

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE E PROPOSTA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO
DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO REDES DE SENSORES SEM FIO**

Kim Moraes Mota

Wanessa de Alvarenga Silva

Brasília, agosto de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE E PROPOSTA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO
DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO REDES DE SENSORES SEM FIO**

Kim Moraes Mota

Wanessa de Alvarenga Silva

*Trabalho submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ugo Silva Dias, ENE/UnB

Orientador

Prof^a. Dra. Janaina Gonçalves Guimarães,

ENE/UnB

Examinador interno

Prof. Dr. Judson Braga, ENE/UnB

Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

MOTA, KIM MORAES

SILVA, WANESSA DE ALVARENGA

Análise e Proposta de Sistemas de Medição do Consumo de Energia Elétrica utilizando Redes de Sensores Sem Fio [Distrito Federal] 2013.

ix, 104p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Elétrica, 2013). Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Redes de Sensores Sem Fio | 2. Dispositivos de Medição |
| 3. Consumo de Energia Elétrica | 4. Sensores de corrente |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Mota, K. M. & Silva, W. A. (2013). Análise e Proposta de Sistemas de Medição do Consumo de Energia Elétrica utilizando Redes de Sensores Sem Fio. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação ENE 01/2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Kim Moraes Mota e Wanessa de Alvarenga Silva.

TÍTULO: Análise e Proposta de Sistemas de Medição do Consumo de Energia Elétrica utilizando Redes de Sensores Sem Fio.

GRAU: Bacharel

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. As autoras reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte pode ser reproduzida sem a autorização por escrito.

Kim Moraes Mota
Brasília - DF - Brasil

Wanessa de Alvarenga Silva
Brasília - DF - Brasil

Dedicatórias

Dedico este trabalho aos meus pais, aos quais busco honrar a cada passo, à minha família e a Deus, porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.

Kim Moraes Mota

Dedico este trabalho a todos que amo, em especial a Deus, aos meus pais, Artur e Elvira, aos meus irmãos, à vó Lucica, ao vô Juca (in memoriam), a toda minha família e aos meus amigos.

Wanessa de Alvarenga Silva

Agradecimentos

A Deus, à minha família, aos meus amigos e ao professor Ugo Silva Dias.

Kim Moraes Mota

Agradeço a Deus, aos meus pais, aos meus irmãos, ao professor Ugo, ao tio Evandro, à Shirley, à Lili, ao Yuri, à Kim e a todos meus amigos por tudo que fizeram e fazem por mim, pelo apoio, pelo suporte e pelo carinho.

Wanessa de Alvarenga Silva

RESUMO

Conscientes do benefício fornecido pelo conhecimento detalhado do estado das redes elétricas de potência e do consumo de energia elétrica, este trabalho fornece análises descritivas detalhadas a respeito de sistemas de comunicação sem fio, de redes de sensoriamento de dados e de dispositivos de medição do consumo de energia elétrica. Incorporadas às análises descritas, estão as caracterizações e as padronizações tecnológicas dos sistemas analisados.

Por conseguinte, este trabalho propõe a integração das tecnologias de comunicação sem fio e de medição de dados, a fim de desenvolver dois sistemas de sensoriamento de energia elétrica. Um sistema de medição utiliza um sensor de efeito Hall e o outro sistema utiliza um sensor de corrente que atua por efeito indutivo. Os dois sistemas de medição são implementados sob a tecnologia das Redes de Sensores sem Fio e possuem nós de sensoriamento concebidos pela plataforma Rádiumino; seus componentes são estudados e suas respectivas estruturas de apresentação de dados são apresentadas. A comprovação prática da eficiência, da funcionalidade e da contribuição tecnológica do sistema é obtida por meio dos resultados provenientes das experimentações laboratoriais.

Palavras-chave: Medidores elétricos, Consumo de energia elétrica, Redes de Sensores Sem Fio, Rádiumino.

ABSTRACT

Aware of the benefit provided by the detailed knowledge of power system's state and electricity consumption, this work provides descriptive analyzes regarding wireless communication systems, data sensing networks and devices for consumption measurement. Incorporated into the described analyzes, are the characterizations and the standards of technological analyzed systems.

Therefore, this work proposes the integration of wireless communication technologies and data measurement in order to develop two systems of electrical energy measurement. One of the measurement systems uses a Hall effect sensor and other uses a current sensor that operates by inductive effect. Both measurement systems are implemented using Wireless Sensor Network's technology and sensing nodes designed by RADIINO platform; components are studied and their data presentation structures are shown. The practical verification of efficiency, functionality and technological contribution of the system is obtained by means of the results from the laboratory experiments.

Keywords: Electric meters, Electric Energy Consumption, Wireless Sensor Networks, RADIINO.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Estado da Arte	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REDES DE SENSORES SEM FIO	8
2.1	Introdução	8
2.2	Tecnologia e Caracterização das Redes de Sensores Sem Fio	10
2.2.1	Tipos de Redes de Sensores	11
2.2.2	Topologias de Redes de Sensores	14
2.2.3	Formas de Transmissão das Redes de Sensores Sem Fio	16
2.3	Padronização das Redes de Sensores Sem Fio	17
2.3.1	O Padrão IEEE 802.15.4	18
2.3.2	O Padrão ZigBee	20
2.3.3	O Padrão IEEE 1451	21
2.3.4	Pilha de Protocolos para Redes de Sensores Sem Fio	23
2.4	Conclusão	24
3	SISTEMAS DE MEDIÇÃO ENERGÉTICA RESIDENCIAL	26
3.1	Introdução	26
3.2	Sistemas de Monitoramento de Energia Elétrica	27
3.2.1	Dispositivos de Medição	29
3.2.2	Medidores Inteligentes	32
3.2.3	Medidores de Energia Residenciais	33
3.2.4	Sistemas para Medição de Energia Consumida por Eletrodomésticos	38
3.3	Análise dos Sistemas de Medição de Energia	44
3.3.1	O Futuro dos Sistemas de Medição de Energia	45

3.4	Tarifação do Consumo de Energia Elétrica	47
3.5	Conclusão	48
4	PROPOSTA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDEN- CIAL	49
4.1	Introdução	49
4.2	Descrição do Sistema de Medição Energética.....	53
4.2.1	Sistema de Medição Energética com Sensor de Efeito Hall	57
4.2.2	Sistema de Medição Energética com Sensor de Corrente por Efeito Indutivo	65
4.2.3	Adaptabilidade e Configuração Física dos Sistemas de Medição	72
4.3	Conclusão	75
5	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	77
5.1	Introdução	77
5.2	Metodologia de Testes	77
5.2.1	Rede de Comunicação Sem Fio.....	77
5.2.2	Sistema de Medição de Energia.....	78
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	84
6.1	Conclusões e Contribuições	84
6.2	Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE FIGURAS

2.1	Configuração de uma rede infra-estruturada [1].....	12
2.2	Configuração de uma rede <i>ad hoc</i> [1].....	13
2.3	Topologia <i>ponto a ponto</i> [2].	14
2.4	Topologia barramento [2].....	15
2.5	Topologia anel [2].	15
2.6	Topologia estrela [2].	15
2.7	Topologia árvore [2].	16
2.8	Topologia <i>mesh</i> [2].....	16
2.9	Caracterização de redes quanto ao tráfego [1].....	17
2.10	Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4/ZigBee [3].....	18
2.11	Frequências de operação do IEEE 802.15.4 [1].....	20
2.12	Aplicações ZigBee.	21
2.13	Pilha de protocolos das RSSF [4].....	23
3.1	Sensor indutivo [5].	31
3.2	Sensor de efeito Hall [5].	32
3.3	Wattson [6].	34
3.4	Elite [7].	35
3.5	AlertMe [8].....	36
3.6	Sistema de Monitoramento Energético [9].	37
3.7	Sistema de medição de energia com rede ZigBee [10].	40
3.8	Plogg [11].	40
3.9	Power-Mate [12].....	41
3.10	Kill a Watt [13].....	42
3.11	Kill a Watt Graphic Timer [13].....	42
3.12	Power Meter [14].	43
3.13	Watts Up? [15].	44
3.14	EnergyMate [16].....	46
4.1	Proposta de um sistema de medição [17].	50

4.2	Plataforma Rádúino [18].	51
4.3	Sistemas propostos.	52
4.4	Módulo de comunicação BE900.	53
4.5	Módulo de sensoramento e de atuação.	54
4.6	Nós da rede.	55
4.7	Modelo da camada de protocolos.	56
4.8	Pacote de dados da plataforma Rádúino [18].	58
4.9	Comunicação por consultas.	59
4.10	Nó de borda com sensor de efeito Hall.	60
4.11	Sensor de efeito Hall LTA 50P/SP1.	61
4.12	Apresentação de dados do sistema com o sensor de efeito Hall.	65
4.13	Arquivo de armazenamento de dados do sistema com o sensor de efeito Hall.	66
4.14	Nó de borda com sensor de efeito indutivo.	67
4.15	Sensor de corrente SCT-013.	68
4.16	Esquemático do condicionamento.	69
4.17	Circuito de condicionamento.	69
4.18	Interface gráfica do programa HEM.	72
4.19	Arquivo de armazenamento de dados do programa HEM.	72
4.20	Acoplamento magnético entre o sensor de corrente e o condutor.	73
4.21	Acoplamento magnético entre o sensor de efeito Hall e o condutor.	73
4.22	Extensão elétrica.	74
4.23	Conexão do sensor em um quadro elétrico.	75
4.24	Configuração de medição dos sistemas.	75
5.1	Resultados do sistema de medição com sensor de efeito Hall.	82
5.2	Resultados do sistema de medição com sensor de efeito indutivo.	82
5.3	Visualização alternativa dos resultados do HEM.	83

LISTA DE TABELAS

4.1	Endereçamento dos nós da rede.....	56
5.1	Resultado das medições com sensor de efeito Hall.....	79
5.2	Resultados das medições com sensor de efeito indutivo.	80
5.3	Resultado das medições em aparelhos com sensor de efeito indutivo.	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

A	Amplitude	[V]
E	Energia elétrica	[kWh]
I	Corrente elétrica	[A]
P	Potência elétrica	[W]
R	Resistência elétrica	[Ω]
t	Tempo	[h]
v	Tensão elétrica	[V]
V	Tensão elétrica	[V]
x	Tensão elétrica	[V]

Subscritos

c	condicionada
i	i-ésima
N	n-ésima
$rede$	rede elétrica
ref	referência
RMS	RMS
s	sinal do sistema de medição

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HEM	<i>Home Energy Monitor</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
RF	Radiofrequência
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TEDS	<i>Transducer Electronic Data Sheets</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 ESTADO DA ARTE

Impulsionada pelas mais diversificadas fontes energéticas existentes, a sociedade atual desenvolveu-se sempre em busca de ferramentas que lhe proporcionassem maior conforto, segurança e estrutura para a continuidade do desenvolvimento tecnológico. Atualmente, as diversas fontes de fornecimento energético geram energia de diferentes naturezas, sendo esta convertida, convenientemente, para a forma elétrica a qual é transmitida e distribuída para uso do consumidor requisitante deste recurso.

Dada a importância dos recursos energéticos existentes, difundidos principalmente em natureza elétrica, todos os aspectos relativos ao monitoramento e ao controle do consumo da energia elétrica são indispensáveis para a garantia do uso energético eficiente. As pesquisas atuais para este setor da tecnologia têm crescido em prol do melhoramento e da eficiência do uso energético e em função da demanda imposta pelo mercado quanto ao uso racionado de energia. Vislumbrando o aspecto de crescimento da pesquisa voltada a este setor da tecnologia, a literatura apresenta uma proposta de um sistema para monitoramento detalhado do consumo de energia elétrica residencial utilizando redes de sensores ZigBee [1]. Esta proposta ilustra a possibilidade de se monitorar a energia consumida por diversos dispositivos demandantes de energia elétrica para seu funcionamento. Nota-se que a eficiência energética é uma questão tecnológica [9]. De fato, fornecer algum recurso que possibilite averiguar o gasto energético de cada aparelho elétrico garante que se escolham aparelhos mais eficientes energeticamente.

Com o monitoramento, os consumidores têm à sua disposição todo o registro histórico do seu consumo em qualquer instante [9]. A existência destes tipos de sistema de medição energética detalhada auxilia, dentre outros fatores, o avanço das Redes Inteligentes (*Smart Grids*), uma vez que esta tecnologia de Redes Inteligentes utiliza dados sobre o estado da rede e suas características para promover alterações, reparos ou alocações de recurso conforme a necessidade do sistema analisado.

O ambiente das Redes Inteligentes requer a atualização de ferramentas para detecção, sen-

sorimento e medição em todos os níveis da rede. Estes componentes irão fornecer os dados necessários para o monitoramento da rede e do mercado de energia. O sensoriamento oferece detecção de falha e fornece resposta, avalia a saúde dos equipamentos e a integridade da rede, oferece proteção contra roubo de energia e proporciona várias funções de controle da rede [19]. Isto ilustra que fatores importantes quanto ao avanço tecnológico dos sistemas elétricos de potência são dependentes das novas ferramentas de sensoriamento energético que têm sido propostas. A perspectiva para o futuro é de que estes sistemas de medição de energia residenciais, industriais e comerciais se interconectem com a rede de aferição e de controle da concessionária promovendo comunicação e troca de dados em tempo real.

Diante do contexto exposto, atrelado com a idealização da automação residencial, proposta primordialmente para trazer benefícios sócio-econômicos e conforto pessoal, sistemas de monitoramento, como os propostos em [1], [9] e [11], têm sido construídos para lidar com medições energéticas residenciais, possibilitando que a implementação das Redes Inteligentes sejam abastecidas com maior infra-estrutura tecnológica e estejam mais próximas da implementação em larga escala. Os sensores responsáveis por medir o consumo energético, os Medidores Inteligentes (*Smart meters*), têm duas funções: fornecer dados da energia utilizada pelo consumidor para auxiliar no controle do custo e do consumo energético; e enviar dados ao usuário para controle do fator de carga e prover a comunicação entre dispositivos integrantes da tecnologia [19].

Ao acompanhar a tecnologia das Redes Inteligentes, nota-se que a automação residencial também se favorece das propostas de efetivação da eficiência do consumo energético, sendo esta uma de suas vertentes de pesquisa. Desta maneira, o sensoriamento energético se mostra semelhantemente importante para garantir o controle e a observação da situação do consumo de energia residencial. No entanto, o monitoramento do consumo de eletricidade não pode ser considerado, por si só, uma medida responsável pela otimização do consumo de energia, pois o consumidor deve estar disposto a mudar o seu comportamento em função da informação fornecida [9].

De forma geral, a automação consiste de sistemas dotados de sensores que possibilitam o reconhecimento de algum elemento de interesse e a posterior atuação sobre o sistema. No caso da automação residencial, o diagnóstico energético é base para os demais atributos do sistema de automação. O conceito de residências inteligentes se refere ao aprimoramento do ambiente residencial, a fim de prover os meios necessários para que seus moradores possam desempenhar suas atividades diárias com maior qualidade [20].

A diversidade de sistemas de sensoriamento de energia elétrica existentes otimiza a implementação de plataformas de medição do consumo energético detalhado. A análise das técnicas de medição demonstra a convergência das formas de medição para sistemas de medição detalhada de energia.

A conscientização da importância da comunicação entre os sistemas de medição de consumo energético incentiva a utilização de redes de comunicação de dados. Independente da infraestrutura empregada para implementação das redes de comunicação de dados deve-se prezar pela eficiência, escalabilidade, custo de produção e consumo de energia. Prezando por estas características e cientes do uso dos sensores para sistemas de medição energética, as propostas mais recentes para a implementação de redes de comunicação de dados são as Redes de Sensores Sem Fio(RSSF). As redes variam muito e, dependendo das necessidades de cada aplicação, podem variar em relação à taxa de transmissão, topologia, mobilidade entre outros pontos [1].

As RSSF são uma tecnologia emergente que promete uma ampla gama de aplicações nas áreas civis e militares. Uma RSSF consiste tipicamente de um grande número de dispositivos, denominados nós sensores, de baixo custo e de baixo consumo energético, sendo multifuncionais e aplicáveis às regiões de interesse. Estes nós sensores são pequenos em tamanho, mas são equipados com sensores, microprocessadores e rádios transceptores. Desta forma, não são apenas dispositivos de sensoriamento, mas também de processamento de dados com capacidade de comunicação. Estes dispositivos se comunicam sobre curtas distâncias via meio de comunicação sem fio e colaboram para a realização de tarefas comuns [4].

A junção das ferramentas anteriormente analisadas intensifica a capacidade dos novos sistemas de medição de energia elétrica e cria condições para a inserção de diversas novas abordagens tecnológicas que contribuam com a continuidade e o desenvolvimento dos sistemas de medição do consumo de energia elétrica detalhado.

1.2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento dos recursos e de como estes são empregados é determinante para o desenvolvimento de tecnologias fundamentalmente dependentes destes recursos. A energia elétrica, que consiste no mais importante recurso empregado no desenvolvimento tecnológico e na principal

e mais difundida forma de distribuição energética atual é um recurso caro, atualmente insubstituível, que carece cada vez mais de ferramentas que forneçam o conhecimento do consumo detalhado deste recurso.

Apesar de existirem diversos dispositivos responsáveis pela medição do consumo energético, a tendência relativa a este setor é de que surjam formas de medição energética mais detalhadas. A disponibilização deste tipo de dispositivo para uso difuso possibilita que se aprimore a forma de reconhecimento do emprego da energia elétrica, o que favorece o desenvolvimento de tecnologias de geração distribuída de energia, uma vez que realizada a medição detalhada, o consumo energético de ambientes residenciais, comerciais ou industriais é determinado, e pode-se proceder uma alocação do recurso energético de forma específica, permitindo que uma das fontes de energia disponível seja alocada para fornecer o recurso energético sob demanda para os ambientes submetidos à tecnologia de medição energética detalhada.

O perfil de utilização da energia elétrica pode ser apresentado para o proprietário ou usuário de cada residência. Esta informação é bastante útil para que o consumidor verifique em qual equipamento o consumo é maior e, com isso, possa tomar alguma atitude para corrigir possíveis deficiências [1]. Esta forma de medição energética é útil como uma medida auxiliar da verificação do consumo, mas dentro dos padrões de medição atuais não substitui a medição taxativa do consumo energético.

Além do detalhamento da medição energética, a possibilidade de se aferir o consumo de energia de forma não invasiva contribui significativamente ao conceito de difusividade do dispositivo, uma vez que esta possibilidade de medição energética não exige conhecimento mais complexo de conexões elétricas e evita contato direto com tensões e correntes elétricas.

Das tecnologias que, eficientemente, proporcionam a construção de dispositivos que sejam capazes de realizar uma medição detalhada do consumo energético, as redes de sensores são candidatas vantajosas, de fácil manipulação e que fornecem dados de forma remota.

As redes de sensores representam uma parte da aplicação das tecnologias de telecomunicações amplamente utilizadas e com potencial de evolução tecnológica vasto e dinâmico. Devido à estas características positivas das redes de sensores, sua utilização não se restringe à alguma área específica, porém é adaptável à diversas situações de interesse que possuem características mensuráveis. Uma rede de sensores pode ser utilizada para uma infinita variedade de possíveis

soluções para automação e controle nas áreas residenciais, industriais, médica, militar, agrícola, dentre outras [1].

A disposição dos sensores em forma de rede, independente da topologia empregada, favorece o dinamismo das medições realizadas e o vislumbre e reconhecimento de um universo maior, relativo ao que se deseja sensoriar. Desta forma, a utilização de redes de sensores voltada a sistemas de medição de energia amplia o detalhamento da medição, tornando possível o reconhecimento do consumo energético de setores industriais, ambientes residenciais ou dispositivos que utilizam energia de natureza elétrica para seu funcionamento.

Para que o usuário doméstico possa controlar de forma eficiente o seu consumo de energia é necessário que o mesmo tenha fácil acesso às informações detalhadas relativas ao seu consumo [11].

Diante do exposto, o intuito a que se predispõe este estudo é o de promover a implementação de uma rede de medição de energia com caráter colaborativo aos sistemas de medição já existentes, a fim de tornar o reconhecimento do consumo energético mais detalhado e de fácil utilização.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Analisar o funcionamento das redes de sensores sem fio, bem como suas características de funcionamento aliadas aos seus padrões de comunicação;
- Avaliar através de um estudo detalhado o funcionamento dos sistemas de medição de energia elétrica existentes, explorando as possíveis análises comparativas e a eficiência destes sistemas;
- Explorar em detalhes os elementos de *hardware*, *software* e *firmware* úteis à construção de um sistema de sensoriamento de energia elétrica, por meio da disponibilidade e custo benefício, atrelados a um projeto de cunho acadêmico;
- Construir uma plataforma de medição de consumo de energia elétrica por meio de RSSF;

- Adequar as ferramentas de medição energética ao uso difundido, à simplicidade de implementação e à segurança dos usuários do sistema; permitindo que a visualização dos dados captados pelo sistema se apresente de forma clara, simples e eficiente;
- Obter resultados que concretizem a funcionalidade e a eficiência do sistema; e que mostrem a amplitude de seu potencial tecnológico visando avanços futuros.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos que buscam, individualmente, a consecução de objetivos específicos, mas, de forma conjunta, permitem que o objetivo apresentado anteriormente seja atingido.

Os Capítulos 2 e 3 tratam, essencialmente, da revisão bibliográfica do trabalho e foram elaborados em prol do fornecimento de informações úteis à compreensão completa do sistema proposto. No Capítulo 2, discute-se o estado da arte em RSSF, que é a tecnologia fundamental para a implementação dos objetivos propostos. Seu uso, suas aplicações atuais e suas formas de adaptabilidade em meio ao avanço tecnológico atual são apresentadas, uma vez que se encaixam adequadamente ao engajamento acadêmico do trabalho. As características tecnológicas que descrevem as RSSF, bem como sua padronização são expostas. O Capítulo 3 contextualiza os recentes avanços e as futuras perspectivas a respeito dos sistemas de medição energéticos, tratando de seu funcionamento e dos sistemas já existentes.

No Capítulo 4, são apresentados os materiais e métodos utilizados para a elaboração dos sistemas de medição de consumo energético detalhado propostos. Desta forma, este capítulo apresenta detalhadamente a descrição dos sistemas, seus funcionamentos e as ferramentas úteis à sua implementação. O projeto desenvolvido sob proposta acadêmica visa à elaboração de dois sistemas de medição detalhada do consumo energético, a priori, residencial; sendo este implementado sob a tecnologia de RSSF, a fim de promover o trânsito de informações e dados através de sinais de RF.

De posse de todo o embasamento teórico fornecido pelos capítulos prévios, o Capítulo 5 destina-se a descrever os resultados obtidos pelo sistemas propostos. Os resultados são detalhados conjuntamente com seus respectivos métodos de obtenção, de maneira que se possa avaliar

coerentemente a validade e a qualidade dos resultados obtidos pelos sistemas de medição energética. Idealiza-se que, até esta etapa de estudo, todos os conceitos relativos à análise dos sistemas expostos estejam estabelecidos.

Finalmente, o Capítulo 6 destina-se ao registro das conclusões finais do trabalho e das principais contribuições deste aos sistemas de medição atuais, e à indicação de sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros que acrescentem valor ao sistema explorado.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO

2.1 INTRODUÇÃO

Uma rede de sensores sem fio representa uma ferramenta tecnológica capaz de captar informações de alguma região de interesse e fornecer a transmissão dos dados captados para determinada parte do sistema, onde estes possam ser tratados de forma conveniente. Os elementos básicos destas redes são os nós de sensoriamento, comumente equipados com microprocessadores e rádios transceptores [4]. A comunicação sem fio entre os dispositivos de sensoriamento - nós, representa um dos principais e mais interessantes aspectos deste tipo de sistema. Estas características colaboram para a utilização das redes de sensores sem fio nas mais diversificadas situações.

A rede de sensores sem fio pode ser, então, bem definida como uma série de dispositivos independentes espalhados em uma determinada área que por meio de sensores estabelecem as medidas que devem ser entregues ou monitoradas. Todos os dispositivos se comunicam com um dispositivo central que permite que os dados monitorados sejam armazenados, analisados, processados, etc. [1]. Conforme Zambianco [1], a viabilidade das redes de sensores sem fio se baseia na otimização das seguintes características:

- **Tolerância à falha:** Por serem de baixo custo, há risco de problemas devido à própria confiabilidade dos dispositivos. Dessa forma, o sistema deve suportar problemas como falta de energia, a falta de visibilidade de nós ou ainda danos físicos, fazendo com que a rede seja capaz de se auto reconfigurar e continuar funcionando mesmo com a perda de alguns nós.
- **Escalabilidade:** O fato de os nós serem de baixo custo, de tamanho reduzido e possuírem pouca capacidade de processamento contribui para a formação de redes com uma escala muito alta, muito densa. Conseqüentemente, deve-se ter um alto grau de redundância na transmissão de dados; entretanto, isso pode ser um problema se considerarmos que quanto mais dados trafegam, maior é a energia gasta. Dessa forma, a agregação dos dados é uma tarefa muito importante para regiões da rede que possam diminuir esse tráfego, dada a redundância de sinais.

- **Custo de produção:** Como foi dito anteriormente, a tendência de se ter um grande número de nós é muito grande; desta forma, o custo de cada nó deve ser o menor possível para que seja viável sua instalação, comparada com uma rede de sensores com fio tradicional.
- **Consumo de energia:** Esse é outro fator de muita importância, pois nem todos os sensores possuem uma fonte de alimentação; portanto, a economia de energia deve ser levada em consideração para aplicações nas quais a alimentação dos sensores se dá por meio de baterias.

A adequação destas características das redes de sensores a sistemas de medição de energia promovem a eficácia e a elevação da relação custo benefício deste tipo de sistema.

As RSSF têm uma ampla gama de aplicações. De acordo com esta visão, as RSSF estão lentamente se tornando parte integrante de nossas vidas. Recentemente, uma quantidade considerável de esforços de pesquisa tem viabilizado a implantação real de redes de sensores adaptadas às necessidades específicas de determinados tipos de detecção e de aplicações de monitoramento.

Para a realização das aplicações existentes e potenciais das RSSF, protocolos de comunicação sofisticados e extremamente eficientes são necessários. As RSSF são compostas de um grande número de nós de sensoriamento, que são densamente implantados no interior de um fenômeno físico ou muito próximo a ele. A fim de permitir a observação confiável e eficiente e para iniciar as ações corretas, características físicas do fenômeno devem ser detectadas/estimadas de maneira confiável a partir da informação fornecida pelo conjunto dos nós sensores. Além disso, em vez de enviar os dados brutos para os nós responsáveis pela fusão, nós sensores usam suas capacidades de processamento para realizar localmente cálculos simples e transmitir apenas os dados necessários e parcialmente processados. Assim, essas propriedades das RSSF apresentam desafios únicos para o desenvolvimento de protocolos de comunicação [21].

As propriedades intrínsecas dos nós de sensoriamento representam desafios adicionais para os protocolos de comunicação em termos de consumo de energia; portanto, enquanto as redes de obtenção de dados tradicionais são projetadas para melhorar as métricas de desempenho, como produtividade e atraso, os protocolos das RSSF se concentram principalmente na economia de energia. O nível desta concentração de esforços, entretanto, varia conforme a aplicação da rede. Outro fator responsável por requisitar atenção e esforços por parte do desenvolvimento de protocolos adequados é a organização física dos nós e os caminhos a serem percorridos pelos dados em

adequação à disposição dos sensores. A posição dos nós de sensoriamento não necessita de pré-determinação. Isso permite a implantação aleatória em terrenos de difícil acesso ou de operações de socorro. Por outro lado, essa implantação aleatória requer o desenvolvimento de protocolos de auto-organização para a pilha de protocolos de comunicação. Além da alocação dos nós, a densidade da rede também é explorada em protocolos das RSSF, esta característica das redes de sensoriamento é determinante para o seu desempenho. Devido à grande quantidade de transmissões curtas, um grande número de nós sensores implantados podem afetar o desempenho do tráfego da rede. As propostas de formas de implementação da comunicação são variadas, visando o fornecimento de uma gama de protocolos de comunicação que se adéquem aos mais diversos cenários.

Há propostas de comunicação por meio de múltiplos saltos (*multi-hop*), predominantemente exploradas na comunicação entre nós de redes que exijam consumo de energia menos elevado, uma vez que este tipo de tráfego de comunicação leva a um menor consumo de energia do que a comunicação tradicional de único salto (*hop*). Além disso, a implantação densa dos nós juntamente com as propriedades físicas do fenômeno detectado introduzem a correlação em domínios espaciais e temporais. Como resultado disto, os protocolos baseados em correlação espaço-temporais surgiram para melhorar a eficiência em redes de sensores sem fio [21].

2.2 TECNOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE SENSO-RES SEM FIO

Nós sensores, também conhecidos pela denominação inglesa *motés*, são os componentes básicos das redes de sensores sem fio. O conceito de *motés* nasceu junto ao projeto denominado *Smart Dust*, que descreve uma rede hipotética formada por dispositivos do tamanho de um grão de areia, capazes de atuar e coletar dados sobre o meio em que estão presentes. Estes nós são dispostos sobre o ambiente de estudo, de forma a serem capazes de monitorar os fenômenos que acontecem no local onde estão. Os *motés* podem ser definidos como computadores extremamente básicos, comumente compostos por quatro partes; sendo estas partes básicas, distribuídas e nomeadas como unidades, conforme a seguir [22].

- Unidade de sensoriamento;

- Unidade de processamento;
- Unidade transceptora;
- Unidade de energia.

Além destas, podem ser encontradas unidades adicionais dependentes de aplicação. A unidade de sensoriamento é geralmente formada por outras duas sub-unidades: sensores e conversores analógicos digitais, cabendo a estes medir a grandeza de um fenômeno físico e converter a leitura em um valor digital. Desta forma, é possível utilizar na unidade processadora as informações convertidas. À unidade processadora, programável conforme a aplicação da RSSF e que costuma estar associada a uma pequena unidade de armazenamento, cabe a tarefa de comunicar e colaborar, por meio da unidade transceptora, com os outros nós sensores, de forma a cumprir as tarefas incumbidas. A unidade de energia é responsável por fornecer corrente elétrica para todo o sistema [22].

Este padrão de organização das unidades constituintes dos nós de sensoriamento apresenta conformidade com o padrão de construção de sistemas de medição típicos, o que nos permite observar que as unidades de sensoriamento, os nós, dispõem de todas as características físicas necessárias para a estruturação de um sistema de medição adequado e padronizado.

2.2.1 Tipos de Redes de Sensores

Após o aperfeiçoamento das arquiteturas de rede, existem basicamente dois tipos de redes móveis sem fio: infra-estruturadas e *ad hoc* [1]. As redes infra-estruturadas utilizam uma configuração de arquitetura de rede em que o dispositivo móvel está sempre em contato direto com um ponto de acesso, o qual está ligado a uma rede fixa [1]. Quanto à rede *ad hoc*, a noção mais difundida é a de uma rede formada sem uma central administradora que consiste de nós móveis que usam interface sem fio para enviar pacotes de dados em múltiplos saltos, tendo ou não acesso à internet; desta forma, todos os nós se comunicam entre si.

A diferença entre os dois tipos de redes móveis se dá mais notadamente pela configuração física das conexões de comunicação da rede; apesar de existirem outras diferenças entre os tipos de redes. A rede infra-estruturada possui uma arquitetura padronizada de comunicação, com uma central coordenadora da rede, pela qual passam os dados coletados pelos demais dispositivos da

rede, como é ilustrado na Figura 2.1, a seguir.

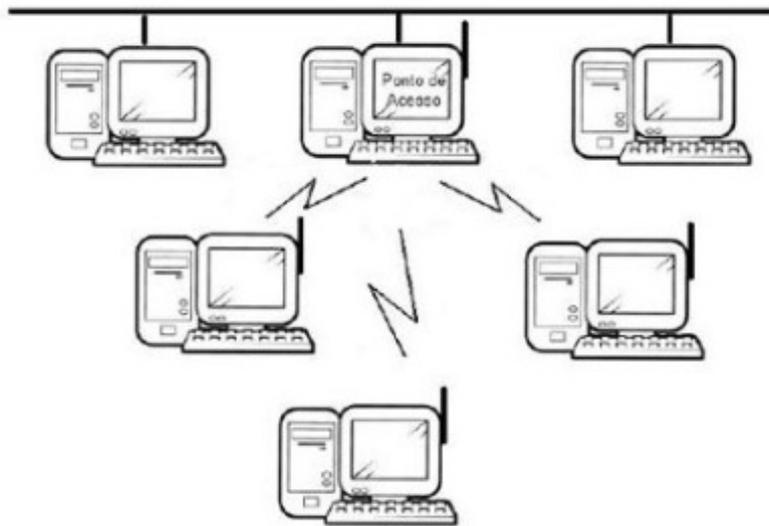


Figura 2.1: Configuração de uma rede infra-estruturada [1].

As redes *ad hoc*, possuem ainda uma estrutura de comunicação que permite que todos os nós da rede se comuniquem entre si, sem uma central de processamento específica. As rotas de tráfego de dados são convenientemente alteradas, conforme a necessidade e a disposição dos nós da rede. A Figura 2.2 ilustra a configuração desta rede.

A existência destes dois tipos de rede permite que haja opções de estrutura diferentes para a implementação de redes de sensores sem fio. Cada rede, possuidora de diferentes características, adequa-se melhor a situações de sensoriamento distintas. Redes infra-estruturadas e redes *ad hoc* são passíveis de comparações, em prol da elaboração de um mapa comparativo entre as vantagens e desvantagens de cada conceito tecnológico intrínseco a cada tipo de rede. Assim, citam-se a seguir as vantagens e desvantagens de cada tipo de rede:

- **Instalação:** As redes *ad hoc* por serem dinâmicas e caracterizadas pela não necessidade de alto padrão de estrutura de instalação são um tipo de rede que apresentam vantagens quanto à rapidez da instalação do sistema em relação aos sistemas infra-estruturados, que por sua vez exigem um alto padrão de planejamento de estrutura, que garanta seu bom funcionamento;
- **Mobilidade:** Os nós de sensoriamento podem apresentar mobilidade se inseridos em redes *ad hoc*, sem a necessidade de se reconfigurar toda a rede por parte do instalador mediante

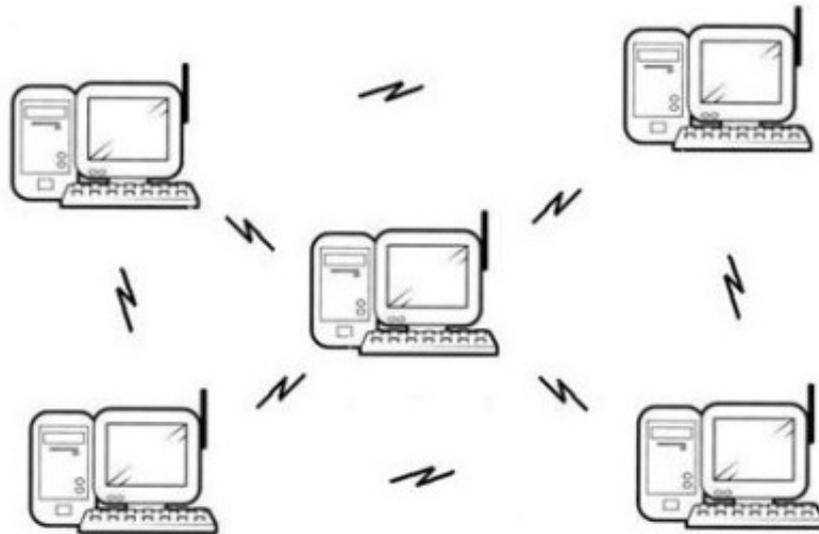


Figura 2.2: Configuração de uma rede *ad hoc* [1].

alguma alteração de posicionamento dos nós, sendo assim a própria rede se encarrega de estabelecer as conexões entre os nós da rede; enquanto os mesmos dispositivos de sensoriamento possuem pouca ou nenhuma mobilidade em redes infra-estruturadas. Estas características, que distinguem as duas situações apresentadas pelas redes, devem ser comparadas qualitativamente a luz da situação que demanda a rede; somente a situação do sistema de sensoriamento pode qualificar entre vantajosa ou não a utilização de cada tipo de rede.

- **Conectividade:** Em redes infra-estruturadas, conforme [1], os nós possuem conectividade restrita, uma vez que nem todos os nós podem comunicar-se entre si, estando a comunicação restrita entre os nós de sensoriamento e o ponto de processamento central. Nas redes *ad hoc*, entretanto, quaisquer dois nós podem se comunicar, havendo apenas a necessidade de estarem um ao alcance do outro. Neste aspecto, as redes *ad hoc* apresentam-se vantajosas em relação às redes infra-estruturadas.
- **Roteamento:** Por ser uma rede predominantemente estática, a rede infra-estruturada possui algoritmos de roteamento mais simples e fáceis de implementar, por outro lado, para as redes *ad hoc* possuírem a mobilidade dos pontos da rede e uma topologia completamente dinâmica, são necessários algoritmos de roteamento mais complexos que acabam aumentando o consumo dos dispositivos e principalmente o consumo de memória para alocação das tabelas de roteamento [1].

- **Localização:** Quanto à localização dos dispositivos de sensoriamento, nota-se claramente que a localização dos nós em redes *ad hoc* é imprevisível, apesar de, atualmente, sistemas de GPS estarem sendo utilizados, o que torna o sistema mais caro; situação que difere das redes com estrutura pré-definida, nas quais a localização dos nós é bem definida, o que favorece o conhecimento do sistema de sensoriamento.

2.2.2 Topologias de Redes de Sensores

A topologia das RSSF é fundamental para se conhecer a forma em que o tráfego de dados ou informações acontece dentro da rede. Conseqüentemente, qualquer mudança na topologia da rede terá influência nos caminhos de comunicação (ou rotas) entre os sensores [4]. As topologias comumente utilizadas na disposição física das redes de sensores são [2]:

- **Ponto a ponto:** Topologia mais simples, onde os dispositivos estão conectados em pares de comunicação, trocando informações entre si. A topologia é ilustrada com o uso de dois dispositivos conforme a Figura 2.3;

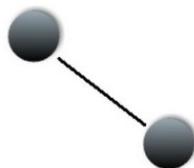


Figura 2.3: Topologia *ponto a ponto* [2].

- **Barramento:** Esta topologia utiliza uma conexão física única entre todos os dispositivos da rede [1]. Desta forma, sempre um dispositivo por vez pode se comunicar no barramento e todos os outros pontos recebem a informação enviada, tornando a rede ocupada toda vez que um dispositivo envia uma informação. É muito utilizada em redes Ethernet mais antigas com cabo coaxial. A Figura 2.4 ilustra esta topologia de rede.
- **Anel:** Nesta topologia de rede, as conexões são feitas em série, tendo, portanto, um circuito fechado no formato de um anel, conforme a Figura 2.5. Desta forma, o tráfego de dados é transmitido em apenas uma direção, passando por nós vizinhos até chegar ao seu destino. Esta topologia é normalmente utilizada em enlaces de fibra óptica.

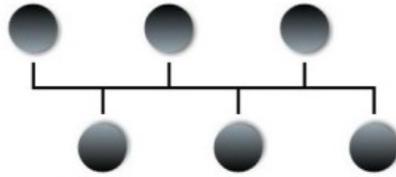


Figura 2.4: Topologia barramento [2].

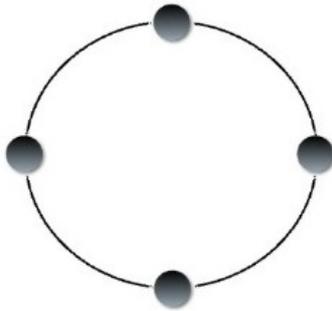


Figura 2.5: Topologia anel [2].

- **Estrela:** A topologia estrela é uma das mais utilizadas atualmente. Esta topologia consiste em um concentrador, ou central, definido como o ponto de rede onde toda informação é enviada ou recebida. Esta central tem a função de reenviar os dados para todos os dispositivos se comunicarem [2]. Muito utilizada em pequenas redes residenciais ou em pequenos escritórios. Esta topologia está ilustrada na Figura 2.6.

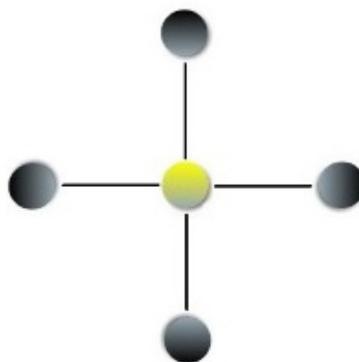


Figura 2.6: Topologia estrela [2].

- **Árvore:** Esta topologia pode ser descrita como ramificações de uma árvore genealógica,

onde há uma descendência e uma raiz [1]. Assim, redes implementadas em topologia em árvore, Figura 2.7, podem se tornar muito grandes com diversas ramificações e, por consequência, passam a requisitar padrões de comunicação mais complexos, conforme [2].

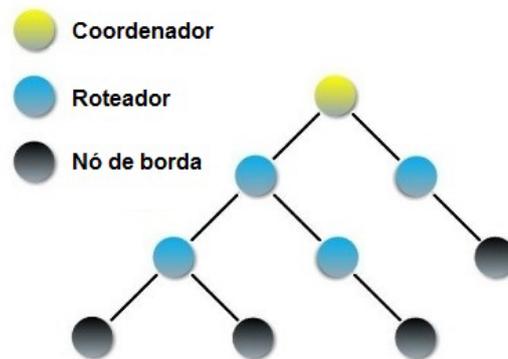


Figura 2.7: Topologia árvore [2].

- **Mesh:** Esta é uma das configurações mais utilizadas, pois é uma junção da topologia Árvore e Estrela. A grande vantagem da topologia *Mesh* é a utilização de dispositivos que atuam como repetidores para ampliar a área de cobertura. Esta topologia é exemplificada por meio da Figura 2.8.

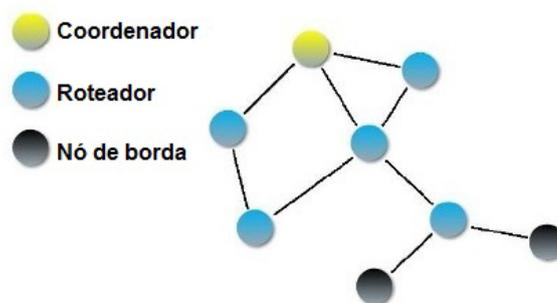


Figura 2.8: Topologia *mesh* [2].

2.2.3 Formas de Transmissão das Redes de Sensores Sem Fio

De maneira igualmente importante às características dos sistemas de comunicação descritas anteriormente, a transmissão de dados e informações dos sistemas de comunicação, de forma geral, podem ter atribuídas a si, as seguintes definições quanto ao tráfego de informações:

- **Simplex:** é o tipo de ligação onde dados apenas circulam em um sentido, indo do emissor ao receptor. Normalmente utilizado quando não se tem a necessidade de dados trafegando nos dois sentidos como, por exemplo, uma impressão sendo enviada de um computador para uma impressora.
- **Half Duplex:** é o tipo de ligação onde os dados circulam nos dois sentidos, mas não os dois simultaneamente; sendo cada extremidade da ligação transmitindo por vez. Normalmente utilizada em conexões onde a taxa de comunicação é baixa e um comando pode esperar a ser processado como, por exemplo, rádios *Push-To-Talk*.
- **Full Duplex:** é o tipo de ligação onde os dados circulam nos dois sentidos e simultaneamente. Desta forma, cada extremidade da transmissão pode emitir e receber dados ao mesmo tempo. Podemos citar o caso de telefones celulares como exemplo.

A Figura 2.9 ilustra os padrões de tráfego característicos de cada definição dada anteriormente.

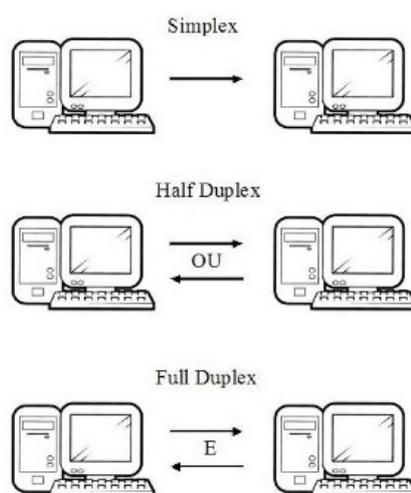


Figura 2.9: Caracterização de redes quanto ao tráfego [1].

2.3 PADRONIZAÇÃO DAS REDES DE SENSORES SEM FIO

Para facilitar o desenvolvimento e a aplicação universais de redes de sensores sem fio, existe necessidade de se construir um grande mercado de baixo custo para os produtos relativos às RSSF

[4]. Para isso, é importante especificar as normas pertinentes para que os produtos de sensoria-
 mento de diferentes fabricantes possam interagir. Uma série de esforços foi feita e estão em curso
 em muitas organizações de normalização, a fim de unificar o mercado, levando a baixo custo e a
 interoperabilidade dos dispositivos, e evitar a proliferação de sistemas de rede incompatíveis com
 os protocolos padrões. Em certa medida, o sucesso de RSSF como uma tecnologia em grande
 parte depende do sucesso desses esforços de normalização.

A padronização desta tecnologia de comunicação é atualmente realizada pelo órgão de pa-
 dronização do IEEE e pela aliança ZigBee, conforme a distribuição de padronização por camada
 especificada na Figura 2.10, a seguir.

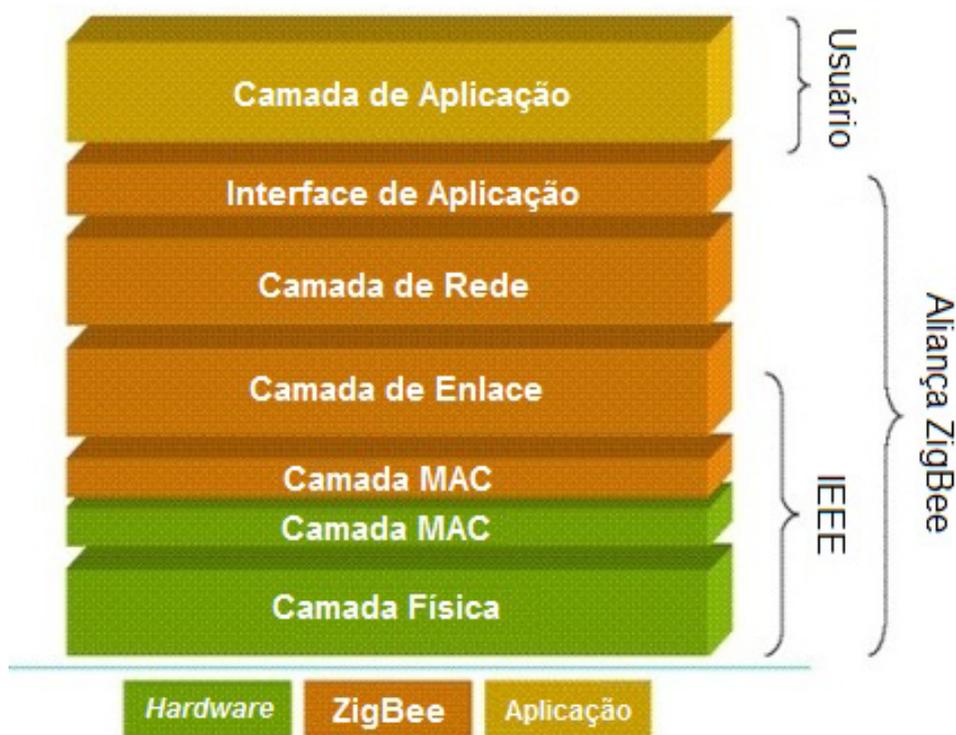


Figura 2.10: Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4/ZigBee [3].

2.3.1 O Padrão IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é um padrão desenvolvido pelo IEEE 802.15 Task Group 4, que especifica a
 padronização das camadas física e MAC para WPANs de taxas de transmissão baixas. Como de-
 finido no seu pedido de autorização de um projeto, o objetivo do grupo é fornecer um padrão para

sistemas de baixa complexidade, custo, consumo de energia e baixa taxa de dados entre dispositivos de baixo custo [4]. O primeiro padrão IEEE 802.15.4 foi entregue em 2003 e é distribuído gratuitamente. Esta versão foi revista em 2006, mas a nova versão ainda não é distribuída gratuitamente. Sua pilha de protocolos é simples e flexível, e não necessita de qualquer infra-estrutura. O padrão tem as seguintes características [4]:

- Taxas de dados de 250 kbps, 40 kbps e 20 kbps.
- Dois modos de endereçamento: modelo curto: 16 bits; e de 64 bits.
- Suporte para dispositivos de latência críticas, por exemplo, joysticks.
- Acesso de canal por CSMA-CA.
- Estabelecimento de rede automática pelo coordenador.
- Protocolo totalmente implementado com *handshaking* para a confiabilidade de transferência.
- Gestão para garantir baixo consumo de energia.
- 16 canais na banda de 2,4 GHz - ISM, 10 canais na banda de 915 MHz e um canal na banda de 868 - MHz.

A camada física do padrão IEEE 802.15.4 foi especificada para coexistir com outros padrões IEEE para redes sem fio, por exemplo, IEEE 802.11 (WLAN) e IEEE 802.15.1 (Bluetooth). Possui ativação e desativação do transceptor de rádio e transmissão de pacotes no meio físico. Atua em uma das três seguintes bandas de licença livre, [4]:

- 868-868,6 MHz, com uma taxa de dados de 20 kbps.
- 902-928 MHz, com uma taxa de dados de 40 kbps.
- 2400-2483,5 MHz, com uma taxa de 250 kbps de dados.

A Figura 2.11, a seguir, ilustra as bandas de utilização e seus respectivos canais para a comunicação sem fio, segundo o padrão IEEE 802.15.4.

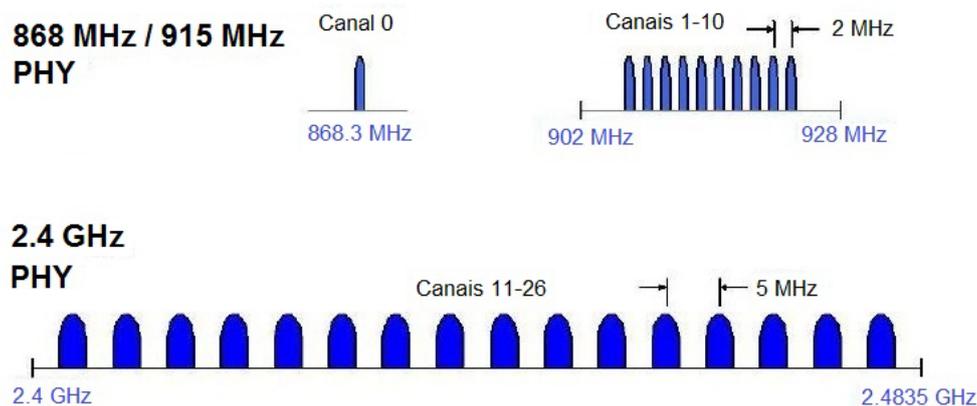


Figura 2.11: Frequências de operação do IEEE 802.15.4 [1].

A camada MAC fornece o gerenciamento de serviços para as camadas superiores. O serviço permite a transmissão de dados e de recepção de pacotes MAC por meio da camada física. Os serviços de gestão incluem a sincronização, o gerenciamento de intervalo de tempo, e de associação e dissociação de dispositivos à rede. Além disso, a camada MAC tem como função implementar mecanismos básicos de segurança, desta forma, os protocolos padronizadores da camada de enlace definem as regras que proporcionam que o acesso ao meio de comunicação dos nós se dê de maneira ordenada e eficiente.

2.3.2 O Padrão ZigBee

Conforme [4], o padrão IEEE 802.15.4 só define os protocolos das camadas física e MAC sem especificar as camadas de protocolo superiores, incluindo camadas de rede e de aplicação. O padrão ZigBee é desenvolvido na parte superior das camadas do modelo TCP/IP, definindo os protocolos das camadas de rede e de aplicação, conforme a necessidade. A camada de rede fornece funcionalidades de rede para diferentes topologias de rede, e a camada de aplicação fornece um *framework* para desenvolvimento de aplicações distribuídas e de comunicação. As duas pilhas de protocolos podem ser combinadas para dar suporte à comunicação sem fio de curto alcance e de baixa taxa de transmissão de dados. As aplicações potenciais dessas normas incluem sensores, brinquedos interativos, etiquetas inteligentes, controles remotos e automação residencial.

A pilha do protocolo ZigBee foi proposto no final de 2004 pela Aliança ZigBee, uma associação de empresas trabalhando em conjunto para permitir que, o custo, a confiança, a eficácia e

o baixo consumo de energia em rede sem fios de monitoramento e controle de produtos tenham base em uma padronização global aberta. O primeiro lançamento do ZigBee foi revisto no final de 2006, que introduz extensões na padronização.

A Aliança ZigBee é uma organização criada com a missão de desenvolver produtos com a plataforma ZigBee a nível global, sendo então responsável também por controlar e monitorar os produtos lançados no mercado. Ela também tem o dever de certificar e de verificar a conformidade de produtos ZigBee. Atualmente, empresas como Ember, Freescale, Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips, Samsung e mais de 120 empresas fazem parte da Aliança ZigBee. Desta maneira, a tecnologia ZigBee veio não apenas para atender um setor específico de mercado, mas sim para aplicações industriais, comerciais, residenciais e qualquer tipo de aplicação que envolva controle, monitoração e automação [1], conforme a Figura 2.12.

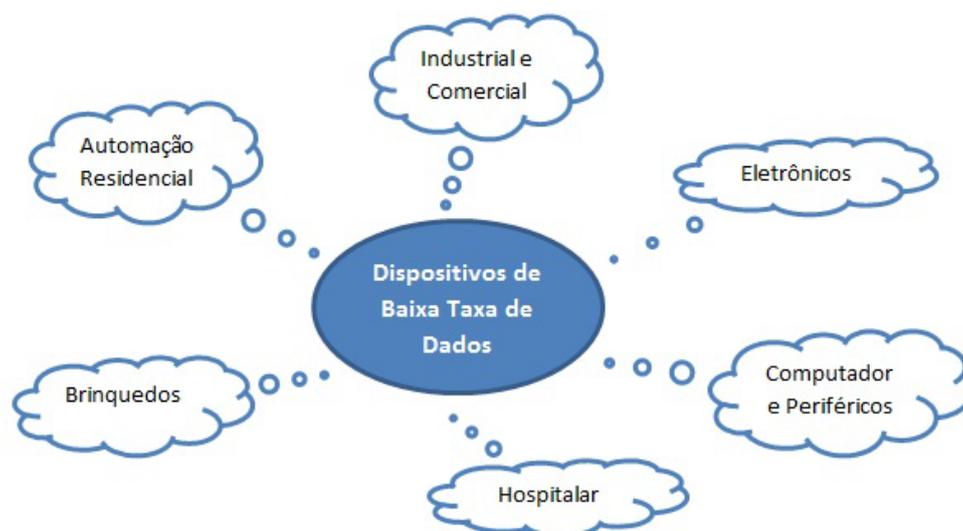


Figura 2.12: Aplicações ZigBee.

2.3.3 O Padrão IEEE 1451

A IEEE 1451 segundo [4] é uma família de padrões que define e descreve interfaces para a conexão de transdutores (sensores ou atuadores) inteligentes, comuns, com interfaces de comunicação independentes para conexão de transdutores (ou seja, sensores ou atuadores) para microprocessadores, sistemas de instrumentação e controle. Transdutores têm uma grande variedade de aplicações na indústria; por exemplo, fabricação, controle industrial, automotivo, aeroespacial,

construção e biomedicina. Como o mercado de transdutores é muito diversificado, os fabricantes de transdutores estão buscando maneiras de construir dispositivos inteligentes de baixo custo, em redes com fio e sem fio. Portanto, um conjunto de padrões abertos que são universalmente aceitos, por exemplo, o conjunto IEEE 1451 de inteligentes padrões de interface do transdutor são desenvolvidos para abordar estas questões.

A principal característica destas normas é a definição do *Transducer Electronic Data Sheets* (TEDS), que é uma estrutura de memória ligada a um transdutor para armazenar a identificação, calibração, correção de dados, faixa de medição, informações relacionadas ao fabricante do transdutor. O objetivo do conjunto IEEE 1451 é tornar mais fácil para os fabricantes de transdutores desenvolverem dispositivos inteligentes e interface destes dispositivos para redes, sistemas e instrumentos, incorporando sensores já existentes e tecnologias de rede emergentes. Em outras palavras, o objetivo destas normas se traduz em permitir acesso de dados dos transdutores por meio de um conjunto comum de interfaces nas quais transdutores estão ligados a sistemas de redes com ou sem fio [4].

As RSSF são atualmente um dos principais temas da área tecnológica, apesar de haverem distintas soluções e plataformas para tais, por meio da padronização introduzida pela IEEE 1451, mais especificamente os padrões 1451.0 e 1451.5, é possível integrar diferentes redes, formadas por diferentes *motes* e tecnologias de comunicação sem fio, permitindo a configuração automática e compreensão das leituras coletadas; uma vez que estes nós tenham se conectado ao sistema [22].

De forma conclusiva, mesmo se tratando de um padrão extremamente complexo, as características oferecidas pelas normas pertencentes ao IEEE 1451 trazem diversas vantagens e melhorias quando utilizadas juntamente com as RSSF [22]. A adição de novos nós sensores torna-se um processo fácil e automático, visto que um novo nó pode ser colocado em funcionamento apenas ligando-o à rede, permitindo, assim, uma expansão rápida e eficiente de redes existentes. Assim, a existência de um conjunto padronizado de interfaces, estruturas e formatos de comunicação, tornou possível manter interoperabilidade entre os diferentes *motes* utilizados e que o sistema pudesse reconhecer e trabalhar com novos sensores de maneira ágil.

Independente do tipo de rede móvel que possa ser utilizada para a captação de grandezas de interesse em um sistema, a padronização das formas com as quais o sistema se comunica permite que haja maior eficiência e adaptação a todos os sistemas de medição atuais.

2.3.4 Pilha de Protocolos para Redes de Sensores Sem Fio

A pilha de protocolos para RSSF consiste em cinco camadas de protocolo: a camada física, de enlace de dados, de rede, de transporte, e a camada de aplicação, como mostrado na Figura 2.13. A camada de aplicação contém uma variedade de protocolos de aplicação para gerar variadas aplicações de rede de sensores. A camada de transporte é responsável pela entrega confiável de dados exigida pela camada de aplicação. A camada de rede é responsável pelo encaminhamento dos dados a partir da camada de transporte. A camada de enlace de dados é o principal responsável pela multiplexação de dados de fluxo, transmissão de quadros de dados e recepção, acesso ao meio e controle de erro. A camada física é responsável pela transmissão e recepção do sinal através de um meio de comunicação físico, incluindo a geração de frequência, a modulação do sinal, a transmissão e recepção, codificação de dados e assim por diante [4].

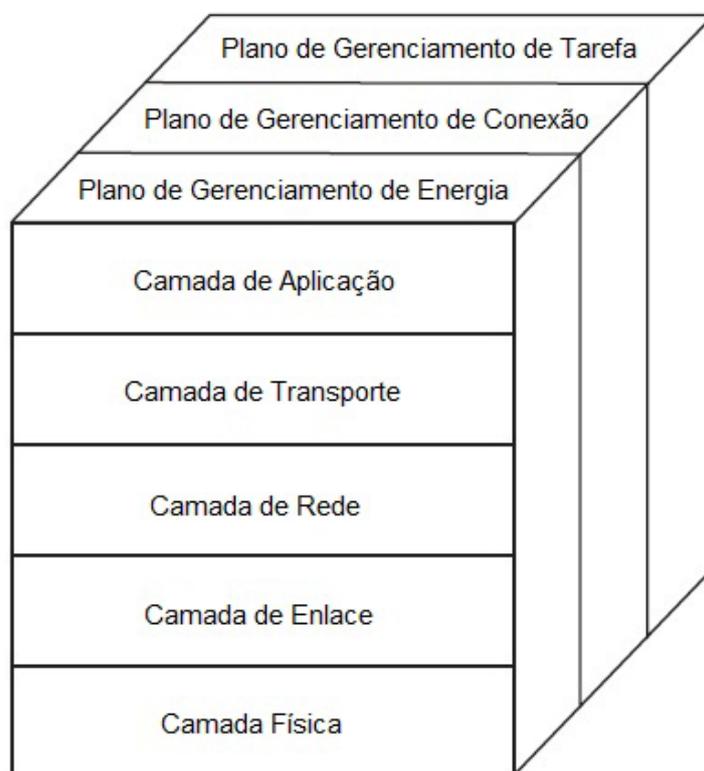


Figura 2.13: Pilha de protocolos das RSSF [4].

Uma importante característica da pilha de protocolos das RSSF é notada por meio da observação da Figura 2.13, mostrada anteriormente. Todas as cinco camadas de protocolo descritas anteriormente compartilham os objetivos de planejar e gerenciar eficientemente a alimentação e

o consumo energético, as conexões e as tarefas da rede de sensoriamento. Desta maneira, todas as etapas do projeto de uma rede de sensores sem fio devem contribuir para a eficiência e a adequação do sistema a todo o propósito de baixo consumo energético.

Dada a importância do recurso energético para a maioria das redes de sensores atualmente, a tendência dos protocolos voltados para padronizar o funcionamento das RSSF é que todas as camadas incluam em seus objetivos a função de tornar o uso dos recursos cada vez mais eficientes. Por exemplo, na camada MAC, um nó de sensoriamento pode desligar o respectivo transceptor quando não há dados para transmitir e receber. Na camada de rede, um nó sensor pode selecionar um nó vizinho com mais energia residual como o seu próximo salto para efetivação de transmissão. O plano de gestão de conexão é responsável pela configuração e reconfiguração dos nós de sensoriamento para estabelecer e manter a conectividade de uma rede; no caso da implantação de um nó, a falha de nó, a movimentação do nó, e assim por diante. O plano de gerenciamento de tarefas é responsável pela distribuição de tarefas entre os nós sensores em uma região de detecção, a fim de melhorar a eficiência energética e prolongar tempo de vida da rede. Uma vez que os nós sensores são geralmente implantados de forma densa numa região de detecção e são redundantes para a realização de uma tarefa de detecção; nem todos os nós sensores da região de detecção são necessários para executar a mesma tarefa de detecção. Por isso, um mecanismo de gestão de tarefas pode ser usado para realizar a distribuição de tarefas entre múltiplos sensores [4].

2.4 CONCLUSÃO

O capítulo em análise possibilitou a exposição da teoria que embasa a tecnologia das redes de sensores sem fio. A importância da tecnologia, seus fundamentos e sua incorporação ao cenário tecnológico atual, como citado, demonstram o crescimento e o desenvolvimento da tecnologia das redes de sensores atualmente.

As características mais importantes e influentes em todos os projetos de RSSF foram contempladas, tendo sido feitas análises detalhadas das redes de comunicação quanto às suas características de conexão, transferência de dados, alcance, topologia e padronização tecnológica. O cerne da análise das redes de sensoriamento é o embasamento conceitual que auxilia a implementação de um sistema de sensoriamento energético.

De posse dos conceitos relativos às redes de comunicação, o foco do presente estudo volta-se à análise dos sistemas de medição de consumo energético atuais e a possibilidade de incorporá-los às redes de sensores sem fio.

3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO ENERGÉTICA RESIDENCIAL

3.1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos energéticos é um dos principais problemas enfrentados pela sociedade moderna [23]. Por essa razão, cada vez mais sistemas de medição energética têm sido construídos. A intenção da melhoria de todos os recursos tecnológicos referentes à medição do consumo de energia elétrica se deve ao crescente desejo e à necessidade de o mundo moderno consumir energia de maneira mais eficiente.

A participação ativa dos consumidores na gestão de seus gastos é de fundamental importância para a redução dos impactos ambientais provocados pela produção de energia elétrica [11]. Para que isso seja possível, os consumidores precisam de informações detalhadas sobre o seu consumo de energia. As Redes Inteligentes, juntamente com os Medidores Inteligentes, possibilitam um maior controle aos usuários domésticos sobre o uso da energia, constituindo um importante fator no processo de redução do consumo energético.

O papel das Redes Inteligentes consiste fundamentalmente em tornar os sistemas elétricos mundiais adaptados às variações de demanda energética atuais, possibilitando a melhor utilização dos recursos energéticos, além de intensificar o uso da tecnologia em prol da evolução dos sistemas de geração, transmissão e distribuição energéticas. As RSSF têm sido amplamente reconhecidas como uma tecnologia promissora que pode melhorar todos estes três subsistemas, tornando a RSSF um componente vital do sistema de energia elétrica de última geração, a Rede Inteligente [24].

Atualmente o sistema elétrico brasileiro não apresenta características muito dinâmicas, quanto à geração e à distribuição de energia, uma vez que a geração de energia é extremamente centralizada e a transmissão energética é feita de forma unidirecional, com poucas alternativas efetivadas de sistemas de geração distribuída. Quanto a este aspecto, a implementação em larga escala de sistemas de geração distribuída representa um fator que acrescenta dinamismo e eficiência ao

sistema elétrico nacional e está atrelado ao desenvolvimento de Redes Inteligentes.

O Brasil é detentor de um dos maiores potenciais energéticos do mundo - dado o seu potencial hídrico, de irradiação solar, biomassa e potencial eólico - sendo cerca de 90% da energia elétrica gerada por usinas hidrelétricas, em virtude de características como a disponibilidade dos recursos, a facilidade de aproveitamento e, principalmente, o seu caráter renovável [25]. Diferente das demais fontes renováveis, a energia hidráulica já representa uma parcela significativa da matriz energética mundial, com tecnologias devidamente consolidadas. Consiste na principal fonte geradora de energia para mais de 30 países e representa cerca 20% de toda a eletricidade gerada no mundo [11]. No Brasil, além do recurso hidráulico vastamente utilizado para a obtenção de energia elétrica, o potencial existente para a obtenção de energia mediante outras fontes renováveis é enorme. Para o uso efetivo deste potencial, entretanto, existe a necessidade da renovação tecnológica dos sistemas elétricos nacionais, mediante a emergente ferramenta tecnológica das redes elétricas inteligentes, as Redes Inteligentes.

Diante dos conceitos previamente explorados é notória a importância das Redes Inteligentes para o futuro do desenvolvimento da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica mundial, sabe-se, porém, que este desenvolvimento está atrelado, dentre outros fatores, ao desenvolvimento de ferramentas mais eficientes que forneçam informações sobre o estado do consumo energético. Desta forma, surge a tendência atual de se desenvolver sistemas de medição de energia elétrica cada vez mais eficientes e com potencial de integração a sistemas maiores, como as Redes Inteligentes.

Além dos sistemas já citados, outro segmento tecnológico que se beneficia do desenvolvimento de dispositivos de medição energético é a área de automação residencial que surgiu com a missão de beneficiar as pessoas e o meio ambiente, consequentemente tornando o uso de todos os recursos úteis à vida humana eficientes.

3.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

O primeiro medidor destinado à quantificação do consumo de energia elétrica conhecido foi desenvolvido e patenteado por Samuel Gardiner, em 1872. Tratava-se de um medidor de lâmpada-hora para aplicação em corrente contínua, que indicava o período que uma lâmpada permanecia

acesa. Por ser uma carga conhecida, com corrente praticamente constante, o cálculo do consumo resumia-se ao produto do tempo ligado pela potência nominal da carga.

Desde o surgimento do primeiro medidor, os sistemas de monitoramento de energia elétrica avançaram significativamente em eficiência e qualidade. Atualmente 92% dos medidores de energia utilizados são eletromecânicos, que possuem baixo custo e alta disponibilidade [11]. Este medidor é constituído pelos seguintes elementos:

- Um elemento motor, que consiste, basicamente, em dois circuitos magnéticos, cada um com uma bobina, uma de potencial e outra de corrente, cujos campos magnéticos resultantes são proporcionais à tensão e à corrente do circuito medido;
- Um disco de alumínio suspenso na região do campo magnético criado pela bobina de corrente, onde são induzidas correntes parasitas, de modo a fazer com que o disco gire no seu próprio eixo, traduzindo a grandeza energética lida em um deslocamento mecânico do disco. O número de rotações do disco é proporcional à energia consumida pela carga em determinado intervalo de tempo, fornecendo a medida do consumo de energia em quilowatt-hora (kWh).

Também conhecido como medidor do tipo indução por apresentar um princípio de funcionamento idêntico ao de um motor de indução, este medidor ainda é o modelo mais utilizado para efetuar a medição de energia elétrica. Seu princípio de funcionamento baseia-se nas correntes de Foucault induzidas no disco. A interação eletromagnética entre estas correntes induzidas no disco e o fluxo magnético que atravessa o mesmo irá produzir uma força, e conseqüentemente um conjugado em relação ao eixo do disco, fazendo-o girar.

Estes medidores são os dispositivos principais em uso atualmente no Brasil, sua eficiência garante sua utilização e adequação atual; porém, os níveis de acurácia e de precisão de suas medições têm se tornado gradativamente ultrapassados mediante o grau de exatidão exigido nos sistemas de medição atuais. Diante do exposto, surgem propostas, em fase de teste, de equipamentos de medição digitais.

Além do que já foi descrito, devido as suas características de construção, tais como o uso de equipamentos indutivos, os medidores eletromecânicos possuem algumas limitações e restrições que devem ser consideradas para que o seu funcionamento seja confiável, como: interferência

na operação na presença de corrente contínua (uma vez que a presença desse tipo de corrente pode causar deformações nos fluxos magnéticos produzidos); diminuição da precisão para valores muito baixos de potência (uma vez que o atrito do conjunto mecânico é alto em relação ao torque eletromagnético produzido pelo disco); e por último, os mecanismos destes instrumentos são sensíveis a vibrações e a choques produzidos por elementos externos, dificultando sua aplicação em ambientes mecanicamente instáveis ou em aplicações embarcadas [11].

A leitura dos valores de medição obtidos pelo dispositivo em análise é realizada com a necessidade do deslocamento de pessoal qualificado ao local em que se situa o medidor, o que acresce valor ao custo operacional dos sistemas elétricos em geral. Dentre esta e outras razões de eficiência operacional existe uma tendência à substituição dos medidores eletromecânicos por medidores digitais, visando, além de uma maior precisão na medição, a possibilidade de leitura remota do consumo de energia ou de aplicação de tarifação diferenciada controlada pela faixa de horário ou pela central de distribuição [11].

3.2.1 Dispositivos de Medição

Os sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física numa segunda grandeza física mais adequada a um sistema de medição. Para o caso em estudo, estamos interessados no funcionamento de sensores que se caracterizem por converter grandezas como corrente e tensão elétrica de magnitude mais elevada para sinais elétricos eletronicamente tratáveis.

A energia elétrica é uma grandeza que envolve o conhecimento das grandezas de tensão e corrente elétricas. Desta maneira, sistemas que se proponham o fornecimento dos dados de consumo energéticos devem estar aptos a realizar as medições destas grandezas, ou conhecer previamente uma delas e aferir a outra, obtendo então um valor de energia aproximado.

A tensão é obtida de maneira mais fácil, a partir de sistemas que se conectam paralelamente ao circuito elétrico que se deseja sensoriar. As conexões elétricas em paralelo permitem obter exatamente a tensão que alimenta determinado ponto do circuito, estas conexões devem ser realizadas fisicamente, sendo assim, sistemas invasivos e que apresentam riscos ao responsável pela sua estruturação.

As tecnologias mais comuns, úteis para medir a corrente de um sistema elétrico, podem ser classificadas em duas grandes categorias: medição da corrente tradicional (usando resistor *shunt*

ou transformador de corrente) e medição que detecta a magnitude de um campo magnético [26].

Os *shunts* são elementos de sensoriamento de baixa resistência que são inseridos diretamente no circuito da corrente que se deseja medir. Operam pelo princípio instituído pela Lei de Ohm, estabelecendo uma tensão proporcional a corrente que atravessa o dispositivo, e podem ser utilizados para medir correntes contínuas e alternadas até dezenas de MHz. No entanto, como têm que ser inseridos diretamente nos circuitos, sua eficiência diminui especialmente em grandes correntes, em função do aquecimento do resistor, e em baixas tensões. A tensão de saída deve ser ligada diretamente ao circuito de medição, o que limita sua aplicação; não sendo empregados em circuitos de alta tensão.

O transformador de corrente tradicional compreende bobinas primária e secundária enroladas num circuito magnético. O transformador proporciona a existência de uma corrente secundária proporcional à corrente primária. O secundário do transformador é isolado eletricamente do primário. Um transformador é definido pela sua relação de transformação; o seu poder e sua classe de precisão são selecionados de acordo com o caso. A fim de não perturbar o circuito que está sendo submetido à medição, a impedância do transformador deve ser tão baixo quanto possível. Para reduzir as indutâncias parasitárias, a bobina é geralmente enrolada sobre um núcleo magnético, toróide. Os transformadores de corrente são robustos e proporcionam bom isolamento elétrico. Contudo, seu uso é limitado, em alguns casos, devido a fenômenos de saturação e histerese que eles apresentam. Um transformador de corrente saturado gera um sinal não senoidal e a sua precisão não pode ser garantida. Além disso, os problemas de perda de calor são por vezes importantes, especialmente em alta frequência. Outra desvantagem de transformadores de corrente é que eles não são úteis, caso se deseje medir corrente contínua [26].

O segundo método de obtenção da magnitude de uma corrente sensoriada se dá pela aferição da magnitude do campo magnético criado pela corrente [26]. Segundo este método, o sensor de corrente deve captar a intensidade de um campo magnético. Esta técnica de medição tem funcionamento semelhante ao de um transformador de potência, no qual uma bobina sofre efeitos da indução magnética de uma corrente. O dispositivo é constituído, basicamente, por um solenóide toroidal com núcleo de ar ou de material não ferromagnético que rodeia o condutor no qual circula a corrente que se pretende medir, conforme a Figura 3.1. A bobina está acoplada magneticamente ao condutor e, por isso, se induz em seus terminais uma tensão proporcional à corrente do condutor.

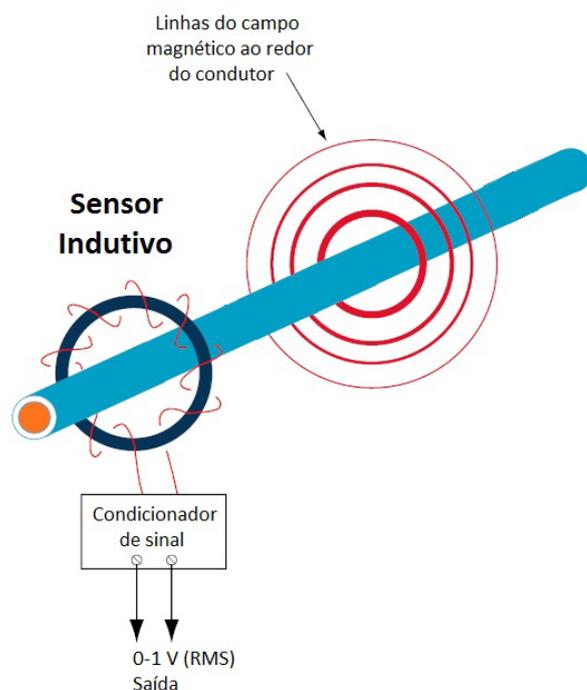


Figura 3.1: Sensor indutivo [5].

A implementação de uma bobina pode ser feita de diversas formas. Pode-se enrolar um condutor sobre um núcleo não ferromagnético. Este núcleo pode ser simplesmente um toróide rígido ou flexível e não fechado, de modo que possa ser aberto para ser instalado ao redor do condutor em que se vai medir a corrente. As bobinas enroladas sobre um núcleo rígido oferecem melhor precisão. Por outro lado, aquelas que podem ser abertas, são mais propensas a variar suas características devido ao desalinhamento das espiras no ponto de conexão [27].

Finalmente, pode-se mensurar campos magnéticos por meio de dispositivos que tem operação baseada no efeito Hall, Figura 3.2. De acordo com este fenômeno é possível, por meio de sensores apropriados, traduzir a magnitude de um campo magnético em tensão, esta tensão é lida pelo sistema de processamento de sinal que se encarrega, através dos equacionamentos necessários, de associar os valores de tensão obtidos com a magnitude do campo magnético e conseqüentemente da corrente que o produziu.

Vale frisar que os dois métodos de captação da magnitude de corrente por meio da medição da magnitude do campo magnético representam dispositivos não invasivos de sensoriamento de campo magnético e de corrente elétrica.

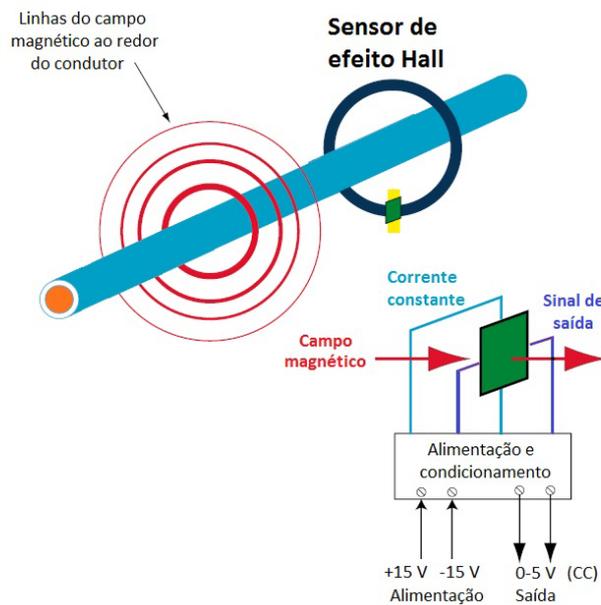


Figura 3.2: Sensor de efeito Hall [5].

3.2.2 Medidores Inteligentes

Dentro deste curso de avanço tecnológico ao qual se inserem os medidores de energia elétrica estão os Medidores Inteligentes. Os Medidores Inteligentes são medidores eletrônicos com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação, cuja atuação vai muito além da mensuração do consumo. Tais dispositivos têm proposta funcional de possibilitarem a troca de informações em tempo real e de maneira bidirecional entre a companhia responsável pelo controle e pela medição da energia elétrica e o consumidor final e, ainda, o monitoramento da qualidade da energia [23]. Os estudos que vêm sendo feitos em prol da concepção deste tipo de sistema de medição demonstram que tais dispositivos alcançarão níveis de exatidão de aferição muito maiores, com erros em torno de 1%. Tais níveis deverão ser alcançados principalmente pelo fato de não existirem limitações mecânicas nos elementos envolvidos no processo de medição e de registro, e pela possibilidade de se empregar sensores de alta precisão.

A implantação em larga escala de tais dispositivos pode beneficiar todas as partes envolvidas nos sistemas elétricos atuais. A possibilidade de se obter dados de leitura remotamente e em tempo real traz grandes vantagens para usuários e companhias de transmissão, distribuição e geração elétrica, tornando todas as etapas do processo energético mais eficientes. A medição energética inteligente é atualmente considerada como ponto de partida para a estruturação física das Redes Inteligentes; assim, todas as contribuições que possam ser feitas visando à implementação

de sistemas de medição energética mais avançados são bem vindas aos interesses tecnológicos das redes do sistema elétrico.

Em relação à operação do sistema, à confiabilidade e à qualidade, as Redes Inteligentes são proativas e não reativas como as redes atuais. A coordenação desses aspectos é feita em tempo real, com mecanismos avançados para restaurar qualquer dano que haja na rede, tentando minimizar ao máximo as perdas dos consumidores [23].

3.2.3 Medidores de Energia Residenciais

Apesar das inúmeras vantagens associadas, os contadores inteligentes são sistemas de monitoramento ainda relativamente inacessíveis, por serem complexos, de difícil utilização para o consumidor e caros. Para o consumidor é mais prático utilizar um sistema de monitoramento que seja fácil de instalar e utilizar e que apresente alguma flexibilidade. Os *home energy monitors* são sistemas de medição desenvolvidos exclusivamente para ajudar o consumidor a controlar e reduzir os seus consumos. Além disso, são portáteis, mais simples e mais baratos que os contadores inteligentes, e conseguem medir e tratar os consumos elétricos em tempo real, mas não substituem o contador tradicional [11].

Elaborar sistemas de medição de energia auxiliares aos sistemas padrão existentes significa trilhar os primeiros passos em busca do avanço tecnológico dos sistemas energéticos e da automação residencial, dado que a automação residencial é favorecida pela integração de todos os sistemas que colaborem para a eficiência e comodidade previstas pelos sistemas de automação residenciais.

Eficientes sistemas de medição energética residencial com medições a nível de quadro elétrico utilizam, geralmente, sensores ou transformadores de corrente *split core* que podem ser ligados a um circuito do quadro elétrico de uma residência. Com este tipo de sensores não é necessário interromper o circuito e é possível medir correntes com magnitude superior às medidas com os sistemas *plug-in*, caracterizados pelas medições de energia por meio da conexão entre o aparelho eletrodoméstico e a tomada de energia [9]. Existem sistemas deste tipo que possuem um único dispositivo responsável por medir e disponibilizar num pequeno visor a informação relativa ao consumo. No entanto, os sistemas mais práticos possuem dois dispositivos que se comunicam entre si, utilizando sistemas de comunicação sem fios. Um dos dispositivos lê, mede e transmite os

dados de energia a outro dispositivo, normalmente portátil, que disponibiliza os dados recebidos num visor, podendo ainda comunicar-se com um computador. Com este tipo de sistema é possível monitorar o consumo total de energia elétrica de uma residência, e ter conhecimento desses consumos em qualquer lugar, a qualquer momento. Porém, são, geralmente, sistemas caros e a sua instalação acarreta certos riscos, ao contrário dos outros sistemas; sendo aconselhado que seja realizada por um técnico habilitado.

A título de exemplificação, são citados em seguida, sistemas de medição de energia elétrica em nível de quadro elétrico.

3.2.3.1 Wattson

Criado pela empresa inglesa Diy Kyoto, o Wattson é um sistema simples e com um *design* interessante. É constituído por um sensor de corrente (transformador de corrente *split core*), um transmissor sem fios e um módulo de visualização. O sensor de corrente e o transmissor sem fio são instalados no quadro elétrico para medir a corrente de um circuito. O módulo de visualização possui um visor alfanumérico que recebe o valor de corrente lido pelo sensor e calcula a potência, a energia e os custos e emissões de CO_2 associadas. Na Figura 3.3 está ilustrado o módulo de visualização do Wattson [9].



Figura 3.3: Wattson [6].

O Wattson pode ser ligado ao computador via USB, onde interage com um programa cha-

mado Holmes, que disponibiliza gráficos diários do consumo. Possui ainda um conjunto de luzes que mudam de cor conforme a quantidade de energia elétrica que estiver sendo consumida (azul significa pouco consumo e vermelho indica elevado nível de consumo). Contudo, este sistema não mede a tensão do circuito e, por isso, não calcula o fator de potência. Logo em circuitos com baixo fator de potência, o Wattson apresenta um erro considerável nos valores calculados de potência e, conseqüentemente, nos valores de energia e custos energéticos [6].

3.2.3.2 Elite

O Elite, ilustrado na Figura 3.4, foi desenvolvido pela empresa Efergy. Semelhante ao Wattson, o Elite é constituído por um sensor de corrente, um transmissor sem fios e um módulo de visualização.

Este sistema tem a capacidade de guardar os dados medidos no próprio equipamento e mostrar no visor os gráficos de consumo, motivo pela qual, provavelmente, a empresa tenha optado por não disponibilizar uma ligação para comunicação com o computador. Este fato pode também ser visto como uma vantagem, dado que o usuário tem acesso a muitas informações sobre os consumos energéticos (potência, energia, custos, emissões de CO_2) em um único dispositivo [9].

Entretanto, o Elite apresenta o mesmo problema de exatidão que o sistema Wattson, no que diz respeito ao cálculo de potência, visto que apenas lê a corrente e despreza o fator de potência [7]. Apesar deste decréscimo de exatidão existente, o sistema apresenta boa funcionalidade e se adequa ao fornecimento das informações básicas das quais um usuário residencial necessita.



Figura 3.4: Elite [7].

3.2.3.3 AlertMe

O AlertMe é uma plataforma de sensoriamento que cria uma rede de comunicação residencial, conectando o usuário à sua casa. Este sistema permite controle e visibilidade em tempo real da energia consumida e dos dispositivos de comunicação em qualquer lugar e a qualquer momento [8]. O sistema é capaz de se comunicar, via wireless, tanto aos dispositivos que fazem parte da plataforma quanto aos dispositivos de terceiros que estejam habilitados.

Atualmente aplicativos têm sido disponibilizados para que o sistema possua maior interatividade. As informações fornecidas pelo sistema vão além de dados de consumo: são fornecidas análises poderosas, de forma acessível e personalizável. A plataforma é capaz de identificar eletrodomésticos individuais, analisar seu desempenho e fornecer recomendações quanto ao uso e consumo personalizadas. Os dispositivos do sistema são ilustrados na Figura 3.5.



Figura 3.5: AlertMe [8].

Uma das vantagens destes sistemas é que sua configuração de funcionamento permite que as medições sejam realizadas tanto em aparelhos quanto em circuitos residenciais, tornando o sistema mais abrangente. Embora estejam classificados como sistemas de medição tipicamente de circuitos elétricos, estes dispositivos podem medir a energia de aparelhos, consideradas as reduções da acurácia e precisão das medições em função da energia dos aparelhos, dado que este

tipo de sistema opera com exatidão para valores de energia mais elevados.

3.2.3.4 Sistema de Monitoramento Energético

Josué [9] propõe um projeto de construção de um sistema de monitoramento energético com o objetivo de auxiliar os consumidores de energia residenciais a reduzir seus gastos energéticos por meio do conhecimento de seus valores de consumo.

O sistema é capaz de medir e de calcular em tempo real diversos dados de energia, nomeadamente o valor eficaz da tensão e da corrente, a potência ativa, o fator de potência, a energia consumida e os custos energéticos. Com o conhecimento destes dados, o consumidor poderá tomar decisões fundamentadas sobre como alterar os seus hábitos de consumo de eletricidade ou de substituir os equipamentos elétricos menos eficientes [9].

O sistema desenvolvido é composto por dois dispositivos eletrônicos: o dispositivo de aquisição de dados e o dispositivo de visualização de dados, ilustrados na Figura 3.6.



Figura 3.6: Sistema de Monitoramento Energético [9].

O dispositivo de aquisição de dados é responsável por medir os consumos elétricos e o dispositivo de visualização de dados por mostrar, num pequeno display, a informação relativa a esses consumos. A troca de informação entre os dois dispositivos é feita com recurso à comunicação sem fios. O dispositivo de visualização de dados é um equipamento portátil e, por isso, os consumos de eletricidade podem ser visualizados em qualquer ponto da casa, mesmo distantes do local de aquisição. Desta forma, o sistema torna-se uma fonte de informação facilmente acessível a

qualquer usuário.

Outra característica deste sistema é a sua capacidade de monitorar os consumos não só de um determinado equipamento elétrico, como também de um circuito do quadro elétrico de uma residência. Esta funcionalidade permite ao usuário conhecer informações detalhadas dos consumos por equipamento elétrico individual (televisor, geladeira, chuveiro, etc) ou por aplicação elétrica (circuito de iluminação, de climatização, etc). É assim possível perceber qual o peso que cada aplicação ou equipamento elétrico tem nos consumos totais de energia elétrica residencial.

O sistema de monitoramento desenvolvido permite também a ligação do sistema a um computador, via USB. No computador, é possível o armazenamento dos dados de energia e a sua posterior utilização em aplicações diversas [9].

3.2.4 Sistemas para Medição de Energia Consumida por Eletrodomésticos

Existem medidores de energia destinados a monitorar o consumo total da residência que ficam localizados junto ao medidor eletromecânico ou ao quadro elétrico, e existem os medidores chamados *plug-in*, cujo objetivo é medir o consumo de aparelhos individualmente; esses medidores ficam localizados entre a tomada de fornecimento de energia e o aparelho do qual se deseja medir o consumo [9]. Comumente, os sistemas com mais ênfase acadêmica se destinam a medir o consumo de aparelhos individualmente, apesar de esta proposta possuir sua importância, elaborar sistemas que contribuam para as medições residências também é necessário para o avanço tecnológico do setor.

Os sistemas de medição específicos para a aferição do consumo energético de aparelhos permitem ao usuário um detalhamento de medição bastante significativo, permitindo que os consumidores compreendam e estejam a par da eficiência energética de seus aparelhos. Este tipo de sistema tem se difundido rapidamente no cenário atual e sendo incorporado a diversos sistemas de automação residenciais. A seguir, são feitas as análises e as apresentações dos sistemas de medição por aparelhos, disponíveis no mercado atualmente ou sob proposta acadêmica.

3.2.4.1 Sistema para Monitoramento do Consumo Elétrico Residencial Utilizando Rede ZigBee

Este sistema proposto está em fase final de desenvolvimento pelos pesquisadores da Unicamp. O sistema emprega uma rede Zigbee, uma tecnologia de rede disponível mundialmente que designa um conjunto de especificações para a comunicação sem fio de diversos pontos. Deu-se bastante atenção à possibilidade de instalação dos módulos medidores de energia elétrica sem danificar as residências, nem modificar a instalação elétrica [10].

Foram desenvolvidos três módulos medidores de energia elétrica. Cada um deles mede o consumo de forma diferente, o que é necessário por conta das várias maneiras de se distribuir a energia dentro das casas. Estes três equipamentos poderão ser utilizados simultaneamente. O primeiro módulo, que é o de mais fácil aplicação e também o mais comum, é próprio para medição em tomadas de energia. Assim, em todo o equipamento que puder ser desligado da tomada, insere-se esse módulo entre ela e o equipamento, operando como uma extensão. Há uma via de entrada e outra de saída para serem introduzidas nas tomadas do cômodo. O segundo módulo mede o consumo de energia elétrica de equipamentos que emitem luz, sejam eles lâmpadas ou abajures. Neste caso, um fotossensor verifica há quanto tempo a lâmpada está ligada e há quanto tempo está desligada. O microcontrolador faz um cálculo matemático e demonstra o quanto de energia elétrica foi despendida. Isso é programável, e o computador devolve tais informações. O terceiro módulo mede o consumo de energia elétrica de equipamentos que consomem uma grande quantidade de corrente. O chuveiro elétrico é um exemplo típico: além de gastar mais energia, também possui maior potência. Para a medição do chuveiro, adota-se uma garra semelhante a um alicate amperímetro. Igualmente, através de cálculos matemáticos, o módulo fornece a potência consumida [10].

O sistema, em fase final de testes, é projeto de cunho acadêmico com visão comercial, sendo feito por meio de parcerias entre uma instituição de ensino e uma distribuidora de energia elétrica responsável pelo fornecimento do estado de São Paulo.

A Figura 3.7 abaixo ilustra os dispositivos do sistema.

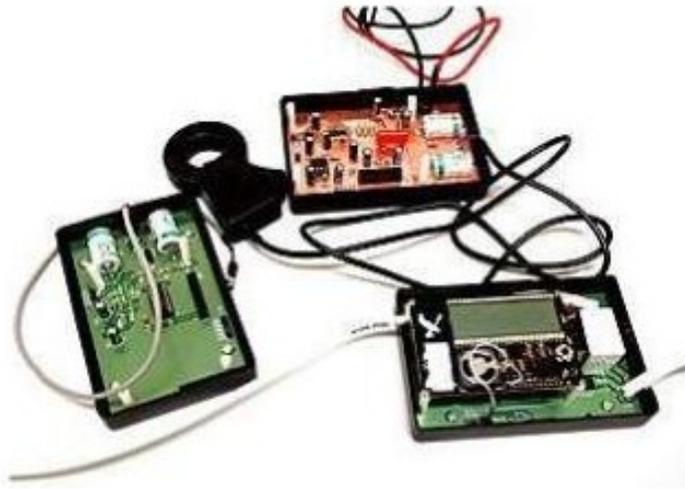


Figura 3.7: Sistema de medição de energia com rede ZigBee [10].

3.2.4.2 Plogg

O Plogg é um sistema simples e prático, também ligado entre a tomada e o eletrodoméstico, que envia dados de energia através de um sistema de comunicação sem fio ZigBee ou Bluetooth para um computador ou celular. Além dos habituais dados de energia, é também capaz de medir a potência reativa. Pode ser vendido como um sensor de corrente externo que possibilita a medição de corrente de um circuito, torna possível o monitoramento do consumo da casa como um todo [9].

A Figura 3.8 ilustra o dispositivo.



Figura 3.8: Plogg [11].

3.2.4.3 Power-Mate

O dispositivo de sensoriamento Power-Mate foi desenvolvido pela empresa australiana CCI. Este dispositivo possui um visor responsável pela apresentação dos dados relativos ao consumo energético medido. Os dados incluem os valores das potências ativa e reativas do sistema, no instante da medição. Além disso, o dispositivo apresenta uma estimativa das emissões de CO_2 resultantes do consumo de energia.

Sua principal característica é a elevada resolução e sensibilidade, o que permite medições de 0,001 A e de 0,1 W. A versão mais recente do dispositivo possui interface com o computador para armazenamento e análise dos dados de energia [12].

O dispositivo é ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9: Power-Mate [12].

3.2.4.4 Kill a Watt

O Kill a Watt é um dispositivo de medição desenvolvido pela companhia P3 International. É também um dispositivo do tipo *plug in*, alocado entre a fonte de energia residencial e o eletro-eletrônico que se deseja alimentar. O dispositivo possui um display LCD no qual são mostradas as medidas relativas ao consumo de energia do equipamento elétrico que está conectado ao seu terminal adequado. Mostram-se as medidas: Volts, Amperes, Watts, Hertz, Volt-Ampere ou Kilowatts-hora. Essas medidas permitem a análise do consumo de um eletrodoméstico detalhado

[13]. O dispositivo é mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Kill a Watt [13].

A empresa também é fabricante do Kill a Watt Graphic Timer P4480 que além de medir e monitorar o consumo de energia elétrica, pode ainda ser programado para ligar/desligar o equipamento ao qual estiver ligado; o que auxilia na redução do consumo energético [13].

A Figura 3.11 ilustra o dispositivo.



Figura 3.11: Kill a Watt Graphic Timer [13].

3.2.4.5 Power Meter

O Power Meter é outro dispositivo de medição com funcionamento muito similar aos dispositivos apresentados anteriormente. Possui um timer embutido que controla o tempo de utilização de um aparelho conectado ao dispositivo.

O Power Meter é capaz de: medir o consumo de um aparelho em uma faixa de 1 a 2400 W; informar o consumo em Kilowatts-hora; informar o quanto está sendo gasto em dinheiro, se informada a tarifa da energia elétrica local; e medir tensão, fator de potência atual e a frequência [14]. O aparelho de medição é ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.12: Power Meter [14].

3.2.4.6 Watts Up?

O Watts Up? também é um dispositivo que fica alocado entre a tomada de energia e o aparelho do qual deseja-se medir o consumo de energia. O modelo básico mede tensão e corrente com uma frequência de medição bastante alta para garantir um tempo de resposta rápido. O dispositivo é capaz de medir a potência real e o fator de potência. O display mostra, além do consumo, a porcentagem de tempo que esse consumo está acima de um limiar pré-determinado, o que pode ajudar a identificar defeitos em aparelhos [11].

Outros modelos do mesmo fabricante estão disponíveis no mercado. Há a possibilidade de se obter modelos que armazenem dados e possuam interfaces USB para comunicação com computadores. A Figura 3.13 ilustra o medidor Watts Up?.



Figura 3.13: Watts Up? [15].

3.3 ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA

Tendo sido apresentados alguns sistemas de medição do consumo energético residencial, torna-se possível discorrer sobre a análise destes dispositivos e de sua tecnologia fundamentadora.

Os sistemas de medição do consumo energético que vêm sendo propostos constituem-se em ferramentas auxiliares aos padrões de medição empregados atualmente. Seu intuito imediato não é o de substituir as formas de medição tarifárias presentes, mas agregar eficiência, comodidade, tecnologia e acessibilidade aos dados de consumo energético residenciais. Promover a disseminação desta tecnologia é uma tarefa importante que permite que a conscientização dos valores gastos mediante a utilização dos recursos energéticos seja estabelecida socialmente.

Dois tipos principais de sistemas são propostos, os sistemas *plug in*, tipicamente mais invasivos, e os sistemas de sensoriamento não invasivo por meio de sensores ou transformadores de corrente. Nos sistemas *plug in* as medições são comumente realizadas em aparelhos que consomem energia elétrica. Estes sistemas são práticos de usar e não exigem configurações muito complexas; são alocados entre as fontes de energia e os aparelhos consumidores. Estes dispositivos funcionam basicamente através da captação da corrente destinada ao eletrodoméstico que passa pelo sensor de corrente do dispositivo e da captação dos valores de tensão da linha elétrica disponível nas tomadas de energia. De posse destas duas grandezas é possível calcular potência e energia elétrica e posteriormente atribuir um valor monetário ao consumo energético dos aparelhos submetidos ao sensoriamento. O outro tipo de sistema responsável pela aferição do consumo energético se caracteriza, tipicamente, por possuir um sensor de corrente não invasivo

que funciona a partir da aferição do campo magnético criado por uma corrente em um sistema elétrico. Conhecendo a amplitude deste campo magnético é possível realizar o condicionamento do sinal e estabelecer o valor da corrente consumida pelo sistema e, conseqüentemente, a energia consumida.

A diferença de funcionamento entre os dois sistemas de medição conduzem a diferentes aplicações dos mesmos. Desta forma, a situação será determinante para a escolha do sistema que se adéque melhor ao que for requisitado. Porém, ao fazer uma análise geral é possível concluir que os sistemas não invasivos garantem maior nível de segurança aos usuários e têm aplicabilidade superior em relação ao sistema *plug in*, uma vez que pode aferir a energia consumida também por aparelhos, de modo aproximado.

É conhecido que a exatidão das medições dos sistemas *plug in* é maior, já que as aferições são feitas por meio de conexões elétricas diretas entre o sistema de medição e o sistema elétrico. Esta exatidão dos valores de tensão e corrente possibilita o acesso aos valores exatos de potência e energia, tornando o sistema fortemente confiável. A perda de exatidão dos sistemas não invasivos, entretanto, não é fator decisivo para a desqualificação destes sistemas, uma vez que a perda de precisão não é tão significativa. Atualmente, sensores de corrente do tipo *split core* fornecem níveis de precisão e acurácia indiscutivelmente bons, variando de acordo com a sofisticação do dispositivo. Ainda, por representar um recurso que auxilia a medição energética residencial, os sistemas de medição anteriormente discutidos, dentre outros existentes, são suficientemente qualificados à sua tarefa de auxílio de monitoramento e de automação residencial.

Observa-se que a integração dos sistemas de medição e de métodos de comunicação sem fio entre os dispositivos de sensoriamento beneficia o sistema tornando-o mais sofisticado e ampliando sua área de atuação, por meio da comunicação sem fio. Integrar tecnologias, desde que estas sejam compatíveis, tende a agregar valor aos sistemas e aumentar a aplicabilidade dos mesmos.

3.3.1 O Futuro dos Sistemas de Medição de Energia

Os sistemas de medição de energia do futuro deverão não só fazer o controle da energia elétrica, como também o controle do consumo de gás, de água e de temperatura, etc. Um sistema com estas capacidades, designado EnergyMate, que pode ser visualizado na Figura 3.14, foi projetado recentemente.



Figura 3.14: EnergyMate [16].

O EnergyMate é constituído por uma unidade central com um visor LCD e por sensores de gás, água, temperatura, iluminação e electricidade. Todos estes sensores comunicam com a unidade central através de comunicação sem fios. O visor LCD é sensível ao tato e apresenta gráficos e animações que indicam consumos, custos e emissões de CO_2 [9].

Ao contrário da maioria dos sistemas hoje em dia comercializados, este sistema permite que sejam controlados e monitorados os consumos não só de electricidade, mas também de água e de gás, o que representa um fator muito importante na redução da energia consumida em casa. Se as projeções apontam para uma redução dos consumos de 5 a 15% através do monitoramento de electricidade, então com o sensoriamento de mais tipos de energia é possível economizar ainda mais [28].

Dentro das pretensões futuras do setor energético, inserem-se os Medidores Inteligentes e os sistemas de automação residenciais mais sofisticados. Aliando a pesquisa dos sistemas e equipamento de medição energética que está a se desenvolver às tendências de mercado atuais, é possível prever que os setores tecnológicos citados serão favorecidos e tornar-se-ão praticáveis em um futuro próximo.

3.4 TARIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

No setor elétrico, o sistema deve ser dimensionado para atender à demanda máxima, ainda que essa ocorra uma única vez no ano e o sistema fique ocioso durante a maior parte do tempo. Logo, quanto mais usuários utilizarem o sistema elétrico durante o período de demanda máxima, maior deve ser a infra-estrutura, e, conseqüentemente, mais caro será prestar o serviço [29].

Ocorre que o setor elétrico registra alta concentração de consumo durante poucas horas do dia. Como o uso de eletricidade é um ato quase inconsciente - normalmente associado à satisfação de necessidades básicas, à atividade econômica ou ao conforto - os consumidores, de forma involuntária, acabam provocando a expansão do sistema elétrico. Com efeito, durante a maior parte do tempo, os ativos e o capital investido ficam ociosos. Essa ineficiência acarreta o aumento do custo médio de prestação do serviço, e conseqüentemente, das tarifas de eletricidade [30].

O consumidor que aumenta o consumo nos períodos de maior carregamento tende a ser aquele que imputa expansão da cadeia geração-transmissão-distribuição. O ônus imputado ao sistema por este é suportado pelos demais, mesmo que não tenham feito uso de energia nos horários de ponta. Cria-se, portanto, um subsídio cruzado em que o consumo fora da ponta financia aquele que é feito durante o horário de pico.

O estabelecimento de uma tarifa que represente o custo horário de prestação do serviço contribui para redução desse subsídio cruzado. O aumento do custo da energia durante o horário de uso mais intenso do sistema elétrico promove uma alocação ótima dos recursos, aumentando a eficiência econômica do setor elétrico através da redução do consumo neste horário [31].

Mas a elasticidade demanda-preço da energia elétrica é baixa, uma vez que se trata de um bem essencial sem substituto direto, e a resposta do usuário a sinais tarifários está relacionada à classe social e à atividade que desempenha. Na classe residencial, notadamente nos lares em que a fatura de energia tem peso considerável no orçamento doméstico, pode-se observar redução do uso de chuveiros elétricos e de iluminação quando as tarifas estão mais elevadas [32].

Os efeitos da aplicação de tarifas horárias vão além da resposta imediata ao preço. Assim que a modalidade tarifária horária é aplicada, alguns usuários terão capacidade de reduzir ou reagendar o consumo em resposta aos preços, contanto que estejam informados adequadamente. Em longo prazo, o custo médio da energia afetará o nível de consumo total. Em outras palavras, a aplicação

de tarifas horárias resulta imediatamente em um melhor comportamento dos consumidores e em uma redução do consumo total em longo prazo. Devido a este fato, é notória a necessidade de tornar os valores de energia consumida cada vez mais acessíveis ao consumidor.

Sabe-se que a tarifação horária do consumo de energia elétrica será utilizada dentro de um futuro próximo no território brasileiro, desta maneira, maiores esforços devem estar voltados ao setor elétrico nacional, de modo que se concebam ferramentas capazes de alertar o consumidor quanto aos seus gastos e ao comportamento de seu consumo de energia em função dos horários das tarifações.

3.5 CONCLUSÃO

O capítulo em análise expôs a teoria que embasa e justifica a tecnologia e o uso dos sistemas de medição energéticos. A importância da tecnologia, seus fundamentos e sua incorporação ao cenário tecnológico atual, como citado, demonstram o crescimento e o desenvolvimento deste setor.

Foram descritas as características mais importantes e influentes em diversos sistemas de sensoriamento energético, tendo sido feitas análises detalhadas do funcionamento dos mesmos. Os dispositivos de medição de tensão e corrente também foram detalhados. A exemplificação de sistemas foi proposta de modo a se obter parâmetros, do conceito tecnológico em estudo, que auxiliem desenvolvimentos futuros. Foi feita uma breve comparação qualitativa entre os sistemas, a fim de expor, de forma geral, as vantagens e desvantagens entre eles.

As previsões estimadas aos sistemas de medição do consumo energético envolvem as tendências de automação residencial e, de maneira mais globalizada, o desenvolvimento das Redes Inteligentes.

De posse dos conceitos relativos aos sistemas de medição energética, o foco do presente estudo volta-se à análise descritiva dos sistemas de medição de consumo energético detalhado em proposta, implantado sob a tecnologia de redes de sensores sem fio.

4 PROPOSTA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

4.1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se consumir energia elétrica de forma mais eficiente motiva o surgimento de sistemas que auxiliem a verificação em tempo real da quantidade de energia que está sendo consumida por determinados ambientes ou aparelhos de interesse imediato. A proposta de detalhamento do consumo de energia elétrica enriquece as formas de medição atuais e amplia a capacidade de monitoramento e de controle sobre a energia elétrica, uma vez que os dados de consumo passam a ser de fácil acesso.

Visando a implementação de sistemas de medição do consumo energético detalhado, com bom custo-benefício e com poder de disponibilização de dados remoto, propõe-se, mediante este trabalho, a confecção de dois sistemas de medição estruturados de forma semelhante; porém, com o uso de elementos de sensoriamento distintos. Desta forma, o termo sistema de medição pode ser utilizado sem distinção para os dois casos propostos neste trabalho, sem prejuízo conceitual, já que os dois sistemas atuam de maneira semelhante; diferindo, entretanto, em relação ao sensor utilizado. Conforme a necessidade, os dois sistemas serão tratados separadamente para prover suas informações características.

Embora existam aspectos distintos entre os sensores utilizados, sua função no sistema de medição do consumo de energia elétrica é semelhante. A proposta para a concepção dos sistemas é a de se captar a corrente consumida por determinados ambientes ou mesmo por equipamentos, preferencialmente de forma não invasiva; e traduzir, mediante as leis físicas adequadas, a potência e a energia elétrica referentes a esta demanda de corrente.

A construção dos sistemas de medição de consumo energético se baseia na elaboração de uma infra-estrutura dotada da capacidade de captar a intensidade de corrente elétrica que flui através de um condutor. Assim, um processo, definido como um sistema que gera uma informação [17], fornece um dado de interesse; no caso em estudo, a intensidade do campo magnético gerada

por uma corrente. A informação é tratada pelo sistema de medição e a saída é fornecida ao observador graficamente por meio da informação de energia consumida. A Figura 4.1 sintetiza de forma simplificada a proposta de sistema descrito anteriormente.

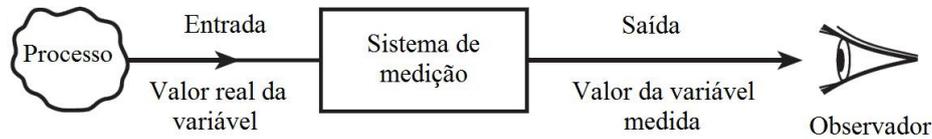


Figura 4.1: Proposta de um sistema de medição [17].

Os sistemas de medição podem ser distribuídos segundo uma estrutura de blocos bem definida, com cada elemento ou bloco especificado conforme sua função no sistema [17]. É possível identificar quatro tipos de elementos, embora em dado sistema algum dos tipos de elementos pode não ser utilizado ou pode haver a necessidade de existir mais de um elemento do mesmo tipo.

Em conformidade com a estrutura pré-suposta de um sistema de medição, os quatro elementos básicos existentes neste tipo de sistema são:

- Elemento de sensoriamento;
- Elemento de condicionamento de sinal;
- Elemento de processamento de sinal;
- Elemento de apresentação de dados.

A função de cada elemento do sistema é a de promover as alterações necessárias ao sinal medido até que o mesmo se torne suficientemente adaptado à visualização da grandeza em análise. A caracterização destes elementos para os sistemas propostos será definida, posteriormente, com o detalhamento dos mesmos quando inseridos ao sistema de medição.

Além de prover a medição desejada, o sistema caracteriza-se por possibilitar a visualização da grandeza sensoriada de forma remota, tornando o conceito do dispositivo ainda mais aceito e adaptável. A forma de comunicação dos dispositivos responsáveis pelo sensoriamento se dá pela utilização da comunicação por Radiofrequência (RF). Esta forma de comunicação gera uma nova perspectiva conceitual ao sistema de medição proposto. Nesta perspectiva, o sistema de medição

atua mutuamente como um sistema de medição do consumo de energia de forma detalhada e uma RSSF, provendo o trâmite dos dados captados pelos sensores sob um canal de comunicação sem fio.

A fim de implementar o sistema de comunicação sem fio utilizou-se a plataforma Radiuino, caracterizada por ser uma plataforma livre para criação de RSSF. Esta plataforma, integrada por *hardware*, *software* e *firmware* é passível de alteração e representa uma alternativa para a estruturação física de um sistema de comunicação sem fio, contendo relação custo-benefício consideravelmente atrativa.

A plataforma Radiuino, Figura 4.2, foi criada com base no ambiente de desenvolvimento Arduino. Ela é uma biblioteca utilizada para realizar transmissões sem fio na banda de 915 MHz, utilizando o transceptor CC1101 da Texas Instruments; e que pode ser utilizada com qualquer módulo Arduino [18]. Devido a estas características e a fácil obtenção desta plataforma de desenvolvimento, sua utilização volta-se primordialmente à pesquisa e ao desenvolvimento de projetos de cunho acadêmico, sendo que sua contribuição para este propósito é extremamente favorável e sua tecnologia apresenta vasto ambiente de exploração.



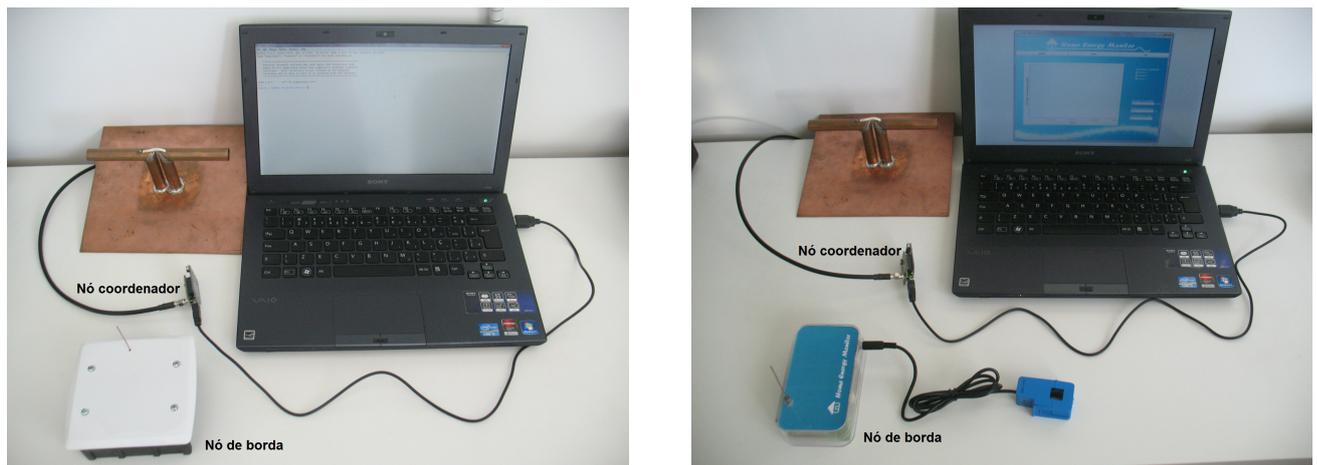
Figura 4.2: Plataforma Radiuino [18].

A utilização de ferramentas tecnológicas, como a plataforma Radiuino, que possibilitem a construção de novos projetos, mediante a alteração de sistemas pré-existent, favorecem o dinamismo do desenvolvimento prático de conceitos tecnológicos de interesse. A oportunidade

da alteração dos componentes físicos ou não do sistema, traduzidos em *hardware*, *software* e *firmware*, ampliam as possibilidades de atuação dos nós da RSSF¹. Os parâmetros de cada sensor podem ser configurados, personalizando o endereço do nó, a potência de transmissão, o canal de operação, entre outros; conferindo ao desenvolvedor a facilidade e o controle sobre a sua rede [18].

De posse dos dados recebidos de cada nó de sensoriamento faz-se a apresentação dos mesmos. O elo final de conexão entre os dados e o observador no sistema em estudo, foi idealizado como um ilustrador gráfico do comportamento do consumo de energia elétrica dos ambientes sensoriados pelos nós dispostos, conforme o interesse do usuário. Dois modelos foram propostos, um para cada elemento de sensoriamento distinto, visando estimar comparativamente as características destes sistemas de apresentação com seus sensores em seus respectivos cenários de atuação.

A integração dos sistemas de comunicação e de medição, ilustrados de forma geral na Figura 4.3, traduz o propósito do projeto dos sistemas de medição de energia.



(a) Utilizando o Sensor de Efeito Hall.

(b) Utilizando o Sensor de Efeito Indutivo.

Figura 4.3: Sistemas propostos.

A possibilidade de se mensurar dados relativos ao consumo energético e de se transmitir estes dados a uma central responsável por seu processamento e pela sua apresentação resumizam o conteúdo explorativo do trabalho desenvolvido.

¹Os códigos utilizados nos dois sistemas de medição estão disponíveis em [33].

4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO ENERGÉTICA

Com fundamento em toda a teoria que embasa o funcionamento das RSSF, bem como dos sistemas de medição energéticos, propôs-se um sistema que busca utilizar eficientemente todos os recursos tecnológicos disponíveis em prol da integração de uma RSSF infra-estruturada, dotada de todos os elementos principais constituintes de um sistema de medição típico.

Os sistemas de medição são também uma rede de sensoriamento sem fio, cujos nós de sensoriamento são implementados, em termos de *hardware*, na plataforma Rádiumo, criada com base no ambiente de desenvolvimento Arduino.

A plataforma Rádiumo utilizada neste trabalho de desenvolvimento é fabricada pela RadioIt com o módulo de comunicação BE900, conforme ilustrado na Figura 4.4. O transceptor integrante do módulo de comunicação é o CC1101 da Texas Instruments. Os nós de comunicação do Kit Rádiumo podem ser alimentados por uma bateria de 6 V ou por uma fonte de tensão contínua de 12 V.



Figura 4.4: Módulo de comunicação BE900.

O módulo BE900 é conectado ao módulo de sensoriamento e de atuação, responsável por captar o sinal dos sensores de medição a ele acoplados. Esta placa, ilustrada pela Figura 4.5, é composta por conexões que permitem o acoplamento elétrico entre o elemento de sensoriamento

e a placa, por um sensor de luminosidade - LDR, por um sensor de temperatura e por componentes elétricos responsáveis pelo condicionamento dos sinais provenientes dos sensores de temperatura e de luminosidade.

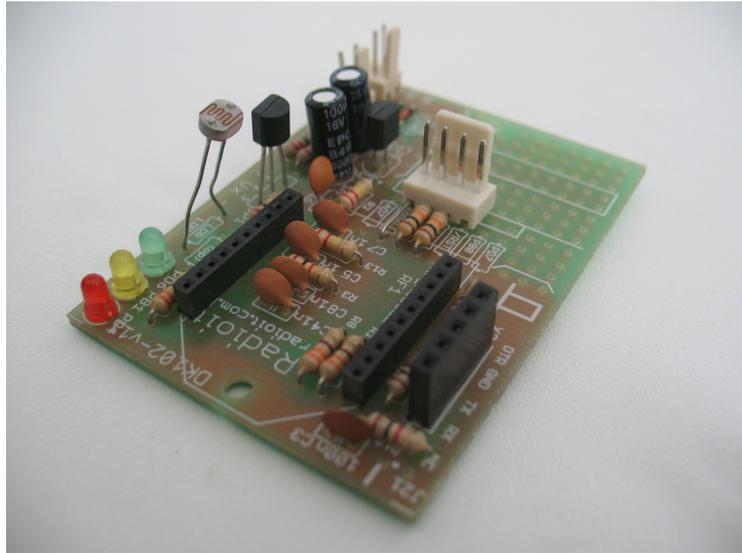


Figura 4.5: Módulo de sensoriamento e de atuação.

O módulo de comunicação está presente em cada nó de sensoriamento e é também o componente constituinte do nó coordenador da rede, responsável pelo controle da RSSF e pela recepção dos dados provenientes do sensoriamento dos nós de borda da rede, Figura 4.6. Ao receber os dados de todos os nós, o módulo coordenador realiza a transferência dos dados captados ao computador, que deverá apresentar os dados referentes à energia sensorizada.

O nó coordenador da rede, como ocorre tipicamente em RSSF, se responsabiliza pela identificação dos componentes da rede e por sua adaptação, mediante a entrada ou a saída de nós de sensoriamento. Todas estas características de configuração da rede são construídas por meio das configurações de *firmware* da RSSF. Estas configurações foram estruturadas durante o desenvolvimento do projeto, conforme a necessidade do sistema.

O nó coordenador está conectado ao computador utilizado no sistema de medição e é alimentado energeticamente pela mesma conexão responsável pela troca de dados entre o nó e o computador, a conexão USB.

Os *firmwares* dos nós de sensoriamento e do nó coordenador são estruturados em camadas. Cada *firmware* é composto por seis códigos escritos em linguagem de programação C, sendo um

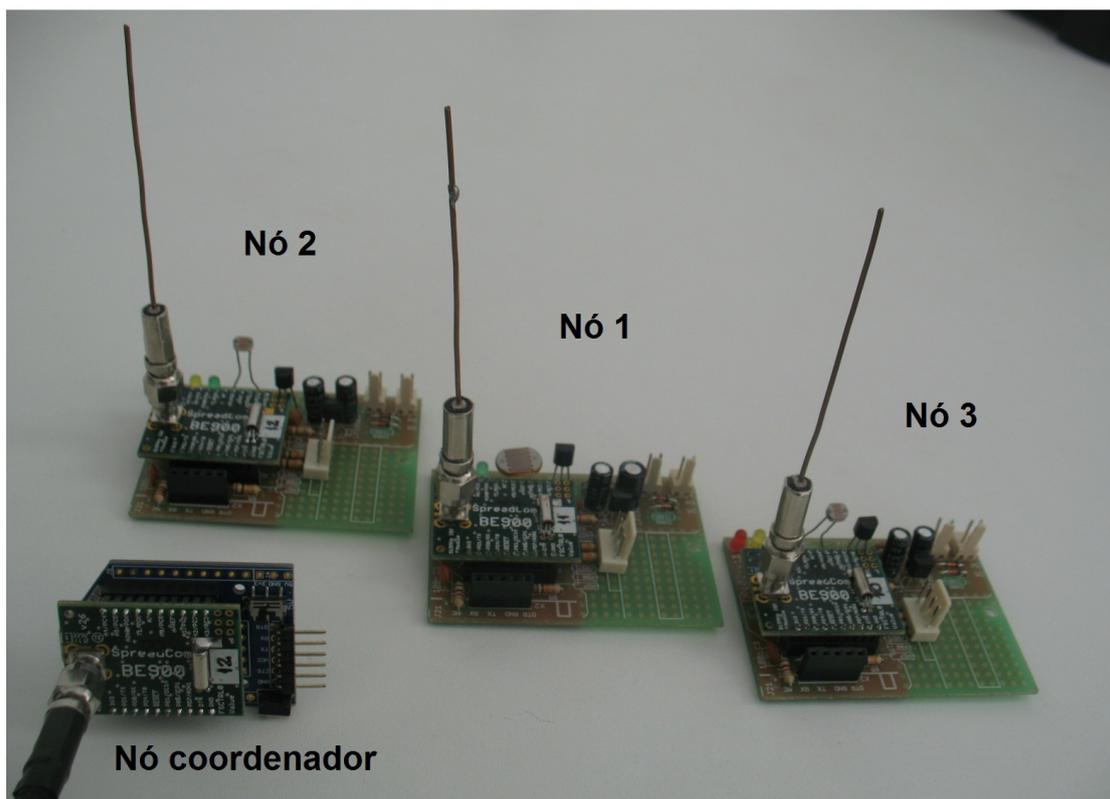


Figura 4.6: Nós da rede.

código principal e cinco códigos que implementam cada uma das camadas ilustradas na Figura 4.7. Este modelo de camadas se assemelha ao tão difundido modelo TCP/IP.

Na camada física, são definidos a potência de transmissão do sinal sem fio e o canal de comunicação. O canal de comunicação pode ser escolhido entre um dos 66 canais disponíveis na plataforma, estando eles na faixa de 915 a 928 MHz, com espaçamento de 200 kHz. No sistema proposto, todos os nós utilizam o primeiro canal, pois o acesso ao meio é feito por divisão no tempo.

A plataforma Radiuino permite a configuração de 8 valores diferentes de potência de transmissão que variam entre -30 e 10 dBm. O nível do sinal deve ser adequado à distância em que o nó sensor se encontra do nó coordenador, logo, com o ajuste de potência, é possível controlar o consumo de energia dos nós, a fim de aumentar a eficiência da rede. Para a elaboração dos sistemas propostos, a potência de transmissão foi fixada em seu valor máximo, visando à simplificação do projeto; entretanto, este parâmetro pode ser ajustado conforme a necessidade.

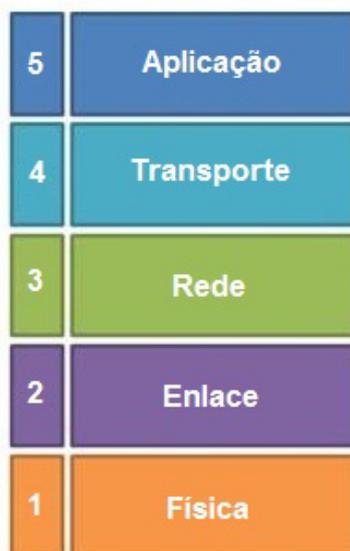


Figura 4.7: Modelo da camada de protocolos.

Na camada de enlace, para se evitar a colisão de pacotes prezando pela eficiência do sistema, é feito *carrier sense*, medida que intensifica o racionamento energético da rede. Outra medida importante em relação à eficiência do sistema é a de coordenar os modos de consumo energético dos nós de borda, alternando-os de acordo com o estado da rede em modo *sleep* e modo ativo; esta tarefa é destinada ao nó coordenador.

O *firmware*, dentre seus processos, descreve as formas e as rotas de comunicação entre o nó coordenador e os nós de borda, através das atribuições da camada de rede. As identificações dos nós de borda são configuradas a fim de estabelecer o reconhecimento da rede por parte do coordenador, Tabela 4.1. As rotas de comunicação são bem definidas com o trânsito de dados sempre entre o coordenador e os nós de bordas em *half duplex*.

Tabela 4.1: Endereçamento dos nós da rede.

Tipo	Endereço de rede
Coordenador	0
Nó de borda	1
Nó de borda	2
Nó de borda	3

Devido à simplicidade do sistema, a camada de transporte, por sua vez, apenas enumera pacotes, não havendo necessidade de maiores atuações por parte desta camada nos dados do sistema. Já a camada de aplicação é definida conforme a necessidade do projeto.

Todas as propostas de controle e de adequação da rede se basearam na importância de se alcançar qualidade de operação e simplicidade tecnológica; sem sacrificar a flexibilidade ou generalidade da rede. A ênfase das especificações do sistema é sempre voltada para a baixa potência de operação, baixa taxa de transmissão de dados e no baixo custo de implementação. Desta maneira, as definições e as atribuições de cada camada, contribuem para a adequação da rede de sensoriamento para as medições do consumo energético.

As camadas de protocolo expostas anteriormente especificam como são tratados os dados e como é realizada a comunicação entre os nós de borda e o nó coordenador. Findada a comunicação entre os nós de borda e o nó coordenador, cabe ao nó coordenador se comunicar com um computador para prover o desenvolvimento da apresentação adequada dos dados. A comunicação do nó coordenador com o computador é estabelecida por uma conexão USB, articulada pelo programa de cada sistema, também responsável pelo processamento final e pela apresentação dos dados.

As descrições feitas até aqui servem para detalhar as partes comuns aos dois sistemas de medição em proposta, tanto em nível de *hardware* quanto de *firmware*. As distinções entre os sistemas propostos ocorrem em relação às camadas de aplicação de cada um; o primeiro referente ao sensor de efeito Hall e o segundo referente ao sensor de corrente por efeito indutivo. As funções do *firmware*, separado em camadas, são alcançadas através da junção entre as funções pertinentes aos nós de borda e ao nó de coordenação da rede; desta forma, a programação do *firmware* dos nós é feita de maneira a adequar cada nó à sua função na rede.

Para o entendimento mais adequado dos sistemas de medição do consumo energético detalhado, serão feitas descrições mais aprofundadas das características de cada sistema.

4.2.1 Sistema de Medição Energética com Sensor de Efeito Hall

O sistema de medição com o sensor de efeito Hall possui os quatro elementos básicos dos sistemas de medição:

- Elemento de sensoriamento;
- Elemento de condicionamento de sinal;
- Elemento de processamento de sinal;
- Elemento de apresentação de dados.

O sistema é composto por quatro nós, sendo três responsáveis pelo sensoriamento e um pela coordenação da RSSF. A comunicação e o controle da RSSF são iniciados a partir do computador utilizado no sistema. Por meio do programa de apresentação de dados, faz-se também o controle da comunicação entre o computador e o nó coordenador e da comunicação entre os nós da RSSF; desta forma, o usuário decide quando as medições devem ser iniciadas ou interrompidas.

A partir do comando responsável por iniciar o processo de comunicação, o programa responsável pelo controle da comunicação e também responsável pela apresentação de dados, gera um pacote de dados de 52 bytes, ilustrado na Figura 4.8; endereça-o ao nó de sensoriamento de menor endereço, envia-o para o nó coordenador da rede via USB, que transmite o pacote ao nó ao qual o pacote está endereçado. Quando o pacote é recebido pelo nó de borda da rede, o módulo de comunicação conectado ao módulo de sensoriamento coordena, via *firmware*, a atuação do sensor de efeito Hall.

Cabeçalho:	PhyHdr[#]				MacHdr[#]				NetHdr[#]				TranspHdr[#]			
Posição: #	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
Função:	RSSI Downlink	LQI Downlink	RSSI Uplink	LQI Uplink	Sleep	TBD	T2	T1	Destination ID	Destination Net ID	Source ID	Source Net ID	Packet Counter	TBD	TBD	TBD
Número do byte:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Cabeçalho:	AD0[#]			AD1[#]			AD2[#]			AD3[#]			AD4[#]			AD5[#]		
Posição: #	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Função:	AD0_W	AD0_H	AD0_L	AD1_W	AD1_H	AD1_L	AD2_W	AD2_H	AD2_L	AD3_W	AD3_H	AD3_L	AD4_W	AD4_H	AD4_L	AD5_W	AD5_H	AD5_L
Número do byte:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33

Cabeçalho:	IO0[#]			IO1[#]			IO2[#]			IO3[#]			IO4[#]			IO5[#]		
Posição: #	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Função:	IO0_W	IO0_H	IO0_L	IO1_W	IO1_H	IO1_L	IO2_W	IO2_H	IO2_L	IO3_W	IO3_H	IO3_L	IO4_W	IO4_H	IO4_L	IO5_W	IO5_H	IO5_L
Número do byte:	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51

Figura 4.8: Pacote de dados da plataforma Radiumino [18].

Dentro de um *timeout-1* pré-definido e configurável, o sistema de controle e de apresentação de dados espera a resposta do nó de sensoriamento. Depois de receber a resposta com o dado captado e processá-la, ou depois do tempo de *timeout* ter sido finalizado, o sistema de controle

inicializa outro tempo de espera, *timeout-2*; e ao fim deste tempo gera um pacote semelhante ao primeiro; porém, desta vez endereçado ao próximo nó da rede, conforme seus endereços de rede.

O elemento de sensoriamento do sistema está conectado aos módulos de sensoriamento e de atuação que estão conectados aos módulos de comunicação do Kit Rádiumino; o que corresponde fisicamente a um nó de borda da rede. O módulo de comunicação é responsável por encapsular e colocar os cabeçalhos apropriados nos dados captados e transmiti-los ao nó coordenador da RSSF. O nó coordenador da rede se encarrega de organizar os pacotes de dados provenientes dos sensores de borda e encaminhá-los, via USB, ao computador utilizado pelo sistema. O computador, por sua vez, por meio de um programa elaborado em Python recebe os dados, processa-os e constrói uma tabela informativa que apresenta os dados ao usuário. Este procedimento de resposta deve ocorrer dentro do *timeout-1*, estabelecido pelo nó coordenador da rede para que a informação seja corretamente recebida e apresentada ao observador.

As etapas descritas anteriormente são repetidas até que o usuário decida interromper o processo de sensoriamento. Como descrito, a comunicação da RSSF se baseia em consultas (*pollings*), conforme ilustrado na Figura 4.9, priorizando o menor gasto energético. Assim, o nó de sensoriamento, só realiza a medição da informação no momento em que ela é requisitada pelo sistema de controle.

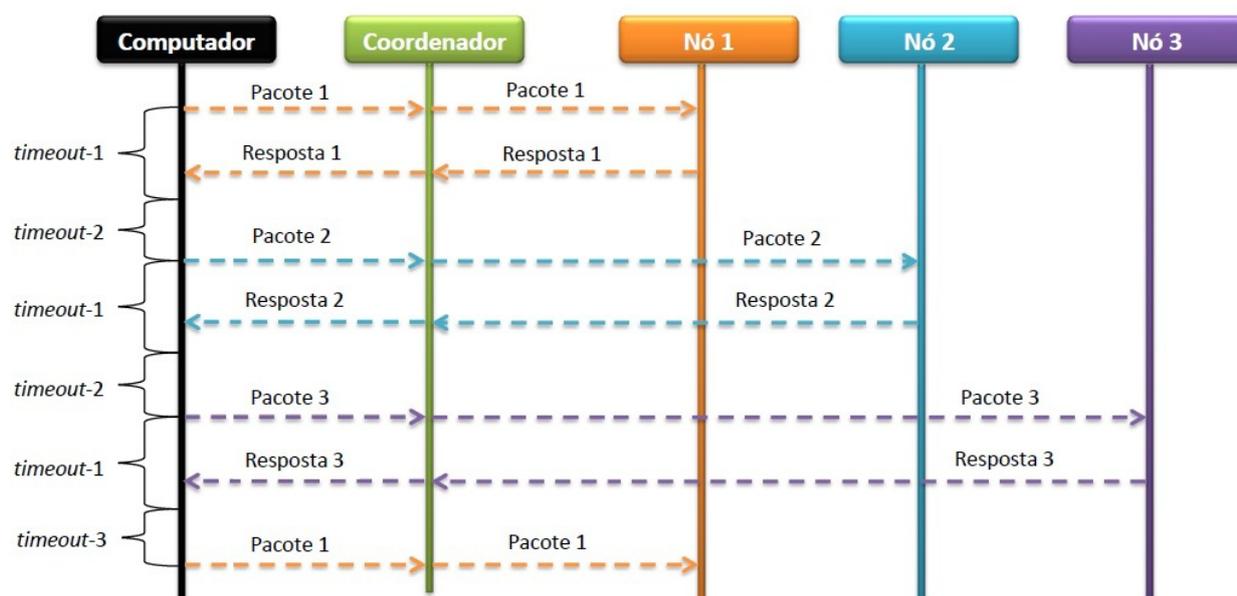


Figura 4.9: Comunicação por consultas.

Por possuir um sistema de apresentação de dados simplificado, um dispositivo de sensoria-
mento mais complexo, mais acurado e mais preciso, este sistema é voltado a um público mais
especializado, detentor de conhecimentos técnicos relativos à operação de equipamentos eletrô-
nicos. Assim, sua utilização é mais voltada aos ambientes comerciais e industriais; podendo
também ter empregabilidade residencial. Observa-se na Figura 4.10 o detalhamento do nó de
borda do sistema em análise.



Figura 4.10: Nó de borda com sensor de efeito Hall.

As funcionalidades detalhadas dos elementos do sistema são apresentadas a seguir.

4.2.1.1 Sistema de medição com sensor de efeito Hall - Elemento de Sensoriamento

O efeito Hall leva o nome do físico norte-americano que o descobriu (Edwin Hall), em 1879. Este fenômeno explica o surgimento de uma diferença de potencial entre as extremidades de um condutor em um sentido perpendicular simultaneamente ao sentido da corrente elétrica e ao sentido do campo magnético.

Logo após a descoberta deste fenômeno, verificou-se que alguns semicondutores se comportavam de forma oposta aos metais, indicando a presença de portadores de carga positiva. Isso foi verificado como sendo a condução por buracos, onde o termo buraco é encontrado na literatura,

referenciando-se a um espaço vazio outrora ocupado por um elétron. Isto significa que se elétrons se deslocam em um sentido para preencher buracos, podemos interpretar como uma condução de buracos no sentido oposto.

O efeito Hall é notado em qualquer material condutor, mas seu efeito é mais acentuado nos materiais semicondutores. A grande vantagem do uso de sensores de efeito Hall como elemento de medida de campo magnético é a capacidade de mensurar tanto campos contínuos como alternados em um único instrumento.

Deste modo, para os sensores construídos com material semicondutor, até mesmo densidades de corrente moderadas fornecem uma força eletromotriz Hall muito maior. Os sensores de efeito Hall podem, alternativamente, ser utilizados para medição da concentração (dopagem) de um material semicondutor, dado que o campo magnético ao qual ele está submetido é conhecido - ou avaliado de outra forma.

Os transdutores magnéticos ou de efeito Hall são classificados como transdutores geradores, pois têm a propriedade de gerar uma tensão quando submetidos a uma grandeza física. A Figura 4.11 ilustra o transdutor de efeito Hall utilizado no projeto do sistema de medição.



Figura 4.11: Sensor de efeito Hall LTA 50P/SP1.

O transdutor LTA 50P/SP1 utilizado no projeto pode medir correntes de até 50 A e deve ser alimentado por uma fonte simétrica de energia de +15 e -15 V, podendo variar em 5% em torno deste valor, como consta em seu *Datasheet*. Por este motivo, este sistema se torna mais complexo e conseqüentemente mais caro. A acurácia do sensor varia em até 1% do valor da

corrente nominal.

Segundo a funcionalidade do dispositivo, capta-se a intensidade de um campo magnético gerado pela corrente elétrica presente no condutor submetido à medição, por meio do fenômeno nomeado efeito Hall, e uma tensão proporcional a intensidade deste campo é gerada. De posse deste sinal, deve-se proceder com a adequação da informação até que se apresentem os dados de forma eficiente e compreensível.

4.2.1.2 Sistema de medição com sensor de efeito Hall - Elemento de Condicionamento

O dispositivo utilizado para o sensoriamento da corrente elétrica é fabricado de maneira a condicionar o sinal capturado, desta forma, não há necessidade de se implementar um sistema que condicione o sinal. Por esta razão, o sensor utilizado é também denominado transdutor de efeito Hall. O sinal condicionado e fornecido pelo dispositivo é um sinal de tensão contínua, com valor linearmente proporcional à corrente sensoriada.

Como o sinal captado já está condicionado, o transdutor de efeito Hall é conectado diretamente ao módulo de sensoriamento e atuação, que por sua vez está conectado ao módulo de comunicação que se encarrega de organizar o pacote, colocando os cabeçalhos de cada camada do *firmware*, e enviá-lo ao nó coordenador da RSSF.

4.2.1.3 Sistema de medição com sensor de efeito Hall - Elemento de Processamento

O processamento do sinal referente ao que foi captado pelo sensor de efeito Hall é de fácil implementação. Para o sistema proposto, a etapa de processamento do sinal foi implementada dentro do programa de apresentação e de controle de dados, escrito em linguagem Python.

O processamento do sinal adequa o valor da tensão elétrica fornecida pelo sensor ao valor correspondente de corrente elétrica eficaz, responsável pelo campo magnético medido. Posteriormente, o valor correspondente à corrente medida é tratado de modo a se obter uma boa aproximação do valor da energia consumida pelo circuito elétrico sensoriado dentro de determinado intervalo de tempo. Conforme foi obtido pelo *Datasheet* do dispositivo e por comprovações práticas, mediante testes laboratoriais, a equação que adéqua o sinal do dispositivo é uma equação

linear que passa pela origem do plano cartesiano. Aplicando o valor de tensão, proveniente do condicionamento do sinal, à equação linear, obtém-se o valor eficaz da corrente elétrica sensorizada pelo sistema. A equação que traduz o valor do sinal de tensão do sistema no valor da corrente elétrica eficaz captada é dada pela Equação 4.1.

$$I_{\text{rede}} = 10V_s. \quad (4.1)$$

Com o valor da corrente elétrica do sistema, propôs-se utilizar o valor da tensão elétrica eficaz da rede de modo aproximado, a fim de se obter a potência elétrica instantânea do sistema analisado, segundo a Equação 4.2.

$$P_{\text{rede}} = I_{\text{rede}}V_{\text{rede}}. \quad (4.2)$$

A utilização da média da tensão eficaz da rede foi escolhida para que não fossem necessárias conexões elétricas entre a rede de sensoriamento e a rede do sistema elétrico. Estas aproximações, entretanto, não afetam a eficácia do sistema nem a qualidade dos dados fornecidos. Como o sensor capta apenas a informação referente à intensidade da corrente elétrica consumida, não há informação sobre a sua fase; portanto, considera-se a fim de simplificação que a potência aparente corresponde a potência ativa, o que superestima o valor da potência ativa e consequentemente da energia consumida, mas não acarreta prejuízo, visto que na prática a potência reativa de sistemas residenciais representa uma pequena fração da potência aparente. Para sistemas industriais, entretanto, a potência reativa possui maior importância.

Por fim, para a obtenção da energia elétrica consumida pelo sistema ou aparelho elétrico submetido ao sensoriamento, faz-se necessário o conhecimento de duas amostras de potência elétrica já obtidas em intervalos de tempo coerentes com a unidade escolhida. De posse destas duas amostras de potência ($P_{\text{rede}}(t_i)$ e $P_{\text{rede}}(t_{i-1})$) e do intervalo de tempo entre a obtenção de cada uma ($t_i - t_{i-1}$), a energia elétrica consumida durante este período pode ser aproximada pela Equação 4.3, conhecida como regra do trapézio.

$$E_i = \frac{P_{\text{rede}}(t_i) + P_{\text{rede}}(t_{i-1})}{2}(t_i - t_{i-1}). \quad (4.3)$$

Considerando que a potência antes das medições possui valor igual a zero, utiliza-se a Equação

4.4 para a obtenção do valor da energia consumida pela rede ou aparelho até o instante N.

$$E_N = \sum_{i=0}^N E_i. \quad (4.4)$$

Sendo esta energia, E_N , a energia atualizada e apresentada pelo programa.

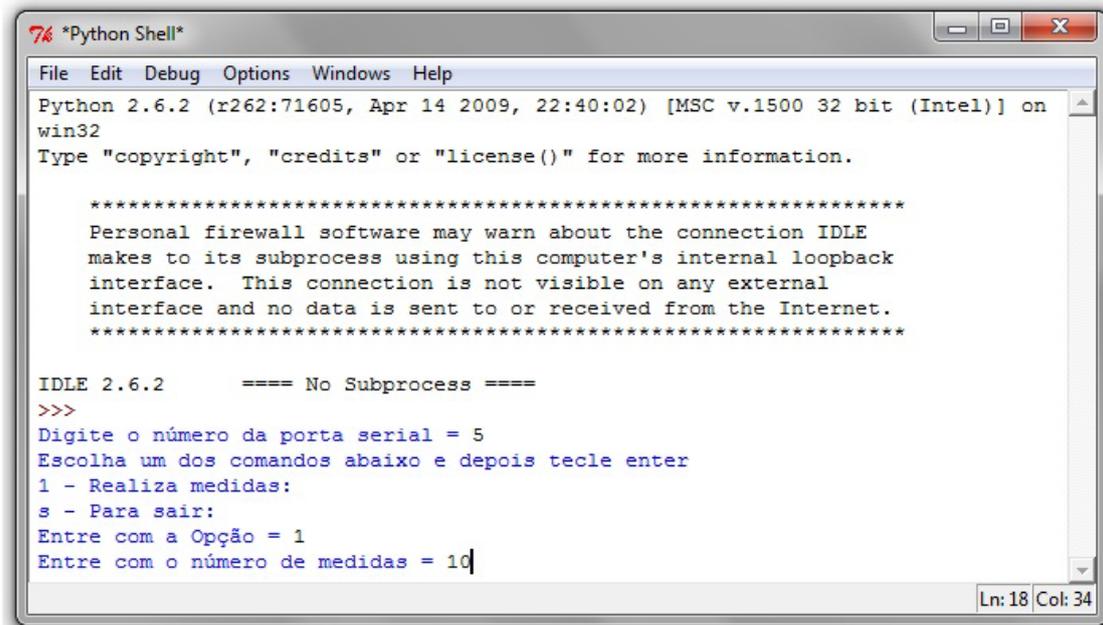
4.2.1.4 Sistema de medição com sensor de efeito Hall - Elemento de Apresentação

O elemento de apresentação de dados proposto para este sistema consiste de um programa em linguagem de programação Python e é uma ferramenta simplificada; porém, atende de forma satisfatória às necessidades demandadas pelo projeto. Ao iniciar o programa, são requisitadas três informações:

- O número da porta serial utilizada na comunicação entre o computador e o módulo coordenador;
- Um caractere para indicar a opção escolhida entre: 1 - para realizar medição ou s - para sair do programa;
- Caso o usuário tenha escolhido a opção 1 - realizar medições; a próxima informação a ser inserida no programa será o número de medições que ele deseja realizar. Este número caracterizará quantas consultas o módulo coordenador fará à rede.

No que tange a visualização dos dados que são recebidos por meio da rede, o programa realiza duas funções principais; a primeira delas é ilustrada na Figura 4.12, em que os dados referentes às medições de cada um dos sensores são apresentados na tela em tempo real.

Como observado, o programa não concebe uma interface gráfica propriamente dita, e sim uma interface do tipo textual. A segunda função consiste no armazenamento dos dados em um arquivo de formato txt, como na estrutura exemplificada na Figura 4.13; apresentando os dados referentes à energia consumida, captada por cada sensor e a hora correspondente a cada medida.



```
*Python Shell*
File Edit Debug Options Windows Help
Python 2.6.2 (r262:71605, Apr 14 2009, 22:40:02) [MSC v.1500 32 bit (Intel)] on
win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.

*****
Personal firewall software may warn about the connection IDLE
makes to its subprocess using this computer's internal loopback
interface. This connection is not visible on any external
interface and no data is sent to or received from the Internet.
*****

IDLE 2.6.2      ==== No Subprocess ====
>>>
Digite o número da porta serial = 5
Escolha um dos comandos abaixo e depois tecle enter
1 - Realiza medidas:
s - Para sair:
Entre com a Opção = 1
Entre com o número de medidas = 10
```

Figura 4.12: Apresentação de dados do sistema com o sensor de efeito Hall.

4.2.2 Sistema de Medição Energética com Sensor de Corrente por Efeito Indutivo

O sistema de medição com o sensor de corrente que atua por efeito indutivo também possui os quatro elementos básicos dos sistemas de medição típicos, de acordo com [17]. O sistema é também composto por quatro nós, sendo três responsáveis pelo sensoriamento e um pela coordenação da RSSF.

A comunicação e o controle da RSSF são iniciados a partir do programa Home Energy Monitor (HEM), implementado em Java. O controle da rede é executado no computador conectado ao nó coordenador. Por meio do programa de apresentação de dados, como no sistema anterior, faz-se também o controle da comunicação entre o computador e o nó coordenador e da comunicação entre os nós da RSSF; desta forma, o usuário decide quando as medições devem ser iniciadas ou interrompidas.

A partir do comando responsável por iniciar o processo de comunicação, inserido no programa HEM responsável pelo controle da comunicação, também responsável pela apresentação de dados, gera-se um pacote de dados de 52 bytes com a mesma estrutura ilustrada na Figura 4.8. O pacote é endereçado ao primeiro nó de sensoriamento; enviado para o nó coordenador da rede

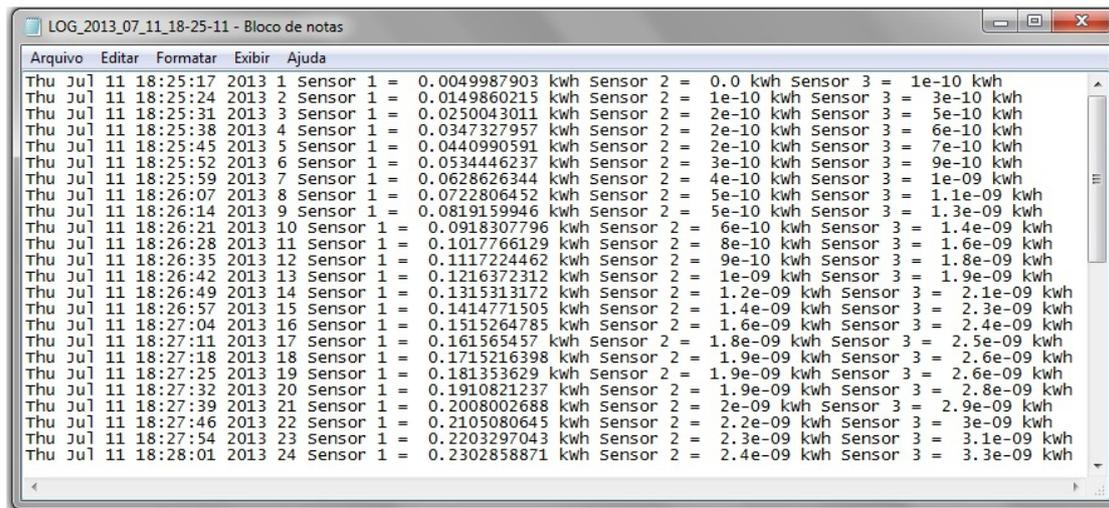


Figura 4.13: Arquivo de armazenamento de dados do sistema com o sensor de efeito Hall.

que transmite o pacote ao nó ao qual o pacote está endereçado. Quando o pacote é recebido pelo nó de borda da rede, o módulo de comunicação conectado ao módulo de sensoriamento coordena, por meio do programa, a atuação do sensor de corrente.

De modo semelhante ao que ocorre no outro sistema proposto, dentro de um *timeout-1* pré-definido e configurável, o sistema de controle e de apresentação de dados, espera a resposta do nó de sensoriamento. Depois de receber a resposta, com o dado captado, ou depois do tempo de *timeout-1* ter sido finalizado, o sistema de controle inicializa outro tempo de espera, o *timeout-2*, e ao fim deste tempo gera um pacote semelhante ao primeiro; porém, desta vez endereçado ao próximo nó da rede, conforme seus endereços de rede.

O elemento de sensoriamento do sistema, o sensor de corrente, está conectado aos módulos de sensoriamento e de atuação que estão conectados aos módulos de comunicação do Kit Rádium. O módulo de comunicação é responsável por encapsular e por colocar os cabeçalhos apropriados nos dados captados e transmiti-los ao nó coordenador da RSSF. O nó coordenador da rede possui a tarefa de organizar os pacotes de dados originários dos sensores de borda e de encaminhá-los, via USB, ao computador utilizado pelo sistema. O computador, por sua vez, por meio do programa escrito em Java recebe os dados, processa-os e constrói um gráfico informativo que apresenta os dados ao usuário. Este procedimento de resposta deve ocorrer dentro do *timeout-1*, estabelecido pelo nó coordenador para que a informação seja corretamente recebida e os dados possam ser apresentados ao observador.

As etapas descritas anteriormente são repetidas até que o usuário decida interromper o processo de sensoriamento. Como descrito, a comunicação da RSSF se baseia em consultas, conforme ilustrado na Figura 4.9, priorizando a eficiência dos gastos energéticos.

Observa-se na Figura 4.14 o detalhamento do nó de borda do sistema em análise.

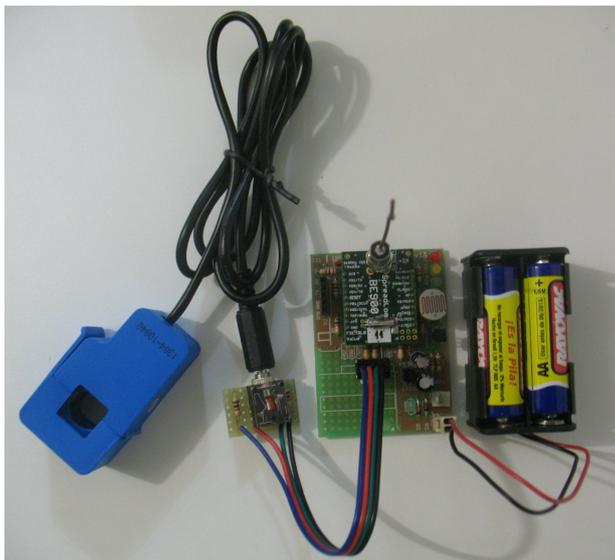


Figura 4.14: Nó de borda com sensor de efeito indutivo.

As funcionalidades detalhadas dos elementos do sistema são apresentadas a seguir.

4.2.2.1 Sistema de medição com sensor de corrente por efeito indutivo - Elemento de Sensoriamento

O sensor de corrente é um dispositivo que capta a intensidade do campo magnético produzido pela presença de uma corrente alternada de um sistema em análise e permite que este valor seja, de algum modo, traduzido para um sinal compreensível.

Seu funcionamento é similar ao dos transformadores de potência, uma vez que, a corrente alternada sensorizada produz um campo magnético proporcional a sua intensidade. Este campo magnético induz corrente em uma bobina; no caso em análise, a bobina do sensor. Esta indução proporciona a passagem de corrente na bobina que em seu terminal final, devido à existência de resistores; fornece uma tensão alternada de amplitude proporcional à da corrente sensorizada. Desta forma, o sinal obtido é uma tensão alternada proporcional à corrente medida.

O sensor utilizado no projeto do sistema proposto está ilustrado na Figura 4.15, este sensor pode ser utilizado para medir correntes de até 15 A. Este dispositivo possui uma característica vantajosa em relação ao sensor de efeito Hall: permite que a corrente elétrica que flui por um condutor seja mensurada de maneira não invasiva, ou seja, não há a necessidade de se manipular conexões elétricas.



Figura 4.15: Sensor de corrente SCT-013.

4.2.2.2 Sistema de medição com sensor de corrente por efeito indutivo - Elemento de Condicionamento

Para adequar o sinal fornecido pelo sensor ao sistema de medição, faz-se necessário o condicionamento do sinal de tensão. Esta etapa de adequação do sinal é realizada por *hardware* e por *firmware*. Este processo de condicionamento de sinal possui um custo-benefício adequado à proposta do sistema. O *firmware* está implementado no módulo de comunicação do nó da rede, interligado ao sensor pelo módulo de sensoriamento e de atuação. A interligação entre o elemento de sensoriamento e o módulo de sensoriamento e de atuação é feita por meio do circuito de condicionamento mostrado na Figura 4.17.

O sinal nos terminais do sensor é uma onda senoidal de frequência igual à da rede, aproximadamente 60 Hz, com média zero. A primeira etapa do condicionamento do sinal consiste em

elevar sua média, processo implementado pelo circuito mostrado na Figura 4.17. A Figura 4.16 apresenta um esquemático da técnica utilizada para realizar esta parte do condicionamento do sinal.

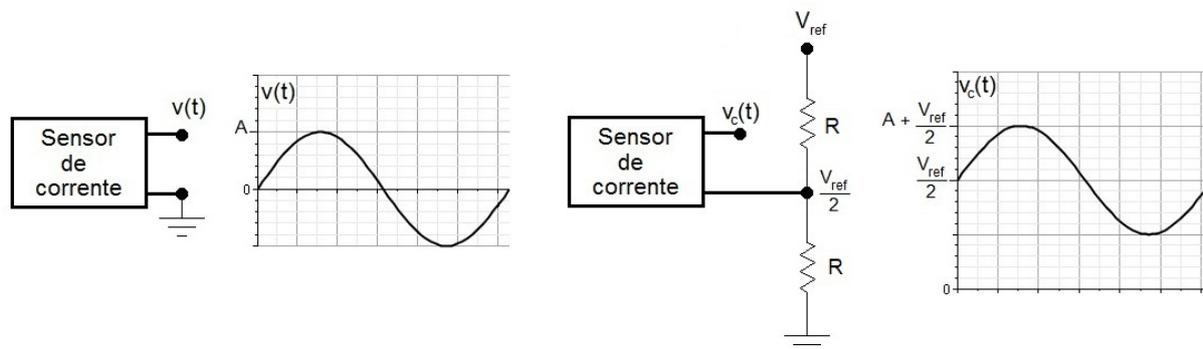


Figura 4.16: Esquemático do condicionamento.



Figura 4.17: Circuito de condicionamento.

Para o restante do condicionamento do sinal, o *firmware* do Rádiumino, na camada de aplicação, amostra o sinal de tensão fornecido pelo sensor de corrente conectado ao módulo de sensoriamento e de atuação, com frequência suficiente para este propósito; respeitando a frequência de Nyquist. A partir da amostragem deste sinal, submetem-se os dados à formulação da Equação 4.5, de forma a se obter o valor RMS da onda e utilizar este valor de tensão para efetivamente traduzi-lo em um valor de corrente eficaz.

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}. \quad (4.5)$$

Após o condicionamento do sinal, o nó se encarrega de transmitir o pacote de dados ao nó coordenador da rede que o envia ao computador do sistema que realiza o seu processamento e a

sua apresentação.

4.2.2.3 Sistema de medição com sensor de corrente por efeito indutivo - Elemento de Processamento

O processamento do sinal referente ao que foi captado pelo sensor de corrente é realizado de maneira semelhante ao processamento do sistema com o sensor de efeito Hall. Para o sistema aqui proposto, a etapa de processamento do sinal foi implementada dentro do programa de apresentação e de controle de dados, escrito em linguagem Java.

O processamento do sinal corresponde a adequar o valor medido e condicionado, referente à tensão RMS, ao valor correspondente de corrente elétrica responsável pelo campo magnético medido. Posteriormente, calcula-se o valor da energia consumida pelo circuito elétrico sensoriado em um determinado intervalo de tempo. Conforme foi obtido pelo Datasheet do dispositivo e por comprovações práticas, mediante testes laboratoriais, a equação que adequa o sinal do dispositivo é uma equação linear que passa pela origem do plano cartesiano. Aplicando o valor de tensão RMS, proveniente do condicionamento do sinal, à equação linear, obtém-se o valor eficaz da corrente elétrica sensorizada pelo sistema. A equação que traduz o valor do sinal de tensão do sistema no valor da corrente elétrica eficaz captada é dada pela Equação 4.6.

$$I_{\text{rede}} = 15x_{\text{RMS}}. \quad (4.6)$$

De posse do valor da corrente elétrica do sistema, propôs-se utilizar o valor da tensão elétrica eficaz da rede de modo aproximado, a fim de se obter a potência elétrica instantânea do sistema analisado, segundo a Equação 4.2; de modo semelhante ao que foi praticado para o outro sistema proposto.

A utilização da média da tensão eficaz da rede, semelhante ao que foi proposto anteriormente, foi escolhida para que não fossem necessárias conexões elétricas entre a rede de sensoriamento e a rede do sistema elétrico. Estas aproximações, entretanto, não afetam a eficácia do sistema nem a qualidade dos dados fornecidos. Como o sensor capta apenas a informação referente à intensidade da corrente elétrica consumida, não há informação sobre a sua fase; portanto, considera-se, a fim de simplificação, que a potência aparente é 100% ativa, o que superestima o valor da potência ativa e, conseqüentemente da energia consumida, mas não acarreta prejuízo; visto que, na prática

a potência reativa de sistemas residenciais, representa uma pequena fração da potência aparente.

Por fim, para a obtenção da energia elétrica consumida pelo sistema ou pelo aparelho elétrico submetido ao sensoriamento, faz-se necessário o conhecimento de duas amostras de potência elétrica já obtidas em intervalos de tempo coerentes com a unidade escolhida. De posse destas duas amostras de potência ($P_{rede}(t_i)$ e $P_{rede}(t_{i-1})$) e do intervalo de tempo entre a obtenção de cada uma ($t_i - t_{i-1}$), a energia elétrica consumida durante este período pode ser aproximada pela Equação 4.3.

Considerando que a potência antes das medições possui valor igual a zero, para a obtenção do valor da energia consumida pela rede ou pelo aparelho, até o instante N é fornecida pela Equação 4.4. Sendo E_N , a energia atualizada e apresentada pelo programa de apresentação.

4.2.2.4 Sistema de medição com sensor de corrente por efeito indutivo - Elemento de Apresentação

O elemento de apresentação de dados proposto para este sistema compõe uma parte do programa construído em linguagem de programação Java, o HEM. Ao contrário do programa em Python, este foi implementado com base em uma interface gráfica, como ilustrado na Figura 4.18. Além de se apresentar de forma mais acessível e intuitiva ao usuário, o HEM possuiu mais funcionalidades e maior interatividade. Assim como no programa em Python, elaborado em uma proposta complementar, o HEM também permite o armazenamento dos dados da medição da energia consumida com seu horário correspondente; porém, com opção de os dados serem salvos ou não. A Figura 4.19 ilustra o arquivo de dados salvos do sistema.

O sistema HEM apresenta graficamente a energia consumida pelo ambiente ou pelo aparelho sensoriado em função do tempo, sendo estes dados atualizados em tempo real. É possível interagir e controlar a visualização do gráfico com o *mouse* e também por meio das caixas de verificação. Com as caixas de verificação é possível escolher de qual ambiente ou aparelho a energia monitorada deve ser exibida no gráfico do programa. Além disso, o HEM também indica a energia total consumida, a potência instantânea e o custo em reais referente ao consumo; todos em tempo real.

O controle da rede é realizado através dos botões "Iniciar" e "Parar". Ao clicar em "Iniciar", o programa perguntará ao usuário se ele deseja salvar os dados da medição em um arquivo txt.

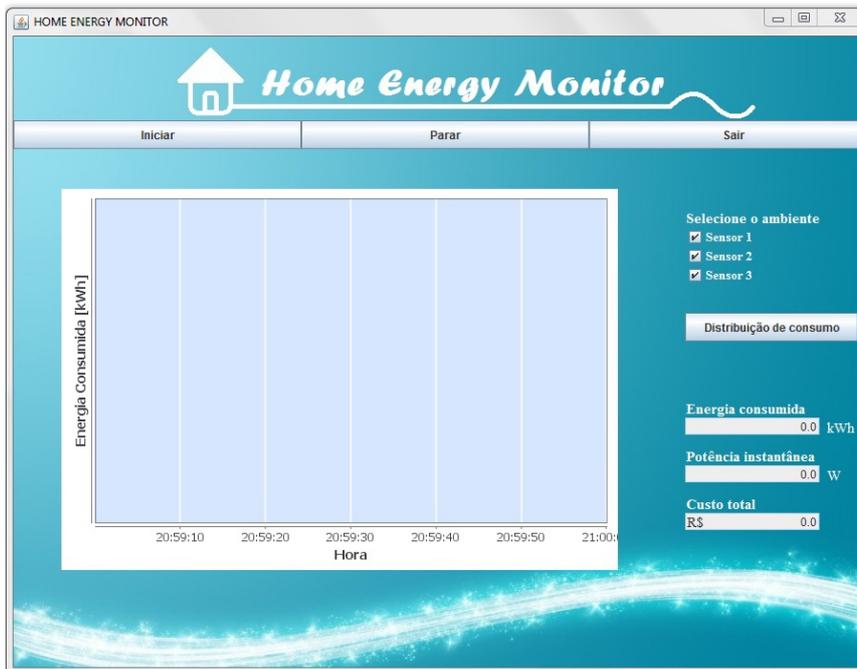


Figura 4.18: Interface gráfica do programa HEM.

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda			
2013/08/20	19:11:22	Sensor 1: 0.000000000000000	kwh	Sensor 2: 0.000000000000000	kwh	Sensor 3: 0.000000000000000	kwh
2013/08/20	19:11:34	Sensor 1: 0.002554838709641	kwh	Sensor 2: 0.0008387097421213	kwh	Sensor 3: 0.001423790580645	kwh
2013/08/20	19:11:38	Sensor 1: 0.007637903220645	kwh	Sensor 2: 0.0017298709677419	kwh	Sensor 3: 0.003446370967742	kwh
2013/08/20	19:11:42	Sensor 1: 0.010186088967741	kwh	Sensor 2: 0.0023086693548380	kwh	Sensor 3: 0.004045161290322	kwh
2013/08/20	19:11:46	Sensor 1: 0.010199316129032	kwh	Sensor 2: 0.0033798387096419	kwh	Sensor 3: 0.441754233870967	kwh
2013/08/20	19:11:50	Sensor 1: 0.012296129032257	kwh	Sensor 2: 0.0593334677435482	kwh	Sensor 3: 0.879463306451612	kwh
2013/08/20	19:11:54	Sensor 1: 0.013092741935483	kwh	Sensor 2: 0.1142292330967731	kwh	Sensor 3: 0.879463306451612	kwh
2013/08/20	19:11:58	Sensor 1: 0.014423387096774	kwh	Sensor 2: 0.1142358096774183	kwh	Sensor 3: 0.879463306451612	kwh
2013/08/20	19:12:02	Sensor 1: 0.015410709677419	kwh	Sensor 2: 0.1142387096774183	kwh	Sensor 3: 0.880880443548387	kwh
2013/08/20	19:12:06	Sensor 1: 0.016949999999999	kwh	Sensor 2: 0.1148064516129023	kwh	Sensor 3: 0.883721370967741	kwh
2013/08/20	19:12:10	Sensor 1: 0.025564516129032	kwh	Sensor 2: 0.1952419354838692	kwh	Sensor 3: 0.886575604838709	kwh
2013/08/20	19:12:14	Sensor 1: 0.027038709677935	kwh	Sensor 2: 0.1170967741935482	kwh	Sensor 3: 0.889416532258064	kwh
2013/08/20	19:12:17	Sensor 1: 0.030019354870967	kwh	Sensor 2: 0.1176756048387651	kwh	Sensor 3: 0.890827016129032	kwh

Figura 4.19: Arquivo de armazenamento de dados do programa HEM.

Esta proposta de sistema tem foco residencial, uma vez que não requer conhecimento técnico especializado, podendo ser adaptada a outros ambientes para prover o monitoramento energético demandado.

4.2.3 Adaptabilidade e Configuração Física dos Sistemas de Medição

Os sistemas de medição propostos apresentaram-se igualmente eficientes, embora utilizem sensores e programas de controle e de apresentação diferentes. Mesmo possuindo propostas bem definidas e características de *hardware*, *firmware* e *software* distintas, os sistemas propostos anteriormente podem comutar infra-estrutura e recursos computacionais, o que permite adequar

elementos de um sistema ao outro sem perda de funcionalidade.

Dentre as vantagens dos sistemas em estudo está a adaptabilidade dos mesmos mediante a possibilidade da realização das medições tanto em ambientes quanto em aparelhos que consumam energia.

Para realizar as medições do consumo de aparelhos eletrodomésticos deve-se introduzir o condutor elétrico que alimenta o aparelho ao núcleo dos sensores, conforme ilustrado nas Figuras 4.20 e 4.21. Esta configuração permite que o campo magnético gerado pela corrente que flui pelo condutor atue nos sensores que captam a intensidade deste campo.



Figura 4.20: Acoplamento magnético entre o sensor de corrente e o condutor.



Figura 4.21: Acoplamento magnético entre o sensor de efeito Hall e o condutor.

Devido à forma de atuação dos dispositivos de sensoriamento, apenas um condutor de corrente deve ser inserido ao núcleo do sensor, caso os dois fios de condução sejam inseridos simultaneamente ao núcleo do sensor e o sentido da corrente destes condutores se oponha; seus campos magnéticos se cancelarão, impossibilitando a medição correta. Caso seja necessário, pode-se

utilizar uma extensão, proposta neste projeto, que possua os fios de alimentação separados, possibilitando a medição do consumo de energia. A Figura 4.22 ilustra a extensão proposta.



Figura 4.22: Extensão elétrica.

As medições em nível de ambientes necessitam de configurações distintas da RSSF. A arquitetura de disposição das redes de sensores dependerá de como o circuito elétrico da residência foi concebido.

As medições do consumo energético podem ser feitas nos quadros elétricos das residências, lojas ou indústrias, conforme ilustrado na Figura 4.23. Para a realização deste tipo de medição, deve-se introduzir o condutor elétrico ao núcleo dos sensores. Com esta configuração é possível mensurar a corrente demandada em cada circuito do quadro elétrico, o que permite o maior detalhamento dos níveis de consumo.

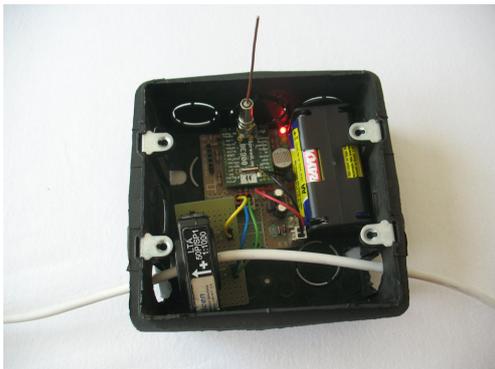
O sensor de corrente por efeito indutivo se adapta facilmente a este tipo de medição, já que possui uma configuração física manipulável que permite o fácil e o prático acoplamento magnético entre o núcleo do sensor e o condutor de corrente. O sensor de corrente utilizado no projeto é um dispositivo de encaixe, o que facilita o acoplamento magnético entre o sensor e o condutor. O sensor de efeito Hall, por sua vez, não permite alterações em sua constituição física, o que exige que os condutores elétricos sejam manipulados para que possam ser inseridos ao núcleo do sensor.

Para realizar a medição do consumo energético de cômodos que compartilhem circuitos elétricos, basta inserir um sensor no início do circuito elétrico de cada cômodo, ou seja, antes das derivações elétricas que alimentam todos os pontos de energia do cômodo; desta forma, é possível mensurar a energia consumida por cômodos individualmente. Esta configuração pode ser estruturada por meio da acomodação dos elementos de sensoriamento em caixas de passagem elétricas existentes nos circuitos elétricos residenciais, comerciais ou industriais. A Figura 4.24 ilustra este



Figura 4.23: Conexão do sensor em um quadro elétrico.

tipo de configuração do sistema de medição.



(a) Utilizando o sensor de efeito Hall.



(b) Utilizando o sensor de efeito Indutivo.

Figura 4.24: Configuração de medição dos sistemas.

4.3 CONCLUSÃO

Este capítulo destinou-se à apresentação descritiva e detalhada de dois sistemas de sensoria-
mento de consumo energético. Estes sistemas possuem a mesma funcionalidade básica, distinguindo-
se em relação ao elemento de sensoriamento utilizado e ao sistema de apresentação de dados

implementado.

Os sistemas consistem, basicamente, de uma rede de sensoriamento dotada de três nós sensores e um nó coordenador. Os nós sensores se comunicam, por meio de multiplexação temporal, com o nó coordenador e este com um computador, via USB, que armazena e apresenta os dados sensorizados.

As descrições de *hardware*, *firmware* e *software* foram feitas de maneira que a funcionalidade do sistema fosse esclarecida. Observou-se através destas análises que os dois sistemas foram implementados com o auxílio do Kit de desenvolvimento Rádium e um computador, responsável pelo controle e pela apresentação dos dados capturados.

As apresentações dos dados constituídas por programas foram desenvolvidas por duas linguagens de programação, Python e Java. Os programas dotaram de algoritmos responsáveis pela construção gráfica referente aos dados de energia; sendo também responsáveis pelo controle da comunicação serial entre o nó de controle da rede e o computador utilizado para complementar o sistema, e pelo controle do início e do fim da atuação da RSSF.

5 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

5.1 INTRODUÇÃO

O fornecimento dos resultados obtidos por meio dos testes práticos auxilia o procedimento analítico referente à qualidade dos sistemas propostos. Mediante os resultados adquiridos, podem-se alcançar conclusões mais realistas a respeito dos sistemas de medição e da rede de comunicação sem fio utilizada.

Este capítulo está organizado de maneira a apresentar os resultados obtidos durante a elaboração deste trabalho, apresentando uma simulação das medições e a obtenção destes dados até a sua apresentação nos programas de apresentação elaborados.

5.2 METODOLOGIA DE TESTES

A metodologia de testes teve como foco principal a utilização da rede de comunicação sem fio para comprovar seu funcionamento e a posterior integração dos elementos de medição à RSSF para que fosse feita a verificação da funcionalidade do sistema.

5.2.1 Rede de Comunicação Sem Fio

A rede de comunicação foi submetida a testes em diversos ambientes para que fosse realizada a verificação e comprovação da eficiência de comunicação da rede. Foi constatada a eficácia da comunicação para distâncias de até oito metros entre os nós de comunicação da rede.

Para a verificação do trâmite de informações na rede, foi pré-definido um pacote de dados, foi realizada a transmissão deste pacote até o nó de borda que o reenviou e, posteriormente, foi averiguada a condição da informação inserida no pacote após o seu recebimento pelo nó coordenador.

A comunicação entre os dispositivos de borda da rede e o nó coordenador foi averiguada em testes de duração aproximada de dezoito horas ininterruptas, sendo realizados outros testes de

curta duração. A resposta da rede de comunicação mediante a realização de vários testes de curta duração seguidos se mostrou igualmente adequada.

5.2.2 Sistema de Medição de Energia

Após a realização dos testes da rede de comunicação, os demais dispositivos dos sistemas propostos foram integrados aos nós de comunicação da rede, formando as RSSF.

As duas RSSF propostas foram submetidas a testes de medição em ambientes controlados, o que possibilitou a comprovação da eficiência dos resultados obtidos. Os testes foram realizados, inicialmente, nos laboratórios de Circuitos Elétricos e de Conversão de Energia do prédio SG11 da Universidade de Brasília. Os laboratórios possuem dispositivos que fornecem e conduzem energia elétrica e simulam eficientemente os circuitos elétricos que alimentam diversos ambientes.

Os testes foram realizados a fim de aferir as respostas dos sensores de corrente por efeito indutivo e por efeito Hall quando submetidos aos campos magnéticos gerados pelas correntes que fluíam pelos condutores analisados; e para confirmar a relação entre a intensidade da corrente sensoriada com o valor de tensão fornecido pelo dispositivo de sensoriamento. Desta forma, foram comprovadas as relações matemáticas dos sinais dos sensores, segundo as Equações 4.1 e 4.6.

Tendo sido garantidas as relações matemáticas regentes da atuação dos sensores utilizados, foram realizados testes com os sistemas de sensoriamento completos. Os testes realizados foram executados sempre com a motivação de simular adequadamente os gastos energéticos de ambientes residenciais, comerciais e industriais e atestar a adequação dos sistemas por meio das medições verificadas. As Tabelas 5.1 e 5.2 fornecem os resultados da elaboração dos testes para os dois sistemas de medição propostos.

Os valores das correntes esperadas ilustrados nas Tabelas 5.1 e 5.2 foram obtidos com auxílio de um multímetro conectado em série com o circuito sensoriado. A bancada do laboratório utilizada nos testes permitiu com que a tensão de alimentação do circuito fosse mantida em 220 V, verificada também com a utilização de um multímetro.

Tabela 5.1: Resultado das medições com sensor de efeito Hall.

Resultados Esperados		Resultados Obtidos					
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3	
Corrente [A]	Potência [W]	Corrente [A]	Potência [W]	Corrente [A]	Potência [W]	Corrente [A]	Potência [W]
0,970	213,40	0,93548	205,8056	0,93548	205,8056	0,93548	205,8056
2,985	656,70	2,96774	652,9028	2,96774	652,9028	2,93548	645,8056
4,987	1097,14	4,96774	1092,9028	4,96774	1092,9028	4,98700	1097,1400
5,986	1316,92	5,96774	1312,8280	5,96774	1312,8280	5,96774	1312,8280
6,987	1537,14	6,96774	1532,9028	6,98700	1537,1400	6,98700	1537,1400
7,985	1756,70	7,96774	1752,9028	7,96774	1752,9028	7,96774	1752,9028
8,996	1979,12	8,96774	1972,9028	8,99600	1979,1200	8,99600	1979,1200
9,498	2089,56	9,48387	2086,4514	9,51613	2093,5486	9,48387	2086,4514
9,988	2197,36	9,96774	2192,9028	9,98800	2197,3600	9,98800	2197,3600
12,040	2648,80	12,03226	2647,0972	12,01446	2643,1812	12,02998	2646,5956
14,989	3297,58	14,96674	3292,9028	14,96674	3292,9028	14,96674	3292,9028
16,987	3737,14	16,98373	3736,4206	17,06452	3754,1944	16,96774	3732,9028
19,998	4399,56	19,99800	4399,5600	19,98323	4396,3106	19,98323	4396,3106
23,999	5279,78	23,99856	5279,6832	23,99856	5279,6832	23,99856	5279,6832
25,013	5502,86	25,00000	5500,0000	25,00967	5502,1274	25,01612	5503,5464
26,012	5722,64	26,00000	5720,0000	26,16129	5755,4838	26,16129	5755,4838
30,050	6611,00	30,03226	6607,0972	30,10355	6622,7810	30,08677	6619,0894
32,998	7259,56	33,00000	7260,0000	33,00000	7260,0000	33,00000	7260,0000

Diante do que se observa, por meio dos dados da Tabela 5.1, a análise destes dados de medição constata que o erro percentual entre os valores de corrente medida e esperada é de no máximo 3,558%; este valor permite a constatação da boa qualidade das medições do sistema. O erro máximo em termos das potências referentes às correntes medidas é o mesmo erro dos valores das correntes. Estes valores são razoáveis para o que se espera dos sistema proposto.

Tabela 5.2: Resultados das medições com sensor de efeito indutivo.

Resultados Esperados		Resultados Obtidos					
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3	
Corrente [A]	Potência [W]	Corrente [A]	Potência [W]	Corrente [A]	Potência [W]	Corrente [A]	Potência [W]
0,960	211,20	0,92455	203,4010	0,92455	203,4010	0,92455	203,4010
2,998	659,56	2,95434	649,9548	2,95434	649,9548	2,93522	645,7484
4,989	1097,58	4,96180	1091,5960	4,96180	1091,5960	4,96180	1091,5960
5,989	1317,58	5,94889	1308,7558	5,94889	1308,7558	5,93534	1305,7748
6,990	1537,80	6,95997	1531,1934	6,95997	1531,1934	6,95997	1531,1934
7,987	1757,14	7,97165	1753,7630	7,97165	1753,7630	7,96502	1752,3444
8,998	1979,56	8,96524	1972,3528	8,96524	1972,3528	8,96524	1972,3528
9,498	2089,56	9,47710	2084,9620	9,47710	2084,9620	9,46301	2081,8622
9,989	2197,58	9,96192	2191,6224	9,96192	2191,6224	9,96192	2191,6224
11,988	2637,36	11,96997	2633,3934	11,96997	2633,3934	11,96899	2633,1778
14,988	3297,36	14,96325	3291,9150	14,97102	3293,6244	14,95998	3291,1956

É possível fazer uma análise semelhante à realizada para os resultados do sistema com o sensor de efeito Hall. Os resultados, obtidos por meio dos testes com o sistema que utiliza o sensor de corrente por efeito indutivo, são caracterizados por apresentarem um erro percentual máximo de 3,693%, em relação às correntes esperadas e o mesmo valor de erro em relação às potências esperadas. Tais resultados atestam o alcance dos objetivos descritos e a eficácia do sistema com proposta acadêmica.

O restante dos testes se baseou na medição do consumo energético de aparelhos eletrodomês-

ticos. Este teste foi aplicado ao sensor de corrente que atua por meio do efeito indutivo, pois o sistema proposto com este sensor é mais adequado ao sensoriamento de ambientes residenciais e aparelhos eletrônicos, por não exigir o manuseio técnico especializado para a configuração do sistema. Para a realização dos procedimentos experimentais utilizou-se os aparelhos listados na Tabela 5.3 com suas respectivas potências.

Os resultados obtidos, referentes às medições dos aparelhos submetidos à medição energética estão ilustrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultado das medições em aparelhos com sensor de efeito indutivo.

Aparelho		Resultados Obtidos		
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Nome	Potência nominal [W]	Potência [W]	Potência [W]	Potência [W]
Ferro de passar	1200	1122,8301	1122,8301	1122,8301
Liquidificador	200	195,3540	195,3540	197,1104
Micro-ondas	1500	1451,4250	1451,4250	1451,4250
Secador de cabelo	1830	1666,5521	1664,7032	1666,5521

Os dados obtidos pelo sensoriamento de aparelhos eletrodomésticos, ilustrados na Tabela 5.3, demonstram que o sistema de medição implementado com o sensor de corrente que atua por efeito indutivo é apto à medir a corrente e, conseqüentemente, o consumo de energia de equipamentos alimentados por energia elétrica. A acurácia das medições alcançou níveis de 98,50% em relação aos valores esperados.

Com a intenção de se concluir a realização dos testes experimentais, foram realizadas medições em ambientes não controlados e foram obtidos os resultados provenientes das interfaces de cada sistema de medição conforme as Figuras 5.1 e 5.2.

Na Figura 5.3 pode ser observada uma forma gráfica alternativa que auxilia a visualização da energia mensurada por cada nó de borda da rede; esta forma de apresentação permite a observação da distribuição do consumo de energia elétrica.

```

Python Shell
File Edit Debug Options Windows Help
Python 2.6.2 (r262:71605, Apr 14 2009, 22:40:02) [MSC v.1500 32 bit (Intel)] on
win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.

*****
Personal firewall software may warn about the connection IDLE
makes to its subprocess using this computer's internal loopback
interface. This connection is not visible on any external
interface and no data is sent to or received from the Internet.
*****

IDLE 2.6.2      ==== No Subprocess ====
>>>
Digite o número da porta serial = 5
Escolha um dos comandos abaixo e depois teclre enter
1 - Realiza medidas:
s - Para sair:
Entre com a Opção = 1
Arquivo de log: C:\Users\Wanessa\Desktop\Python\LOG_2013_08_22_14-32-40.txt
===== Número de Pollings = 1 =====
B-S1 1 Energia consumida = 0.0 kWh
B-S2 1 Energia consumida = 0.0 kWh
B-S3 1 Energia consumida = 0.0 kWh
===== Número de Pollings = 2 =====
B-S1 2 Energia consumida = 0.000331182796 kWh
B-S2 2 Energia consumida = 0.00243655914 kWh
B-S3 2 Energia consumida = 0.001904301075 kWh
===== Número de Pollings = 3 =====
B-S1 3 Energia consumida = 0.002537096774 kWh
B-S2 3 Energia consumida = 0.007321505376 kWh
B-S3 3 Energia consumida = 0.005701075269 kWh
Ln: 64 Col: 4

```

Figura 5.1: Resultados do sistema de medição com sensor de efeito Hall.

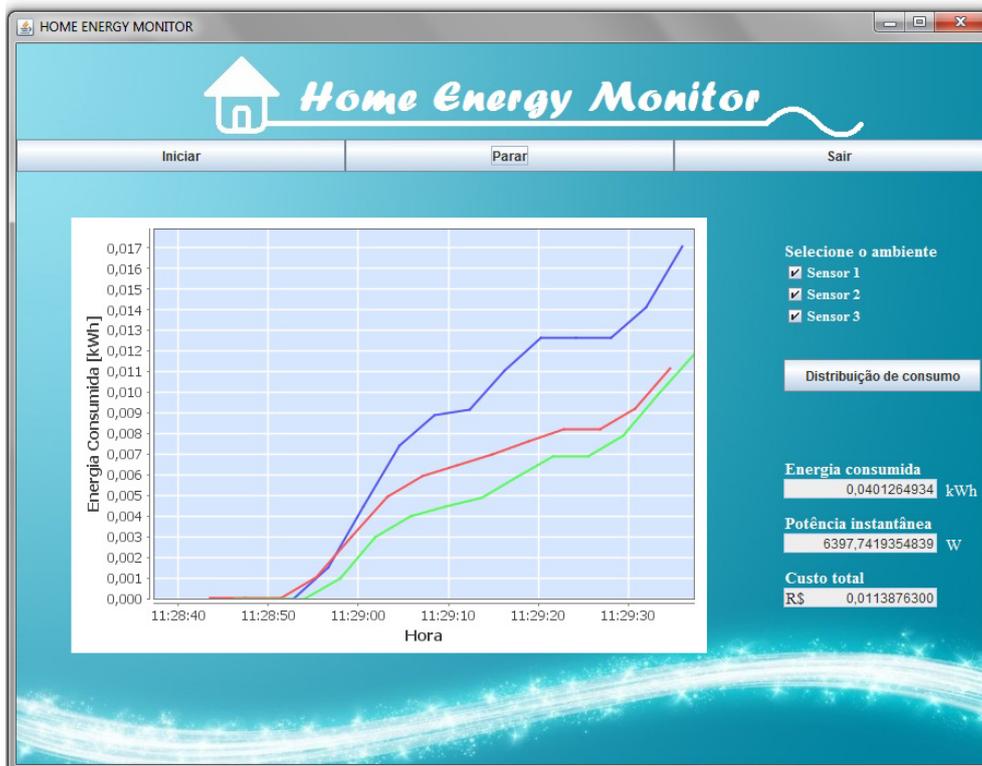


Figura 5.2: Resultados do sistema de medição com sensor de efeito indutivo.

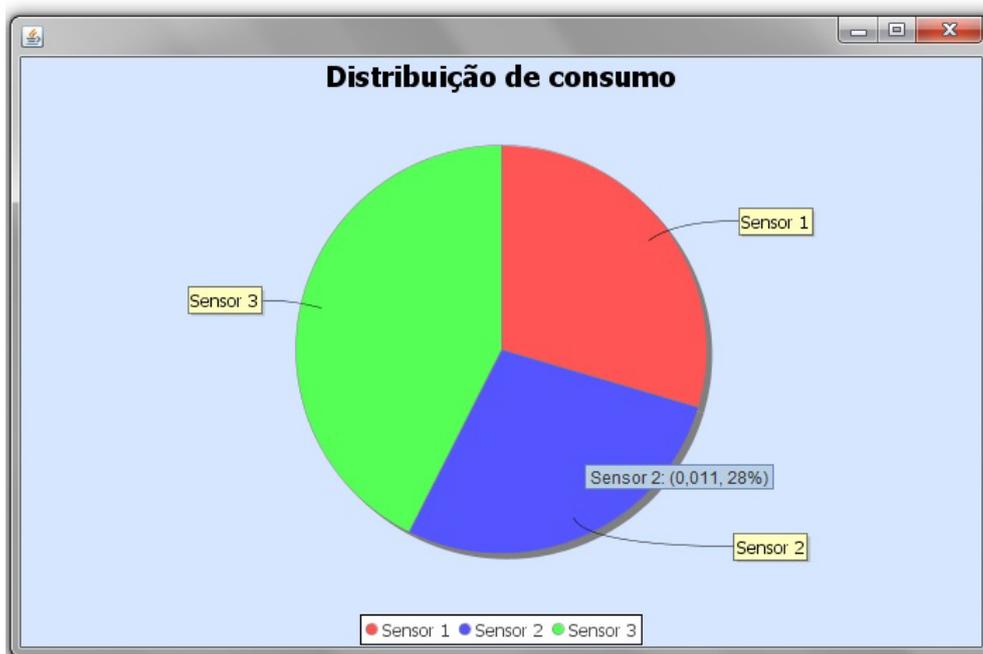


Figura 5.3: Visualização alternativa dos resultados do HEM.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho apresenta as características e os métodos de elaboração de dois sistemas de sensoriamento energético detalhado, implementados sob a tecnologia das Redes de Sensores sem Fio, a fim de proporcionar uma leitura de dados remota. A captação da informação desejada é feita por meio de dois sensores de corrente distintos; no primeiro sistema utiliza-se um sensor de corrente invasivo, enquanto que no segundo sistema utiliza-se um sensor não invasivo. Os sensores foram selecionados de modo a atender os anseios do projeto e ao mesmo tempo simplificar o uso do sistema e não encarecê-lo exacerbadamente. A aferição do consumo energético pôde ser feita em ambientes residenciais ou mesmo em aparelhos eletrônicos. O sistema utiliza a tecnologia Rádium que representa uma alternativa tecnológica de custo-benefício atrativo para a exploração de sistemas de comunicação sem fio de cunho acadêmico.

As duas hipóteses sistêmicas criadas e as simulações realizadas permitiram concluir que a metodologia utilizada para a construção dos dois sistemas de medição foi adequada ao objetivo inicial do trabalho. Os programas desenvolvidos apresentam características muito favoráveis à utilização e constituem-se em ferramentas poderosas para a adequação dos sinais elétricos até a sua apresentação em formato mais conveniente ao observador. A adequação do sinal foi subdividida em duas etapas fundamentais: condicionamento e processamento.

As análises preliminares dos sistemas de medição de consumo energético existentes e da tecnologia dos sistemas de comunicação sem fio constituem-se em guias, precursores do desenvolvimento do projeto, de modo que sua análise leva à escolha das estratégias, métodos e equipamentos mais adequados à construção dos sistemas propostos. Observou-se que a construção de um sistema capaz de se adaptar às medições detalhadas de residências, ambientes ou aparelhos traria maiores contribuições à pesquisa deste setor tecnológico, não se limitando à apenas um tipo de medição. Desta maneira, a versatilidade e a adaptabilidade do sistema são comprovadas.

Mediante o estudo realizado foram descritos os detalhes de funcionamento dos sensores de corrente existentes. Esta análise garantiu a escolha de sensores adequados para o desenvolvi-

mento do projeto. O sensor que atua mediante efeito Hall garante maior exatidão da grandeza física mensurada, em contrapartida, exige uma fonte de alimentação mais complexa e manipulação de circuitos elétricos. Já o sensor de corrente por efeito indutivo não requer uma fonte de alimentação externa nem a manipulação de conexões elétricas, este tipo de sensor proporciona grande facilidade para a realização da medição, adequada garantia de eficiência e de segurança.

Os dois modelos de sensores utilizados se mostraram eficientes, embora sistemas com estes tipos de sensores baseiem o fornecimento e a apresentação de determinadas grandezas elétricas por meio de aproximações. Estas aproximações não acarretam prejuízo à eficiência do sistema, uma vez que o sistema consiste, basicamente, em uma ferramenta auxiliar que proporciona ao usuário o acesso a informações úteis, não sendo exigida a exatidão inerente a sistemas de medição destinados à tarifação. O sistema composto pelo sensor de efeito Hall garante maior precisão e acurácia às medições, entretanto possui custo muito mais elevado em relação ao sistema que utiliza o sensor de corrente por efeito indutivo.

O sistema foi implementado por meio de três nós de sensoriamento, dispostos conforme o interesse de medição. Estes nós, responsáveis pela medição da corrente elétrica do sistema ou aparelho, também se caracterizam por formar a rede de sensoriamento, realizando o envio das informações captadas para o nó coordenador da rede. Todas as propostas do sistema foram bem sucedidas, a comunicação foi estabelecida com êxito; a troca de dados foi realizada eficientemente, permitindo que os dados fossem enviados ao sistema de apresentação.

Por fim, pode-se concluir a análise do sistema em relação aos sistemas de apresentação de dados. A primeira proposta garantiu a elaboração de um sistema construído em linguagem Python, com o uso do sensor de efeito Hall. Este sistema, com proposta voltada ao setor comercial e industrial, podendo ser utilizado em residências, possui uma estrutura de apresentação de dados mais simples; mostrando uma interface gráfica menos elaborada, porém igualmente eficiente. A segunda proposta implementada, utilizou o sensor de corrente com captação magnética por efeito indutivo. A interface de apresentação deste sistema foi estruturada em linguagem Java, no qual se construiu um sistema de apresentação de dados mais elaborado, voltado ao consumidor residencial, com recursos interativos mais atrativos e eficiência comprovada.

Diante da exposição dos resultados obtidos mediante a implementação dos sistemas, observa-se a versatilidade, a adaptabilidade, a eficiência e o valor de contribuição dos mesmos aos avanços

tecnológicos do setor. As principais contribuições do trabalho se dão, principalmente, em relação ao custo-benefício do sistema, acentuado em razão da escolha dos dispositivos integrantes do sistema; enquanto que a eficiência do sistema foi mantida em relação às outras propostas expostas no escopo do trabalho. A segurança das medições e a característica de não invasão de um dos dispositivos de sensoriamento contribuem ao valor da proposta do trabalho.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Não obstante o reconhecimento das contribuições deste trabalho, muitos estudos importantes ainda devem ser realizados a fim de se completar a implementação dos sistemas de medição do consumo energético aqui iniciada. Desta forma, apresentam-se, a seguir, as recomendações para o aprofundamento das análises, das aplicações e dos métodos feitos e sugestões para futuros trabalhos.

- Aprimorar a eficiência do sistema de medição proposto, buscando a exatidão de todas as medições, mediante a incorporação de outros sensores ao sistema, a fim de realizar a medição da tensão da rede elétrica. Desta forma, fornecer, além da energia total do sistema elétrico em análise, as potências ativa e reativa dos aparelhos submetidos ao sensoriamento.
- Adicionar mais funções e aumentar interatividade do sistema de apresentação de dados, tornando-o mais atrativo, eficiente e completo.
- Implementar uma estação base com tamanho reduzido, para garantir maior mobilidade e portabilidade ao sistema, assegurando a permanência do funcionamento adequado e da eficiente troca de dados do sistema.
- Realizar medições em outros ambientes, de modo que se possa comprovar o funcionamento do sistema em outras situações de análise. A implementação em ambientes industriais e comerciais forneceria mais dados e resultados ao funcionamento do sistema, podendo ser verificado o comportamento da captação e da transferência de dados.
- Aumentar as funcionalidades da estrutura construída, possibilitando a criação de um sistema de automação residencial possuidor de diversos recursos e diversas funcionalidades.

- Adequar o sistema proposto aos padrões requisitados pela legislação pertinente, para que o mesmo se torne uma ferramenta adequada à medição destinada à construção dos Medidores Inteligentes integrantes das Redes Inteligentes.
- Consultar e controlar o sistema de medição pela rede mundial de computadores(internet).
- Auxiliar a verificação da tarifação horária de consumo de energia de elétrica.
- Adicionar ao sistema de medição de energia elétrica dispositivos que transmitam os dados obtidos ao celular do usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZAMBIANCO, J. D. B. *Sistema para Monitoramento Detalhado do Consumo Elétrico Residencial Utilizando Redes de Sensores ZigBee*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Setembro 2010.
- [2] WATANABE, A. T. Y. *Monitoramento, controle e parametrização de eletrodomésticos numa rede sem fio via interface virtual remota*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Maio 2008.
- [3] ZIGBEE Alliance. Acesso em 22/08/2013. Disponível em: <<http://www.zigbee.org>>.
- [4] ZHENG, J.; JAMALIPOUR, A. *Wireless Sensor Networks - A Networking Perspective*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [5] MAKEMYPRODUCT. Acesso em 22/08/2013. Disponível em: <<http://www.makemyproduct.in>>.
- [6] KYOTO, D. *Wattson*. 2006. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.diykyoto.com/uk>>.
- [7] MONITOR Reduce Save. 2009. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.efergy.com>>.
- [8] ALERTME Creating Smart Solutions. 2012. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.alertme.com>>.
- [9] JOSUÉ, J. G. *Projecto e Construção de um Sistema de Monitorização de Energia Elétrica para uma Habitação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nova de Lisboa - UNL, 2010.
- [10] UNICAMP cria sistema inteligente de medição do consumo de energia. 2011. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=rede-sensores-sem-fios-consumo-energia-inteligente>>.

- [11] FERREIRA, J. B. *Análise de formas de medição de consumo de energia elétrica no setor residencial*. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Julho 2012.
- [12] STEPLIGHT. *Power-Mate*. 2012. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.power-mate.com.au>>.
- [13] SOLUTIONS, W. C. *Kill A Watt Power Monitor*. 2012. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.weemscreeksolutions.com/KillAWatt.htm>>.
- [14] STEPLIGHT. *Power Meter - Measure Appliance Energy Consumption and Cost*. 2012. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://steplight.com.au/monitor/plug-in-electricity-power-meter>>.
- [15] WATTS up? Acesso em 22/08/2013. Disponível em: <<http://www.wattsupmeters.com>>.
- [16] HYPOWER. Acesso em 22/08/2013. Disponível em: <<http://www.powerpedestal.com/energymate>>.
- [17] BENTLEY, J. P. *Principles of Measurement Systems*. [S.l.]: Pearson, 2005.
- [18] SOBRE o Rádiuino. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.radiuino.cc/node/8>>.
- [19] MOMOH, J. *Smart Grid: Fundamentals of Desing and Analylis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- [20] BOLZANI, C. A. M. *Análise de Arquiteturas e Desenvolvimento de uma Plataforma para Residências Inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo - USP, Janeiro 2010.
- [21] AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. *Wireless Sensor Networks*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- [22] TORRI, L. B. *A norma IEEE 1451 aplicada a redes heterogêneas de sensores sem fio*. Outubro 2008.
- [23] FERREIRA, M. C. A. F. *Perspectivas e Desafios para a Implantação das Smarts Grids: um estudo de caso dos EUA, Portugal e Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Julho 2010.

- [24] GUNGOR, B. L. V. C.; HANCKE, G. P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, 2010.
- [25] ATLAS de Energia Elétrica do Brasil. 2008. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>.
- [26] MAROUN, A. *Micro Capteur Magnetique de Mesure de Courant et Traitement Integre*. Tese (Doutorado) — Institut Polytechnique de Grenoble, Setembro 2009.
- [27] CHAVES, C. F. *Transformador de Corrente Eletrônico Utilizando Bobina de Rogowski e Interface Óptica com POF para Aplicações em Sistemas de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro 2008.
- [28] DESIGN, Y. *EnergyMate*. 2008. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.yankodesign.com/2008/10/13/energy-mate-converts-consumption-into-sense/>>.
- [29] LEITE, D. R. V. *Medidores Eletrônicos: Análise De Viabilidade Econômica No Contexto Das Redes Inteligentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília - UnB, Março 2013.
- [30] ANEEL. *Nota Técnica número 362/2010-SRE-SRD/ANEEL*. 2010. Acesso em 09/08/2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>.
- [31] ERSE. *A Regulação da Energia em Portugal*. [S.l.]: Security Print - Sociedade de Indústria Gráfica, Lda, 2008.
- [32] GUARDIA, E. C. *Metodologia para o Cálculo da Elasticidade da Tipologia de Carga Frente à Tarifa de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Setembro 2007.
- [33] MOTA, K. M.; SILVA, W. de A. *Códigos dos programas do projeto de sistemas de medição*. 2013. Acesso em 22/08/2013. Disponível em: <<http://goo.gl/dtBmr9>>.