

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE  
TECNOLOGIA**

**PEDRO RINALDO CHAVES**

**REDES CENTRALIZADAS DE SENSORES SEM FIO  
PARA PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS -  
UM ESTUDO PREPARATÓRIO PARA A  
INDÚSTRIA 4.0**

**PUC-Campinas  
2016**

**PEDRO RINALDO CHAVES**

**REDES CENTRALIZADAS DE SENSORES SEM FIO  
PARA PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS -  
UM ESTUDO PREPARATÓRIO PARA A  
INDÚSTRIA 4.0**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

**PUC - Campinas  
2016**

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

t621.3851  
C512r

Chaves, Pedro Rinaldo.

Redes centralizadas de sensores sem fio para pequenas e médias indústrias: um estudo preparatório para a indústria 4.0 / Pedro Rinaldo Chaves. - Campinas: PUC-Campinas, 2016.  
77p.

Orientador: Omar Carvalho Branquinho.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Inclui anexo e bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Engenharia elétrica. 3. Pequenas e médias empresas. 4. Interconexão de redes (Telecomunicações). I. Branquinho, Omar Carvalho. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações. III. Título.

22.ed. CDD – t621.3851

**PEDRO RINALDO CHAVES**

**REDES CENTRALIZADAS DE SENSORES SEM FIO  
PARA PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS – UM  
ESTUDO PREPARATÓRIO PARA A INDÚSTRIA 4.0**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica 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.

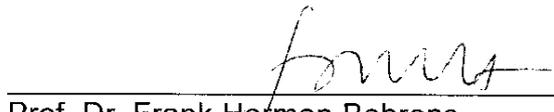
Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações e Informática - Gestão de Redes e Serviços. Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

Dissertação defendida e aprovada em 05 de novembro de 2016 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



---

Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho  
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Frank Herman Behrens  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Fabiano Fruett  
Universidade Estadual de Campinas

**A minha esposa, pais, filho e  
amigos, por todo apoio.**

“Dammed if you do, dammed if  
you don't.”

Lorenzo Dow – Evangelista  
Americano

(1834)

## Resumo

CHAVES, Pedro Rinaldo. **REDES CENTRALIZADAS DE SENSORES SEM FIO PARA PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS - UM ESTUDO PREPARATÓRIO PARA A INDÚSTRIA 4.0**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2016.

A demanda por redes de sensores sem fio (RSSF) aplicadas à monitoração e controle de processos em ambientes industriais de todos os tamanhos tende a aumentar à medida que a quarta revolução industrial (Industry 4.0) avança, sendo que uma das suas características é a flexibilização da disposição dos equipamentos (*plant set-up*). A flexibilidade e baixo custo das RSSF as tornam a escolha perfeita para estas novas instalações manufatureiras do século 21. As pequenas e médias manufaturas (SMEs) tem um papel importante no desenvolvimento das economias da América Latina. Neste trabalho, primeiro descrevem-se os testes e analisa-se o comportamento de uma rede centralizada de sensores sem fio (RCSSF) de baixo custo, em dois ambientes industriais de médio porte de forma a se determinar como o ambiente (topologia, distâncias, barreiras, maquinário e pessoas) e os processos impactam o sinal de rádio. Pondera-se também sobre a confiabilidade e aplicabilidade das RCSSF na monitoração e controle de processos industriais que, por vezes, podem ser críticos. Os resultados mostram uma relação entre parâmetros como o indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI), a taxa de erros do pacote (PER), o ambiente e os processos fornecendo assim subsídios para a gerência da rede. Posteriormente, apresenta-se uma nova estratégia de gerência que consiste em dois índices que rastreiam e monitoram o nível do RSSI garantindo um alerta precoce caso o sinal de rádio apresente deterioração. Com os conhecimentos adquiridos, conclui-se o trabalho com a apresentação de um conjunto de melhores práticas para auxiliar no planejamento, implantação e comissionamento de RCSSF de baixo custo voltadas às SMEs.

## Abstract

The demand for wireless sensor networks (WSN) applied to industrial process monitoring and control should increase as the fourth industrial revolution (Industry 4.0) gathers pace, since one of its main characteristics is about flexible plant set-up. Flexibility and low cost make the WSN the perfect choice for the modern 21st century manufacturing plants. Small and medium enterprises (SMEs) have an important role in the development of the Latin America economies. This paper first describes the tests done in two industrial environments, analyses the results and examines the behaviour of a low cost, centralized WSN in industrial environments to ascertain the impact of the processes and environment (topology, distances, barriers, machines and people) in the radio signal and discuss the reliability and applicability of WSNs in process monitoring and control. The results obtained with the tests indicated a relationship between the received signal strength indicator (RSSI), the packet error rate (PER), the environment and the processes generating subsidies to the network management system. Subsequently, a new management strategy is presented, it includes two RSSI tracking indexes that guarantee an early warning in case the radio signal deteriorates. With the knowledge gathered, a set of best practices is presented; it covers the planning, installation and commissioning of centralized low cost WSNs for SMEs.

## Lista de Figuras

FIGURE 1 - DIAGRAMA DE UMA RSSF TÍPICA COM GERENCIAMENTO REMOTO [FIG. PRÓPRIA] .....	18
FIGURA 2 - BER x Eb/No [3] .....	25
FIGURA 3 - ICS DIAGRAMA [FIG PRÓPRIA] .....	27
FIGURA 4 - MÓDULO BE990 [FIG. PRÓPRIA] .....	30
FIGURA 5 - PLACA DK104 [FIG. PRÓPRIA] .....	31
FIGURA 6 - MÓDULO UARTSBEE E BE990 [FIG. PRÓPRIA] .....	31
FIGURA 7 - CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS 1 [FIG. PRÓPRIA] .....	33
FIGURA 8 - DIAGRAMA DA BANCADA DE EMULAÇÃO SEM FIO [FIG. PRÓPRIA] .....	35
FIGURA 9 - ATENUADORES [FIG. PRÓPRIA] .....	35
FIGURA 10 - BANCADA DE EMULAÇÃO SEM FIO [FIG. PRÓPRIA] .....	36
FIGURA 11 - PER MÉDIA x RSSI MÉDIA [FIG. PRÓPRIA] .....	37
FIGURA 12 - ESQUEMA DE TRANSMISSÃO [2] .....	38
FIGURA 13 - DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS [FIG. PRÓPRIA] .....	39
FIGURA 14 - RSSI SENSORES 1,2 E 3 [FIG. PRÓPRIA] .....	39
FIGURA 15 - LQI SENSORES 1, 2 E 3 [FIGURA PRÓPRIA] .....	40
FIGURA 16 - PLANTA BAIXA EMPRESA X [FIG. PRÓPRIA] .....	43
FIGURA 17 - VISTA LONGITUDINAL DA EMPRESA X [FIG. PRÓPRIA] .....	43
FIGURA 18 - VISTA AÉREA DA EMPRESA Y .....	44
FIGURA 19 - SENRSORES 1 E 2 [FIG. PRÓPRIA] .....	44
FIGURA 20 - PLANTA BAIXA EMPRESA Y .....	45
FIGURA 21 - RSSI SENSORES 1,2 E 3 [FIG. PRÓPRIA] .....	46
FIGURA 22 - PER POR HORA SENSORES 1, 2 E 3 [FIG. PRÓPRIA] .....	47
FIGURA 23 - RSSI SENSORES 1, 2 E 3 NO DIA 29 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	49
FIGURA 24 - PER POR HORA SENSORES 1, 2 E 3 NO DIA 29 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	49
FIGURA 25 - RSSI SENSORES 1, 2 E 3 NO DIA 30 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	50
FIGURA 26 - PER POR HORA SENSORES 1, 2 E 3 NO DIA 30 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	50
FIGURA 27 - DIAGRAMA DO BOX PLOT [FIG. PRÓPRIA] .....	54
FIGURA 28 - ÍNDICE Zr x RSSI - DIA 29 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	57
FIGURA 29 - ÍNDICE Zt x RSSI - DIA 29 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	58
FIGURA 30 - ÍNDICE Zr x PER POR HORA - DIA 29 DE JUNHO [FIG. PRÓPRIA] .....	58
FIGURA 31 - TELA DO SUPERVISÓRIO SCADABR [FIG. PRÓPRIA] .....	59
FIGURA 32 - TELA DO SUPERVISÓRIO SCADABR - TESTE 1 [FIG. PRÓPRIA] .....	61
FIGURA 33 - TELA DO SUPERVISÓRIO SCADABR - TESTE 2 [FIG. PRÓPRIA] .....	62
FIGURA 34 - TELA DO SUPERVISÓRIO SCADABR - TESTE 3 [FIG. PRÓPRIA] .....	63

## Lista de Tabelas

<b>TABELA I - CLASSES DE SERVIÇO [4]</b> .....	22
<b>TABELA II - CAUSAS E EFEITOS DA ATENUAÇÃO [16]</b> .....	25
<b>TABELA III - POTÊNCIA DO SINAL NA TRANSMISSÃO [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	34
<b>TABELA IV - AFERIÇÃO DOS MÓDULOS [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	36
<b>TABELA V - RSSI MÉDIA X PER [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	37
<b>TABELA VI - RESULTADOS DOS TESTES [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	40
<b>TABELA VII - CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES [21]</b> .....	41
<b>TABELA VIII - CÁLCULOS E MEDIÇÕES EMPRESA X [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	47
<b>TABELA IX - PARAMETROS DOS SENSORES [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	51
<b>TABELA X - MEDIÇÕES EMPRESA Y - DIA 29 JUNHO [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	51
<b>TABELA XI - MEDIÇÕES EMPRESA Y - DIA 30 JUNHO [TAB. PRÓPRIA]</b> .....	51

## Lista de Variáveis

$P_{RX_{dBm}}$ .....	Potência de Recepção em dB
$P_{TX_{dBm}}$ .....	Potência de Transmissão em dB
$G_{RX_{dBi}}$ .....	Ganho da Antena de Recepção em dB
$G_{TX_{dBi}}$ .....	Ganho da Antena de Transmissão em dB
$L_{EL_{dB}}$ .....	Atenuação em dB
$f$ .....	Frequência
$d$ .....	Distancia de Referência
$\beta$ .....	Fator de Atenuação
$d_o$ .....	Distancia Entre $d$ e o Receptor
$Z_r$ .....	Índice de Tendência
$Z_b$ .....	Média Móvel (grande)
$Z_s$ .....	Média Móvel (pequena)
$Z_t$ .....	Índice de Limite
$V_r$ .....	Valor de Referência

## Lista de Equações

Equação 1.....	24
Equação 2.....	24
Equação 3.....	33
Equação 4.....	37
Equação 5.....	37
Equação 6.....	40
Equação 7.....	40
Equação 8.....	41
Equação 9.....	54
Equação 10.....	54
Equação 11.....	54
Equação 12.....	55

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ANATEL.....	Agência Nacional de Telecomunicações
ANSI.....	American National Standards Institute
BER.....	Bit Error Rate
EMC.....	Compatibilidade Eletromagnética
EMI.....	Interferência Eletromagnética
FCC.....	Federal Communications Commission
FSK.....	Frequency Shift Key
GHz.....	Giga Hertz
ICS.....	Industrial Control System
IDE.....	Integrated Development Environment
IEEE.....	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISA.....	International Society of Automation
ISM.....	Industrial Scientific and Medical
ISSO.....	International Standards Organization
LQI.....	Link Quality Indicator
MHz.....	Mega Hertz
PER.....	Packet Error Rate
QoS.....	Quality of Service
RF.....	Rado Frequency
RFID.....	Radio Frequency Identification
RCSSF.....	Rede Centralizada de Sensores sem Fio
RSSF.....	Rede de Sensores sem Fio
RSSI.....	Received Signal Strength Indicator
SCADA.....	Supervisory Control and Data Acquisition
SME.....	Small and Medium Enterprise
SNR.....	Signal to Noise Ratio
TRT.....	Tempo de RoundTrip

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 Objetivo.....	19
1.2 Motivação .....	20
1.3 Organização do Trabalho .....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
2.1 RSSF no Ambiente Industrial.....	21
2.2 Roteamento .....	24
2.3 Confiabilidade .....	24
2.4 Gerenciamento das RSSF .....	26
2.5 Testes (Método da Caixa Preta).....	27
<b>3. AMBIENTES AVALIADOS</b> .....	28
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
<b>5. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO</b> .....	33
5.1 Medições das Potências de Transmissão.....	33
5.2 Medições do RSSI e PER.....	34
5.3 Relação RSSI X PER.....	36
5.4 Cálculo do RSSI – Ambiente de Teste.....	37
5.5 Medições do RSSI – Ambiente de Teste.....	38
5.6 O Modelo LOG-Distance.....	41
5.7 Medições em Campo .....	42
5.7.1 Medições na Empresa X.....	42
5.7.2 Medições na Empresa Y.....	44
<b>6 RESULTADOS DOS TESTES</b> .....	46
6.1 Empresa X.....	46
6.2 Empresa Y.....	48
6.3 Análise dos Resultados.....	52
<b>7 GERÊNCIA</b> .....	54
7.1 Estratégia com Índices $Z_r$ e $Z_t$ .....	54
7.2 Teste da Estratégia.....	56
7.3 Implementação da Estratégia em Sistema Supervisório.....	59
7.4 Testes da Estratégia em Sistema Supervisório.....	60

<b>8</b>	<b>MELHORES PRÁTICAS PARA IMPLANTAÇÃO DE RSSF EM AMBIENTES INDUSTRIAIS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE.....</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>68</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Pequenas e médias manufaturas (SMEs) estão no centro do debate das políticas econômicas nos países da América Latina [1], contribuindo para o desenvolvimento da região. A produtividade nessas SMEs pode ser melhorada com o uso de tecnologias modernas, no entanto, as redes de sensores sem fio (RSSF) correntemente oferecidas pelos grandes provedores de soluções são complexas, não centralizadas, caras [2] e conseqüentemente fora do alcance das SMEs que diferentemente das grandes indústrias, não têm os recursos para fazer uso efetivo destas soluções [1].

Com a chegada da quarta revolução industrial (Industry 4.0), a automação com a utilização de RSSF industriais deve se intensificar visto que uma das principais características destas redes é a sua grande flexibilidade no tocante a instalação, que vai ao encontro das necessidades das modernas instalações manufatureiras do século 21 quanto a flexibilização da disposição geral dos equipamentos [3]. Devido a sua inerente flexibilidade, seria natural que controle e não somente monitoramento dos processos fossem feitos com o uso de RSSF [2].

Fábricas inteligentes permitirão que máquinas e materiais se comuniquem enquanto na linha de montagem. No princípio do processo, cada produto trará consigo um chip com a informação necessária para sua montagem, e à medida que avança na linha, se comunicará com os equipamentos de montagem via Identificação por Frequência de Rádio (RFID). As conexões dos pontos de coleta de informação com os pontos de controle dos processos utilizarão RSSF industriais [3].

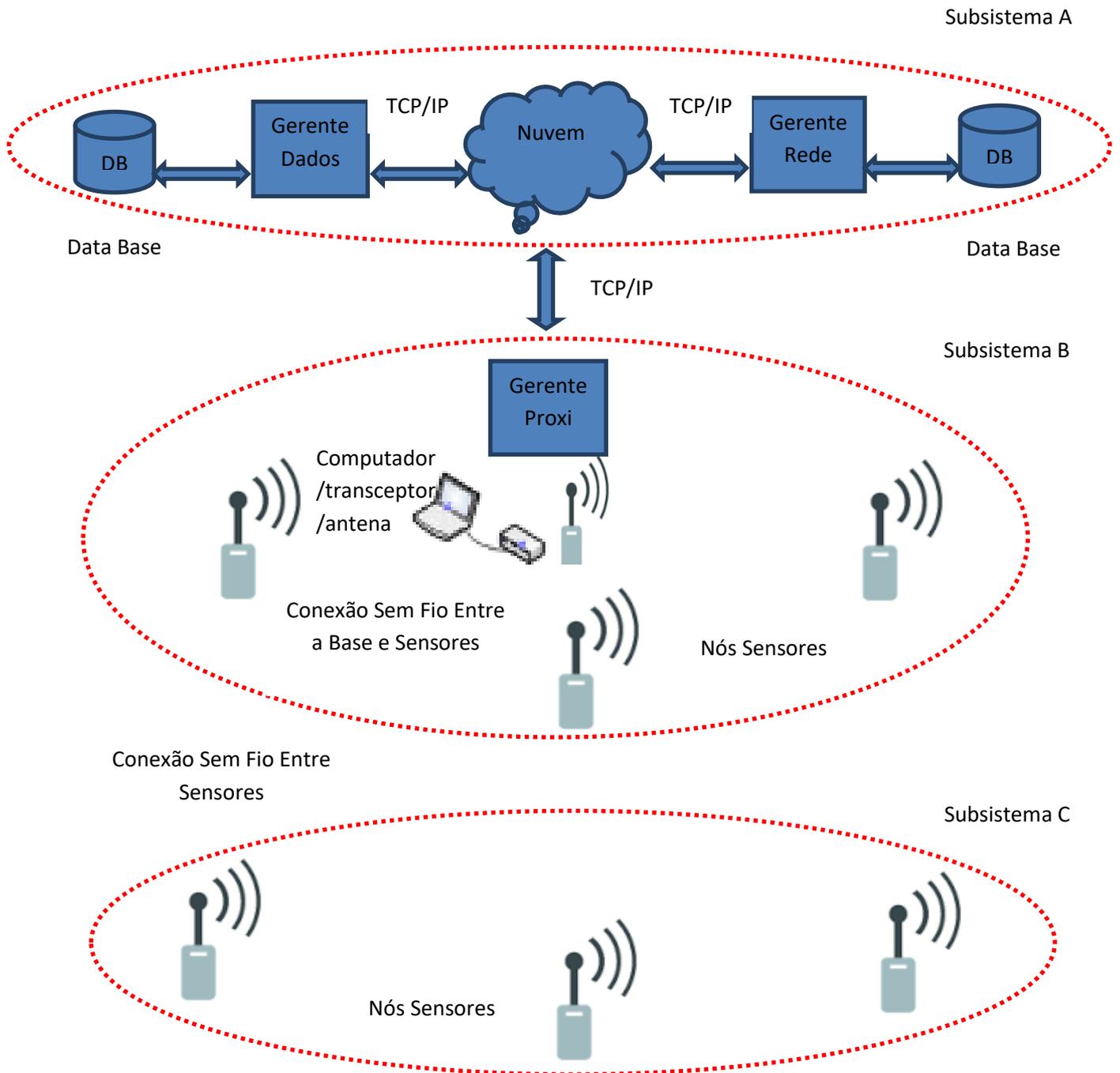
Se comparadas as redes cabeadas, a RSSF oferecem vantagens substanciais quanto à instalação, comissionamento e manutenção [4]. Permitem alcançar áreas que antes estavam fora de alcance físico ou econômico, permitindo assim a melhoria dos processos. Áreas remotas e obstruções físicas deixam de ser uma barreira. O alcance do sinal tende a ser degradado pelo tipo dos processos efetuados na área e pela densidade da infraestrutura, que pode ser estimada por mapeamento das áreas onde os nós sensores serão instalados, classificando-as como baixa, média e alta [5].

Uma RSSF é composta por um grupo de transceptores com o intuito de monitorar processos e ambientes e controlar atuadores. Parâmetros comumente monitorados incluem temperatura, umidade, pressão, fluxo, nível de líquidos, luminosidade, vibrações, voltagem e concentração de poluentes. Estas redes são compostas por várias estações de monitoração chamadas de nós sensores, que devem ser pequenos, leves e portáteis, um nó sorvedouro e uma central com poder de processamento para receber e tratar as informações. Cada nó sensor deve ser equipado com um transdutor, um microprocessador, um transceptor, fonte de energia e opcionalmente um atuador. O transdutor gera um sinal elétrico baseado em efeitos físicos, o microprocessador processa e salva as informações enquanto o transceptor as recebe e envia para central de monitoramento.

A Figura 1 traz um diagrama de uma RSSF. O subsistema A pode ser considerado como o cliente e é caracterizado por *databases* e gerentes de rede e dados com capacidade de conectar-se a rede do subsistema B. Estes gerentes requisitam informações ao subsistema B.

O subsistema B é composto por um gerente e *proxy*, com a possibilidade da inserção de uma *database* neste nível. O gerente faz a requisição dos dados sendo monitorados pelo subsistema e faz a conversão para o protocolo da nuvem (TCP/IP). Também faz parte desse subsistema o conjunto denominado computador/transceptor/antena (nó sorvedouro) e os conjuntos sensores/transceptores/antenas (nós sensores) que por sua vez, dependendo da topologia, roteiam os pacotes para os nós sensores do subsistema C.

O subsistema C é fundamentalmente composto pelos agentes gerenciados, conjuntos de nós sensores para comunicação sem fio com os conjuntos do subsistema B.



**Figura 1 - Diagrama de uma RSSF Típica com Gerenciamento Remoto [Fig. Própria]**

Aplicações típicas para RSSF incluem monitoramento e automação industrial, monitoramento de tráfego e condições climáticas, controle de robôs e usos militares [6].

As soluções de monitoração e controle por RSSF oferecidas por grandes fornecedores como Emerson, Banner ou Siemens são voltadas às necessidades de grandes empresas, com preços na ordem de centenas de milhares de reais, o que não necessariamente atende as necessidades das SMEs no tocante a custo e complexidade. Estes fornecedores, em geral, oferecem soluções não centralizadas para grandes redes, onde a decisão sobre o roteamento fica a cargo dos nós sensores, tornando a rede refém da topologia estabelecida, impactando assim em seu controle.

O propósito deste trabalho é avaliar o funcionamento de redes centralizadas de sensores sem fio (RCSSF); com preços que correspondem a somente uma fração dos praticados pelos grandes fornecedores; voltadas as SMEs, onde o gerente da rede tem total controle sobre seu funcionamento. Para isso descrevem-se os testes realizados em duas indústrias que atuam em mercados distintos, de forma a embasar a proposta do uso de RCSSF no atendimento das necessidades de monitoramento e controle em plantas industriais de pequeno e médio porte a um baixo custo.

A primeira indústria é aqui denominada Empresa X Indústria Metalúrgica Ltda. com 2685 m<sup>2</sup> de área construída, e a segunda será chamada de Empresa Y Indústria e Comércio de Postes e Artefatos de Cimento Ltda. com área construída de 5800 m<sup>2</sup>.

Uma RCSSF composta por um nó sorvedouro e três nós sensores sem fio, operando na banda ISM de 915 MHz, utilizando a topologia ponto-multiponto, também conhecida como em estrela, foi instalada em ambas as plantas; dados foram colhidos e analisados de forma a se averiguar a relação entre os diferentes processos de cada planta, fatores ambientais, variação do indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI), taxa de erro dos pacotes (PER) e distância entre nós sensores e nó sorvedouro.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é avaliar uma solução que atenda as necessidades de automação das Empresas X e Y e como resultado elencar

critérios, por meio da caracterização de ambientes, que facilitem a instalação e gerenciamento de RCSSF de baixo custo em SMEs, para monitoração e controle de processos e ambientes.

## **1.2 Motivação**

Nortear a adequação de novas e existentes, pequenas e médias, instalações industriais à quarta revolução industrial no contexto da produção inteligente.

## **1.3 Organização do Trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 descreve-se como as RSSF em geral são atualmente utilizadas nos ambientes industriais e são analisados os indicadores que serão utilizados.

No Capítulo 3 são descritos os ambientes avaliados e é apresentada a proposta a ser seguida na avaliação da aplicabilidade das RCSSF em monitoramento e controle em ambiente industrial.

No Capítulo 4 são listados o material e descritos os métodos utilizados.

No Capítulo 5 são detalhados os métodos de aferição dos módulos e descritos os cálculos e medições efetuadas.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados das medições.

No Capítulo 7 é apresentada a proposta de gerência.

No Capítulo 8 é apresentado um conjunto das melhores práticas a serem observadas no planejamento, implantação e comissionamento de RCSSF.

No Capítulo 9 estão as conclusões do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RSSF no Ambiente Industrial

Quando implementadas em ambientes industriais, as RSSF podem estar expostas a interferências na faixa do espectro eletromagnético, visto que estes ambientes geralmente contem muitas máquinas, linhas de transmissão de corrente alternada, equipamentos de solda, fornos de micro-ondas e objetos metálicos em geral [7]. A Interferência Eletromagnética (EMI) pode causar problemas para sistemas sem fio, o nível de irradiação gerada por equipamentos deve estar dentro de limites. A Compatibilidade Eletromagnética (EMC) descreve como um equipamento se comporta em um ambiente eletromagnético com relação a introdução de ruído eletromagnético.

De acordo com a ISA 100 [4], as RSSF oferecem três principais benefícios se comparadas a redes cabeadas. A confiabilidade da rede é o primeiro e maior benefício, visto que em algumas situações onde as conexões cabeadas estão expostas a condições extremas, uma rede sem fio apresenta um grau maior de confiabilidade. O segundo benefício está na possibilidade de um melhor controle devido à facilidade de se empregar um número maior de nós sensores, criando assim redundância, oferecendo uma maior flexibilidade e possibilitando a cobertura de áreas antes de difícil acesso. O terceiro benefício está no custo mais baixo, considerando-se que até 90% do custo de instalação de uma rede convencional está no cabeamento, calhas e obras relacionadas [4].

Uma RSSF é essencialmente probabilística e não determinística [2]; vários estudos têm mostrado que a sensibilidade e a cobertura de uma rede de sensores não são regulares e sim seguem um modelo probabilístico [8]. O meio utilizado por estas redes é por natureza não confiável, sendo que ruídos e interferências na faixa do espectro utilizada podem causar dificuldades [7].

Os métodos de monitoramento baseados em hardware estimam a qualidade do link usando métricas básicas que são fornecidas pelo chip, como o RSSI, o Indicador da Qualidade do Enlace (LQI) e a Relação Sinal Ruído (SNR), que se comparados com sistemas baseados em software, necessitam de menos

*overhead*, possibilitando assim uma melhor resposta as mudanças na qualidade do enlace [9].

Desde que WLANs, Bluetooth e Zigbee foram introduzidos, muito do esforço dentro do espectro não licenciado foi focado na banda Industrial, Scientific and Medical (ISM) de 2.4 GHz; no entanto existem outras bandas não licenciadas reservadas para aplicações ISM que podem ser utilizadas para comunicação sem fio [10]. A banda ISM de 915 MHz não tem nenhuma restrição quanto ao tipo de aplicação. Esta banda encampa as frequências de 902 MHz a 928 MHz com o centro da banda em 915 MHz [11]. No Brasil a faixa disponível vai de 902 MHz a 907.5 MHz e de 915 MHz a 928 MHz [2].

Sensores monitoram o estado dos processos e periodicamente enviam as leituras para controladores remotos. Baseados nestas leituras, o controlador envia um comando de controle para o atuador que no recebimento deste promove os ajustes necessários. Para aplicações de controle, o tempo de resposta é um parâmetro crítico para garantir a estabilidade dos processos. A confiabilidade da comunicação é conseguida somente se a mensagem de leitura da monitoração e o comando de controle são decodificados dentro de um tempo limite especificado pela política de controle [12].

A ISA 100 classifica os processos industriais, de acordo com suas criticidades, em seis classes diferentes como indicado na Tabela I.

**Tabela I - CLASSES DE SERVIÇO [4]**

Utilização	Classe	Descrição	Característica
Segurança	0	Ação de Emergência	Sempre Critico
Controle	1	Controle de regulação, (Malha Fechada)	Geralmente Critico
	2	Controle de Supervisão (Malha Fechada)	Geralmente não Critico
	3	Controle Aberto (Malha Aberta)	Participação Humana
Monitoração	4	Alerta	Poucas Consequências
	5	<i>Logging, up e download</i>	Sem Consequências Imediatas

Correntemente em ambientes industriais, as RSSF são usualmente empregadas em monitoração de processos, classes 4 e 5, mas não tão comumente em controle, classes 1, 2 e 3 [4].

O tráfego na rede, quando utilizada em monitoração e controle de processos, inclui a transmissão contínua, assimétrica e espontânea de dados [13].

Alguns dos maiores desafios no desenvolvimento das RSSF são:

- Limitações dos dispositivos: capacidade das baterias, tamanho e peso.
- Topologias: o roteamento dinâmico esta sujeito a mudanças com o tempo devido aos diferentes processos e atividades.
- Condições adversas: problemas com a propagação das ondas de rádio, *multipath*, ruído e interferências causados por equipamentos e máquinas.
- Meio ambiente agressivo: ambientes com grande variação térmica, vibrações, umidade, condensação e poluentes.
- Qualidade de serviço (QoS): RSSF atenderão processos com demandas diferentes.
- Segurança: RSSF devem ter estratégias para lidar com ataques internos e externos.
- Escalabilidade: crescimento ou mudanças na topologia da rede.
- Integração: necessidade de compatibilização com a infraestrutura existente [14].

As transmissões das leituras de monitoração dos estados dos processos na descida (*downlink*) e os comandos de controle para os atuadores na subida (*uplink*) utilizam o *half-duplex* sendo que elas ocorrem em *time slots* diferentes e precisam atender as exigências os tempos de *round trip* (TRT) dos processos [12].

## 2.2 Roteamento

Para o uso em controle de processos, classes um, dois ou três, *timing* é um parâmetro essencial. As RSSF devem apresentar baixo *jitter* (variação estatística do ciclo na entrega de dados) e *delay* (atraso do sinal). Em [15] defende-se o emprego da topologia ponto-multiponto (estrela), devido a não necessidade de roteamento entre nós sensores o que reduz *jitter* e *delay*. Essa estratégia, no entanto pode limitar o alcance das RSSF, dificuldade que pode ser minimizada com o uso de transceptores de alta potência. O roteamento ponto-multiponto, se não bem planejado, pode também causar dificuldades quanto à confiabilidade da comunicação dentro da rede devido à ausência de redundância de caminhos entre nó sorvedouro e nós sensores.

Uma topologia em malha com roteamento multi-saltos estático ou mesmo dinâmico oferece a possibilidade da redundância de caminhos, mas pode comprometer o *timing*. Sendo assim, a opção pela topologia da rede é dependente das particularidades do projeto; distância entre nós sensores, densidade, criticidade dos processos, posição dos equipamentos, tamanho da planta, etc. [15], necessitando de planejamento cuidadoso.

## 2.3 Confiabilidade

Com a utilização de redundâncias de dispositivos e caminhos, uma RSSF pode ter uma disponibilidade maior que uma rede cabeada, no entanto há a preocupação com a confiabilidade visto que os processos e o meio podem afetar a comunicação [4]. De forma a garantir a confiabilidade do sistema, é preciso também garantir a disponibilidade da rede e a confiabilidade dos dados. O sinal, ao atravessar o meio, sofre desvanecimento, causado pela degradação da qualidade do sinal de rádio (RF) devido a interferências, absorção, atenuação e obstáculos. Interferências na mesma banda de frequência que a RSSF pode corromper ou até mesmo inutilizar o sinal [13]. Em [16] afirma-se que a atenuação pode ser compreendida como efeitos físicos distintos, como indicado na Tabela II.

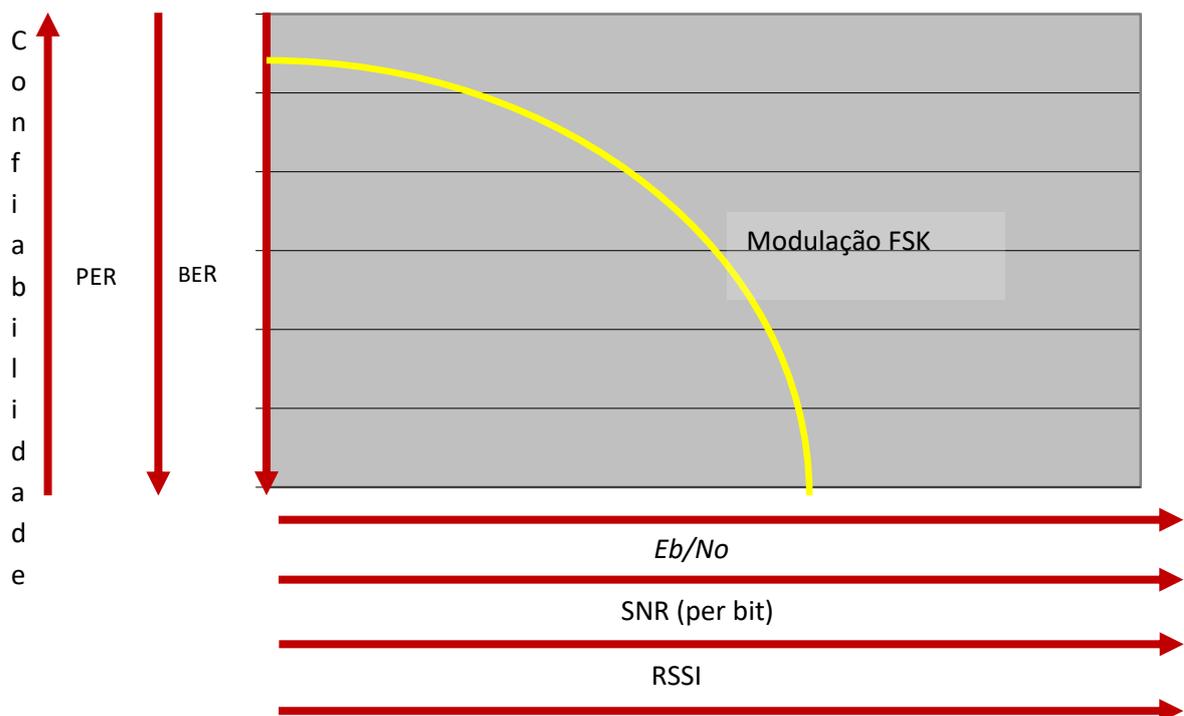
**Tabela II - CAUSAS E EFEITOS DA ATENUAÇÃO [16]**

Causas Ambientais	Efeitos Físicos no Sinal	Desvanecimento
Absorção	Atenuação { Obstrução Absorção Divergência Convergência	Plano
Obstáculos		

O padrão ISA 100.11a para aplicações sem fio em processos de automação industrial, sugere estratégias para se mitigar esses efeitos adversos como técnicas de modulação, redundância de bases, diversidade de frequências e um gerenciamento cuidadoso da rede [4].

Em [17] a relação  $E_b/N_0$  e Bit Error Rate (BER) é apresentada com a Equação 1, sendo que  $E_b/N_0$  é a relação entre a energia do bit e a densidade espectral da potência de ruído, sendo que esta relação é dependente da modulação utilizada. A Figura 2 traz o diagrama com esta relação.

$$BER = \frac{1}{2} e^{Eb/2No} \quad (1)$$



**Figura 2 - BER x Eb/No [3]**

A PER pode ser relacionada com a BER através da Equação 2.

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (2)$$

Sendo que  $n$  é o número de bits no pacote.

De acordo com [18], uma PER de 5% pode ser utilizada como valor de referência ( $V_r$ ) para uma RSSF, no entanto é preciso salientar que o valor da PER máxima admissível será sempre estipulado pela tolerância da aplicação.

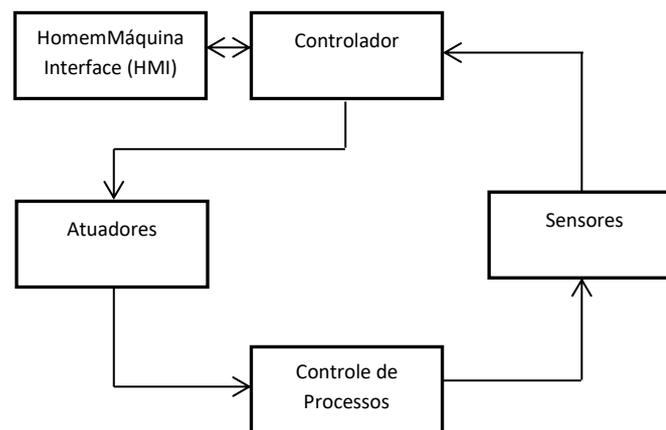
## 2.4 Gerenciamento das RSSF

A *raison d'être* de uma RSSF é monitorar e controlar processos e ambientes. A gerência de uma RSSF deve definir o conjunto de funções que integrarão, de forma organizada, funções de configuração, monitoramento, operação e manutenção dos serviços da rede e dos dispositivos [19]. A definição da criticidade do processo e caracterização do sinal e do meio fornece subsídios ao sistema de gerência da rede. A ISO divide o gerenciamento de redes em cinco áreas: configuração, desempenho, falha, segurança e contabilidade [20].

Em comunicações sem fio, a intensidade do sinal recebido é dependente do meio. Uma estratégia que auxilie na estimativa da tendência do RSSI a um limiar seria relevante para a gerência de desempenho e conseqüentemente a gerência de configuração, sendo que uma ação pode ser tomada antes que este limiar seja alcançado [21]. O RSSI é medido em dBm. O dB é equivalente a 10 vezes o logaritmo na base 10 da razão entre duas potências, que no caso do dBm é medido com referência a 1 miliwatt. Um aumento em 3 dB corresponde a dobrar a potência, um aumento em 10 dB corresponde a multiplicar a potência por 10 e em 20 dB corresponde a um aumento da potência em 100 vezes.

Um Sistema de Controle Industrial (ICS) típico tem uma gama de laços de monitoração de controle. Laços de supervisão operam continuamente durante os processos com ciclos variando de milissegundos a minutos [22]. Estes sistemas coletam dados dos sensores remotos em tempo real para monitorar e controlar equipamentos e condições.

Sistemas Supervisórios de Controle e Aquisição de Dados (SCADA) são ICSs usados na monitoração e controle de dispositivos remotos. Como indicado na Figura 3, estes sistemas executam o monitoramento e controle centralizado das redes de comunicação, incluindo monitoramento de alarmes e processamento de dados. Baseados em informações dos sensores, comandos manuais ou automáticos podem ser executados nos dispositivos remotos [22].



**Figura 3 – Diagrama de um Sistema de Controle Industrial [Fig Própria]**

## 2.5 Testes (Método da Caixa Preta)

De acordo com o padrão ANSI/IEEE 1059, um teste pode ser definido como um processo de análise do software de forma a detectar diferenças entre as especificações e o produto entregue e avaliar suas particularidades executando-se procedimentos para identificar possíveis falhas, erros ou ausência de requerimentos [23].

O método da Caixa Preta considera o programa de software como uma caixa preta, fora do alcance do indivíduo fazendo os testes e por isso ignora-se totalmente sua construção interna. Esta técnica foca nas seguintes categorias: funções incorretas ou ausentes, erros na interface, erros na estrutura dos dados, erros de desempenho ou comportamento e erros de inicialização ou término [24]. Neste trabalho, este método é utilizado na avaliação dos resultados com os testes dos índices de rastreamento do RSSI a serem descritos no Capítulo 7.

### 3. AMBIENTES AVALIADOS

De forma a se avaliar o comportamento das RCSSF em monitoramento e controle de processos industriais usados nas SMEs, optou-se por se fazer um levantamento das áreas de produção de duas empresas manufatureiras de médio porte e corroborar os resultados com cálculos usando o modelo Log-Distance [25].

Percebeu-se que muitos processos executados nas duas plantas poderiam ser monitorados e controlados remotamente. Por meio de visitas as Empresas X e Y, foi identificada a possibilidade do aumento da produtividade de ambas: no caso da Empresa X, o controle da produção de cada máquina e o controle da temperatura do ambiente e no caso da Empresa Y, a monitoração do volume d'água nos reservatórios e da temperatura dos motores elétricos, visto que estas ações são correntemente efetuadas manualmente. Confirmou-se com os gerentes de produção locais que todos estes processos se enquadram na Classe 3 (controle aberto com participação humana) da Tabela 1, sendo que não são críticos e uma vez detectada uma falha, uma ação por operador necessita somente ser tomada no período de até cinco minutos. Foi proposta a monitoração e controle destes processos via uso de RCSSF. Uma rede composta de nó sorvedouro e três nós sensores foi instalada em cada planta, foram feitas medições do RSSI e da PER nos nós sensores instalados em diferentes áreas, visando-se avaliar fatores ambientais (distância entre nó sorvedouro e nós sensores, topologia, visada, maquinário, pessoas etc...) que possam afetar a qualidade da comunicação. Como os processos a serem monitorados não são considerados críticos, optou-se pela utilização da topologia ponto-multiponto, por sua simplicidade e inerente baixo *jitter* e *delay*.

As instruções para implantação e comissionamento de redes oferecidas por grandes fornecedores de soluções em RSSF se resumem a um conjunto de instruções que não levam em conta fatores como a PER ou RSSI. Uma possível identificação da relação entre a qualidade do sinal no enlace e da taxa de erro dos pacotes com os fatores dos ambientes servirá de base para uma metodologia que facilitará o planejamento, implantação e comissionamento de RCSSF de baixo custo, baseando-se em mapeamentos dos fatores ambientais e medições da

qualidade da comunicação, assim abrindo caminho para o uso de RSSF por SMEs em processos de monitoração e controle.

Quanto à gerência da rede, foi desenvolvida uma estratégia que utiliza dois índices que rastreiam a dispersão do sinal no tempo e, por correspondência com a PER, fornecem informações para os gerentes de desempenho e configuração.

A proposta caracteriza uma estratégia de auxílio no planejamento, instalação e comissionamento das RSSF tendo fatores ambientais como parâmetros.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

Para as medições neste trabalho, foi utilizada a plataforma de baixo custo Rádium (software e hardware aberto) que utiliza pacotes com 52 bytes [26]. O *firmware* para os módulos foi desenvolvido usando o *Integrated Development Environment* (IDE) do Rádium e a aplicação para monitoração do RSSI, LQI e PER foi criada em Python versão 2.6 [27] (vide Anexo A). O sistema supervisorio utilizado na proposta de gerência foi o ScadaBR [28] (vide Anexo B), que também é software aberto.

O transceptor utilizado foi o módulo rádio BE990, com dimensões de 32.0 mm x 24.4 mm x 1.5 mm, como indicado na Figura 4, opera na banda ISM de 915 MHz e utiliza a modulação FSK. O módulo foi configurado com a taxa de transmissão de 38.38 Kbps. O BE990 atende à regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e traz um micro controlador Atmega 328, um transceptor Texas CC1101 e um amplificador RF Texas CC1190 [29].



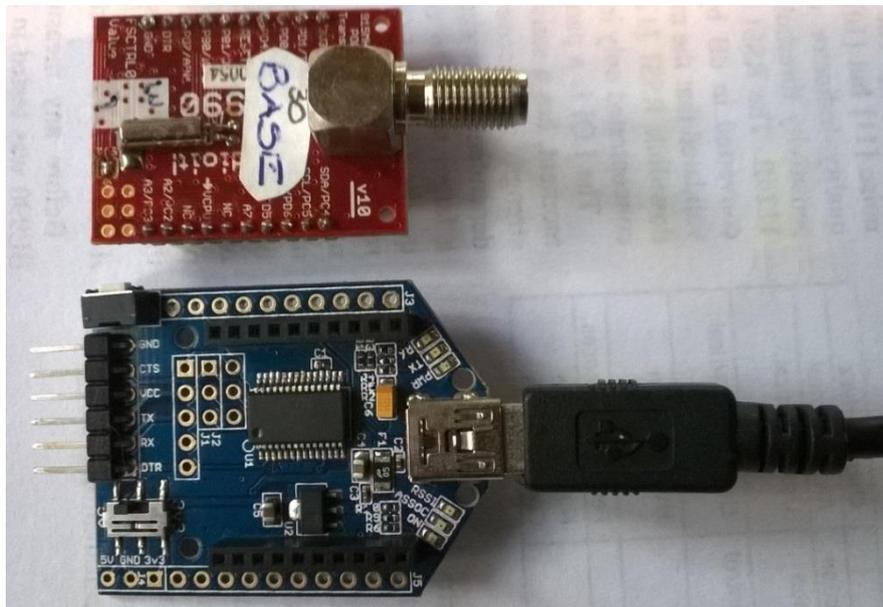
**Figura 4 - Módulo BE990 [Fig. Própria]**

Nos nós sensores, o módulo foi montado na placa de desenvolvimento DK104 [26], como indicado na Figura 5. Esta placa possui um regulador de tensão que permite a utilização de fontes de energia entre 5V e 14V, os nós sensores utilizados neste estudo foram sempre alimentados por baterias de 12 volts.



**Figura 5 - Placa DK104 [Fig. Própria]**

O DK104 não possui saída serial USB para comunicação com o computador e por isso não pôde ser utilizado no nó sorvedouro. Para esse fim, utilizamos o módulo UartSBee que possui saída mini USB, Figura 6.



**Figura 6 - Módulo UartSBee e BE990 [Fig. Própria]**

O transceptor provê os dois parâmetros utilizados nesse estudo, o RSSI e o LQI. O RSSI representa a intensidade do sinal observado no transceptor no momento da recepção em dBm [30]. O RSSI pode sofrer a interferência de ruído de outras transmissões [31]. No entanto [32] prova que o RSSI pode ser um bom indicador da qualidade do link, desde que este valor esteja acima do limite da

sensibilidade do dispositivo, que no caso do CC1190 é de -112 dBm [29]. O RSSI é medido como um número inteiro e então convertido em dBm através da subtração de uma constante [31]. Através de testes, validou-se que o BE990 apresenta simetria de RSSI de subida e descida e por esta razão, neste trabalho, utilizou-se somente os valores RSSI de descida, ou seja, a potência percebida no nó sensor.

O LQI é uma medida que mostra se o sinal de rádio de um enlace está, naquele momento, com qualidade satisfatória, não levando em consideração a intensidade do mesmo. No entanto a qualidade do sinal tende a ser dependente da intensidade devido ao fato que um sinal potente tem uma relação sinal ruído maior e dessa forma será visto como de melhor qualidade. O LQI reflete a qualidade do sinal visto do lado do nó receptor [32]. O LQI deve ser usado como uma medida relativa da qualidade do enlace, visto que é dependente do tipo de modulação. Um valor menor de LQI indica um enlace melhor que um valor maior [30]. Valores de LQI geralmente se encontram entre 110 e 50 [32]. Em [31] há a indicação que o LQI não é um bom indicador da qualidade da comunicação e esta informação é corroborada no item 5.5 deste trabalho.

A PER corresponde a porcentagem de pacotes que não foram transmitidos com sucesso, incluindo pacotes perdidos e pacotes recebidos com erro.

## 5. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

### 5.1 Medições das Potências de Transmissão

Antes que qualquer medição em campo pudesse ser feita, foram efetuados testes em laboratório para se averiguar a aferição dos módulos BE990.

Para a medição da potência de transmissão de cada módulo, fez-se uso de um *splitter* Mini-Circuit ZFRSC-123-S+ [33] conectado na saída SMA do módulo. Nas saídas do *splitter* foram conectados a antena e o analisador de espectro Anritsu MS2036A [34]. Para evitar danos ao analisador de espectro, foi também instalado um atenuador de 30 dB Mini-Circuit 15542 VAT-30+ [33] na entrada deste. Para estas medições, cada módulo foi conectado por vez ao *setup* indicado na Figura 7. Um dos módulos foi instalado no nó sorvedouro enquanto os demais foram utilizados nos nós sensores. O nó sorvedouro enviou uma serie de 500 pacotes, sendo um por segundo, e leituras da potência do sinal enviado pelo nó sensor foram feitas com o analisador de espectro configurado para *max hold*. O número de 500 pacotes foi escolhido de forma a garantir que as medições refletissem a real característica de cada módulo.

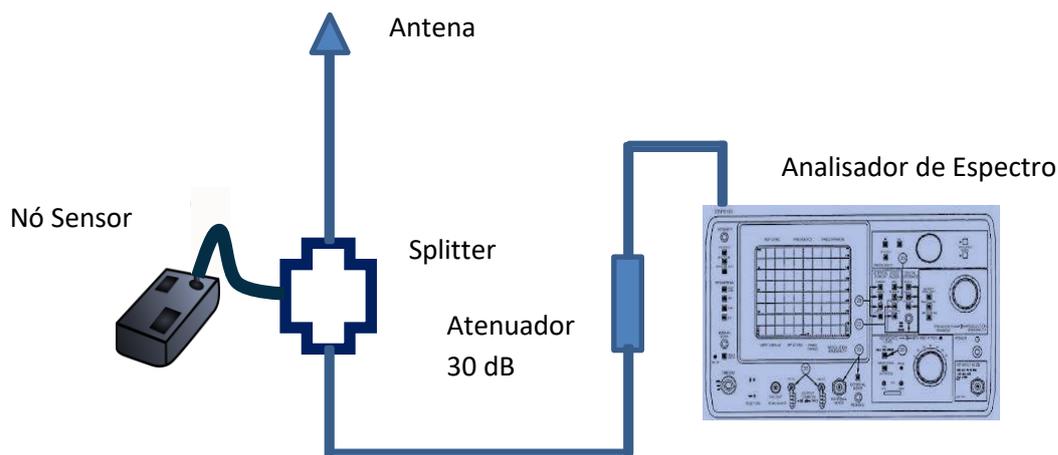


Figura 7 - Configuração dos Equipamentos Para Medição da Potência de Transmissão [Fig. Própria]

Para o cálculo da potência do sinal transmitido por cada módulo (Equação 3), adicionou-se a atenuação de 30 dB à leitura feita pelo analisador de espectro ( $P_{Lida_{dBm}}$ ) e subtraiu-se os ganhos das antenas no transmissor ( $G_{TX_{dB}}$ ) e no receptor ( $G_{RX_{dB}}$ ).

$$P_{TX_{dBm}} = P_{Lida_{dBm}} - G_{TX_{dB}} - G_{RX_{dB}} + 30dB \quad (3)$$

Os resultados das medições da potência de transmissão de cada módulo estão na Tabela III.

**Tabela III - POTÊNCIA DO SINAL NA TRANSMISSÃO [TAB. PRÓPRIA]**

Módulo	Potência Transmitida
Módulo 0 - Nó Sorvedouro	24.1 dBm
Módulo 1 - Nó Sensor 1	13.9 dBm
Módulo 2 - Nó Sensor 2	13.2 dBm
Módulo 3 - Nó Sensor 3	12.1dBm

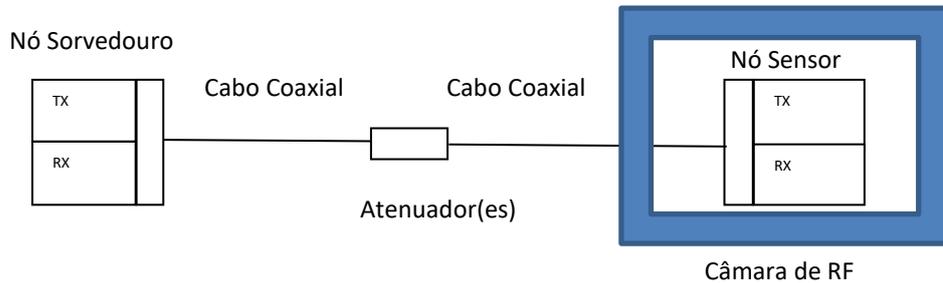
Os dados na Tabela III mostram que há variação na potência de transmissão dos módulos. Para a execução dos demais testes e medições, optou-se por utilizar o módulo com a maior potência no nó sorvedouro.

## 5.2 Medições do RSSI e PER

Cada módulo B990 foi testado em câmara de teste de RF blindada de forma a se obter resultados livres de interferências presentes no ambiente, EMI mínimo, e assim se aferir os resultados do RSSI e PER.

A comunicação sem fio entre o nó sorvedouro e cada um dos nós sensores foi emulada utilizando um cabo coaxial. Para evitar saturação, foram utilizados

atenuadores Mini-Circuit 15542 VAT-30+ de 30 dBm [33] entre os módulos no nó sorvedouro e nó sensor, como indicado na Figura 8.



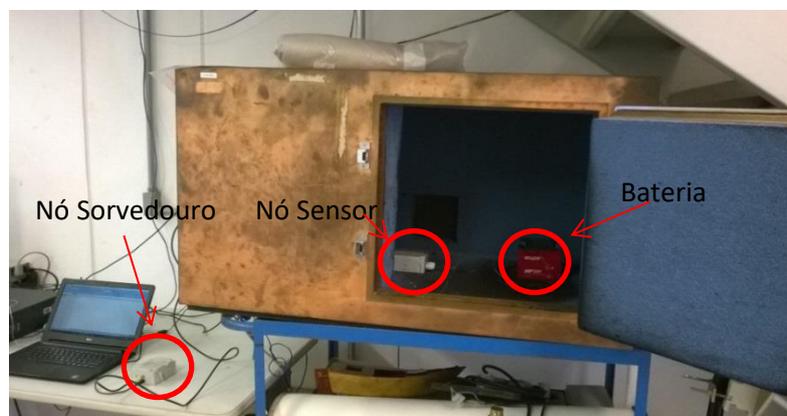
**Figura 8 - Diagrama da Bancada de Emulação de Rede Sem Fio [Fig. Própria]**

Cada módulo por vez foi posicionado dentro da câmara com dois atenuadores de 30 dB (60 dB) conectados na saída SMA, os atenuadores (Figura 9) foram então conectados, via cabo coaxial, à saída SMA do nó sorvedouro localizado fora da câmara blindada, como indicado na Figura 10.



**Figura 9 – Modelo dos Atenuadores Utilizados [Fig. Própria]**

Um total de sessenta pacotes, um por segundo, foi enviado do nó sorvedouro para cada um dos sensores e medições do RSSI e PER foram feitas.



**Figura 10 - Bancada de Emulação de Uma Rede Sem Fio [Fig. Própria]**

Decidiu-se por sessenta pacotes, porque esse valor foi suficiente para caracterizar a estabilidade do módulo.

Uma vez que todos os módulos haviam sido testados, uma nova série de testes utilizando três atenuadores de 30 dB (90 dB) foi feita.

Os resultados na Tabela IV mostram que os módulos nos três nós sensores estavam conformes, retornando valores semelhantes de RSSI e PER para ambos os cenários de atenuação. O maior desvio padrão, da ordem de 0.31 dB e a maior PER de somente 1.6%, aconteceram para o cenário de maior atenuação (90 dB), indicando uma boa estabilidade dos módulos. Concluiu-se então que os módulos podem ser considerados aferidos e podem ser utilizados nas medições de campo.

**Tabela IV - AFERIÇÃO DOS MÓDULOS [TAB. PRÓPRIA]**

Sensor	Média RSSI (60 dB atten.)	Desv. Pad. (dB)	PER (%)	Média RSSI (90 dB atten.)	Desv. Pad. (dB)	PER (%)
S1	- 42.50 dBm	0	0	- 70.50 dBm	0.31	0
S2	- 42.50 dBm	0.13	1.6	- 69.50 dBm	0.26	0
S3	- 42.00 dBm	0	0	- 69.00 dBm	0.26	1.6

### 5.3 Relação RSSI X PER

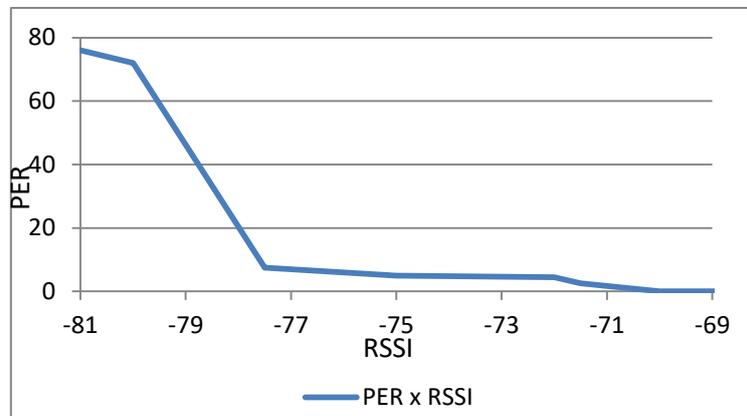
O experimento descrito no Item 5.2 foi estendido de forma a coletar informações que permitiram relacionar o nível do RSSI com a PER.

A atenuação foi gradativamente aumentada, diminuindo-se assim o nível do RSSI no nó sensor e consequentemente aumentando a PER de forma a se encontrar o nível do RSSI que corresponde a PER de referência de 5% sugerida por [18]. De forma a se garantir a confiabilidade dos resultados, cada teste foi executado três vezes com o envio de 200 pacotes. Os dados apresentados na Tabela V são as médias dos resultados das três series de testes.

**Tabela V - RSSI Média x PER [TAB. PRÓPRIA]**

<b>RSSI Média (dBm)</b>	<b>-26</b>	<b>-45</b>	<b>-52</b>	<b>-63</b>	<b>-69.5</b>	<b>-70</b>	<b>-71.5</b>	<b>-72</b>	<b>-75</b>	<b>-77.5</b>	<b>-80</b>	<b>-81</b>
<b>PER (%)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>4.5</b>	<b>5.0</b>	<b>12.5</b>	<b>38</b>	<b>76</b>
<b>RSSI Desv. Pad.</b>	<b>0.24</b>	<b>0.11</b>	<b>0.31</b>	<b>0.38</b>	<b>0.64</b>	<b>0.57</b>	<b>0.69</b>	<b>0.76</b>	<b>0.57</b>	<b>1.15</b>	<b>4.41</b>	<b>1.21</b>

O gráfico na Figura 11 com o nível da PER no eixo vertical e o RSSI em dBm no eixo horizontal mostra a relação entre as duas grandezas.



**Figura 11 - PER Média x RSSI Média [Fig. Própria]**

Os testes indicam que para a rede utilizada, a média máxima do RSSI antes que a PER média atinja 5%, é de -72 dBm.

#### **5.4 Cálculo do RSSI – Ambiente de Teste**

Uma vez determinada a intensidade do sinal transmitido por cada nó sensor, cálculos foram feitos para se determinar a potência recebida pelos nós sensores em dBm a 10 metros de distância do nó sorvedouro, e com isso aferir as medições de RSSI. Visto que os testes de campo foram efetuados em ambiente externo com linha de visada entre nó sorvedouro e nó sensor, como indicado na Figura 12, para os cálculos optou-se por utilizar o Modelo do Espaço Livre.



**Figura 12 - Esquema de Transmissão [Fig. Própria]**

No cálculo da atenuação utilizou-se a Equação 4, sendo  $d$  a distância entre transmissor e receptor,  $c$  a velocidade da luz e  $f$  a frequência.

$$L_{el} = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

Para  $d = 10$  e  $\lambda = c/f = 0.327\text{m}$ , a atenuação  $L_{el}$  foi de 51.70 dB.

Para o cálculo da potência do sinal recebido no sensor a 10 metros do nó sorvedouro, utilizamos a fórmula de Friis, considerando como zero o ganho das antenas de transmissão e recepção, como indicado na Equação 5.

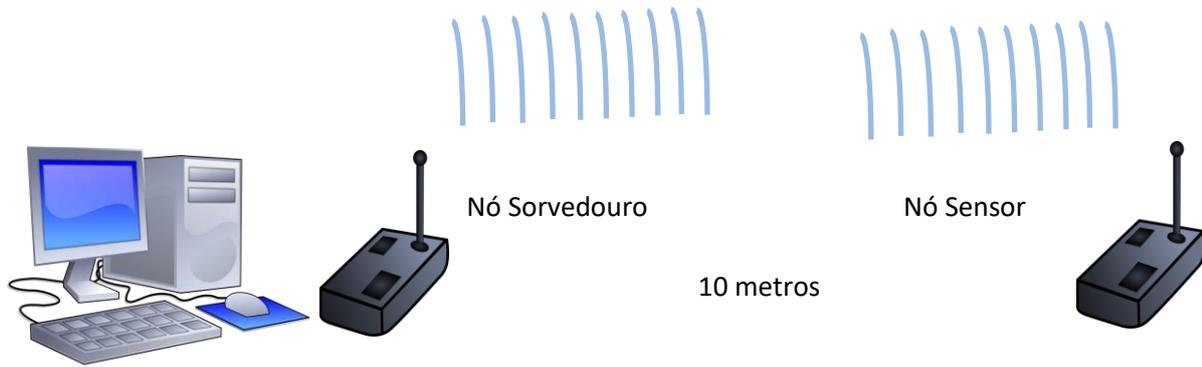
$$P_{RX_{dBm}} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dBi}} + G_{RX_{dBi}} - L_{EL_{dB}} \quad (5)$$

$$P_{RX_{dBm}} (\text{sensors}) = 24.1 + 0 + 0 - 51.70 = -27.60 \text{ dBm}$$

Na comunicação, a 10 metros de distância, entre o nó sorvedouro e cada sensor, a potência calculada do RSSI no sensor foi de -27.60 dBm.

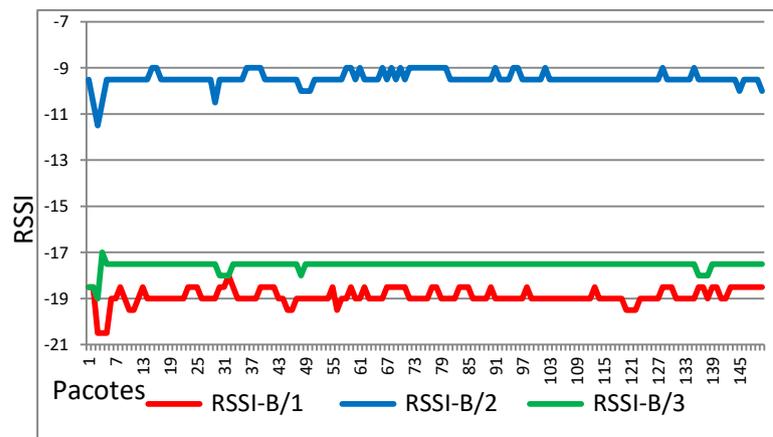
## 5.5 Medições do RSSI – Ambiente de Teste

Cada nó sensor foi testado de forma a se aferir as leituras de RSSI e LQI. Uma topologia ponto a ponto utilizando a plataforma Radiuino foi implantada. Para evitar interferências entre sensores, cada nó sensor foi testado separadamente em ambiente externo, com visada para o nó sorvedouro, a 10 metros de distância e a um metro e meio do solo, como indica a Figura 13.



**Figura 13 - Disposição dos Equipamentos [Fig. Própria]**

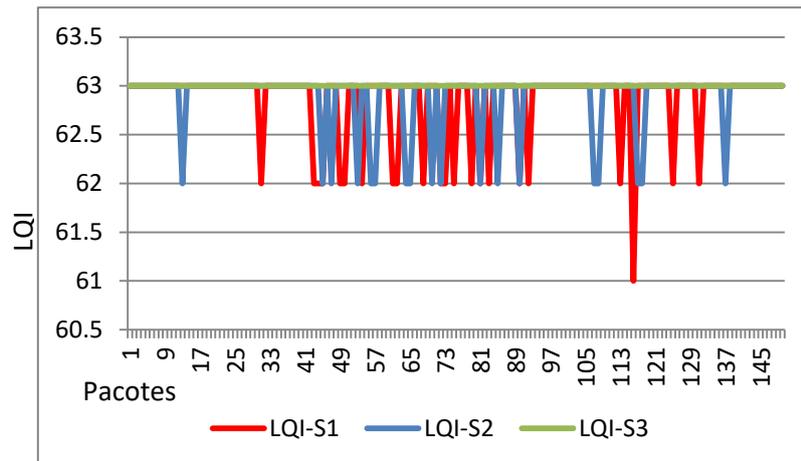
Do nó sorvedouro foram enviados 200 pacotes para cada nó sensor, leituras de RSSI e LQI foram tomadas a cada segundo. Optou-se por 200 pacotes pois, rapidamente, percebeu-se a estabilidade do sinal e a não necessidade de testes extensivos. O gráfico na Figura 14 traz os resultados das medições obtidas nos nós sensores 1, 2 e 3, com valores do RSSI em dBm no eixo vertical e número de pacotes no eixo horizontal.



**Figura 14 - RSSI Sensores 1,2 e 3 [Fig. Própria]**

Observa-se que os três nós sensores apresentam boa estabilidade com poucos picos ou depressões.

O gráfico na Figura 15 mostra os resultados das medições da LQI obtidas nos nós três sensores com valores do LQI no eixo vertical e número de pacotes no eixo horizontal.



**Figura 15 - LQI Sensores 1, 2 e 3 [Figura Própria]**

Quanto ao LQI, deve-se lembrar que este reflete a qualidade do sinal visto na recepção [32]. Observou-se que as medições apresentaram pouca variação, estando entre os valores de 61 e 63. No entanto não há indicação da relação do LQI com a distância, RSSI ou visada entre nós sensores e nó sorvedouro, confirmando a hipótese de [31] que o LQI não é um bom indicador da qualidade da comunicação e por isso não será considerado na estratégia a ser apresentada neste trabalho.

Os nós sensores apresentaram baixa perda de pacotes com a PER média medida variando entre 0.3 e 0.5 %.

A Tabela VI traz os resultados dos testes preliminares. As médias dos valores dos RSSIs medidos nos testes de aferição para todos os nós sensores ficaram abaixo dos valores calculados no Item 5.4 que foi de -27.60 dBm, indicando que o ambiente de teste não degradou o sinal tanto quanto esperado.

**Tabela VI - RESULTADOS DOS TESTES [TAB. PRÓPRIA]**

Sensor	Dist. Base Sensor (metros)	Prx (dBm) Calc.	Prx (dBm) Média Medida	Desv. Pad. (dBm)	LQI Média Medida	PER %
NS1	10	-27.60	-19.00	0.36	62.50	0.5
NS2	10	-27.60	-9.50	0.31	62.50	0.3
NS3	10	-27.60	-17.50	0.20	63.00	0.5

## 5.6 O Modelo LOG-Distance

Antes que as medições nas empresas fossem efetuadas, cálculos dos RSSI esperados para cada sensor foram feitos de forma a corroborar os resultados das medições de campo. Utilizou-se o modelo LOG-Distance que leva em consideração o tipo de ambiente, sendo que a potência recebida a uma distância  $d$  pode ser calculada usando-se o fator de atenuação  $\beta$  e a potência recebida medida a uma distância de referência  $d_0$  mais próxima do transmissor T. Nesse modelo, a potência do sinal recebido diminui logaritmicamente com a distância [25].

Para o cálculo, considera-se a atenuação do espaço livre entre o transmissor T e  $d_0$ . No entanto entre  $d_0$  e  $d$  considera-se que o sinal sofrerá uma atenuação conforme o *path loss*  $\beta$  [2]. A potência  $P_{rx}$  à distância  $d$  é obtida com a Equação 6.

$$P_{rx}(d) = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{log} \quad (6)$$

O fator  $\beta$ , Equação 7, representa o *path loss* e sua variação permite a caracterização dos diferentes tipos de ambientes [2].

$$\beta = \frac{P_{rx}(d_0) - P_{rx}(d)}{10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right)} \quad (7)$$

A Tabela VII mostra parâmetros que auxiliam na caracterização dos diferentes ambientes.

**Tabela VII - CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES [21]**

Ambiente		<i>Path Loss</i> - $\beta$
Externo	Espaço Livre	2
	Área Urbana Sombreada	2.7 a 5
Interno	Visada	1.6 a 1.8
	Sem Visada	4 a 6

A atenuação no modelo log-distance é obtida pela Equação 8.

$$L_{log} = 10 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)^2 + 10\beta \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (8)$$

Os resultados destes cálculos para as Empresas X e Y podem ser encontrados nas Tabelas VIII e IX nas páginas 46 e 50 respectivamente.

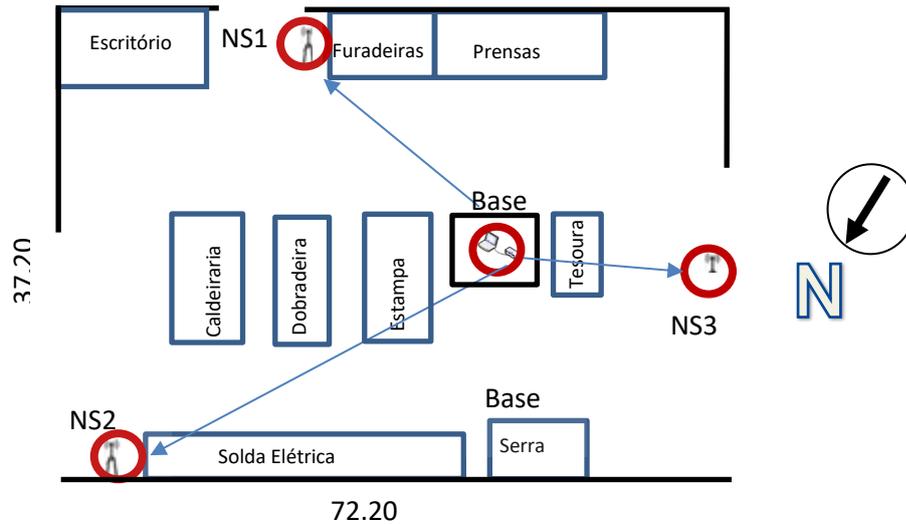
## 5.7 Medições em Campo

As medições em campo foram realizadas em duas fábricas que atuam em segmentos diferentes. A Empresa X atua no setor metalúrgico e a Empresa Y atua no setor cimenteiro. Em ambos os casos, uma rede utilizando a plataforma Radiuino com topologia ponto-multiponto foi montada com os nós sensores posicionados em diferentes áreas das plantas, a 1.5 metros do chão, com medições de RSSI e PER tomadas a cada segundo durante o período de cinco horas e dez minutos consecutivos no caso da Empresa X e durante dois dias consecutivos no caso da Empresa Y, abrangendo períodos de trabalho e descanso. Como indicado anteriormente, quando da implantação das redes, foi garantido que o RSSI em cada sensor estivesse acima do valor mínimo de -72 dBm para que a PER não ultrapassa-se o valor de referência  $V_r$  de 5%.

### 5.7.1 Medições na Empresa X

As áreas executam processos diferentes sendo o nó sensor 1 posicionado próximo a área de furadeiras, o nó sensor 2 próximo a área de solda e o nó sensor 3 próximo a área de estampagem, como indicado na Figura 16.

Os dados foram coletados no dia 17/11/2015 entre as 10h49min e 16h00min, quando 2999 pacotes foram enviados do nó sorvedouro para cada um dos três nós sensores.



**Figura 16 - Planta Baixa Empresa X [Fig. Própria]**

Embora houvesse visada entre os dispositivos, o ambiente interno com área plana de 2685 m<sup>2</sup> possuía obstáculos como maquinário pesado, prensas, máquinas de solda elétrica e um grande número de trabalhadores e equipamentos móveis, como empilhadeiras, transitando entre o nó sorvedouro e os nós sensores, como indicado na Figura 17.



**Figura 17 - Vista Longitudinal da Empresa X [Fig. Própria]**

### 5.7.2 Medições na Empresa Y

Na Empresa Y, Figura 18, os principais processos são os de solda, efetuados nas áreas onde foram instalados os nós sensores 1 e 2 (Figura 19) e preenchimento dos moldes que são executados na área onde o nó sensor 3 foi instalado, como indicado na Figura 20. As medições foram feitas por 8 horas consecutivas nos dias 29 e 30 de junho de 2016 entre as 09h05min e 17h00min com o envio de aprox. 7000 pacotes por dia para cada um dos três nós sensores. A Empresa Y tem área fabril plana de 5800 m<sup>2</sup> com obstáculos físicos, tráfego de pessoal e uma grande utilização de pontes rolantes.

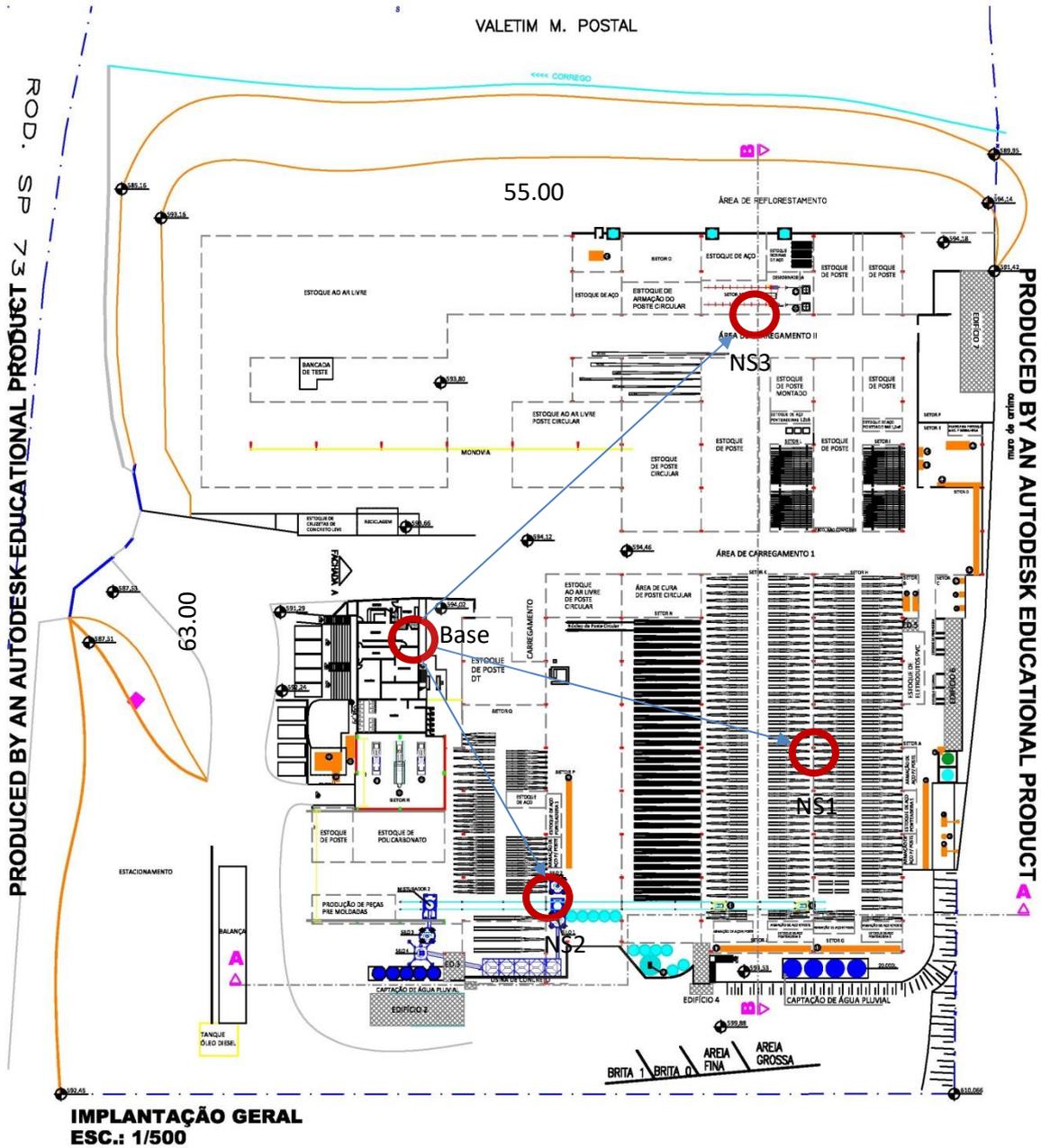


**Figura 18 - Vista Aérea da Empresa Y**



**Figura 19 - Senrssores 1 e 2 [Fig. Própria]**

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



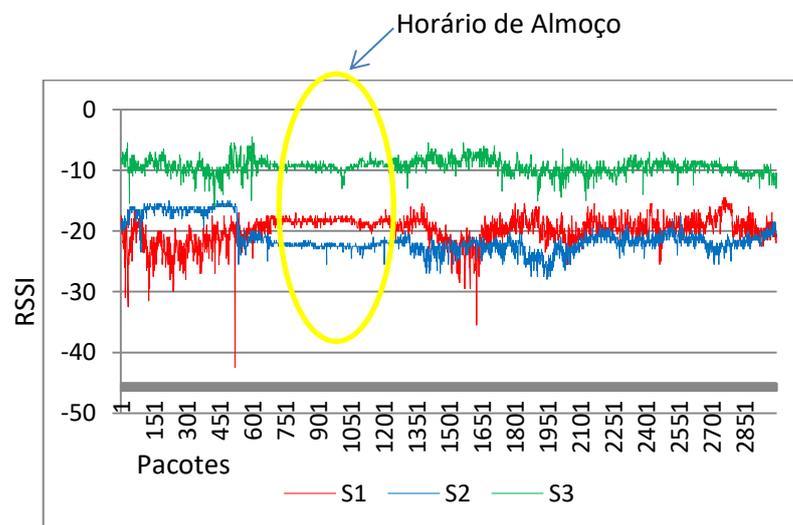
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Figura 20 - Planta Baixa Empresa Y

## 6 RESULTADOS DOS TESTES

### 6.1 Empresa X

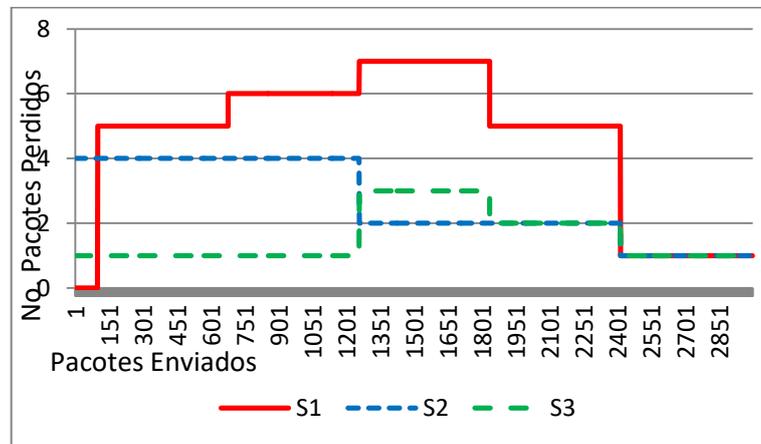
De modo geral, os resultados mostraram pouca variação do RSSI. O gráfico na Figura 21 mostra a variação do RSSI com valores em dBm no eixo vertical e número de pacotes no eixo horizontal para os três sensores, enquanto a Figura 22 traz o gráfico com a variação da PER por hora, com o número de pacotes perdidos por hora no eixo vertical e número de pacotes no eixo horizontal. Os gráficos confirmam a correlação entre o RSSI e PER visto que a maior PER por hora, obtida com o sensor 1, aconteceu em torno da leitura 1510 exatamente quando o RSSI apresentou a maior oscilação. Os gráficos também indicam a relação da RSSI com a distância e visada entre nós sensores e nó sorvedouro, observando-se que quanto mais distante do nó sorvedouro o nó sensor foi instalado, menor foi a média do RSSI, como pode também ser visto na Tabela VIII. Nos testes, havia visada entre os nós sensores e o nó sorvedouro.



**Figura 21 - RSSI Sensores 1,2 e 3 [Fig. Própria]**

O gráfico também confirma que os processos industriais utilizados afetam a intensidade do sinal, caracterizando o EMC, pois o sinal apresentou maior estabilidade entre as medições 680 e 1260, que corresponde exatamente ao período entre 12h00min e 13h00min, horário de almoço, período quando cessam

todos os processos na fábrica. O efeito pode ainda ser agravado devido aos cabos de alimentação e circuitos internos dos nós sensores.



**Figura 22 - PER por Hora Sensores 1, 2 e 3 [Fig. Própria]**

Os resultados dos cálculos e das medições feitas na Empresa X estão resumidos na Tabela VIII.

**Tabela VIII - CÁLCULOS E MEDIÇÕES EMPRESA X [TAB. PRÓPRIA]**

Sensor	S1	S2	S3
Visada	Sim	Sim	Sim
Distância Base Sensor (m)	35	56	19
RSSI Calculado (dBm)	-26.29	-29.56	-22.05
RSSI Média Medida (dBm)	-19.50	-22.00	-9.50
<i>Path Loss</i> ( $\beta$ )	0.09	1.67	-2.87
PER Média%	0.83	0.43	0.26
RSSI Desvio Padrão (dBm)	0.895	0.341	0.491

Para o RSSI calculado em cada sensor, utilizou-se como referência o *path loss*  $\beta = 1.6$  que caracteriza um espaço interno com visada.

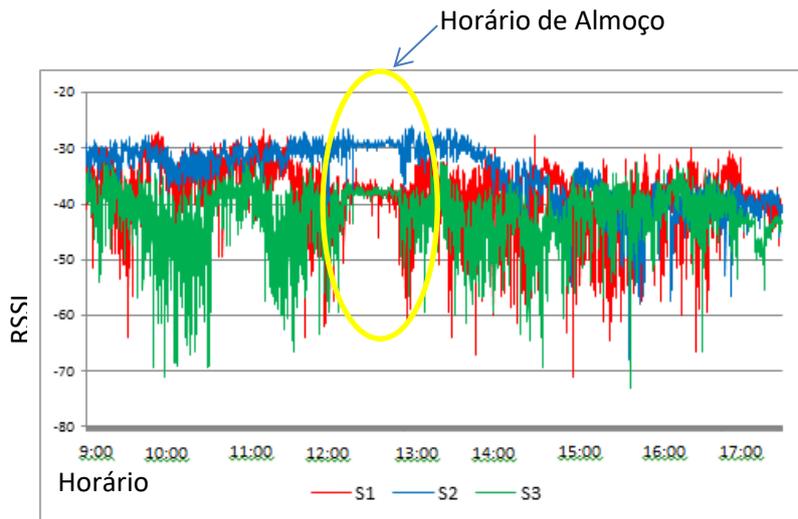
Todos os sensores apresentaram valores de RSSI acima dos valores calculados, indicando que o sinal não se degradou tanto quanto esperado.

Observou-se um efeito interessante em que o *path loss* para os sensores 1 e 3 foi zero e negativo, respectivamente, caracterizando um reforço no sinal, causado por efeito físico presente, provavelmente proximidade a uma parede, no entanto esta investigação não fez parte do escopo deste estudo. O *path loss* para o nó sensor 2 apresentou valores condizentes com os valores de referência apresentados na Tabela VII para um ambiente interno com visada, tipicamente entre 1.60 e 1.80.

A PER máxima por hora em todos os sensores, ficou muito abaixo do valor de referência  $V_r$  de 5% sugerido por [18]. O Sensor 1 apresentou a maior PER e o maior desvio padrão, o que pode ser explicado por sua localização distante do nó sorvedouro e junto a uma área muito movimentada. O nó sensor 2, posicionado o mais distante do nó sorvedouro, apresentou o menor desvio padrão mas, como esperado, o maior *path loss* e o menor RSSI, sugerindo obstruções, o que pode ser explicado por sua localização distante do nó sorvedouro mas em uma área com pouca atividade e menor circulação de pessoas. O nó sensor 3, por sua proximidade ao nó sorvedouro apresentou a menor PER e o maior valor médio de RSSI dentre os resultados.

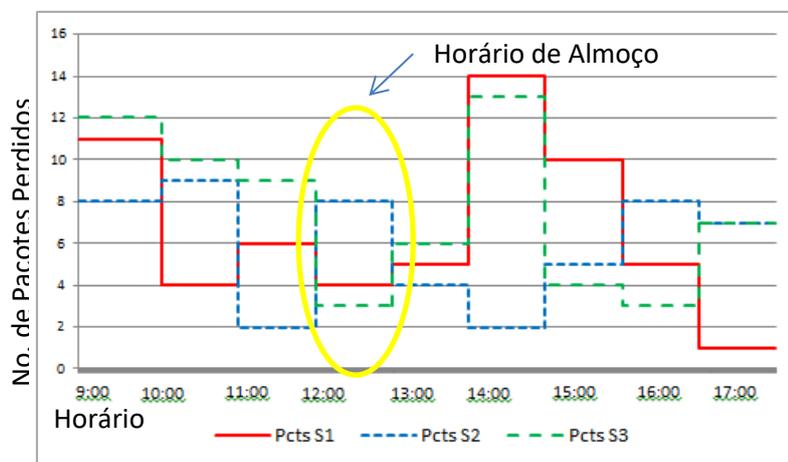
## 6.2 Empresa Y

O gráfico na Figura 23 mostra a variação do RSSI ao longo do dia 29 de junho com os valores do RSSI em dBm no eixo vertical e horário no eixo horizontal enquanto a Figura 24 traz a variação da PER, com o número de pacotes perdidos por hora no eixo vertical e horário no eixo horizontal. Os gráficos também confirmam a relação entre o RSSI e PER visto que a maior PER por hora, obtida com o nó sensor 1, aconteceu entre as 14h00min e 15h00min período quando o RSSI apresentou maior oscilação. Mais uma vez, o gráfico mostra a relação entre os processos industriais a EMC e a variação da intensidade do sinal, sendo que o sinal nos três sensores se estabilizou durante o horário de almoço, entre 12h00min e 13h00min, período quando todos os processos da planta cessam.



**Figura 23 - RSSI Sensores 1, 2 e 3 no Dia 29 de Junho [Fig. Própria]**

Também se confirmou a relação entre o RSSI e a distância entre o nó sorvedouro e os nós sensores, visto que quanto mais distante do nó sorvedouro o nó sensor foi instalado, menor foi a média do RSSI. Não havia visada entre o nó sorvedouro e os nós sensores.

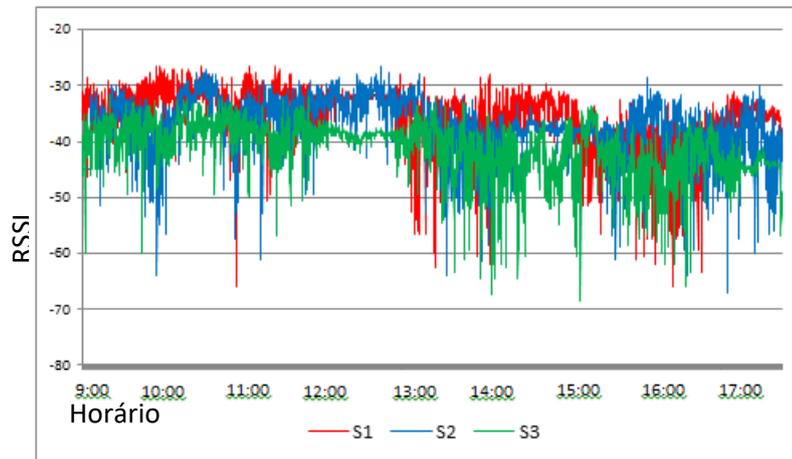


**Figura 24 - PER por Hora Sensores 1, 2 e 3 no Dia 29 de Junho [Fig. Própria]**

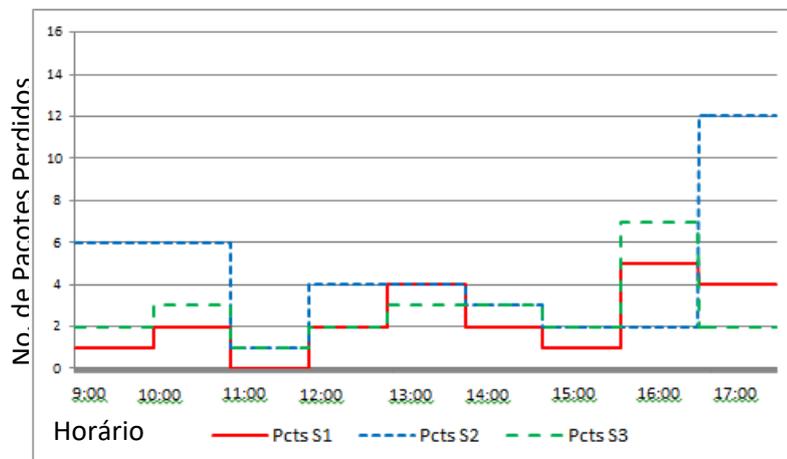
A maior PER por hora, de 1.7%, foi observada no nó sensor 1 e a menor, de 0.3%, foi medida no nó sensor 3, considerando-se que o valor de referência  $V_r$  sugerido por [18] é de 5%. É interessante notar que a PER nos nós sensores 1 e 3 apresentou seus mínimos valores durante o horário do almoço, entre 12:00 e 13:00 horas.

Os resultados do dia 30 de junho espelharam os do dia anterior. O gráfico na Figura 25 traz o comportamento do RSSI para cada um dos sensores durante o dia com os valores em dBm no eixo vertical e o horário no eixo horizontal e o gráfico na Figura 26 mostra a PER por hora para cada sensor com o número de pacotes perdidos no eixo vertical e o horário no eixo horizontal.

Embora a PER nos três sensores tenha sido baixa, se comparada com o valor de referência  $V_r$  de 5% sugerido por [18], com máximo de 1.5% no nó sensor 2, os dados novamente confirmam a relação entre a estabilidade do RSSI e a PER, com o maior valor da PER para o nó sensor 3 acontecendo em torno das 16h00min justamente quando o RSSI naquele sensor apresentou maior variação.



**Figura 25 - RSSI Sensores 1, 2 e 3 no Dia 30 de Junho [Fig. Própria]**



**Figura 26 - PER por Hora Sensores 1, 2 e 3 no Dia 30 de Junho [Fig. Própria]**

Os valores de *path loss* medidos foram inferiores aos esperados para um ambiente interno sem visada. Em ambos os dias, todos os sensores apresentaram valores de RSSI acima dos valores calculados, indicando que o sinal não se degradou tanto quanto esperado. Os resultados dos cálculos e das medições feitas em ambos os dias na Empresa Y estão resumidos nas Tabelas IX, X e XI. Para o RSSI calculado em cada sensor, utilizou-se como referência o *path loss*  $\beta = 4$  que caracteriza um ambiente interno sem visada.

**Tabela IX - PARAMETROS DOS SENSORES [TAB. PRÓPRIA]**

Sensor	S1	S2	S3
Visada	Não	Não	Não
Dist. Base Sensor (m)	49	42	55
RSSI Calculado (dBm)	-45.20	-42.52	-47.20

**Tabela X - MEDIÇÕES EMPRESA Y - DIA 29 JUNHO [TAB. PRÓPRIA]**

Sensor	S1	S2	S3
RSSI Média Medida (dBm)	-38.00	-32.50	-41.50
<i>Path Loss</i> ( $\beta$ ) Medido	2.75	3.69	3.24
Max. PER por Hora (%)	1.7	1.5	0.3
Desvio Padrão do RSSI (dBm)	5.31	5.07	4.88

**Tabela XI - MEDIÇÕES EMPRESA Y - DIA 30 JUNHO [TAB. PRÓPRIA]**

Sensor	S1	S2	S3
RSSI Média Medida (dBm)	-34.50	-37.00	-40.00
<i>Path Loss</i> ( $\beta$ ) Medido	2.24	4.41	3.03
Max. PER por Hora (%)	0.8	1.5	1.3
Desvio Padrão do RSSI (dBm)	5.23	5.09	4.67

As tabelas mais uma vez confirmam a relação entre o RSSI e a distância entre o nó sorvedouro e o nó sensor, visto que a média do RSSI tende a cair com o aumento da distância entre estes. Percebe-se também que as médias dos RSSI variam de dia para dia, o que é explicado pelas obstruções físicas que cada dia apresentou, como caminhões estacionados na linha entre o nó sorvedouro e nós sensores.

O nó sensor 1 consistentemente apresentou o menor *path loss*, mas também o maior desvio padrão combinado para os dois dias, o que pode ser explicado pelo fato de, embora este não fosse o sensor mais distante do nó sorvedouro, este foi instalado no centro da área de manufatura, área com grande circulação de trabalhadores, grande quantidade de máquinas e fluxo de pontes rolantes.

O nó sensor 2 apresentou a maior média do RSSI, provavelmente porque o sensor foi posicionado o mais próximo do nó sorvedouro, em uma área de preparação com menor fluxo de pessoas, veículos e pontes rolantes, se comparado com os outros nós sensores.

O nó sensor 3 apresentou o mais baixo RSSI combinado, o que é explicado pelo fato deste nó sensor ter sido instalado o mais distante do nó sorvedouro.

### **6.3 Análise dos Resultados**

Os resultados obtidos com as medições de campo indicam a viabilidade da automação dos processos Classe 3 (Controle Aberto com participação Humana) propostos, conforme a Tabela I, no caso da Empresa X, a monitoração e controle da produção das máquinas e da temperatura ambiente e no caso da Empresa Y, a monitoração do volume de água nos reservatórios e a monitoração e controle da temperatura dos motores elétricos das pontes.

No cenário da Empresa X, todos os sensores apresentaram boa estabilidade do sinal com valores de RSSI acima dos valores calculados, com valor mínimo de -22.00 dBm, indicando que o sinal não se degradou tanto quanto

esperado, máximo desvio padrão de 0.895 dBm e PER tipicamente abaixo de 0.9%, consideravelmente abaixo do valor de referência  $V_r$  de 5%, confirmando assim que os processos Classe 3 propostos poderiam perfeitamente ser monitorados e controlados com o uso de uma RSSF.

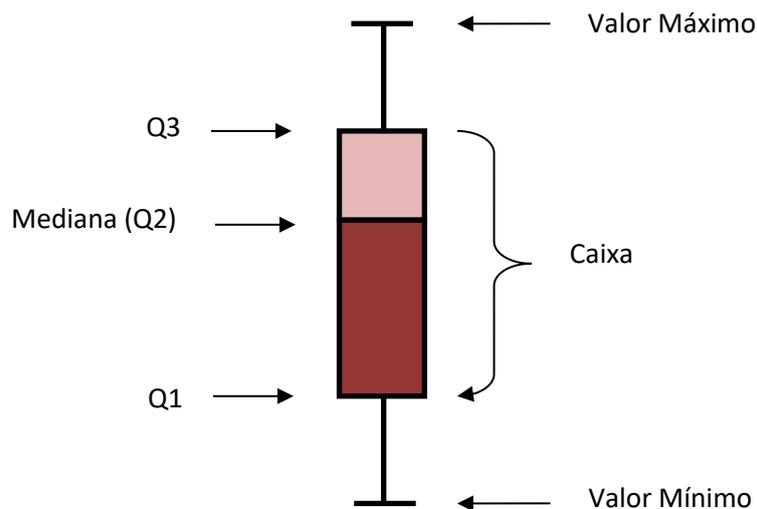
No contexto da Empresa Y, o RSSI mínimo medido foi de -41.50 dBm, com valores de RSSI em todos os sensores acima dos valores calculados, indicando que o sinal também não se degradou tanto quanto esperado, com maior desvio padrão na ordem de 5.31 dBm, valores de *path loss* inferiores aos esperados de um ambiente interno sem visada e PER máxima por hora de 1.7%, novamente bem abaixo dos 5% sugeridos por [18]. Neste caso também se confirma a viabilidade da proposta de monitoração e controle dos processos, pois estes se enquadram na Classe 3 não críticos e não demandam altas taxas de transferência de dados.

## 7 GERÊNCIA

### 7.1 Estratégia com Índices Zr e Zt

Em [21] uma técnica baseada no diagrama de fio de bigode (*Box Plot Diagram*) é proposta. Nesta técnica, os dados são divididos em cinco grupos, mínimo (Vmin), primeiro quartil (Q1), mediana, terceiro quartil (Q3) e máximo (Vmax). Os valores extremos e discrepantes se concentram entre o Vmin e Q1 e entre Q3 e Vmax.

O diagrama na Figura 27 representa a distribuição das amostras dentro de um conjunto.



**Figura 27 - Diagrama do Box Plot [Fig. Própria]**

Foi identificada a escassez de soluções de sumarização de baixa complexidade que possam ser utilizadas por operadores não técnicos. Neste trabalho apresentamos uma tratativa de gerência que utiliza uma métrica básica fornecida pelo BE990 que é o RSSI. A estratégia inclui dois índices, ambos gerados em tempo real; um estima a tendência do RSSI e permite o mapeamento da posição da amostra no conjunto e seu valor, e o outro compara o RSSI atual a um valor de referência pré-configurado.

Estes índices também são baseados no *Box Plot* e por isso apresentam benefícios como a baixa complexidade dos cálculos necessários para sua

obtenção, podendo assim ser considerados como *running statistics*; estatísticas geradas em tempo real utilizadas pela gerência de desempenho para instruir a gerência de configuração em ações de reconfiguração, garantindo assim sua fácil implementação em sistemas supervisórios como o ScadaBR. Estes sistemas coletam dados de sensores remotos para o monitoramento e controle de equipamentos e do meio.

Índices auxiliam o trabalho de monitoração visto que produzem a comparação de um estado atual com um estado passado ou pré-definido, permitindo a visualização da posição da amostra dentro de um conjunto [21].

De forma a avaliar a tendência do RSSI e tomando-se como base a dispersão do sinal, propõe-se o índice ( $Z_r$ ) composto pela razão entre a média (móvel) dos valores do RSSI em uma grande (configurável) janela deslizante em tempo ( $Z_b$ ) expressa pela Equação 9, e a média (móvel) dos valores do RSSI em uma pequena (configurável) janela deslizante em tempo ( $Z_s$ ) expressa pela Equação 10, que pode também ser entendida como a média histórica.

$$Z_b = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m} \quad (9)$$

$$Z_s = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (10)$$

Sendo  $m > n$ .

O índice  $Z_r$  expresso pela Equação 11 indica o quanto  $Z_s$  se afasta da média histórica  $Z_b$  indicando a dispersão e, mais importante, a tendência do RSSI com a vantagem de retornar valores próximos a 1. O índice é independente da intensidade do sinal em que o nó sensor opera. Esta característica permite sua fácil implementação no monitoramento de nós sensores sem fio visto que, por serem posicionados em áreas diferentes, tendem a apresentar níveis de RSSI diferentes.

O índice  $Z_r$  tenderá a 1 à medida que  $Z_s$  se aproximar de  $Z_b$ .

$$Z_r = Z_b / Z_s \quad (11)$$

O segundo índice,  $Z_t$ , expresso pela Equação 12 rastreia o valor de  $Z_s$  em relação a um valor de referência relacionado a um patamar da PER e tende a 1 à medida que  $Z_s$  se aproxima do valor de referência. Este índice é dependente da intensidade do sinal em que o nó sensor opera.

$$Z_t = V_r / Z_s \quad (12)$$

A observação dos dois índices permite ao responsável pela rede uma visão clara da corrente situação dos nós sensores com relação à RSSI e conseqüentemente à PER.

## 7.2 Teste da Estratégia

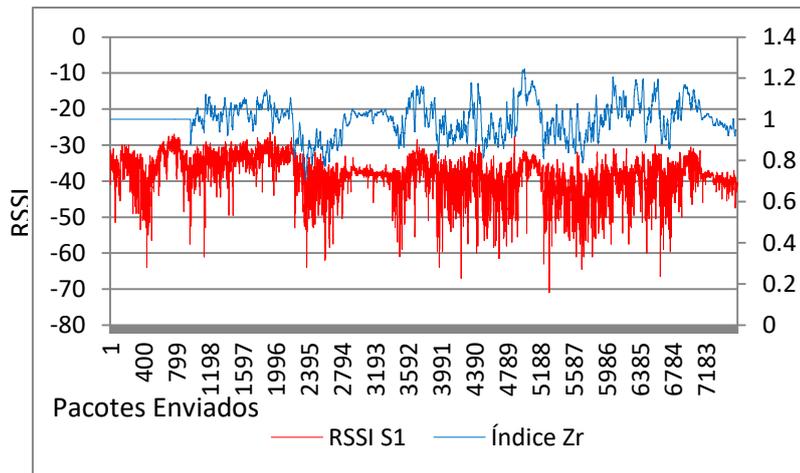
Como indicado anteriormente, o índice  $Z_r$  é independente do nível do RSSI em que o nó sensor opera, podendo ser aplicado a qualquer rede operando com qualquer nível de RSSI. O índice  $Z_r$  rastreia a variação do RSSI entre a grande e a pequena janela deslizante no tempo, e por essa razão, para a aplicação da estratégia, considera-se que a rede opera com um nível do sinal apropriado para cada nó sensor, estando o RSSI necessariamente acima do valor de referência  $V_r$ .

O índice  $Z_t$  é dependente do nível do RSSI em que o sensor opera, visto que sua função é indicar o quanto o sinal se aproxima do valor de referência  $V_r$ , sendo que cabe a gerência de configuração o *setup* inicial deste nível.

Para os testes preliminares com os índices, utilizaram-se os dados obtidos com o nó sensor 1 nas medições feitas na indústria Y no dia 29 de junho de 2016, claramente o cenário mais instável encontrado, mapeando a variação do RSSI com o aumento da PER.

Destes dados, os índices  $Z_r$  e  $Z_t$  foram extraídos e comparados com o comportamento do RSSI. A janela deslizante utilizada para  $Z_b$  foi de 60 minutos e para  $Z_s$  foi de 1 minuto. Estes valores foram escolhidos após outras combinações de valores terem retornado índices com pouca representatividade. Como estabelecido no Item 5.3, o valor de referência  $V_r$  foi de -72 dBm.

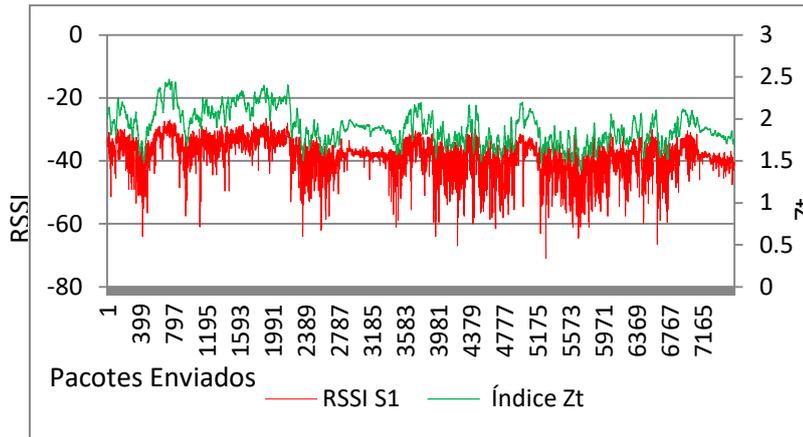
Para validação dos resultados, optou-se por uma comparação gráfica entre a variação do RSSI e  $Z_r$ , RSSI e  $Z_t$  e  $Z_r$  e PER. A Figura 28 mostra o RSSI com valores em dBm no eixo vertical primário, o índice  $Z_r$  com valores no eixo vertical secundário e o número de pacotes no eixo horizontal.



**Figura 28 - Índice  $Z_r$  x RSSI - Dia 29 de Junho [Fig. Própria]**

Observa-se que o índice  $Z_r$  apresenta o valor 1 até aproximadamente o pacote 900, o que equivale aos 60 minutos necessários para que  $Z_b$  seja estabelecido. A partir desse momento, o índice segue a variação do RSSI; no entanto percebe-se que este é centrado no valor 1 e diferencia-se do RSSI pelo fato deste considerar as médias dos valores dos últimos 1 e 60 minutos, o que dilui o impacto das amostras com valores extremos e discrepantes.

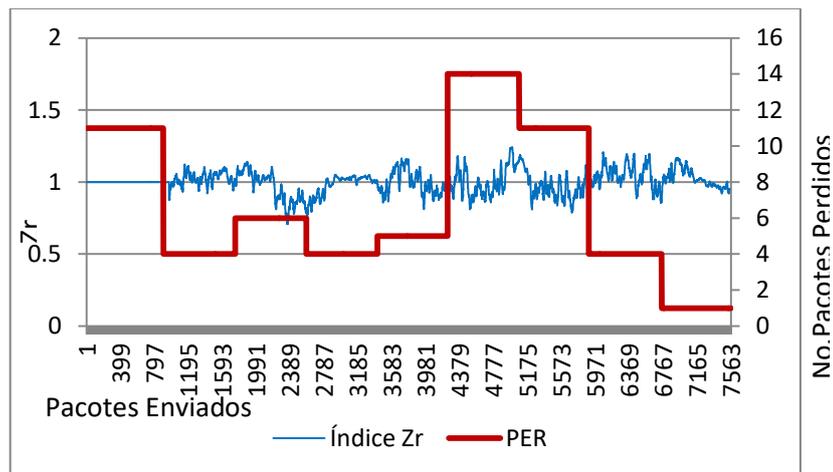
O gráfico na Figura 29 mostra o RSSI com valores em dBm no eixo vertical primário, o índice  $Z_t$  com valores no eixo vertical secundário e o número de pacotes no eixo horizontal. O índice  $Z_t$  rastreou a variação do RSSI com relação ao valor de referência  $V_r$  de -72 dBm que não foi atingido, pois o RSSI oscilou somente entre -26.5 dBm e -71 dBm; lembrando que cada 3 dBm de queda do RSSI corresponde a redução da potência pela metade.



**Figura 29 - Índice Zt x RSSI - Dia 29 de Junho [Fig. Própria]**

O índice Zt funciona como um alarme que é disparado toda vez que o RSSI atinge o valor de referência, sendo que sua permanência nesse ou abaixo desse patamar indica o aumento da PER.

A Figura 30 apresenta o índice Zr com valores no eixo vertical primário e a PER com valores no eixo vertical secundário e o número de pacotes no eixo horizontal. Observando-se os gráficos percebe-se que a PER, embora tenha sido muito baixa, ainda assim apresentou alta nos momentos em que o índice Zr estava abaixo de 1, ou seja, nos momentos quando o RSSI se encontrava abaixo da média histórica.



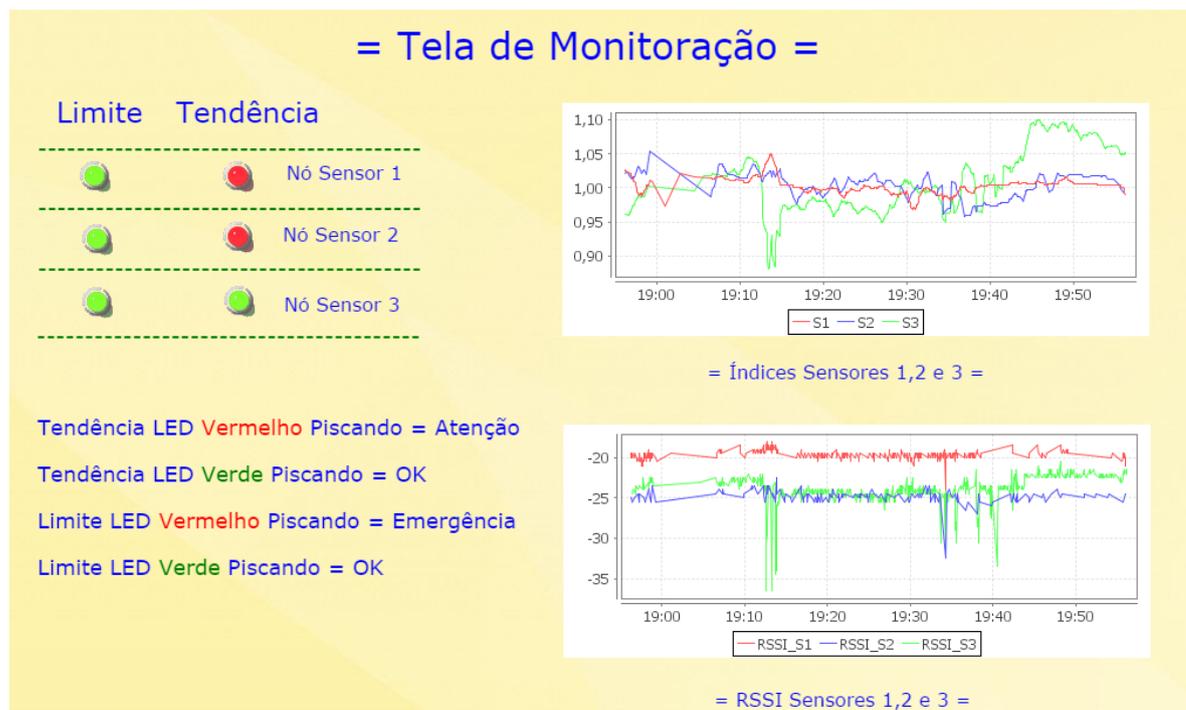
**Figura 30 - Índice Zr x PER por Hora - Dia 29 de Junho [Fig. Própria]**

Observando-se os resultados apresentados, confirma-se a robustez dos índices Zr e Zt e sua aplicabilidade pela gestão de desempenho.

### 7.3 Implementação da Estratégia em Sistema Supervisório

Para a implementação da proposta de gerência em sistema supervisório, foi utilizada uma bancada com uma RCSSF com três sensores, propriamente configurada, com as médias do RSSI acima do valor de referência  $V_r$  estabelecido no item 5.1 ( $RSSI > -72$  dBm). O sistema supervisório utilizado foi o ScadaBR que foi configurado para coletar os dados de RSSI de descida (*downlink*) de cada nó sensor, calcular  $Z_s$  para o último minuto e  $Z_b$  para os últimos 60 minutos. Como indicado anteriormente, a razão  $Z_b/Z_s$  produz o índice  $Z_r$  e a razão  $V_r/Z_s$  produz o índice  $Z_t$ .

Na Figura 31 observa-se a tela do ScadaBR com os gráficos obtidos com os sensores 1, 2 e 3. O gráfico superior à direita mostra a variação do índice  $Z_r$  para cada sensor e o inferior traz a variação do RSSI. À esquerda, veem-se as luzes de Limite que piscam na cor verde enquanto o índice  $Z_t$  está acima do valor de referência  $V_r$  e vermelho quando este o alcança ou está abaixo, e as luzes de Tendência que indicam a posição do índice  $Z_r$ , sendo verde enquanto acima de 1 ou vermelho quando abaixo. Em benefício da simplicidade da tela, optou-se pela não apresentação de gráficos com a variação do índice  $Z_t$ .



**Figura 31 - Tela do Supervisório ScadaBR [Fig. Própria]**

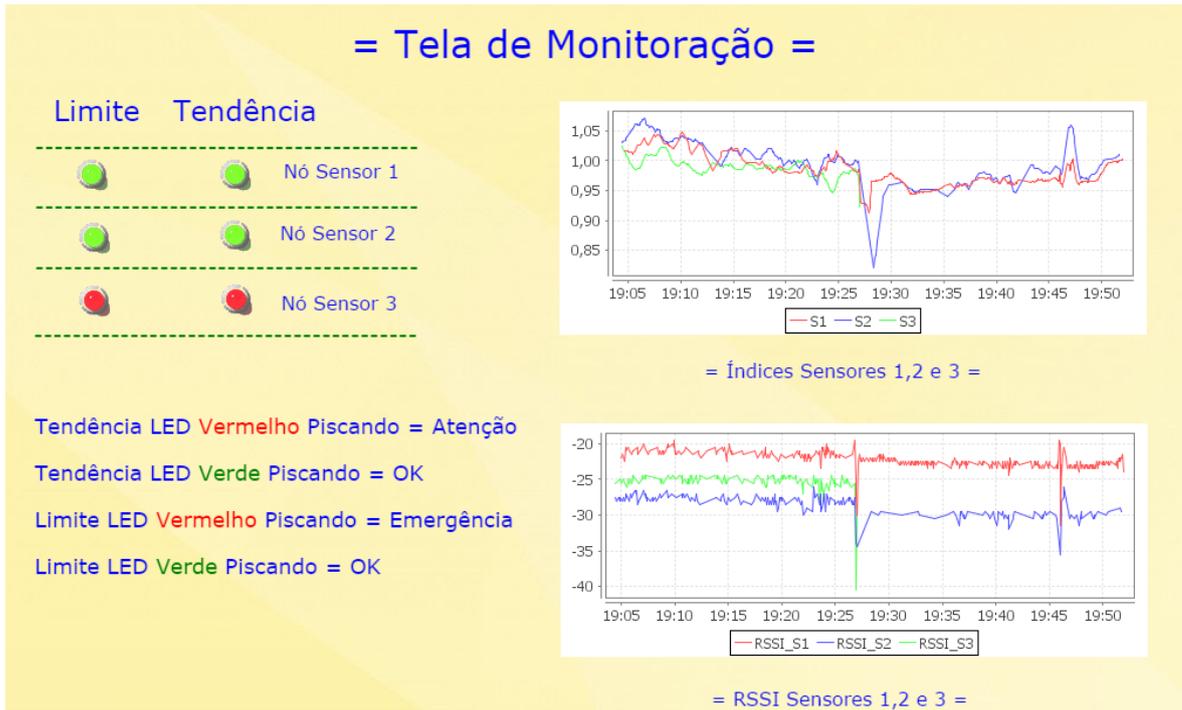
Vê-se na tela do supervisor que os LEDs de Tendência dos nós sensores 1 e 2 estão acesos em vermelho indicando que, no momento, o RSSI nestes dois sensores apresenta tendência de queda, o que pode ser confirmado no gráfico “Índices Sensores 1,2 e 3” onde a linha de tendência dos sensores 1 e 2 (linhas vermelha e azul) estão abaixo de 1.

A monitoração via sistema supervisor permite a construção de uma interface gráfica em que diferentes níveis de informação podem ser apresentados contemplando níveis diferentes de conhecimento. Na Figura 32 o gráfico intitulado “RSSI Sensores 1,2 e 3” traz informações que serão apreciadas por pessoa tecnicamente apta, como gerente da rede enquanto o gráfico intitulado “Índices Sensores 1, 2 e 3” será de grande valia a pessoa interessada na rede mas não necessariamente técnica, como gerente de produção. A informação mais concisa está à esquerda no *dashboard*, com os LEDs de Limite e Tendência que tem como função alertar uma pessoa não interessada na rede mas dependente dela, como um operador.

#### **7.4 Testes da Estratégia em Sistema Supervisor**

De forma a validar a utilização da estratégia com índices, estendemos a utilização da bancada usada do item 7.3 para a execução dos testes. Foram efetuados testes introduzindo situações de utilização não esperadas. Estes testes foram uteis para revelar possíveis problemas com o supervisor, como erros de comportamento e desempenho, erros de iniciação e término e erros de interface.

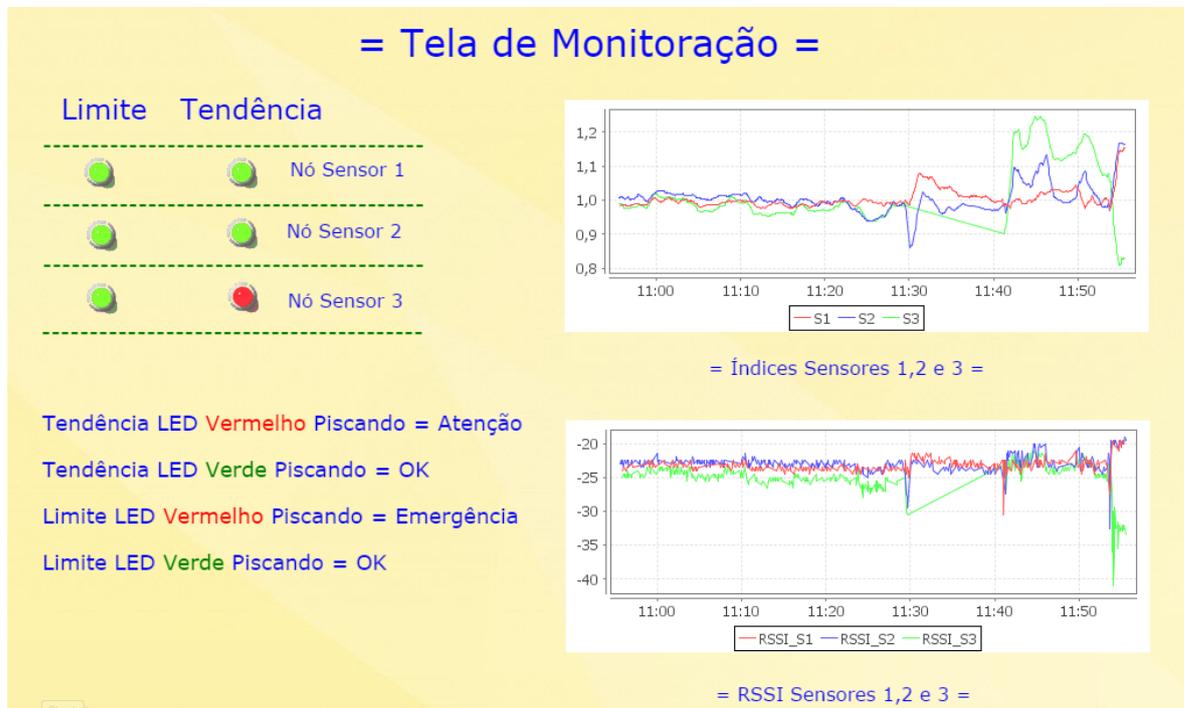
O primeiro teste, Figura 32, foi realizado de forma a se averiguar qual seria o comportamento do supervisor no caso de indisponibilidade ou trava de um dos nós sensores. A rede foi iniciada e foram observados os 60 minutos necessários para que Zb fosse estabelecido. Em seguida, o sensor 3 foi propositalmente desligado de forma a simular a indisponibilidade do mesmo.



**Figura 32 - Tela do Supervisório ScadaBR - Teste 1 [Fig. Própria]**

Observa-se que imediatamente os LEDs indicativos de Limite e Tendência do nó sensor 3 se acendem em vermelho e nos gráficos “Índices Sensores 1,2 e 3” e “RSSI Sensores 1,2 e 3” as linhas de tendência do sensor (linhas verdes) desaparecem. Conclui-se assim que a estratégia no supervisório apresentou o comportamento esperado.

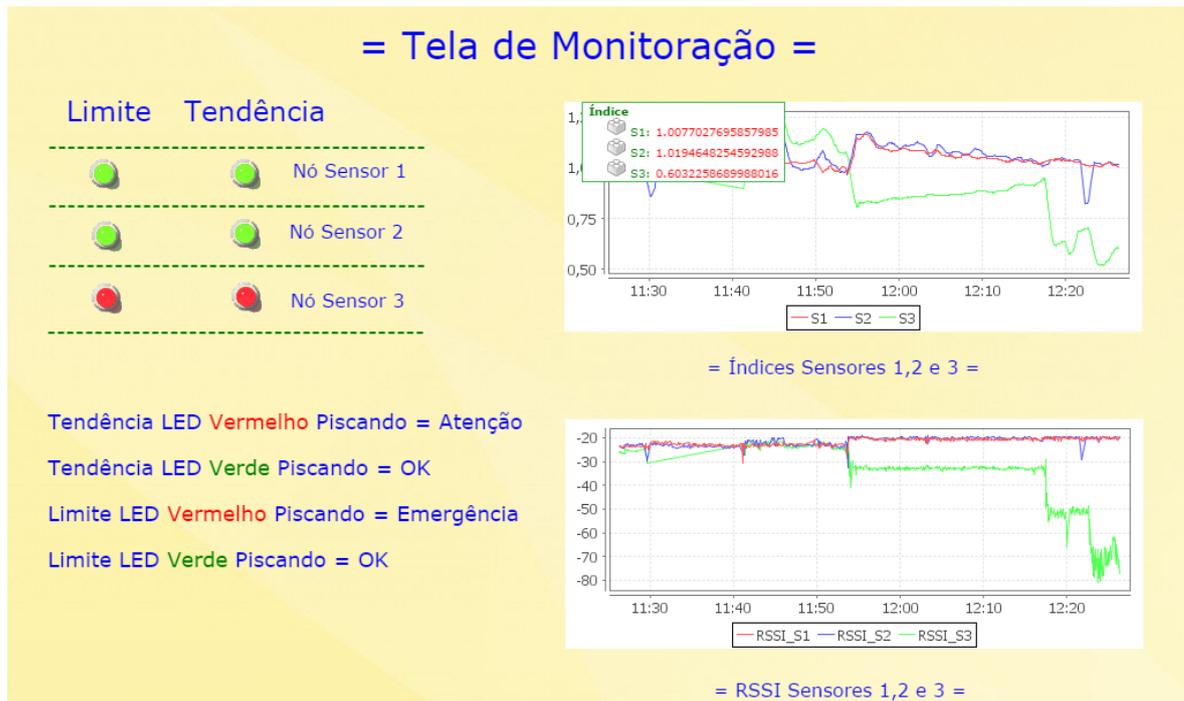
O segundo teste, Figura 33, averiguou o comportamento do supervisor no caso de súbita deterioração do sinal.



**Figura 33 - Tela do Supervisor ScadaBR - Teste 2 [Fig. Própria]**

Para este teste, o nó sensor 3 foi distanciado do nó sorvedouro, simulando a deterioração do sinal. Observa-se novamente que o LED indicativo de tendência do nó sensor 3 se acende em vermelho e no gráfico “Índices Sensores 1,2 e 3” a linha de tendência do sensor 3 (linha verde) atinge valores abaixo de -40 dBm, refletindo exatamente a situação do sensor.

O terceiro teste, Figura 34, averiguou o comportamento do supervisor no caso da aguda deterioração do sinal, quando o nó sensor 3 foi afastado do nó sorvedouro a ponto do RSSI atingir e ultrapassar o valor de referência  $V_r$  de -72 dBm.



**Figura 34 - Tela do Supervisório ScadaBR - Teste 3 [Fig. Própria]**

Neste caso, percebe-se que o LED indicativo do Limite do nó sensor 3 se acende em vermelho indicando que o RSSI naquele nó sensor está abaixo do valor de referência  $V_r$ , o que pode acarretar uma PER acima de 5%. Esta condição pode ser confirmada pelo gráfico “RSSI Sensores 1,2 e 3” sendo que a linha de tendência do sensor 3 (linha verde) chega a atingir valores abaixo de -80 dBm. O LED indicativo da tendência do nó sensor 3 também se acende em vermelho indicando a deterioração do RSSI o que pode ser confirmado no gráfico “Índices Sensores 1,2 e 3” onde a linha de tendência deste sensor (linha verde) mostra a queda do índice  $Z_r$ .

Para a execução do último e mais extenso teste, os três nós sensores foram conectados a rede elétrica, de forma a garantir energia ininterrupta. O teste se resumiu ao contínuo e ininterrupto emprego da estratégia de índices no supervisório pelo tempo de uma semana, de forma a se averiguar possíveis travas no sistema. Os testes apontaram que ao final do período, o sistema não apresentou sequer uma falha.

Os resultados dos testes da estratégia no sistema supervisório ScadaBR mais uma vez confirmam a robustez da solução.

## 8 MELHORES PRÁTICAS PARA IMPLANTAÇÃO DE RSSF EM AMBIENTES INDUSTRIAIS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE.

Com o benefício da experiência adquirida na execução deste estudo e tomando-se como base os resultados das medições e dos cálculos aqui mostrados, apresenta-se aqui um conjunto de melhores práticas a serem observadas quando da implementação de RCSSF em SMEs, independente da área de atuação e complexidade.

1. Definição do escopo: um levantamento preciso das reais necessidades de monitoração e controle e uma avaliação criteriosa das criticidades dos processos para que assim os dispositivos que comporão a rede sejam alocados de forma eficiente. Caso mais de uma rede seja instalada, um sistema de identificação das redes precisa ser implementado.
2. Levantamento: avaliação da infraestrutura necessária para a implantação, fazendo uso de um diagrama em escala da área a ser coberta pela RSSF, uma planta com os equipamentos ou mesmo imagem do Google Earth. A execução de *survey* detalhada das condições ambientais (temperatura, umidade, poeira, acessibilidade, viabilidade de implantação, alcance do sinal, etc.) levando-se em consideração a futura localização dos dispositivos, visadas e distância entre nós sensores e nó sorvedouro. O alcance do sinal pode ser influenciado pelo tipo do processo executado na área e pela densidade da infraestrutura, que pode causar obstrução, dispersão, reflexão ou fading do sinal. É preciso também fazer a prévia estimativa da densidade da infraestrutura das áreas onde os nós sensores serão instalados, classificando-as em: baixa, mínima obstrução entre dispositivos, tipicamente acima de 6 metros de altura do solo, onde há pouca infraestrutura; média, onde se localizam dutos, cabos e calhas, geralmente entre 3 e 6 metros do solo e alta, quando os dispositivos estão montados abaixo de 3 metros, onde geralmente estão cercados por máquinas e infraestrutura [5]. Esta classificação será um guia para o posicionamento dos sensores.

3. Mitigação de possíveis problemas: muitas plantas industriais já tem sistemas de comunicação sem fio operando em partes diferentes do espectro de frequência de rádio, incluindo o de 915 MHz, sendo assim, uma varredura do espectro se faz necessária. Alguns destes sistemas também podem produzir interferências na faixa de espectro, como sistemas *two-way* de comunicação de voz de longo alcance.
4. Cálculos prévios da esperada intensidade do sinal em cada dispositivo a ser instalado devem ser feitos nesta fase, o uso do modelo Log-Distance pode ser uma opção. De forma a corroborar os resultados dos cálculos, um levantamento da intensidade e estabilidade do sinal recebido em cada dispositivo da rede e a respectiva taxa de perda de pacotes deve também ser executada nesta fase. Como resultado desta etapa, um projeto de implantação deve ser gerado.
5. Planejamento e Implantação: a implantação da rede deve seguir conforme projeto e *survey* de cobertura. A rede deve ser organizada de acordo com as necessidades das aplicações e não com as necessidades da comunicação, no entanto é também necessário considerar possíveis dificuldades identificadas no levantamento, o futuro crescimento da rede, a topologia e a tecnologia a ser utilizada [5]. É imprescindível o cuidado com a alocação dos sensores para uma completa cobertura da área [13]. Considerando-se uma topologia ponto-multiponto, idealmente o nó sorvedouro deve ser fisicamente localizado no centro da rede, permitindo que este forme a conexão mais direta com cada sensor. Preferivelmente o nó sorvedouro será instalado próximo ao gateway que proverá a integração com a rede da empresa, cabeada ou não. O gerente de produção ou o administrador da rede local pode ser útil na identificação de pontos de integração entre as redes. Caso haja necessidade do uso de uma rede com topologia em malha, é boa prática garantir que o nó sorvedouro tenha conexão direta com pelo menos 25% dos nós sensores [5]. É necessário cuidado com o posicionamento das antenas, sendo aconselhável que estas não sejam posicionadas muito próximas a superfícies metálicas.

6. Uma taxa de transmissão maior sempre terá um nível menor de sensibilidade. É boa prática garantir que o RSSI nos dispositivos da rede se encontre acima do valor de referência determinado [35].
7. Testes/Monitoramento: assegurar-se que ao longo do tempo, o sinal se manterá estável e potente o suficiente em todos os nós sensores para atender os requerimentos das aplicações. Um relatório com as estatísticas da estabilidade, intensidade e perdas de pacotes deve ser gerado nesta etapa. Testes de *stress* podem ser executados nesta fase com a identificação das posições com sinal mais fraco na rede.
8. Comissionamento: o sistema de gerência da rede deve fazer uso de ferramentas estatísticas. Indicadores como os índices  $Z_r$  e  $Z_t$  que indicam a tendência do RSSI, podem auxiliar na caracterização do sinal, promovendo assim as necessárias reconfigurações da rede. É necessário se assegurar que todos os sensores estão respondendo e propriamente configurados. Também é preciso verificar que as variáveis monitoradas estão sendo propriamente atualizadas a taxa correta e que todos os dados estão sendo propriamente apresentados no console de monitoração.

## 9 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar e demonstrar a aplicabilidade do emprego de uma solução com RCSSF de baixo custo na monitoração e controle de ambientes e processos em SMEs.

Para tal, foi necessário comprovar, através de medições e cálculos, que as RCSSF são suficientemente estáveis. Verificou-se que a escolha da arquitetura de rede apropriada é condição *sine qua non* sendo a potência de transmissão e sensibilidade dos dispositivos fatores essenciais nesta escolha. Também se observou que as características do ambiente e a distância entre o nó sorvedouro e os nós sensores influem fortemente na qualidade da comunicação.

Os resultados obtidos com as medições feitas com a RCSSF, utilizando o módulo rádio BE990, indicam que no caso da Empresa X, esta rede poderia ser empregada na monitoração e controle da produção e da temperatura do ambiente e no caso da Empresa Y, na monitoração do volume d'água nos reservatórios e da temperatura dos motores elétricos, visto que a comunicação entre o nó sorvedouro e os nós sensores se mostrou adequada a atender as necessidades dos processos mencionados, que se enquadram na classe 3 (controle aberto com participação humana) da Tabela 1.

A estratégia de gerência aqui proposta é de fácil implementação visto que necessita somente dos valores do RSSI, dados que são fornecidos pelo módulo rádio BE990. A estratégia requer menos *overhead*, com conseqüente simplicidade nos cálculos, possibilitando assim sua fácil implementação em sistemas supervisórios.

Este trabalho não pretendeu esgotar o estudo sobre o emprego das RCSSF em SMEs. Futuras investigações devem considerar a influência de fatores que não foram considerados nesse trabalho mas que são encontrados em ambientes industriais como umidade, poeira, vibração, segurança da informação, comprimento dos cabos e EMC. Desta forma se poderá aferir a confiabilidade das RCSSF e justificar seu emprego na monitoração e controle de processos industriais e assim municiar as SMEs para que ingressem na quarta revolução industrial.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Peres and G. Stumpo, "Small and Medium-Sized Manufacturing Enterprises in Latin America and the Caribbean Under the New Economic Model", disponível em:  
<http://xcsc.xoc.uam.mx/apymes/webftp/documentos/biblioteca/PYMES%20en%20e%20nuevo%20modelo%20econ%20F3mico.pdf> Acessado em 10 maio de 2016.
- [2] Dr. Omar C. Branquinho. Tecnologias de Redes Sem Fio. ISBN 978-85-63630-49-0. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/206659698/Tecnologias-de-Redes-sem-Fio#> Acessado em 16 de outubro de 2015.
- [3] The Engineer. Industry 4.0: The Next Industrial Revolution. Disponível em: <http://www.theengineer.co.uk/manufacturing/automation/industry-40-the-next-industrial-revolution/1016696.article> Acessado em: 3 de maio de 2015.
- [4] ISA 100 Wireless. Control Over Wireless: Current Applications and Future Opportunities. Disponível em:  
[http://www.nivis.com/resources/WCI\\_auto\\_Week\\_2012\\_%20Paper\\_v18Sep.pdf](http://www.nivis.com/resources/WCI_auto_Week_2012_%20Paper_v18Sep.pdf).  
 Acessado em 15 de maio de 2015.
- [5] Emerson Process Management. Wireless Training. Disponível em:  
<http://www2.emersonprocess.com/enUS/plantweb/wireless/WirelessTraining/Pages/index.aspx> Acessado em 18 de dezembro de 2015.
- [6] Wireless Sensor Network (WSN) Definition. Disponível em:  
<http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/sensor-network> Acessado em 5 de fevereiro de 2015.
- [7] Ruan D. Gomes, Marcelo S. Alencar, Iguatemi E. Fonseca, Abel C. Lima Filho. Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais. Disponível em:  
<http://www.rtic.com.br/artigos/v04n01/v04n01a03.pdf> Acessado em 22 de julho de 2015.
- [8] Hossein Ahmadi. Probabilistic Coverage and Connectivity in Wireless Sensor Networks. Disponível em: <https://cs-nsl-wiki.cs.surrey.sfu.ca/theses/ahmadi07.pdf>  
 Acessado em 18 de maio de 2015.
- [9] Chen Wei, Luo Jian. An Improved LQI- based Link Quality Estimation Mechanism for Wireless Sensor Networks. Disponível em:  
<http://www.atlantispres.com/php/pub.php?publication=csss14&frame=http%3A//www.atlantispres.com/php/paperdetails.php%3Ffrom%3Dsession+results%26id%3D12655%26quervstr%3Did%253D222>. Acessado em 7 de junho de 2015.
- [10] EE Times. Make the most of the unlicensed ISM band. Disponível em:  
[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1273378](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273378) Acessado em 2 de julho de 2015.

- [11] Jack Shandle. Unlicensed 915-MHz Band Fits Many Applications and Allows Higher Transmit Power. Disponível em: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/may/unlicensed-915-mhz-band-fits-many-applications-and-allows-higher-transmit-power> Acessado em 28 de agosto de 2015.
- [12] Stefano Savazzi, Sergio Guardiano, Umberto Spagnolini. Wireless Critical Process Control in oil and gas refinery plants. Disponível em: <http://home.deib.polimi.it/savazzi/articles/KF-006297.pdf>. Acessado em 26 de dezembro de 2015.
- [13] Gang Zhao, Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey. Disponível em: <http://macrothink.org/journal/index.php/npa/article/viewFile/580/533>. Acessado em 26 de dezembro de 2015.
- [14] Konstantin Mikhaylov, Jouni Tervonen, Joni Heikkilä, Janne Käsäkoski. Wireless Sensor Networks in Industrial Environment: Real-Life Evaluation Results. Disponível em: [http://cc.oulu.fi/~kmikhayl/site-assets/pdfs/2012\\_BCFIC.pdf](http://cc.oulu.fi/~kmikhayl/site-assets/pdfs/2012_BCFIC.pdf). Acessado em 26 de dezembro de 2015.
- [15] Ignace Verhamme. Wireless Control for Process Automation Using ISA100.11a. Honeywell Process Solutions. Disponível em: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/article-reprints/wireless-control-for-process-automation-using-isa100.pdf>. Acessado em 18 de dezembro de 2015.
- [16] LIMA, Hugo Santana. Engenharia de Telecomunicações - Propagação em Sistemas Rádio Enlace. Disponível em: [http://professores.unisanta.br/santana/downloads%5CTelecom%5CSistemas\\_Telecom%5CRadio%5CPropagatpo\\_Radio.pdf](http://professores.unisanta.br/santana/downloads%5CTelecom%5CSistemas_Telecom%5CRadio%5CPropagatpo_Radio.pdf). Acessado em 26 de dezembro de 2015.
- [17] AKYILDIZ, Ian F. et al. Wireless sensor networks: a survey. Computer networks, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002.
- [18] KARL, H.; Hillig, A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Hoboken, NJ: Willey, 2005.
- [19] Unlicensed 915-MHz Band Fits Many Applications and Allows Higher Transmit Power. Disponível em: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/may/unlicensed-915-mhz-band-fits-many-applications-and-allows-higher-transmit-power>. Acessado em 28 agosto de 2015.
- [20] STALLINGS, William. SNMP, SNMPv2, SNMPv3, and RMON 1 and 2 (3rd Edition). 1999

- [21] Vitor Queiros Pereira. Estimativa da PER, Protocolo de Coleta de RSSI e Determinação de Melhores Rotas em RSSF. Disponível em: <http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/handle/tede/889> . Acessado em 01 de setembro de 2016.
- [22] Guide to Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) and Industrial Control Systems Security. Available at: <https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/csd-nist-guidetosupervisoryanddataacquisition-scadaandindustrialcontrolsystemssecurity-2007.pdf>. Acessado em 8 de agosto de 2016.
- [23] Software Testing - Quick Guide. Disponível em: [http://www.tutorialspoint.com/software\\_testing/software\\_testing\\_quick\\_guide.htm](http://www.tutorialspoint.com/software_testing/software_testing_quick_guide.htm). Acessado em 02 de setembro de 2016.
- [24] Software testing Fundamentals. Disponível em: <http://softwaretestingfundamentals.com/black-box-testing>. Acessado em 02 de setembro de 2016.
- [25] T. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice”, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [26] Rádiuino Site. Disponível em: <http://radiuino.cc/>. Acessado em 06 de agosto de 2015.
- [27] Python Software Foundation. Disponível em: <https://www.python.org/downloads/> . Acessado em 02 de maio 2015.
- [28] ScadaBR Forum. Disponível em: <http://www.scadabr.com.br> Acessado em 07 de agosto de 2016.
- [29] CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>> Acessado em 03 de Junho de 2015.
- [30] Texas Instruments. Calculation and usage of LQI and RSSI. Disponível em: [https://e2e.ti.com/support/wireless\\_connectivity/w/design\\_notes/calculation-and-usage-of-lqi-and-rssi](https://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/w/design_notes/calculation-and-usage-of-lqi-and-rssi) Acessado em 13 de junho de 2015.
- [31] Ambili Thottam Parameswaran, Mohammad Iftexhar Husain, Shambhu Upadhyaya. Is RSSI a Reliable Parameter in Sensor Localization Algorithms? – An Experimental Study. Disponível em: [http://www.cse.buffalo.edu/srds2009/F2DA/f2da09\\_RSSI\\_Parameswaran.pdf](http://www.cse.buffalo.edu/srds2009/F2DA/f2da09_RSSI_Parameswaran.pdf). Acessado em 01 de novembro de 2015.
- [32] Kannan Srinivasan, Philip Levis. RSSI is Under Appreciated. Disponível em: <https://sing.stanford.edu/site/publications/14> Acessado em 13 de abril de 2015.
- [33] Minicircuits Data sheet. Disponível em: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFRSC-123+.pdf> Acessado em 5 de maio de 2015.
- [34] Anritsu Data Sheet. Disponível em: <http://www.anritsu.com/en-gb/test-measurement/products/ms2036a> Acessado em 5 de maio de 2015.

[35] Richard Wallace. Texas Instruments. Excel Sheet to Estimate Range for Indoor and Outdoor. Disponível em:

[http://e2e.ti.com/support/wireless\\_connectivity/proprietary\\_sub\\_1\\_ghz\\_simplici/f/156/p/375556/1447173](http://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/proprietary_sub_1_ghz_simplici/f/156/p/375556/1447173). Acessado em 26 de dezembro de 2015.

## Anexo A – Python Software Para Coleta de RSSI e PER

```

# ID_Base = 0
# Sensores de 1 a 4
# BIBLIOTECAS
import serial
import math
import time
import struct
from time import localtime, strftime
#=====CONFIGURA SERIAL (USB)=====
n_serial = raw_input("Digite o Número da Serial = ") #seta a serial
n_serial1 = int(n_serial) - 1
ser = serial.Serial(n_serial1, 9600, timeout=3,parity=serial.PARITY_NONE) # seta valores da serial
#===== VARIÁVEIS UTILIZADAS =====
CONTADOR = 0 # conta o número de pollings realizados
lost1 = 0
lost2 = 0
lost3 = 0
lost4 = 0
#===== TEMPOS DE REPOSTA E POLLING =====
TEMPO1 = 0.25 # Tempo de Resposta = é o tempo entre o envio do pacote da base para sensor e
da devolução do pacote pelo sensor para base
TEMPO2 = 0.30 # Tempo entre sensores = tempo de leitura entre os sensores
TEMPO3 = 0.25 # Tempo entre Pollings
#===== CRIAÇÃO DOS PACOTES PARA CADA SENSOR =====
Pacote1 = {}
Pacote2 = {}
Pacote3 = {}
Pacote4 = {}
#===== Cria Pacote de 52 bytes com valor zero em todas as posições.
for i in range(0,52): # faz um array com 52 bytes
    Pacote1[i] = 0
    Pacote2[i] = 0
    Pacote3[i] = 0
    Pacote4[i] = 0
#===== LOOP DE EXECUÇÃO =====
while True:
    try:
        # Imprime na tela o menu de opções
        print 'Escolha um comandos abaixo e depois pressione enter'
        print '1 - Para Fazer Medições:'
        print '2 - Para Sair:'
        # Entrada da opção
        Opcao = raw_input('Entre com a Opção = ')
        # Limpa o buffer da serial
        ser.flushInput()
        # Verifica se é para encerrar a execução
        if Opcao == "2" or Opcao == "@":# caso o caracter digitado for 2 ou @
            ser.close() # fecha a porta COM
            print 'Fim da Execução' # escreve na tela
            break

```

```

# Execução
if Opcao == "1":
    # Identificação da base
    #ID_base = raw_input('ID_base = ')
    ID_base = 0
    # Identificação do sensor a ser acessado
    #ID_sensor1 = raw_input('ID do sensor 1 = ')
    ID_sensor1 = 1
    #ID_sensor2 = raw_input('ID do sensor 2 = ')
    ID_sensor2 = 2
    #ID_sensor3 = raw_input('ID do sensor 3 = ')
    ID_sensor3 = 3
    #ID_sensor4 = raw_input('ID do sensor 4 = ')
    ID_sensor4 = 4
    # Coloca nos pacotes para cada sensor a identificação da base e do sensor
    Pacote1[8] = int(ID_sensor1)
    Pacote1[10] = int(ID_base)
    Pacote2[8] = int(ID_sensor2)
    Pacote2[10] = int(ID_base)
    Pacote3[8] = int(ID_sensor3)
    Pacote3[10] = int(ID_base)
    Pacote4[8] = int(ID_sensor4)
    Pacote4[10] = int(ID_base)
    # Entra com o número de medidas que devem ser realizadas
    num_medidas = raw_input('Entre com o Número de Medições = ')
    w = int(num_medidas)
#===== CRIA ARQUIVO PARA GRAVAR O LOG =====
    FileLOG = strftime("LOG_%d_%H-%M-%S.csv")
    print "Arquivo de log: %s" % FileLOG
    LOG = open(FileLOG, 'w') # Abre o arquivo com permissão de escrita

    # Imprime na tela os resultados das medicoes
    print >> LOG, 'Data / Hora', ',', 'Contador', ',', 'RSSI-B/1', ',', 'Status', ',', 'RSSI-
B/2', ',', 'Status', ',', 'RSSI-B/3', ',', 'Status', ',', 'RSSI-B/4', ',', 'Status'
#===== FOR PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIDAS =====
    for j in range(0,int(num_medidas)): # for para realização das w medidas
        ser.flushInput() # Limpa o buffer da serial
        CONTADOR = CONTADOR + 1 #contador de poolings
        print '===== Medição Número =',CONTADOR,'=====
##### BASE - SENSOR 1
        # Transmissão do pacote de leitura
        for k in range(0,52):
            TXbyte = chr(Pacote1[k])
            ser.write(TXbyte)
        # Aguarda a resposta do sensor
        time.sleep(int(TEMPO1))
        line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que recebe da serial pela COM
        if len(line) == 52:
            #RSSI Downlink
            rssid1 = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
            if rssid1 > 128:
                RSSId1=((rssid1-256)/2.0)-63

```

```

        lost1 = 1 #pacote OK
    else:
        RSSId1=(rssid1/2.0)-63
        lost1 = 1 #pacote OK
    count = ord(line[12]) # contador de pacotes enviados pelo sensor
    print 'B-S1','OK',' RSSId = ',RSSId1

else:
    lost1 = 0 #pacote perdido
    print 'B-S1','Erro',' RSSId = N/A'
# Aguarda tempo de polling
time.sleep(int(TEMPO2))
##### BASE - SENSOR 2
ser.flushInput() # Limpa o buffer da serial
# Transmissão do pacote medida pacote 2
for k in range(0,52):
    TXbyte = chr(Pacote2[k])
    ser.write(TXbyte)
# Aguarda a resposta do sensor
time.sleep(int(TEMPO1))
line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que recebe da serial pela COM
if len(line) == 52:
    #RSSI Downlink
    rssid2 = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
    if rssid2 > 128:
        RSSId2=((rssid2-256)/2.0)-63
        lost2 = 1 #pacote OK
    else:
        RSSId2=(rssid2/2.0)-63
        lost2 = 1 #pacote OK
    count = ord(line[12]) # contador de pacotes enviados pelo sensor
    print 'B-S2','OK',' RSSId = ',RSSId2
else:
    lost2 = 0 #pacote perdido
    print 'B-S2','Erro',' RSSId = N/A'
time.sleep(int(TEMPO2))
##### BASE - SENSOR 3
ser.flushInput() # Limpa o buffer da serial
# Transmissão do pacote medida pacote 3
for k in range(0,52):
    TXbyte = chr(Pacote3[k])
    ser.write(TXbyte)
# Aguarda a resposta do sensor
time.sleep(int(TEMPO1))
line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que recebe da serial pela COM
if len(line) == 52:
    #RSSI Downlink
    rssid3 = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
    if rssid3 > 128:
        RSSId3=((rssid3-256)/2.0)-63
        lost3 = 1 #pacote OK
    else:

```

```

        RSSId3=(rssid3/2.0)-63
        lost3 = 1 #pacote OK
        count = ord(line[12]) # contador de pacotes enviados pelo sensor
        print 'B-S3','OK',' RSSId = ',RSSId3
    else:
        lost3 = 0 #pacote perdido
        print 'B-S3','Erro',' RSSId = N/A'
    time.sleep(int(TEMPO2))

##### BASE - SENSOR 4
    ser.flushInput() # Limpa o buffer da serial
    # Transmissão do pacote
    for k in range(0,52):
        TXbyte = chr(Pacote4[k])
        ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(int(TEMPO1))
    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que recebe da serial pela COM
    if len(line) == 52:
        #RSSI Downlink
        rssid4 = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
        if rssid4 > 128:
            RSSId4=((rssid4-256)/2.0)-63
            lost4 = 1 #pacote OK
        else:
            RSSId4=(rssid4/2.0)-63
            lost4 = 1
        count = ord(line[12]) # contador de pacotes enviados pelo sensor
        print 'B-S4','OK',' RSSId = ',RSSId4
    else:
        lost4 = 0 #pacote perdido
        print 'B-S4','Erro',' RSSId = N/A'
    time.sleep(int(TEMPO2))
    print
>>LOG,time.asctime(),',',CONTADOR,',',RSSId1,',',lost1,',',RSSId2,',',lost2,',',RSSId3,',',lost3,',',RSSId
4,',',lost4
        time.sleep(int(TEMPO3))
    LOG.close()
except KeyboardInterrupt:
    ser.close()
    break

```

## Anexo B - ScadaBR Software - Java Script Object Notation (Json)

```

{
  "dataSources":[
    {
      "xid":"DS_414958",
      "type":"RADIUINO",
      "alarmLevels":{
        "DATA_SOURCE_EXCEPTION":"URGENT",
        "POINT_READ_EXCEPTION":"URGENT"
      },
      "updatePeriodType":"SECONDS",
      "baudRate":9600,
      "commPortId":"COM3",
      "dataBits":8,
      "enabled":true,
      "name":"Concrefer",
      "parity":0,
      "pollingMode":true,
      "retries":1,
      "stopBits":1,
      "timeout":1000,
      "updatePeriods":1
    },
    {
      "xid":"DS_683328",
      "type":"META",
      "alarmLevels":{
        "SCRIPT_ERROR":"URGENT",
        "CONTEXT_POINT_DISABLED":"URGENT",
        "RESULT_TYPE_ERROR":"URGENT"
      },
      "enabled":true,
      "name":"Controle"
    },
    {
      "xid":"DS_707063",
      "type":"META",
      "alarmLevels":{
        "SCRIPT_ERROR":"URGENT",
        "CONTEXT_POINT_DISABLED":"URGENT",
        "RESULT_TYPE_ERROR":"URGENT"
      },
      "enabled":true,
      "name":"Index"
    },
    {
      "xid":"DS_571824",
      "type":"META",
      "alarmLevels":{
        "SCRIPT_ERROR":"URGENT",

```

```

    "CONTEXT_POINT_DISABLED":"URGENT",
    "RESULT_TYPE_ERROR":"URGENT"
  },
  "enabled":true,
  "name":"LED_S1"
},
{
  "xid":"DS_594063",
  "type":"META",
  "alarmLevels":{
    "SCRIPT_ERROR":"URGENT",
    "CONTEXT_POINT_DISABLED":"URGENT",
    "RESULT_TYPE_ERROR":"URGENT"
  },
  "enabled":true,
  "name":"LED_S2"
},
{
  "xid":"DS_458355",
  "type":"META",
  "alarmLevels":{
    "SCRIPT_ERROR":"URGENT",
    "CONTEXT_POINT_DISABLED":"URGENT",
    "RESULT_TYPE_ERROR":"URGENT"
  },
  "enabled":true,
  "name":"LED_S3"
},
{
  "xid":"DS_583288",
  "type":"META",
  "alarmLevels":{
    "SCRIPT_ERROR":"INFORMATION",
    "CONTEXT_POINT_DISABLED":"INFORMATION",
    "RESULT_TYPE_ERROR":"INFORMATION"
  },
  "enabled":true,
  "name":"MB_LED_S1"
},
{
  "xid":"DS_207228",
  "type":"MODBUS_IP",
  "alarmLevels":{
    "DATA_SOURCE_EXCEPTION":"INFORMATION",
    "POINT_READ_EXCEPTION":"INFORMATION",
    "POINT_WRITE_EXCEPTION":"INFORMATION"
  },
  "updatePeriodType":"SECONDS",
  "transportType":"TCP",
  "contiguousBatches":false,
  "createSlaveMonitorPoints":false,
  "enabled":true,

```

```

    "encapsulated":false,
    "host":"192.168.0.197",
    "maxReadBitCount":2000,
    "maxReadRegisterCount":125,
    "maxWriteRegisterCount":120,
    "name":"Modbus",
    "port":502,
    "quantize":false,
    "retries":2,
    "timeout":500,
    "updatePeriods":1
  },
  {
    "xid":"DS_026896",
    "type":"META",
    "alarmLevels":{
      "SCRIPT_ERROR":"URGENT",
      "CONTEXT_POINT_DISABLED":"URGENT",
      "RESULT_TYPE_ERROR":"URGENT"
    },
    "enabled":true,
    "name":"Monitoramento"
  }
],
"watchLists":[
  {
    "xid":"WL_038492",
    "user":"admin",
    "dataPoints":[
      "DP_765192",
      "DP_424061",
      "DP_035980",
      "DP_877556",
      "DP_927419",
      "DP_358992",
      "DP_316760",
      "DP_407223",
      "DP_789995"
    ],
    "sharingUsers":[
    ],
    "name":"(sem nome)"
  }
]
}

```

## Anexo C – Artigos Apresentados

### IV SAISSE - Seminário de Automação Industrial e Sistemas Eletro-Eletrônicos - 01/03/2016 - Santa Rita do Sapucaí, Brasil.

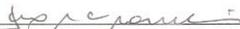


**Inatel**

Instituto Nacional de Telecomunicações

Certificamos que **Pedro R. Chaves** participou do IV SAISSE - ISSN 2319-0280 - Seminário de Automação Industrial e Sistemas Eletro-Eletrônicos, realizado em Santa Rita do Sapucaí – MG no dia 01 de março de 2016, apresentando o artigo intitulado **Critérios para Implantação de RSSF em Ambiente Industrial em Função da Classe de Serviço: Um Estudo de Caso.**

Santa Rita do Sapucaí, 01 de Março de 2016.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Yvo Marcelo C. Masselli  
Coordenador – IV SAISSE – 2016



**Inatel**  
Instituto Nacional de Telecomunicações

**8th IEEE Latin-American Conference on Communications  
15-17/11/2016 - Medellin, Colombia.**

**Criteria for the Setting up of Low Cost Wireless Sensor Networks  
in Small and Medium Size Manufacturing Enterprises**

