

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Pós-Graduação em Ciência da Computação

Redes de Sensores sem Fio Aplicadas ao
Monitoramento de Motores em Ambiente Industrial

Ruan Delgado Gomes

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em
Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande -
Campus I como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau
de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Metodologia e Técnicas da Computação

Marco Aurélio Spohn

(Orientador)

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Ruan Delgado Gomes, 27/02/2012

DA
024.31624.393/1043
063312



G633r Gomes, Ruan Delgado
Redes de sensores sem fio aplicadas ao monitoramento de motores em ambiente Industrial / Ruan Delgado Gomes. - Campina Grande, 2012.
101 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Ciencia da Computacao) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Eletrica e Informatica.


1. Redes de Sensores sem Fio 2. Sistemas Embarcados 3. Monitoramento de Motores 4. Ambiente Industrial 5. Padrao IEEE 802.15.4 6. Dissertacao I. Spohn, Marco Aurelio, Prof. Dr. II. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) III. Título


CDU 004.7:621.391(043)


**'REDES DE SENSOES SEM FIO APLICADAS AO MONITORAMENTO DE MOTORES
EM AMBIENTE INDUSTRIAL'**

RUAN DELGADO GOMES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 27/02/2012


MARCO AURELIO SPOHN, Ph.D
Orientador(a)


REINALDO CÉZAR DE MORAIS GOMES, Dr.
Examinador(a)


FABIANO SALVADORI, D.Sc
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Resumo

A otimização do uso da energia, diminuindo custos e reduzindo o impacto ambiental, tem sido motivo de grande preocupação em diversos setores da sociedade. Nesse contexto, a utilização de sistemas de automação industrial inteligentes e de baixo custo para monitoramento de motores pode representar uma ferramenta muito útil, possibilitando a diminuição do uso da energia elétrica no setor industrial. Tradicionalmente, o monitoramento de energia e detecção de falhas em sistemas industriais são realizados de forma *off-line* ou através de redes cabeadas. Essa última abordagem apresenta um alto custo e pouca flexibilidade, devido principalmente à necessidade de utilização de cabos, o que dificulta o processo de instalação e manutenção da rede. Uma alternativa para construção de sistemas de monitoramento industrial flexíveis e de baixo custo é a utilização de Redes de Sensores sem Fio (RSSF). Entretanto, a aplicação dessas redes em ambiente industrial apresenta uma série de desafios. Os erros de transmissão e a capacidade variável do enlace são um dos fatores mais críticos na aplicação das RSSF em um ambiente industrial. Esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma RSSF para monitoramento em tempo real de motores em ambiente industrial. A rede é formada por nós inteligentes que realizam localmente o processamento para estimação dos parâmetros (torque e eficiência) e transmitem esses valores para uma unidade central de monitoramento. Foram realizados estudos experimentais para observar a relação entre o desempenho da rede de sensores e o nível de ocupação espectral no ambiente de operação, verificando o impacto causado pela inserção de fontes de interferência. Também foi desenvolvido um modelo matemático para avaliar o desempenho da RSSF em vários cenários. Através desses estudos teóricos e experimentais, foi demonstrado que a utilização de nós inteligentes traz grandes benefícios para este tipo de aplicação, provocando uma grande redução na quantidade de dados transmitidos na rede e tornando possível o monitoramento dos motores, mesmo em cenários de alta interferência. Além disso, os estudos fornecem informações que podem guiar o desenvolvimento de novas tecnologias e protocolos para redes de sensores sem fio industriais.

Abstract

The optimization of energy usage, by decreasing costs and reducing environmental impact, has been cause of great concern in various sectors of society. In this context, intelligent and low-cost industrial automation systems for motor monitoring can be a very useful tool, allowing reducing the use of electricity in the industrial sector. Traditionally, energy monitoring and fault detection in industrial systems are performed off-line or through wired networks. This latter approach has a high cost and limited flexibility, mainly due to the need of cables, which difficult the process of installing and maintaining the network. An alternative to construction of flexible and low-cost industrial monitoring systems is the use of Wireless Sensor Networks (WSN). However, the application of these networks in an industrial environment presents a number of challenges. Transmission errors and the variable link capacity are one of the most critical factors in the application of WSN in an industrial environment. This work proposes the development of a WSN for real-time monitoring of motors in industrial environment. The network consists of intelligent nodes that perform local processing to estimate the parameters (torque and efficiency), and transmit these values to a central monitoring unit. Experimental studies were performed to observe the relationship between the WSN performance and spectral occupancy in the operating environment, also observing the impact of external interference sources. It was also developed a mathematical model to evaluate the WSN performance in several scenarios. Through these theoretical and experimental studies, it was demonstrated that employing intelligent nodes brings great benefits for this type of application, reducing the amount of data transmitted over the network and allowing monitoring even in high interference scenarios. In addition to that, our work provides insights for guiding the development of new technologies and protocols for industrial WSN.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à minha família, especialmente a meus pais Onildo Gomes e Silvana Delgado, por todo apoio concedido.

Agradeço à Taísia pelo incentivo e paciência.

Ao Prof. Marco Spohn pela excelente orientação durante o mestrado e pelos conhecimentos compartilhados.

Agradeço também a todos os membros do Laboratório de Telecomunicações (Latec) da UFCG e do Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Controle em Estudos de Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA) da UFPB, em especial aos professores Francisco Antônio Belo e Abel Cavalcante Lima Filho.

Agradeço aos professores Reinaldo Gomes e Fabiano Salvadori pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos pela torcida.

Por fim, agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado e ao CNPq pelo financiamento do projeto.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
2	Fundamentação Teórica	6
2.1	Redes de Sensores sem Fio	6
2.2	Padrão IEEE 802.15.4	8
2.3	Utilização Espectral e Banda ISM de 2.4 GHz	13
2.4	Redes de Sensores sem Fio em Ambiente Industrial	16
2.4.1	Aplicação dos Protocolos Baseados no Padrão IEEE 802.15.4 na Indústria	18
2.5	Sistemas Embarcados	25
2.5.1	Modelo básico de um sistema embarcado	26
3	Trabalhos Relacionados	29
3.1	Sistemas de Monitoramento Industrial Utilizando Redes de Sensores sem Fio	29
3.2	Avaliação de Desempenho de Redes de Sensores sem Fio Baseadas no Padrão IEEE 802.15.4	31
4	Rede de Sensores sem Fio para Monitoramento de Motores	34
4.1	Método para Estimção de Torque e Eficiência	36
4.1.1	Estimção de Torque no Eixo do Motor	36
4.1.2	Estimção da Eficiência	37
4.2	Descrição do Sistema Embarcado	39
4.3	Análise Teórica Sobre a Relevância do Processamento Local	46

4.3.1	Análise da Latência de Processamento	46
4.3.2	Impacto da Perda de Pacotes	50
4.3.3	Análise da Latência na Entrega de Informações pela RSSF	52
5	Resultados Experimentais	64
5.1	Correlação Entre Taxa de Perda de Pacotes e Ocupação Espectral	64
5.1.1	Metodologia	65
5.1.2	Resultados dos Experimentos	70
5.1.3	Conclusões Obtidas a Partir do Estudo	76
5.2	Análise de Desempenho da Rede de Sensores	77
5.2.1	Configuração do Experimento	77
5.2.2	Resultados dos Experimentos	79
5.3	Validação dos Valores Obtidos a Partir da RSSF	86
6	Conclusões	89
A	Software para Análise de Espectro	100

Lista de Figuras

2.1	Topologias de redes IEEE 802.15.4 [15].	9
2.2	Estrutura do <i>superframe</i> do IEEE 802.15.4 [37].	11
2.3	Canais definidos pelos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 na banda ISM de 2.4 GHz.	15
2.4	Impacto causado por um microondas do ponto de vista dos canais definidos no padrão IEEE 802.15.4.	15
2.5	Modelo básico de um sistema embarcado.	27
4.1	Rede de Sensores sem Fio para monitoramento de motores.	35
4.2	Diagrama de blocos do sistema embarcado.	38
4.3	Diagrama de blocos do dsPIC33F [47].	40
4.4	Comparação entre dsPic e DSP [47].	41
4.5	Conexão SPI [45].	42
4.6	Diagrama de atividades.	45
4.7	Pacote IEEE 802.15.4.	48
4.8	Tempo máximo de processamento versus taxa de transferência.	48
4.9	Quantidade média de pacotes transmitidos para cada estimativa de torque e eficiência.	51
4.10	Latência na entrega de informações pela RSSF no cenário sem processamento local.	54
4.11	Latência na entrega de informações pela RSSF no cenário com processamento local.	55
4.12	Taxa de entrega de informações para $W = 80kbps$	56
4.13	Taxa de entrega de informações para $W = 150kbps$	57

4.14	Validação do modelo para o cenário com processamento local, sem retransmissão e $V_a = 1$	60
4.15	Validação do modelo para o cenário com processamento local, sem retransmissão e $V_a = 18$	61
4.16	Validação do modelo para o cenário sem processamento local e sem retransmissão.	62
4.17	Taxa de entrega de informações pela RSSF considerando os valores de e	63
5.1	Ambiente Industrial.	70
5.2	Distância entre os nós IEEE 802.15.4 e as fontes de interferência.	71
5.3	Impacto na Ocupação Espectral.	72
5.4	Impacto causado por um forno microondas.	74
5.5	Impacto causado por uma rede IEEE 802.11g operando no canal 1.	75
5.6	Impacto causado por uma rede IEEE 802.11g operando no canal 6.	75
5.7	Distância entre os nós IEEE 802.15.4 e as fontes de interferência.	78
5.8	Protótipo do Sistema Embarcado.	79
5.9	Software da Base de Monitoramento.	79
5.10	Impacto causado pelo forno microondas no nó N1.	80
5.11	Impacto causado pelo forno microondas no nó N2.	80
5.12	Impacto causado pela rede IEEE 802.11g (canal 6) no nó N1.	81
5.13	Impacto causado pela rede IEEE 802.11g (canal 6) no nó N1.	82
5.14	Potência Induzida nas Componentes de Frequência.	83
5.15	Bancada onde foi instalado o sistema embarcado.	87
5.16	Comparação entre o torque estimado e o torque de referência.	87
5.17	Comparação entre a eficiência estimada e a referência.	88
A.1	Diagrama de classes do analisador de espectro.	101

Lista de Tabelas

2.1	Desafios e objetivos de projeto para implantação de RSSF.	18
2.2	Breve Comparação Entre os Padrões.	24
4.1	Principais características do MRF24J40.	42
4.2	Comparação Entre Transceptores de Diferentes Padrões.	43
5.1	Parâmetros do Experimento.	72
5.2	Número Médio de Transmissões.	84
5.3	Taxa de Entrega de Informações.	85

Lista de Códigos Fonte

A.1 Exemplo de código para obtenção de uma varredura do Airview2/EXT . . .	101
--	-----

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A otimização do uso da energia, diminuindo custos e reduzindo o impacto ambiental, tem sido motivo de grande preocupação em diversos setores da sociedade. Além disso, a competitividade existente atualmente na indústria leva as empresas a aperfeiçoarem seus processos, com o objetivo de diminuir os custos e alcançar seus objetivos financeiros.

Em um ambiente industrial, os sistemas mecânicos impulsionados por motores elétricos são utilizados pela grande maioria dos processos de produção, sendo responsáveis por mais de dois terços do consumo de energia elétrica nesse setor [44]. Uma forma de se obter redução no consumo de energia por parte dos motores é a partir da utilização de sistemas de monitoramento que permitam identificar motores operando com baixa eficiência; ou seja, consumindo mais energia que o necessário para executar determinado trabalho.

Devido ao alto custo dos sistemas de monitoramento, em geral apenas motores acima de 500 hp são monitorados. No entanto, motores abaixo de 200 hp correspondem a 99,7% dos motores em serviço e consomem 71% da energia utilizada [44]. Portanto, a utilização de sistemas de automação industrial inteligentes e de baixo custo para determinação da eficiência energética em motores de médio a pequeno porte pode representar uma ferramenta útil no ramo industrial, permitindo a implantação em maior escala desse tipo de sistema e possibilitando a otimização do uso da energia elétrica.

Entre todas as funções de monitoramento, a estimação de eficiência é a mais importante quando se pretende promover a redução na utilização da energia na indústria [43]. Nos

últimos anos, técnicas para se estimar a eficiência em motores de indução de forma não-invasiva e com alta exatidão têm sido aprimoradas. A partir dessas técnicas é possível realizar monitoramento de eficiência energética em motores elétricos a partir de sensores de baixo custo e que podem facilmente ser integrados em uma rede de sensores.

Tradicionalmente, o monitoramento de energia e detecção de falhas em sistemas industriais é realizado de forma *off-line* ou a partir de redes cabeadas. Em sistemas de monitoramento baseados em redes cabeadas, o processo de instalação dos cabos e sensores possui usualmente um custo muito mais alto que o custo dos próprios sensores [43]. Além do alto custo, essa abordagem apresenta pouca flexibilidade, o que dificulta o processo de instalação e manutenção da rede.

Uma alternativa para construção de sistemas de monitoramento industrial de baixo custo é a utilização de redes sem fio, as quais apresentam significativas vantagens, incluindo maior flexibilidade, baixo custo e facilidade de instalação e manutenção [25]. Mais especificamente, as redes de sensores sem fio (RSSF) apresentam ainda outras vantagens, como a capacidade de auto-organização e processamento local. Nesse contexto, as RSSF aparecem como uma plataforma promissora para a implementação de sistemas *online* e remotos de monitoramento de energia e diagnóstico de falhas em sistemas industriais [43].

As RSSFs são formadas por nós equipados com sensores e/ou atuadores e capacidade de comunicação via radiofrequência. Esses nós podem ainda possuir capacidade de processamento, o que permite a inserção de inteligência nos dispositivos, possibilitando melhorar a utilização do canal de comunicação. Normalmente, essas redes trabalham de forma colaborativa, realizando monitoramento de parâmetros do ambiente onde estão inseridas e possuem capacidade de auto-organização.

No entanto, a utilização de RSSF para construção de sistemas de automação em ambiente industrial apresenta uma série de desafios que devem ser enfrentados. As redes sem fio possuem um meio de comunicação inerentemente não confiável, o que pode ser agravado devido a ruídos e interferências na faixa de espectro utilizada para comunicação. A falta de confiabilidade do meio de transmissão nas redes sem fio torna difícil a definição de garantias de qualidade de serviço. Além disso, outros aspectos também devem ser levados em consideração, como a auto-organização, no caso de redes de sensores *ad hoc*, segurança e o consumo de energia.

O padrão IEEE 802.15.4 é designado para aplicações de redes de sensores sem fio. Ele foi desenvolvido para prover comunicação sem fio de forma simples, com baixo alcance relativo, potência limitada, baixa largura de banda e baixo custo. Entretanto, mesmo considerando as limitações inerentes, esse padrão é suficiente para satisfazer os requisitos de muitos sistemas de monitoramento industriais [43]. Esse padrão define as camadas física e de controle de acesso ao meio e alguns protocolos definem as camadas superiores sobre o padrão IEEE 802.15.4, como o protocolo *Zigbee* e o *MiWi*.

Os rádios que operam de acordo com o padrão IEEE 802.15.4 utilizam bandas não licenciadas para comunicação como, por exemplo, a banda em torno de 2.4 GHz estabelecida na Industrial, Scientific and Medical radio bands (ISM). Segundo Baronti et al. [9], o padrão IEEE 802.15.4 será utilizado em uma larga faixa de produtos e aplicações embarcadas, tanto no ramo comercial quanto no industrial. Os instrumentos que utilizam este padrão permitem a formação de uma grande rede de sensores ou a sua integração em uma rede existente para o monitoramento e controle de motores em tempo real em vários segmentos industriais, onde espera-se que este padrão tenha um impacto significativo [62].

A operação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais ainda está continuamente sendo validada. Análises de desempenho de rádios que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 em ambientes industriais são essenciais antes que esses rádios sejam utilizados em aplicações críticas na indústria. Essas análises também podem prover fundamentos valiosos e sólidos para auxiliar o desenvolvimento de novas tecnologias e protocolos de redes de sensores e guiar as decisões de projeto para aplicações de redes de sensores sem fio na indústria [43].

1.2 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é o desenvolvimento de uma RSSF baseada no padrão IEEE 802.15.4 para o monitoramento em tempo real de motores elétricos na indústria. A rede de sensores deve ser formada por nós inteligentes, capazes de realizar processamento local para estimação da eficiência e torque em motores de indução trifásicos. Os parâmetros são estimados utilizando valores obtidos a partir de sensores de corrente e tensão. Após o processamento para estimação dos parâmetros, os valores estimados são transmitidos através

da RSSF até uma unidade central de monitoramento.

A utilização de processamento local permite otimizar a utilização do meio de comunicação, reduzindo significativamente a quantidade de dados que trafegam pela rede. Sem a utilização de processamento local é necessário transmitir uma grande quantidade de dados para realizar o cálculo dos parâmetros. Isso limita, entre outras coisas, a frequência de aquisição de dados a partir dos sensores. Em uma RSSF com um grande número de nós a situação se torna ainda pior, visto que todos os nós compartilham o mesmo meio físico de comunicação. Além disso, deve ser levada em consideração a falta de confiabilidade inerente das redes sem fio, o que pode resultar na perda de dados transmitidos, prejudicando o processo de estimação dos parâmetros.

Os nós da RSSF proposta nesse trabalho realizam todo o processamento localmente, transmitindo para a unidade central de monitoramento apenas os parâmetros desejados previamente calculados. Assim, existe uma grande redução na quantidade de dados transmitidos, permitindo o monitoramento em tempo real de vários motores, mesmo com uma alta taxa de aquisição a partir dos sensores, o que é essencial para obter boa precisão na estimação dos parâmetros.

Nesse trabalho também foram realizados estudos experimentais sobre a correlação entre o desempenho de rádios IEEE 802.15.4 e a ocupação espectral em um ambiente industrial. Esses estudos tiveram como principal objetivo observar o impacto, tanto no desempenho de comunicação como na ocupação espectral, causado pela inserção de novas fontes de interferência no ambiente de operação da rede. O desempenho da RSSF desenvolvida também foi avaliado e o impacto das fontes de interferência no desempenho da rede foi observado.

Os estudos demonstraram que a adição de novas fontes de interferência no ambiente pode afetar significativamente a distribuição de utilização do espectro disponível para comunicação, tendo também um impacto direto no desempenho de comunicação.

Foi realizado um estudo teórico para avaliar a importância do processamento local nesse tipo de aplicação. A partir desse estudo foi possível avaliar a quantidade de pacotes transmitidos e a taxa de entrega de informações da RSSF em vários cenários. Foi demonstrado, a partir dos estudos teóricos e dos estudos experimentais, que a utilização de processamento local é muito importante para garantir o monitoramento, principalmente em cenários de alta interferência.

A partir da RSSF desenvolvida nesse trabalho e dos estudos teóricos e experimentais realizados, foi possível estudar a viabilidade da aplicação dessa tecnologia para aplicações de monitoramento de motores na indústria, além de gerar informações úteis, que podem ser utilizadas para guiar a implantação dessa tecnologia, bem como o desenvolvimento de novas técnicas e protocolos que permitam uma melhor operação dessas redes no ambiente industrial.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos sobre as Redes de Sensores sem Fio e sua aplicação na indústria, bem como sobre o padrão IEEE 802.15.4. Também são apresentados conceitos sobre utilização espectral e as bandas de comunicação não licenciadas, especialmente a de 2.4 GHz. Por fim são apresentados conceitos básicos sobre sistemas embarcados.

2.1 Redes de Sensores sem Fio

Na última década houve um grande avanço tecnológico nas áreas de sensores, circuitos integrados e comunicação sem fio. Devido a esse avanço, o desenvolvimento de pequenos dispositivos de baixo custo, com poder de processamento e capacidade de comunicação a curtas distâncias, tem se tornado algo factível. O desenvolvimento dessa tecnologia levou ao surgimento das redes de sensores sem fio (RSSF), que são redes formadas por dispositivos munidos de sensores com capacidade de comunicação via radiofrequência [42]. Estes sensores podem produzir respostas a mudanças em condições físicas, tais como temperatura, umidade ou campo magnético. Em geral, as RSSF possuem como principal objetivo realizar monitoramento de ambientes ou localização de objetos. Estas redes formam um novo tipo de redes *ad hoc* com um conjunto de características e desafios peculiares [5].

O desenvolvimento de sensores inteligentes foi o principal responsável pela atenção recebida pelas RSSF nos últimos anos. Trata-se de sensores pequenos, com restrições de recurso e de baixo custo. Dispositivos equipados com processadores podem fazer mais do que apenas transmitir os dados coletados a partir dos sensores, eles podem também realizar

processamento local, o que permite gerar novas informações e diminuir o tráfego na rede [5].

Em uma RSSF os dados recolhidos do ambiente são transmitidos possivelmente através de múltiplos saltos via retransmissões por nós intermediários, para um nó sorvedouro (chamado às vezes de controlador ou monitor) que pode ser usado localmente ou estar conectado a outras redes (em geral a Internet) por meio de um *gateway*. Os nós podem ainda possuir mobilidade, o que exige uma capacidade de auto-organização por parte dos nós. Além disso, outros aspectos podem influenciar na dinâmica da topologia da rede, como obstruções no ambiente e interferências na faixa de espectro utilizada para comunicação [61].

As RSSF, ao contrário das redes tradicionais, apresentam severas restrições de recursos como: baixo alcance de comunicação, baixa largura de banda e capacidade limitada de processamento e armazenamento. Em muitos casos também existe pouca disponibilidade de energia (alimentação via baterias). Portanto, é preciso levar em consideração tais restrições quando se pretende desenvolver tecnologias e protocolos para esse tipo de rede.

As RSSF geralmente possuem pouca ou nenhuma infra-estrutura. Uma RSSF não-estruturada é implantada de forma *ad hoc* e exige auto-organização. Por outro lado, em uma RSSF estruturada, todos os nós ou parte deles são implantados de forma pré-planejada. As restrições de projeto de uma RSSF são normalmente dependentes da aplicação e baseadas no ambiente a ser monitorado. O ambiente monitorado é uma peça chave na determinação do tamanho da rede, do esquema de implantação e da topologia. Implantação *ad hoc* é preferível quando o local de implantação é de difícil acesso ou quando a rede é composta por uma vasta quantidade de nós [65].

As aplicações de RSSF possuem um conjunto de atributos que determinam o rumo das pesquisas em RSSF. Aplicações específicas, como o monitoramento ambiental e monitoramento industrial, possuem características e requisitos específicos. Portanto, a implantação de redes de sensores deve necessariamente envolver considerações sobre os requisitos específicos da aplicação para a qual é designada.

Em geral, existem características-chave que devem ser asseguradas pelas RSSF como, por exemplo, segurança, robustez, confiabilidade, taxa de transferência adequada e determinismo. Dentre essas características, a falta de confiabilidade é a principal razão para muitos usuários não implantarem equipamentos sem fio em geral. A preocupação com confiabilidade não diz respeito apenas a falhas nos equipamentos, mas também à confiabilidade da

transmissão e recepção dos dados [17]. Muito dessa preocupação está relacionada à interferência no espectro de comunicação das redes sem fio. As redes sem fio sofrem com interferência tanto interna, ou seja, causada por outros nós da própria rede, como externa, quando causada por outras redes ou por outros dispositivos que operam na mesma faixa de frequência.

Uma variedade de tecnologias para RSSF vem sendo desenvolvidas no decorrer dos anos, entretanto é necessário a realização de estudos que visem tornar as aplicações baseadas em RSSF mais confiáveis e robustas. As avaliações de desempenho provêem informações valiosas para o desenvolvimento de ferramentas e soluções, com o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas avaliados e determinar seus benefícios e limitações [65].

As RSSF possuem um grande potencial de aplicação, podendo ser inseridas em diversas áreas. Dessa forma, é de suma importância a realização de estudos para o aprimoramento dessas redes em vários aspectos, permitindo o uso mais eficiente dessa tecnologia, bem como a inserção em novas áreas de aplicação.

2.2 Padrão IEEE 802.15.4

A grande demanda por sistemas de monitoramento e controle, aliada aos avanços tecnológicos ocorridos na área da microeletrônica, em especial dos dispositivos de transmissão de dados sem fio, bem como a disponibilidade de sensores de baixo custo com capacidade computacional, fizeram crescer o interesse de pesquisadores e empresas pelo desenvolvimento de uma variedade de aplicações, tais como: monitoramento de temperatura ou umidade de ambientes, detecção de incêndio ou incidentes, rastreamento de veículos, monitoramento ambiental, automação residencial, monitoramento e controle industrial, entre outras.

Nesse contexto, desenvolveu-se o padrão IEEE 802.15.4, que é designado para aplicações de redes de sensores sem fio. Esse padrão oferece comunicação sem fio com baixo consumo de energia e baixo custo, para aplicações de monitoramento e controle que não exijam grande largura de banda. Em comparação com outros padrões de comunicação sem fio, como o IEEE 802.11 (*WiFi*) e o IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), ele apresenta vantagens no que diz respeito ao consumo de energia, escalabilidade e menor tempo levado para adição de novos nós [53].

O padrão IEEE 802.15.4 define as camadas física e de controle de acesso ao meio. São

definidas três faixas de frequência para comunicação: 868 MHz, 915MHz e 2.4GHz. O padrão divide as faixas de espectro em vinte e sete canais, sendo um para a primeira faixa, dez para segunda e dezesseis para a terceira [36]. As bandas utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.4 para comunicação são não-licenciadas, ou seja, rádios que utilizam esse padrão compartilham o meio de comunicação com dispositivos que implementam outras tecnologias. Por exemplo, na banda de 2.4 GHz também operam rádios que utilizam os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1. Entretanto, como o espectro é dividido em canais, é possível que múltiplas redes compartilhem a banda de forma simultânea sem causar interferência.

Em uma rede IEEE 802.15.4 os nós podem ser de dois tipos: FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduced Function Device*). Os nós FFD podem agir como o coordenador da rede ou um nó final. O coordenador da rede é responsável, por exemplo, pela inicialização e sincronização da rede, e geralmente funciona como o sorvedouro da rede de sensores. Além disso, ele pode servir como ponte entre várias outras redes IEEE 802.15.4. Os nós FFD podem também exercer a função de roteador intermediário entre nós, sem precisar do intermédio do coordenador. Por meio de roteadores, uma rede IEEE 802.15.4 pode ser expandida e obter maior cobertura [53]. Os nós RFD podem atuar apenas como nós finais, que são responsáveis pelas funções de sensoriamento e/ou atuação e podem interagir com apenas um nó FFD na rede [36].

A topologia da rede pode ser organizada de três formas: estrela, malha e árvore. A Figura 2.1 ilustra as três topologias.

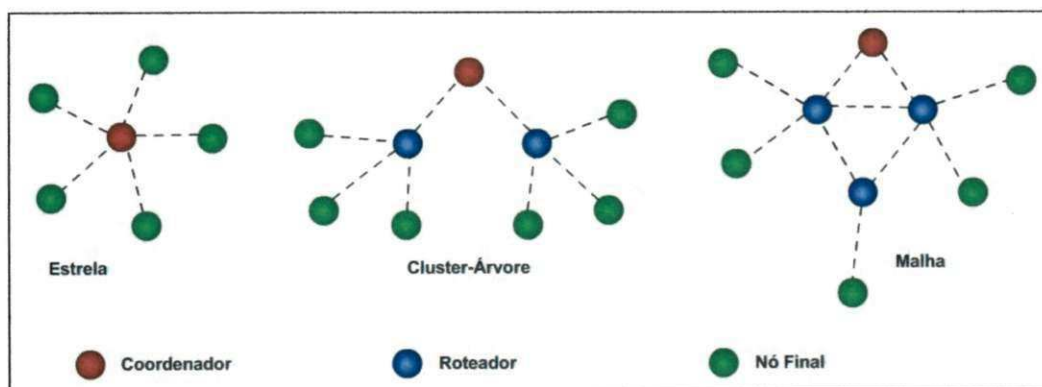


Figura 2.1: Topologias de redes IEEE 802.15.4 [15].

Uma rede em estrela é formada por um nó coordenador e múltiplos nós finais. O coor-

denador gerencia a rede e roteia todos os pacotes. Dessa forma, os nós finais se comunicam entre si sempre com o intermédio do coordenador.

Uma rede em árvore é formada a partir de uma hierarquia, na qual cada conjunto de nós finais se comunica com um determinado roteador, que por sua vez se comunica com o coordenador.

Uma rede em malha funciona de modo *ad hoc*, na qual um roteador pode se comunicar com qualquer outro diretamente; ou seja, sem a necessidade de intermediação por parte do coordenador. Nessa topologia a rede é auto-organizável, podendo se ajustar automaticamente, tanto na sua inicialização como na entrada ou saída de novos nós na rede. A topologia em malha permite também aumentar a abrangência da rede, visto que a comunicação de nós distantes com o coordenador pode ser feita a partir de múltiplos saltos, através dos roteadores [12].

Embora sejam suportadas essas três topologias, o padrão IEEE 802.15.4 não define a implementação dos mecanismos utilizados na camada de rede, como o algoritmo de roteamento, por exemplo. Isso fica a cargo dos protocolos que implementam as camadas superiores sobre o padrão IEEE 802.15.4.

Os rádios que seguem o padrão IEEE 802.15.4 alcançam no máximo uma taxa de transferência nominal de 250 Kbps, quando operando na banda de 2.4 GHz. Entretanto existe uma sub-utilização do canal devido ao mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), utilizado pelo algoritmo de acesso ao meio, no qual cada pacote a ser transmitido deve passar obrigatoriamente por pelo menos um período de *backoff*. Estudos experimentais realizados por Lee [37] demonstraram que a taxa de transferência máxima real é de aproximadamente 153 Kbps. Embora a taxa de transferência seja relativamente pequena, ela é suficiente para muitas aplicações de redes de sensores sem fio, visto que, em geral, não se tem um grande volume de informações sendo geradas pelos nós. Além disso, se os nós possuem capacidade de processamento local, pode-se obter uma redução significativa na quantidade de dados transmitidos.

Aplicações em campos como o industrial, veicular e residencial possuem requisitos mais relaxados em relação à taxa de transferência. Além disso, essas aplicações usualmente requerem baixo consumo de energia e canais sem fio de baixa complexidade e baixo custo. O IEEE 802.15.4 satisfaz esses requisitos [37].

Existem dois modos de operação definidos pelo padrão IEEE 802.15.4. O primeiro modo, denominado modo *Nonbeacon* é baseado apenas no mecanismo CSMA/CA. Nesse modo, antes de cada transmissão o dispositivo espera por um período de tempo aleatório, denominado *backoff*. Após o período de *backoff*, o dispositivo verifica se o meio de transmissão está livre. Caso o meio esteja livre o dispositivo realiza a transmissão dos dados, caso contrário o dispositivo espera por mais um período de *backoff* aleatório e então tenta acessar o meio de comunicação novamente.

O segundo modo de operação definido pelo padrão IEEE 802.15.4 é denominado modo *beacon*. Nesse modo, é definida uma estrutura denominada *superframe*. O *superframe* é limitado por *beacons* de rede enviados pelo coordenador e dividido em 16 *slots* de tempo iguais. Todas as transações devem ser completadas no tempo entre dois *beacons*. A Figura 2.2 ilustra a estrutura do *superframe* definida pelo padrão IEEE 802.15.4, quando operando no modo *beacon*.

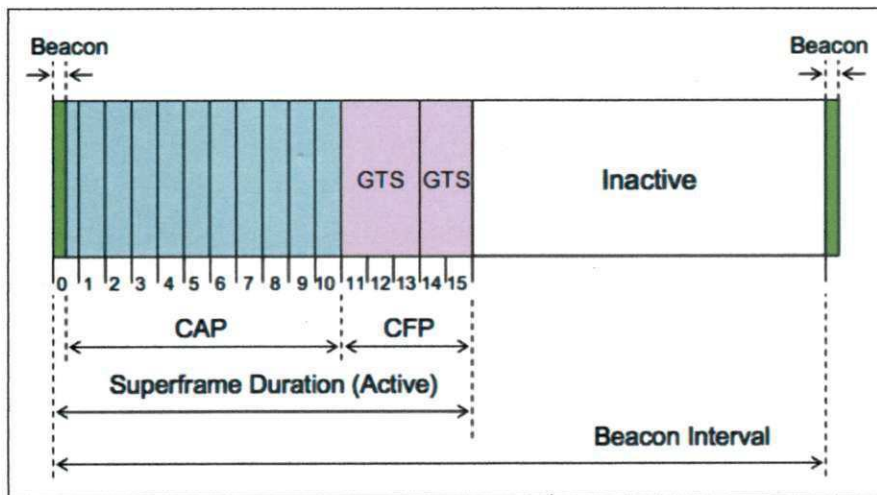


Figura 2.2: Estrutura do *superframe* do IEEE 802.15.4 [37].

Os *beacons* são transmitidos pelo coordenador da rede e são utilizados para sincronizar os dispositivos, identificar a rede e descrever a estrutura dos *superframes*. Ele possui uma porção ativa e uma porção inativa. A porção ativa é dividida em três partes: um *beacon*, um período de acesso por contenção (CAP) e um período livre de contenção (CFP). O *beacon* deve ser transmitido sem o uso de CSMA/CA e o CAP inicia imediatamente depois da transmissão do *beacon*. Qualquer dispositivo que desejar se comunicar durante o CAP

entre dois beacons deve competir com os outros usando CSMA/CA baseado nos *slots* de tempo (*slotted-CSMA/CA*). O CFP, se presente, inicia imediatamente depois do CAP e se estende até o final da porção ativa. Nenhuma transmissão no CFP deve usar o CSMA/CA para acessar o canal.

Para aplicações de baixa latência ou aplicações que requerem uma taxa de transferência específica, o coordenador pode dedicar porções do *superframe* ativo (GTS) para essas aplicações. O coordenador pode alocar até 7 *slots* para GTSs e um GTS pode usar mais de um *slot*.

Alguns protocolos implementam as camadas superiores sobre o padrão IEEE 802.15.4, sendo o protocolo *ZigBee* o mais conhecido. O protocolo *ZigBee* foi proposto no ano de 2002 e consiste em um padrão designado para redes de sensores sem fio desenvolvido pela *Zigbee Alliance* [6]. A *Zigbee Alliance* é uma associação de empresas que trabalham em conjunto para desenvolver tecnologias baseadas em um padrão aberto, que possibilite comunicação sem fio confiável, com baixo consumo de energia e baixo custo, para aplicações de monitoramento e controle que não exijam grande largura de banda.

Além do *ZigBee*, outros protocolos têm sido propostos, como o *MiWi*, desenvolvido pela *Microchip*TM[47]. Esse protocolo utiliza muitos conceitos utilizados pelo *ZigBee*, entretanto é aplicado a redes menores. Enquanto que uma rede *ZigBee* permite até 65536 nós, uma rede *MiWi* permite no máximo 1000 nós. Além disso, em uma rede *MiWi* a transmissão de um pacote pode ser realizada com no máximo quatro saltos até o destino. Dessa forma, o protocolo *MiWi* aparece como uma alternativa para construção de redes de sensores que possuam uma menor quantidade de nós e que não possuam uma grande área de cobertura.

Outro protocolo proposto em conformidade com o padrão IEEE 802.15.4 é o *WirelessHART* [29]. Entretanto, esse protocolo se baseia apenas na camada física do IEEE 802.15.4, enquanto que a camada de enlace é implementada utilizando técnicas diferentes. Um dos principais objetivos desse protocolo é aumentar a confiabilidade e segurança para aplicações de monitoramento e controle. Ele implementa a técnica de salto de frequência (FHSS) para melhorar a co-existência com outros dispositivos que operam na mesma faixa de frequência. Essa técnica permite que os rádios saltem entre os canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 com o objetivo de evitar interferência. Além disso, o protocolo de roteamento do *WirelessHART* utiliza redundância de rotas para aumentar a confiabilidade das transmissões.

Nenhuma dessas duas características (FHSS e redundância de rotas) são providas pelo protocolo *ZigBee* [38].

O padrão *ISA100* [34] também se baseia apenas na camada física do IEEE 802.15.4 e define a camada de enlace de forma semelhante ao WirelessHART. Entretanto, ele implementa as camadas superiores de modo diferente. Por exemplo, ele utiliza endereços IPV6 na camada de rede.

Esses protocolos serão discutidos em maior profundidade na seção 2.4.1.

2.3 Utilização Espectral e Banda ISM de 2.4 GHz

As redes sem fio são formadas por nós que se comunicam através de radiofrequência; ou seja, o meio físico para comunicação é o próprio ar. A utilização de redes sem fio leva a um novo e grande conjunto de possibilidades, viabilizando o surgimento de uma grande gama de aplicações. Devido a essa grande quantidade de aplicações e tecnologias sem fio, a quantidade de informações trafegando através de enlaces sem fio tende a aumentar. Consequentemente, isso resulta em um aumento na utilização do espectro disponível para comunicação sem fio.

O espectro para comunicação sem fio é regulado por agências governamentais. A faixa de espectro disponível é limitada e varia dependendo da região. Atualmente, os rádios utilizam, em sua grande maioria, uma abordagem de alocação estática do espectro utilizado para comunicação. Essa abordagem tende a não funcionar de maneira satisfatória à medida que uma grande quantidade de dispositivos é inserida no ambiente e compartilham do espectro disponível [4]. O protocolo *ZigBee*, por exemplo, não muda de canal durante períodos de alta interferência. Ao invés disso, ele usa apenas um baixo ciclo de trabalho e algoritmos de controle de acesso ao meio para tentar minimizar a quantidade de colisões [27].

Atualmente muitos dispositivos de comunicação operam na faixa de transmissão de 2.4 GHz, que é uma banda não licenciada dentro das faixas do Industrial, Scientific and Medical radio bands (ISM), incluindo rádios que implementam os padrões IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), IEEE 802.11 (*WiFi*) e IEEE 802.15.4, além de outros dispositivos como telefones sem fio, mouses e teclados sem fio e fornos microondas. A banda ISM foi inicialmente alocada para usos não comerciais, sendo mais tarde modificada para permitir mais serviços, provocando um grande fluxo de aplicações de comunicação sem fio. Essas aplicações tiram

vantagem dessa banda para livre operação [39].

Como a banda ISM é uma banda não licenciada, nenhum usuário possui prioridade de uso em relação a outro. A única restrição para os usuários nessa banda é a potência do sinal. A restrição de potência é utilizada para limitar a interferência entre sistemas coexistentes [16]. Como não existe proteção contra interferência de usuários coexistentes, é necessário o desenvolvimento de tecnologias eficientes de coexistência para permitir uma operação suficientemente boa de sistemas em bandas não licenciadas. Portanto, faz-se necessário um novo tipo de abordagem para o projeto de sistemas de comunicação sem fio, que devem incluir medidas da ocupação do espectro, modelagem da interferência de coexistência e avaliação de desempenho [39].

Os padrões de comunicação sem fio, como o IEEE 802.15.4 e o IEEE 802.11, por exemplo, definem um conjunto de canais ao longo da banda disponível para comunicação. Como esses padrões compartilham a mesma faixa de espectro, existe uma sobreposição dos canais entre os padrões, o que pode levar à interferência entre rádios operando no mesmo ambiente. A Figura 2.3 mostra os canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 e três dos catorze canais definidos pelo IEEE 802.11 na banda ISM de 2.4 GHz. Pode-se observar que existe uma forte sobreposição entre os canais dos dois padrões. Portanto, para as redes IEEE 802.15.4 obterem uma boa qualidade de serviço são necessárias técnicas que permitam uma boa coexistência com redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11.

Outras tecnologias também são capazes de causar impacto significativo no nível de utilização espectral e podem afetar o desempenho de redes de sensores sem fio operando na mesma banda. Por exemplo, a Figura 2.4 [21] mostra o impacto causado na ocupação espectral da banda ISM de 2.4 GHz, por um forno microondas. No gráfico são mostradas as potências médias induzidas nos canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4, antes e depois da inserção do forno de microondas no ambiente. Observa-se que a operação de um forno microondas no ambiente pode afetar de maneira significativa a distribuição de uso do espectro ao longo da banda. Portanto, um rádio que esteja operando nos canais mais afetados, como os canais 11, 12 e 13, por exemplo, pode sofrer uma queda de desempenho significativa se houver a inserção de um forno microondas no ambiente de operação da rede.

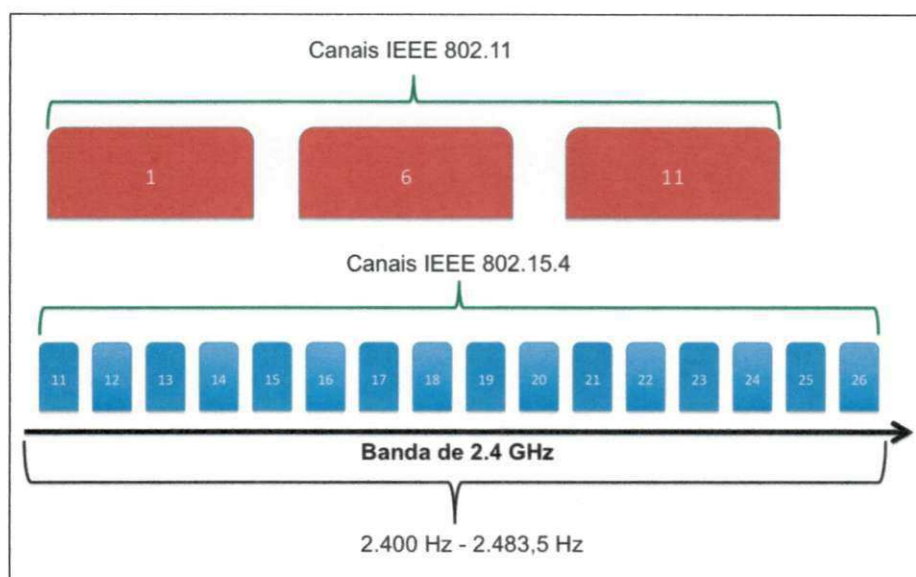


Figura 2.3: Canais definidos pelos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 na banda ISM de 2.4 GHz.

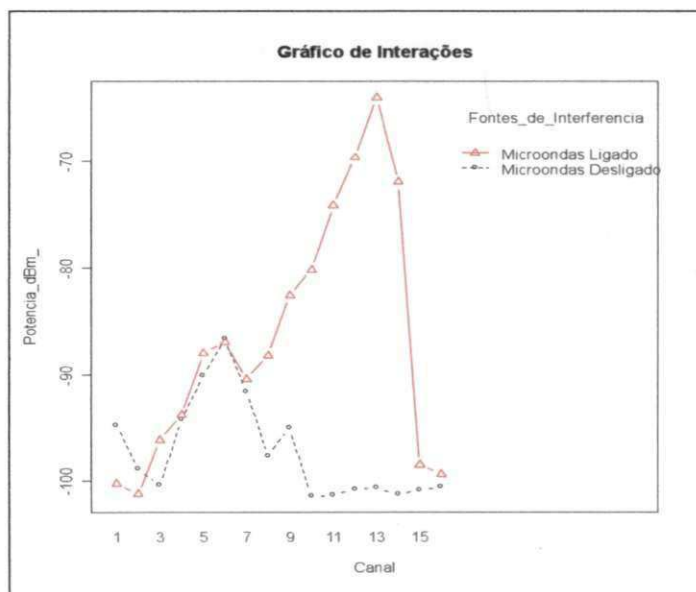


Figura 2.4: Impacto causado por um microondas do ponto de vista dos canais definidos no padrão IEEE 802.15.4.

2.4 Redes de Sensores sem Fio em Ambiente Industrial

A competitividade existente atualmente na indústria leva as empresas a aperfeiçoarem seus processos, com o objetivo de diminuir os custos e alcançar seus objetivos financeiros. Portanto, sistemas de automação industrial inteligentes e de baixo custo se tornam necessários, visando aumentar a produtividade e a eficiência dos sistemas industriais.

Com os recentes avanços nas redes de sensores sem fio, construir sistemas embarcados de automação industrial de baixo custo se tornou factível. Nesses sistemas, nós sensores são implantados em equipamentos industriais e realizam o monitoramento de parâmetros críticos de cada equipamento como, por exemplo: vibração, temperatura, pressão e eficiência de motores. As medidas coletadas são transmitidas através de um enlace sem fio até um nó sorvedouro que recolhe as informações e as disponibiliza para análise em uma central de monitoramento. A partir das informações obtidas na central de monitoramento, pode-se reparar ou substituir equipamentos antes que um prejuízo maior possa ocorrer [25].

Tradicionalmente, sistemas de automação industrial são construídos utilizando comunicação com fio [63]. Esses sistemas foram construídos com o objetivo de realizar tarefas de controle e dependem da comunicação entre controladores digitais e sensores e/ou atuadores. O principal objetivo desses sistemas é prover comunicação em tempo real confiável e previsível. Entretanto, esses sistemas necessitam de cabos que possuem alto custo de instalação e manutenção, limitando, dessa forma, a sua implantação na indústria. Portanto, existe uma grande necessidade de se construir sistemas de automação de baixo custo e que permitam obter economias significativas [25].

Nesse contexto, a utilização de redes sem fio apresenta uma série de vantagens em relação à utilização de redes cabeadas, como a facilidade e a rapidez na implantação e manutenção das redes, além do seu baixo custo. As redes de sensores sem fio apresentam ainda vantagens como auto-organização e capacidade de processamento local. Portanto as redes de sensores sem fio se apresentam como uma solução flexível e de baixo custo para construção de sistemas de monitoramento e controle na indústria.

Embora as redes de sensores sem fio apresentem diversas vantagens para aplicação em sistemas de automação industrial, a implantação dessa tecnologia apresenta também uma série de desafios. As redes sem fio possuem um meio de comunicação inerentemente não

confiável e estão sujeitas a uma maior quantidade de erros de transmissão em comparação com as redes cabeadas, devido a falhas no canal e interferências. Os nós em uma rede sem fio podem sofrer interferência a partir da co-existência com os outros nós da rede, a partir da co-existência com outras redes e também a partir de outros dispositivos capazes de causar interferência no espectro eletromagnético utilizado para comunicação.

Além de degradar o desempenho da rede, a interferência também é capaz de causar mudanças na topologia, devido a possíveis perdas de conectividade entre nós. Em ambientes industriais, podem ainda existir outras fontes de ruído, como ruído térmico, ruído causado a partir de motores e dispositivos que causam descarga elétrica, entre outros [25]. As características dos erros apresentados pelo canal sem fio dependem do ambiente de propagação, do esquema de modulação escolhido, da potência de transmissão, da frequência em uso, bem como de vários outros parâmetros. Em geral, os sistemas tendem a ter taxas de erros frequentemente altas e com alta variância [63].

As redes de sensores sem fio apresentam ainda outros desafios relacionados ao seu desempenho. Algumas características como o baixo poder de processamento, canais *half-duplex* e o *overhead* necessário para prover comunicação nessas redes podem degradar o desempenho. Por último, mas não menos importante, deve-se também atentar para o consumo de energia, visto que alguns nós podem não apresentar fonte de alimentação contínua, tendo assim seu tempo de vida limitado pelo tempo de vida de sua bateria.

Dessa forma, quando se utiliza comunicação sem fio fica mais difícil oferecer garantias de confiabilidade e tempo. Outro aspecto que também deve receber atenção quando se utiliza tecnologia sem fio é a segurança. Como o meio de comunicação sem fio é inerentemente compartilhado, podem existir ataques que não são possíveis de serem realizados quando se aplica comunicação com fio. Por exemplo, podem acontecer injeções de pacotes maliciosos na rede, com informações distorcidas ou ataques para degradação da qualidade do meio de comunicação.

O desenvolvimento de aplicações industriais utilizando a tecnologia de redes de sensores sem fio requer a combinação de conhecimento em diversas disciplinas como: conhecimento do domínio específico da indústria, conhecimento sobre tecnologia de sensores, conhecimento sobre aplicação de rádio frequência e ambiente de propagação e conhecimento sobre arquiteturas e protocolos de rede. A Tabela 2.1 mostra alguns dos maiores desafios na im-

Tabela 2.1: Desafios e objetivos de projeto para implantação de RSSF.

Desafios	Objetivos de Projeto
Restrição de recursos (processamento, memória, energia)	Projeto eficiente de hardware, software e protocolos de redes
Topologia dinâmica e condições ambientais severas	Operação adaptativa da rede
Requisitos de qualidade de serviço	Projeto específico para a aplicação
Redundância de dados e alto <i>overhead</i> de dados	Fusão de dados e processamento local
Erros de transmissão e capacidade variável do enlace	Tolerância a falhas e confiabilidade
Segurança	Projeto seguro, técnicas de autenticação e confidencialidade
Implantação em larga escala e arquitetura <i>ad hoc</i>	Sensores pequenos e de baixo custo, auto-configuração e auto-organização

plantação desse tipo de rede e os objetivos de projeto associados a cada desafio [25].

2.4.1 Aplicação dos Protocolos Baseados no Padrão IEEE 802.15.4 na Indústria

Alguns protocolos foram propostos para aplicações de redes de sensores sem fio baseados no padrão IEEE 802.15.4. Entretanto, devido às características únicas apresentadas pelas aplicações industriais, que impõem uma série de restrições, especialmente em relação à confiabilidade, deve-se verificar se os protocolos existentes são adequados para aplicações na indústria. Nas próximas subseções serão discutidas de forma mais detalhada as características de cada protocolo, em especial as características que afetam os requisitos das aplicações industriais. Apesar de alguns protocolos também possuírem definições para a camada de aplicação, focaremos apenas na descrição das três camadas inferiores (física, enlace e rede), visto que essas camadas influenciam mais significativamente nos requisitos das aplicações

industriais, principalmente no que diz respeito à confiabilidade.

ZigBee

O protocolo mais conhecido e que vem sendo mais amplamente utilizado em pesquisas relacionadas a aplicações de redes de sensores sem fio é o protocolo *ZigBee* [12] [53] [35] [33] [13] [7]. Esse protocolo apresenta uma série de características que o torna um bom candidato para aplicações de redes de sensores sem fio em geral. Ele provê, por exemplo, baixo consumo de energia e baixo custo.

A camada de rede do *ZigBee* suporta topologias em estrela, em árvore ou em malha, permitindo que seja construída uma rede de sensores *ad hoc*. Entre as funcionalidades oferecidas pela camada de rede estão: roteamento por múltiplos saltos, descoberta e manutenção de rotas, segurança e controle de entrada e saída de nós na rede. Cada dispositivo *ZigBee* possui um *ID* único de 64 bits. Uma vez que os dispositivos em uma rede *ZigBee* podem fazer parte de diferentes redes durante seu tempo de vida, o padrão define um mecanismo flexível de endereçamento. Para cada nó que entra na rede é atribuído um endereço de 16 bits [9]. Para melhorar a eficiência durante a comunicação, esses endereços menores são utilizados na comunicação, ao invés de utilizar o *ID* único de cada dispositivo. Em uma topologia em árvore, o endereço de um dispositivo também identifica o nó pai, que é utilizado para fins de roteamento [5].

O algoritmo de roteamento utilizado depende da topologia. Em uma rede com topologia em árvore, o encaminhamento das mensagens ocorre apenas ao longo das conexões entre nós pais e nós filhos, estabelecidas no momento da entrada dos nós na rede. Quando é utilizada uma topologia em malha, o processo de roteamento se torna mais complexo, entretanto se obtém maior robustez e tolerância a falhas, devido à capacidade de descoberta e manutenção de rotas. Nessa topologia, as rotas são mantidas em uma tabela de rotas. O algoritmo de descoberta de rotas é baseado no protocolo *Ad hoc On Demand Distance Vector routing algorithm* (AODV) [9].

MiWi

O protocolo *MiWi*, desenvolvido pela MicrochipTM[47], é uma alternativa para redes pequenas, com no máximo 1000 nós. Teoricamente, uma rede *ZigBee* pode conter até 65.536 nós,

embora na prática não seja recomendável exceder 3000 nós em uma rede [7]. Outro fator que limita o tamanho das redes *MiWi* é quantidade máxima de saltos permitida. Os pacotes podem ser transmitidos com no máximo quatro saltos pela rede.

Uma característica interessante que o difere do *ZigBee* é a capacidade de realizar mudanças dinâmicas de canal. Esse mecanismo, denominado *Frequency Agility*, é opcional e permite mover a rede para um canal diferente se as condições de operação não estiverem favoráveis. Para utilizar esse mecanismo são definidos dois tipos de nós: iniciadores e seguidores. Os iniciadores, que devem ser nós do tipo FFD, mudam o canal da rede se for necessário e definem um novo canal. Para definir o novo canal o iniciador realiza uma varredura de energia nos canais para determinar o melhor canal. Após definir o melhor canal, o iniciador transmite uma mensagem de *broadcast* para os outros dispositivos na rede.

Os nós seguidores podem ser do tipo FFD ou RFD. Os seguidores que são do tipo FFD mudam de canal quando recebem a mensagem de *broadcast* enviada por um nó iniciador. Quando ocorre troca de canal e o nó seguidor não recebe a mensagem do iniciador, ele realiza uma resincronização quando muitas transmissões falham continuamente. Os nós seguidores do tipo RFD mudam de canal apenas a partir de resincronização.

Embora o mecanismo *Frequency Agility* possa melhorar a qualidade de comunicação da rede de uma maneira geral, ele implica em uma sobrecarga nos nós. Dependendo da frequência com que os nós iniciadores realizam a varredura dos canais, a rede pode passar muito tempo sem prover novos dados. Outro fator importante é o tempo de varredura dos canais. Se o tempo de varredura for muito grande, pode-se obter maior precisão ao estimar o melhor canal, entretanto a rede passará muito tempo ociosa. Por outro lado, se o tempo de varredura for pequeno, a rede passa pouco tempo ociosa, mas obtém-se uma menor precisão na estimativa do melhor canal.

Embora o serviço de troca de canal seja fornecido pelo protocolo *MiWi*, ainda existe forte dependência da aplicação, visto que a aplicação determina quando uma verificação de canal e uma possível troca de canal devem ocorrer.

WirelessHART

O padrão *WirelessHART* [29] é considerado o primeiro padrão de comunicação aberto designado para aplicações de monitoramento de processos e controle industriais [56]. Isso se

justifica no fato de os outros padrões, como o *ZigBee* e *Bluetooth*, não atenderem por completo os requisitos das aplicações industriais, principalmente por não oferecerem garantias de tempo, que é importante em muitas aplicações nesse setor.

O *WirelessHART* é baseado na camada física do padrão IEEE 802.15.4, mas implementa sua própria camada de acesso ao meio. Nesse padrão é utilizada apenas a banda ISM de 2.4 GHz. Entretanto, são utilizados apenas 15 canais dos 16 definidos pelo padrão nessa banda. O canal 26 não é incluído, pois ele não é permitido em alguns países [51]. Ao invés de utilizar apenas o mecanismo baseado no CSMA/CA definido pelo padrão IEEE 802.15.4, é implementada uma camada de acesso ao meio aplicando acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). O uso de TDMA reduz as colisões entre nós da mesma rede e reduz o consumo de energia, visto que os nós ficam dormindo e apenas acordam quando realmente irão transmitir ou receber pacotes. Opcionalmente, pode-se configurar os nós para realizarem uma avaliação do canal antes da transmissão, mas sem utilizar *backoff* exponencial, como no CSMA/CA [20].

Para melhorar a co-existência com outras redes e outras tecnologias que utilizam a banda de 2.4 GHz, o padrão implementa um mecanismo de salto de frequência, no qual os dispositivos saltam entre os 15 canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 na banda de 2.4 GHz. Também é definido um mecanismo denominado *blacklisting* (lista negra), no qual os canais que apresentam alto nível de interferência são incluídos na lista negra e conseqüentemente não são utilizados pelos rádios. Entretanto, é importante notar que a configuração da lista negra não é feita de forma automática e sim por um administrador de rede.

As redes de sensores sem fio, em geral, assumem que os sensores são implantados de forma randômica no ambiente e possivelmente com redundância, ou seja, um mesmo parâmetro pode ser medido por mais de um nó. Por outro lado, o *WirelessHART* considera que a rede é implantada de forma planejada e possui redundância limitada. Nas redes de sensores industriais, usualmente cada sensor realiza medições de parâmetros únicos, ou seja, um determinado parâmetro é medido por apenas um nó na rede.

Em uma rede *WirelessHART* não existem nós RFD e todos os nós na rede devem ser capazes de realizar roteamento. É utilizada uma topologia em malha com caminhos redundantes; ou seja, a transmissão de pacotes entre dois nós pode ocorrer por caminhos diferentes. Essa característica permite aumentar a confiabilidade e a tolerância a falhas, visto que caminhos

obstruídos fisicamente ou por interferência no espectro de comunicação podem ser substituídos pelas rotas redundantes. As rotas são geradas por uma entidade central (gerenciador de rede). O gerenciador de rede pode determinar as rotas buscando otimizar diferentes métricas, como balanceamento de carga e latência. O gerenciador de rede também é responsável pelo escalonamento de tempo entre os nós da rede, garantindo o correto funcionamento do mecanismo TDMA.

É importante notar que as redes *WirelessHART* são centralizadas; ou seja, toda a operação da rede é gerenciada por uma única entidade. Nos padrões *ZigBee* e *MiWi* o funcionamento da rede acontece de forma mais distribuída. Por exemplo, em uma rede *ad hoc* baseada nos padrões *ZigBee* ou *MiWi*, os nós finais descobrem a rota até o destino, ao invés de ter a rota definida por uma entidade central. Além disso, nas redes *ZigBee* e *MiWi* cada nó pode decidir quando realizar uma transmissão e tenta evitar colisões de forma autônoma, utilizando o mecanismo CSMA/CA. Nas redes *WirelessHART* o gerenciador da rede define o momento em que cada nó deve transmitir ou receber pacotes.

O roteamento nas redes *WirelessHART* pode acontecer de duas formas: roteamento através do grafo definido pelo gerenciador de rede ou roteamento pela fonte. O primeiro tipo de roteamento utiliza as rotas definidas pelo gerenciador de rede, que são armazenadas em cada dispositivo. No segundo tipo de roteamento a rota é incluída no cabeçalho do pacote. O roteamento pela fonte é utilizado apenas para fins de diagnósticos da rede.

Petersen et al. [51] realizaram estudos de desempenho de rádios que seguem o padrão *WirelessHART*. Também foi verificado o desempenho desses rádios quando sujeitos à interferência por parte de pontos de acesso IEEE 802.11g. Foram instalados três pontos de acesso no ambiente de operação, nos canais 1, 6 e 11 respectivamente, resultando em interferência em quase toda a banda. Entretanto, os pontos de acesso foram configurados apenas para transmitirem pacotes de *beacon*, a cada 20 ms, o que não caracteriza um tráfego intenso. Os resultados mostraram que durante períodos de interferência os nós *WirelessHART* experimentam uma taxa de perda de pacotes média de 27,2%. Entretanto, no experimento foram habilitados os 15 canais de comunicação. Se apenas os canais menos poluídos fossem habilitados, o desempenho poderia ser melhor, embora os rádios não tenham a capacidade de habilitar e desabilitar canais de forma automática. Outra métrica analisada foi a latência. Observou-se que a latência foi alta, de cerca de 2 segundos para a rede operando livre de

interferência, e cerca de 2,7 segundos quando operando em co-existência com os pontos de acesso IEEE 802.11g.

Embora o padrão WirelessHART seja bastante promissor para aplicações de redes de sensores sem fio na indústria, ele ainda não está amplamente disponível no mercado. Como se trata de um padrão novo, lançado em 2007, até 2009 nenhum fornecedor ainda provia qualquer componente que suportasse esse padrão [20]. Atualmente, algumas empresas estão começando a oferecer soluções que utilizam esse padrão [48]. Entretanto, ainda são necessários mais estudos experimentais para validar os produtos que implementam esse padrão e verificar o desempenho das redes de sensores sem fio que seguem o padrão *WirelessHART*.

ISA100

O padrão ISA100 foi idealizado pela *Instrumentation, Systems, and Automation Society* (ISA) [34] e também é um padrão idealizado para a indústria. Assim como o *WirelessHART*, o padrão ISA também é baseado na camada física do padrão IEEE 802.15.4, mas define sua própria camada de acesso ao meio. As características da camada de acesso ao meio desse padrão são muito semelhantes com as características apresentadas pelo *WirelessHART*. Ele também aplica TDMA e salto de frequência, visando melhorar a confiabilidade. A camada de rede aparece de forma um pouco diferente, visto que usa formatos de cabeçalho baseados no protocolo IP [56].

Comparação Entre os Padrões

A Tabela 2.2 apresenta uma breve comparação entre os padrões discutidos, em relação a alguns dos aspectos comentados.

Como podemos ver pela Tabela 2.2 o protocolo *ZigBee* é o único que não apresenta nenhum mecanismo especial de co-existência. O protocolo *MiWi* oferece um mecanismo para troca de canais, mas ainda existe muita dependência da camada de aplicação. Por outro lado, os padrões *WirelessHART* e *ISA100* oferecem mecanismos mais complexos para melhorar a coexistência das redes de sensores sem fio em aplicações industriais. Por outro lado, esses últimos dois padrões possuem como desvantagem a grande centralização da rede. Além disso, podemos ver pelo estudo realizado por Petersen et al. [51] que, se não houver um gerenciamento adequado da Lista Negra, o desempenho da rede pode sofrer uma queda

Tabela 2.2: Breve Comparação Entre os Padrões.

Padrão	<i>ZigBee</i>	<i>MiWi</i>	<i>WirelessHART/ISA100</i>
Faixas de Frequência	868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz	868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz	2.4 GHz
Camada física	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4
Camada de enlace	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	Customizada
Mecanismo de acesso ao meio	CSMA/CA	CSMA/CA	TDMA
Mecanismos de co-existência	-	<i>Frequency Agility</i>	Salto de Frequência e Lista Negra
Determinação de rotas	Distribuída	Distribuída	Centralizada
Rotas redundantes	Não	Não	Sim

significativa.

Os padrões *WirelessHART* e *ISA100* também apresentam rotas redundantes, o que pode aumentar a confiabilidade, visto que múltiplos caminhos podem ser definidos para a transferência dos dados. Entretanto, como esse mecanismo é implementado em camada de rede, ele pode ser também empregado em rádios que implementam a camada física e a camada de enlace de acordo com o padrão IEEE 802.15.4.

Embora os padrões *WirelessHART* e *ISA100* sejam promissores para aplicações de redes de sensores sem fio na indústria, ainda são padrões muito novos e não possuem alta disponibilidade de transceptores no mercado. Por outro lado, existe grande disponibilidade de transceptores que implementam as camadas física e de enlace do IEEE 802.15.4 e são compatíveis com os protocolos *ZigBee* e *MiWi*. Por essa razão utilizou-se nesse projeto transceptores desse tipo.

Embora tenhamos utilizado transceptores não compatíveis com os padrões *WirelessHART* e *ISA100*, os benefícios obtidos são totalmente aplicáveis a esses padrões. A utilização de processamento local ainda continuaria sendo muito importante, devido à baixa

taxa de transferência da camada física do IEEE 802.15.4, além de os padrões *WirelessHART* e *ISA100* ainda apresentarem problemas de confiabilidade. Os resultados obtidos a partir dos estudos experimentais para identificar o impacto de fontes de interferência na ocupação espectral e no desempenho dos rádios IEEE 802.15.4 também podem ser úteis no desenvolvimento de técnicas e protocolos para gerenciamento automático de lista negra ou como auxílio ao gerenciamento manual dos parâmetros da rede de sensores.

2.5 Sistemas Embarcados

Sistemas embarcados são sistemas computacionais usualmente dedicados a uma determinada tarefa específica. Geralmente esses sistemas desempenham papel crítico e são inseridos em um sistema maior. Essa definição abrange quase todos os sistemas embarcados, embora alguns sistemas permitam a execução de diversas tarefas, como os PDAs, smartphones e TV digital [49]. Esses sistemas computacionais são considerados como sistemas embarcados, mas são capazes de executar uma gama de aplicações diferentes, se assemelhando nesse aspecto com os computadores de propósito geral.

Em geral, o desenvolvimento de sistemas embarcados deve respeitar uma série de restrições que comumente não são encontradas em sistemas computacionais de propósito geral, usualmente baseados em computadores pessoais. Os sistemas de propósito geral geralmente precisam se preocupar apenas com os requisitos funcionais do sistema, e às vezes poucos requisitos não funcionais, que geralmente não são críticos. Por outro lado, no projeto de um sistema embarcado quase sempre existem uma série de restrições que devem ser enfrentadas, como: desempenho, consumo de energia, confiabilidade, tamanho, entre outras. Dessa forma, o grande desafio no desenvolvimento de sistemas embarcados não é apenas implementar as funcionalidades requeridas, mas conseguir implementar os requisitos funcionais ao mesmo tempo em que todas as restrições (que muitas vezes formam *trade-offs*) sejam atendidas.

Muitos sistemas embarcados também devem lidar com questões de temporização. Esses sistemas são conhecidos como sistemas de tempo real. Dessa forma, para que um sistema execute de forma correta, ele precisa não apenas executar uma tarefa corretamente, mas executá-la no tempo correto.

Os sistemas embarcados estão inseridos em diversas áreas, como em aplicações industriais, aplicações médicas, aplicações automobilísticas e em telecomunicações. Especificamente na indústria, os sistemas embarcados usualmente estão inseridos em sistemas de controle de processo e automação industrial, entre outros [14].

2.5.1 Modelo básico de um sistema embarcado

Existem muitas maneiras de se desenvolver um sistema digital embarcado. Pode-se, por exemplo, utilizar um dispositivo lógico programável, um ASIC ou optar pela construção de um sistema embarcado baseado em um microprocessador ou microcontrolador.

Uma vez que o projeto de um circuito integrado é uma tarefa que leva tempo e possui alto custo, a possibilidade de reusar componentes de *hardware*, modificando apenas o *software* para uma determinada aplicação torna o desenvolvimento de sistemas embarcados baseados em microprocessador/microcontrolador uma alternativa bastante atraente.

Microprocessadores/microcontroladores são usualmente fabricados em grande escala e utilizados em uma vasta quantidade de aplicações, de modo que seu custo se torna bastante reduzido. Além disso, muitas vezes utilizar um microprocessador pode resultar em um projeto mais eficiente do que o alcançado em um projeto de circuito customizado.

Embora a execução de instruções em um microprocessador sofra com a sobrecarga para a busca e decodificação das mesmas, os microprocessadores/microcontroladores modernos implementam técnicas que torna a execução do *software* bastante eficiente. Processadores RISC modernos podem executar uma instrução por ciclo de *clock* na maior parte do tempo e processadores de alto desempenho são capazes de executar várias instruções por ciclo. Portanto, a sobrecarga pode ser compensada pelo paralelismo interno no processador, utilizando, por exemplo, pipeline e múltiplas unidades funcionais [64].

Apesar de o desenvolvimento de um sistema embarcado baseado em microprocessador/microcontrolador muitas vezes estar concentrado no desenvolvimento do *software* que irá controlar o sistema (denominado *firmware*), é necessário um bom conhecimento do *hardware* sobre o qual o *software* será desenvolvido. Sem um conhecimento conceitual do *hardware* não é possível desenvolver o *software* de forma adequada. Uma característica importante dos sistemas embarcados diz respeito à baixa portabilidade de código, visto que eles geralmente são desenvolvidos considerando uma configuração de *hardware* específica. A Figura

2.5 ilustra um modelo básico de um sistema embarcado, contendo os seguintes componentes: sensores (representados pela seta laranja), atuadores (representados pela seta verde), interfaces de entrada e saída, unidade de processamento e memória [50].

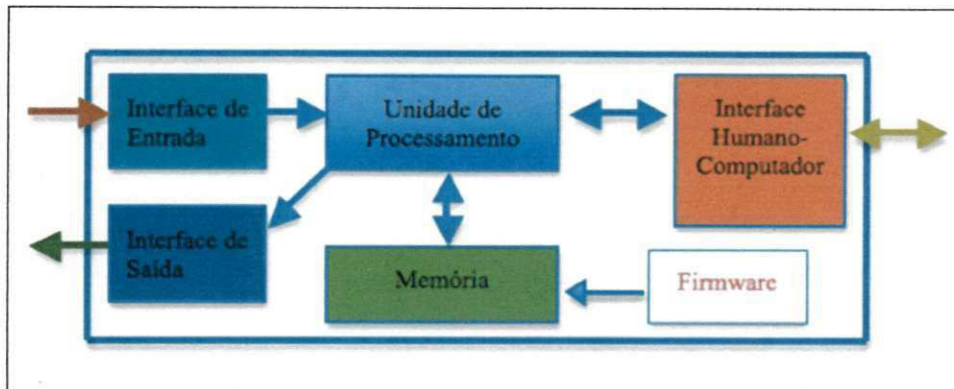


Figura 2.5: Modelo básico de um sistema embarcado.

Os sensores são responsáveis por obter dados do ambiente ou objeto onde estão inseridos, como valores de corrente e tensão de motores, por exemplo. Esses dados são muitas vezes adquiridos no formato analógico, então a interface de entrada pode possuir condicionadores de sinais, que irão ajustar os dados para que sejam compatíveis com o *hardware* do sistema, além de conversores analógico para digital, que convertem os dados de modo que possam ser processados pela unidade de processamento. Os atuadores são responsáveis por provocar mudanças no ambiente ou objeto onde estão inseridos. Assim como os sensores, os atuadores podem ser analógicos, então podem ser necessários condicionadores de sinais e um conversor digital para analógico.

Além dos atuadores e sensores, o sistema pode se comunicar com os usuários através de uma interface humano-computador. Essa interface pode ligar componentes como botões e displays, que permitem ao usuário interagir diretamente com o sistema embarcado.

As interfaces de entrada e saída também podem ser utilizadas para prover comunicação do sistema embarcado com outros sistemas computacionais, através de algum padrão de comunicação. Por exemplo, em uma rede de sensores sem fio os sistemas que formam os nós sensores se comunicam entre si através de uma interface de comunicação sem fio.

No núcleo do sistema é encontrada a unidade de processamento, que recebe dados externos, realiza computações sobre esses dados e gera resultados que são disponibilizados

através das interfaces de saída. A memória armazena o *firmware*, que é responsável pelo controle do sistema, além de armazenar dados durante a execução do mesmo.

Em geral, sistemas embarcados possuem tamanho reduzido. Da mesma forma, sua capacidade de processamento e armazenamento também é reduzida. Além disso, esses sistemas muitas vezes são utilizados em ambientes com pouca acessibilidade e possuem fonte de energia limitada [64].

Usualmente, os microprocessadores utilizados em sistemas embarcados possuem capacidade de processamento bem menor que os processadores encontrados em computadores pessoais, mas possuem também vantagens, como baixo custo e baixo consumo de energia. A quantidade de memória disponível em um sistema embarcado também é bem menor que a quantidade de memória encontrada em um computador pessoal. O programador deve levar isso em consideração na hora de desenvolver o *software*, que deve possuir um código pequeno, respeitando o limite do tamanho da memória de programa e também utilizar pouca memória de dados, respeitando o limite da memória disponível para os dados [55].

Além das considerações sobre as limitações de espaço, processamento e energia, o projeto de um sistema embarcado deve garantir a confiabilidade e respeitar as suas restrições de tempo, visto que muitas vezes esses sistemas fazem parte de sistemas maiores e realizam uma tarefa importante.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

3.1 Sistemas de Monitoramento Industrial Utilizando Redes de Sensores sem Fio

Esta seção descreve alguns trabalhos [24] [19] [52] [43] já desenvolvidos focando na aplicação de redes de sensores sem fio em ambiente industrial. Nota-se que ainda é relativamente pequena a quantidade de trabalhos que visam o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle na indústria utilizando Redes de Sensores sem Fio. Por outro lado, muitos trabalhos recentes tratam da avaliação de desempenho de rádios em ambiente industrial [11] [27] [10] [58] [38] [23] e alguns trabalhos recentes descrevem os desafios para a utilização de tecnologia de redes sem fio em ambiente industrial [25] [62] [63] [3] [26].

González et al. [24] desenvolveram uma rede de sensores para monitoramento de temperatura e pH em barris para processamento de couro em ambiente industrial. Os resultados focam principalmente na validação dos valores de temperatura e pH obtidos. Foi realizado um experimento consistindo no monitoramento de um barril durante 108 horas e foi verificada uma taxa de perda de pacotes média de 13%. Entretanto, não foi realizado nenhum estudo para verificação da qualidade do meio de comunicação.

Flammini et al. [19] apresentam o projeto e avaliação experimental de um protocolo de comunicação sem fio em tempo real, visando aumentar a confiabilidade e o determinismo desse tipo de rede para aplicações de monitoramento na indústria. Foram utilizados rádios que implementam a camada física do IEEE 802.15.4 e a camada de acesso ao meio foi imple-

mentada utilizando TDMA. Um protótipo foi construído para monitoramento de temperatura em máquinas para processamento de plástico. Embora utilize TDMA, o protocolo desenvolvido nesse artigo não utiliza salto de frequência e a rede suporta apenas topologia em estrela. Dessa forma, o protocolo proposto funciona de forma diferente do *WirelessHART* e *ISA100*. A taxa de entrega de informações nos protocolos *WirelessHART* e *ISA100* é baixa e esse protocolo visa otimizar esse aspecto.

Para evitar interferências foi adotada uma estratégia de diversidade de canal. O protocolo define um canal de *backup* e a rede muda para o canal de *backup* quando a qualidade de comunicação do canal primário se torna ruim. A rede de sensores foi instalada para o monitoramento de quatro máquinas e experimentos foram realizados para avaliar o desempenho da rede, entretanto não foi incluída nenhuma fonte de interferência no ambiente para avaliar o desempenho da rede em cenários de alta interferência e o mecanismo de *backup* de canal não chegou a ser utilizado. Também não foram realizados experimentos para verificar a qualidade do meio de comunicação no ambiente de operação da rede.

Salvadori et al. [52] propuseram um sistema digital para avaliação de uso de energia, diagnóstico, controle e supervisão de sistemas elétricos aplicando redes de sensores sem fio com baixo consumo de energia. O sistema implementa um protocolo de gerenciamento dinâmico de energia e possui fácil instalação, baixo custo, fácil implementação de rotinas redundantes, portabilidade, versatilidade e tempo de vida estendido. Esse trabalho foca no consumo de energia e não traz estudos detalhados sobre erros de transmissão e condições do canal de comunicação.

Bin Lu et al. [43] identifica em seu trabalho as sinergias entre redes de sensores sem fio e análise de motores baseado nos sinais elétricos de forma não invasiva e propõe um esquema para aplicar redes de sensores sem fio no monitoramento *online* e remoto de energia e diagnóstico de falhas em sistemas de motores industriais.

O artigo também apresenta algumas análises de desempenho e expõe desafios reais no desenvolvimento e implantação de redes de sensores na prática, incluindo qualidade dinâmica do enlace sem fio, ruído e interferência, além do impacto do ambiente no alcance de comunicação e confiabilidade. São implementados dois métodos não invasivos para diagnóstico de motores para provar sua aplicabilidade e os desafios em aplicar o esquema proposto em um ambiente industrial real são analisados experimentalmente usando resultados de ensaios

em campo.

O trabalho de Lu et al. [43] possui grande relevância visto que são implementados métodos de monitoramento de eficiência em motores utilizando redes de sensores sem fio. Entretanto, apesar de apresentar estudos experimentais de desempenho do sistema, não inclui uma análise suficientemente detalhada da relação entre o desempenho da rede e a qualidade do meio de comunicação. Além disso, foi testada uma rede com apenas um nó final.

A principal limitação do trabalho apresentado em [43] deriva da baixa taxa de transferência provida pelas redes de sensores sem fio baseadas no padrão IEEE 802.15.4, uma vez que a rede de sensores proposta não emprega processamento local. Assim, é necessário transmitir uma grande quantidade de dados para estimar os parâmetros desejados. Isso limita, entre outras coisas, a taxa de aquisição a partir dos sensores. Em uma RSSF com uma grande quantidade de nós, a situação se torna ainda pior, visto que todos os nós compartilham o mesmo meio físico de comunicação. Além disso, deve-se levar em consideração a falta de confiabilidade inerente das redes sem fio, o que pode resultar em erros na transmissão dos dados obtidos a partir dos sensores, prejudicando o processo de estimação dos parâmetros.

3.2 Avaliação de Desempenho de Redes de Sensores sem Fio Baseadas no Padrão IEEE 802.15.4

Alguns trabalhos [54] [27] [37] realizaram estudos de desempenho do padrão IEEE 802.15.4. Outros trabalhos [10] [58] realizaram estudos da aplicação desse padrão em ambiente industrial. Nessa seção esses trabalhos serão descritos e os principais resultados obtidos serão discutidos.

Lee [37] estudou várias características do padrão IEEE 802.15.4, incluindo os efeitos do uso de transmissão direta e transmissão indireta, do mecanismo CSMA/CA, do tamanho do pacote de dados e o uso do modo *beacon*. As métricas investigadas foram taxa de transferência, taxa de entrega de pacotes e a indicação de força do sinal recebido (*Received Signal Strength Indication*, RSSI). Os experimentos foram realizados utilizando uma topologia em estrela. Os pacotes de reconhecimento (ACK) foram habilitados, mas a retransmissão foi desabilitada. Foram transmitidos 10.000 mil pacotes a partir do nó final (transmissão direta) ou a partir do coordenador (transmissão indireta) para cada experimento.

Foi observada uma taxa de transferência de 153,02 kbps para transmissão direta e 65,69 kbps para transmissão indireta. A taxa de transmissão nominal da camada física é de 250 kbps, entretanto existe uma sub-utilização devido ao mecanismo do CSMA/CA, no qual cada pacote a ser transmitido deve passar obrigatoriamente por pelo menos um período de *backoff*. Para a transmissão indireta, a taxa obtida foi menor devido à necessidade de envio de solicitação por parte dos nós finais, denominada *polling*. Foram realizados experimentos variando a quantidade de nós finais (1 a 4 nós) e variando a taxa de dados gerada por cada um (10, 50 e 100 kbps). Verificou-se que dependendo da configuração, a taxa de transferência efetiva pode variar de 15 kbps a 35 kbps, sendo a configuração com 4 nós gerando 100 kbps o pior caso. Já a taxa de entrega de pacotes variou de 62% (4 nós e 100 kbps) até 100% (um nó).

Também foi investigado o impacto do tamanho dos pacotes no desempenho da rede. Os resultados mostram que com o aumento do tamanho do pacote de dados, também cresce a taxa de transferência, uma vez que o *overhead* diminui. A taxa de entrega de pacotes varia pouco nos cenários com 1, 2 e 3 nós. Quando são utilizados 4 dispositivos observou-se uma maior diferença na taxa de entrega de pacotes (80% para pacotes de 20 bytes e 60% para pacotes de 100 bytes). Verificou-se também que a utilização do modo *beacon* provoca uma redução na taxa de transferência, se comparado com o modo *non-beacon*.

Sikora e Groza [54] realizaram medidas para avaliar as questões de co-existência na banda ISM de 2.4 GHz. O impacto dos três sistemas mais importantes que interferem com o padrão IEEE 802.15.4 foram investigados, são eles: IEEE 802.11, *Bluetooth* e fornos microondas. Entretanto, não foi realizado nenhum estudo sobre o impacto desses sistemas na ocupação espectral e nem a correlação entre o desempenho dos rádios e o nível de ocupação espectral no ambiente de operação da rede. A avaliação do impacto do forno microondas e do *Bluetooth* foi bastante limitada. O artigo apresenta resultados mais detalhados apenas para a interferência causada pelo IEEE 802.11. Foi observado que a taxa de perda de pacotes pode chegar até 90% no cenário com a co-existência com o IEEE 802.11, mas nenhuma informação sobre a variância foi fornecida.

Bello e Toscano [10] conduziram estudos para obter um melhor entendimento sobre a interferência entre canais em redes IEEE 802.15.4 aplicadas na indústria. A distância entre dois canais no padrão IEEE 802.15.4 na banda de 2.4 GHz é de 5 MHz. Entretanto, devido

à modulação utilizada na camada física, uma pequena fração do sinal é espalhada para fora do intervalo de 5 MHz. Dessa forma, redes IEEE 802.15.4 que estão funcionando em um mesmo ambiente e em canais adjacentes podem interferir uma na outra.

Tang et al. [58] conduziram vários experimentos utilizando rádios IEEE 802.15.4 e apresentaram estudos abrangendo tanto características temporais como espaciais da operação desses rádios na indústria. Propriedades críticas foram analisadas em termos de RSSI, indicador de qualidade do link (*Link Quality Indicator*, LQI) e taxa de perda de pacotes (TPP). Esse trabalho também conduziu um estudo sobre a simetria dos *links* na rede, focando no impacto causado por obstruções físicas, principalmente por objetos metálicos. Entretanto, não foram realizados estudos sobre o impacto causado pela inserção de outras fontes de interferência no ambiente, nem estudos sobre ocupação espectral.

Guo et al. [27] realizou um estudo experimental sobre a interferência causada pelas tecnologias *WiFi* (IEEE 802.11) e *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) e por fornos microondas na comunicação de rádios *ZigBee*. As métricas analisadas foram RSSI, LQI e TPP. Foram realizados experimentos para estudar o impacto da distância entre as fontes de interferência e os rádios *ZigBee*. Finalmente, eles descreveram um modelo para tentar estimar os valores obtidos pelos experimentos. Os experimentos mostraram que existe uma fraca correlação entre TPP e RSSI, cerca de 43,3%, para os cenários considerados. A correlação entre LQI e TPP foi de 73,1%, o que indica uma forte correlação. Entretanto, a alta variância apresentada é um ponto fraco em utilizar LQI para estimar TPP. O artigo apresentou resultados apenas para um pequeno número de canais e não conduziu estudos sobre ocupação espectral.

Capítulo 4

Rede de Sensores sem Fio para Monitoramento de Motores

É de grande interesse na indústria diminuir o consumo de energia elétrica. Uma maneira de se obter tal economia é a partir do monitoramento de motores elétricos, os quais são empregados na maioria dos processos industriais e são responsáveis por mais de dois terços do consumo de energia elétrica nesse setor [44]. Entre os parâmetros que podem ser monitorados, o torque é um dos principais, visto que é determinante na detecção de falhas nos motores, permitindo evitar grandes perdas no processo de produção [41]. O torque no eixo do motor pode ser estimado a partir dos sinais elétricos de alimentação do mesmo. Embora essa técnica apresente menor exatidão em comparação com os métodos de medição direta, ela é menos invasiva e permite que se monitore o torque utilizando sensores de corrente e tensão de baixo custo e que podem ser facilmente integrados em uma Rede de Sensores sem Fio.

Além do efeito preventivo, medidas de torque também permitem estimar a eficiência de motores elétricos. Entre todas as funções de monitoramento, a estimativa de eficiência é a mais importante quando se pretende promover a redução na utilização da energia na indústria [43]. Hsu e Scoggins [31] apresentam um método para estimar a eficiência energética de motores a partir do torque no entreferro (*air-gap*) que, por sua vez, é obtido a partir dos parâmetros elétricos do motor. Lu et al. [44] também utilizaram essa técnica para medir eficiência de motores.

Nesse trabalho foi desenvolvida uma RSSF para monitoramento de motores de indução trifásicos na indústria. Esses motores correspondem a cerca de 90% dos motores utilizados

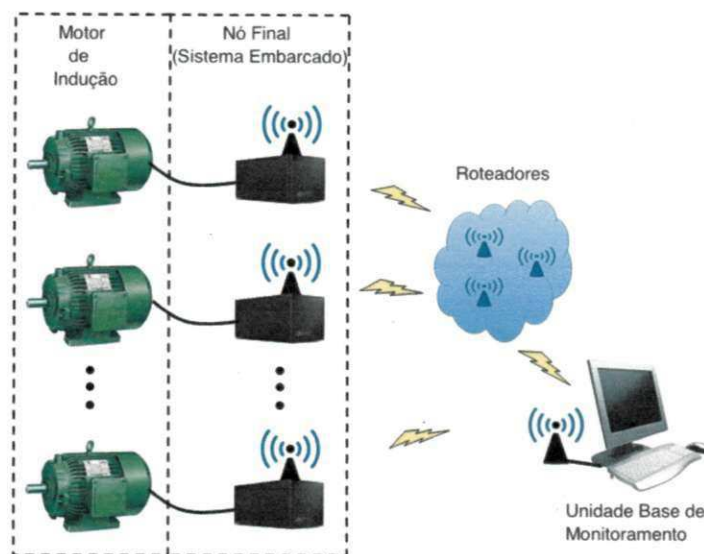


Figura 4.1: Rede de Sensores sem Fio para monitoramento de motores.

[28], sendo responsáveis pelo consumo de grande parte da energia no setor industrial. A rede de sensores é formada por nós inteligentes, que realizam todo o processamento para estimativa dos parâmetros localmente, transmitindo para uma unidade de monitoramento apenas os parâmetros desejados previamente calculados, reduzindo consideravelmente o volume de dados na rede e a probabilidade de colisão de pacotes.

O processamento local é essencial para prover escalabilidade à rede e também para permitir boa acurácia na estimativa dos parâmetros, o que exige uma alta taxa de aquisição a partir dos sensores. Os parâmetros calculados são o torque e a eficiência. A estimativa é realizada a partir dos parâmetros elétricos do motor, utilizando sensores de corrente e tensão e empregando o método do *air-gap torque*, visto que esse é o método de estimativa não invasivo que possui menor incerteza [30] [1]. Mais detalhes sobre o método de estimação utilizado podem ser encontrados em [44], [43], [2] e [1]. Na subseção 4.1 é mostrada uma breve descrição sobre o processo de estimação dos parâmetros.

A Figura 4.1 ilustra a RSSF proposta, na qual os nós finais estão localizados junto aos motores elétricos. Os valores de corrente e tensão são obtidos a partir dos sensores, e o sistema embarcado realiza o processamento para determinar o torque e a eficiência. As informações obtidas são então transmitidas pela RSSF para uma estação base de monitoramento. Na base de monitoramento um *software* é responsável por receber as informações obtidas a partir de

todos os motores e disponibilizá-las para análise em tempo real.

Pode não ser possível estabelecer comunicação entre os nós finais e o coordenador diretamente, devido ao alcance limitado dos rádios e à interferência presente no ambiente, entre outros fatores. Dessa forma, a área de cobertura da rede pode ser expandida utilizando roteadores.

A princípio, vários motores podem ser monitorados simultaneamente e os valores monitorados podem ser visualizados em tempo real em um computador convencional, a partir de um aplicativo que permite a visualização e armazenamento dos dados.

4.1 Método para Estimação de Torque e Eficiência

4.1.1 Estimação de Torque no Eixo do Motor

Para estimação do torque no eixo do motor utilizou-se o método do torque no entreferro (*air gap torque*). O entreferro é a região onde ocorre o processo de conversão eletromecânica do motor. De acordo com a Equação 4.1, o torque no entreferro (T_{ag}) pode ser estimado de forma não invasiva a partir dos valores de corrente e tensão elétrica do motor [31].

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} \left\{ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + r(2i_a + i_b)] dt \right. \\ \left. + (2i_a + i_b) \int [(v_{ab} - r(i_a - i_b))] dt \right\} \quad (4.1)$$

Onde:

p - número de pólos do motor;

i_a, i_b - correntes de linha do motor;

v_{ca}, v_{ab} - Tensões de linha do motor;

r - Resistência de armadura do motor;

A equação 4.1 pode ser aplicada utilizando aquisições simultâneas de i_a, i_b, v_{ca}, v_{ab} , e um valor medido de r .

Para obter o torque no eixo do motor (T_{shaft}) a partir do torque no entreferro, devem ser consideradas as perdas que venham a acontecer depois da conversão eletromecânica, de acordo com a Equação 4.2 [31].

$$T_{shaft} = T_{ag} - \frac{L_{mec}}{\omega_r} - \frac{L_{Rsl}}{\omega_r} \quad (4.2)$$

As perdas mecânicas (L_{mec}) variam de acordo com o motor em particular e o processo industrial em que o mesmo está inserido. Se não for possível estimar as perdas, se faz necessário um teste com o motor operando em vazio (sem carga) para determiná-las. As perdas adicionais (L_{Rsl}) resultam de fenômenos não-lineares de naturezas distintas e podem ser aproximadas por uma porcentagem da potência do motor [57].

Na Equação 4.2, ω_r é a velocidade do rotor e precisa ser estimada ou medida a partir de sensores de velocidade.

4.1.2 Estimação da Eficiência

A eficiência do motor, η , pode ser estimada pela relação entre a potência elétrica fornecida para o motor (potência de entrada (P_{in})) e a potência mecânica fornecida ao eixo do motor (potência de saída (P_{out})), de acordo com a Equação 4.3.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.3)$$

O valor de P_{in} de um motor de indução trifásico é calculado utilizando os valores de corrente e tensão, de acordo com a equação 4.4.

$$P_{in} = i_a v_a + i_b v_b + i_c v_c = -v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab} i_b \quad (4.4)$$

O valor de P_{out} pode ser determinado a partir do torque no eixo (obtido de acordo com a seção 4.1.1) e a velocidade, como segue:

$$P_{out} = T_{shaft} \omega_r \quad (4.5)$$

Dessa forma, a eficiência (η) é obtida a partir da Equação 4.6.

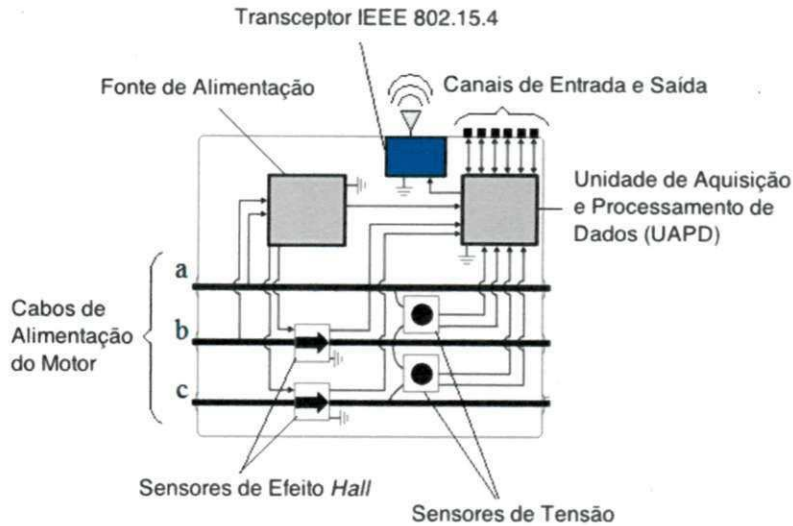


Figura 4.2: Diagrama de blocos do sistema embarcado.

$$\eta = \frac{T_{shaft}\omega_r}{-v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b} \quad (4.6)$$

Diversos métodos para estimação da velocidade (ω_r) tem sido propostos. Esses métodos seguem duas categorias: uma empregando um modelo do motor de indução e outra a partir da análise no domínio da frequência de valores de tensão e corrente. Nesse trabalho foi utilizado um método de linearização, no qual é definida uma relação linear entre o valor de torque e o valor de velocidade. Os parâmetros dessa relação linear variam de acordo com o motor. Para determinar os parâmetros são necessários dois pontos da função linear e esses pontos são definidos a partir da especificação (*nameplate*) do motor. O primeiro ponto é quando a velocidade é nominal (torque nominal). O segundo ponto é quando o torque é zero (sem carga) e a velocidade está perto da síncrona. Mais detalhes sobre os métodos de estimação de velocidade podem ser encontrados em [2] [1].

4.2 Descrição do Sistema Embarcado

Os nós da rede de sensores proposta nesse trabalho são compostos por sistemas embarcados capazes de adquirir valores de tensão e corrente, realizar o processamento para estimação de torque e eficiência e transmitir esses valores através da rede de sensores. A Figura 4.2 mostra um diagrama de blocos simplificado do sistema embarcado.

São empregados dois sensores de corrente e dois sensores de tensão. Para medição de corrente foram utilizados sensores de efeito *Hall*, principalmente devido à sua robustez e pouca invasividade [18]. Os sensores de efeito *Hall* fornecem como saída um valor de tensão que corresponde à corrente medida a partir dos fios de alimentação do motor. Para medição de tensão foram utilizados transformadores de tensão, que reduzem os valores de tensão recebidos como entrada a partir dos fios de alimentação do motor para uma faixa de valores que permita sua leitura a partir do sistema embarcado. Foram utilizados transformadores de núcleo de grão orientado, os quais provêm os sinais de tensão sem atraso entre si.

A unidade de aquisição e processamento de dados (UAPD) é responsável pela aquisição e conversão dos valores de tensão e corrente, além do processamento para estimação dos parâmetros. Os valores oriundos dos sensores de corrente e tensão passam por um circuito de condicionamento de sinais, que tem como objetivo ajustar os valores de tensão fornecidos pelos sensores para a faixa suportada (0 a 3,3 V) pelo conversor analógico para digital (CAD).

O principal elemento do UAPD é um dsPIC33FJ64GP706 [46], fabricado pela *Microchip*™, que consiste em um controlador de sinais digitais designado para aplicações de processamento de sinais que requerem alto poder de processamento. Um controlador de sinais digitais é um circuito integrado que possui características tanto de microcontroladores quanto de processadores de sinais digitais (DSPs). Ele possui boa parte dos componentes de *hardware* necessários para o desenvolvimento do sistema embarcado. A Figura 4.3 mostra um diagrama de blocos com os principais componentes da arquitetura da família de controladores de sinais digitais dsPIC33F.

Os controladores de sinais digitais da família dsPIC33F possuem arquitetura *Harvard*. A arquitetura *Harvard* se diferencia da arquitetura *Von Neumann* pela organização da memória. A arquitetura *Von Neumann* define memória compartilhada para dados e instruções, enquanto

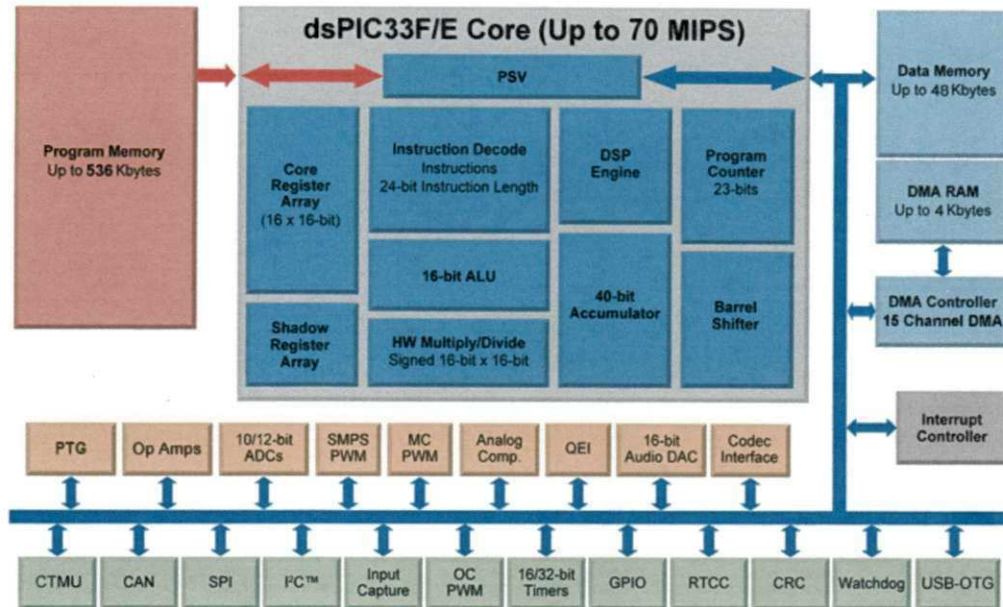


Figura 4.3: Diagrama de blocos do dsPIC33F [47].

que a arquitetura *Harvard* define memórias separadas para dados e instruções. Dessa forma, a arquitetura *Harvard* permite que o *fetch* de instruções e a leitura de dados aconteça em simultâneo, visto que existem dois barramentos separados para dados e instruções. Isso provoca um ganho de desempenho, sendo muito útil em sistemas que precisam ler grande quantidade de dados e realizar processamento em tempo real, como acontece em aplicações de processamento digital de sinais.

O dsPIC33FJ64GP706 apresenta um conjunto de instruções especiais para processamento de sinais, implementadas em uma unidade chamada *DSP engine*. Além do *DSP engine*, o dsPIC33FJ64GP706 possui um rápido multiplicador 16x16 bits em *hardware*. O dsPIC33F possui uma arquitetura RISC de 16 bits, ou seja, seu processador possui um conjunto reduzido de instruções que são executadas em um único ciclo de máquina. Dessa forma, tanto as instruções comuns como as instruções do *DSP engine* são executadas em um único ciclo de máquina [46].

O gráfico na Figura 4.4 mostra uma comparação entre microcontroladores, DSPs e controladores de sinais digitais (dsPIC). Os controladores de sinais digitais dsPIC33F, com arquitetura de 16 bits, oferecem desempenho comparável a microcontroladores de 32 bits e a alguns DSPs, com uma melhor relação custo benefício. Além do menor custo, o dsPIC

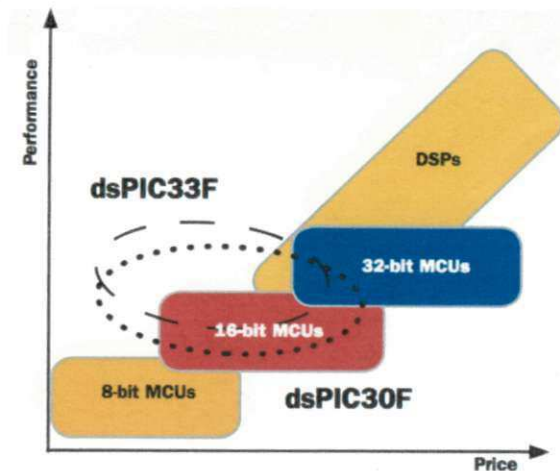


Figura 4.4: Comparação entre dsPic e DSP [47].

apresenta como vantagem em relação aos DSPs o melhor suporte à interrupções e um ótimo suporte a periféricos, que são características dos microcontroladores. Dessa forma, muitas aplicações de processamento digital de sinais podem tirar vantagem dessa tecnologia, como no caso da rede de sensores inteligente proposta nesse trabalho. No entanto, dependendo da capacidade de processamento requerida por algumas aplicações, pode ser necessário utilizar um DSP.

Para que os dados oriundos dos sensores sejam processados é necessário realizar a conversão dos mesmo para digital. O dsPIC33FJ64GP706 possui dois conversores analógicos para digital (CAD) integrados. Cada conversor pode realizar a aquisição de até 4 canais em simultâneo a uma taxa de até 500 KHz e resolução de 10 bits. A aquisição em simultâneo dos valores de corrente e tensão é essencial para prover boa acurácia na estimação dos parâmetros.

O UAPD possui canais de entrada/saída que podem ser utilizados para interface com o usuário e possíveis conexões a sensores auxiliares ou atuadores. Os valores de torque e eficiência do motor são transmitidos pelo transceptor IEEE 802.15.4. A conexão entre o dsPIC33FJ64GP706 e o transceptor IEEE 802.15.4 é realizada utilizando uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*).

O transceptor IEEE 802.15.4 é composto por um MRF24J40MA, fabricado pela *Microchip*™. O MRF24J40MA implementa as camadas física e de acesso ao meio de acordo com o padrão IEEE 802.15.4 para operação na banda ISM de 2.4 GHz. A Tabela 4.1 mostra as

Tabela 4.1: Principais características do MRF24J40.

Faixa de Frequência	2.4 GHz
Taxa de Transferência	250 kbps
Potência mínima de entrada (sensibilidade)	-94 dBm
Consumo	10 mA (RX) / 23 mA(TX)
Suporte a protocolos	<i>ZigBee e MiWi</i>
Alcance (máximo)	120 metros
Antena	PCB integrada

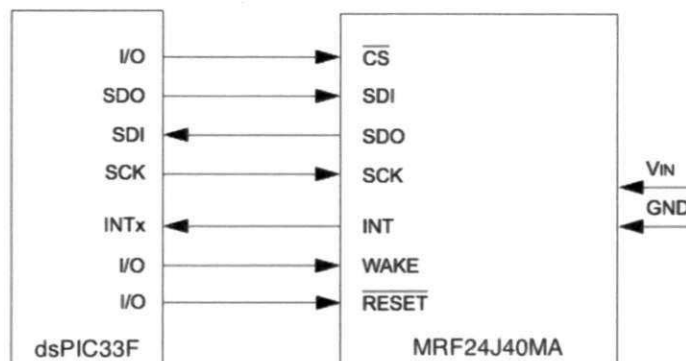


Figura 4.5: Conexão SPI [45].

principais características do MRF24J40MA.

A Figura 4.5 ilustra a conexão entre o dsPIC33FJ64GP706 e o MRF24J40, através da interface SPI. São utilizados quatro pinos do dsPIC33F e do MRF24J40 para a comunicação através da interface SPI: um para transmissão (SDO), um para recepção (SDI), um para o sinal de clock (SCK) e outro para habilitação (CS). Na comunicação SPI usualmente existe um mestre e um escravo. O sinal de clock é gerado pelo mestre para a sincronização e o sinal de habilitação serve para habilitar o escravo. Dessa forma, o dsPIC33F age como mestre na comunicação com o MRF24J40MA.

Além dos quatro pinos definidos pelo barramento SPI, ainda existem três conexões entre o dsPIC33F e o MRF24J40. A primeira é uma linha de interrupção que permite que o

Tabela 4.2: Comparação Entre Transceptores de Diferentes Padrões.

Padrão	IEEE 802.11 (MRF24WB0MA)	IEEE 802.15.1 (RN-42)	IEEE 802.15.4 (MRF24J40MA/MRF24J40MB)
Faixa de Frequência	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Alcance	400 m	30 m	120 m / 1200 m
Taxa de Transferência	1 ou 2 Mbps	até 2 Mbps	250 kbps
Consumo (TX)	154 mA	30 mA	19 mA / 130 mA
Preço (Fonte: digikey.com (em 01/2012))	\$ 25,42	\$ 19,14	\$ 10,65 / \$ 18,60
Interface de I/O	SPI	UART	SPI
Fabricante	Microchip	Rovig Networks	Microchip

MRF24J40 gere interrupções no dsPIC33F. Por exemplo, a cada vez que um novo pacote é recebido uma interrupção é gerada para informar ao dsPIC33F que existem novos dados recebidos a partir da rede sem fio. Existem ainda dois pinos de entrada no MRF24J40, um para reiniciar o transceptor (*RESET*) e outro para tirar o transceptor do estado *sleep* (*WAKE*).

A Tabela 4.2 mostra uma comparação entre transceptores disponíveis no mercado para implementação de sistemas embarcados com comunicação sem fio. A partir da tabela podemos perceber as diferenças entre os padrões IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.1 em termos de vários parâmetros, como: custo, alcance e consumo de energia.

O transceptor IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*) consegue aliar uma boa taxa de transferência, baixo consumo de energia e baixo custo, entretanto o alcance é limitado (30 m). O transceptor IEEE 802.11 consegue aliar boa taxa de transferência e um alcance relativamente alto, entretanto possui um alto custo e consome mais energia. Os transceptores IEEE 802.15.4

apresentam baixa taxa de transferência e o menor custo entre todas as opções. O consumo de energia também é reduzido, mas pode variar de acordo com o alcance. Por exemplo, o transceptor MRF24J40MA possui menor consumo de energia que o transceptor IEEE 802.15.1, mesmo com um alcance 4 vezes maior. O MRF24J40MB possui um alcance de até 1,2 Km, e apesar do grande alcance ainda consome menos energia que o transceptor IEEE 802.11 (alcance de 400 m), além de ser mais barato que os transceptores IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1.

Dentre os transceptores IEEE 802.15.4 existentes no mercado, a escolha pelo MRF24J40MA se deu principalmente por dois motivos. O MRF24J40MA é comercializado em um formato que permite sua inserção em um sistema embarcado de forma muito fácil, através de sua interface de 12 pinos, além de já possuir a antena integrada. A segunda vantagem é que existe um bom suporte para a utilização do MRF24J40MA em conjunto com o dsPIC, visto que ambos são produtos da *Microchip*TM.

O software embarcado para executar no controlador digital de sinais foi desenvolvido em C. O diagrama de atividades na Figura 4.6 ilustra a operação interna do sistema embarcado. Quando o sistema inicia, os parâmetros do sistema embarcado são configurados. Esses parâmetros incluem as configurações da rede sem fio, como a definição do endereço e do canal de operação, e os parâmetros do conversor analógico para digital. Para obter boa acurácia a partir de um algoritmo simples de integração numérica, como o trapezoidal (utilizado para implementar o algoritmo de estimação), é necessário utilizar uma taxa de aquisição maior que 2 KHz [44].

Embora o CAD integrado ao dsPIC33F permita taxas de aquisição maiores, em nosso sistema ele foi configurado para operar com uma taxa de aquisição de 3 KHz e 10 bits de resolução. A taxa de aquisição escolhida satisfaz os requisitos da aplicação e realiza um compromisso entre a precisão da conversão e a quantidade de memória e capacidade de processamento do sistema. Quanto maior a taxa de aquisição, maior a quantidade de dados que precisam ser processados e armazenados para cada ciclo de aquisição. Dessa forma, se uma taxa de aquisição muito alta for utilizada pode-se extrapolar o limite de memória disponível e a latência de processamento pode se tornar muito alta.

Após o primeiro passo, o sistema se conecta à RSSF. O sistema embarcado apenas começa a adquirir e processar os dados depois de se conectar com sucesso a um coordenador operando no mesmo canal. Após se conectar, o sistema entra no *loop* de aquisição, proces-

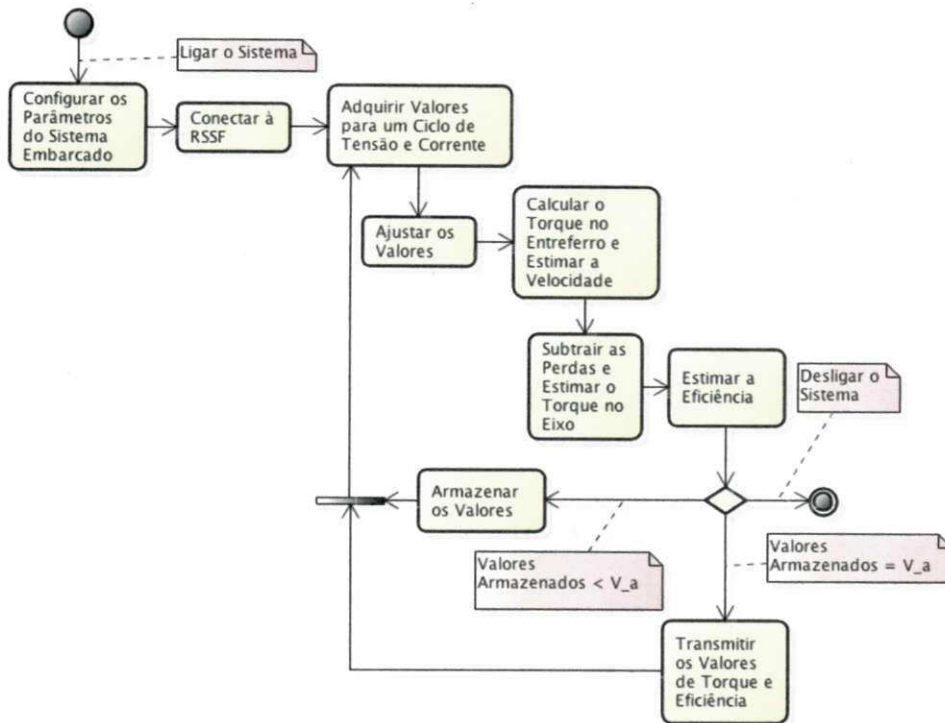


Figura 4.6: Diagrama de atividades.

samento e transmissão de dados, que se repete até que o sistema seja desligado.

Os valores de corrente e tensão, após adquiridos, devem ser ajustados para refletir os valores reais medidos a partir dos sensores. Esse ajuste inclui a retirada do *offset* e a multiplicação dos valores obtidos pela constante de proporção dos sensores. Após isso, o algoritmo é executado para computar o valor do torque no entreferro e também é feita a estimação da velocidade (realizada a partir do torque no entreferro), de acordo com a equação 4.1. Em seguida as perdas são subtraídas e o torque no eixo é estimado, de acordo com a equação 4.2. Utilizando os valores de torque no eixo e velocidade, os valores de eficiência são então estimados.

O sistema embarcado pode ser configurado para calcular um conjunto de V_a valores (2 bytes cada) de torque e eficiência, e então transmitir esses valores agregados em um conjunto de pacotes.

Na seção 4.3 o impacto da latência de processamento do sistema embarcado será investigado. Também será realizado um estudo teórico sobre a relevância do processamento local,

principalmente em cenários com altos níveis de interferência.

4.3 Análise Teórica Sobre a Relevância do Processamento Local

4.3.1 Análise da Latência de Processamento

Inicialmente iremos explorar a latência para a transmissão das informações, considerando o meio de transmissão livre de erros. Cada nó obtém dados de dois sensores de corrente e dois sensores de tensão a uma taxa de aquisição T_a hertz, com uma taxa de transferência disponível igual a W bps. Temos que cada valor de tensão e corrente, obtidos a partir dos sensores, possui b bits. O valor de b depende da resolução do conversor analógico para digital utilizado.

Considerando que os sinais de corrente e tensão possuem uma frequência de 60 Hz, e que para calcular um valor de torque *air-gap* é necessário um ciclo completo de tensão e corrente, então para obter um valor de eficiência e um valor de torque são necessários $T_a/60$ valores de cada sensor. Portanto, tem-se que a quantidade de bits que precisam ser transmitidos para a estimativa dos valores, Q , pode ser definida como:

$$Q = \frac{4 * b * T_a}{60}$$

Com processamento local, para obtenção de um valor de torque e um valor de eficiência, é sempre necessária a transmissão de um número constante de bits, independente dos valores de b e T_a . Denominaremos l a quantidade de bits necessários para armazenar um valor de eficiência e um valor de torque.

Além dos dados gerados pela aplicação, deve-se levar em consideração o cabeçalho dos pacotes transmitidos pela rede. Caso não seja empregado o processamento local, gera-se um número maior de pacotes que precisam ser transmitidos. No cenário com processamento local, apenas um pacote por estimativa é necessário para transmitir as informações. Adicionalmente, pode-se agregar várias medidas de torque e eficiência pré-calculados em um único pacote.

A quantidade de dados de cabeçalho por pacote é denominada H e depende do padrão de comunicação utilizado. A quantidade de dados de cabeçalho transmitidos pela aplicação que não implementa processamento local, denominada H_n , depende do valor de Q . Sendo C_m o tamanho máximo da carga útil de um pacote (definido pelo padrão), tem-se que a quantidade de pacotes, (Q_p), necessários para o envio dos dados é dada por:

$$Q_p = \lfloor \left(\frac{Q}{C_m} + 1 \right) \rfloor$$

e H_n pode ser obtido da seguinte forma:

$$H_n = Q_p * H$$

Entretanto, o processamento local acrescenta a latência devido ao processamento dos dados, denominada L_p . Logo, para que a utilização de processamento local, em termos de latência, seja vantajosa, temos que o tempo necessário para transmitir os dados processados somado à latência de processamento deve ser menor que o tempo necessário para transmitir os dados brutos obtidos a partir dos sensores de corrente e tensão, necessários para estimar os valores de torque e eficiência. Portanto, temos que:

$$\frac{l + H}{W} + L_p \leq \frac{Q + H_n}{W}$$

Ou seja,

$$L_p \leq \frac{(Q + H_n) - (l + H)}{W}$$

Utilizando o modelo matemático genérico descrito acima, fez-se uma análise levando em consideração as características do padrão utilizado nesse trabalho, o IEEE 802.15.4. Nesse padrão, o campo de endereço pode variar entre 4 e 20 bytes; entretanto, utilizamos o valor mínimo de bytes para os endereços. Temos que $H = 15$ bytes, e $C_m = 127 - 9 = 118$ bytes. Em nossa aplicação utilizamos um conversor analógico para digital com resolução de 10 bits; ou seja, $b = 10$ bits. Também para nossa aplicação, a quantidade de bytes necessários para armazenar um valor de torque e um valor de eficiência é de 4 bytes; ou seja, $l = 4$ bytes. A Figura 4.7 mostra a estrutura de um pacote definido pelo padrão [45].

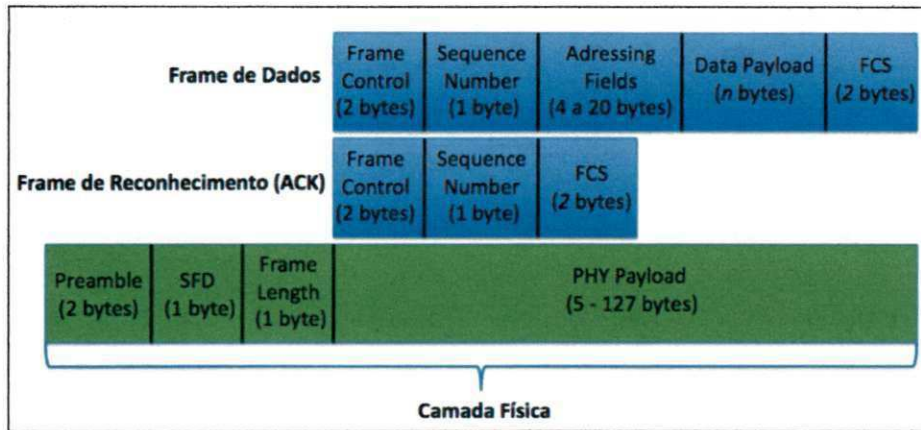


Figura 4.7: Pacote IEEE 802.15.4.

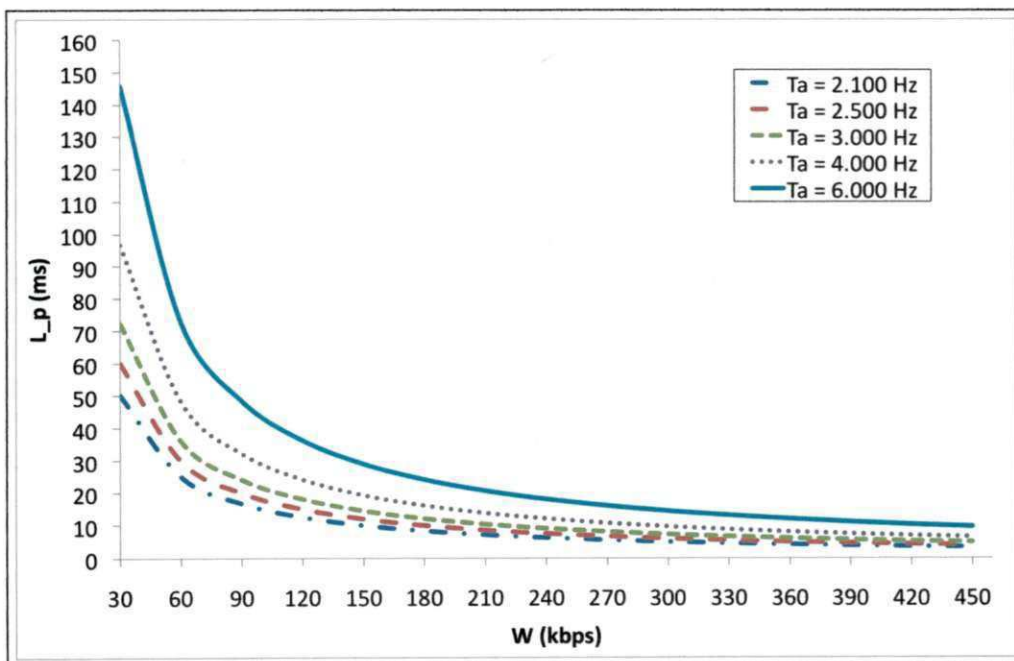


Figura 4.8: Tempo máximo de processamento versus taxa de transferência.

O gráfico mostrado na Figura 4.8 mostra a relação entre a taxa de transferência dos nós (W), em kbps, e o tempo máximo de processamento (L_p), em milissegundos, para diferentes taxas de aquisição do conversor analógico para digital.

Para realizar o cálculo do *air-gap torque*, que é utilizado tanto na estimativa do torque no motor, bem como da eficiência, é necessário realizar uma integração numérica dos sinais de tensão obtidos a partir dos sensores. Para obter boa precisão a partir da utilização de um método simples de integração numérica, como o trapezoidal, é necessário adquirir os sinais do motor com uma frequência maior que 2.000 Hz [44]. Portanto, na nossa análise foi atribuído 2.100 Hz para o valor mínimo de taxa de aquisição.

Podemos perceber que quanto maior o valor de W , menor o valor máximo de L_p . Portanto, utilizando redes que oferecem altas taxas de transferência, a utilização de processamento local pode não ser vantajosa, pelo menos em termos de latência.

O padrão IEEE 802.15.4 possui uma taxa de transferência nominal de 250 kbps, mas a sua taxa de transferência máxima real é de aproximadamente 150 kbps [37]. Portanto, se a capacidade de processamento do nó sensor for suficientemente boa, mesmo que o meio de transmissão esteja livre de erros, como foi considerado na análise, pode-se obter vantagem, em termos de latência, na utilização de processamento local.

Realizou-se um teste de desempenho do sistema embarcado desenvolvido nesse trabalho, considerando $T_a = 3000$ Hz, para observar o tempo de processamento para a estimativa dos valores de torque e eficiência. Pôde-se observar que o tempo de processamento é de cerca de 14 ms; ou seja, em termos de latência para transmissão e processamento dos dados, nesse cenário fica equivalente utilizar ou não processamento local (considerando que a largura de banda máxima alcançada seja de 150 kbps).

No entanto, é importante notar que é mais fácil obter um aumento na capacidade de processamento dos nós do que um acréscimo na largura de banda da rede. Para aumentar a largura de banda seria necessária a utilização de outro padrão de comunicação, ou a utilização de mais *transceivers*, os quais muitas vezes são mais caros do que os microcontroladores embarcados. Além disso, essa modelagem está supondo um meio de transmissão livre de erros e considera que não existe disputa pelo meio de comunicação, visto que foi considerado apenas um nó final; ou seja, a largura de banda disponível não é compartilhada entre múltiplos dispositivos. Porém, na prática, essas suposições não podem ser garantidas.

4.3.2 Impacto da Perda de Pacotes

Nesse novo cenário, considera-se um meio de transmissão não confiável; ou seja, podem ocorrer erros de transmissão. Esse cenário é muito mais realista, considerando a falta de confiabilidade de transmissão inerente às redes sem fio.

Mostraremos que a não utilização de processamento local provoca um grande aumento na quantidade de pacotes transmitidos na rede, principalmente em cenários com alta taxa de perda de pacotes.

Considerando que a transmissão de um pacote consiste em um evento de *Bernoulli* com probabilidade p de ocorrer com sucesso, tem-se que o número de tentativas até que o primeiro sucesso ocorra é definido por uma distribuição de probabilidade Geométrica. Em uma distribuição Geométrica, tem-se que a quantidade média de eventos até o primeiro sucesso é igual a $1/p$.

Quando não se utiliza processamento local, faz-se necessária a transmissão de Q_p pacotes para a estimativa de um valor de eficiência e um valor de torque. Portanto, a probabilidade de ocorrer a transmissão com sucesso dos dados necessários para a estimativa dos valores é de p^{Q_p} , e a quantidade de tentativas até o primeiro sucesso é $1/p^{Q_p}$, considerando ainda um cenário sem retransmissão de pacotes perdidos. Como cada tentativa constitui a transmissão de Q_p pacotes, então temos em média Q_p/p^{Q_p} transmissões até que ocorra um sucesso na transmissão dos dados referentes a um valor de torque e um valor de eficiência.

No cenário sem processamento local, a utilização de retransmissões provoca uma diminuição na quantidade de pacotes transmitidos pelos nós finais, uma vez que apenas pacotes individuais com erro precisariam ser retransmitidos. Entretanto, essa abordagem inclui o *overhead* devido aos pacotes de reconhecimento e também pode fazer com que os nós tentem retransmitir dados por muito tempo, deixando de obter dados mais atualizados.

Considerando que a probabilidade de um pacote de reconhecimento ser entregue com sucesso também é p , então tem-se que a probabilidade de transmissão com sucesso de um pacote passa a ser a probabilidade de o pacote chegar ao destino com sucesso e o respectivo pacote de reconhecimento ser transmitido com sucesso; ou seja, a probabilidade de sucesso em uma transmissão passa a ser p^2 e a quantidade de tentativas de transmissões até o primeiro sucesso é Q_p/p^2 . No cenário com processamento local e com retransmissão, a quantidade de transmissões até o primeiro sucesso é $1/p^2$. Portanto, quando se utiliza processamento local,

a utilização de retransmissão causa um aumento na quantidade de pacotes que precisam ser transmitidos.

A Figura 4.9 mostra a quantidade de pacotes que precisam ser transmitidos, em média, para que um valor de torque e um valor de eficiência sejam recebidos no destino, para os quatro cenários possíveis. No gráfico foram omitidos os valores para $p = 0,2$ e $p = 0,1$, com o objetivo de melhorar a visualização do mesmo. Para $p = 0,1$, na abordagem sem processamento local e sem retransmissão são necessárias em média 3000 transmissões, enquanto que na abordagem com processamento local e sem retransmissão são necessárias em média apenas 10 transmissões.

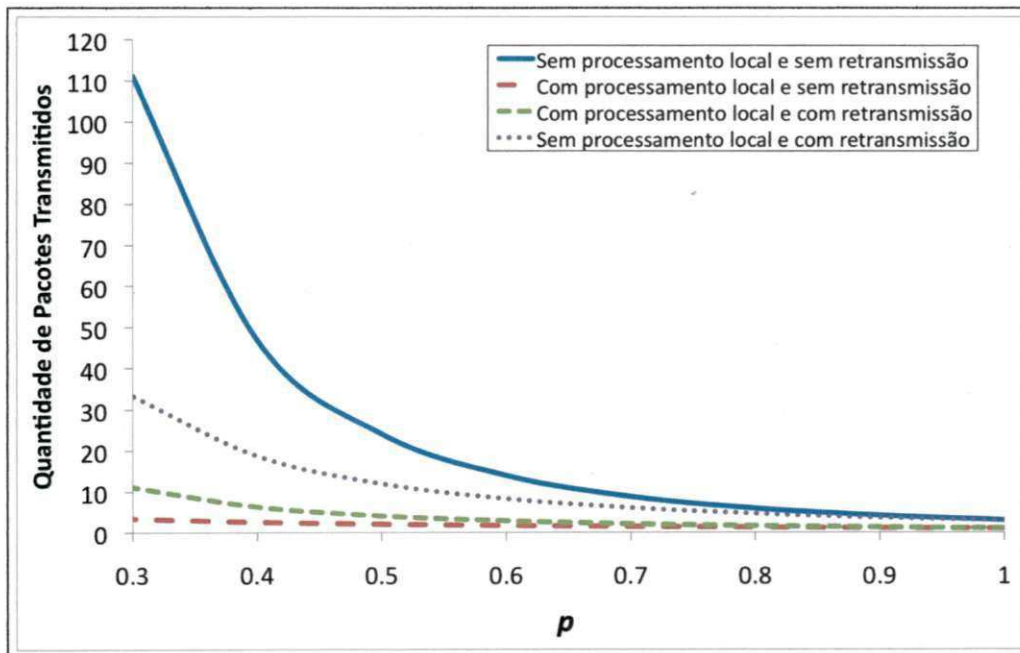


Figura 4.9: Quantidade média de pacotes transmitidos para cada estimativa de torque e eficiência.

Deve-se notar ainda que os pacotes transmitidos na abordagem sem processamento local são maiores que os pacotes transmitidos com os dados pré-processados, considerando o envio de apenas um valor de torque e um valor de eficiência por pacote. Portanto, a probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote com dados pré-processados é teoricamente maior. Na análise, considerou-se que a probabilidade de transmitir um pacote com sucesso independe do tamanho do pacote.

4.3.3 Análise da Latência na Entrega de Informações pela RSSF

Estendendo os estudos realizados nas subseções 4.3.2 e 4.3.1 é possível analisar a latência para entrega de novas informações (valores de torque e eficiência) a partir da rede de sensores.

A carga útil dos pacotes transmitidos na abordagem sem processamento local pode variar. Mais especificamente $Q_p - 1$ pacotes terão carga útil máxima, igual a C_m e 1 pacote terá carga útil $c_m = Q - ((Q_p - 1) * C_m)$, onde Q é a quantidade de bits total transmitidos para a estimação dos valores. Portanto o tamanho médio da carga útil dos pacotes (C_{med}) no cenário sem processamento local é dado pela equação 4.7.

$$C_{med} = \frac{(Q_p - 1) * C_m + c_m}{Q_p} \quad (4.7)$$

Temos que no cenário sem processamento local e sem retransmissão, é necessário transmitir em média Q_p/p^{Q_p} pacotes para se obter um valor de torque e eficiência no destino e quando se utiliza retransmissão é necessário transmitir em média Q_p/p^2 pacotes.

Nessa modelagem o tempo de propagação foi considerado nulo. Dessa forma, a latência para a entrega das informações pela RSSF é calculada apenas em termos do tempo de transmissão e tempo de processamento. No cenário sem processamento local, considerou-se apenas o tempo para aquisição dos valores, igual a $\frac{1}{60}$ segundos, como a latência total de processamento. Uma vez que W é a taxa de transferência e H é a quantidade de bits de cabeçalho por pacote, a latência para o recebimento de um valor de torque e um valor de eficiência no destino no cenário sem processamento local e sem retransmissão (L_{npt}) é dada pela equação 4.8.

$$L_{npt} = \frac{1}{p^{Q_p}} * \left(Q_p * \left(\frac{C_{med} + H}{W} + e_{npt}(p) \right) + \frac{1}{60} \right) \quad (4.8)$$

Deve-se considerar que o valor de W representa a quantidade de bits que o rádio consegue transmitir por segundo, independentemente de os bits chegarem com sucesso ao destino ou não.

A latência para o recebimento de um valor de torque e um valor de eficiência no destino nos cenários sem processamento local e com retransmissão (L_{nptr}) é dado pela equação 4.9.

$$L_{nptr} = \frac{Q_p}{p^2} * \left(\frac{C_{med} + H}{W} + \frac{H_{ack}}{W} + e_{nptr}(p) \right) + \frac{1}{60} \quad (4.9)$$

Onde H_{ack} é a quantidade de bits do pacote de reconhecimento (ACK), incluindo o cabeçalho.

No cenário com processamento local são necessários l bits para armazenar um valor de torque e um valor de eficiência e L_p é a latência de processamento para a estimação de um valor de torque e um valor de eficiência. Seja V_a a quantidade de valores de torque e eficiência agregados em um mesmo pacote, temos que para o cenário sem retransmissão e processamento local, a latência média para o recebimento de um valor de torque e eficiência é dada pela equação 4.10.

$$L_{pl}(V_a) = \frac{1}{p} * \left(\frac{V_a * l + H}{W} + e_{pl}(p)V_a + V_a * \left(\frac{1}{60} + L_p \right) \right) \quad (4.10)$$

Para o cenário com retransmissão e processamento local, a latência média para o recebimento de um valor de torque e eficiência é dada pela equação 4.11.

$$L_{ptr}(V_a) = \frac{1}{p^2} * \left(\frac{V_a * l + H}{W} + \frac{H_{ack}}{W} + e_{ptr}(p)V_a \right) + V_a * \left(\frac{1}{60} + L_p \right) \quad (4.11)$$

$e_{nptr}(p)$, $e_{ptr}(p)$, $e_{pl}(p)V_a$ e $e_{ptr}(p)V_a$ são os erros na estimação do tempo de transmissão devido às suposições feitas. Na modelagem não foram considerados, por exemplo, o tempo de propagação e o *overhead* dos protocolos de rede e de acesso ao meio, entre outros fatores. Posteriormente serão descritos modelos para estimar os valores de e a partir do valor de p para alguns cenários.

Inicialmente iremos realizar análises considerando $e = 0$ para todos os casos. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram a latência para a entrega de informações pela RSSF utilizando as abordagens sem processamento local e com processamento local, respectivamente. Para

o gráfico 4.11 foi considerado $V_a = 1$ e $L_p = 14ms$ (tempo de processamento do sistema embarcado desenvolvido). Os outros parâmetros foram definidos de acordo com o padrão, como na seção 4.3.1.

São mostrados valores de latência para vários valores de p e para três taxas de transferência diferentes (10 kbps, 50 kbps e 80 kbps). A taxa de transferência efetiva máxima do padrão IEEE 802.15.4 é de cerca de 150 kbps, mas essa taxa pode ser menor com o aumento do número de nós na rede, bem como devido à presença de fontes de interferência, que podem obrigar o rádio a passar por muitos períodos de *backoff* antes de transmitir.

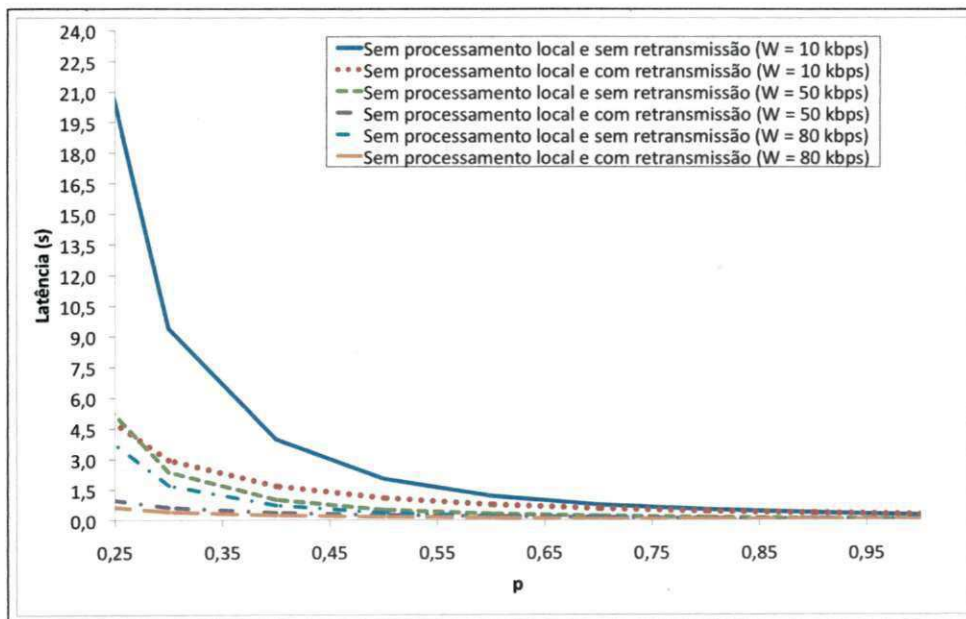


Figura 4.10: Latência na entrega de informações pela RSSF no cenário sem processamento local.

A partir dos gráficos podemos notar que quando se utiliza processamento local a latência para entrega de informações pela RSSF é pequena, mesmo em cenários com alta taxa de perda de pacotes e com pequena taxa de transferência. Os gráficos não incluíram valores para $p < 0,25$ para melhorar a visualização dos mesmos. Sem processamento local e sem retransmissão a latência pode chegar a 253 segundos, para $p = 0,1$ e $W = 10kbps$. Ainda para $p = 0,1$, no melhor caso a latência é de 2,93 segundos, para $W = 80kbps$ e utilizando retransmissão.

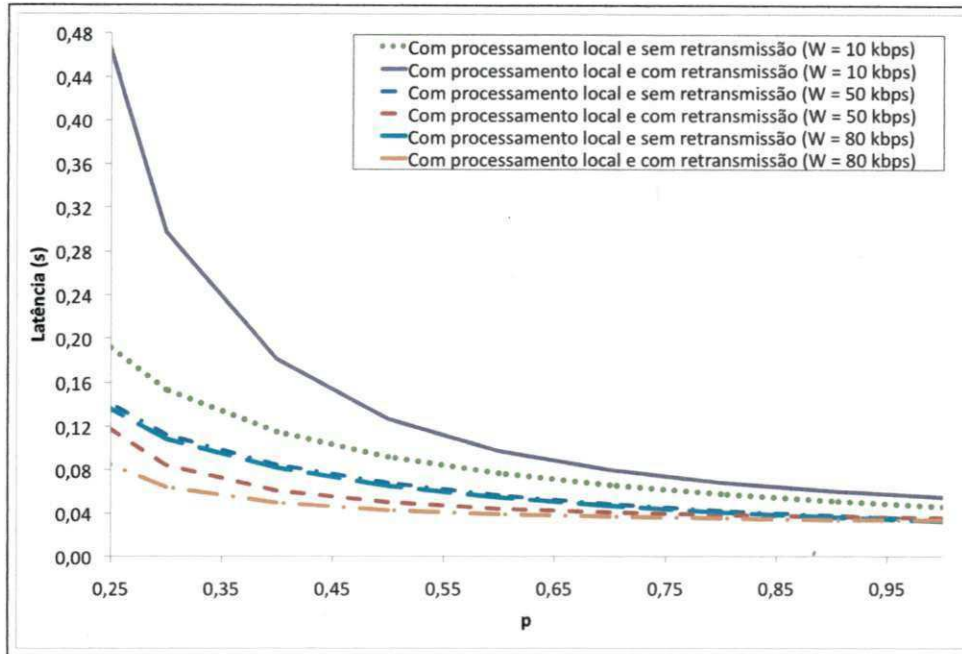


Figura 4.11: Latência na entrega de informações pela RSSF no cenário com processamento local.

Com processamento local, no pior caso ($p = 0,1$ e $W = 10kbps$), a latência é de 2,43 segundos, utilizando retransmissão.

Podemos notar a partir dos gráficos que o uso de retransmissão provoca um melhor desempenho na abordagem sem processamento local em todos os cenários. Isso se deve ao fato de nessa abordagem ocorrer a transmissão de uma grande quantidade de dados, enquanto que o tempo de processamento é mínimo. Já para a abordagem com processamento local a utilização de retransmissão apenas é vantajosa em alguns cenários. Mais especificamente, o uso de retransmissão pode ser vantajoso quando se tem altas taxas de transferência e pequena taxa de perda de pacotes. Podemos observar que para $W = 10kbps$ a latência é muito menor quando não se utiliza retransmissão. Por outro lado, para $W = 80kbps$, a latência é menor quando se utiliza retransmissão para quase toda faixa de valores de p .

Quando se agrega vários valores de torque e eficiência em um único pacote, a latência para transmissão do pacote se torna maior, devido ao aumento na latência de processamento. No entanto, a taxa de entrega de informações pode ser maior, visto que o pacote carrega mais informações. Dessa forma, para comparar o desempenho da RSSF com e sem agregação,

utilizaremos como métrica a taxa de entrega de informações (valores de eficiência e torque obtidos por segundo). As Figuras 4.12 e 4.13 mostram a taxa de entrega de informações em cada cenário para $W = 80kbps$ e $W = 150kbps$, respectivamente.

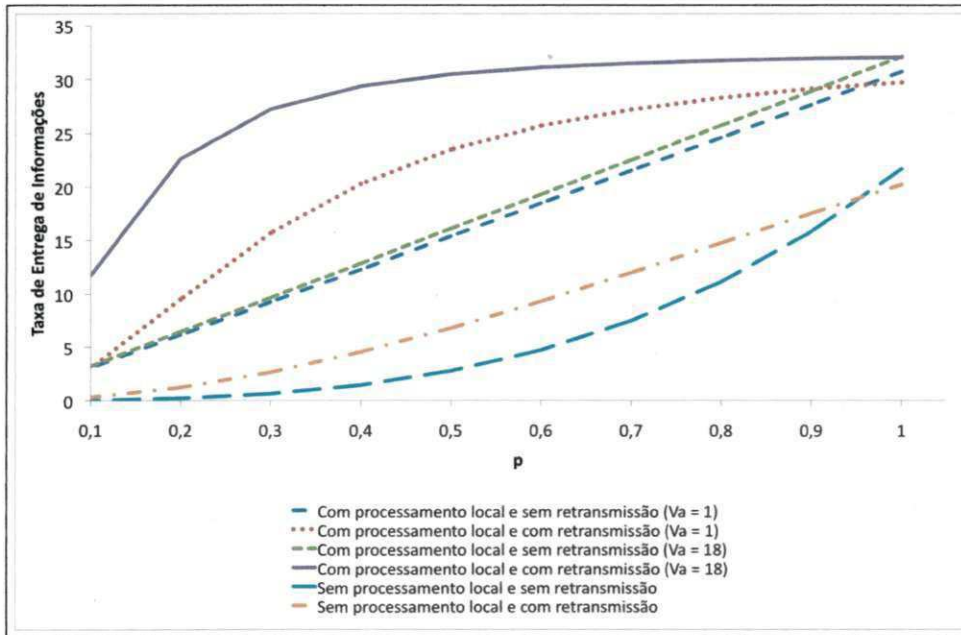


Figura 4.12: Taxa de entrega de informações para $W = 80kbps$.

A partir dos gráficos podemos ver que independente da abordagem utilizada, utilizar processamento local provoca um grande aumento na taxa de entrega de informações pela RSSF, principalmente para baixas taxas de transferência. Quando se utiliza processamento local verificou-se novamente que a utilização de retransmissões também pode ser vantajosa em alguns casos. Pode-se notar que para $p = 1$ a taxa de entrega de informações é ligeiramente pior quando se utiliza retransmissão, em todos os casos. Isso ocorre devido ao tempo de transmissão dos pacotes de reconhecimento, que são transmitidos mesmo não havendo perda de pacotes.

Para $V_a = 18$ podemos observar que a taxa de entrega de informações é ligeiramente maior quando não se utiliza retransmissões se comparado com o resultado obtido para $V_a = 1$, visto que menos pacotes precisam ser transmitidos e o tempo de processamento é o mesmo.

Nesse cenário, a utilização de retransmissões se mostrou vantajosa. Isso pode ser explicado pelo fato de o tempo de processamento para a estimação dos 18 valores de torque e

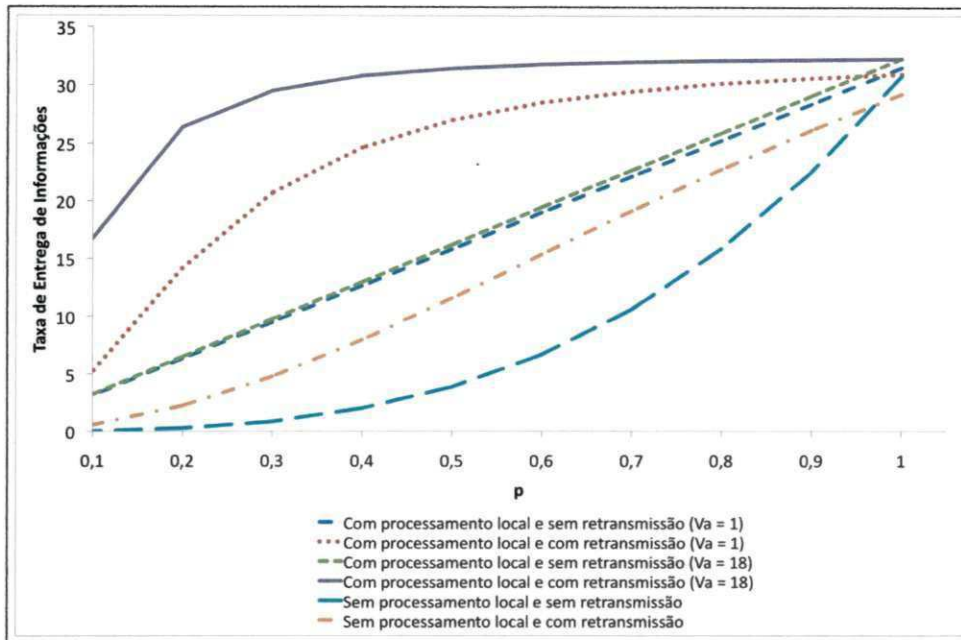


Figura 4.13: Taxa de entrega de informações para $W = 150kbps$.

eficiência ser relativamente longo. Pode ser mais vantajoso, em termos de latência, retransmitir pacotes perdidos do que calcular 18 novos valores e transmitir esses novos valores.

O modelo matemático descrito nessa seção ainda apresenta algumas limitações, devido às suposições feitas. Por exemplo, não foi considerado o tempo de propagação e o *overhead* dos protocolos de rede e de acesso ao meio. No caso da utilização de retransmissões, além do tempo de transmissão do pacote de reconhecimento, deve-se considerar ainda o processamento realizado pelo protocolo para prover o reconhecimento e também o *timeout* utilizado para considerar que um pacote foi realmente perdido.

Além disso, deve-se considerar algumas relações que não são suportadas pelo modelo. Embora o valor de W não seja afetado diretamente pela taxa de perda de pacotes, visto que W é a quantidade de bits que o rádio transmite por segundo, independente do sucesso da transmissão, existe uma correlação entre esses dois parâmetros. O valor de W é afetado pelo mecanismo CSMA/CA implementado pelo protocolo de acesso ao meio. Quando existem fontes de interferência no ambiente de operação da rede ou a rede possui múltiplos nós, provavelmente a taxa de perda de pacotes será maior, ao mesmo tempo em que o rádio passará por mais períodos de *backoff*, o que afeta a taxa de transferência. Portanto, alguns

cenários podem não ser possíveis, como, por exemplo, o cenário que considera uma taxa de perda de pacotes de 90% ($p = 0,1$) e $W = 150kbps$ (taxa de transferência máxima real).

Também não foi feita nenhuma relação entre o tamanho dos pacotes e a taxa de perda de pacotes. Quanto maior os pacotes, maior a probabilidade de ocorrer colisão. No modelo foi considerado que a probabilidade de sucesso em uma transmissão independe do tamanho do pacote.

Dessa forma, na prática o desempenho da RSSF será inferior ao desempenho descrito pelos modelos. No entanto, o modelo serve para comparar o desempenho das várias abordagens possíveis e permite observar o comportamento da RSSF em vários cenários. Principalmente, pode-se observar que a utilização de processamento local pode aumentar significativamente o desempenho da RSSF. Deve-se ainda notar que no cenário sem processamento local o desempenho real sofre ainda mais com as suposições feitas, visto que uma maior quantidade de transmissões são realizadas e os pacotes são usualmente maiores.

Para verificar a precisão do modelo foram realizados alguns testes utilizando o sistema embarcado desenvolvido e um coordenador, para verificar a taxa de entrega de informações e comparar os resultados obtidos com os resultados gerados pelo modelo. É importante notar que nem todos os cenários podem ser validados. Por exemplo, não foi possível validar os cenários com retransmissão, visto que o rádio não provê informações sobre erros de transmissão. Dessa forma, não é possível saber a taxa de perda de pacotes. Quando não se utiliza retransmissão basta verificar a quantidade de pacotes transmitidos e a quantidade de pacotes recebidos.

Durante os experimentos os rádios foram posicionados a menos de um metro de distância e operando no canal 11. Primeiro buscou-se obter resultados para o cenário sem perda de pacotes. Como não havia nenhuma fonte de interferência no mesmo canal, isso pôde ser alcançado. Para obter valores com maior taxa de perda de pacotes, a rede WiFi existente no laboratório foi configurada para operar no canal 1, o qual causa sobreposição com o canal 11 do IEEE 802.15.4. Embora nenhum tráfego significativo tenha sido empregado na rede WiFi, foi possível observar certo nível de degradação da comunicação entre os rádios IEEE 802.15.4. O sistema embarcado foi configurado para transmitir 1.000 pacotes, e o coordenador teve seu código instrumentado para calcular a taxa de entrega de informações.

Com os resultados obtidos a partir dos experimentos foi possível verificar os valores de

$e_{npl}(p)$, $e_{pl}(p)_1$ e $e_{pl}(p)_{18}$ para os testes realizados. Como discutido anteriormente, existe uma correlação entre o valor de p e W , visto que quando a taxa de perda de pacotes é alta, provavelmente a taxa de transferência será menor, além de outras suposições que causam erros no modelo. $e_{npl}(p)$, $e_{pl}(p)_1$ e $e_{pl}(p)_{18}$ correspondem ao tempo adicional de transmissão relativo aos erros do modelo para cada cenário. Dessa forma, os valores de $e_{npl}(p)$, $e_{pl}(p)_1$ e $e_{pl}(p)_{18}$ idealmente devem compensar essas suposições. Dessa forma, definiu-se um modelo para estimar esses valores a partir do valor de p , visto que quanto menor o valor de p , maior é o erro.

Para relacionar esses dois parâmetros foi realizada uma regressão não-linear (exponencial). Através da regressão obteve-se as seguintes equações:

$$e_{npl}(p) = 0,00731 * (0,2018345)^p \quad (4.12)$$

$$e_{pl}(p)_1 = 0,0061 * (0,3631068)^p \quad (4.13)$$

$$e_{pl}(p)_{18} = 0,0286 * (0,1154984)^p \quad (4.14)$$

O gráfico na Figura 4.14 mostra a comparação entre os valores obtidos nos experimentos (referência) e os valores obtidos pelo modelo, para o cenário com processamento local, sem retransmissão e $V_a = 1$. São plotadas três curvas referentes ao modelo, além da curva de referência.

Como não é possível saber com exatidão o valor de W , as duas primeiras curvas obtidas a partir do modelo consideram $W = 150kbps$ e $W = 80kbps$, respectivamente, e $e_{pl}(p)_1 = 0$. Como $150kbps$ é o valor máximo real de W , acreditamos que a curva correta esteja entre as duas curvas mostradas no gráfico. Também são mostrados os erros absolutos entre as curvas referentes ao modelo e a curva de referência para os três casos.

A terceira curva obtida a partir do modelo considera o valor de $e_{pl}(p)_1$, obtido a partir da equação 4.13. Para obtenção do modelo referente a $e_{pl}(p)_1$, fixou-se o valor de $W = 80kbps$. No entanto, o erro devido ao valor fixo de W também é compensando pelo valor de $e_{pl}(p)_1$.

Considerando $W = 80kbps$ o erro variou de 6,2 % a 8,8 %, e considerando $W = 150kbps$ o erro variou de 8,7 % a 11,2 %. A partir do gráfico podemos notar que quanto

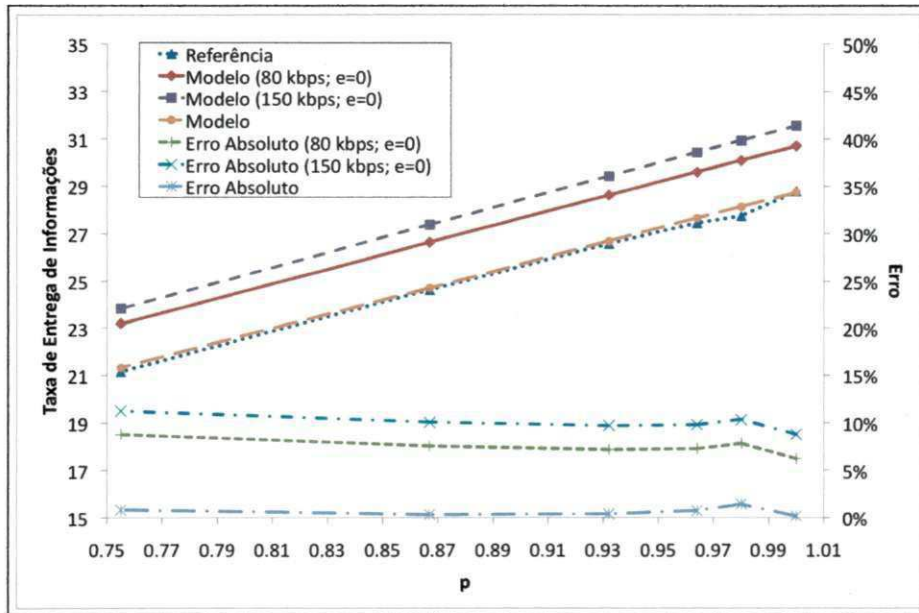


Figura 4.14: Validação do modelo para o cenário com processamento local, sem retransmissão e $V_a = 1$.

menor o valor de p , maior o erro entre a referência e o modelo. Isso ocorre devido à relação entre a taxa de perda de pacotes e a taxa de transferência, como já discutido anteriormente. No gráfico, o valor de W foi considerado constante para todos os valores de p , por isso o erro cresce com o decréscimo do valor de p .

Quando o valor de $e_{pl}(p)_1$ é levado em consideração, o erro fica quase sempre abaixo de 1%, chegando no máximo a 1,41 %, como é possível observar no gráfico da Figura 4.14.

Os rádios também foram configurados para operar utilizando retransmissão no cenário em que obteve-se $p = 1$ no primeiro experimento, com os rádios muito próximos e sem fonte de interferência. Para esse cenário obteve-se uma taxa de entrega de informações de 27,85 informações por segundo, contra uma taxa de 28,8 informações por segundo obtida no cenário sem retransmissão. Como podemos ver na Figura 4.13, para $p = 1$ o desempenho quando se utiliza processamento local e retransmissão é de fato um pouco pior, se comparado com a não utilização de retransmissão.

O gráfico na Figura 4.15 mostra a comparação entre os valores obtidos nos experimentos (referência) e os valores obtidos pelo modelo, para o cenário com processamento local, sem

retransmissão e $V_a = 18$.

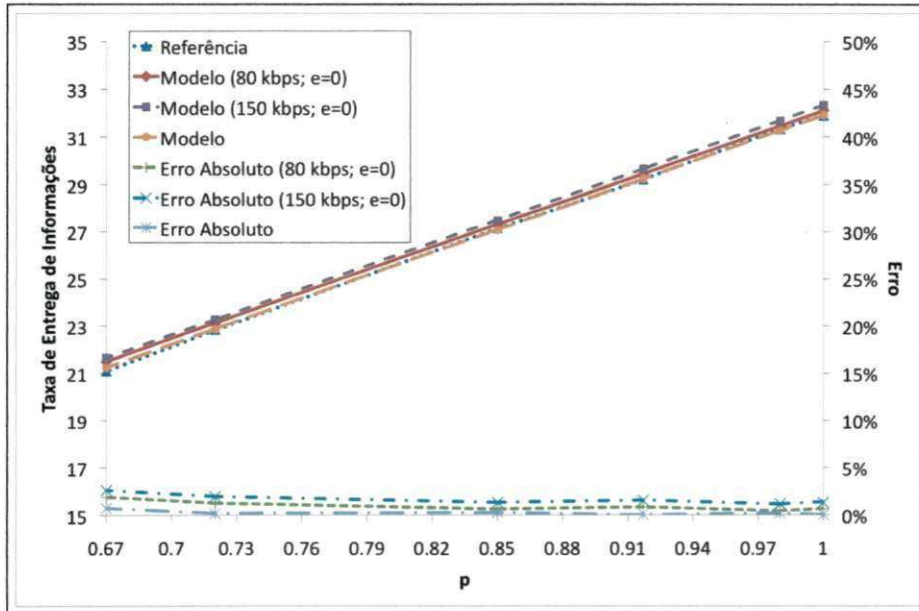


Figura 4.15: Validação do modelo para o cenário com processamento local, sem retransmissão e $V_a = 18$.

Considerando $W = 80\text{kbps}$ o erro variou de 0,6 % a 2,36 %, e considerando $W = 150\text{kbps}$ o erro variou de 1,32 % a 3,07 %. Mais uma vez podemos observar que o erro aumenta à medida que o valor de p diminui. O erro foi bem menor nesse cenário, mesmo considerando $e_{pl}(p)_{18} = 0$. Isso ocorre pois nesse cenário o sistema passa a maior parte do tempo realizando processamento para cálculo dos valores e apenas pequena parcela do tempo transmitindo, visto que cada pacote carrega 18 valores de torque e 18 valores de eficiência. Como a principal fonte de erro do modelo é o tempo de transmissão, nesse cenário o modelo sofre menos com os erros provocados pelas suposições.

Quando o valor de $e_{pl}(p)_{18}$ é levado em consideração o erro chega no máximo a 0,72 %, como é possível observar no gráfico da Figura 4.15.

O gráfico na Figura 4.16 mostra a comparação entre os valores obtidos nos experimentos (referência) e os valores obtidos pelo modelo, para o cenário sem processamento local e sem retransmissão.

Para $W = 80\text{kbps}$ o erro chegou a 13,33 %, e considerando $W = 150\text{kbps}$ chegou

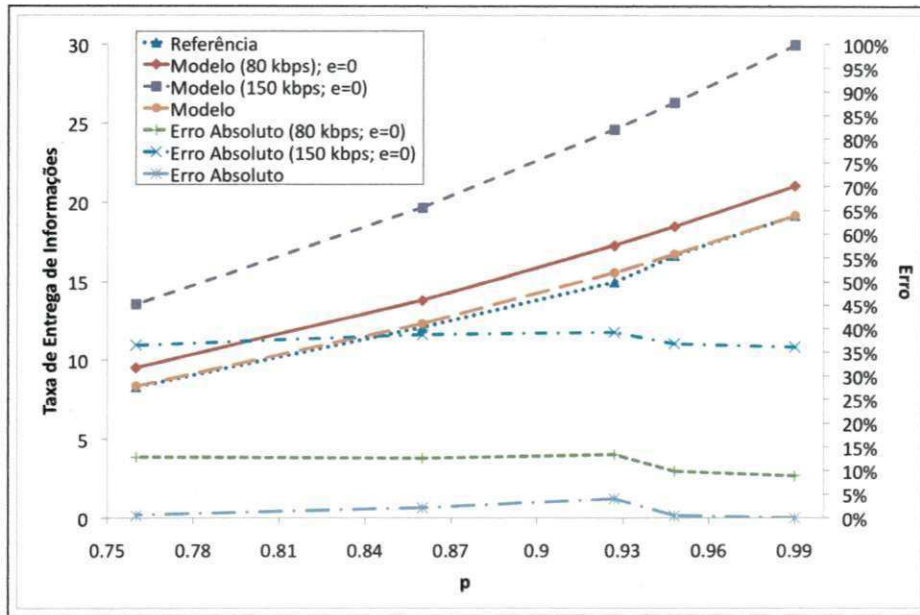


Figura 4.16: Validação do modelo para o cenário sem processamento local e sem retransmissão.

a 39,17 %. Nesse cenário o erro foi significativamente maior, quando $e_{npl}(p) = 0$. Isso ocorre pois nesse cenário o sistema passa a maior parte do tempo realizando transmissões e a latência de processamento é mínima. Como a principal fonte de erro do modelo é o tempo de transmissão, nesse cenário os erros causados pelas suposições aparecem de maneira muito mais significativa.

No entanto, quando se considera o valor de $e_{npl}(p)$ o modelo apresenta um erro muito pequeno, chegando no máximo a 3,99 %, mesmo com a grande quantidade de transmissões nesse cenário.

A Figura 4.17 mostra a taxa de entrega de informações com p variando de 0,1 a 1, para os resultados obtidos a partir do modelo e considerando os valores de $e_{npl}(p)$, $e_{pl}(p)_1$ e $e_{pl}(p)_{18}$.

Como não foi possível validar os cenários com retransmissão, e consequentemente construir os modelos para $e_{nplr}(p)$, $e_{plr}(p)_1$ e $e_{plr}(p)_{18}$, para essa análise consideramos que $e_{nplr}(p) = e_{npl}(p)$, $e_{plr}(p)_1 = e_{pl}(p)_1$ e $e_{plr}(p)_{18} = e_{pl}(p)_{18}$. No entanto, os valores dos erros nos cenários com retransmissão são maiores, devido aos erros oriundos das suposições feitas em relação ao mecanismo de reconhecimento.

Podemos concluir que a utilização de processamento local e com $V_a = 18$ apresenta a

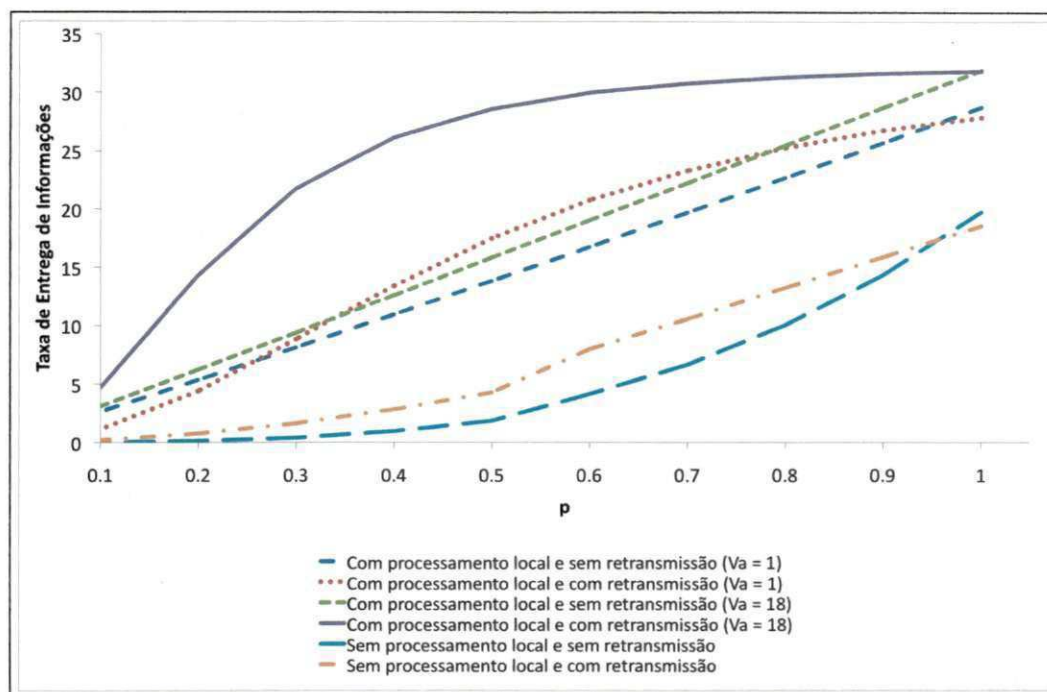


Figura 4.17: Taxa de entrega de informações pela RSSF considerando os valores de e .

melhor taxa de entrega de informações para todos os valores de p . Sem utilizar processamento local a taxa de entrega de informações tende a zero quando o valor de p se aproxima de 0. Dessa forma, pode ser inviável realizar monitoramento em ambientes com muita interferência sem utilizar processamento local.

Para $V_a = 1$ acredita-se que o desempenho seja pior quando se utiliza retransmissão. Embora para alguns valores de p a taxa de entrega de informações apareça maior no gráfico, o modelo é muito simplista na modelagem do tempo associado ao reconhecimento de pacotes e o desempenho real é menor do que o observado.

A utilização de retransmissão indica uma melhora na taxa de entrega de informações pela RSSF para $V_a = 18$. Embora o desempenho real do cenário com retransmissão seja menor do que o observado no gráfico, acredita-se que para boa parte da gama de valores de p a utilização de retransmissão pode ser vantajosa.

Para verificar o desempenho da RSSF utilizando retransmissões será necessário a realização de mais estudos experimentais. A partir desses estudos pode-se também refinar o modelo para os cenários com retransmissão.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Nesse capítulo serão mostrados os resultados obtidos a partir dos estudos experimentais realizados durante o trabalho. Na seção 5.1 será mostrado um estudo sobre a correlação entre Taxa de Perda de Pacotes (TPP) e a Ocupação Espectral (SO) no ambiente de operação da rede. Com esse objetivo, foi investigado o impacto causado pela inserção de novas fontes de interferência no ambiente, tanto na SO quanto na TPP.

Na seção 5.2 são mostrados os resultados obtidos a partir de estudos experimentais de desempenho da RSSF desenvolvida, utilizando a mesma metodologia definida para o estudo inicial descrito na seção 5.1.

5.1 Correlação Entre Taxa de Perda de Pacotes e Ocupação Espectral

Uma vez que a falta de confiabilidade na comunicação é um dos fatores mais críticos para a implementação das RSSF na indústria, foi realizado um estudo de desempenho de rádios baseados no padrão IEEE 802.15.4, focando na correlação entre a taxa de perda de pacotes e a ocupação espectral em um ambiente industrial. Com esse objetivo, foi investigado o impacto causado pela inserção de novas fontes de interferência no ambiente, tanto na ocupação espectral quanto no desempenho de comunicação.

Os resultados buscam justificar a necessidade de políticas de alocação dinâmica de espectro, com o objetivo de manter a rede operando em certo nível de qualidade de serviço.

Usando essa abordagem, os rádios devem estar cientes do estado atual do meio de comunicação. Para estarem cientes do ambiente onde estão operando, os rádios precisam de informações acerca do ambiente de operação para que possam tomar decisões baseados nessas informações. Esse estudo busca oferecer um melhor entendimento da correlação entre a taxa de perda de pacotes, que é uma métrica de desempenho, e a ocupação espectral no ambiente, que pode ser utilizada como métrica para a qualidade do meio de comunicação.

5.1.1 Metodologia

Projeto do Experimento

O desempenho de comunicação entre dois nós (i.e., um coordenador e um nó final) foi investigado, ao mesmo tempo em que foram realizadas análises do espectro no ambiente de operação dos nós. Taxa de perda de pacotes foi a métrica de desempenho escolhida. O espectro foi dividido em canais, de acordo com a especificação do padrão IEEE 802.15.4.

Uma comparação foi feita entre os valores de potência induzidos em cada canal e os resultados de desempenho correspondentes. Assim, o efeito provocado pela inserção de uma nova fonte de interferência no ambiente foi estudado, verificando o impacto na ocupação espectral e no desempenho de comunicação em cada canal.

Abaixo são detalhados os fatores e variáveis de resposta consideradas no experimento:

- Fatores Primários (FP)

FP-1 - Canal: este fator é categórico e possui 8 níveis: Canal 11, Canal 13, Canal 15, Canal 17, Canal 19, Canal 21, Canal 23 e Canal 25.

FP-2 - Fonte de Interferência: este fator é categórico e possui quatro níveis: “Apenas o forno microondas ligado”, “Apenas a rede IEEE 802.11g ligada (canal 1)”, “Apenas a rede IEEE 802.11g ligada (canal 6)” e “Forno microondas e rede IEEE 802.11g desligados”.

- Variáveis de Resposta (VR)

VR-1 - Ocupação Espectral: esta variável de resposta é obtida a partir da potência média induzida na faixa de espectro de cada canal.

RV-2 - Taxa de Perda e Pacotes: esta variável de resposta corresponde ao número de pacotes transferidos com erro dividido pelo número total de pacotes transferidos.

Foram realizadas medidas apenas em canais ímpares. Isso permitiu diminuir o tempo necessário para a realização dos experimentos e nos permitiu obter uma boa análise da distribuição da ocupação espectral e a sua relação com o desempenho de comunicação.

Para aumentar o nível de significância dos resultados foram realizadas três replicações para cada experimento.

Definição das Hipóteses

Com o objetivo de guiar a definição das hipóteses, os seguintes questionamentos foram elaborados:

- A inclusão de uma nova fonte de interferência provoca impacto significativo na distribuição de utilização da banda?
- A inclusão de uma nova fonte de interferência no ambiente causa impacto significativo no desempenho de comunicação relativo em cada canal?

Acreditamos que a resposta seja positiva para ambos os questionamentos, uma vez que com a introdução de novas fontes de interferência, é esperado que se tenha uma mudança na distribuição de uso da banda e conseqüentemente, ocorrerá impacto no desempenho de comunicação. Logo, um canal que possuía baixa utilização e provia bom desempenho de comunicação antes da inserção da nova fonte de interferência, pode passar a ter alto nível de utilização e conseqüentemente oferecer baixa qualidade de comunicação depois da inserção da nova fonte. Baseado nessas idéias, formalizamos abaixo as hipóteses a serem testadas nos experimentos.

Formalização das Hipóteses

Seja f_j uma componente de frequência do espectro e F é o conjunto de todas as componentes de frequência na faixa de espectro considerada no experimento.

c_r é um canal de comunicação e C_r é o conjunto de componentes de frequência de c_r , onde $C_r \subset F$.

A potência induzida na componente de frequência f_j do espectro em um dado instante t , é denotada por $p_t(f_j)$, e a potência induzida no canal c_r em um dado instante t , denotada por $P_t(c_r)$, obtida pela média entre as potências das componentes de frequência pertencentes a C_r , é dada pela equação 5.1.

$$P_t(c_r) = \frac{\sum_{f_j \in C_r} p_t(f_j)}{|C_r|} \quad (5.1)$$

A ocupação espectral no canal c_r , em um dado intervalo de tempo discreto Δt_w , é denotada por $SO(c_r)_w$ e é obtida pela média dos valores de potência medidos em cada instante para o canal c_r durante o intervalo de tempo discreto Δt_w .

S é o conjunto de canais definidos pelo padrão de comunicação (no nosso caso o IEEE 802.15.4) que são considerados no experimento.

$TPP(c_r)_w$ é a taxa de perda de pacotes de um rádio operando no canal c_r no intervalo de tempo Δt_w .

I_w é o conjunto de fontes de interferência presentes no ambiente em um dado intervalo de tempo Δt_w . Supomos que durante o intervalo de tempo Δt_w , o conjunto de fontes de interferência permanece constante.

Seguindo a formalização descrita acima, definimos duas hipóteses a serem testadas durante os experimentos. A primeira formaliza a idéia descrita no primeiro questionamento, enquanto a segunda formaliza a idéia descrita no segundo questionamento.

Seja I_b o conjunto de fontes de interferência presentes no ambiente em certo intervalo de tempo Δt_b , e I_a o conjunto de fontes de interferência depois da inserção de uma nova fonte de interferência em I_b em certo intervalo de tempo Δt_a .

- H1-0 (hipótese nula): Para um dado conjunto de canais S , temos que, se $SO(c_m)_b \leq SO(c_n)_b$, então $SO(c_m)_a \leq SO(c_n)_a, \forall c_m, c_n \in S$.
- H1-1 (hipótese alternativa): Para um dado conjunto de canais S , temos que $\exists c_m, c_n \in S$, tal que, se $SO(c_m)_b \leq SO(c_n)_b$, então $SO(c_m)_a > SO(c_n)_a$.
- H2-0 (hipótese nula): Para um dado conjunto de canais S , temos que, se $TPP(c_m)_b \leq TPP(c_n)_b$, então $TPP(c_m)_a \leq TPP(c_n)_a, \forall c_m, c_n \in S$.

- **H2-1** (hipótese alternativa): Para um dado conjunto de canais S , temos que $\exists c_m, c_n \in S$, tal que, se $TPP(c_m)_b \leq TPP(c_n)_b$, então $TPP(c_m)_a > TPP(c_n)_a$.

Ameaças à Validade

O momento exato em que os experimentos foram realizados pode afetar as conclusões, pois o padrão de ocupação do espectro pode variar ao longo do tempo. Entretanto, nosso experimento foi replicado três vezes, permitindo observar o comportamento das variáveis de resposta em diferentes intervalos de tempo, evitando restringir as conclusões a medidas específicas.

Existe uma ameaça à validade dos experimentos, uma vez que não se pode ter total controle sobre o fator primário FP-2 (fontes de interferência). No momento da inserção de uma nova fonte de interferência pode acontecer a inserção de outras fontes de interferência de maneira não controlada. Além disso, variações meteorológicas durante as medidas podem afetar os resultados, devido a fatores externos não controlados como temperatura e umidade. Alguns trabalhos [11] [8] [59] estudaram o efeito da temperatura e umidade no desempenho de redes de sensores sem fio. A replicação dos experimentos minimiza essas ameaças.

Metodologia para Análise dos Dados

Durante os experimentos, dados foram coletados com o objetivo de testar as hipóteses $H1$ e $H2$. Para testar a hipótese $H1$, a ocupação espectral $SO(c_r)_b$ medida para cada canal c_r , durante o intervalo de tempo Δt_b , foi comparada com a ocupação espectral $SO(c_r)_a$, para cada canal, durante o intervalo de tempo Δt_a . Durante o intervalo de tempo Δt_b , foi atribuído ao fator primário FP-2 (i.e., fontes de interferência) o nível “Forno microondas e rede 802.11g desligados”, enquanto que no intervalo de tempo Δt_a , foram atribuídos os outros níveis, um por vez.

Foi verificado se existe diferença significativa na distribuição de uso do espectro em Δt_b e Δt_a . Em outras palavras, se a potência relativa nos canais permanece a mesma, de acordo com a definição formal de $H1$. Foi também observada a taxa de perda de pacotes $TPP(c_r)_w$ em cada canal c_r . Para determinar a taxa de perda de pacotes, foi estabelecida uma conexão ponto a ponto entre dois rádios IEEE 802.15.4. Foi verificado se existe diferença significativa de desempenho durante Δt_b e Δt_a para cada canal. Em outras palavras, se o desempenho

de comunicação relativo (para cada canal) permaneceu o mesmo, de acordo com a definição formal de $H2$.

O nível de confiança utilizado para a realização dos testes estatísticos foi de 95%.

Instrumentação

A infra-estrutura necessária para a obtenção dos valores de potência no espectro é formada por um componente de *hardware* e um componente de *software*.

O Airview2/EXT [60] é um *hardware* capaz de realizar medição de potência ao longo da banda ISM, na faixa de 2.4 GHz. O Airview2/EXT realiza uma varredura que abrange um espectro de frequências variando de 2.399 MHz a 2.485 MHz. São colhidos pontos em intervalos de 0,5 MHz, resultando em 173 medições por varredura.

Um *software* foi desenvolvido em C++ para realizar a comunicação e adquirir os valores de potência a partir das varreduras realizadas pelo Airview2/EXT. O *software* também é responsável por realizar o processamento para obter os valores de ocupação espectral. O *software* é melhor detalhado no Apêndice A.

Para obter a taxa de perda de pacotes, dois rádios IEEE 802.15.4 [25] foram utilizados, um configurado como coordenador e outro como nó final. Os rádios utilizados para realizar o experimento são compostos por um transceptor MRF24J40MA e um microcontrolador PIC18LF4620. Experimentos com o sistema embarcado desenvolvido serão descritos na seção 5.2. O nó final foi configurado para transmitir com uma potência de 0 dBm.

Para a formação da rede IEEE 802.11g, foram utilizados um roteador D-Link DI-524 e dois computadores pessoais equipados com adaptadores USB Wireless DWL-AG132 para a comunicação via IEEE 802.11g. O forno microondas utilizado foi do modelo Consul CMS25ABHNA, com potência de 700 W. Os nós IEEE 802.11g foram configurados para transmitir com uma potência de 15 dBm.

Ambiente Industrial

Os experimentos foram conduzidos no interior de um galpão na Universidade Federal da Paraíba. O ambiente escolhido possui características típicas de ambientes industriais, como a presença de uma grande quantidade de objetos metálicos. A Figura 5.1 mostra o ambiente onde foram realizados os experimentos.

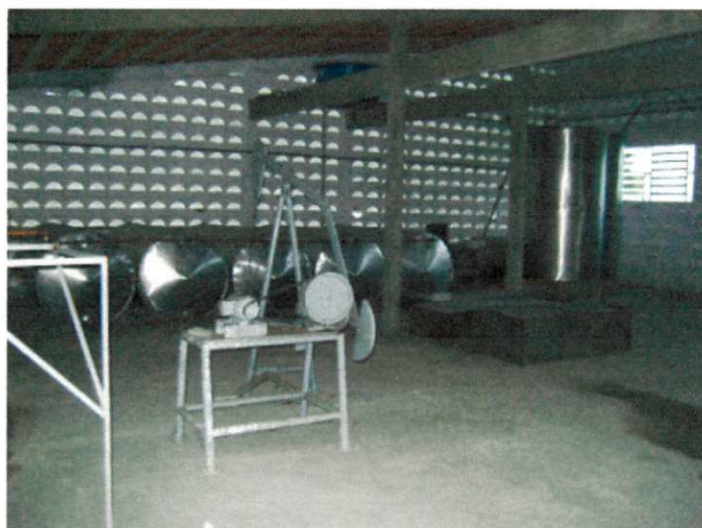


Figura 5.1: Ambiente Industrial.

Configuração do Experimento

A distância entre os nós IEEE 802.15.4 e as fontes de interferência, bem como a localização do analisador de espectro, pode ser visto na Figura 5.2. Durante os experimentos para verificar o impacto da rede IEEE 802.11g, foi realizada uma transferência de arquivo entre o primeiro e o segundo nó IEEE 802.11g, usando o roteador como intermediário. A Tabela 5.1 sumariza as configurações utilizadas nos experimentos.

O nó final foi configurado para transmitir 1000 pacotes em cada replicação. Durante o tempo para transmissão dos 1000 pacotes foram realizadas medições de potência no espectro. Os valores de $SO(c_r)_w$ para cada canal c_r utilizados para comunicação foram calculados para esse intervalo de tempo (Δt_w).

5.1.2 Resultados dos Experimentos

Impacto das Fontes de Interferência na Ocupação Espectral

Primeiro analisamos o impacto na ocupação espectral causado pela inserção das fontes de interferência. O gráfico na Figura 5.3 mostra a potência média induzida em cada canal para todos os fatores primários relativos a “Fontes de Interferência“. Para essa análise, foram considerados todos os canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 na banda ISM de 2.4

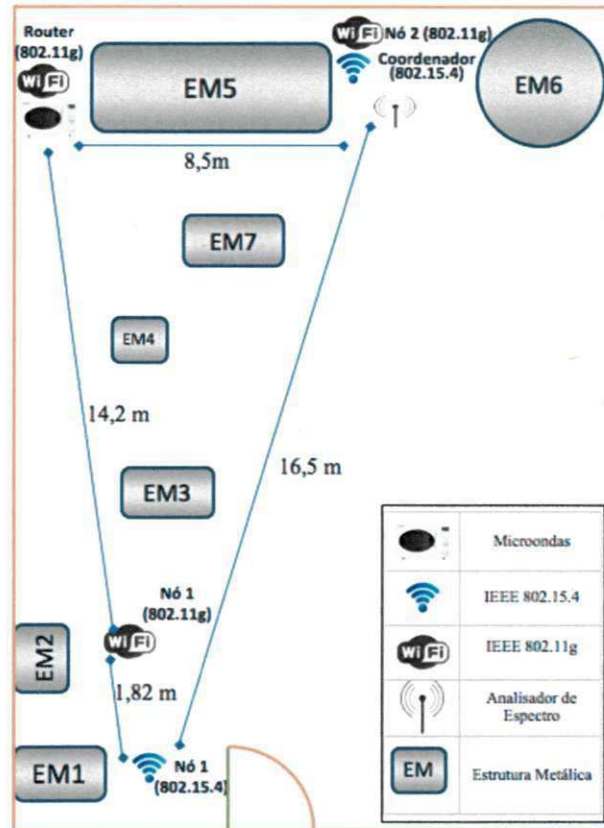


Figura 5.2: Distância entre os nós IEEE 802.15.4 e as fontes de interferência.

GHz.

A partir da análise dos intervalos de confiança no gráfico pode-se observar que a inserção de uma nova fonte de interferência afeta significativamente a distribuição de uso no espectro, ou seja, canais que possuíam baixo nível relativo de potência antes da entrada da nova fonte de interferência apresentaram alto nível relativo de potência após a inserção. Portanto, a hipótese *H1-0* é rejeitada para esse experimento.

Observando as curvas obtidas a partir do impacto da rede IEEE 802.11g operando nos canais 1 e 6, notamos que a ocupação espectral dos canais não afetados é um pouco menor que a ocupação espectral dos canais na curva considerando nenhuma fonte de interferência (forno microondas e rede IEEE 802.11g desligados). Isso é explicado pelo fato de os experimentos sem fontes de interferência e com o forno microondas terem sido realizados em dias diferentes dos experimentos com a rede IEEE 802.11g. Como vimos na subseção 5.1.1,

Tabela 5.1: Parâmetros do Experimento.

Faixa de frequência considerada no experimento	2.401 até 2.481 MHz
Número de componentes de frequência ($ F $)	40 (5 por canal)
Intervalo entre as componentes de frequência	0.5 MHz
Número de pacotes transmitidos (nó IEEE 802.15.4)	1000
Taxa de transmissão de pacotes (nó IEEE 802.15.4)	74 pacotes por segundo
Carga útil dos pacotes (nó IEEE 802.15.4)	100 bytes

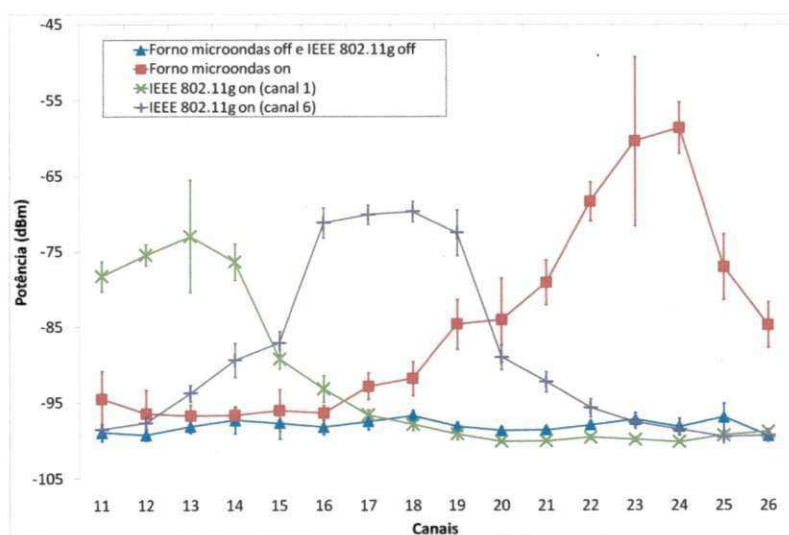


Figura 5.3: Impacto na Ocupação Espectral.

variações ambientais podem afetar os resultados.

Outro ponto interessante a se observar é a variância na ocupação espectral dos canais afetados pelas fontes de interferência, principalmente no canal 23 quando afetado pelo forno microondas e no canal 13 quando afetado pela rede IEEE 802.11g operando no canal 1. No

geral, a variância na ocupação espectral é maior quando os canais são afetados pelo forno microondas. No caso da rede IEEE 802.11g, excetuando o canal 13, quando a rede IEEE 802.11g está operando no canal 1, a variância não é muito significativa.

A partir do gráfico na Figura 5.3 podemos notar ainda que existe um espalhamento por parte dos canais do IEEE 802.11g. Embora na teoria o canal 1 do IEEE 802.11g afete apenas os canais 11, 12, 13 e 14 do IEEE 802.15.4, a rede IEEE 802.11g quando operando no canal 1 causou interferência significativa no canal 15 e também afetou em menor proporção o canal 16. O canal 6 do IEEE 802.11g na teoria afeta apenas os canais 16, 17, 18 e 19 do IEEE 802.15.4, mas também pode-se observar que a rede IEEE 802.11g operando no canal 6 também causa interferência significativa nos canais 14, 15, 20 e 21, e afeta em menor proporção os canais 13 e 22.

Impacto de um Forno Microondas

Nos gráficos seguintes o eixo x contém os canais considerados no experimento, o eixo y do lado esquerdo contém a taxa de perda de pacotes e no eixo y no lado direito temos a ocupação espectral dos canais, em dBm. Para essas análises foram considerados apenas os canais ímpares definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 na banda ISM de 2.4 GHz.

A partir do gráfico na Figura 5.4 podemos analisar o impacto causado pela inserção de um forno microondas no ambiente, tanto na ocupação espectral como na taxa de perda de pacotes.

Podemos ver a partir do gráfico que existe certa correlação entre o nível de ocupação espectral e o desempenho de comunicação. Observamos que quanto maior a diferença entre a potência induzida no canal antes e depois da inserção da nova fonte de interferência, maior a taxa de perda de pacotes.

Para os canais afetados observou-se uma alta taxa de perda de pacotes, sendo superior a 50% em alguns casos. Dessa forma, a operação de um forno microondas no ambiente pode afetar significativamente a taxa de perda de pacotes. Canais que proviam um bom desempenho antes da inserção da fonte de interferência passaram a apresentar alta taxa de perda de pacotes após a inserção. Portanto, a hipótese $H2-0$ é rejeitada para esses experimentos.

Embora a potência média induzida nos canais 21 e 25 sejam próximas quando o forno microondas está ligado, observamos uma menor degradação na qualidade de comunicação

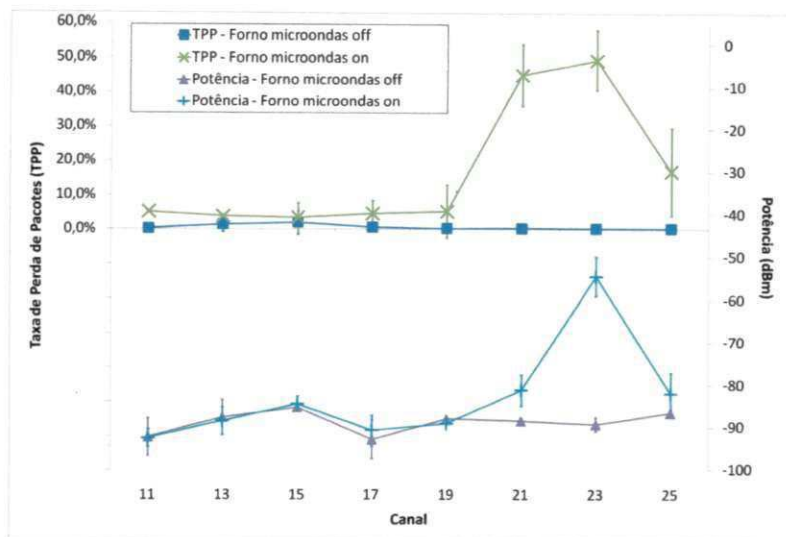


Figura 5.4: Impacto causado por um forno microondas.

no canal 25. Entretanto, se observarmos a diferença entre as potências antes e depois da inserção do forno microondas, observamos que a diferença é maior para o canal 21. Além disso, notamos que existe também uma variância significativa na taxa de perda de pacotes nos canais afetados pela inserção da fonte de interferência, como já foi observado na ocupação espectral.

Para os dados obtidos nesse experimento, obtivemos uma forte correlação de 82% entre a potência média e a taxa de perda de pacotes.

Impacto de uma Rede IEEE 802.11g

O gráfico na Figura 5.5 mostra o impacto causado por uma rede IEEE 802.11g operando no canal 1. Operando nesse canal, a rede IEEE 802.11g afeta principalmente os canais 11 e 13 do IEEE 802.15.4, enquanto que os outros canais não sofrem impacto significativo, embora tenha ocorrido um pequeno aumento na ocupação espectral em todos os canais. O canal 15, embora teoricamente não sofra interferência, sofreu certo nível de degradação.

O gráfico na Figura 5.6 mostra o impacto causado por uma rede IEEE 802.11g operando no canal 6. Nesse canal, ela afeta principalmente os canais 15, 17, 19 e 21, enquanto que os outros canais não sofrem impacto significativo. Como discutido anteriormente, os canais 15 e 21 teoricamente não seriam afetados pela rede IEEE 802.11g operando no canal 6,

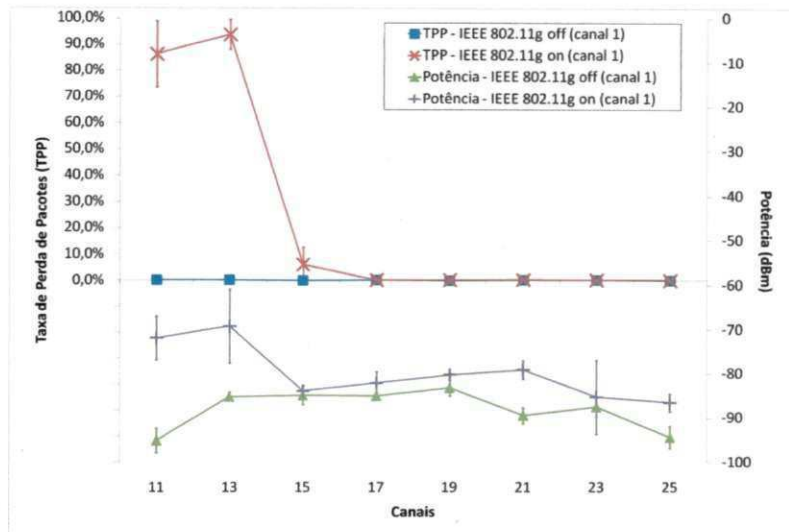


Figura 5.5: Impacto causado por uma rede IEEE 802.11g operando no canal 1.

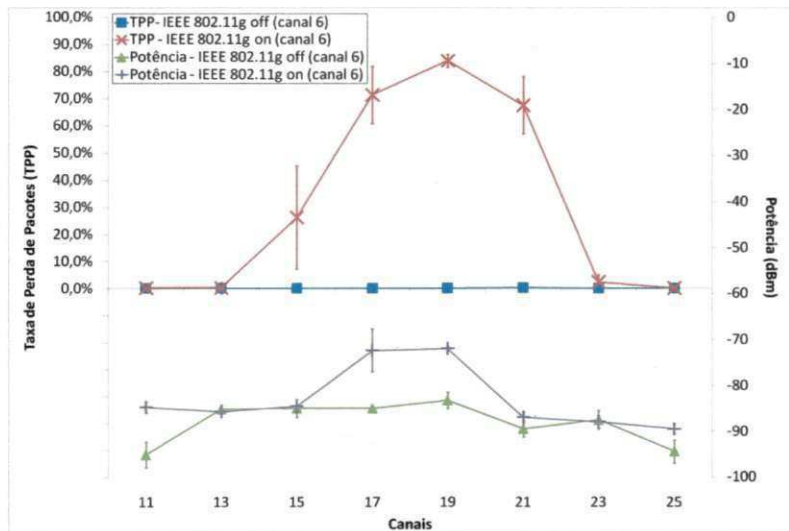


Figura 5.6: Impacto causado por uma rede IEEE 802.11g operando no canal 6.

mas observou-se uma queda significativa de desempenho para esses canais. Isso pode ser explicado pelo espalhamento na potência induzida pelos rádios IEEE 802.11g.

Para os dados obtidos nesses experimentos, obtivemos fortes correlações de 77% para o canal 1 e 72% para o canal 6. A partir da análise dos intervalos de confiança nos gráficos, pode ser observado que a inserção de novas fontes de interferência afeta significativamente o desempenho de comunicação, ou seja, alguns canais que proporcionavam um bom desem-

penho antes da entrada da nova fonte de interferência apresentaram uma alta taxa de perda de pacotes depois da inserção. Portanto, a hipótese $H2-0$ também é rejeitada para esses experimentos.

É importante observar que, embora o impacto causado na ocupação espectral pela rede IEEE 802.11g (aproximadamente -70 dBm no máximo) seja menor que o impacto causado pelo forno microondas (aproximadamente -55 dBm no máximo), a degradação na qualidade de comunicação para os canais afetados foi maior para a rede IEEE 802.11g. Isso mostra que utilizar apenas a potência média induzida nos canais para estimar o desempenho de comunicação não é ideal. Também é necessário conhecer os tipos das fontes de interferência existentes no ambiente ou realizar análises mais detalhadas sobre o padrão de ocupação do espectro.

A partir de estudos de ocupação espectral, é possível desenvolver técnicas para reconhecer fontes de interferência e utilizar essa informação para obter melhor qualidade de comunicação, empregando técnicas de alocação dinâmica de canal aliado a outras estratégias para mitigar os efeitos da interferência, quando a co-existência é inevitável. Alguns pesquisadores têm conduzido estudos buscando desenvolver técnicas para mitigar os efeitos das fontes da interferência em redes IEEE 802.15.4. Por exemplo, alguns estudos têm proposto técnicas para mitigar a interferência por parte de redes IEEE 802.11 [27-28].

5.1.3 Conclusões Obtidas a Partir do Estudo

O estudo experimental realizado teve como objetivo identificar a correlação entre ocupação espectral e taxa de perda de pacotes em redes de sensores sem fio baseadas no padrão IEEE 802.15.4 em um ambiente industrial.

O estudo demonstrou que a inserção de uma nova fonte de interferência no ambiente pode afetar significativamente a distribuição de uso do espectro disponível, possuindo um impacto direto no desempenho de comunicação (as hipóteses $H1$ e $H2$ foram rejeitadas). Foi demonstrado que para manter certo nível de qualidade de serviço, os rádios precisam estar cientes do ambiente onde estão operando e devem utilizar uma abordagem de alocação dinâmica do espectro, não apenas no início, mas também durante todo o período de operação da rede. Quando acontece mudança na distribuição de uso do espectro, provavelmente causada por fontes de interferência, pode ser necessário mudar para um canal menos poluído.

Observou-se uma forte correlação entre a ocupação espectral (i.e., potência média induzida no canal) e desempenho de comunicação (i.e., taxa de perda de pacotes) para os experimentos realizados (82%, 77% e 72%). Entretanto, também vimos que tanto a ocupação espectral quanto a taxa de perda de pacotes podem apresentar uma variância elevada nos canais afetados pelas fontes de interferência, o que pode dificultar a estimação da taxa de perda de pacotes apenas a partir da potência média induzida no canal. Além disso, foi verificado que existe uma diferença na relação entre ocupação espectral e desempenho de comunicação de acordo com o tipo de fonte de interferência.

Portanto, para obter boa acurácia ao estimar o desempenho a partir da ocupação espectral é necessário saber os tipos das fontes de interferência existentes no ambiente ou realizar uma análise mais detalhada incluindo outras métricas, e não apenas a potência média induzida em cada canal. Na seção 5.2 a interferência causada pelas fontes de interferência será melhor analisada.

5.2 Análise de Desempenho da Rede de Sensores

Nessa seção a metodologia descrita na seção 5.1 é utilizada para realizar um estudo de desempenho da RSSF desenvolvida, verificando também a relação entre a ocupação espectral e a taxa de perda de pacotes.

Para esse estudo foram considerados apenas três canais (13, 18 e 24) do IEEE 802.15.4 e foi verificado o impacto da rede IEEE 802.11g operando apenas no canal 6.

5.2.1 Configuração do Experimento

Foram utilizados três nós para testar a RSSF, formando uma topologia em estrela com um coordenador e dois nós finais. O primeiro nó (N1) foi posicionado a uma distância de 16 metros do coordenador, enquanto que o segundo nó (N2) foi posicionado a uma distância de 13 metros. Salienta-se que o nó N1 não possuía linha de visão direta para o coordenador e foi posicionado entre muitos objetos metálicos, enquanto que o nó N2 possuía linha de visão direta com o coordenador.

A distância entre os nós IEEE 802.15.4 e as fontes de interferência, bem como a localização do analisador de espectro, pode ser visto na Figura 5.7.

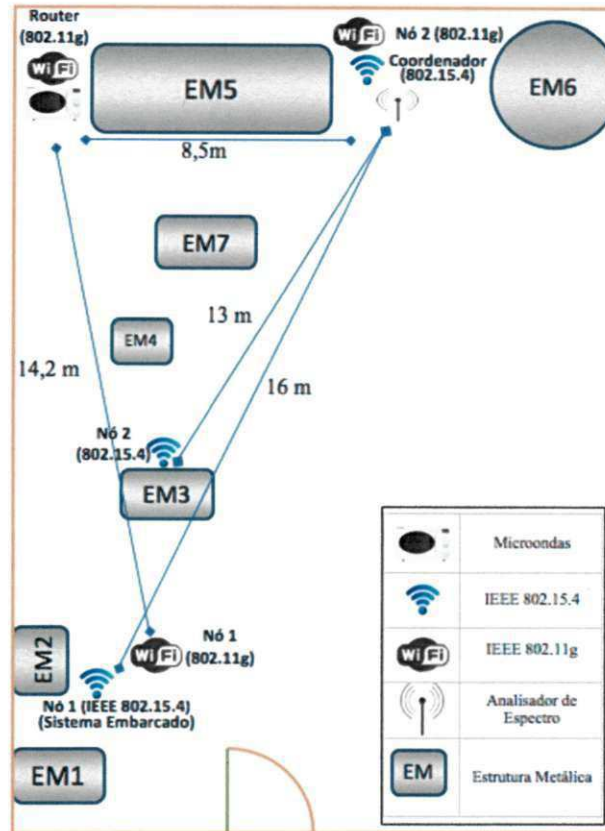


Figura 5.7: Distância entre os nós IEEE 802.15.4 e as fontes de interferência.

O nó N1 consiste em um sistema embarcado instalado em um motor para monitoramento de torque e eficiência. O nó N2 não está conectado a nenhum motor, mas foi configurado para gerar um tráfego na rede idêntico ao nó que está realizando o monitoramento do motor. Apenas o tráfego de pacotes na rede influencia na análise de desempenho da RSSF, independente dos valores contidos nos pacotes.

Na Figura 5.8 pode-se ver o protótipo do sistema embarcado desenvolvido. A partir da figura podemos observar todos os componentes descritos na seção 4.2.

Foi desenvolvido um *software* para executar na estação base de monitoramento. O *software* é responsável por capturar os dados recolhidos a partir da rede através de uma interface serial conectada ao coordenador. Na Figura 5.9 pode-se ver o sistema cliente realizando o monitoramento em tempo real a partir dos nós N1 e N2. Os gráficos na Figura 5.9 mostram os valores de torque e eficiência do motor calculados pelo sistema embarcado e transmitidos através da RSSF.

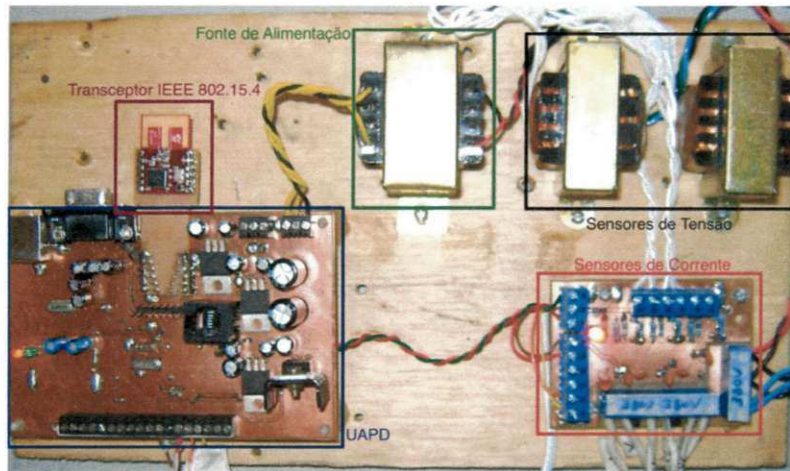


Figura 5.8: Protótipo do Sistema Embarcado.

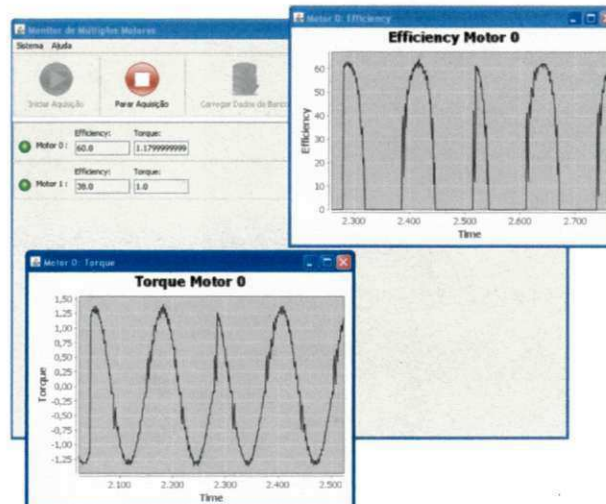


Figura 5.9: Software da Base de Monitoramento.

5.2.2 Resultados dos Experimentos

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram o impacto causado pelo forno microondas e as Figuras 5.12 e 5.13 mostram o impacto causado pela rede IEEE 802.11g operando no canal 6, nos nós N1 e N2 respectivamente. O eixo x contém os canais (c_r) considerados no experimento, o eixo y do lado esquerdo contém a taxa de perda de pacotes e no eixo y do lado direito estão os valores de $SO(c_r)_w$ (em dBm).

Podemos notar a partir dos gráficos nas figuras que a inclusão de novas fontes de interfe-

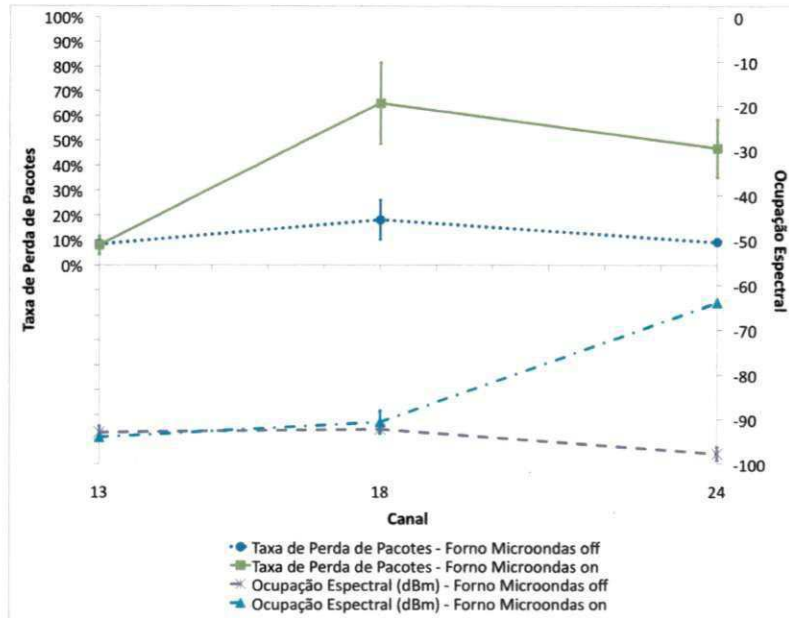


Figura 5.10: Impacto causado pelo forno microondas no nó N1.

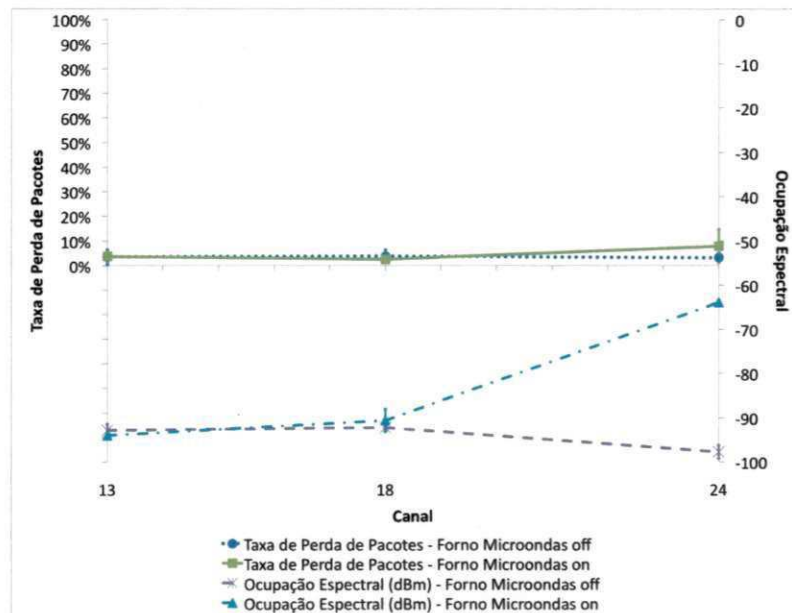


Figura 5.11: Impacto causado pelo forno microondas no nó N2.

rência no ambiente resulta em uma queda de desempenho significativa, principalmente para o nó N1. Em geral, o nó N2 não sofreu grande queda de desempenho se comparado ao nó N1. Isso pode ser explicado pelo posicionamento do nó N1, que ficou a uma maior distância

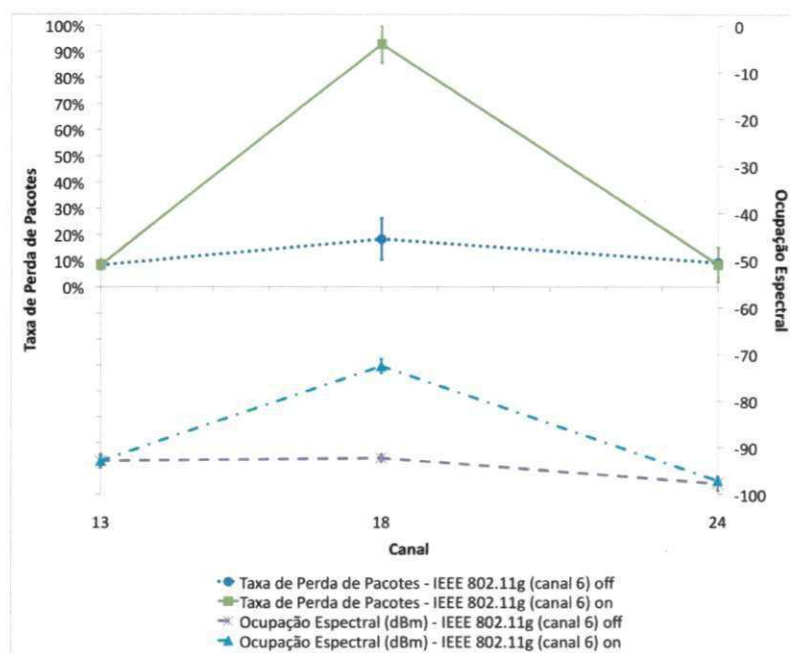


Figura 5.12: Impacto causado pela rede IEEE 802.11g (canal 6) no nó N1.

do coordenador e sem linha de visão direta com o mesmo.

Analisando o impacto causado pelo forno microondas podemos observar que o nó N2 não sofreu grande queda de desempenho, mas quando operando no canal 24 a taxa de perda de pacotes apresentou uma pequena variância, com a taxa de perda pacotes chegando até 15%. O nó N1 sofreu queda de desempenho significativa, principalmente nos canais 18 e 24. A variância também foi larga para esses canais, com a taxa de perda de pacotes chegando a 80% no canal 18 e 60% no canal 24.

Quando analisamos o impacto da rede IEEE 802.11g, observamos que existe uma grande correlação entre a taxa de perda de pacotes e a ocupação espectral. Novamente, o nó N1 sofreu uma maior queda de desempenho quando comparado ao nó N2. Quando a RSSF estava sofrendo interferência da rede IEEE 802.11g operando no canal 6, os nós IEEE 802.15.4 apresentaram impacto significativo apenas quando operando no canal 18. Nesse canal, o nó N2 apresentou melhor desempenho em comparação com N1, mas com uma variância significativa na taxa de perda de pacotes, chegando a 90%.

Quando operando no canal 13, os dois nós IEEE 802.15.4 mantiveram boa qualidade de comunicação em todos os cenários considerados.

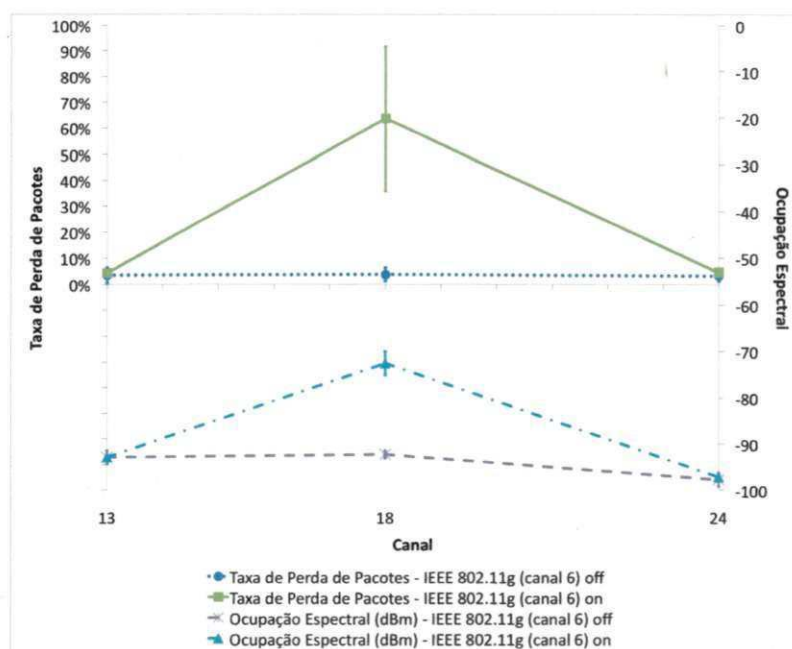


Figura 5.13: Impacto causado pela rede IEEE 802.11g (canal 6) no nó N1.

A Figura 5.14 mostra a potência induzida nas componentes de frequência em cada cenário para uma das replicações realizadas para o canal 13. Podemos notar que a potência média induzida nas componentes de frequência pelo forno microondas pode ser maior que a potência média induzida pela rede IEEE 802.11g, mas a variância também é muito alta.

Quando o forno microondas está ligado, os valores de $SO(c_r)_w$ não apresentam variância relativamente muito alta, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, mas quando analisamos as componentes de frequência individualmente, verificamos que a variância nos valores de $p_t(f_j)$ é muito alta durante o intervalo de tempo das transmissões (Δt_w), principalmente nas componentes de frequência mais afetadas.

Isso pode explicar o motivo de a interferência da rede IEEE 802.11g causar maior queda de desempenho, tanto em N1 como em N2, mesmo induzindo uma potência média menor nos canais. Podemos ver que quando a rede IEEE 802.11g está ligada, o nível de ruído na faixa de frequência afetada permanece alto todo o tempo, com pequena variância. Quando o forno microondas está ligado, o nível de ruído na faixa de frequência afetada flutua entre níveis muito altos de ruído e níveis muito baixos de ruído, aumentando a porção de tempo em que o meio de comunicação permanece livre.

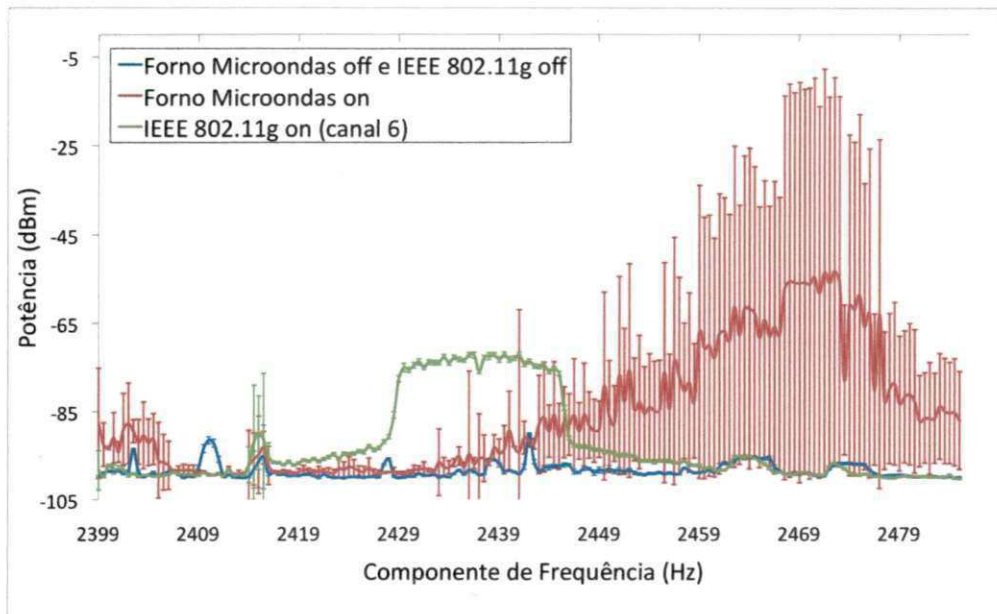


Figura 5.14: Potência Induzida nas Componentes de Frequência.

Em cenários com altos níveis de interferência, o uso de processamento local se torna muito importante. Baseado no estudo teórico realizado na seção 4.3, a Tabela 5.2 mostra o número médio de transmissões requeridas para obter um valor de torque e um valor de eficiência, para vários valores de p (probabilidade de sucesso em uma transmissão) em cada cenário.

A partir da tabela podemos notar que em cenários com alta interferência, existe uma grande redução na quantidade de dados transmitidos quando é utilizado processamento local. Quando a taxa de perda de pacotes é alta, é muito difícil realizar monitoramento sem a utilização de processamento local. Por exemplo, no cenário com a rede IEEE 802.11g operando no canal 6, podemos ver que a taxa de perda de pacotes média foi de 90% para o nó N1 (operando no canal 18). Nesse cenário, sem utilizar processamento local seria necessário, em média, a transmissão de 300 pacotes pelo nó para que um valor de torque e um valor de eficiência fosse recebido no destino, considerando o uso de retransmissões. Sem utilizar retransmissões a quantidade de pacotes transmitidos sobe para 3.000 em média. O nó N2 apresentou melhor desempenho nesse cenário, mas a taxa de perda de pacotes apresentou variância elevada, chegando a 90%.

Utilizando processamento local, para obter um valor de torque e um valor de eficiência a

Tabela 5.2: Número Médio de Transmissões.

	PL	PLR	NPLR	NPL
$p = 0,1$	10	100	300	3000
$p = 0,2$	5	25	75	375
$p = 0,3$	3,3	11,1	33,3	111,1
$p = 0,4$	2,5	6,25	18,75	46,87
$p = 0,5$	2	4	12	24

PL - Com processamento local
 PLR - Com processamento local e com retransmissão
 NPLR - Sem processamento local e com retransmissão
 NPL - Sem processamento local

partir do nó é necessário transmitir em média 10 pacotes quando não se utiliza retransmissões e 100 pacotes em média quando se utiliza retransmissões.

Além disso, uma vez que um valor de torque e um valor de eficiência ocupam apenas 4 bytes, pode-se agregar múltiplos valores em um único pacote. O sistema embarcado foi configurado para transmitir um conjunto de 18 valores de torque e eficiência por pacote, com uma carga útil total de 72 bytes. Também é importante notar que devido ao aumento no número de pacotes transmitidos na abordagem sem processamento local, a taxa de perda de pacotes tende a crescer, principalmente para redes com muitos nós.

Também a partir do estudo teórico realizado na seção 4.3, a Tabela 5.3 mostra a taxa de entrega de informações pela RSSF para alguns valores de p .

Podemos observar que para valores baixos de p a taxa de entrega de informações é muito pequena quando não se utiliza processamento local. Por outro lado, utilizando processamento local é possível realizar o monitoramento com uma taxa de entrega de informações aceitável, mesmo para altas taxas de perda de pacote.

Por exemplo, no cenário com a rede IEEE 802.11g operando no canal 6 e os nós N1 e N2 operando no canal 18, no qual observou-se uma taxa de perda de pacotes de até 90%, a latência para entrega de uma informação a partir dos nós pode chegar a 68 segundos quando

Tabela 5.3: Taxa de Entrega de Informações.

	PL ($V_a = 1$)	PLR($V_a = 1$)	PL ($V_a = 18$)	PLR($V_a = 18$)	NPL	NPLR
$p = 0,1$	2,626	1,134	3,083	4,691	0,0147	0,182
$p = 0,2$	5,326	4,344	6,215	14,27	0,117	0,722
$p = 0,3$	8,093	8,77	9,38	21,76	0,396	1,6
$p = 0,4$	10,919	13,362	12,571	26,139	0,94	2,788
$p = 0,5$	13,796	17,4308	15,778	28,568	1,836	4,245

PL - Com processamento local
 PLR - Com processamento local e com retransmissão
 NPLR - Sem processamento local e com retransmissão
 NPL - Sem processamento local

não se utiliza processamento local nem retransmissões, e até 5,5 segundos quando se utiliza retransmissões. Dessa forma, no melhor caso cada nó entrega 0,182 valores de torque e eficiência por segundo. A taxa real pode ainda ser menor devido ao *overhead* do mecanismo de retransmissão, que não foi totalmente considerado no modelo.

Para uma taxa de perda de pacotes de 90 %, quando se utiliza processamento local e para $V_a = 18$, no pior caso (sem retransmissões) a latência para entrega de uma informação de torque e eficiência é de 0,32 segundos, ou seja, obtém-se em média 3,083 valores de torque e eficiência por segundo a partir dos nós. O uso de retransmissões pode ainda aumentar o desempenho nesse cenário, visto que maior parte da latência para entrega das informações é devido à latência de processamento.

A partir desses estudos notamos que a implantação de uma rede de sensores sem fio industrial ainda apresenta sérios desafios relacionados à confiabilidade de comunicação. Com o objetivo de manter a rede operando com certo nível de qualidade de serviço, os rádios precisam estar cientes do ambiente onde estão operando, adotando uma abordagem de alocação dinâmica de espectro.

Apesar da alta taxa de perda de pacotes em alguns casos, é importante notar que devido à

capacidade de processamento local dos sistemas embarcados, todos os dados que chegam ao coordenador carregam informações úteis que podem ser utilizadas para a tomada de decisão. Sem processamento local provavelmente seria impossível obter dados úteis através da RSSF, em alguns cenários.

Alguns estudos [32; 40] visando desenvolver soluções para mitigar o efeito das fontes de interferência em redes IEEE 802.15.4 tem sido realizados. Combinando a capacidade de processamento local, já explorada nesse trabalho, com técnicas de alocação dinâmica de espectro e técnicas para mitigar os efeitos da interferência, pode ser possível alcançar uma boa qualidade de serviço em aplicações para monitoramento de motores baseadas em Redes de Sensores sem Fio. Nesse contexto, a realização de estudos experimentais, como os apresentados nessa dissertação, é fundamental para prover informações e guiar o desenvolvimento de novas técnicas e protocolos para RSSF.

5.3 Validação dos Valores Obtidos a Partir da RSSF

A Figura 5.15 mostra a bancada utilizada para analisar os valores obtidos a partir do sistema embarcado. A bancada foi construída para obter um valor de torque conhecido e variável no eixo do motor. Ela consiste em um motor de indução de 550 W, com velocidade de rotação nominal de 1680 RPM, acoplado a um redutor que provê uma velocidade de saída de cerca de 15 RMP. Um disco de metal foi colocado no eixo de saída do redutor, simetricamente acoplado com uma barra de metal. Em uma das pontas da barra podem ser inseridas massas, de acordo com o valor de torque desejado, como mostrado na Figura 5.15.

O sistema embarcado foi instalado próximo ao motor para adquirir os valores de corrente e tensão. Torque e eficiência foram calculados pelo UAPD e então foram transmitidos através da RSSF utilizando o transceptor IEEE 802.15.4.

A Figura 5.16 mostra as curvas dos valores de torque calculados pelo sistema embarcado (T_{shaft}), lidos pelo software da estação base de monitoramento e calculados utilizando a Equação 4.2, e o torque de referência, obtido a partir do modelo da bancada (T_{ref}). A descrição do modelo da bancada para obtenção dos valores de referência de torque e eficiência está fora do escopo desse trabalho. Mais detalhes sobre a bancada e seu modelo podem ser encontrados em [1] e [2].

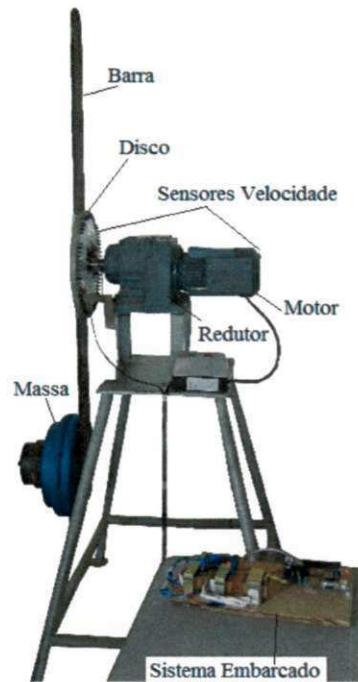


Figura 5.15: Bancada onde foi instalado o sistema embarcado.

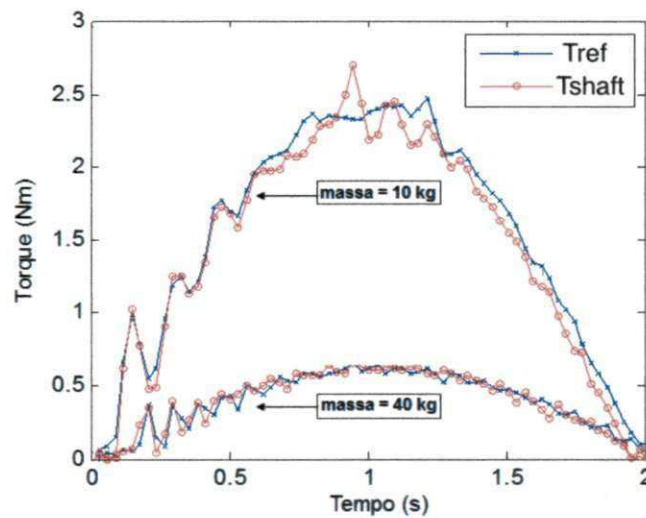


Figura 5.16: Comparação entre o torque estimado e o torque de referência.

As curvas na Figura 5.16 foram obtidas para a primeira metade do ciclo de rotação da barra de metal e utilizando duas massas diferentes, no qual o torque varia de 0 até o valor máximo.

Com relação à eficiência do sistema, utilizamos diferentes massas para computar o va-

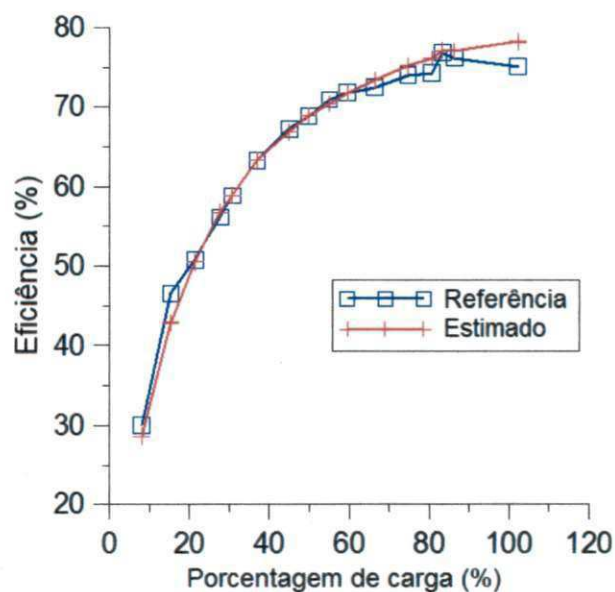


Figura 5.17: Comparação entre a eficiência estimada e a referência.

lores máximos de referência e torque para cada peso. A Figura 5.17 mostra a curva de referência e os valores estimados pelo sistema embarcado. No eixo x temos a faixa de carga da máquina. Entre 0 e 85% da carga nominal, o erro máximo não excedeu 2%.

Mais detalhes sobre a estimação de eficiência e torque em motores de indução, bem como sobre a validação do método utilizado nesse trabalho podem ser encontrados em [2], [1], [44] e [43].

Capítulo 6

Conclusões

Essa dissertação apresentou uma Rede de Sensores Sem Fio para monitoramento de motores na indústria. A rede de sensores proposta é formada por nós inteligentes que realizam todo o processamento para estimação dos parâmetros localmente, diminuindo a quantidade de pacotes que trafegam na rede e permitindo a realização de monitoramento mesmo com a presença de interferência no meio de comunicação. Os parâmetros monitorados são torque e eficiência. O monitoramento desses parâmetros é muito importante tanto para identificar falhas na operação das máquinas como na otimização do uso de energia elétrica.

Foi utilizado um método não-invasivo para determinação dos parâmetros, baseado nos parâmetros elétricos do motor (valores de corrente e tensão). Os nós da rede de sensores são formados por um sistema embarcado que adquire os valores de tensão e corrente, realiza o processamento para estimação dos parâmetros e então transmite os valores de torque e eficiência através da rede de sensores sem fio, baseada no padrão IEEE 802.15.4.

Para avaliar o desempenho da rede de sensores em várias configurações foi construído um modelo matemático para determinar a quantidade de pacotes transmitidos pela rede e a latência para entrega de informações. A partir do modelo matemático foi possível comparar o desempenho da rede de sensores nas abordagens com e sem processamento local. Além disso, pode-se verificar o desempenho da rede com e sem a utilização de retransmissões e o ganho de desempenho obtido a partir da agregação de vários valores em um mesmo pacote.

Experimentos foram realizados para validar o modelo e obteve-se ótima precisão, principalmente para os modelos referentes aos cenários com processamento local. Nos cenários com retransmissão os modelos ainda apresentam limitações e mais estudos precisam ser re-

alizados para melhorar a acurácia dos mesmos.

Também foram conduzidos experimentos para identificar a correlação entre taxa de perda de pacotes e a ocupação espectral no ambiente de operação da rede. Esse estudo teve como principal objetivo verificar o impacto causado pela inserção de novas fontes de interferência no ambiente de operação, tanto na ocupação espectral (métrica relacionada à qualidade do meio de comunicação) como na taxa de perda de pacotes (métrica relacionada ao desempenho de comunicação). Seguindo a mesma metodologia definida, também foram conduzidos experimentos para avaliar o desempenho da rede de sensores desenvolvida com dois nós finais. Os experimentos foram realizados em um ambiente com características típicas de ambientes industriais.

Os estudos demonstraram que a adição de novas fontes de interferência no ambiente pode afetar significativamente a ocupação espectral e possui um impacto direto no desempenho de comunicação. Para alguns cenários a taxa de perda de pacotes médio atingiu cerca de 90%. Para esse cenário é praticamente inviável realizar monitoramento sem a utilização de processamento local.

Mesmo com as dificuldades na transmissão de dados usando a rede de sensores em alguns cenários, o sistema foi capaz de prover informações úteis para monitoramento, uma vez que todo o processamento é feito localmente. Aliado à capacidade de processamento, outras técnicas podem ser desenvolvidas para mitigar a interferência nesses ambientes, provocando uma melhora no desempenho de comunicação. Mais especificamente, para obter melhor desempenho de comunicação em ambientes com muita interferência, os rádios precisam estar cientes da qualidade do meio de comunicação onde estão operando e tomar decisões baseadas nesse conhecimento.

A partir da utilização de técnicas de alocação dinâmica de espectro, os rádios serão capazes de escolher o melhor canal para operação de forma dinâmica, não apenas no início da operação da rede, mas também durante todo o seu período de operação. Os estudos experimentais realizados nessa dissertação proveram informações úteis sobre a relação entre o desempenho de comunicação e a qualidade do meio de comunicação, e podem ser utilizadas para o desenvolvimento de novas técnicas de protocolos para esse tipo de rede.

A partir do trabalho realizado nessa dissertação foram publicados dois artigos em congressos [21] [22], um artigo em periódico [23] e um artigo aceito para publicação no periód-

dico *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, intitulado “*Embedded System Integrated into a Wireless Sensor Network for Online Dynamic Torque and Efficiency Monitoring in Induction Motors*”.

Seguem as principais contribuições que esse trabalho proporcionou:

- Desenvolvimento de um sistema embarcado para monitoramento de motores elétricos.
- Integração do sistema embarcado em uma RSSF utilizando o padrão IEEE 802.15.4.
- Construção de um modelo matemático para estudar a quantidade de pacotes transmitidos e a latência para entrega de informações pela RSSF.
- Definição de uma metodologia para análise de ocupação espectral e implementação de um software para realização das análises.
- Estudos experimentais sobre a ocupação espectral no ambiente e do desempenho de rádios IEEE 802.15.4.
- Estudos experimentais sobre a ocupação espectral no ambiente e do desempenho da RSSF desenvolvida.
- Investigação do impacto causado pela inserção de novas fontes de interferência no ambiente.
- Investigação da relação entre o desempenho da rede e a ocupação espectral no ambiente.

Como trabalhos futuros, pretendemos conduzir estudos de desempenho mais detalhados, considerando uma rede com um grande número de nós em uma indústria. Também pretendemos desenvolver protocolos cientes do espectro, para que os rádios escolham o canal de operação de forma dinâmica, permitindo que os sistemas embarcados se auto adaptem ao ambiente de operação, melhorando a qualidade de serviço da rede. Através de estudos experimentais mais detalhados, pode-se também refinar o modelo matemático, de modo que avaliações teóricas de desempenho possam ser realizadas com boa precisão. Abaixo são listadas algumas possíveis linhas de trabalhos futuros.

- Avaliação experimental da RSSF com uma grande quantidade de nós.

- Estudo sobre métricas para avaliação da qualidade do meio de comunicação.
- Desenvolvimento e avaliação de protocolos para escolha dinâmica de canal.
- Explorar redundância de canais a partir da utilização de múltiplos transceptores por nó.
- Avaliar o desempenho da RSSF operando com retransmissão de pacotes.
- Refinar os modelos matemáticos e realizar mais testes para validação dos mesmos.
- Explorar técnicas de sumarização de dados para diminuir a quantidade de pacotes transmitidos na rede.
- Avaliar experimentalmente o impacto do tamanho dos pacotes no desempenho de comunicação.
- Avaliar experimentalmente o desempenho de transceptores IEEE 802.15.4 utilizando diferentes potências de transmissão.

Bibliografia

- [1] M. O. Adissi. Sistema embarcado de estimação de torque, velocidade e eficiência em motores de indução. Master's thesis, PPGEM, Universidade Federal da Paraíba - Brasil, 2012.
- [2] M. O. Adissi, A. C. Lima Filho, R. D. Gomes, T. A. B. Da Silva, and F. A. Belo. Sistema embarcado de estimação de eficiência de motores de indução trifásicos. In *IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2011.
- [3] J. Akerberg, M. Gidlund, and M. Bjorkman. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. In *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pages 410–415, 2011.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks Journal (Elsevier)*, 50:2127–2159, 2006.
- [5] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran. *Wireless Sensor Networks*. Wiley, 1th edition, 2010.
- [6] ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org>, 2011.
- [7] J. M. R. Ascariz and L. Boquete. System for measuring power supply parameters with zigbee connectivity. In *IEEE Instrumentations Measurement Technology Conference*, pages 1–5, 2007.
- [8] K. Bannister, G. Giorgetti, and S. K. Gupta. Wireless sensor networking for hot applications: Effects of temperature on signal strength, data collection and localization. In *Workshop on Embedded Networked Sensors*, 2008.

- [9] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards. *Computer Communications*, 30:1655–1695, 2007.
- [10] L. Bello and E. Toscano. Coexistence issues of multiple co-located ieee 802.15.4/zigbee networks running on adjacent radio channels in industrial environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 5:157–167, 2009.
- [11] C. A. Boano, N. Tsiftes, T. Voigt, J. Brown, and U. Roedig. The impact of temperature on outdoor industrial sensornet applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6:451–459, 2010.
- [12] L. Cao, W. Jiang, and Z. Zangh. Networked wireless meter reading system based on zigbee technology. In *Control and Decision Conference*, pages 3455–3460, 2008.
- [13] P. Cheong, K. Chang, Y. Lai, S. Ho, I. Sou, and K. Tam. A zigbee-based wireless sensor network node for ultraviolet detection of flame. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58:5271–5277, 2011.
- [14] E. G. dos Anjos. Sistema embarcado reconfigurável para automação de unidades de bombeamento de petróleo através de redes de sensores sem fio. Master's thesis, PPGI, Universidade Federal da Paraíba - Brasil, 2009.
- [15] J. L. A. dos Santos. Sistema telemétrico para monitoramento de trens através de redes de sensores sem fio e processamento em sistema embarcado. Master's thesis, PPGI, Universidade Federal da Paraíba - Brasil, 2010.
- [16] R. Etkin, A. Parehk, and D. Tse. Spectrum sharing for unlicensed bands. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 25:517–528, 2007.
- [17] B. Fette, R. Aiello, P. Chandra, D. Dobkin, D. Bensky, D. Miron, D. Lide, F. Dowla, and R. Olexa. *RF & Wireless Technologies: Know It All*. Elsevier, 1th edition, 2007.
- [18] A. C. Lima Filho. *Estudo e Desenvolvimento de Soluções para Determinação do Torque em Unidades de Bombeio Mecânico Utilizadas na Extração de Petróleo*. PhD thesis, PPGEM, Universidade Federal da Paraíba - Brasil, 2009.

- [19] A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni, and A. Taroni. Design and implementation of a wireless fieldbus for plastic machineries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56:747–755, 2009.
- [20] J. Frey and T. Lennvall. Wireless sensor networks for automation. In *Networked Embedded Systems (Richard Zurawski)*, pages 27–1–27–43. CRC Press, 2009.
- [21] R. D. Gomes and M. A. Spohn. Estudo experimental da utilização espectral na banda de 2.4 ghz. In *The 9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, 2010.
- [22] R. D. Gomes, M. A. Spohn, A. C. Lima Filho, E. G. dos Anjos, and F. A. Belo. Correlação entre ocupação espectral e taxa de perda de pacotes em redes de sensores sem fio industriais baseadas no padrão ieee 802.15.4. In *10th International Information and Telecommunication Technologies Conference*, pages 176–182, 2011.
- [23] R. D. Gomes, M. A. Spohn, A. C. Lima Filho, E. G. dos Anjos, and F. A. Belo. Correlation between spectral occupancy and packet error rate in ieee 802.15.4-based industrial wireless sensor networks. *Revista IEEE América Latina*, 10:1312–1318, 2012.
- [24] A. Gonzáles, N. Leone, M. Murdoch, P. Mazzara, and J. Oreggioni. A wireless sensor network implementation for an industrial environment. In *The Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications*, pages 82–86, 2010.
- [25] V. C. Gungor and G. P. Hancke. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56:4258–4265, 2009.
- [26] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57:3557–3564, 2010.
- [27] W. Guo, W. M. Healy, and M. Zhou. An experimental study of interference impacts on zigbee-based wireless communication inside buildings. In *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 1982–1987, 2010.

- [28] R. Hanitsch. Energy efficient electric motors. In *RIO 02 - World Climate Energy Event*, pages 6–11, 2002.
- [29] Wireless Hart. <http://www.hartcomm.org>, 2011.
- [30] J. S. Hsu, J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert. Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34:117–125, 1998.
- [31] J. S. Hsu and B. P. Scoggins. Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10:471–477, 1995.
- [32] J. Huang, G. Xing, G. Zhou, and R. Zhou. Beyond co-existence: Exploiting wifi white space for zigbee performance assurance. In *IEEE International Conference on Network Protocols*, pages 305–314, 2010.
- [33] X. Huang, X. Li, Y. Wang, and S. Fang. An online temperature monitoring system of substation based on zigbee wireless network. In *International Conference on Electrical and Control Engineering*, pages 992–995, 2011.
- [34] ISA100. <http://www.isa.org>, 2011.
- [35] M. Kang, Y. Ke, and J. Li. Implementation of smart loading monitoring and control system with zigbee wireless network. In *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pages 907–912, 2011.
- [36] H. Karl and A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 1th edition, 2005.
- [37] J. Lee. Performance evaluation of ieee 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 52:742–749, 2006.
- [38] T. Lennvall, S. Svensson, and F. Hekland. A comparison of wirelesshart and zigbee for industrial applications. In *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, pages 85–88, 2008.

- [39] H. Li, M. Syed, Y. Yao, and T. Kamakaris. Spectrum sharing in and ism band: Outage performance of a hybrid ds/fh spread spectrum system with beamforming. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009:1–11, 2009.
- [40] C. Liang, N. Priyantha, J. Liu, and A. Terzis. Surviving wi-fi interference in low power zigbee networks. In *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 309–322, 2010.
- [41] A. C. Lima-Filho, F. A. Belo, and R. D. Gomes. Tests prove, self-powered, wireless, pump torque meter. *Oil and Gas Journal*, 106:43–48, 2008.
- [42] A. A. F. Loureiro, J. M. S. Nogueira, L. B. Ruiz, R. A. F. Mini, E. F. Nakamura, and C. M. S. Figueiredo. Redes de sensores sem fio. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 2003.
- [43] B. Lu and V. C. Gungor. Online and remote motor energy monitoring and fault diagnostics using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56:4651–4659, 2009.
- [44] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley. A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44:1666–1674, 2008.
- [45] Microchip. Mrfj40ma data sheet, 2008.
- [46] Microchip. dspic33fjxxxgpx06/x08/x10 data sheet, 2009.
- [47] Microchip. <http://www.microchip.com>, 2012.
- [48] RFM XDM2510HP 2.4 GHz WirelessHART Transceiver Modules. <http://br.mouser.com/rfmxdm2510h/>.
- [49] T. Noergaard. *Embedded Systems Architecture: A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers*. Elsevier, 1th edition, 2005.
- [50] A. Patra, M. Rajib, and A. Routray. Embedded systems (web course). disponível em <http://nptel.iitm.ac.in/courses/webcourse-contents/iit>

- [51] S. Petersen and S. Carlsen. Performance evaluation of wireless hART for factory automation. In *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, pages 1–9, 2009.
- [52] F. Salvadori, M. de Campos, P. S. Sausen, R. F. Camargo, C. S. Gehrke, C. Rech, M. A. Spohn, and A. C. Oliveira. Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58:3104–3111, 2009.
- [53] J. L. A. Santos, R. C. C. Araújo, A. C. Lima Filho, F. A. Belo, and J. A. G. Lima. Telemetric system for monitoring and automation of railroad networks. *Transportation Planning and Technology*, 34:593–603, 2011.
- [54] A. Sikora and V. Groza. Coexistence of IEEE 802.15.4 with other systems in the 2.4 GHz ISM band. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pages 1786–1791, 2005.
- [55] D. E. Simon. *An Embedded Software Primer*. Pearson, 1th edition, 1999.
- [56] J. Song, S. Han, A. K. Mok, and D. Chen. Wireless hART: Applying wireless technology in real-time industrial process control. In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pages 377–386, 2008.
- [57] IEEE Standard. IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators, 2004.
- [58] L. Tang, K. Wang, Y. Huang, and F. Gu. Channel characterization and link quality assessment of IEEE 802.15.4-compliant radio for factory environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3:99–110, 2007.
- [59] J. Thelen, D. Goense, and K. Langendoen. Radio wave propagation in potato fields. In *WNM workshop*, 2005.
- [60] Ubiquiti. <http://www.ubnt.com/airview>, 2010.
- [61] R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, and A. Conti. *Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analyses and Design*. Elsevier, 1th edition, 2007.

-
- [62] A. Willig. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4:102–124, 2008.
- [63] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz. Wireless technology in industrial networks. In *Proceedings of the IEEE*, pages 1130–1151, 2005.
- [64] W. Wolf. *Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design*. Elsevier, 1th edition, 2008.
- [65] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52:2292–2330, 2008.

Apêndice A

Software para Análise de Espectro

O diagrama de classes na Figura A.1 mostra as classes que compõem o software responsável pela comunicação com o analisador de espectro e aquisição dos valores de potência nas componentes de frequência. O software foi implementado utilizando a linguagem de programação C++.

A classe `Serial` é responsável pela comunicação com o `Airview2/EXT` através de uma interface USB. A classe `DataReceiver` é responsável por implementar o protocolo para comunicação com o `Airview2/EXT`. `DataReceiver` herda de `JThread` (baseado no `POSIX Threads`). A classe `AirView` é responsável por abstrair toda a comunicação com o `Airview2/EXT`. Através dos métodos da classe `AirView` pode-se iniciar o dispositivo e recolher dados das varreduras realizadas pelo `Airview2/EXT`. Os objetos das classes `AirView` e `DataReceiver` compartilham uma fila, na qual os valores das varreduras são armazenados. Dessa forma, estabelece-se uma relação produtor consumidor, na qual o objeto da classe `DataReceiver` age como produtor.

Utilizando as abstrações fornecidas pela API desenvolvida, o desenvolvimento de software para comunicação e obtenção de valores de potência do espectro através do `Airview2/EXT` se torna muito facilitada. Optou-se pela implementação dessa API visando facilitar trabalhos futuros que venham a utilizar o analisador de espectro. O código A.1 ilustra a utilização da API para a obtenção dos valores de potência em cada componente de frequência para uma varredura do `Airview2/EXT`. No caso, o analisador obtém valores de potência para 173 componentes de frequência na faixa de 2.4 GHz. O único parâmetro necessário para a criação de um objeto `AirView` é a porta (ex: `COM1`, `COM2`, etc) na qual o dispositivo

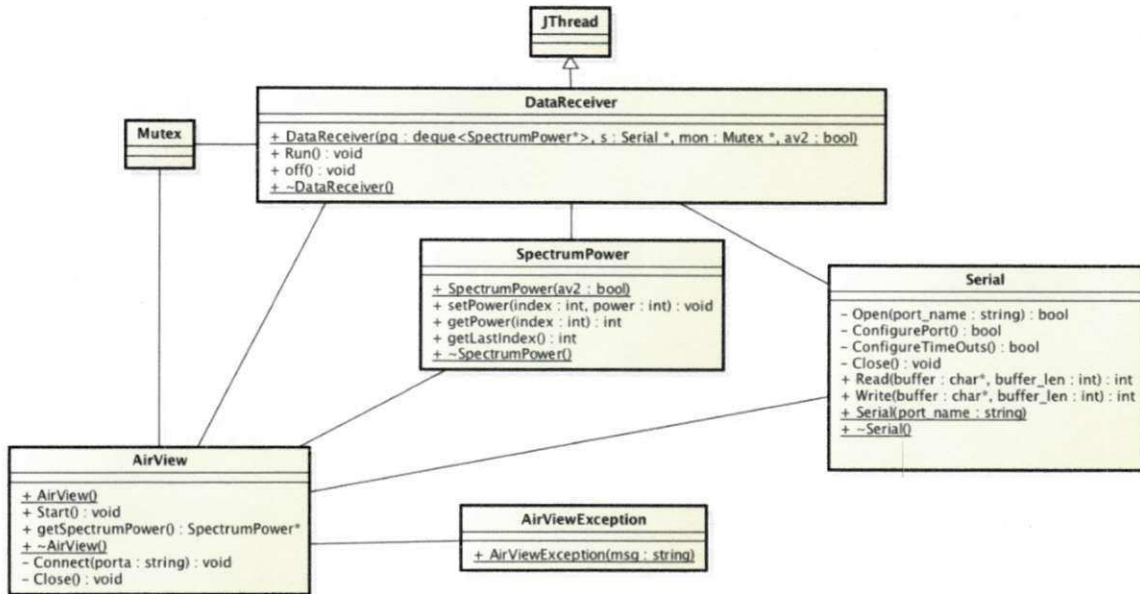


Figura A.1: Diagrama de classes do analisador de espectro.

está conectado. Após a criação do objeto, o método Start() é chamado. Esse método inicia a varredura a partir do Airview2/EXT e os valores das varreduras podem ser obtidos a partir do método getSpectrumPower().

Código Fonte A.1: Exemplo de código para obtenção de uma varredura do Airview2/EXT

```

...
SpectrumPower *sp = new SpectrumPower;
Airview *av = new Airview("COM5");
av->Start();
sp = av->getSpectrumPower();

for(int i = 0; i < 173; i++) {
    cout << sp->getPower(i) << endl;
}

delete av;
...

```