

Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
Curso de Engenharia da Computação

Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes
Industriais: Estudo de Caso em uma Subestação de
Energia Elétrica

LILIAN COELHO DE FREITAS

Orientador:

PROF. DR. JOÃO CRISÓSTOMO WEYL ALBUQUERQUE COSTA

Belém
2007

Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes Industriais: Estudo de Caso em uma Subestação de Energia Elétrica

LILIAN COELHO DE FREITAS

Orientador:

PROF. DR. JOÃO CRISÓSTOMO WEYL ALBUQUERQUE COSTA

Trabalho de Conclusão de curso submetido ao Colegiado do Curso de Engenharia da Computação para a obtenção do grau de “Engenheira da Computação”.

Universidade Federal do Pará

**Belém
2007**

Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes Industriais: Estudo de Caso em uma Subestação de Energia Elétrica

Lilian Coelho de Freitas

Banca examinadora

.....
Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa (UFPA) - Orientador

.....
Eng. Msc. Norberto Bramatti - Co-orientador

.....
Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior - Membro

.....
Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias - Membro

Visto:

.....
Prof. Dr. Manoel Ribeiro

Coordenador do Curso de Engenharia da Computação

Dedicatória

Este trabalho é dedicado com muito amor às pessoas mais importantes da minha vida.

JOÃO BATISTA e ROSILDA COELHO

Meus maravilhosos pais, que dedicaram suas vidas
ao meu desenvolvimento pessoal e profissional;

LEIDIAN COELHO

Minha querida irmã, que com sua meiguice e carinho
sempre foi fonte de motivação para minha vida;

OBEDI COELHO

Meu amado irmão, que sempre me ajudou em todos
os momentos que precisei dele.

Agradecimentos

Oh, Deus! Como és bom! Tu me guiaste por um caminho árduo, mas recompensador. Sou extremamente grata pelas conquistas que me destes durante esses cinco anos de Universidade. Também sou grata pelos anjos visíveis e invisíveis que mandastes para me guiar, proteger, encorajar e apoiar. Com sincera gratidão gostaria de agradecer aos meus anjos visíveis:

Meus pais, João Batista e Rosilda, exemplos de luta, superação e dignidade. Que fizeram seus os meus sonhos e dedicaram suas vidas para torná-los realidade.

Meus irmãos, Leidian e Obedi, meus grandes e sinceros amigos, agradeço pelo constante apoio. Espero sempre poder retribuir o carinho e a ajuda de vocês!

Minha tia e amiga, Quézia, agradeço pelas agradáveis visitas ao pensionato, pelas conversas, passeios, enfim por sempre lembrar e se fazer presente.

Minha amiga, Maria Lúcia, por dividir comigo não só uma casa, mas uma vida, com todos seus os momentos alegres e tristes, por tornar a distância de casa divertida e agradável; por me ensinar a olhar para vida e ver além das dificuldades um motivo pra sorrir e ser feliz; enfim pela amizade forte e verdadeira;

Ao meu (acima de qualquer outro título) amigo, André Mendes, pelos momentos felizes, pelo apoio, pela amizade, pelo aprendizado;

Ao meu orientador e amigo, Prof. João Crisóstomo, pela confiança depositada durante esses quatro anos de convívio e orientação, pelas oportunidades de crescimento profissional, pelo carinho quase de um pai, pela amizade;

Aos meus colegas de turma Acácio, Adriana (*Tico*), Bruno, Cynthia, Cleide, Éder, Helen, Igor, Liviane, Lucas, Marcus Pantoja, Marcos Guerra, Néilton e Plácido, pelas alegrias compartilhadas, pelo companheirismo, pelos momentos de estudo tão divertidos!

A todos os colegas do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (Liane, Marco, Vinícius, Lamartine, Roberto, Denize, Andrey, Anderson, Clenilson, André) pela companhia sempre agradável.

Aos professores e amigos, Aldebaro Klautau, Eurípedes Santos, Renato Francês, por serem sempre solícitos.

Ao Admilson Ribeiro, por compartilhar seus conhecimentos em redes de sensores sem fio e ser meu co-orientador no início desta pesquisa.

Ao meu supervisor de estágio na Eletronorte, Norberto Bramatti, por acreditar na importância deste trabalho, por viabilizar a realização dos testes e sempre se dispor a ajudar e esclarecer dúvidas.

Ao meu amigo Anderson, pela ajuda fundamental com a linguagem LabView e pelos esclarecimentos de dúvidas referentes aos sistemas de monitoramento, implementados na Eletronorte.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da minha bolsa de iniciação científica, durante últimos três anos de pesquisa.

Aos Projetos PAD-SEA I e PAD-SEA II, pelos investimentos na área de redes de sensores sem fio, através dos quais foram adquiridos os equipamentos de redes de sensores sem fio utilizados neste trabalho.

*“Amarei a luz, porque ela me mostra o caminho.
Contudo, suportarei a escuridão, pois ela me mostra as estrelas.”*
- Og Mandino

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de redes de sensores sem fio voltado para aplicações em ambientes industriais. Como estudo de caso, é implementado um sistema de monitoramento de máquinas, o qual é responsável por monitorar medidas de aceleração de uma máquina rotativa, chamada compensador síncrono, instalada na subestação de energia elétrica da empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte). Fatores como interferência, alcance de transmissão, confiabilidade da comunicação e precisão dos sensores são analisados.

Abstract

This work presents a study of wireless sensor networks applied on industrial environments. As case study, a electrical machines monitoring system is implemented, which is responsible for monitoring acceleration measures of a rotative machine (synchronous compensator) installed in the electric power substation of the company called Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte). Factors a interference, transmission range, communication reliability and accuracy of the sensors are analyzed.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Glossário	v
1 Introdução	1
1.1 Contexto do Trabalho	1
1.2 Requisitos de projeto e objetivos	2
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2 Redes de Sensores Sem Fio	5
2.1 Introdução	5
2.2 Tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio	5
2.2.1 Características das RSSFs	7
2.2.2 Componentes de <i>Hardware</i>	10
2.2.2.1 Nó Sensor	10
2.2.2.2 Estação Base	12
2.2.2.3 Interfaces de Conexão com outras Redes - <i>Gateways</i>	12
2.2.3 Componentes de <i>Software</i>	14
2.2.3.1 Características dos <i>Software</i> para RSSFs	14
2.2.3.2 Sistemas Operacionais	14
2.2.3.3 Linguagens de Programação	15
2.3 Padrão de Comunicação ZigBee	16
2.4 Conclusões do Capítulo	19
3 Metodologia Adotada nos Experimentos	20
3.1 Introdução	20
3.1.1 O Compensador Síncrono	21
3.1.2 Modelos de nós sensores	22
3.1.2.1 Modelo MicaZ	22

3.1.2.2	Modelo G-Link	23
3.2	Conclusões do Capítulo	24
4	Testes Experimentais e Resultados	25
4.1	Introdução	25
4.2	Estudo de Precisão dos Sensores	25
4.3	O <i>Software</i> WSensor Networking	28
4.4	Teste de Sensibilidade de Frequência	29
4.5	Teste no Compensador Síncrono-1 em Vila do Conde	32
4.6	Conclusões do Capítulo	38
	Conclusão	40
	Referências	42
	Anexo	47

Lista de Figuras

2.1	Visão geral de uma RSSF.	6
2.2	Comunicação por múltiplos saltos em uma RSSF.	6
2.3	Tipos de redes sem fio de comunicação de dados.	7
2.4	Agregação de dados coletados individualmente.	8
2.5	Esquema de uma RSSF com vários nós sorvedouro	9
2.6	Arquitetura básica de um nó sensor	10
2.7	Alguns modelos de nós sensores da Universidade de Berkeley	11
2.8	Projetos acadêmicos de nós sensores	12
2.9	Modelo genérico de uma RSSF com <i>gateway</i>	13
2.10	Tipos de <i>gateways</i> disponíveis para a família Mica Motes	13
2.11	Camadas de Protocolos	17
2.12	Diferentes topologias ZigBee.	18
3.1	Compensador Síncrono	21
3.2	RSSF com nó sensor MicaZ	23
3.3	Equipamentos utilizados na montagem da RSSF G-Link	24
4.1	Placa de sensores MTS-310	26
4.2	Esquema de ligação nó sensor, shaker e osciloscópio.	27
4.3	Esquema de ligação nó <i>gateway</i> e estação base.	27
4.4	Tela do <i>Software</i> WSensor	28
4.5	Resultados do teste de variação da frequência de aceleração.	30
4.6	Resultados do teste de variação da frequência de aceleração.	31
4.7	Esquema de medição utilizando o medidor e analisador de aceleração	33
4.8	Visão do compensador síncrono (à esquerda) e da sala de operação (à direita) .	33
4.9	Visão interna da sala de operação do compensador síncrono	34
4.10	Conexão com a estação base	34
4.11	Medidas externas ao compensador no domínio do tempo	35
4.12	Medidas externas ao compensador no domínio da frequência	36

4.13	Posicionamento dos sensores internos ao compensador.	36
4.14	Medidas internas ao compensador, no domínio do Tempo	37
4.15	Medidas da parte interna do compensador, no domínio da frequência	38

Glossário

A/D	- Analógico/Digital
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
API	- <i>Application Programming Interface</i>
CAME	- Laboratório de Calibração de Transdutores de Vibração
DEIV	- Laboratório de Instrumentação Virtual
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i>
HAN	- <i>Home Area Networks</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISM	- <i>Industrial, Scientific and Medical</i>
JPL	- <i>Jet Propulsion Laboratory</i>
kbps	- kilobits por segundo
MAC	- <i>Medium Access Control</i>
Mbps	- Megabits por segundo
PAN	- <i>Personal Area Networks</i>
PCMCIA	- <i>Personal Computer Memory Card International Association</i>
PHY	- <i>Physical Layer</i>
QoS	- Qualidade de Serviço
RSSFs	- Redes de Sensores Sem Fio
TCP/IP	- <i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
UCLA	- <i>University of California, Los Angeles</i>
WiFi	- <i>Wireless Fidelity</i>
WINS	- <i>Wireless Integrated Networks Sensors</i>
WLANS	- <i>Wireless Local Area Networks</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto do Trabalho

Recentes avanços tecnológicos nas comunicações sem fio e na eletrônica têm propiciado o desenvolvimento de redes de baixo custo, baixa potência e de sensores multifuncionais. Este cenário levou à criação das denominadas Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs). Essas redes são compostas por minúsculos dispositivos capazes de sensoriar, processar dados, e comunicar-se com outros através de canais de rádio frequência [1]-[3]. Tais dispositivos podem monitorar e obter informações sobre fenômenos físicos que seriam difíceis, ou até impossíveis, de serem obtidas utilizando redes convencionais. Dessa forma, RSSFs possuem um vasto potencial de aplicação em diferentes áreas [1]-[5], por exemplo:

- *Na área militar*, podem ser utilizadas para vigilância de fronteiras, detecção de inimigos, de material perigoso, como gás venenoso ou radioativo.
- *Na área médica*, no monitoramento de pacientes em hospitais, através de sensores sem fio que medem informações como batimentos cardíacos, sinais neurais, pressão e fluxo sanguíneo dos pacientes. Esses sensores seriam capazes de atuar em situações de risco enviando sinais de alerta aos médicos, sinalizando uma situação de emergência.
- *Na área ambiental*, no monitoramento de florestas, para detecção de queimadas, e outras variações climáticas; no monitoramento de rios, através da detecção de poluentes; no monitoramento do solo, auxiliando a agricultura de precisão.
- *Na indústria*, através do monitoramento de máquinas, para auxiliar na prevenção de falhas (manutenção preditiva). No controle de processos de produção, através da conexão de sensores sem fio embutidos em “peças” numa linha de montagem, entre outras.

A aplicação de RSSF em ambientes industriais representam uma classe de aplicações com enormes potenciais e benefícios. Muitas soluções sugerem a eliminação de cabeamento em ambientes industriais, dentre as quais RSSF têm se mostrado uma nova e promissora tecnologia [6]-[7].

Sensores são essenciais para automação industrial. Estes provêem uma ligação vital entre sistemas de controle e o mundo físico. Atualmente, sofisticados *hardwares* e *softwares* para sistema de controle estão criando diversas possibilidades de automação na indústria. No entanto, a relação custo-eficiência pode apresentar restrições ao uso de sensores tradicionais (sensores cabeados) em aplicações industriais, devido a: [8]

- Custos com cabeamento e com manutenção dos sensores;
- Dificuldades para implantar um sistema cabeado em áreas de difícil acesso, ou com restrições;
- Incompatibilidade de protocolos entre vários tipos de sensores e *hardware/software* de sistemas de controle;
- Alto custo de instalação e alta taxa de falhas de conectores de cabos.

Estes são apenas alguns dos fatores que têm impulsionado a pesquisa de alternativas sem fio. Dessa forma, o desafio que emerge é migrar, integrar e/ou substituir (em alguns casos) as redes de sensores cabeadas por RSSF.

Neste contexto, este trabalho apresenta alguns estudos referentes à aplicação de RSSF em ambiente industrial, especificamente no monitoramento de uma máquina rotativa em uma subestação de energia elétrica.

1.2 Requisitos de projeto e objetivos

Em aplicações industriais, os sistemas devem atuar com a mínima intervenção do operador. Em RSSF, isto se traduz em auto-organização e auto-configuração dos nós sensores [7]. Além, dessas características, RSSF para aplicações industriais devem atender aos seguintes requisitos [8]:

- Interação com o ambiente;
- Qualidade de Serviço (QoS) similar às redes tradicionais;

- Centralização de dados;
- Tempo de atraso reduzido (possibilidade de execução em tempo real);
- Simplicidade;
- Confiabilidade e segurança dos dados;
- Coexistência com a estrutura legada;
- Robustez frente às condições ambientais agressivas (por exemplo: interferência de rádio frequência).

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo de viabilidade da aplicação de RSSF em um ambiente industrial, através da implementação de testes práticos em tal ambiente, considerando medidas como robustez diante de interferências, alcance e confiabilidade da comunicação, e precisão dos sensores sem fio.

Como objetivos secundários, destacam-se a instalação e configuração de uma RSSF; o estudo do padrão de comunicação sem fio para redes de baixa frequência - padrão ZigBee; e o levantamento do estado da arte em termos de tecnologias de sensores sem fio, incluindo fabricantes, modo de comunicação, precisão, etc.

Como estudo de caso, é implementado um sistema de monitoramento de máquinas através da tecnologia de RSSF, o qual é responsável por monitorar medidas de aceleração de uma máquina rotativa, chamada compensador síncrono [9], instalada na subestação de energia elétrica da empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletronorte [10]. Este sistema enviará as informações sensoriadas, através de um canal de comunicação sem fio (*wireless*), para uma estação base, a partir da qual estas informações poderão ser disponibilizadas para análise.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho adota a seguinte organização:

O Capítulo 2 descreve a tecnologia de RSSFs e os seus principais conceitos. Apresenta aspectos específicos relacionados ao *hardware* e ao *software*, tais como nó sensor, estação base, sistemas operacionais, programação, padrões de comunicação, etc.;

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na realização deste trabalho, bem como os principais equipamentos de *hardware* e *software* adotados.

O Capítulo 4 descreve os testes experimentais realizados em um ambiente industrial com o intuito de analisar o comportamento da RSSF em um ambiente de subestação. Fatores como interferência, alcance de transmissão, confiabilidade da comunicação e precisão dos sensores são analisados e os resultados encontrados são discutidos.

O Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, as principais dificuldades encontradas e as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes de Sensores Sem Fio

2.1 Introdução

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) representam um novo paradigma de comunicação, as quais apresentam componentes e características bastante específicas, que as tornam diferentes de outras redes tradicionais [1]-[5]. A idéia de computadores pequenos e sensores não é em si uma inovação. Contudo, a combinação de pequenos sensores, computadores de baixa-potência e rádios constitui uma nova plataforma tecnológica que agrega inúmeras e importantes aplicações [1]-[5], [8], [13]. Neste contexto, este capítulo apresenta os principais conceitos referentes à tecnologia de RSSFs, abordando aspectos específicos relacionados ao *hardware* e ao *software*, tais como: componentes, arquitetura, sistemas operacionais e programação.

2.2 Tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs são projetadas para detectar eventos ou fenômenos físicos, coletar e processar dados, e transmitir as informações sensorizadas para usuários interessados. São compostas por pequenos dispositivos, chamados de nós sensores e por pelo menos um ponto de comunicação, denominado estação base. Os nós sensores podem ser equipados com um ou mais sensores, tais como acelerômetro, fotômetro, termistor, sensor de umidade, de pressão, de força, de luz ultra-violeta, de radiação, os quais monitoram o ambiente de acordo com a aplicação a que se destinam. São distribuídos espacialmente em uma determinada área física que se deseja monitorar, e usam enlaces sem fio para realizar tarefas de sensoriamento [3]-[16],[17]. A Figura 2.1 fornece uma visão geral de RSSFs.

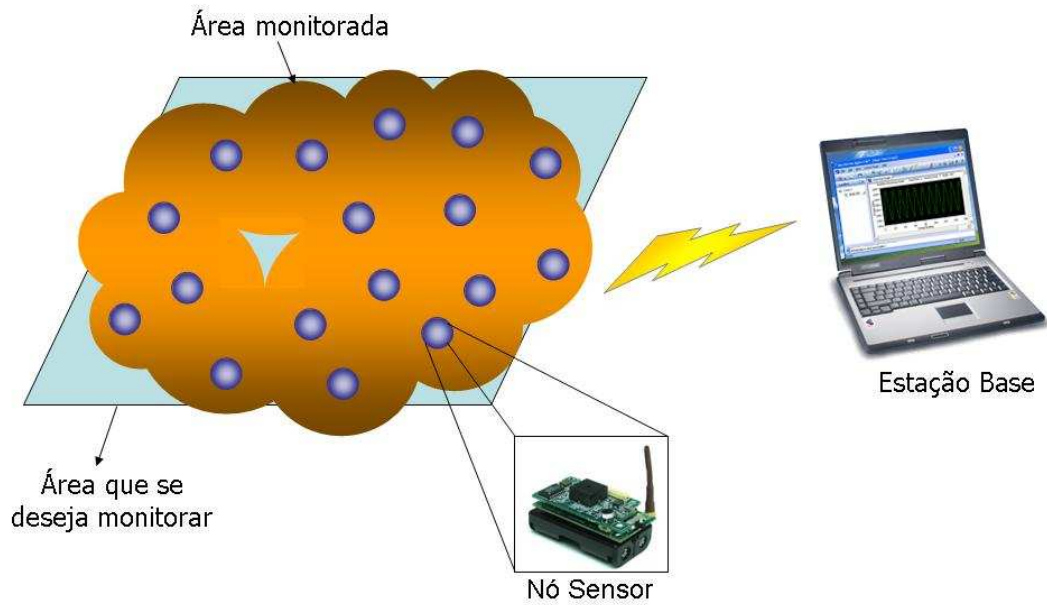


Figura 2.1: Visão geral de uma RSSF.

A estação base provê uma interface de comunicação entre a RSSF e o usuário final. Através dela, pode-se coletar informações sensorizadas do ambiente e enviar comandos aos nós sensores. Devido à limitação do alcance de transmissão dos nós sensores [18], estes podem não possuir um canal de comunicação direto com a estação base e os outros nós. Neste caso, há a formação de uma malha de comunicação, na qual os nós “fonte” e “destino” são as extremidades. Os pacotes são envidados salto-a-salto (*hop-by-hop*) através desta malha, conforme esquematizado na Figura 2.2. Este procedimento de comunicação é denominado de roteamento por múltiplos saltos (*multihop*) [17].

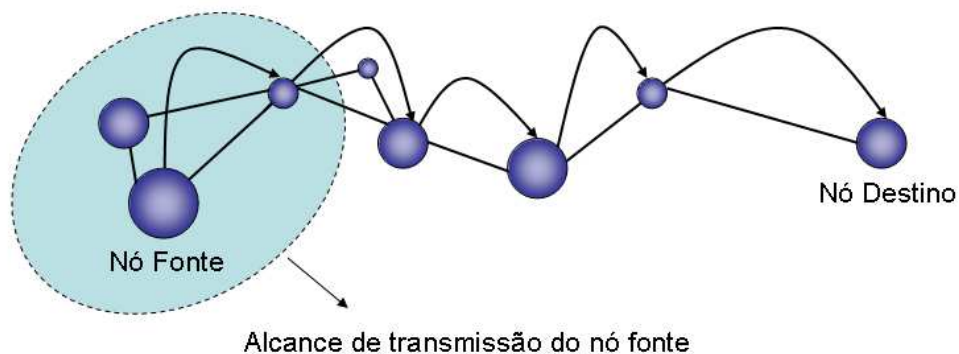


Figura 2.2: Comunicação por múltiplos saltos em uma RSSF.

RSSFs podem ser vistas como um tipo particular de redes móveis *ad hoc*. Numa rede tradicional, a comunicação entre os elementos computacionais é feita através de estações base, que constituem uma infra-estrutura de comunicação, como ilustrado na Figura 2.3.a. Esse é o caso das redes de celulares e redes locais sem fio (WLANs). Por outro lado, numa rede móvel *ad hoc* os elementos computacionais trocam dados diretamente entre si, como ilustrado na Figura 2.3.b.

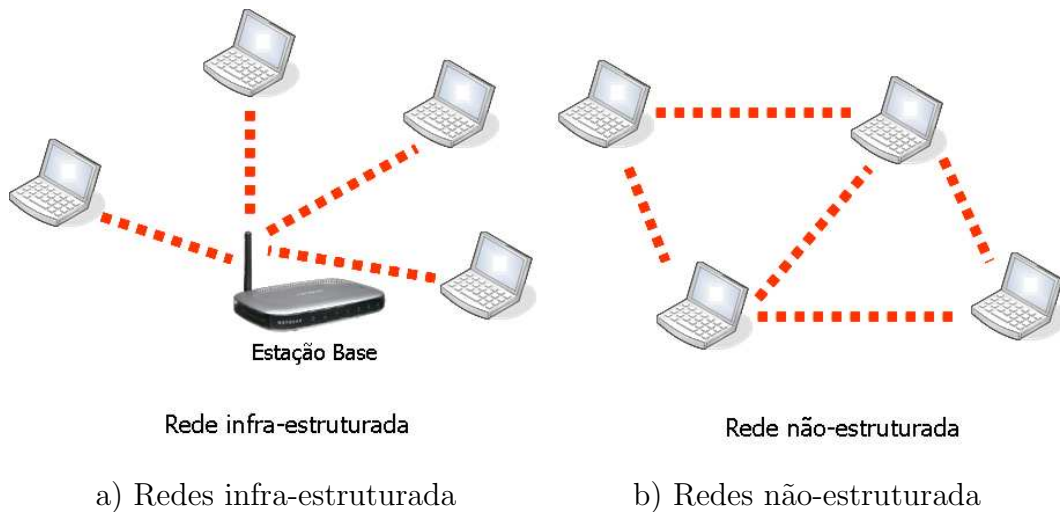


Figura 2.3: Tipos de redes sem fio de comunicação de dados.

Do ponto de vista organizacional, RSSFs e redes *ad hoc* são idênticas, já que possuem elementos computacionais que se comunicam diretamente através de enlaces de comunicação sem fio. No entanto, as redes *ad hoc* têm como função básica prover um suporte à comunicação entre esses elementos computacionais, que individualmente, podem estar executando tarefas distintas. Enquanto que RSSFs tendem a executar uma função colaborativa, onde os dados são processados em conjunto pelos nós sensores que formam a rede [19].

2.2.1 Características das RSSFs

RSSF apresentam características particulares conforme as áreas em que são aplicadas. Isto faz com que questões específicas tenham que ser resolvidas. Algumas dessas características e questões são discutidas a seguir.

- **Endereçamento dos nós sensores:**

Dependendo da aplicação, cada nó sensor pode ser endereçado individualmente ou não. O endereçamento individual ocorre em aplicações onde se deseja saber exatamente o local de onde o dado está sendo coletado, por exemplo, em aplicações de nós sensores

monitorando máquinas em uma indústria. Por outro lado, existem aplicações onde o importante é saber o valor de uma determinada variável em uma região, neste caso o endereçamento individual não se faz necessário, como ocorre em aplicações de monitoramento climático em uma floresta [11], [19].

- **Agregação dos dados:**

Indica a capacidade de uma RSSF de agregar ou sumarizar dados coletados pelos nós sensores. Caso a rede tenha essa funcionalidade, é possível reduzir o número de mensagens que precisam ser transmitidas por ela. Este cenário é ilustrado na Figura 2.4. Os dados coletados são combinados e sumarizados ainda na rede, antes de serem enviados à estação base [20].

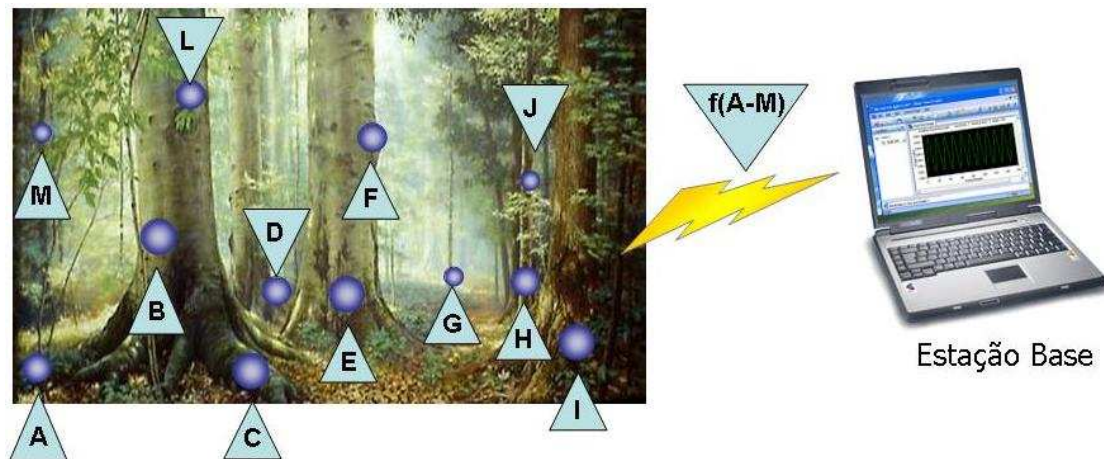


Figura 2.4: Agregação de dados coletados individualmente.

- **Mobilidade dos sensores:**

Indica se os sensores podem se mover ou não em relação ao sistema em que estão coletando dados. Por exemplo, nós sensores colocados em máquinas para coletar dados de temperatura e aceleração são tipicamente estáticos (considerando que as máquinas são estáticas), enquanto nós sensores colocados na superfície de um oceano para medir o nível de poluição da água são móveis [11],[19].

- **Limitação da energia disponível:**

Em algumas aplicações, os nós sensores serão colocados em áreas remotas, o que não permitirá facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Neste cenário, o tempo de vida de um nó sensor depende da quantidade de energia disponível [22]. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs devem ser escolhidos considerando a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de qualquer solução para esse tipo de rede deve levar em consideração o consumo, o modelo de energia e o mapa de energia da rede [23].

- **Auto-organização da rede:**

Nós sensores numa RSSF podem ser perdidos por causa de sua destruição física ou falta de energia. Também podem ficar incomunicáveis, devido a problemas no canal de comunicação sem fio ou por decisão de um algoritmo de gerenciamento da rede. Neste caso, isso pode acontecer por diversas razões como, por exemplo, para economizar energia ou por causa da presença de outro nó sensor na mesma região que já coleta o dado desejado [11].

A situação contrária também pode acontecer: nós sensores inativos se tornarem ativos ou novos nós sensores passem a fazer parte da rede. Em qualquer um dos casos, de nós sensores ficarem inoperantes ou passem a participar de sua estrutura, é necessário haver mecanismos de auto-organização para que a rede continue a executar a sua função. Essa configuração deve ser automática e periódica já que a configuração manual não é viável, devido a problemas de escalabilidade [24].

- **Capacidade de responder a consultas:**

Uma consulta sobre uma informação coletada numa dada região pode ser colocada para um nó sensor individual ou um grupo de nós sensores. Quando as consultas são realizadas em um grupo de nós sensores, os dados são transmitidos através da rede até um nó especial, chamado de nó sorvedouro. Este é responsável por reunir as informações dos nós sensores sob sua “jurisdição” [19]. Dependendo do grau de sumarização executado, pode ser necessário definir vários nós sorvedouros (nós *sinks*) em uma determinada área, como esquematizado na Figura 2.5.

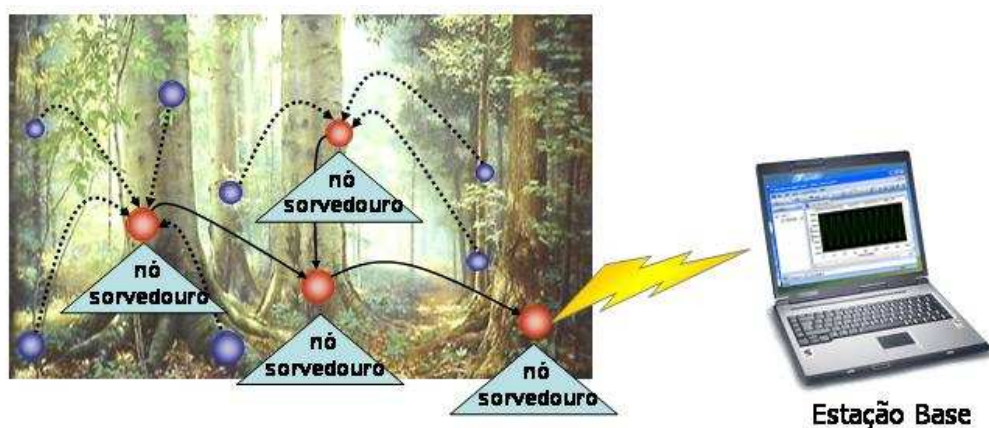


Figura 2.5: Esquema de uma RSSF com vários nós sorvedouro

2.2.2 Componentes de *Hardware*

Uma RSSF é composta basicamente por três elementos distintos: os nós sensores, a estação-base, e uma interface para comunicação com outras redes (nó *gateway*).

2.2.2.1 Nó Sensor

Nós sensores são dispositivos autônomos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação [16]. Cada nó sensor possui um ou mais sensores, microprocessador de baixo poder de processamento, rádio de faixa estreita (em geral), memória de baixa capacidade de armazenamento, bateria finita [3]. A Figura 2.6 mostra os componentes básicos de um nó sensor.

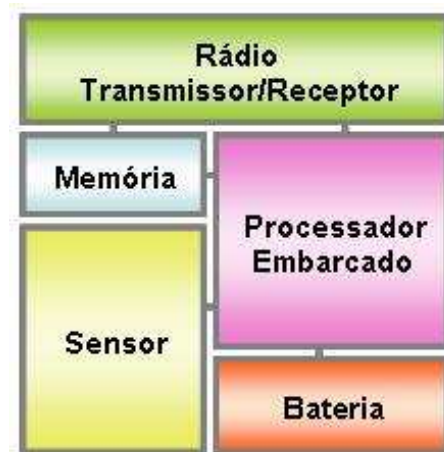


Figura 2.6: Arquitetura básica de um nó sensor

Os microprocessadores, são normalmente de 8 bits com frequência de 10 MHz, os rádios possuem taxa de transmissão na faixa de 1 kbps a 1 Mbps e a capacidade de memória, em geral, varia entre 128 Kbytes a 2 Mbyte [4].

Um dos desafios referentes à RSSFs está relacionado, à limitação de energia dos nós sensores. Cada nó sensor possui uma bateria com capacidade limitada, sendo praticamente inviável recarregar manualmente todas as baterias, uma vez que, RSSF podem ser compostas por milhares de nós sensores e, além disso, estes podem estar em locais inacessíveis. Dessa forma, o foco de projeto em RSSF, do *hardware* aos protocolos de redes, é o uso eficiente de energia. Torna-se, então, necessária a adoção de mecanismos de economia de energia, tais como desligar componentes de *hardware* que não estão sendo usados e colocar o processador no modo de mais baixo consumo quando estiver ocioso.

No caso de aplicações de monitoramento industrial, como o monitoramento de máquinas

proposto neste trabalho, a energia ainda é limitante, já que os nós sensores sem fio utilizados são alimentados por baterias, no entanto, neste tipo de aplicação seria possível o uso de um modelo de nó sensor que não trabalhe com fonte de alimentação finita, já que os nós sensores não serão móveis.

Nos últimos anos, foram intensificados os esforços para o desenvolvimento de nós sensores de tamanho reduzido que possam realizar as atividades de sensoriamento, comunicação e processamento com baixo consumo de energia. Entre os modelos mais populares, estão os nós sensores do Projeto Mica Motes [29], desenvolvido por pesquisadores na Universidade de Berkeley, e comercializados pela empresa Crossbow Technology Inc. [30].

Esses nós sensores visam apresentar baixo custo, baixa potência e confiabilidade. Possuem uma completa arquitetura de *software*, composta por uma pilha de protocolos de código aberto e um sistema operacional específico para RSSFs (também de código aberto), chamado TinyOS [31]. Apresentam a capacidade de interfacear com uma variedade de sensores, tais como: sensores de luminosidade, temperatura, aceleração, vibração, pressão, campo magnético e som, o que possibilita uma diversidade de aplicações, por exemplo monitoramento ambiental, monitoramento de estruturas, na engenharia civil, monitoramento de máquinas em indústrias, entre outras.

A Figura 2.7 ilustra alguns modelos, atualmente comercializados: o Mica2 (Figura 2.7.a), o Mica2dot (Figura 2.7.b), o MicaZ (Figura 2.7.c) e Telos (Figura 2.7.d). O Telos, a versão mais recente, utiliza o padrão IEEE.15.4 [32], na frequência de 2.4GHz e largura de banda de 250 Kbps.

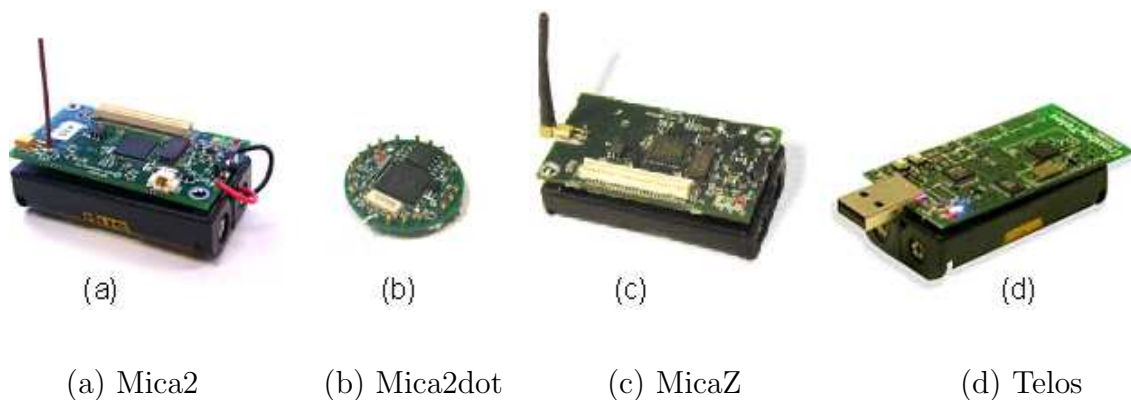


Figura 2.7: Alguns modelos de nós sensores da Universidade de Berkeley

A Figura 2.8 apresenta outros tipos de nós sensores resultantes de pesquisas em diversas instituições, como o Sensor Web [33] desenvolvido pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da NASA. O WINS (*Wireless Integrated Networks Sensors*) [34], da *University of California, Los*

Angeles (UCLA), com colaboração do *Rockwell Science Center*. O Medusa [35] também da UCLA.

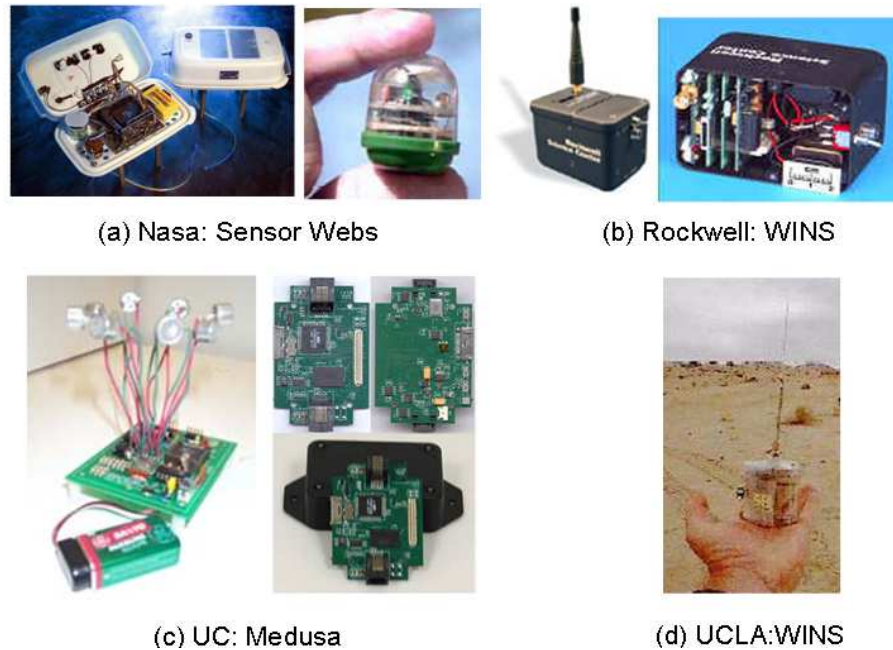


Figura 2.8: Projetos acadêmicos de nós sensores

A tendência é que sejam produzidos nós sensores em larga escala, barateando o custo, levando a novas melhorias, e reduzindo o tamanho, para que RSSF se tornem, cada vez mais, disponíveis executando as mais diferentes tarefas.

2.2.2.2 Estação Base

É responsável pela entrega da informação ao usuário. Pode ser um computador, que pode estar conectado localmente à RSSF (via porta serial ou USB) [28] ou pode estar conectado remotamente. Neste último caso, a rede de sensores precisa dispor de uma interface de interconexão remota. Na seção seguinte serão apresentadas algumas dessas interfaces.

2.2.2.3 Interfaces de Conexão com outras Redes - *Gateways*

A comunicação da RSSF com outras redes ocorre através de nós chamados *gateways*. Os dados coletados pelos nós sensores percorrem a RSSF até chegar a um *gateway* que irá encaminhá-los, para uma outra rede (por exemplo, a Internet) [19], a partir da qual estes dados serão encaminhados até uma estação base, que armazenará tais dados, e os disponibilizará aos usuários. A Figura 2.9 ilustra um modelo genérico de uma RSSF conectada a Internet através de um nó *gateway*.

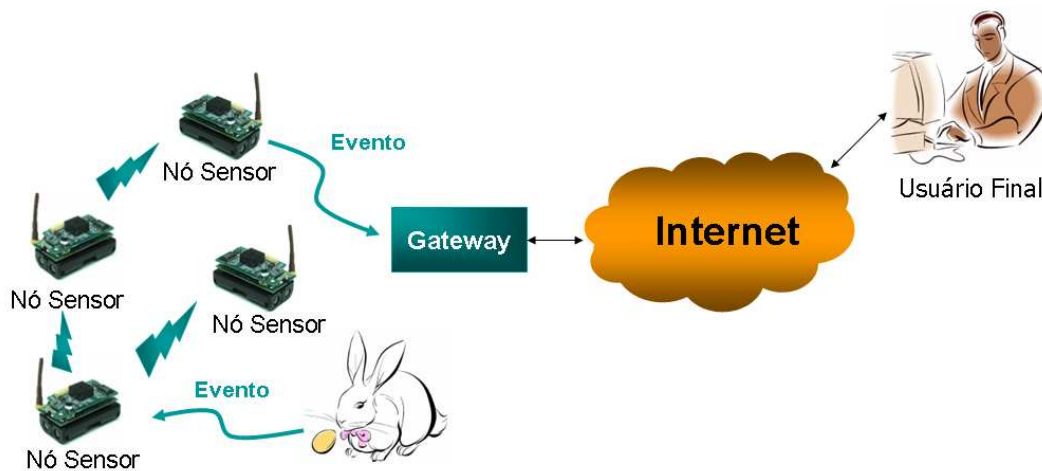


Figura 2.9: Modelo genérico de uma RSSF com *gateway*

Existem diversos tipos de *gateways*, que variam conforme a arquitetura de nós sensores e o tipo de rede a qual se pretende conectar. A Figura 2.10 ilustra os principais *gateways* comercializados pela empresa Crossbow Technology Inc. para conexão com nós sensores da família Mica Motes [30].

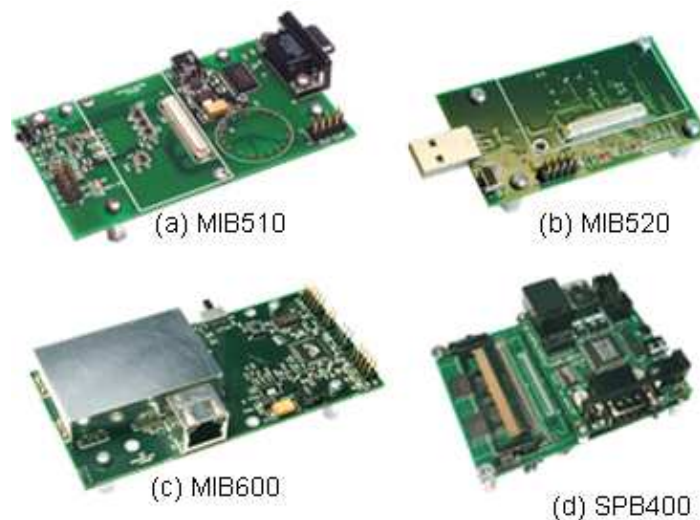


Figura 2.10: Tipos de *gateways* disponíveis para a família Mica Motes

A placa MIB510 [36] (Figura 2.10.a) conecta uma RSSF a uma estação base, via porta serial (RS-232). A placa MIB520 [36] (Figura 2.10.b), permite a conexão com a estação base via porta USB. A placa MIB600CA [36] (Figura 2.10.c), provê uma conectividade Ethernet (10/100 Base-T) com uma RSSF, permitindo acesso remoto à RSSF via protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*, protocolos padrão da Internet). A placa SPB400 [37] (Figura 2.10.d), contém um ponto de acesso que conecta uma RSSF a uma rede WLAN sem a necessidade de um computador ou servidor. Contém múltiplas interfaces,

incluindo Ethernet, USB e serial. Além de *slots* PCMCIA e de memórias *CompactFlash* habilitam a conectividade com redes Wi-Fi, por exemplo.

2.2.3 Componentes de *Software*

As limitações de processamento, memória e, principalmente, energia presentes nos nós sensores, impõem sérias restrições aos *softwares* projetados para RSSFs. Por esse motivo, esta seção apresentará alguns componentes e características de *software* para essas redes.

2.2.3.1 Características dos *Software* para RSSFs

Considerando as características das RSSF, destacam-se os seguintes requisitos para os *softwares* projetados especificamente para essa plataforma tecnológica [28]:

- **Pequeno:** o código executável das aplicações devem caber na memória dos nós sensores;
- **Expressivo:** um sistema de programação deve permitir um variedade de aplicações;
- **Conciso:** Aplicações devem ser pequenas, e conservar a banda da rede;
- **Resilientes:** Uma aplicação não pode parar de funcionar ou causar danos no nó sensor;
- **Eficiente** Eficiência de energia e de comunicação são essenciais;

2.2.3.2 Sistemas Operacionais

Devido às características dos nós sensores e da própria rede de sensores, algumas questões devem ser consideradas no projeto de um sistema operacional [38] para RSSFs, tais como:

- Dadas suas limitações de memória, os nós sensores não podem armazenar todos os aplicativos em sua memória local, sendo desejável que possuam um mecanismo para que novos aplicativos sejam transferidos de um nó para outro;
- Deve-se fornecer, também, algum suporte à execução concorrente de aplicativos;
- A quantidade de nós em uma dada rede de sensores pode ser muito grande, tornando difícil a configuração manual de cada nó individual, dessa forma o sistema operacional deve facilitar o desenvolvimento de aplicativos e programação dos nós sensores;

Diversos projetos de sistemas operacionais estão sendo desenvolvidos pela comunidade científica. Dentre estes, destacam-se o TinyOs [31] da Universidade de Berkeley, SensorWare [39] da Universidade da Califórnia e o MantisOs [41] da Universidade do Colorado.

O TinyOS [31], utilizado por uma grande comunidade de usuários, é um escalonador de eventos que provê execução concorrente para RSSF embutidas com recursos de *hardware* escassos, sendo utilizado, principalmente pela arquitetura Motes [55]. As características relevantes do TinyOS estão relacionadas a sua arquitetura baseada em componentes, e seu modelo de concorrência obtido através do uso de eventos e tarefas. Tarefas de um componente são atômicas entre si, executando até seu término, mas podem ser preemptadas por eventos externos. Podem executar comandos de componentes em níveis baixos na hierarquia, sinalizar eventos para componentes em níveis altos e agendar a execução de outras tarefas em um componente. Eventos são generalizações de tratadores de interrupção, propagando processamento para cima na hierarquia (através da sinalização de outros eventos) ou para baixo (por meio da execução de comandos). São executados quando sinalizados, preemptando a execução de uma tarefa ou outro evento.

O SensorWare [39] é um arcabouço para RSSFs. Suas características principais são: mobilidade de código através de *scripts* móveis e separação de funcionalidades correlatas em unidades distintas. *Scripts* móveis são entidades do SensorWare que podem se deslocar de um nó para outro numa RSSF. Executam até um certo ponto num nó e, ao transferir-se para outro, continuam a execução a partir de pontos de entrada bem definidos. A maioria dos comandos e funções são agrupadas em APIs (*Application Programming Interface*) distintas. Elas possuem funcionalidades que fornecem acesso a um recurso ou serviço do nó sensor.

MantisOS [41], é um sistema operacional embarcado para RSSF, baseado em *thread*. MantisOs suporta, *multithreading* em forma preventiva, evitando que uma tarefa de longa duração obstrua a execução de uma segunda tarefa de curta duração. O TinyOs não considera este problema, mas MantisOs resolve isso usando o conceito *thread*.

2.2.3.3 Linguagens de Programação

Durante a criação dos primeiros nós sensores (o primeiro da Família Motes foi lançado em 1999 [42]), a programação desses nós era feita através da linguagem C com rotinas específicas para o *hardware* alvo. Esse tipo de programação lembra muito a construção de *drivers* para dispositivos, e é muito próxima de uma linguagem de montagem.

Surgiram, então, várias abordagens para programação de RSSFs. A mais difundida atualmente é a linguagem NesC [42], que é uma variante da linguagem C, mas que não suporta

a alocação dinâmica de memória, o que facilita a otimização do programa. Os módulos em linguagem NesC expressam tanto a interface entre *software* e *hardware* como as aplicações em si. Essa modularidade permite o reuso de código em várias aplicações, permitindo o menor tempo de desenvolvimento e maior robustez [43].

A programação em NesC é dirigida por eventos, no sentido em que os procedimentos são executados em resposta a interrupções do *hardware* ou por outros módulos. Computações mais complexas são delegadas a abstrações denominadas tarefas, as quais são executadas quando não há eventos a serem tratados. Esse modelo de programação é bastante diferente das linguagens comuns, nas quais existem um fluxo de execução definido [43].

É importante destacar que a linguagem de programação está muito ligada ao sistema operacional e a arquitetura de *hardware* suportada. Em algumas arquiteturas de nós sensores comerciais, principalmente aqueles voltados para aplicações industriais, a linguagem de programação LabVIEW [44] pode ser utilizada, como é o caso dos nós sensores comercializado pela empresa MicroStrain [45].

O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica pertencente à National Instruments, Inc. [44]. O principal campo de aplicação do LabVIEW é na técnica de medição e na automatização. A programação é feita através do modelo de fluxo de dados, que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e sua manipulação. Os programas LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou simplesmente VIs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface; e o bloco de diagramas, que contém o código gráfico do programa. O programa não é lido por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo, o seu desempenho é comparável com o das linguagens de alto nível.

A vantagem de um nó sensor ter suporte a programação LabVIEW é que esta é uma linguagem de domínio dos profissionais da área de automação industrial, facilitando assim a aplicação de RSSF em aplicações industriais.

2.3 Padrão de Comunicação ZigBee

Nos últimos anos, começou-se a reunir esforços no sentido de criar um protocolo globalmente aceito que permita a ligação em rede de sensores, uniformizando o processo de comunicação destes. De fato, há algum tempo que se conhecem vários protocolos para suporte à comunicações sem fio, de média ou alta taxas, como o Bluetooth [47] ou a WLAN, no entanto, só recentemente se começou a pensar num protocolo que atendesse às necessidades específicas das redes pessoais (*Personal Area Networks* - PAN) e das redes domésticas (*Home Area Networks* - HAN) de sensores e dispositivos de controle alimentados por baterias.

É neste contexto que surge o protocolo ZigBee [46], que complementa a norma IEEE 802.15.4 [32], uniformizando as comunicações e garantindo, a confiabilidade e segurança necessárias, bem como a maximização do tempo de vida útil das baterias em tais dispositivos.

O ZigBee é o principal padrão de comunicação adotado em RSSFs. Foi definido por uma aliança de empresas de diferentes segmentos do mercado, chamada ZigBee Alliance [46]. Este padrão foi projetado para permitir comunicação sem fio confiável, com baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão para aplicações de monitoramento e controle [48]. Para implementar as camadas de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) e física (*Physical Layer* - PHY), o ZigBee utiliza a definição 802.15.4 do IEEE, que opera em bandas de frequência livres, no qual os canais são numerados de 11 (2.405GHz) a 26 (2.480GHz), sendo cada canal separado por 5MHz [48]. Ao nível físico, destacam-se duas características importantes:

- Operação em três frequências distintas:
 - 2,4 GHz e uma taxa de 250 KB/s (uso global)
 - 915 MHz e uma taxa de 40 KB/s (América e Austrália)
 - 868 MHz uma taxa de 20 KB/s (Europa)
- Alcance de 10 a 75 metros, dependendo do ambiente (mais especificamente, da presença de obstáculos), da potência de transmissão e da faixa de operação.

A Figura 2.11 ilustra a divisão das camadas de uma rede ZigBee.

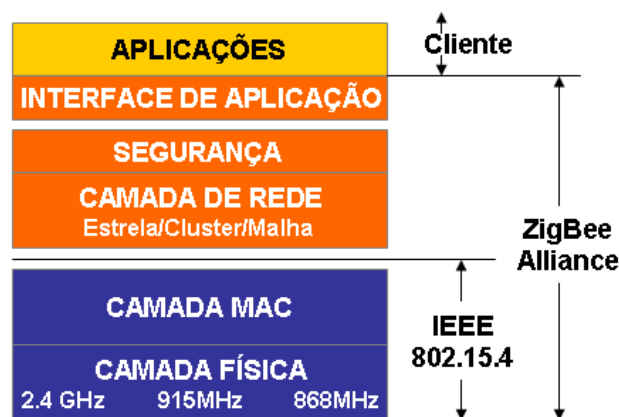


Figura 2.11: Camadas de Protocolos

Complementando a norma IEEE 802.15.4, no que diz respeito às restantes camadas do modelo OSI, o ZigBee tem como principais características o fato de ser um protocolo para aplicações de baixo consumo e de baixo custo. Estas duas características o torna ideal para sistemas de monitoramento e sensoriamento, como é o caso dos sistemas de automação, segurança, controle de iluminação e de acessos, etc.

Em uma rede ZigBee, podem existir três classes de dispositivos lógicos: coordenador, roteador e *endpoint*, os quais podem ser implementados com base em dispositivos físicos das seguintes classes [48]:

- FFD (*Full Function Device*): podem atuar como coordenadores ou roteadores da rede. Caracterizam-se por estarem no modo de recepção sempre que não estiverem transmitindo e possuem maior poder computacional do que os demais dispositivos participantes da rede.
- RFD (*Reduced Function Device*): são implementados com microcontroladores de baixo custo e com pouca memória. Não podem participar de qualquer atividade de roteamento, sendo que podem se comunicar somente com FFDs. Além disso, não podem ser coordenador da rede.

A Figura 2.12 exemplifica diferentes topologias para uma rede ZigBee.

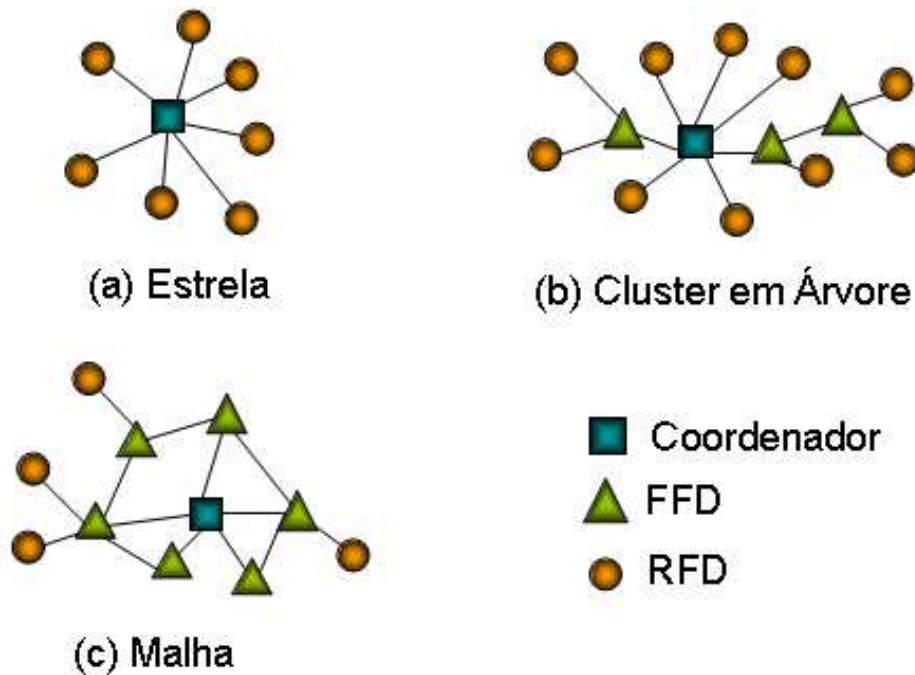


Figura 2.12: Diferentes topologias ZigBee.

O ZigBee é o mais apropriado para aplicações que envolvam dispositivos remotos alimentados por baterias, tais como sensores e atuadores, já que permite baixos consumos, taxas de dados aceitáveis e possui uma pilha protocolar simples que possibilita a sua implementação em sistemas com recursos limitados. Essas características justificam o fato de ser este, o padrão de comunicação mais utilizado na implementação de RSSF.

2.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram abordados conceitos básicos de RSSF, propiciando uma visão geral dessa tecnologia. Alguns aspectos referentes ao nó sensor foram discutidos e características de *hardware* e *software* foram apresentadas.

No próximo capítulo, são apresentados a metodologia utilizada na realização deste trabalho, bem como os principais equipamentos de *hardware* e *software* adotados.

Capítulo 3

Metodologia Adotada nos Experimentos

3.1 Introdução

A metodologia utilizada consistiu na instalação e configuração de uma RSSF, e na realização de testes experimentais nesta rede. Em um primeiro momento, estes testes foram realizados no Laboratório de Instrumentação Virtual (DEIV) do Centro de Tecnologia da Eletronorte. Nesta fase, um *software* de coleta e análise de sinais de vibração foi implementado utilizando a linguagem Labview [44]. Este é responsável por receber (via um nó *gateway*) as medidas de aceleração coletada pelos nós sensores e armazenar estas informações em arquivo. Além disso, em laboratório, foram realizados a calibração dos nós sensores, os testes de precisão destes, os testes de comunicação entre o nó sensor e a estação base e os testes de sensibilidade em frequência. Este último, objetivou analisar a capacidade do sistema de responder satisfatoriamente quando submetido a sinais de diferentes frequências de aceleração.

Em um segundo momento, estando os sensores calibrados e o *software* de monitoramento desenvolvido, foram realizados testes no compensador síncrono 1, em operação na subestação de energia elétrica da Eletronorte, situada em de Vila do Conde, na cidade de Barcarena. Estes testes, objetivaram, basicamente, analisar o comportamento da RSSF em um ambiente industrial real (sujeito a interferências), e validar os testes realizados no laboratório DEIV.

Vale ressaltar que todos os equipamentos de *hardware* utilizados na implementação da RSSF foram cedidos pelo Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) da Universidade Federal do Pará (UFPA) para realização deste trabalho.

A seguir, é apresentada a descrição dos principais *hardwares* e *softwares* utilizados neste estudo de caso, objetivando uma melhor compreensão das atividades desenvolvidas.

3.1.1 O Compensador Síncrono

Os compensadores síncronos (ilustrado na Figura 3.1) são máquinas importantes nos sistemas de transmissão de energia elétrica, têm como função principal manter estável a tensão na linha de transmissão [9], [55]. A falta temporária dessas máquinas pode ocasionar problemas de estabilidade e diminuição da potência transmitida, gerando problemas para empresas concessionárias de energia elétrica, tais como: diminuição de receita, possível escassez de energia, e multas aplicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [49], em caso de paradas não programadas.



Figura 3.1: Compensador Síncrono

Problemas nos compensadores síncronos demandam normalmente muita manutenção por parte das equipes especializadas, seja do tipo manutenção *preditiva*, a qual se procura prever os problemas e atuar de imediato nas suas causas; seja do tipo *preventiva*, em que periodicamente são realizadas intervenções, substituindo peças que se desgastam; ou do tipo *corretiva*, resultando, geralmente, em intervenções demoradas e de alto custo [9].

Atualmente, a empresa Eletronorte dispõe de um sistema de monitoramento de vibração do compensador síncrono, chamado Vibrocomp. Este destina-se a monitorar medidas como vibração do compensador, objetivando a manutenção preditiva. Aumentos na vibração podem indicar a evolução de possíveis problemas mecânicos, geralmente relacionados com desalinhamento, desbalanceamento ou desnivelamento, além de outros problemas específicos em determinados componentes mecânicos, tais como bombas, mancais ou afrouxamento de componentes do estator [9].

O atual sistema implantado utiliza cabos para interligar os sensores a base de dados,

na qual as informações são armazenadas, isto demanda custos adicionais, além de apresentar problemas inerentes a cabeamento, como mau contato nos conectores. Dessa forma, o sistema proposto neste trabalho, que consiste no monitoramento através de RSSF, se apresenta como uma solução alternativa de monitoramento industrial, principalmente em casos onde instalar uma infraestrutura com sensores cabeados se torne proibitiva, devido aos problemas já citados.

3.1.2 Modelos de nós sensores

Foram utilizados (separadamente) dois modelos distintos de nós sensores na realização de testes comparativos para implantação da RSSF - o modelo MicaZ, da empresa Crossbow Technology Inc. [30] e o modelo G-Link da empresa MicroStrain Inc. [45]. Estes são os modelos de nós sensores mais difundidos comercialmente. A seguir é apresentada uma descrição destes.

3.1.2.1 Modelo MicaZ

Pertence à família de nós sensores mais versátil disponível para construção de protótipos. Este dispositivo é composto de um microcontrolador de alto desempenho e baixa potência, o ATmega128L [50], operando a 4MHz. Possui 128kB para memória de programa (FLASH), 4kB de memória de dados (SRAM) e 512kB de memória de armazenamento (FLASH serial, externa ao microcontrolador, que comporta acima de 100.000 medições dos sensores) [36]. O Micaz mede 5,7cm x 3,1cm x 1,8cm e é alimentado comumente por duas pilhas alcalinas AA.

As grandezas físicas monitoradas são lidas pelo Micaz através de conversores analógico/digitais e canais digitais, os quais são conectados à placas de sensores, como por exemplo a placa MTS310CA [51], que contém sensores de temperatura, som, luz, aceleração e vibração.

Para a comunicação sem fio, o Micaz utiliza o padrão de comunicação ZigBee (descrito na seção 2.3) e o rádio ChipCon CC2420 [52] com taxa de transmissão de até 50 Kbps, frequência de operação programável entre 2400MHz a 2483,5MHz e potência de transmissão ajustável entre 0dBm e 25 dBm, cujo alcance pode chegar a dezenas de metros em campo aberto [36]. Utilizou-se, neste estudo de caso, frequência de transmissão de 2,048GHz e potência de transmissão de 25dBm, as quais são configurações padrão do Micaz. A extração de informações da rede foi realizada através do *gateway* MIB510 [36]. Este permite a conexão do computador (estação base) à RSSF, via porta serial. A Figura 3.2 apresenta os equipamentos da RSSF utilizados nos experimentos:

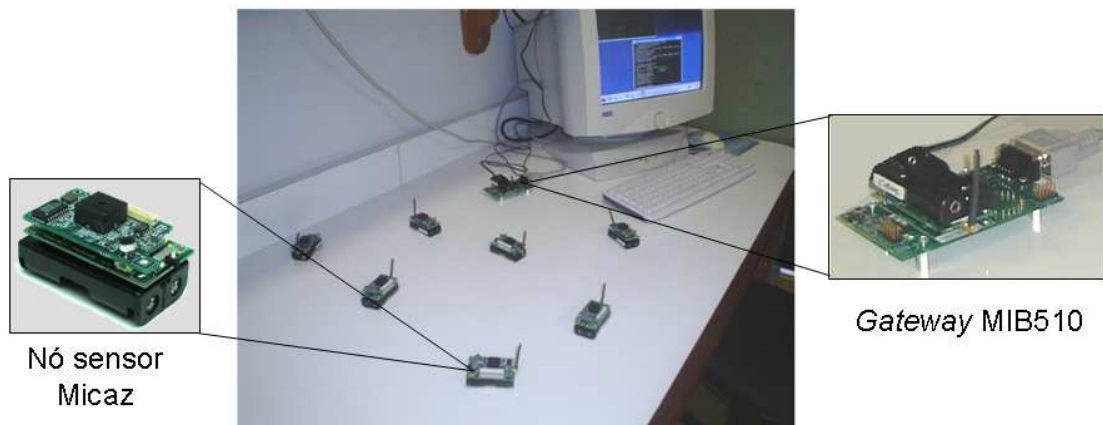


Figura 3.2: RSSF com nó sensor MicaZ

O MicaZ possui uma completa plataforma de *software*, composta pelo sistema operacional TinyOS, e uma completa pilha protocolos, que permite ao programador alterar parâmetros diversos, objetivando testes na rede. Por outro lado, essa característica leva a uma complexa programação dos nós sensores, já que o programador precisa se preocupar com outras configurações, além da sua aplicação.

3.1.2.2 Modelo G-Link

A empresa MicroStrain [45] comercializa modelos de sensores sem fio bem mais fáceis de configurar e programar, comparados com os modelos MicaZ. Também utiliza o padrão de comunicação Zigbee (mais detalhes na seção 2.3). Há três tipos de nós sensores - S-Link (Gauge Strain), G-Link (Acelerômetro), e V-Link (suporta qualquer sensor que gera diferenças de tensão).

Neste estudo de caso, utilizou-se o nó sensor G-Link, capaz de medir aceleração de $\pm 10g$. Este nó sensor tem uma EPROM pré-programada, assim não é necessário uma maior programação por parte do usuário. Suporta armazenamento *onboard* de dados de 2MB. É alimentado por uma bateria interna de íon de lítio de 3,6V. Mede 5,8cm x 4,3cm x 2,6cm. Cada nó tem um endereço original de 16 bits. A comunicação de rádio-frequência entre a estação base e os nós sensores é bidirecional e os nós sensores têm uma taxa programável de amostra de dados. Essa comunicação tem um alcance médio de 70 metros. Este nó sensor permite a programação utilizando a Linguagem LabVIEW, a qual é uma linguagem bastante difundida na área de controle e automação industrial.

A Figura 3.3 ilustra o nó sensor G-Link e o nó *gateway* de comunicação com a estação base, utilizados neste experimento.



(a) Nó sensor G-Link

(b) Gateway

Figura 3.3: Equipamentos utilizados na montagem da RSSF G-Link

3.2 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado a visão geral de como este trabalho foi realizado, através da descrição da metodologia adotada.

No próximo capítulo, serão descritos os testes experimentais realizados com o intuito de analisar o comportamento da RSSF em um ambiente de subestação e os resultados obtidos.

Capítulo 4

Testes Experimentais e Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados diversos testes em RSSF, voltados para aplicações em ambientes industriais. Como estudo de caso, é implementado um sistema de monitoramento de máquinas, o qual é responsável por monitorar medidas de aceleração de uma máquina rotativa, chamada compensador síncrono. Fatores como interferência, alcance de transmissão, confiabilidade da comunicação e precisão dos sensores são analisados.

4.2 Estudo de Precisão dos Sensores

Ao se pensar em um sistema de monitoramento industrial utilizando RSSF, o primeiro questionamento que surge, está relacionado com a precisão dos nós sensores sem fio. Dessa forma, buscou-se analisar neste estudo se os nós sensores sem fio seriam tão precisos e confiáveis quanto os sensores tradicionais, já utilizados na empresa Eletronorte. Com esse objetivo, realizou-se vários testes comparativos entre os nós sensores sem fio, e os sensores tradicionais, submetendo-os a diferentes sinais de vibrações.

Inicialmente, planejava-se implantar o sistema de monitoramento utilizando o modelo de nó sensor MicaZ (descrito na seção 3.1.2.1), pois este era o único nó sensor disponível para testes, até o momento. Dessa forma, os primeiros testes foram realizados com o sensor de aceleração ADXL202E, presente na placa de sensores MTS-310 [51], que acompanham o nó sensor MicaZ. A Figura 4.1 ilustra esta placa.



Figura 4.1: Placa de sensores MTS-310

Estes sensores possuem uma faixa de aceleração de $\pm 2g$, com uma sensibilidade de $2mg$. Considerando que os compensadores síncronos apresentam uma aceleração média inferior a $1g$, essas características atenderiam aos requisitos para monitoramento do compensador síncrono. No entanto, os testes com o sensor de aceleração do modelo MicaZ não apresentaram resultados satisfatórios, quando comparados com os sensores de aceleração tradicionais. Os resultados divergiram bastante, mostrando imprecisão dos sensores. Além disso, estes também apresentaram falhas de comunicação frequentes para distâncias pequenas, em torno de $10m$.

Diante disso, a Universidade Federal do Pará, adquiriu outro modelo de nós sensores sem fio, específicos para aplicações industriais: o módulo G-link, da empresa MicroStrain Inc, descrito na seção 3.1.2.2. Com essa nova aquisição foi possível a continuação dos testes visando aplicações industriais.

O sensor de aceleração G-Link apresenta faixa de aceleração de $\pm 10g$, com sensibilidade $10mg$. A calibração e o teste de precisão do sensor G-Link foi realizada utilizando o equipamento chamado, Shaker DI-813 da empresa Hardy Instruments. Este equipamento possui um gerador de vibração, sendo possível configurar a frequência e a amplitude da vibração gerada, bem como visualizar sua forma de onda (através do osciloscópio).

O esquema de calibração foi montado fixando o nó sensor G-Link no Shaker DI-813, sendo que o sinal gerado pelo shaker foi visualizado no osciloscópio, conforme mostrado na Figura 4.2.

Diferentes valores de frequência e amplitude de aceleração foram configurados no shaker e enviados pelo nó sensor sem fio para a estação base, localizada a $10m$ de distância. Este teste foi realizado no Laboratório de Instrumentação Virtual da Eletronorte (DEIV).



Figura 4.2: Esquema de ligação nó sensor, shaker e osciloscópio.

A estação base é responsável por disponibilizar as informações recebidas (do nó sensor) para o usuário do sistema. A Figura 4.3, mostra o nó *gateway* e o computador (estação base) utilizados nos testes.



Figura 4.3: Esquema de ligação nó *gateway* e estação base.

Os resultados comparativos, entre os valores de aceleração medidos no osciloscópio e os valores recebidos na estação base, mostraram que os nós sensores sem fio G-Link apresentam, inicialmente, precisão satisfatória, tornando sua utilização adequada para sistemas de monitoramento implementados na Eletronorte. Dessa forma, os testes seguintes foram realizados utilizando apenas este modelo de nó sensor.

4.3 O *Software* WSensor Networking

O *software* WSensor Networking foi desenvolvido especificamente para realização de experimentos utilizando o módulo G-Link. Constitui-se em um *software* de coleta e análise de sinais vibratórios. É responsável por realizar a comunicação entre a estação base e a RSSF. Foi desenvolvido com a linguagem Labview 7.1, utilizando as bibliotecas disponibilizadas pela empresa MicroStrain, Inc. A Figura 4.4 apresenta o *software* WSensor Networking.

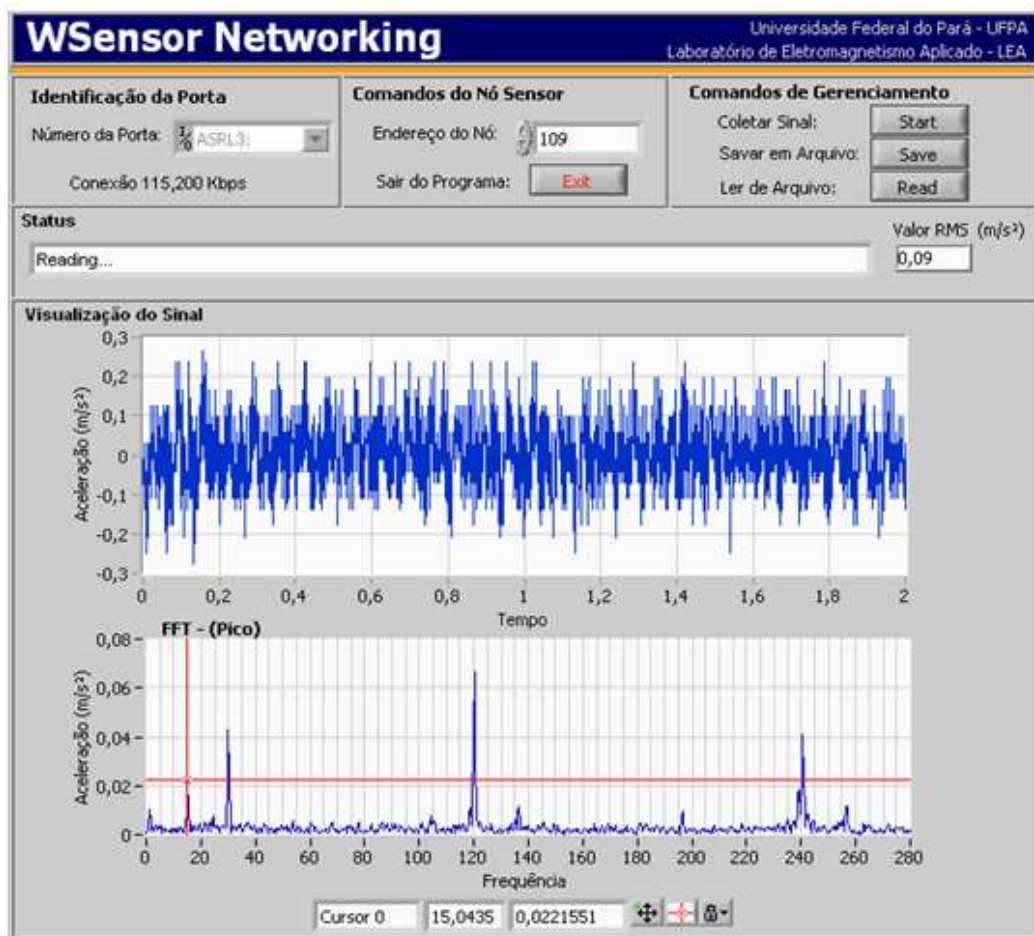


Figura 4.4: Tela do *Software* WSensor

Seu desenvolvimento foi necessário, pois o *software* que acompanha o modelo G-Link, chamado AgileLink, não fornece a visualização das medidas de aceleração em unidades válidas, por exemplo em “g” ou “m/s²”. Este *software* fornece uma relação de aceleração que deve ser calibrada. Além disso, ele não permite a coleta de informações em tempo real e modo contínuo, além de não permitir uma análise do sinal no domínio da frequência.

Dessa forma, objetivando suprir essas necessidades, o *software* WSensor foi desenvolvido e apresenta as seguintes funções e características:

- Funções básicas:
 - Permite leituras do sinal de vibração em modo contínuo e em tempo real;
 - Exibe o sinal de vibração coletado de forma gráfica, já convertido para “g” ou “m/s²”;
 - Fornece análise espectral FFT em função da frequência de trabalho (Hz) e da amplitude do sinal vibratório em aceleração em tempo real;
 - Armazena o sinal coletado em um arquivo com extensão *.txt*, para análise posterior;
 - Permite a leitura do arquivo salvo e sua visualização de forma gráfica;
- Principais Características:
 - Ler as informações da RSSF da porta serial (RS-232) ou USB, conforme selecionado via programa;
 - Permite a comunicação com um único nó sensor por vez, pois a rede utilizada possuía apenas um nó sensor. Este é selecionado através do seu endereço, que é especificado de fábrica, mas pode ser alterado via programa;
 - Utiliza uma taxa de amostragem de 736 amostras/seg., a qual é especificada pelas bibliotecas do modelo G-Link;
 - Em cada ciclo de trabalho, coleta 2000 amostras. Esse valor foi escolhido, para ser compatível com o *software* Vibrocomp, mas pode ser facilmente alterado;

O nó sensor G-Link é pré-programado de fábrica, dessa forma, sua programação é facilitada, pois esta baseia-se em comandos enviados para a rede, por exemplo para executar o comando *ping* envia-se comando 0x02, seguido do endereço do nó sensor. Em anexo está a lista dos principais comandos para acessar as informações da RSSF.

4.4 Teste de Sensibilidade de Frequência

Neste teste, avaliou-se a capacidade do sistema de responder satisfatoriamente quando submetido a sinais de diferentes frequências de aceleração.

Este teste foi realizado no Laboratório de Calibração de Transdutores de Vibração (CAME) da empresa Eletronorte, através de um levantamento de resposta em frequência. Esse levantamento foi implementado pelo método de calibração secundária, caracterizado pela comparação do sensor que está sendo medido, com um padrão de referência, sendo ambos

submetidos à mesma vibração. No laboratório CAME, este padrão é rastreado periodicamente a padrões primários no INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), dessa forma garantindo a confiabilidade metrológica das medições.

Os resultados mostraram que o nó sensor G-Link apresenta um melhor desempenho quando trabalha na faixa entre 10Hz e 90Hz, pois nesse intervalo a variação de aceleração foi de $\pm 10\%$ em relação à aceleração padrão. Essa variação foi obtida através da média entre a aceleração em 10Hz (que foi $8,5\text{m/s}^2$) e a aceleração em 90Hz (que foi $6,5\text{m/s}^2$), dessa forma tem-se:

$$V = \frac{(8,5 - 6,5)}{2} = 1 \quad (4.1)$$

Onde V, que é a variação do nó sensor, corresponde a cerca de 10% do valor de $9,8\text{m/s}^2$ do valor padrão.

A Figura 4.5 mostra os resultados obtidos em cada frequência. A partir da frequência de 100Hz, a variação entre o valor do nó sensor e o valor padrão aumentaram, não sendo recomendada a utilização do nó sensor sem fio nessas frequências

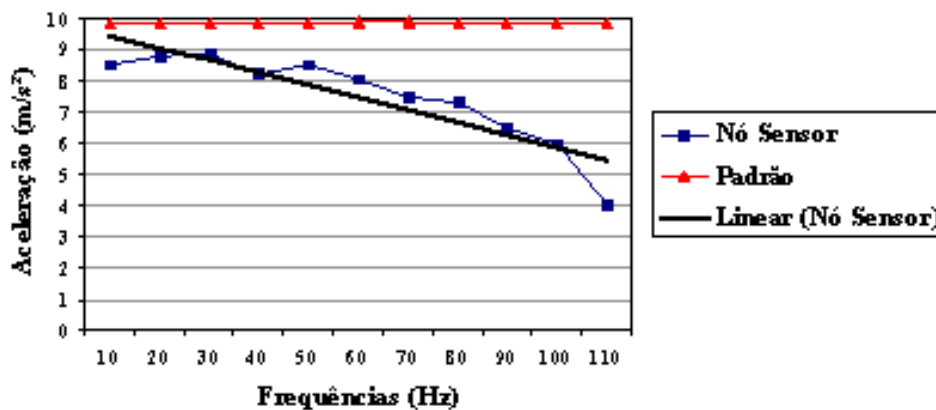
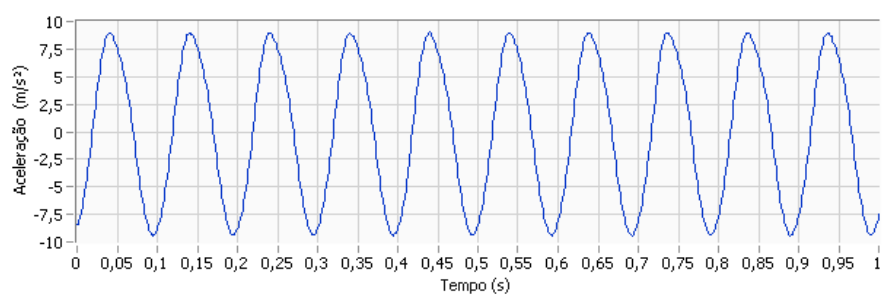
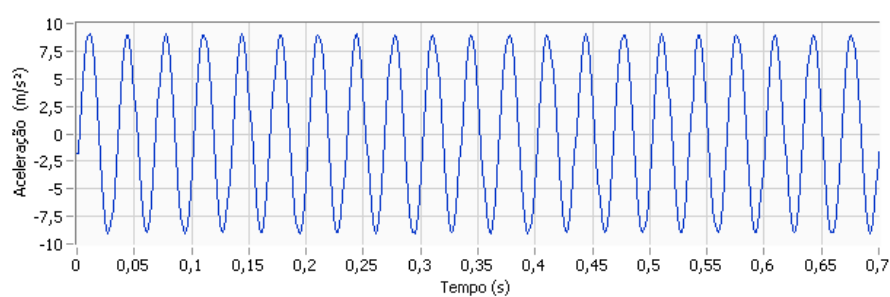


Figura 4.5: Resultados do teste de variação da frequência de aceleração.

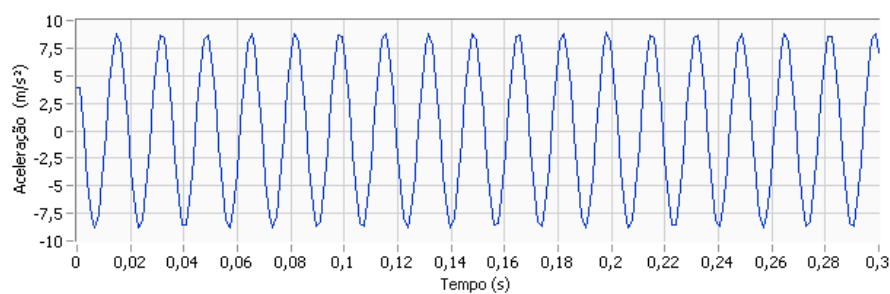
Além disso, os resultados evidenciam que este nó sensor é melhor aplicado em máquinas que trabalhem em uma frequência fixa, onde seria necessário monitorar apenas a amplitude da aceleração, como é o caso dos compensadores síncronos, que vibram na frequência 15Hz. A Figura 4.6 mostra algumas medidas coletadas pelo nó sensor, como resposta a um sinal de aceleração de $9,8\text{m/s}^2$, em diferentes frequências.



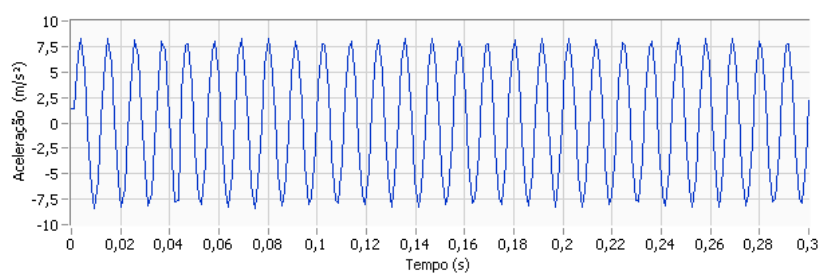
(a) Aceleração de 10Hz



(b) Aceleração de 30Hz



(c) Aceleração de 60Hz



(d) Aceleração de 90Hz

Figura 4.6: Resultados do teste de variação da frequência de aceleração.

Dessa forma, um fator de correção de 1,2 foi aplicado à calibração do nó sensor objetivando uma maior precisão dos sensores. Esse fator de correção foi obtido através da média dos valores de aceleração medido pelo nó sensor, dividido pela média dos valores medidos pelo padrão.

De modo geral, pode-se dizer que os resultados do teste de sensibilidade de frequência foram satisfatórios, pois o nó sensor G-Link se mostrou eficiente na coleta de sinais de aceleração dentro da faixa de 10Hz a 90Hz. Podendo ser este, aplicado no monitoramento de máquinas baixas frequências de vibração. Nesse contexto, a RSSF implementada atende aos requisitos de sistemas de monitoramento de compensador síncrono em subestação, no que se refere à sensibilidade de frequência e precisão dos sensores.

4.5 Teste no Compensador Síncrono-1 em Vila do Conde

Após os testes de precisão e de sensibilidade de frequências dos sensores sem fio, realizados em laboratório, efetuou-se os testes no compensador síncrono-1 na subestação da Eletronorte, em Vila do Conde. O objetivo deste teste experimental foi analisar o comportamento da RSSF em um ambiente industrial real, caracterizado pela presença de possíveis elementos interferentes.

Foram realizadas medidas comparativas entre a RSSF e os sensores tradicionais (cabeados), através do analisador e medidor de aceleração, modelo CMVA60 da empresa SKF. Também foram utilizadas medidas comparativas com o sistema Vibrocomp, atualmente implantado. A Figura 4.7 ilustra este esquema de medição utilizando o medidor e analisador de aceleração SKF.

Para receber o sinal de aceleração do nó sensor, a estação base foi instalada na sala de operação do compensador síncrono, a cerca de 40m de distância do nó sensor. Esta sala é construída em concreto e com portas de ferro. As Figuras 4.8 e 4.9 ilustram o posicionamento do compensador síncrono e a sala de operação, onde foi instalada a estação base.



Figura 4.7: Esquema de medição utilizando o medidor e analisador de aceleração



Figura 4.8: Visão do compensador síncrono (à esquerda) e da sala de operação (à direita)

Inicialmente, acreditou-se que as características da sala e a distância de 40m entre a estação base e o nó sensor tornaria proibitiva a realização do teste nesta configuração, mas como este foi o local mais próximo encontrado, insistiu-se nesta configuração para realização dos testes.

A estação base e o nó *gateway* (receptor do sinal) foram posicionados no final da sala de operação. Colocou-se o nó *gateway* em cima dos armários para que este pudesse captar mais facilmente o sinal, conforme mostrado na Figura 4.10.

Na estação base foi instalado o *software* WSensor para receber e analisar o sinal de aceleração coletado pelo nó sensor. Dois pontos de medição foram utilizados. Na parte externa do compensador e interna, chamada *anel coletor*.

Conforme dito anteriormente, utilizou-se o esquema de configuração na qual estação



Figura 4.9: Visão interna da sala de operação do compensador síncrono



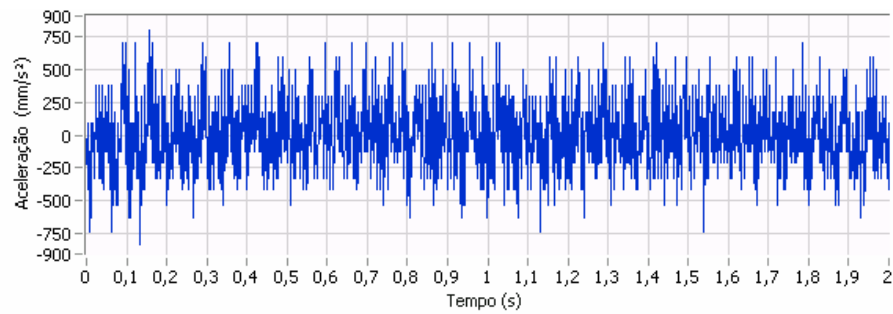
Figura 4.10: Conexão com a estação base

base foi posicionada dentro da sala de operação do compensador, a 40m de distância do nó sensor. Nesta posição, a comunicação da RSSF apresentou, pequenas falhas, ficando algumas vezes sem comunicação, até se estabilizar.

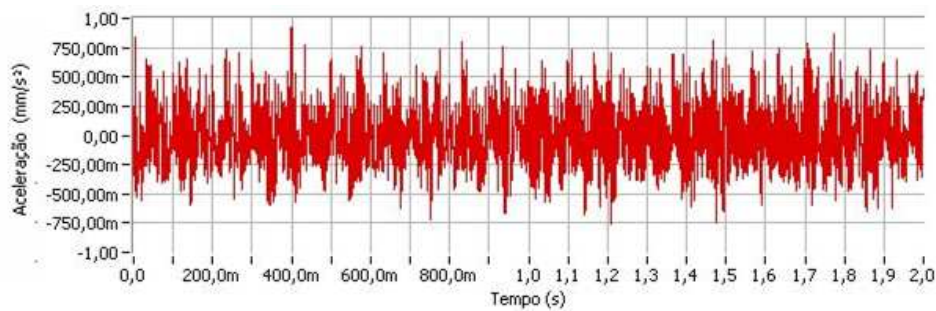
Algumas mudanças no posicionamento do nó *gateway* foram necessárias para encontrar a melhor posição de recepção do sinal. Após estes ajustes, a comunicação da RSSF foi estabelecida satisfatoriamente, mesmo diante dos obstáculos.

Dessa forma, o sinal de aceleração do nó sensor foi medido e analisado. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a comparação do sinal de aceleração entre o sensor e o sistema Vibrocomp, no tempo e na frequência.

Observa-se nos gráficos da Figura 4.11 que o sinal coletado pelo nó sensor e pelo Vibrocomp apresentam características similares no tempo. Na Figura 4.12 é apresentada uma visualização mais detalhada do sinal no domínio da frequência.

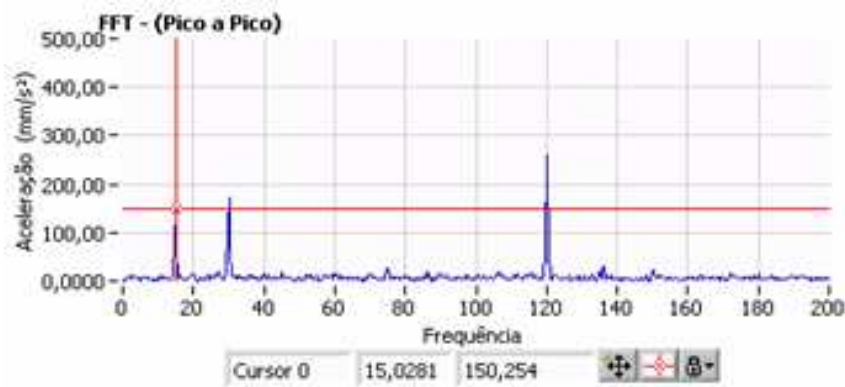


(a) Medidas do nó sensor



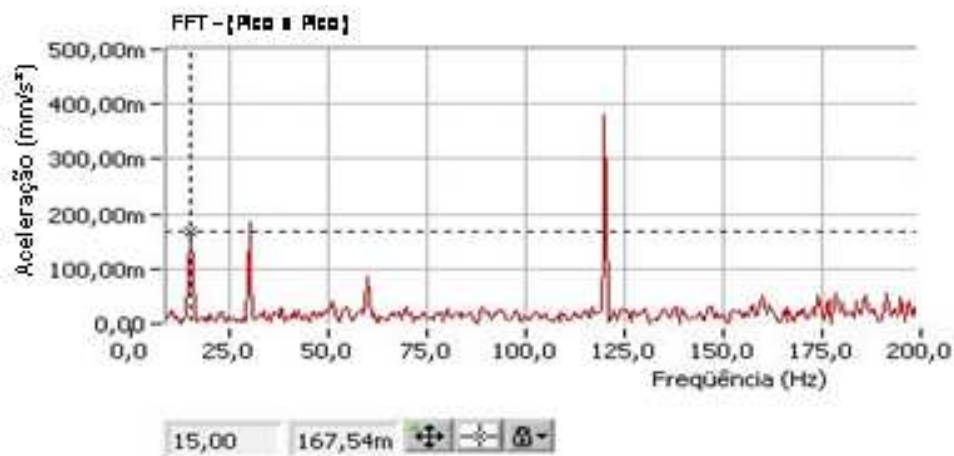
(b) Medidas do sistema Vibrocomp

Figura 4.11: Medidas externas ao compensador no domínio do tempo



(a) Medidas do nó sensor

O resultado da análise do sinal de aceleração, obtido pelo nó sensor, apresentou pequenas diferenças de amplitude comparado com as medidas do Vibrocomp. Observando o gráfico de aceleração, e realizando uma análise na frequência de 15Hz, a qual é a frequência de vibração do compensador síncrono, a aceleração apresentada foi de $150,254 \text{ mm/s}^2$, enquanto que a medida pelo sistema Vibrocomp foi $167,54 \text{ mm/s}^2$. Essa diferença deve-se a calibração do nó sensor, para se alcançar uma precisão melhor do sinal seria necessário uma nova calibração, considerando especificamente a frequência de 15Hz. De qualquer forma esta diferença



(b) Medidas do sistema Vibrocomp

Figura 4.12: Medidas externas ao compensador no domínio da frequência

não influencia de forma comprometedora no monitoramento do compensador síncrono.

Além das acelerações presentes na frequência de 15Hz, outras acelerações foram observadas na frequência de 120Hz, a qual corresponde ao ruído mecânico da máquina. Vale ressaltar que o nó sensor não apresentou ruído elétrico, caracterizado pelo sinal de aceleração na frequência de 60Hz.

O segundo ponto de medição, corresponde a parte interna ao compensador síncrono, no anel coletor, conforme mostrado a Figura 4.13.

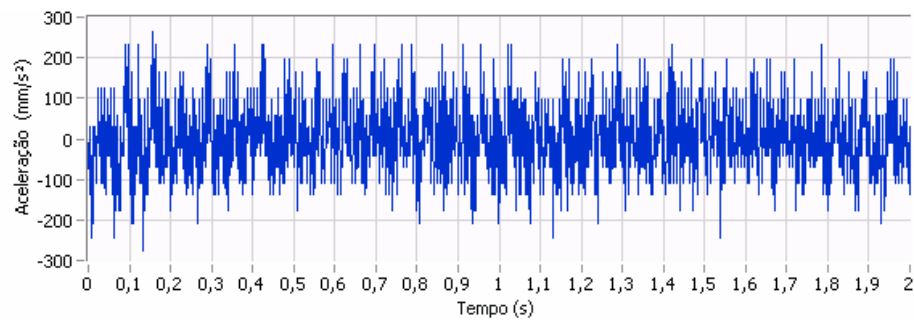


Figura 4.13: Posicionamento dos sensores internos ao compensador.

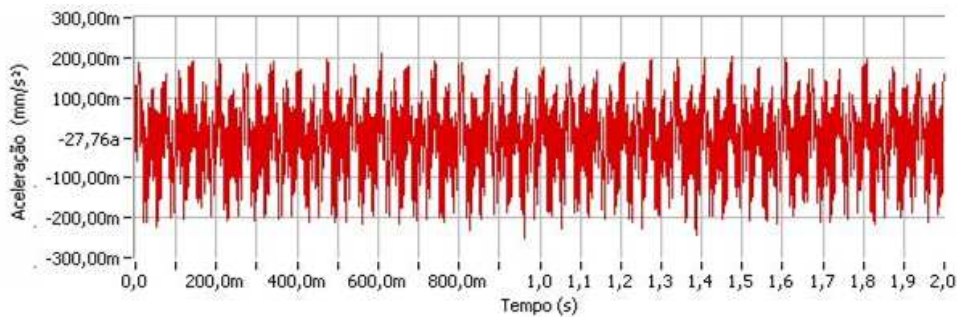
Neste teste, a comunicação entre a estação base e o nó sensor não foi estabelecida,

considerando a configuração inicialmente adota, da estação base localizada dentro da sala de operação do compensador. Isto, deve-se ao fato de que o anel coletor é todo revestido de ferro, dificultando a saída do sinal. Diante disso, uma nova configuração foi adotada posicionando a estação base fora da sala de operação (deixando-a mais próxima do compensador) e mantendo a porta do compensador aberta.

Nestas condições foi possível realizar as medições e os resultados são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15



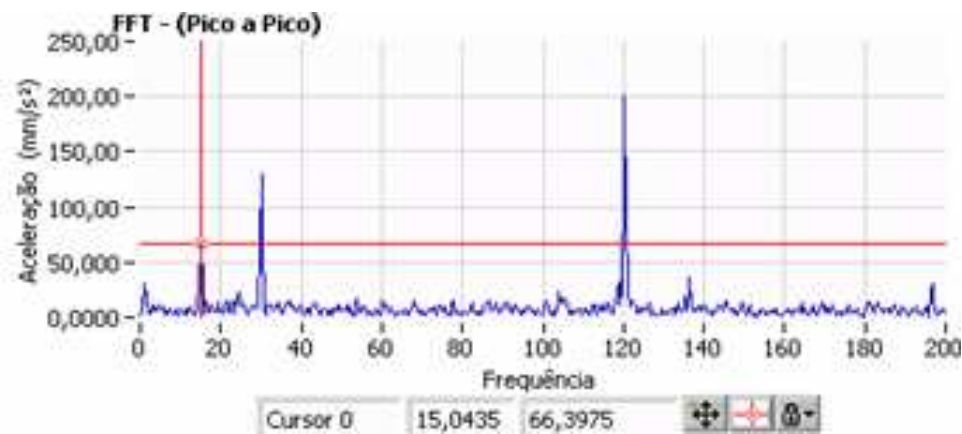
(a) Medidas do nó sensor



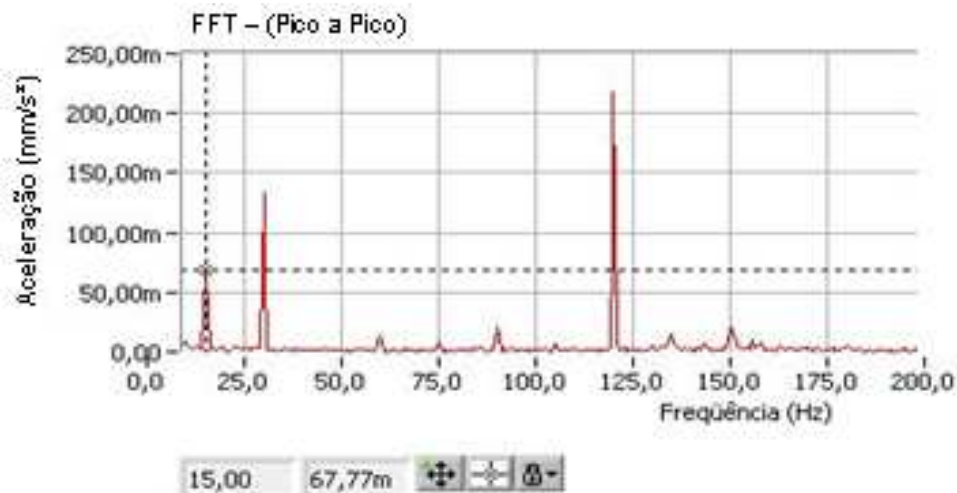
(b) Medidas do sistema Vibrocomp

Figura 4.14: Medidas internas ao compensador, no domínio do Tempo

Observa-se nos gráficos da Figura 4.14 que o sinal coletado pelo nó sensor e pelo Vibrocomp apresentam as mesmas características no tempo, no entanto, um análise mais detalhada do sinal pode ser obtida da FFT do sinal, conforme mostrado na Figura 4.15.



(a) Medidas do nó sensor



(b) Medidas do sistema Vibrocomp

Figura 4.15: Medidas da parte interna do compensador, no domínio da frequência

Novamente, a comparação entre ambos os gráficos mostra uma pequena diferença nas medidas coletadas. No entanto, a relação de variação foi mantida mostrando que a RSSF pode se adequar a um ambiente industrial, pois os valores coletados pelos nós sensores apresentarem bons resultados, e a comunicação na RSSF foi estabelecida com sucesso.

4.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais testes e resultados experimentais realizados com RSSF, com o objetivo de analisar a viabilidade de implantação desta tecnologia em ambientes industriais, como solução alternativa em ambientes que seja custoso ou proibitivo (devido à dificuldade de acesso) implantar um sistema de monitoramento por meio de sensores

cabeados. Foram realizados testes de precisão e de sensibilidade de frequência de sensores sem fio, bem como testes em uma subestação de energia elétrica, através do monitoramento de um compensador síncrono. Um *software* de coleta e análise de sinais de aceleração foi implementado para possibilitar a coleta, armazenamento e leitura de sinais de aceleração, além de realizar a análise do sinal no domínio do tempo e da frequência.

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões referentes aos estudos de RSSF e os planos futuros.

Considerações Finais e Planos Futuros

As RSSF representam, sem dúvida, um ramo de pesquisa com grande potencial de aplicação em diferentes áreas, principalmente na área industrial. Diversas são as vantagens de utilização dessa tecnologia no monitoramento industrial, vantagens estas que envolvem redução de custos com cabeamento, facilidade de implantação de sistemas de monitoramento e flexibilidade dos pontos de medição. Entretanto, várias questões referentes à precisão e tolerância à falhas dos nós sensores são requeridas em tais aplicações, podendo ser estes fatores limitantes para utilização de tal tecnologia. Neste contexto, diversos testes experimentais voltados para aplicações industriais foram realizados, objetivando analisar RSSF nestes ambientes.

Os resultados dos testes de precisão, comunicação, e comportamento em ambiente industrial real, apresentados neste trabalho evidenciaram a viabilidade de implantação desta tecnologia em ambientes industriais. Sendo, importante destacar, que RSSF ainda apresentam muitas restrições de aplicabilidade, principalmente no que se refere à interferências. Desse modo, é necessária a análise adequada do ambiente onde a rede será instalada, bem como a escolha dos equipamentos que serão utilizados na montagem da rede e a sua configuração, que envolve local de implantação do nó sensor e da estação base, taxa de transmissão, frequência de amostragem do sinal, potência de transmissão, entre outras. Já existem disponíveis no mercado antenas com alcance de transmissão maior (cerca de 300m) que podem ser acopladas aos nós sensores.

De modo geral, os resultados dos testes utilizando os modelos de nós sensores G-Link da empresa MicroStrain, apresentaram bom desempenho em ambientes industriais, principalmente se forem comparados com os nós sensores MicaZ, da empresa CrossBow.

Como todo trabalho prático e pioneiro, muitas foram as dificuldades encontradas durante o mesmo. Dentre as quais se destacam a escassa documentação existentes sobre os modelos de nós sensores utilizados, e mesmo os manuais disponibilizados pelos fabricantes apresentam muitas lacunas. Dessa forma, diversas vezes, recorreu-se ao suporte dos fabricantes para esclarecimentos de dúvidas e problemas mais específicos. Outra dificuldade esteve relacionada a divergências entre a especificação técnica dos equipamentos e seu comportamento

na prática, levando muitas vezes à adaptações. Além disso, os equipamentos utilizados na montagem da RSSF não são comercializados no Brasil, por isso muito tempo foi gasto com a especificação nós sensores e o processo de importação.

Como planos futuros, pretende-se continuar com os estudos em RSSF, avaliando, por exemplo o comportamento da rede com mais de um nó sensor, e explorando métricas de qualidade de serviço. Pretende-se ainda, a realização de intercâmbio com outros grupos de pesquisa que desenvolvam trabalhos relacionados com RSSF, a exemplo do grupo SensorNet da Universidade Federal de Minas Gerais, onde trabalhos com projeto e implementação de *softwares* para RSSF poderão ser realizados.

Referências Bibliográficas

- [1] Haenggi, M., *Opportunities and Challenges in Wireless Sensor Networks*. In Ilyas, M., Mahgoub, I. (Editors), *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, New York: CRC Press, 2005.
- [2] Shen, C., Jaikaeo, C., Srisathapornphat, C., *Sensor Networks Architecture and Applications*. In Ilyas, M. , Mahgoub, I. (Editors), *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, New York: CRC Press, 2005.
- [3] R. Franck *Understanding Smart Sensors*, 2^a Ed., London: Artech House, 2003.
- [4] E. H. Callaway Jr., *Wireless Sensor Networks - Architectures and Protocols*, New York: AUERBACH, 2004.
- [5] Bulusu, N., Jha, S., *Wireless Sensor Networks - A Systems Perspective*, London: Artech House, 2005.
- [6] Aakvaag, N., Mathiesen, M., Thonet, G., “Timing and Power Issues in Wireless Sensor Networks - an Industrial Test Case”, *Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW’05)*, IEEE.
- [7] Jiang, P., Ren, H., Zhang, L., Wang, Z., Xue, A., “Reliable Application of Wireless Sensor Networks in Industrial Process Control”, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE, June, 2006, Dalian, China.
- [8] Shen, X., Wang, Z., Sun, Y., “Wireless Sensor Netowrks for Industrial Applications”. *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, P.R., China, June, 2004.
- [9] Brammati, N., “Desenvolvimento e Implantação de Sistema de Monitoração *On-Line* de Compensadores Síncronos.”. *Dissertação de Mestrado*. Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Pará. Belém, PA, Brasil. Dezembro, 1993.

-
- [10] Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletronorte, [http : //www.eln.gov.br](http://www.eln.gov.br). Janeiro, 2007.
 - [11] Perillo, M. A., Heinzelman, W. B. *Wireless Sensor Network Protocols*. In Boukerche, A. (Editor) Handook of Algorithms for Wireless Netwoking and Mobile Computing, volume 1, chapter VIII, Canada: Chapman and Hall/CRC, 2005.
 - [12] Chandrakasan et al. Design considerations for Distributed Microsensor Systems, *IEEE 1999 Custom Integrated Circuits Conf.*, 279-286, San Diego, May 1999.
 - [13] Feng, J., Koushanfar, F. and Potkonjak, M., System-Architectures for Sensor Networks Issues, Alternatives, and Directions, *IEEE ICCD'02,: VLSI Computers Processors*, 226-231, Freiburg, Germany, 2002.
 - [14] Heinzelman, W., Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Networks, Ph.D., *Dissertation, Massachusetts Institute of Technology*, June 2000.
 - [15] Sobeih et al., “J-Sim: A Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks”. *IEEE Wireless Communications*, volume 13, nº 4, August, 2006.
 - [16] Cook, B. W., Lanzisera, S. and Pister, K. S. J., “SoC Issues for RF Smart Dust”. *Proceedings of the IEEE*, volume 94, nº 6, June, 2006.
 - [17] Culler et al., “Overview of Sensor Networks”. *Published by the IEEE Computer Society*, pp. 41-49, August, 2004. Downloaded: www.computer.org.
 - [18] Ribeiro, A., Freitas, L. C., Francês, R., Costa, J. W., “SensorBus: A Middleware Model fo Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the 3rd IFIP/ACM Latin America Networking Conference*, ACM Press, Colombia, Outubro 2005.
 - [19] Loureiro et al., “Redes de Sensores Sem Fio”. *22º Congresso Brasileiro de Computação (SBC'02)*, pp. 193-234, Florianópolis, SC, Brasil. Tutorial.
 - [20] Nakamura, E., Figueredo, C., Loureiro, A., *Information Fusion Algorithms for Wireless Sensor Networks*. In Boukerche, A. (Editor) Handook of Algorithms for Wireless Netwoking and Mobile Computing, volume 1, chapter VIII, Canada: Chapman and Hall/CRC, 2005.
 - [21] Wang, Q., Hassanein, H.. and Xu, K., *A Pratical Perspective on Wireless Sensor Networks*, In Ilyas, M. , Mahgoub, I. (Editors) Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, New York: CRC Press, 2005.

-
- [22] He et al. “Energy-Efficient Surveillance System Using Wireless Sensor Networks”. *MobiSYS’04*, June, 2004, Boston, Massachusetts, USA.
 - [23] Chen, C., Ma, J., Yu, K., “Designing Energy-Efficient Wireless Sensor Networks with Mobile Sinks”. *WSW’06 at Sensys’06*, October 31, 2006, Boulder, Colorado, USA.
 - [24] Gupta et al., “Connected Sensor Cover: Self-Organization of Sensor Networks for Efficient Query Execution”, *MobiHoc’03*, June, 2003, Annapolis, Maryland, USA.
 - [25] Iftode, L., Borcea, C., Kang, P., *Cooperative Computing in Sensor Networks*, In Ilyas, M., Mahgoub, I. (Editors) Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, New York: CRC Press, 2005.
 - [26] Singh, M., Prasanna, V., *Distributed Collaborative in Wireless Sensor Systems*, In Boukerche, A. (Editor) Handbook of Algorithms for Wireless Networking and Mobile Computing, volume 1, chapter VIII, Canada: Chapman and Hall/CRC, 2005.
 - [27] Feng, J., Koushanfar, F. and Potkonjak, M., *Sensor Networks Architecture*, In Ilyas, M., Mahgoub, I. (Editors) Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, New York: CRC Press, 2005.
 - [28] Vieira, L. F. M., “Middleware para Sistemas Embarcados e Rede de Sensores”, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, Abril de 2004.
 - [29] Hollar, A., (Berkeley), *COTS Dust: Large Scale Models for Smart Dust*, [http : //www – bsac.eecs.berkeley.edu/archive/users/hollar – seth/macro_motes/macromotes.html](http://www.bsac.eecs.berkeley.edu/archive/users/hollar-seth/macro_motes/macromotes.html), Janeiro 2007.
 - [30] CrossBow Technology Inc. [http : //www.xbow.com](http://www.xbow.com) Janeiro 2007.
 - [31] TinyOs Community Forum. [http : //www.tinyos.net](http://www.tinyos.net) Janeiro 2007.
 - [32] Padrão IEEE 802.15.4. [http : //www.ieee802.org/15/](http://www.ieee802.org/15/) Janeiro 2007.
 - [33] Jet Propulsion Laboratory. [http : //sensorwebs.jpl.nasa.gov/](http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/) Janeiro 2007.
 - [34] WINS - Wireless Integrated Network Sensors [http : //www.janet.ucla.edu/WINS/](http://www.janet.ucla.edu/WINS/). Janeiro 2007.
 - [35] Savvides, A., Srivastava, M. B., A distributed computation platform for wireless embedded sensing. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors (ICCD’02)*

-
- [36] *MPR/MIB User's Manual*. Document 7430-0021-07. Rev. A, September, 2005. [http : //www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MPR – MIB_Series_Users_Manual.pdf](http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MPR_MIB_Series_Users_Manual.pdf). Janeiro 2007.
- [37] *Stargate Developer's Guide*. Document 7430-0317-13. [http : //www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/Stargate_Manual.pdf](http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/Stargate_Manual.pdf) Janeiro 2007.
- [38] Almeida V., Vieira L., Vitorino B., Vieira M., Nacif J., Fernandez A., Silva D., Coelho Jr. C. Sistema Operacional Yatos para Redes de Sensores Sem Fio. *I Workshop de Sistemas Operacionais (WSO'2004)*. XXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (SBC), Salvador, BA, Brasil, Agosto, 2004
- [39] Boulis, A. and Srivastava, M. B. A framework for efficient and programmable sensor networks. *In Proceedings of OPENARCH 2002*.
- [40] Hill et al., “System Architecture Directions for Networked Sensors”. *Proceedings of Ninth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*, November 2000.
- [41] Bhatti S., Carlson J., Daí H., Rose J., Sheth A., Shucker B., Gruenwald C., Torgenson A., Han R., Mantis Os: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Plataforms. *ACM Klumer Mobile Networks and Applications (MONETS) Jornal, Special Issue on Wireless Sensor Networks*. August 2005.
- [42] Levis et al., The NesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. *In Conference on Programming Language Design and Implementation of ACM SIGPLAN*, 2003.
- [43] Gay et al., *NesC 1.1 Language Reference Manual*. <http://nesc.sourceforge.net/>. Fevereiro, 2007.
- [44] National Instruments Inc., [http : //www.ni.com/labview/](http://www.ni.com/labview/). Fevereiro, 2007.
- [45] MicroStrain Inc., [http : //www.microstrain.com](http://www.microstrain.com). Janeiro, 2007.
- [46] ZigBee Alliance, [http : //www.zigbee.org](http://www.zigbee.org). Janeiro, 2007.
- [47] Bluetooth Site, [http : //www.bluetooth.org](http://www.bluetooth.org). Janeiro, 2007.
- [48] Le, T., Zigbee System-on-Chip (SoC) Design, *High Frequency Electronics*. Summit Technical Media. January 2006.

-
- [49] Agência Nacional de Energia Elétrica. *http : //www.aneel.gov.br/*. Fevereiro, 2007.
- [50] Processador Atmega128L. Disponível:
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf. Fevereiro, 2007.
- [51] *MTS/MDA Sensor and Data Acquisition Board User's Manual*. Document 7430-0020-04. Rev. A, January 2006. *http : //www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MTS – MDA_Series_Users_Manual.pdf*. Fevereiro, 2007.
- [52] Chipcon Inc. *http : //www.chipcon.com/*. Fevereiro 2007.
- [53] Manual Agile-LinkTM 2.4GHz Data Communications Protocol. Version 1.01. 2006 by MicroStrain, Inc.
- [54] Analog Devices. *ADXL202E Datasheet*. Disponível em *http : //www.analog.com/en/prod/0,2877,ADXL202,00.html*. Fevereiro, 2007.
- [55] Kiamah, P., *Eletrical Equipament Handbook: Troubleshooting and Maintenance*. New York: McGraw-Hill companies, 2003.

Anexo

Lista dos principais comandos para acessar as informações da RSSF

Command	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8	Byte 9	Byte 10
Check connection between Host and Base Station	0x01									
Comm check between Base Station and Node, a.k.a. 'Ping'	0x02	Node Address MSB	Node Address LSB							
Read from an EEPROM address on-board a Node	0x03	Node Address MSB	Node Address LSB	EEPROM Address MSB	EEPROM Address LSB					
Write to an EEPROM address on-board a Node	0x04	Node Address MSB	Node Address LSB	EEPROM Address LSB	Write Value MSB	Write Value LSB				
Read Base Station EEPROM	0x72	EEPROM Address LSB								
Write Base Station EEPROM	0x77	EEPROM Address LSB	Write Value MSB	Write Value LSB						
Download a page of data from a Node	0x05	Node Address MSB	Node Address LSB	Page Address MSB	Page Address LSB					
Erase all data on-board a Node	0x06	Node Address MSB	Node Address LSB	0x08	0x10	0x0C	0xFF			
Trigger a data logging session on-board a Node	0x0C	Node Address MSB	Node Address LSB	Trigger Number (1-255)						
Initiate real time streaming data from a Node	0x38	Node Address MSB	Node Address LSB							
Initiate low-power periodic sleep mode on the Node	0x32	Node Address MSB	Node Address LSB							
Read Single Sensor	0x03	Node Address MSB	Node Address LSB	0x01	Channel Number (1-8)					
Auto-Balance a Channel on a Node	0x62	Node Address MSB	Node Address LSB	Channel Number (1-8)	Target Value MSB	Target Value LSB				
Node Ping	0xAA	0x05	0x00	Node Address MSB	Node Address LSB	0x02	0x00	0x02	Checksum MSB	Checksum LSB
Low Duty Cycle	0xAA	0x05	0x00	Node Address MSB	Node Address LSB	0x02	0x00	0x038	Checksum MSB	Checksum LSB