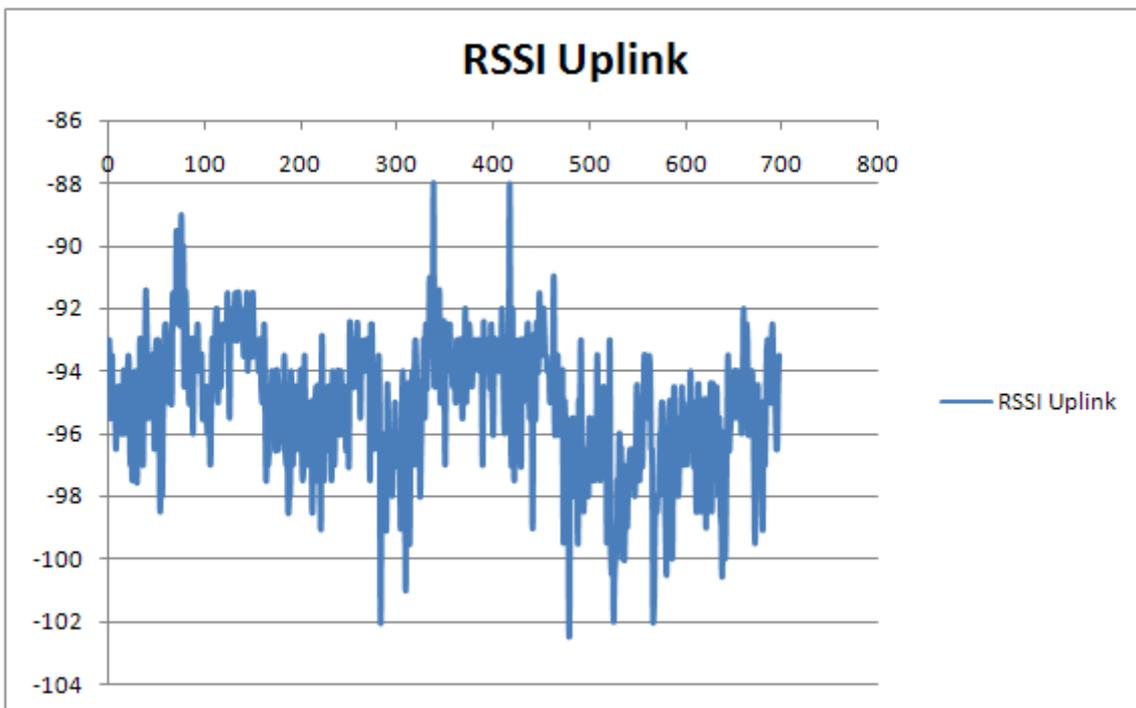


Figura 75 - Dia 25/09/2013 – das 13h00min às 17h00min

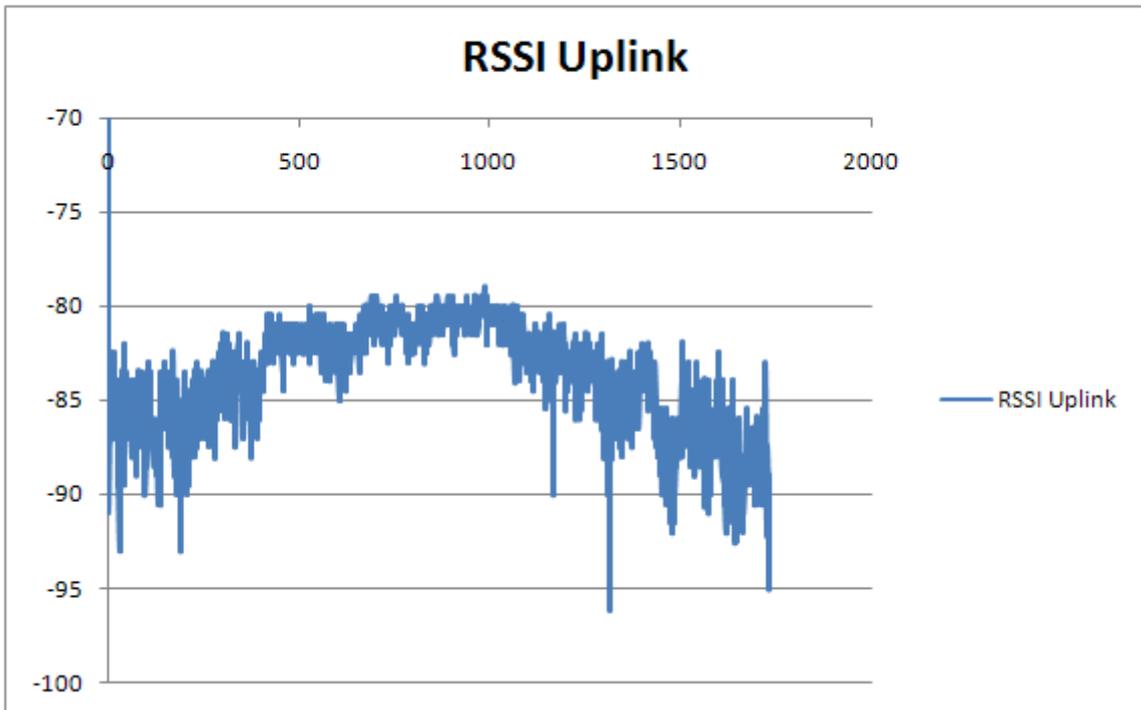


Figura 76 - Dia 26/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

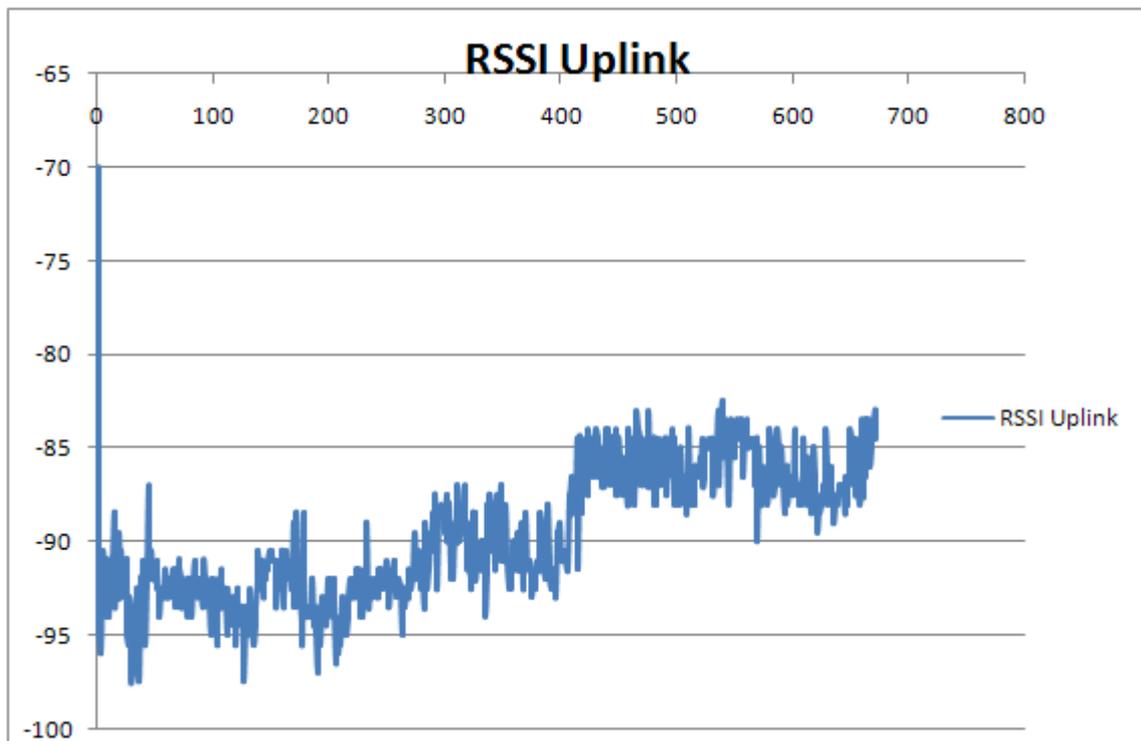


Figura 77 - Dia 26/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

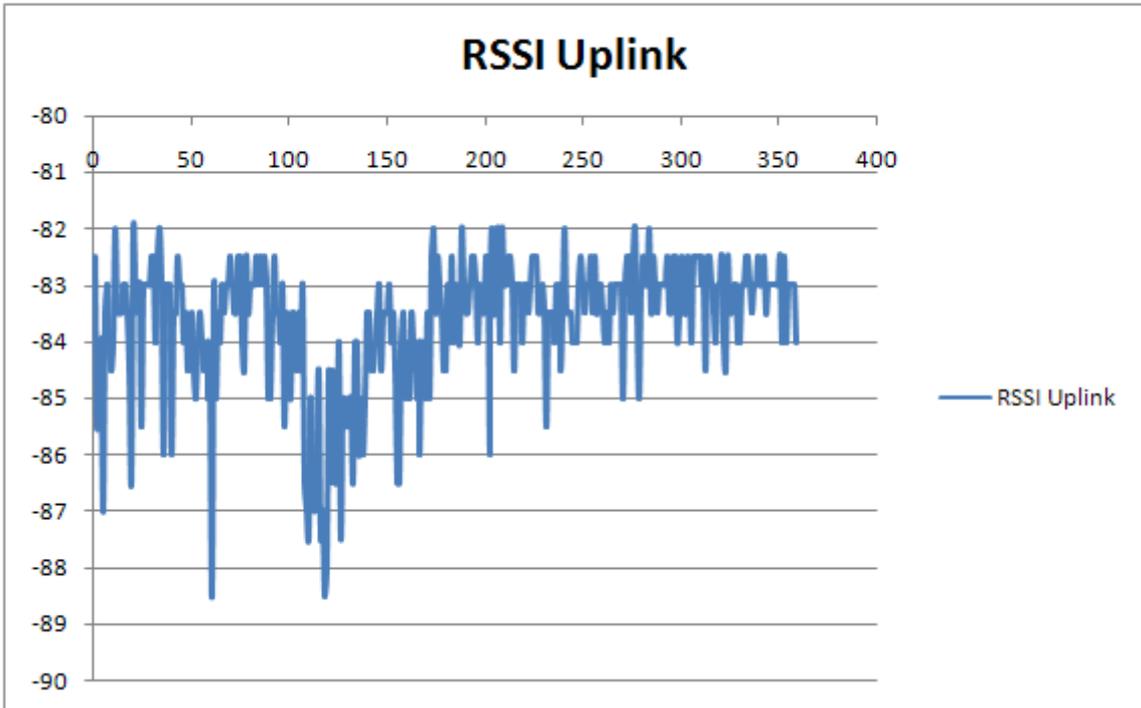


Figura 78 - Dia 26/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

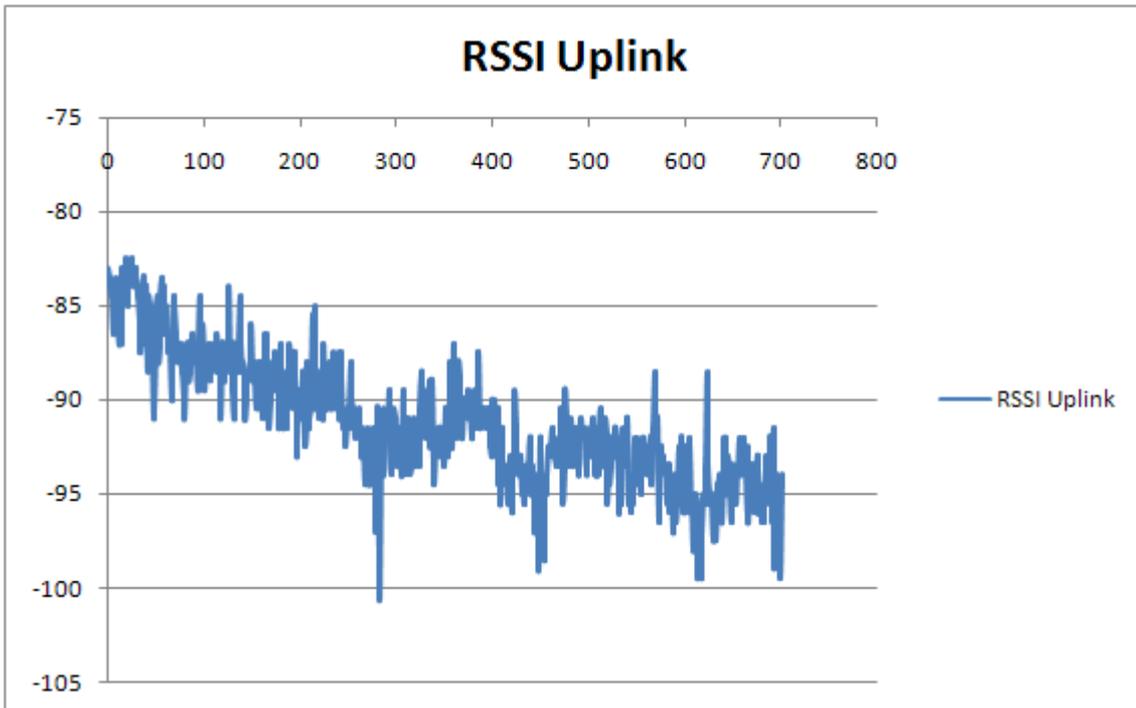


Figura 79 - Dia 26/09/2013 – das 13h00min às 17h00min

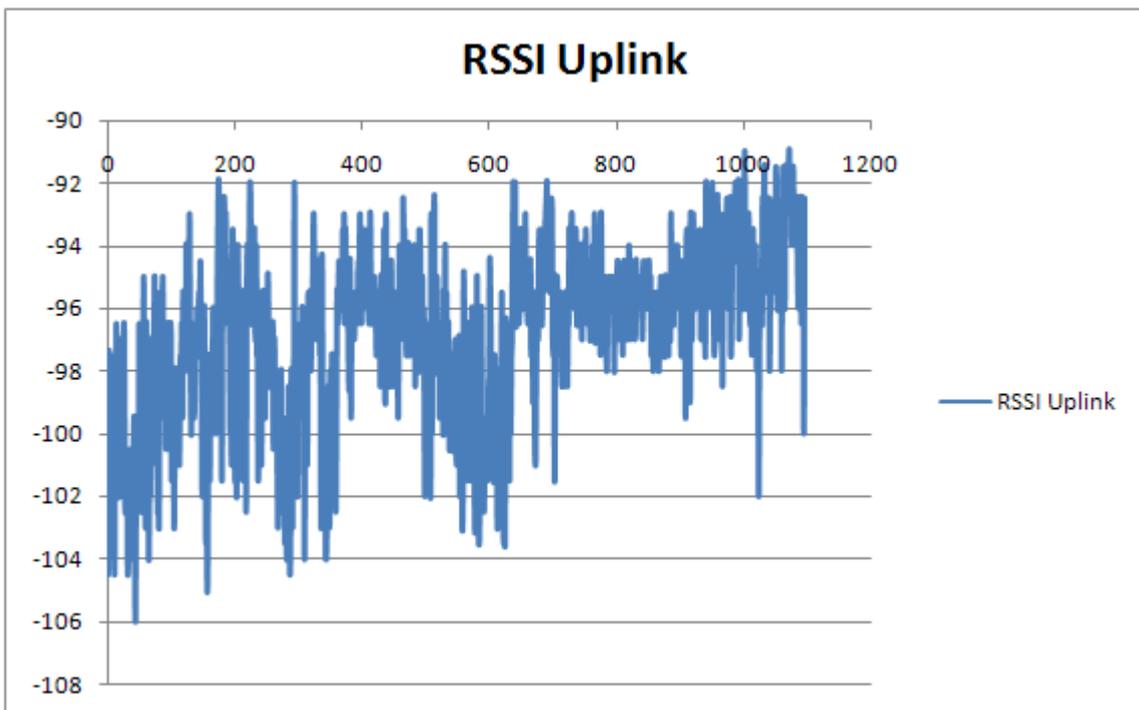


Figura 80 - Dia 27/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

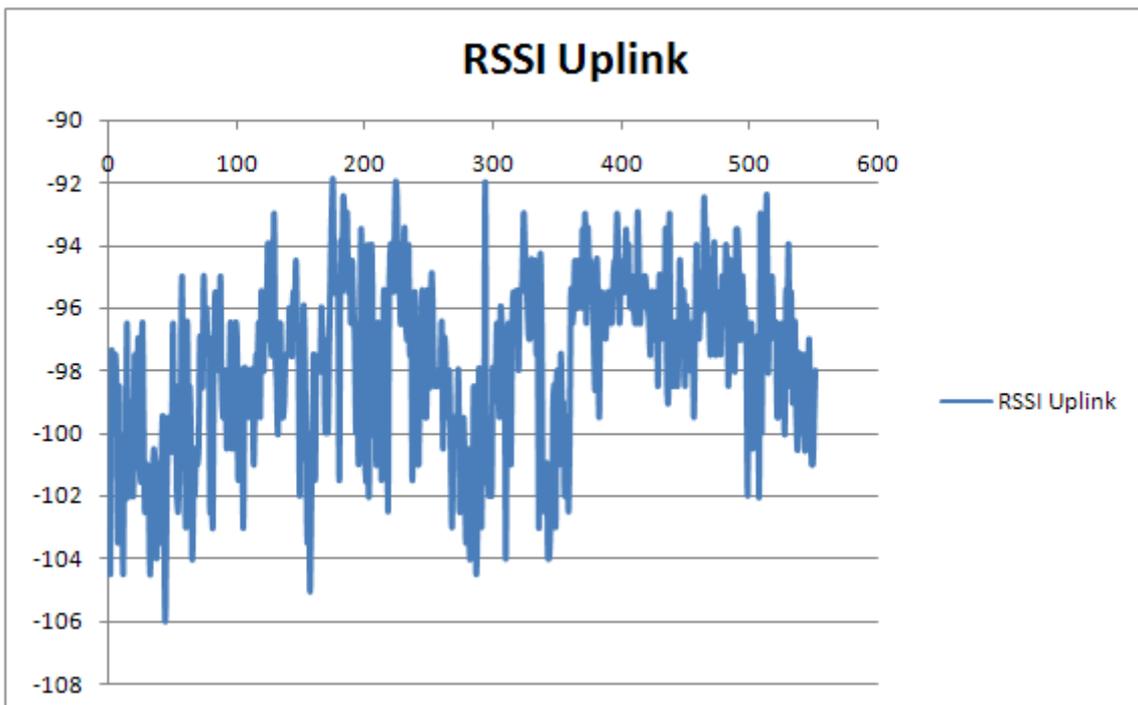


Figura 81 - Dia 27/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

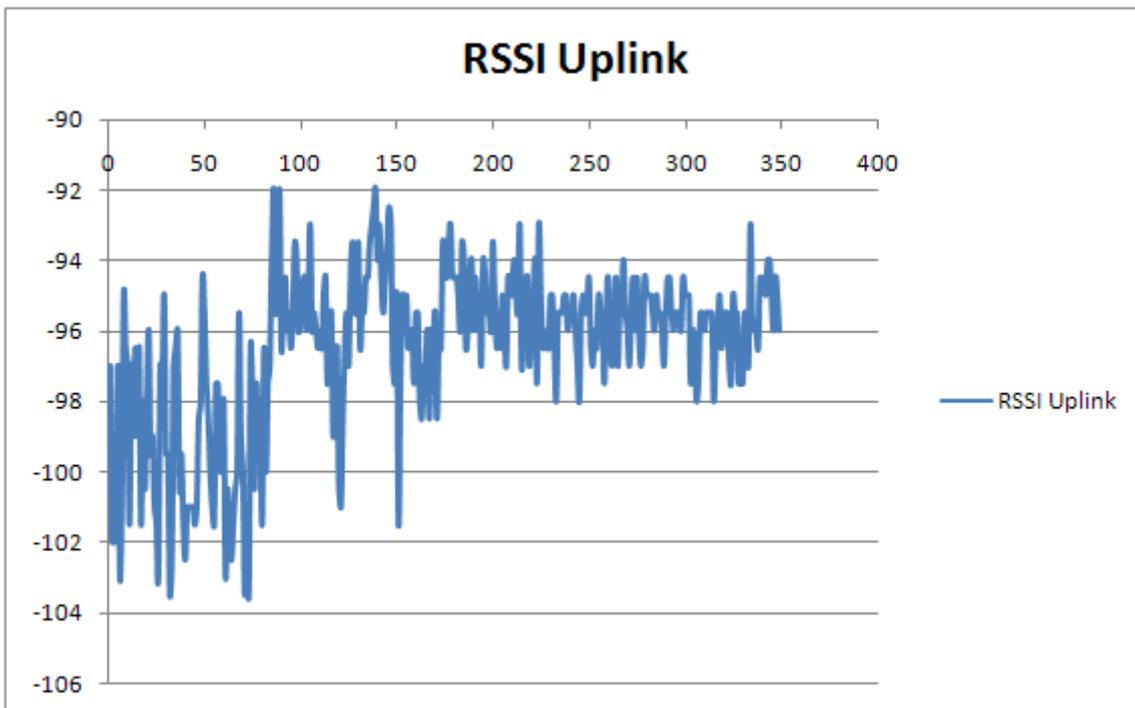


Figura 82 - Dia 27/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

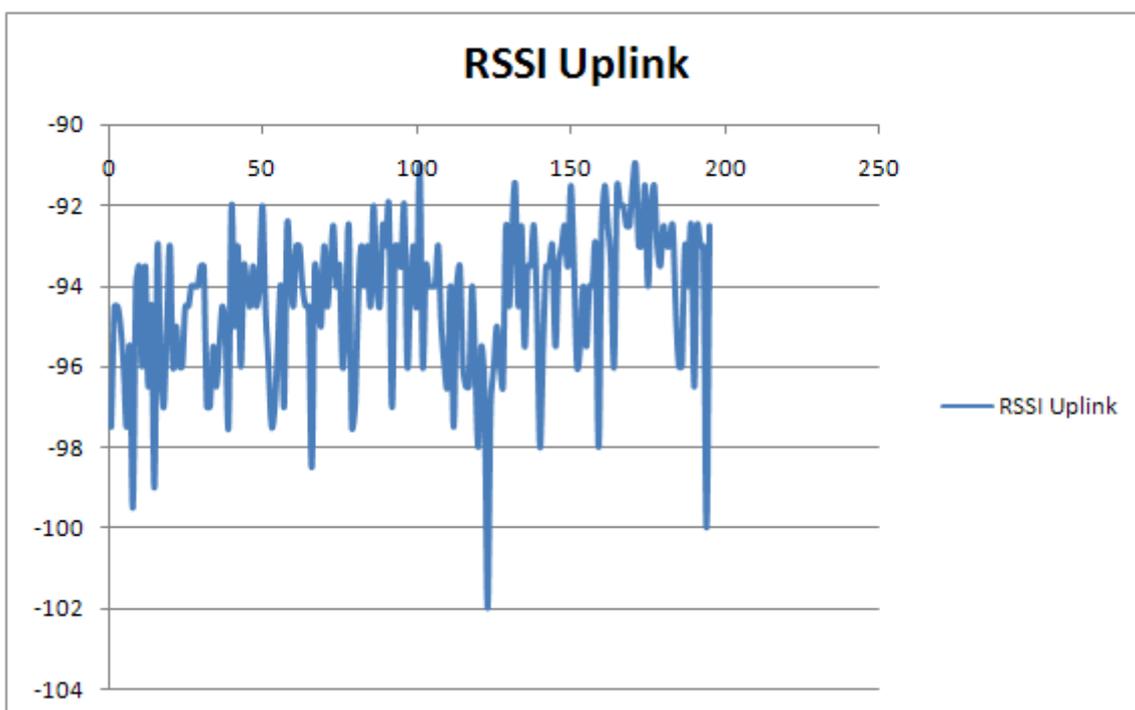


Figura 83 - Dia 27/09/2013 – das 13h00min às 14h05min

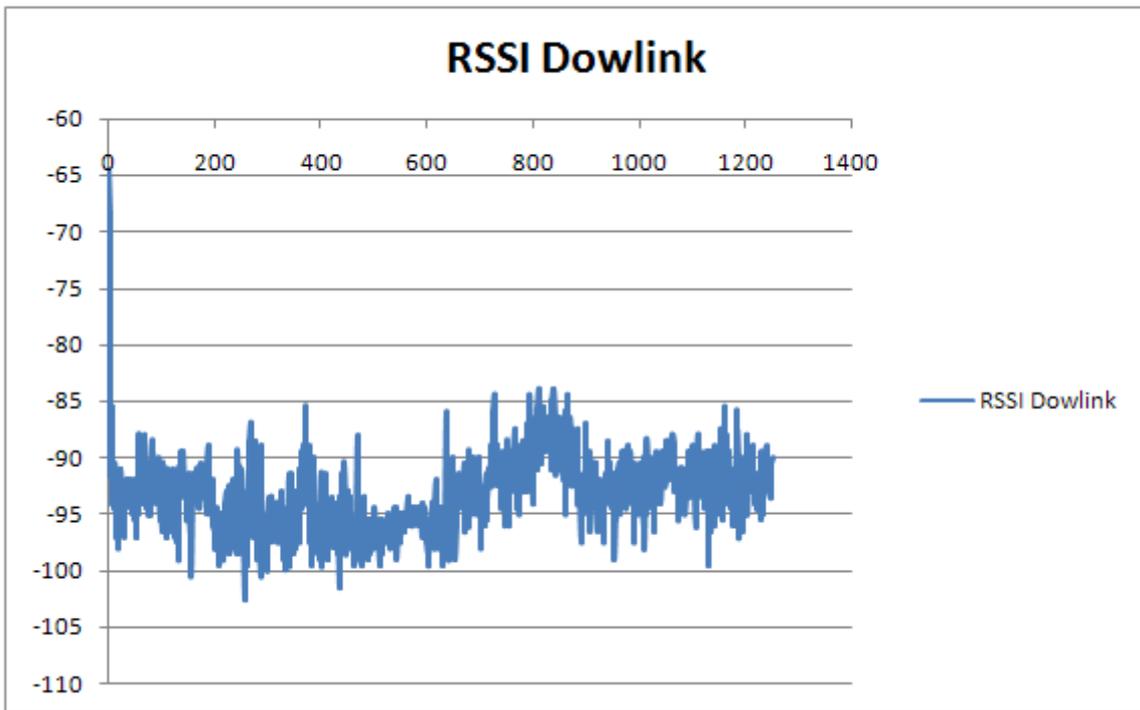


Figura 84 - Dia 23/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

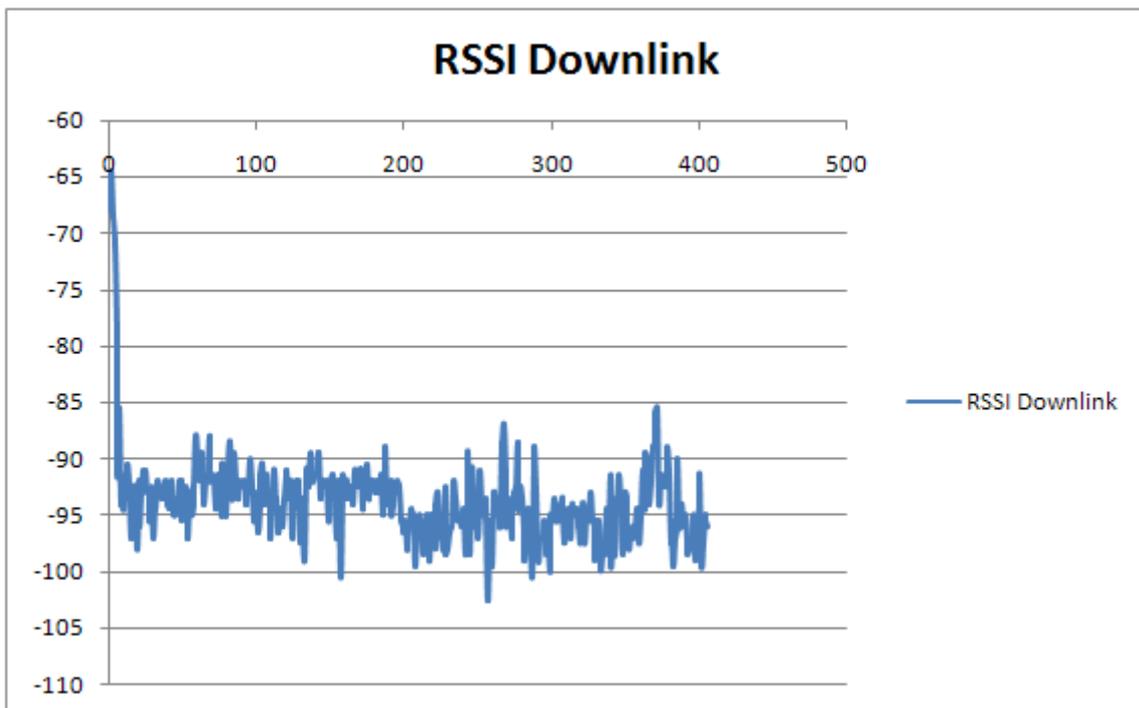


Figura 85 - Dia 23/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

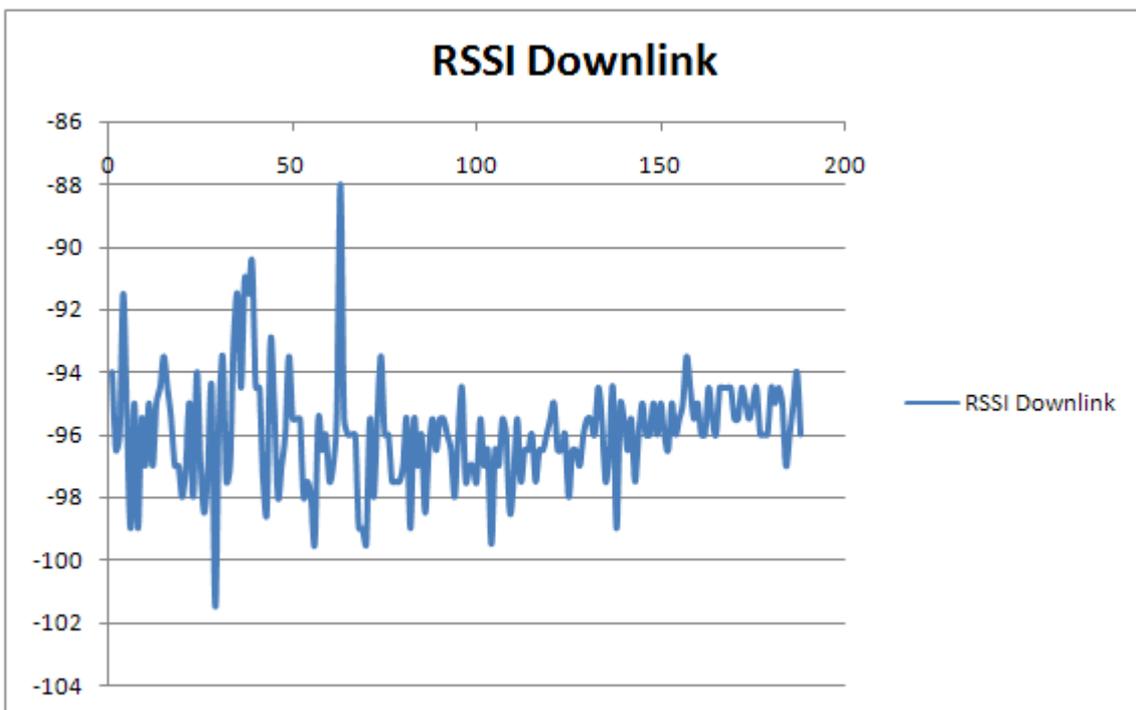


Figura 86 - Dia 23/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

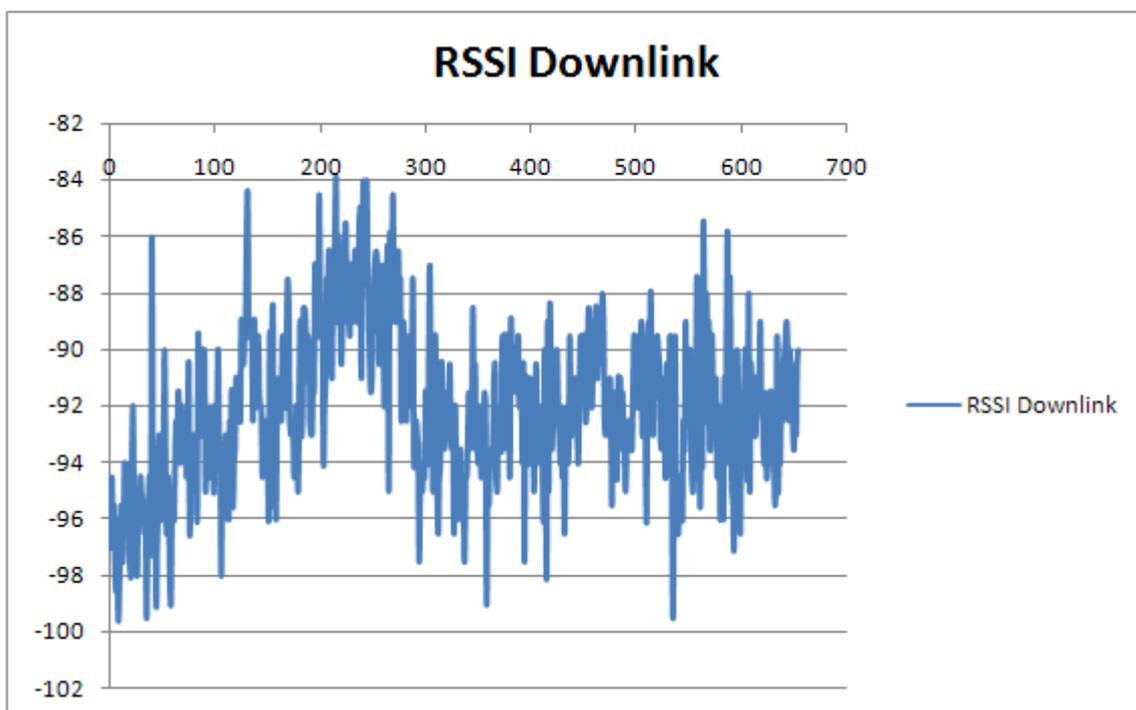


Figura 87 - Dia 23/09/2013 – das 13h00min às 17h00min

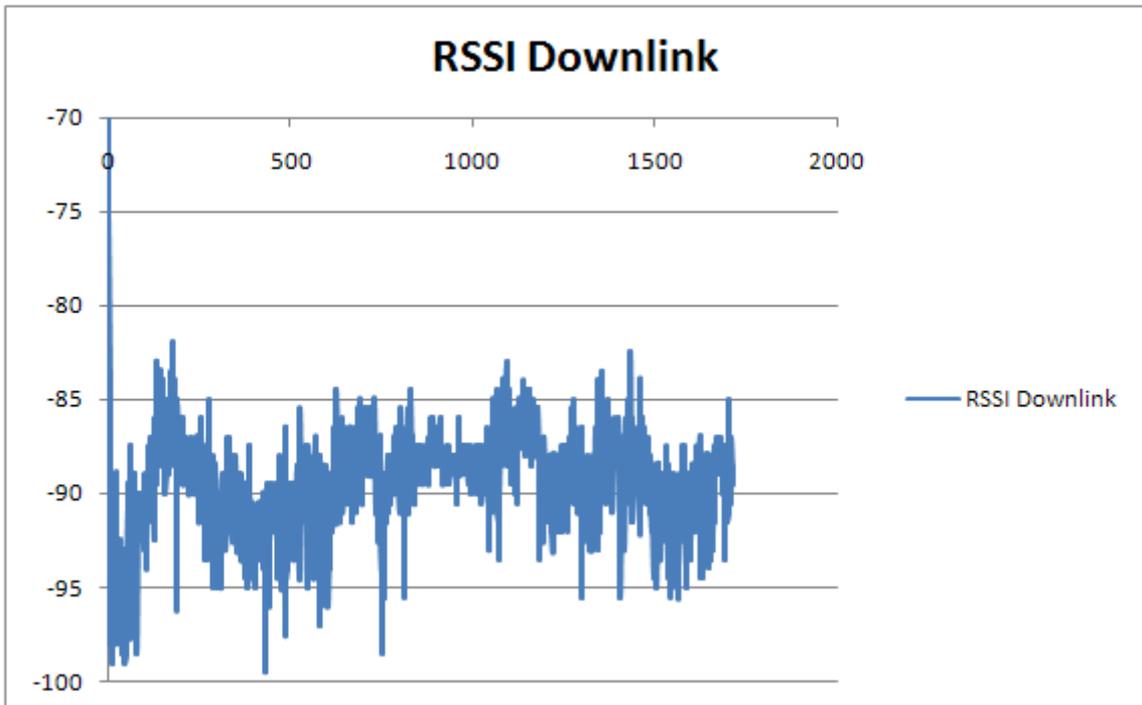


Figura 88 - Dia 25/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

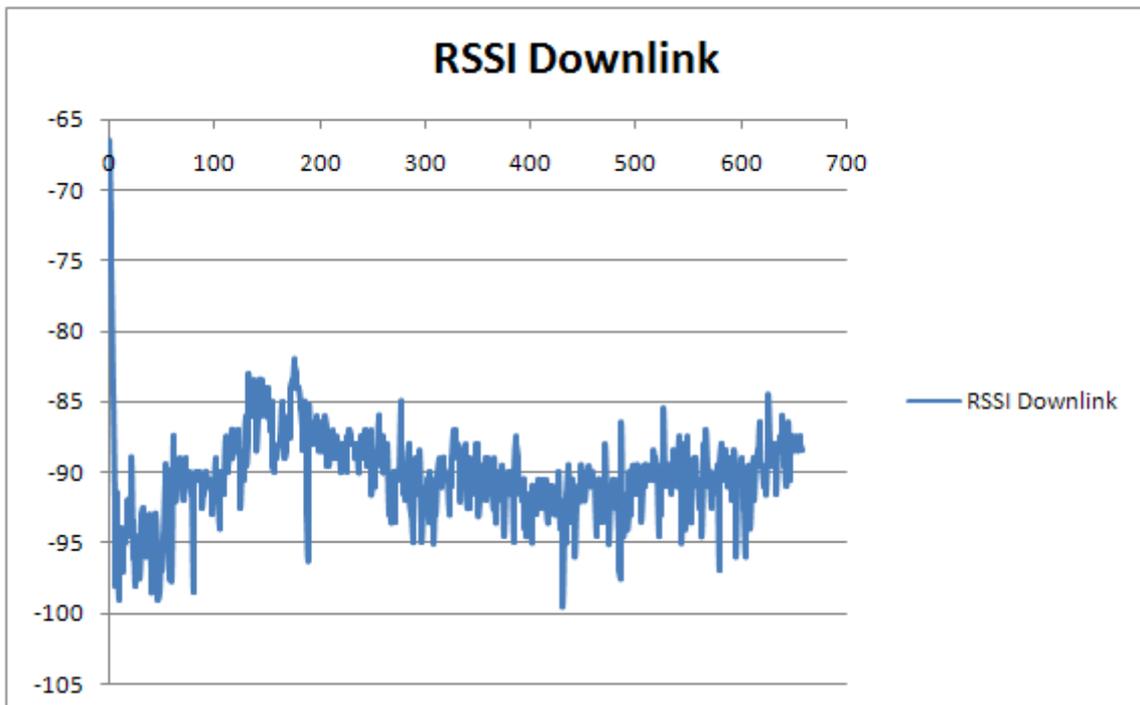


Figura 89 - Dia 25/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

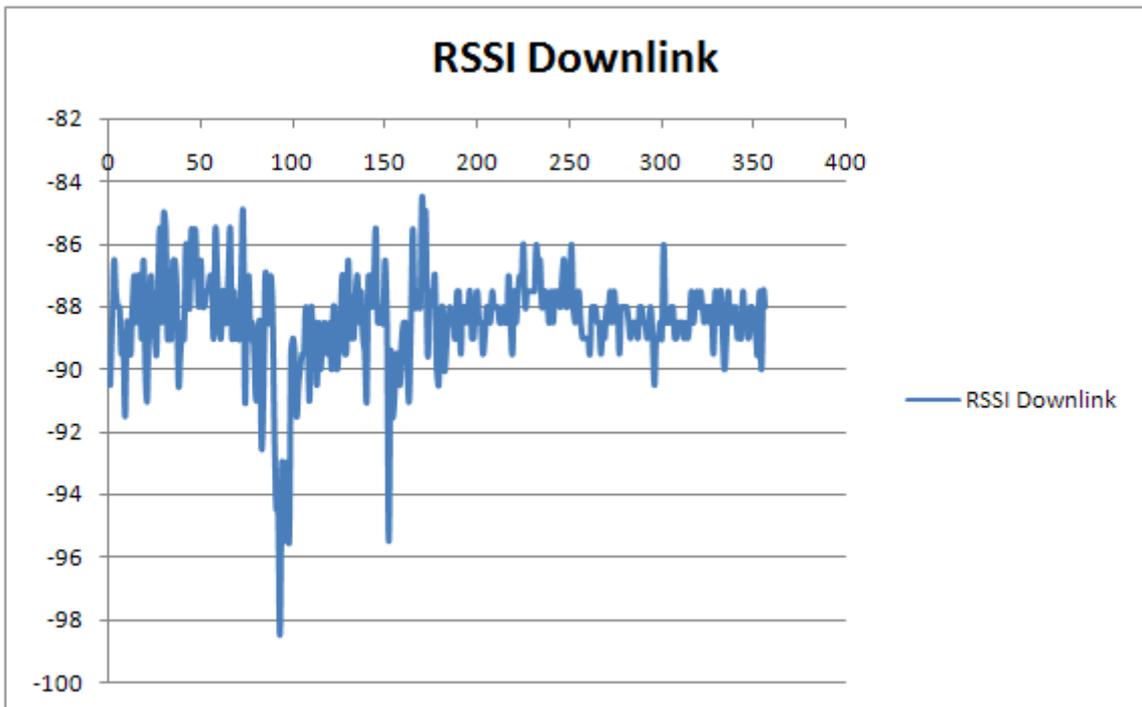


Figura 90 - Dia 25/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

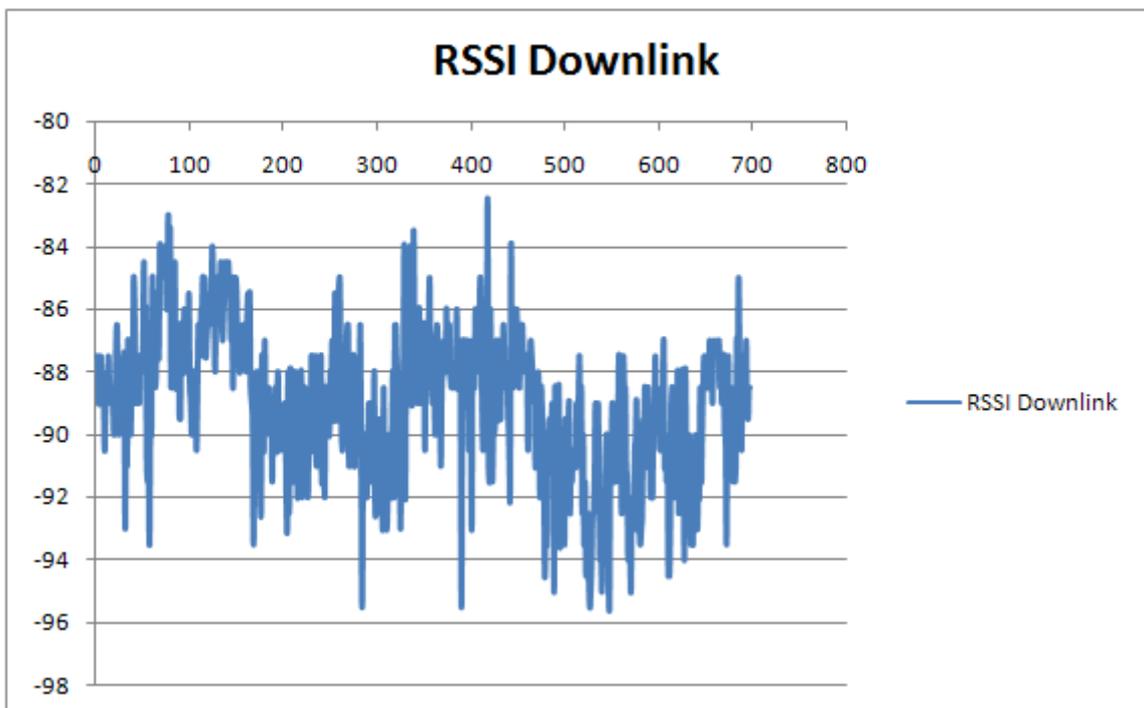


Figura 91 - Dia 25/09/2013 – das 13h00min às 17h00min

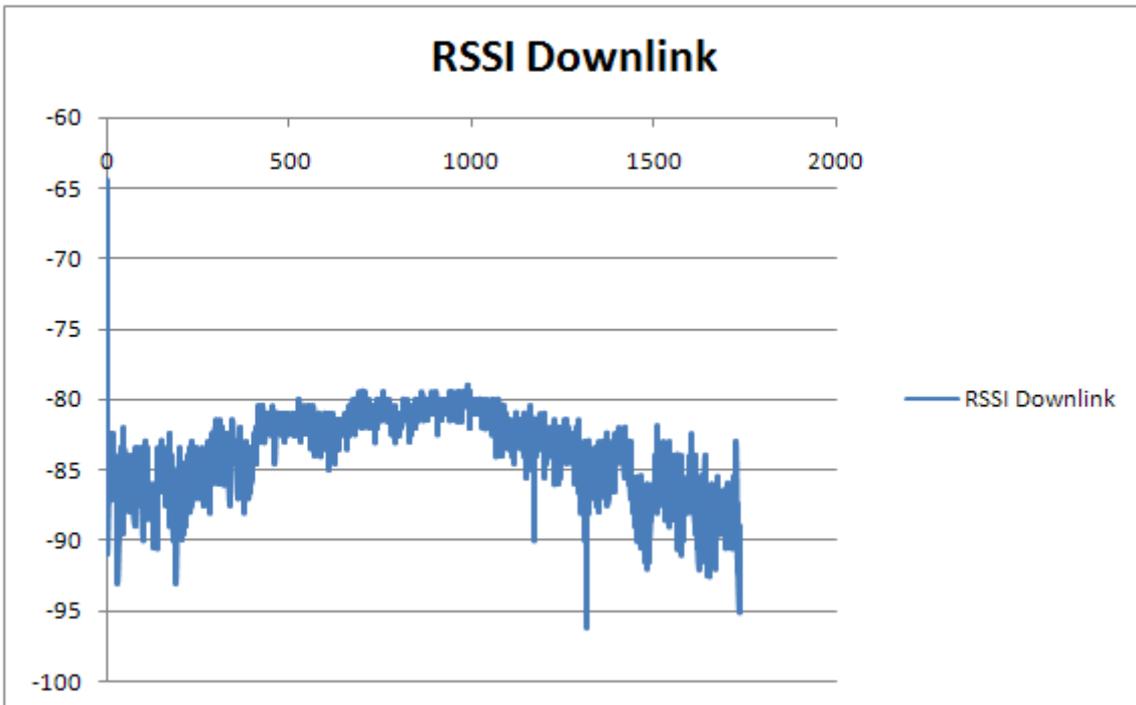


Figura 92 - Dia 26/09/2013 – das 07h00min às 17h00min

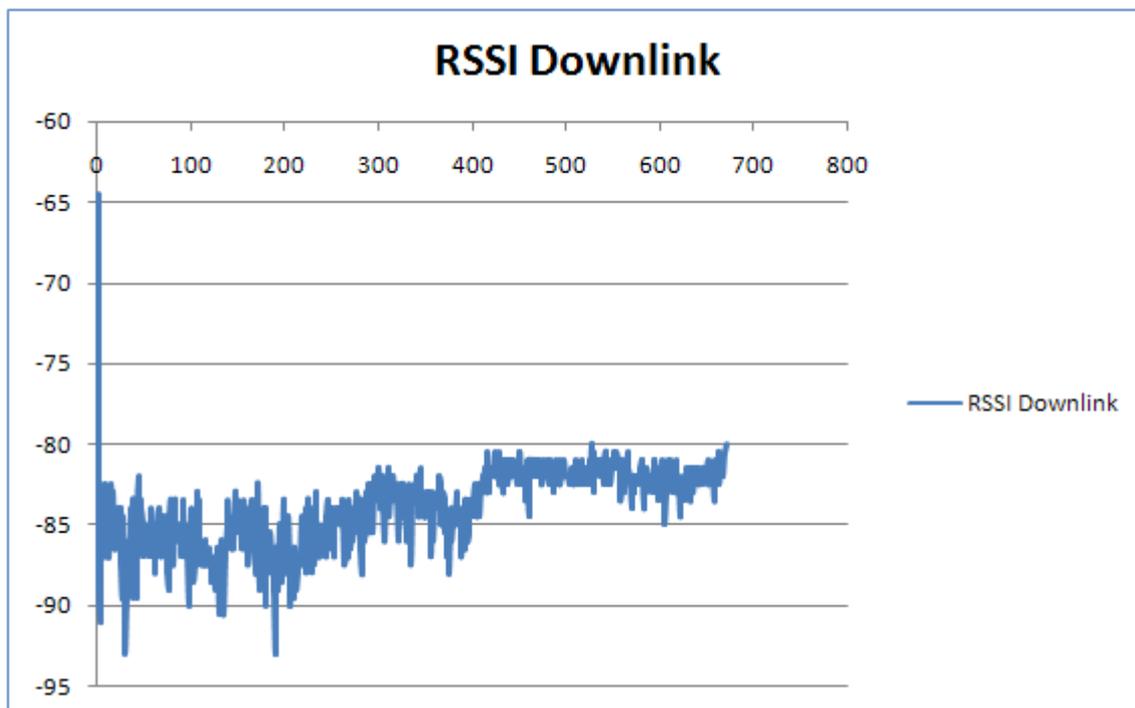


Figura 93 - Dia 26/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

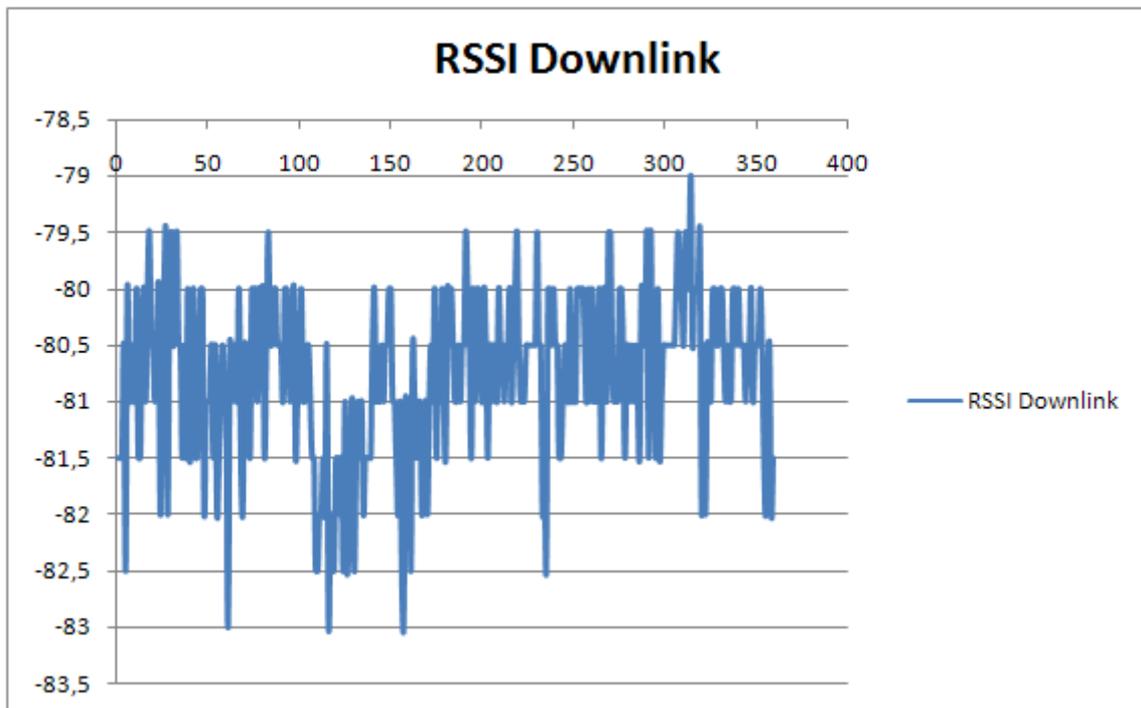


Figura 94 - Dia 26/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

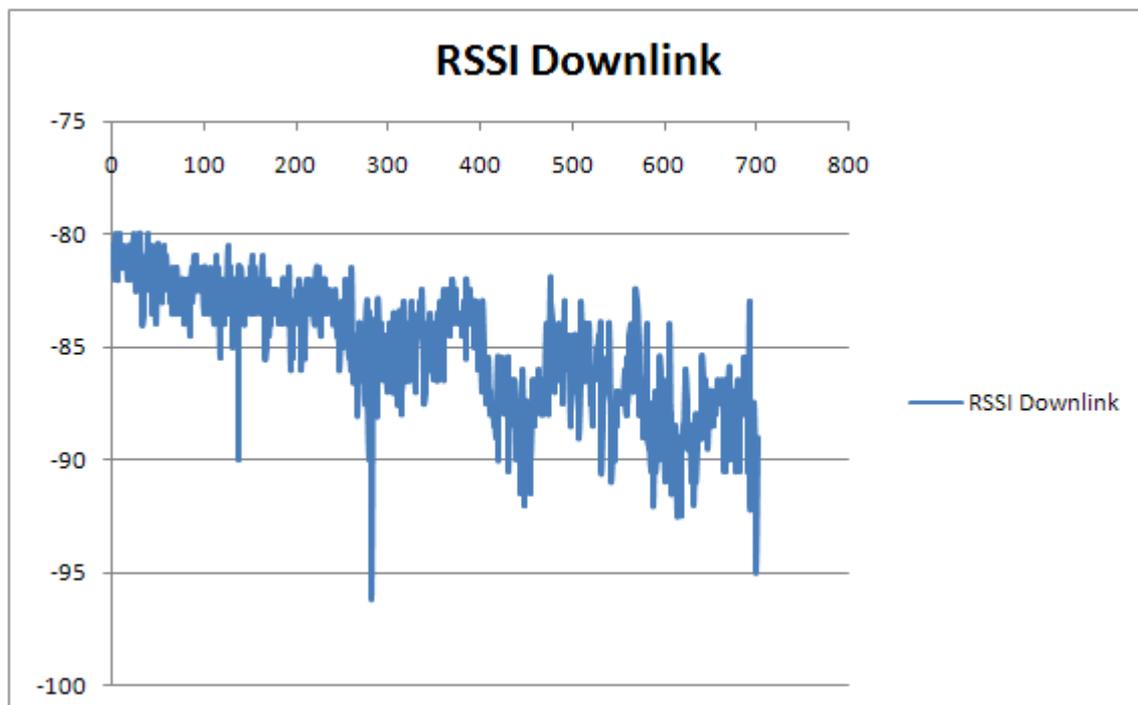


Figura 95 - Dia 26/09/2013 – das 13h00min às 17h00min

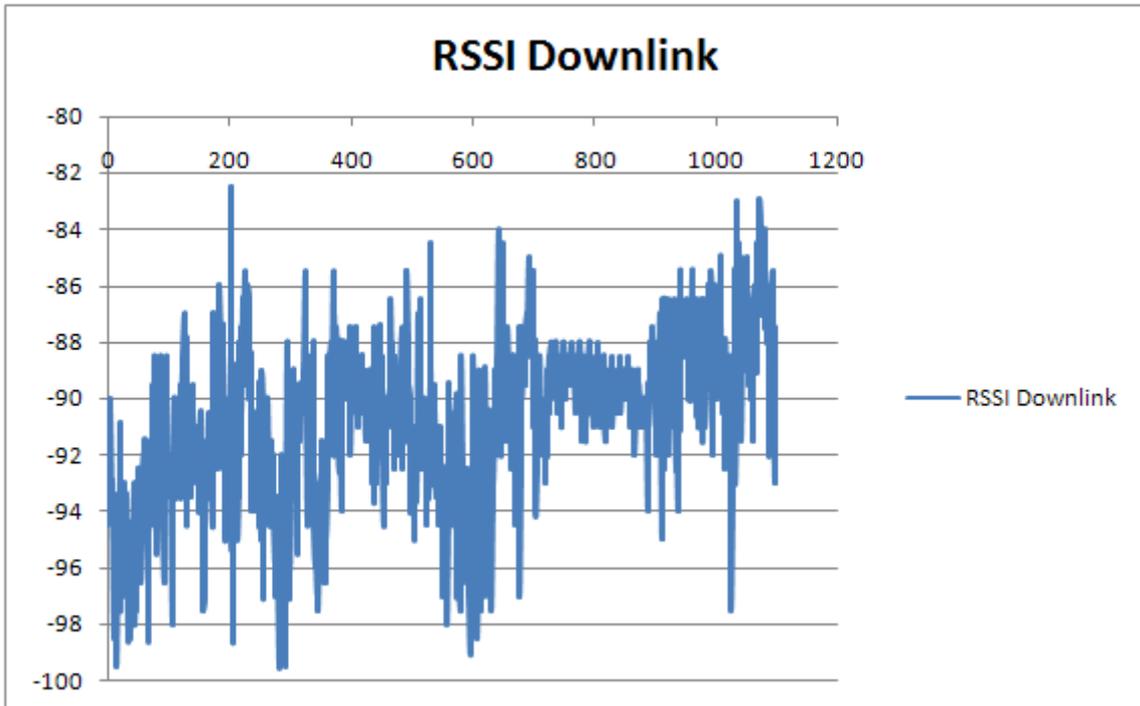


Figura 96 - Dia 27/09/2013 – das 07h00min às 14h05min

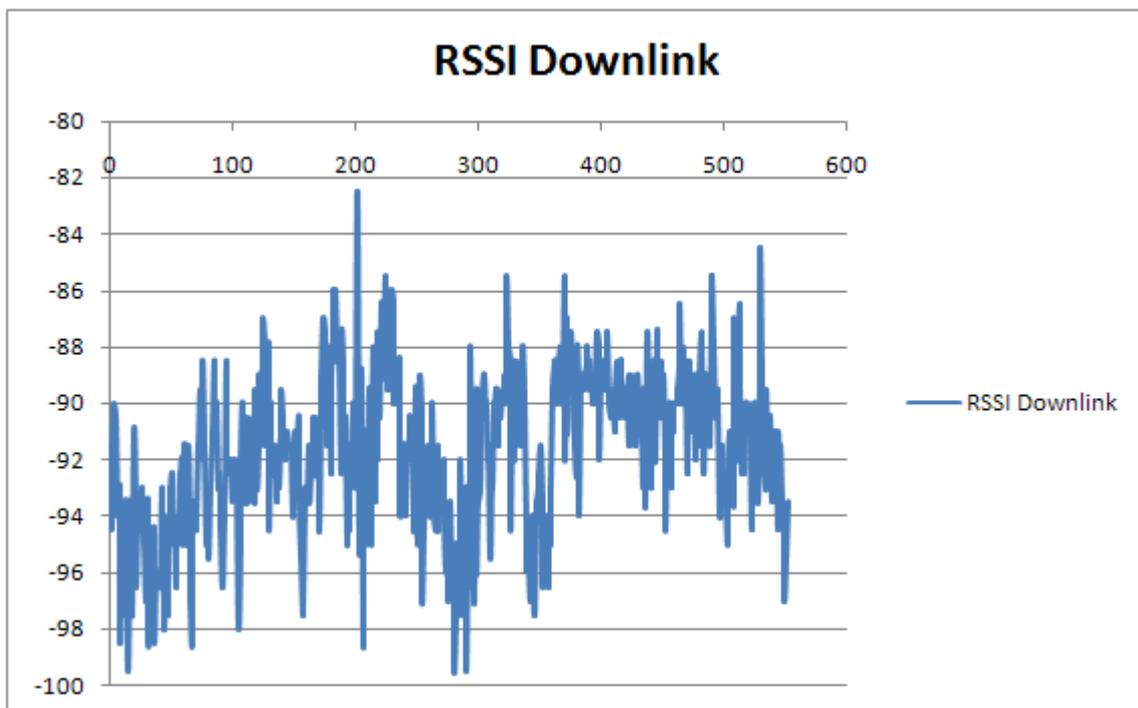


Figura 97 - Dia 27/09/2013 – das 07h00min às 11h00min

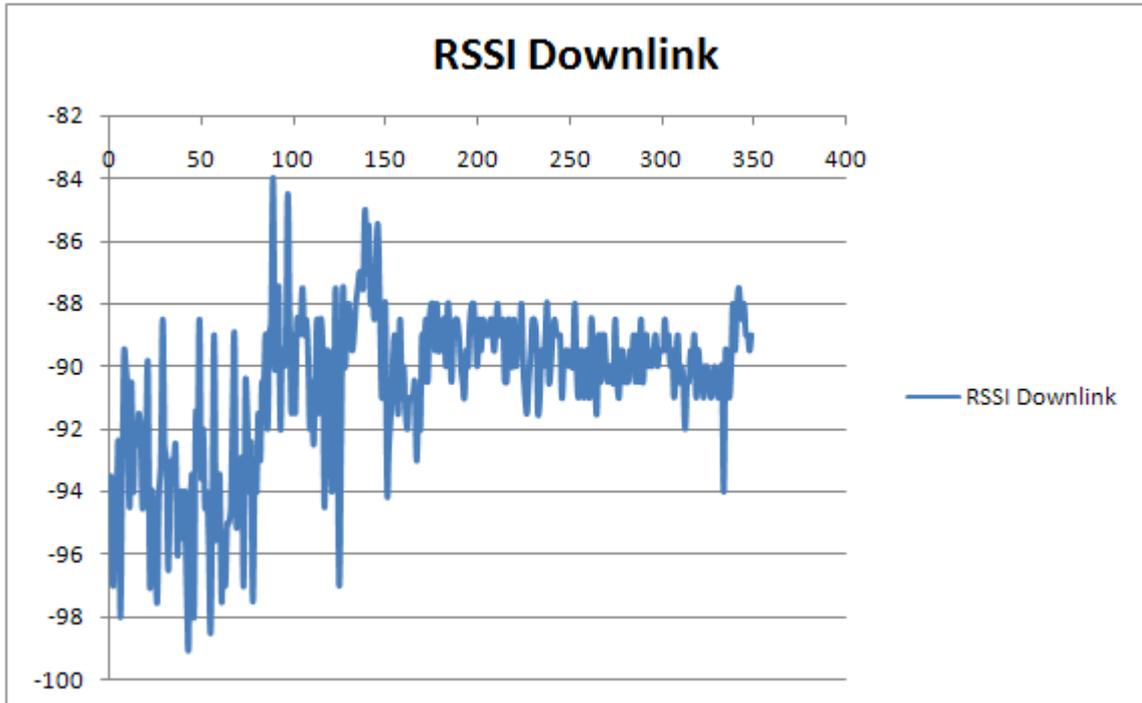


Figura 98 - Dia 27/09/2013 – das 11h00min às 13h00min

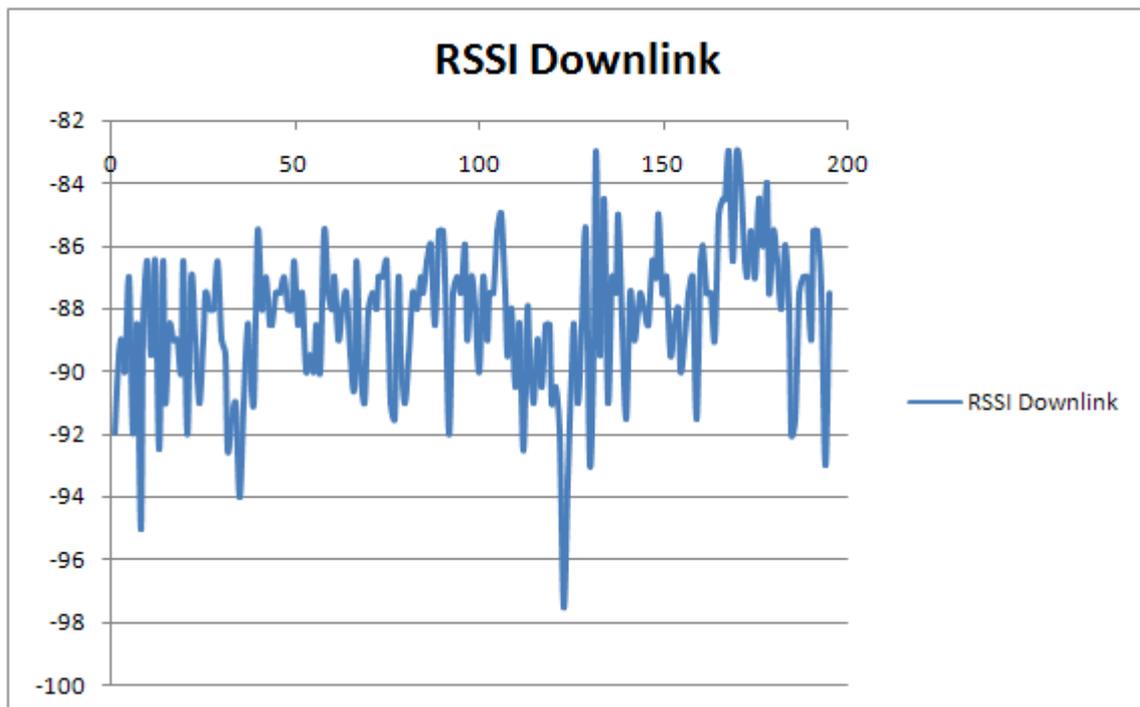


Figura 99 - Dia 27/09/2013 – das 13h00min às 14h05min