

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONCEPÇÃO DE UM NÓ SENSOR/ATUADOR
SEM-FIO PARA UMA REDE DE
GERENCIAMENTO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Carlos Henrique Barriquello

Santa Maria, RS, Brasil

2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**CONCEPÇÃO DE UM NÓ SENSOR/ATUADOR
SEM-FIO PARA UMA REDE DE
GERENCIAMENTO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

por

Carlos Henrique Barriuello

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Alexandre Campos
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Nederson do Prado

Santa Maria, RS, Brasil

2009

©2009

Todos os direitos autorais reservados a Carlos Henrique Barriquello. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Av. Roraima, 1000, Bairro: Camobi, Santa Maria, RS, 97.105-900

Fone: 55 91752769; Endereço Eletrônico: barriquello@mail.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CONCEPÇÃO DE UM NÓ SENSOR/ATUADOR SEM-FIO
PARA UMA REDE DE GERENCIAMENTO DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

elaborada por
Carlos Henrique Barriquello

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Alexandre Campos Dr.
(Presidente/Orientador)

Ricardo Nederson do Prado, Dr.
(Co-orientador)

Santa Maria, 05 de Agosto de 2009

À minha família...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao prof. Alexandre Campos pelo apoio na conclusão do curso de mestrado e na elaboração deste trabalho. Também pelo seu trabalho frente ao Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos (GEDRE) em conjunto com os professores Ricardo Nederson do Prado e Alisson Seidel, para os quais, igualmente, ficam meus agradecimentos.

Certamente, este agradecimento se estende a todo o grupo GEDRE, para os colegas de pós-graduação (Rafael Adaime Pinto, Marcelo Freitas da Silva, Juliano de Pelegrini Lopes, Rafael Eduardo da Costa) e de graduação. Em especial, para o colega Gustavo Weber Denardin, não apenas pela permissão de utilização, neste trabalho, do RTOS desenvolvido por ele, mas também pelas valiosas oportunidades de aprendizado durante realização de trabalho em conjunto.

Agradeço ao amigo Jorge Rodrigo Massing pelo auxílio com a classe Latex usada na elaboração da dissertação. Deixo, igualmente, meu reconhecimento e gratidão pelo trabalho do amigo Rafael Cardoso, desenvolvedor da classe Latex de acordo com as normas da MDT/UFSM.

Agradeço aos funcionários do NUPEDEE, Fernando, Zulmar e Anacleto, pelo auxílio prestado durante a realização deste trabalho. Também, agradeço aos funcionários da secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Cleonice e Carlo, pelo trabalho empreendido na condução do programa.

Agradeço a todos os amigos, pelo suporte e pela parceria; e a todos aqueles que, de alguma forma, direta ou indiretamente, prestaram algum tipo de auxílio para a elaboração deste trabalho.

Finalmente, expresso minha gratidão à minha namorada Gisele, pelo apoio, carinho e compreensão incontestáveis.

“If you cannot measure it, you cannot improve it.”

Lord Kelvin

“Se não puder medir, não poderá
melhorar.”

Lord Kelvin

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

CONCEPÇÃO DE UM NÓ SENSOR/ATUADOR SEM-FIO PARA UMA REDE DE GERENCIAMENTO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

AUTOR: CARLOS HENRIQUE BARRIQUELLO

ORIENTADOR: ALEXANDRE CAMPOS

CO-ORIENTADOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 05 de Agosto de 2009.

Neste trabalho, propõem-se modificações nos relés fotoelétricos utilizados nos sistemas de iluminação pública presentes nos municípios brasileiros. Pretende-se, assim, melhorar tais sistemas, de forma a trazer benefícios sociais e econômicos. Em sua maioria, os sistemas de iluminação pública são compostos por lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão empregadas em conjunto com reatores eletromagnéticos e relés fotoelétricos que controlam o acionamento destas lâmpadas nos horários devidos. Apesar de simples e eficaz, este método de acionamento possui muitas limitações, como a falta de diagnóstico de falhas dos elementos do sistema, a falta de métodos de medição de consumo de energia elétrica, a falta de monitoramento de tempos de funcionamento e a impossibilidade de acionamento à distância. Através do emprego de tecnologias de comunicação sem-fio e computação embarcada se apresenta uma alternativa de solução para os problemas citados. As modificações aplicadas ao relé fotoelétrico dão origem a um novo dispositivo - o nó sensor/atuador sem-fio para gerenciamento de iluminação pública. Relatam-se as etapas de desenvolvimento deste novo dispositivo e os testes realizados como forma de validar e justificar seu emprego nos sistemas atuais de iluminação pública.

Palavras-chave: Rede, Comunicação, Sensores, Sem-fio, Medição, Controle, Iluminação Pública, ZigBee

ABSTRACT

Master's Dissertation

Post Graduate Program in Electrical Engineering

Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

DESIGN OF A WIRELESS SENSOR/ACTUATOR FOR STREET LIGHTING SYSTEM MANAGEMENT

AUTHOR: CARLOS HENRIQUE BARRIQUELLO

ADVISOR: ALEXANDRE CAMPOS

CO-ADVISOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

Place and Date: Santa Maria, August 5th, 2009.

In this thesis, changes to be done into the photoelectric relays used on street lighting systems are proposed. It is intended to improve those systems, bringing social and economical benefits. Most of street lighting systems is comprised by high pressure sodium lamps, electromagnetic ballasts and photoelectric relays, which must turn on/off lamps on due time. Even simple, such a method has many drawbacks, as lack of fault diagnosis, energy measurement, time monitoring and remote control. By employing wireless communication and embedded computing, an innovative solution is presented. When such changes are applied into the photoelectric relay, a new device comes out - a wireless sensor/actuador for street lighting management. Development steps of the device are reported. Testing procedures are undertaken to validate it and justify its use on the street lighting systems.

Keywords: Network, Communication, Sensors, Wireless, Measurement, Control, Street lighting, ZigBee

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

1	Introdução	p. 23
1.1	Introdução sobre redes de sensores sem-fio	p. 28
1.2	Justificativa e objetivos	p. 31
1.3	Contribuição	p. 31
1.4	Organização textual	p. 33
2	Redes de sensores sem-fio	p. 35
2.1	Introdução a redes de comunicação de dados	p. 35
2.1.1	Mensagens	p. 35
2.1.2	Topologia da rede	p. 35
2.1.3	Taxa de transmissão de dados	p. 36
2.1.4	Número de nós e modos de endereçamento	p. 37
2.1.5	Controle de erros e confinamento de falhas	p. 37
2.1.6	Meio físico de transmissão e alcance	p. 37
2.1.7	Protocolos de comunicação	p. 38
2.1.8	Transceptor	p. 39
2.2	Rede de sensores sem-fio	p. 39

3	Padrões de comunicação para redes de sensores sem-fio	p. 41
3.1	Especificação IEEE 802.15.4 TM	p. 41
3.1.1	Descrição da camada física (PHY)	p. 42
3.1.2	Descrição da camada de controle de acesso ao meio (MAC)	p. 43
3.1.3	Formato dos pacotes MAC e PHY	p. 44
3.2	Especificação do Padrão ZigBee	p. 46
3.2.1	Dispositivos ZigBee	p. 46
3.2.2	Camadas da pilha ZigBee	p. 47
3.2.2.1	Camada de rede	p. 48
3.2.2.2	Sub-camada de suporte à aplicação (APS)	p. 48
3.2.3	Estrutura de aplicação	p. 49
3.2.4	Atributos e clusters	p. 49
3.2.5	Perfis de aplicação ZigBee	p. 50
3.2.6	Serviços de rede	p. 51
3.2.6.1	Descoberta de dispositivo	p. 51
3.2.6.2	Descoberta de serviço	p. 51
3.2.7	Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO)	p. 51
3.2.8	Redes ZigBee	p. 51
3.2.8.1	Iniciando a rede ZigBee	p. 52
3.2.8.2	Associando-se à uma rede ZigBee	p. 52
3.2.8.3	Permissão de ingresso	p. 53
3.2.8.4	Segurança	p. 53
3.2.9	Endereçamento na rede ZigBee	p. 53
3.2.9.1	Endereçamento de dispositivo	p. 53
3.2.9.2	Endereçamento de aplicação	p. 54
3.2.10	Transmissão de dados e roteamento	p. 54

3.2.10.1	Descoberta do endereço da rede	p. 54
3.2.10.2	Descoberta de rota	p. 54
3.2.10.3	Retransmissões e reconhecimentos	p. 56
3.2.10.4	Conclusão	p. 56
4	Sistema Operacional de Tempo Real - RTOS	p. 58
4.1	Introdução	p. 58
4.2	Conceitos sobre sistemas operacionais de tempo real (RTOS)	p. 59
4.2.1	O gerenciador de tarefas	p. 60
4.2.2	Objetos de um RTOS	p. 60
4.2.2.1	Tarefas	p. 61
4.2.2.2	Semáforos	p. 63
4.2.2.3	Filas de mensagens	p. 64
4.2.3	O BRTOS	p. 65
5	Concepção e desenvolvimento	p. 67
5.1	Descrição geral do sistema proposto	p. 67
5.2	Desenvolvimento do hardware	p. 69
5.2.1	Módulo transceptor RF	p. 69
5.2.1.1	Módulo XBee™	p. 70
5.2.2	Microcontrolador	p. 71
5.2.3	Os sensores	p. 71
5.2.3.1	O sensor de medição de corrente	p. 71
5.2.3.2	O sensor de medição de tensão	p. 74
5.2.3.3	O sensor de medição de luminosidade	p. 74
5.2.4	Conversor CA/CC	p. 74
5.2.5	Circuito de acionamento da lâmpada	p. 77
5.3	Desenvolvimento de <i>software</i>	p. 79

5.3.1	Tarefas	p. 80
5.3.1.1	Tarefa de comunicação pela rede	p. 80
5.3.1.2	Tarefa de medição de corrente/tensão e cálculo de consumo de energia	p. 82
5.3.1.3	Tarefa de comando da lâmpada	p. 84
5.3.2	Tarefa de diagnóstico de falhas	p. 84
5.3.3	Tarefa de relógio local e tempo de funcionamento	p. 85
5.3.4	Tarefa de medição de luminosidade	p. 85
5.3.5	Desenvolvimento da camada de aplicação ZigBee	p. 86
5.4	Considerações práticas	p. 91
5.4.1	Central de gerenciamento	p. 91
5.4.2	Instalação da rede	p. 92
6	Resultados	p. 93
6.1	Resultados experimentais de <i>hardware</i>	p. 93
6.1.1	Teste do sensor de corrente	p. 93
6.1.2	Teste do sensor de tensão	p. 96
6.1.3	Teste do sensor de luminosidade	p. 96
6.2	Resultados experimentais de <i>software</i>	p. 96
6.2.1	Teste de medição de energia	p. 96
6.2.2	Teste do protocolo ZigBee	p. 97
7	Conclusão	p. 101
7.1	Conclusão	p. 101
7.2	Sugestões de trabalhos futuros	p. 102
	Referências	p. 104
	Apêndice A – Projeto do conversor Flyback	p. 107

A.0.1 Projeto do transformador <i>Flyback</i>	p.111
Apêndice B - Simulação em MATLAB da amostragem de tensão e corrente e do cálculo de potência e consumo do conjunto reator-lâmpada	p.115
Apêndice C - Circuito desenvolvido	p.119
Anexo A - Datasheet NCP1015	p.120

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Distribuição dos pontos de iluminação pública no Brasil	p. 24
FIGURA 2	Variação da resistência equivalente e da potência consumida conforme tempo de uso	p. 26
FIGURA 3	Cabeamento convencional de rede.	p. 36
FIGURA 4	Cabeamento de rede <i>fieldbus</i>	p. 36
FIGURA 5	Camadas do modelo de referência OSI	p. 38
FIGURA 6	Formato do quadro PHY IEEE 802.15.4 TM	p. 44
FIGURA 7	Formato do quadro MAC IEEE 802.15.4 TM	p. 45
FIGURA 8	Camadas da pilha ZigBee	p. 48
FIGURA 9	Topologias de rede ZigBee	p. 49
FIGURA 10	Compartilhamento do rádio ZigBee entre vários objetos.	p. 50
FIGURA 11	Descoberta de rota na rede ZigBee	p. 55
FIGURA 12	Componentes de uma tarefa	p. 61
FIGURA 13	Máquina de estados de uma tarefa	p. 62
FIGURA 14	Componentes de um semáforo	p. 63
FIGURA 15	Componentes de uma fila de mensagens	p. 65
FIGURA 16	Diagrama de blocos do dispositivo proposto	p. 68
FIGURA 17	Módulo RF ZigBee XBee	p. 70
FIGURA 18	Sensor de efeito Hall	p. 72
FIGURA 19	Blocos de sensor de efeito Hall em circuito integrado	p. 73
FIGURA 20	Configuração do sensor de tensão	p. 74
FIGURA 21	Topologia do conversor Flyback	p. 76
FIGURA 22	Circuito do conversor Flyback desenvolvido	p. 76
FIGURA 23	Tensão na saída do conversor Flyback - simulação	p. 77
FIGURA 24	Circuitos de disparo de TRIAC	p. 78
FIGURA 25	Perdas em condução x corrente RMS - TRIAC modelo BTA12-600	p. 79
FIGURA 26	Estrutura de <i>hardware</i> e <i>software</i> do dispositivo	p. 79
FIGURA 27	Diagrama do <i>software</i> do dispositivo	p. 81

FIGURA 28	Tensão na saída do sensor de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CC com escala de 500mV/div)	p. 93
FIGURA 29	Forma de onda de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 500mA/div)	p. 94
FIGURA 30	Componente alternada da tensão na saída do sensor de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 200mV/div)	p. 94
FIGURA 31	Comparação da tensão na saída do sensor de corrente (mais abaixo na figura) x tensão de saída do conversor Flyback (acoplamento CC com escala de 1V/div)	p. 95
FIGURA 32	Tensão na saída do sensor de corrente com alimentação por fonte linear - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 200mV/div)	p. 95
FIGURA 33	Tensão na saída do sensor de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 200mV/div)	p. 95
FIGURA 34	Resposta do sensor de tensão (acoplamento CC com escala de 500mV/div)	p. 96
FIGURA 35	Resposta do sensor de tensão com filtro RC (acoplamento CC com escala de 500mV/div)	p. 96
FIGURA 36	Resposta do sensor de luminosidade (acoplamento CC com escala de 500mV/div)	p. 97
FIGURA 37	Corrente amostrada pelo conversor A/D (12 bits)	p. 97
FIGURA 38	Tensão amostrada pelo conversor A/D (12 bits)	p. 98
FIGURA 39	Corrente reconstruída com os valores amostrados	p. 99
FIGURA 40	Tensão reconstruída com os valores amostrados	p. 99
FIGURA 41	Janela do <i>software</i> de teste da rede	p. 100
FIGURA 42	Janela do <i>software</i> de teste da rede - mensagem liga/desliga	p. 100
FIGURA 43	Resposta do nó à mensagem ligar a lâmpada	p. 100
FIGURA 44	Resposta do nó à mensagem desligar a lâmpada	p. 100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Distribuição dos tipos de lâmpadas empregadas na iluminação pública	p. 24
TABELA 2	Bandas de frequências e taxas de transmissão	p. 43
TABELA 3	Campo de identificação do tipo de quadro	p. 45
TABELA 4	Campo de modo de endereçamento	p. 46
TABELA 5	Tabela de roteamento - ZigBee AODV	p. 55
TABELA 6	Tabela de descoberta de rota - ZigBee AODV	p. 56
TABELA 7	Informações elétricas - lâmpadas HPS e reatores eletromagnéticos	p. 73
TABELA 8	Consumo de corrente por bloco	p. 75
TABELA 9	Dispositivos do perfil ZigBee <i>Smart Energy</i>	p. 87
TABELA 10	Dispositivos do perfil ZigBee <i>Home Automation</i> para iluminação .	p. 87
TABELA 11	Mensagens suportadas pelos dispositivos 0x0501, 0x0100 e 0x0106	p. 88
TABELA 12	Mensagens suportadas pelo dispositivo 0xC000	p. 88
TABELA 13	Resumo dos perfis de aplicação, perfis de dispositivos e <i>clusters</i> suportados	p. 90
TABELA 14	Tabela de <i>clusters</i> e atributos	p. 90

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

l	enlace entre dois nós de uma rede
$C\{l\}$	custo associado ao enlace l
$C\{P\}$	custo associado à rota P
D_i	localização do i -ésimo nó da rede
D_{i+1}	localização do $i + 1$ -ésimo nó da rede
p_l	probabilidade de entrega do pacote através do enlace l
V_{DSmax}	máxima tensão suportada pelo interruptor
V_{INmax}	máxima tensão de entrada
V_{out}	tensão de saída
V_{diodo}	tensão direta sobre o diodo
N	relação de espiras
V_{INmin}	tensão mínima na entrada
$V_{dr_{max}}$	tensão de pico reversa máxima do diodo
Lp_{crit}	indutância crítica do enrolamento primário
V_r	tensão refletida
f_{sw}	frequência de comutação
P_{out}	potência de saída do conversor
$I_{p_{max}}$	máxima corrente de pico suportada pelo interruptor
D_{max}	máxima razão cíclica
Lp_{max}	indutância máxima
$P_{out_{max}}$	potência máxima teórica
R_{clamp}	resistor do circuito RCD de grampeamento do transformador <i>Flyback</i>
C_{clamp}	capacitor do circuito RCD de grampeamento do transformador <i>Flyback</i>
V_{clamp}	tensão de grampeamento do transformador <i>Flyback</i>

Lista de Símbolos

L_{leak}	indutância de dispersão
V_{ripple}	variação de tensão sobre o capacitor
C_{in}	capacitor de entrada
C_{out}	capacitor de saída
$V_{out_{ripple}}$	variação do valor nominal da tensão de saída
I_{out}	corrente drenada pela carga
B_{max}	máxima densidade de campo magnético
A_e	área transversal do caminho magnético
L_e	comprimento médio do caminho magnético
A_w	área da janela do núcleo
L_t	comprimento médio por espira
N_p	número de espiras do enrolamento primário
N_s	número de espiras do enrolamento secundário
S_p	bitola do condutor do enrolamento primário
S_s	bitola do condutor do enrolamento secundário
$I_{s_{rms}}$	corrente eficaz
I_{rms}	corrente eficaz no enrolamento primário
$I_{p_{rms}}$	corrente eficaz no enrolamento secundário
J_{max}	densidade de corrente máxima
I_{p_p}	corrente de pico no enrolamento primário
D_p	diâmetro do condutor do enrolamento primário
D_s	diâmetro do condutor do enrolamento secundário
δ	profundidade <i>skin</i>
l_g	espessura do entreferro
μ_0	permeabilidade magnética do ar
$A_{w_{min}}$	área mínima da janela do núcleo
K_w	fator de ocupação do cobre dentro do carretel

ACRÔNIMOS

IP	iluminação pública
----	--------------------

Lista de Símbolos

P2P	peer-to-peer
WSN	wireless sensor network
FSK	frequency shift keying
ISM	industrial, scientific, and medical
GPRS	general packet radio service
CDMA	code division multiple access
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineer
GSM	global system mobile
RTOS	real-time operating system
OSI	open systems interconnect
SAP	service access point
MAC	medium access control
TCP	transport control protocol
IP	internet protocol
RF	rádio-frequência
PAN	personal area network
WPAN	wireless personal area network
PHY	physical
FFD	full-function device
RFD	reduced-function device
ED	energy detection
LQI	link quality indication
CCA	clear channel assessment
BPSK	binary phase-shift keying
O-QPSK	offset quadrature phase-shift keying
CSMA-CA	carrier sense multiple access with collision avoidance
GTS	guaranteed time slot
MHR	MAC header
MFR	MAC footer

Lista de Símbolos

FCS	frame check sequence
ITU-T	International Telecommunication Union
CRC	cyclic redundancy check
NWK	network
ZDO	ZigBee device object
APS	application support sub-layer
APSDE	application support sub-layer data entity
APSDE-SAP	application support sub-layer data entity - service access point
APSME	application support sub-layer management entity
APSME-SAP	application support sub-layer management entity - service access point
AES	advanced encryption standard
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
RREP	route reply
RREQ	route request
TCB	task control block
SCB	semaphore control block
QCB	queue control block
API	application programming interface
FIFO	first in first out
LIFO	last in first out
BRTOS	Brazilian real-time operating system
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIP	Contribuição para Custeio da Iluminação Pública
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ReLuz	Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes
HPS	high pressure sodium
HPM	high pressure mercury
HID	high intensity discharge
UART	universal asynchronous receiver/transmitter

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública afeta diretamente a qualidade de vida da população. A iluminação das vias urbanas permite maior segurança no tráfego de veículos e pedestres. É responsável também por inibir a criminalidade. Do ponto de vista estético, a iluminação valoriza a cidade, seus monumentos e praças. O turismo, o comércio e o lazer noturno são fortemente impactados pela qualidade dos sistemas de iluminação instalados. Trata-se de um serviço essencial à qualquer cidade, pois está intrinsecamente relacionada ao bem-estar social e à segurança dos cidadãos, além de contribuir, consideravelmente, no desenvolvimento social e econômico da população.

O inciso V do artigo 30 da Constituição Federal estabelece a prestação do serviço de iluminação pública como competência dos municípios brasileiros:

Art. 30 - Compete aos Municípios: [...]

V - organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, [...] (Constituição da República Federativa do Brasil, 1988).

A regulamentação do serviço está especificada na Resolução ANEEL nº 456/2000. Esta resolução estabelece critérios acerca do fornecimento de energia elétrica para iluminação pública, bem como, das condições para prestação do serviço. Segundo a mesma, mediante contrato ou convênio, a concessionária poderá efetuar os serviços de iluminação pública, ficando o poder público municipal responsável pelas despesas decorrentes. Entretanto, quando o ponto de entrega da energia se dá no bulbo da lâmpada, os serviços de operação e manutenção, inclusive seus custos, são de responsabilidade da concessionária (ELETROBRÁS, 2008).

Em 2004, a iluminação pública, no Brasil correspondia a aproximadamente 7% da demanda nacional e a 3,3% do consumo total de energia elétrica do país. Isto equivalia a uma demanda de 2,3 GW e a um consumo de 10,2 bilhões de KWh/ano (MARCHEZAN, 2007). Em 2008, passou a corresponder a aproximadamente 4,5% da demanda nacional e a 3,0% do consumo total de energia elétrica do país. O equivalente a uma demanda de

Tabela 1: Distribuição dos tipos de lâmpadas empregadas na iluminação pública

Tipo de lâmpada	Quantidade	Percentual
Vapor de sódio	9.294.611	62,93%
Vapor de mercúrio	4.703.012	31,84%
Mista	328.427	2,22%
Incandescente	210.417	1,42%
Fluorescente	119.535	0,81%
Multivapor metálico	108.173	0,73%
Outras	5.134	0,03%
Total	14.769.309	100%

Fonte: Eletrobrás, 2008

2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano (ELETROBRÁS, 2008). Esses dados mostram uma diminuição do consumo de energia elétrica, em virtude, principalmente, dos programas de eficiência energética promovidos pela Eletrobrás, como o Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes (ReLuz).

Segundo levantamento cadastral realizado em 2008, junto às distribuidoras de energia elétrica, há 15 milhões de pontos de iluminação pública instalados no país, aproximadamente, distribuídos por região de acordo com o gráfico representado na figura 1 (ELETROBRÁS, 2008). Os tipos de lâmpadas empregadas se encontram na tabela 1.

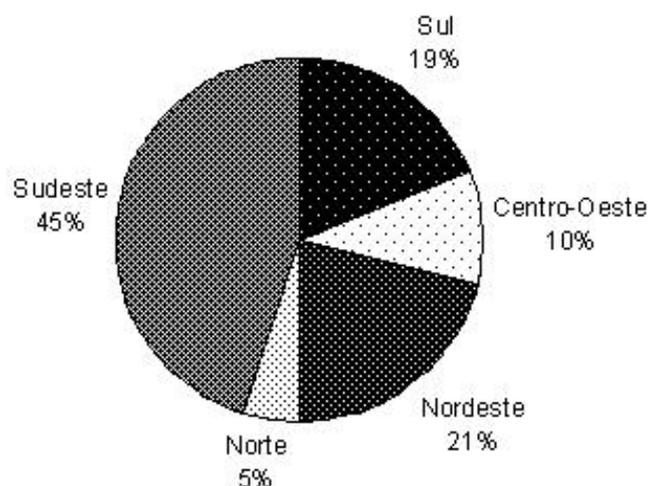


Figura 1: Distribuição dos pontos de iluminação pública no Brasil

Os sistemas de iluminação pública instalados nos municípios brasileiros são, de uma forma geral, formados pelos seguintes componentes:

- Rede de alimentação - Normalmente é utilizada a própria rede de distribuição de energia elétrica.

- Braço (suporte) - Geralmente, se utiliza os postes de distribuição de energia elétrica para se colocar o suporte (braço).
- Relé ou chave de comando - Em geral, são utilizados relés fotoelétricos para realizar o comando da lâmpada.
- Tomada (antiga base) - Utilizada para permitir a troca do relé fotoelétrico, facilitando a manutenção do sistema.
- Reator - Utilizado quando se há o emprego de lâmpadas de descarga.
- Ignitor - Normalmente se encontra integrado ao reator;
- Luminária - Utilizada para direcionar o fluxo luminoso.
- Lâmpada - Em geral, se utiliza lâmpadas de descarga de alta ou baixa pressão.
- Ferragens e acessórios.

Sendo que tais componentes são normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através das seguintes normas:

- NBR 5101 - Iluminação pública - procedimento;
- NBR 5125 - Reator para lâmpada a vapor de mercúrio a alta pressão;
- NBR 5123 - Relé fotoelétrico;
- NBR 5169 - Rele fotoelétrico para iluminação pública - método de ensaio;
- NBR 5434 - Redes de distribuição aérea urbana de energia elétrica;
- NBR 13598 - Reatores e ignitores para lâmpadas a vapor de mercúrio a alta pressão;
- NBR 13593 - Reatores e ignitores para lâmpadas a vapor de sódio a alta pressão;
- NBR 15129 - Luminárias para iluminação pública;
- NBRIEC 662 - Lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão;
- NBRIEC 188 - Lâmpadas a vapor de mercúrio de alta pressão;
- NBRIEC 1167 - Lâmpadas multi vapor metálico.

As lâmpadas empregadas nos sistemas de iluminação pública são, em sua maioria, do tipo de alta pressão de vapor de sódio (HPS) ou mercúrio (HPM) e possuem boa eficiência luminosa. Mesmo assim, o consumo de energia elétrica em iluminação pública é bastante considerável, sendo do interesse dos municípios melhorias que visem sua redução.

Porém, o sistema atual não permite saber exatamente qual o consumo que cada lâmpada contribui. Tampouco, se sabe por quanto tempo uma determinada lâmpada permanece ligada (ciclo de trabalho) por dia (24 horas). Para o cálculo do consumo, utiliza-se o valor de 12 horas para o ciclo de trabalho (ANEEL, 2000), pois considera-se que esta é a duração média anual do período noturno.

Também é comum perceber-se lâmpadas que permanecem ligadas durante o dia, ou quando o nível de intensidade luminosa do ambiente ainda é suficientemente elevado, não sendo necessário ligar a lâmpada. Isto ocorre devido a uma falha do sistema de acionamento (p.ex.: dano ao relé fotoelétrico), e se torna um problema, principalmente, em virtude da falta de um método de diagnóstico.

Igualmente, é sabido que as lâmpadas HPS possuem uma resistência equivalente que aumenta conforme seu tempo de uso (GARCIA-GARCIA, 2006), diminuindo a potência efetivamente consumida. Desta forma, como é cobrado o equivalente à potência nominal, paga-se mais do que realmente se consome. Segundo (GARCIA-GARCIA, 2006), uma lâmpada HID de 70W, por exemplo, diminui seu consumo em 50% (de 70W para 35W) quando passa de 15 mil horas de operação. Em (2), pode-se verificar como o envelhecimento da lâmpada afeta sua resistência equivalente e como esta, por sua vez, afeta a potência consumida pela lâmpada.

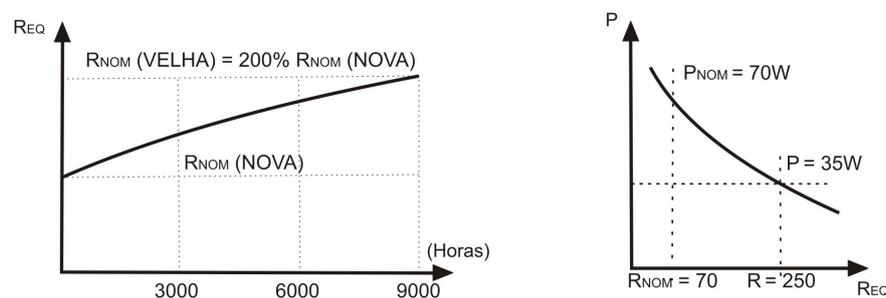


Figura 2: Variação da resistência equivalente e da potência consumida conforme tempo de uso

Com base nestes dados, poder-se-ia estimar que, por exemplo, uma cidade que possui um parque de iluminação pública, cuja potência nominal instalada é de, pelo menos, 50% correspondente a lâmpadas de vapor de sódio e, considerando-se ainda, que a idade média

destes pontos corresponderia a meia vida útil de uma lâmpada HPS (em torno de 16000 horas), a potência consumida por este parque estaria em torno de um valor 25% menor que do que a sua potência nominal. Isto implicaria diretamente em uma redução de mesmo percentual sobre a conta de energia elétrica.

Este exemplo evidencia um dos possíveis impactos que um sistema de gerenciamento do sistema de iluminação pública traria aos municípios. Entretanto, devido à inexistência de tal infra-estrutura, que permitisse, por exemplo, coletar dados sobre as lâmpadas instaladas, como, consumo de energia, ciclo de trabalho e tempo de uso, torna-se impraticável que qualquer medida seja adotada. A seguir, tem-se um resumo dos problemas ainda existentes no sistema atual e seus respectivos impactos no consumo de energia elétrica.

- Falta de diagnóstico de falha: lâmpadas permanecem ligadas durante 24 horas por dia, durante vários dias, acarretando excessivo consumo.
- Falta de medição de ciclo de trabalho: cobra-se do município o equivalente gasto pela lâmpada por um ciclo de trabalho de 12h. No entanto, as lâmpadas podem permanecer ligadas por um tempo inferior a esse em certas épocas do ano. Ainda, lâmpadas danificadas não deveriam ser contabilizadas no consumo de energia.
- Falta de medição de tempo de uso: lâmpadas com grande tempo de uso diminuem sua eficiência e estão sujeitas a apresentar falha de funcionamento com maior probabilidade. A inexistência de informações sobre o tempo de uso dificulta uma possível manutenção preventiva, resultando em maiores custos de manutenção.
- Falta de um método de controle remoto: em certas épocas do mês e do ano, as lâmpadas poderiam ser ligadas mais tarde e desligadas mais cedo, economizando uma grande quantidade de energia que, atualmente, é desperdiçada, por não haver um método que permita este controle.
- Falta de um método de medição de consumo: conforme o tempo de uso, as lâmpadas HPS diminuem a potência consumida. No entanto, cobra-se de acordo com a potência nominal da lâmpada.

Em suma, apesar de a iluminação pública ser um serviço essencial em qualquer cidade, não se observa qualquer avanço no sentido de minimizar os custos relativamente altos de manutenção e de consumo de energia dos parques de iluminação. Pelo contrário, medidas paliativas têm sido adotadas para financiar tais custos, como a criação da Contribuição de Custeio para Iluminação Pública (CIP), cuja finalidade é permitir aos municípios arcar

com os elevados custos de seus antigos e ineficientes parques de iluminação. Por isso, medidas que busquem a efficientização destes sistemas são importantes, pois se tornam soluções viáveis a longo prazo.

Os municípios, responsáveis pela administração e manutenção de seus parques de iluminação, pagam às concessionárias pelo número de pontos de iluminação instalados, conforme potência nominal e tempo de utilização, definido em 360 horas mensais (ANEEL, 2000). Portanto, os municípios pagam por pontos de iluminação danificados e, quando o tempo de funcionamento real for menor que 360 horas, pagam pelo tempo excedente não utilizado. Além disso, lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (HPS) em conjunto com reatores eletromagnéticos, cujo uso é predominante nos sistemas de iluminação pública, não são cargas de potência fixa. Sua potência é variável e diminui conforme seu tempo de uso. Portanto, os municípios pagam, inclusive, por potência não consumida. Esses problemas, que implicam em maiores gastos com os sistemas de iluminação pública, podem ser sanados pelo emprego de um sistema de monitoramento capaz de medir o consumo real de energia elétrica e detectar falhas de funcionamento dos pontos de iluminação. A concepção e o desenvolvimento deste sistema, em especial seu constituinte fundamental - o nó sensor/atuador - é o foco do presente trabalho.

1.1 Introdução sobre redes de sensores sem-fio

O advento da internet e dos dispositivos de comunicação móveis, no final do século XX, representaram uma verdadeira revolução na história da humanidade. Ambos alteraram significativamente a maneira como as pessoas interagem entre si, quebrando as barreiras das distâncias geográficas e de tempo - hoje, alguém pode se comunicar com outra pessoa em, praticamente, qualquer lugar do mundo e (quase que) instantaneamente.

Agora, no início do século XXI, uma nova revolução começa a despontar. Após a revolução que possibilitou conectar as pessoas, surge a possibilidade de conectar os objetos que as cercam, bem como, as pessoas aos objetos - é a "internet das coisas".

Com o intuito de tornar essa nova revolução possível, surgiram vários esforços para juntar o melhor dos dois mundos - internet e comunicações móveis. Isto é, a possibilidade de comunicação ponto-a-ponto (P2P) em uma rede de larga escala geograficamente distribuída - internet - e a ausência de fios para se conectar tais pontos - dispositivos de comunicação móveis (sem-fio).

Tais esforços, em conjunto com os avanços das tecnologias de comunicação sem-fio e

computação (tais como processadores de melhor desempenho e memórias com maior capacidade de armazenamento) culminaram no surgimento de uma nova geração de sensores e atuadores de baixo custo capazes de atingir abrangências temporais e espaciais com um grau bastante elevado (SOHRABY K; MONOLI, 2007). Esses sensores, quando organizados em uma topologia de rede e conectados entre si, possibilitam a formação do que se costuma denominar uma rede de sensores sem-fio (WSN).

Redes de sensores sem-fio encontram uma enorme gama de aplicações, tais como:

- Aplicações militares
 - Rastreamento de veículos e equipamentos
 - Detecção de ataques químicos, biológicos ou nucleares
- Aplicações ambientais
 - Monitoramento de áreas de conservação
 - Rastreamento de animais
 - Detecção de focos de incêndio
- Aplicações médicas
 - Monitoramento de médicos e pacientes em hospitais
 - Administração de medicamentos
 - Cuidado de crianças e idosos
- Aplicações domésticas
 - Automação residencial
 - Medição automática de água, gás e energia elétrica
- Aplicações comerciais
 - Monitoramento de alarmes
 - Controle de tráfego de carros e pessoas
 - Controle ambiental de escritórios e edifícios
 - Rastreamento de equipamentos e objetos
- Aplicações agropecuárias
 - Sensoriamento de lavouras

Rastreamento bovino

Agricultura de precisão

Nos últimos anos, aplicações baseadas em redes de sensores sem-fio têm se tornado cada vez mais viáveis. Em comum entre as diversas publicações relacionadas ao assunto, percebe-se o emprego de tecnologia de comunicação sem-fio em faixas de frequências livres e de um sistema operacional de tempo-real (RTOS) que serve como base para o desenvolvimento do *software* que gerencia a aplicação e os protocolos de acesso à rede.

Assim, este trabalho consiste, em suma, no desenvolvimento de um nó de uma rede de sensores sem-fio, habilitado de *hardware* e *software* adequados para permitir que o mesmo participe da constituição de uma rede de sensores sem-fio de propósito específico - monitoramento e controle da rede de iluminação pública. Por isso, o *hardware* de tal nó foi desenvolvido de forma que o mesmo possa desempenhar satisfatoriamente as tarefas que lhe são designadas enquanto constituinte da rede de iluminação pública. O casamento entre a tecnologia de redes de sensores sem-fio e a realidade dos sistemas atuais de iluminação pública é o primeiro desafio encontrado na abordagem do presente tema. A busca de uma solução eficaz partiu de uma análise do sistema de iluminação pública, focando-se no papel de cada um de seus constituintes. Chegou-se à conclusão de que o casamento perfeito entre essas duas realidades se daria através de modificações a ser realizadas em um dos constituintes do sistema de iluminação pública - o relé fotoelétrico, por se tratar de um componente cujas características de composição, funcionamento e finalidade são ideais para o que se pretende realizar. Quais modificações foram realizadas e como foram realizadas se descreve neste trabalho.

Como salientado, tais modificações se dão tanto em nível de *hardware* quanto de *software*. Em ambos os níveis foram encontrados obstáculos a se transpor. Porém, apesar das dificuldades impostas pelo desenvolvimento do *hardware*, os requisitos de *software* foram mais desafiadores. O que já era esperado, conforme percebido pelo conteúdo da literatura acerca do tema.

Assim, chegou-se à conclusão que um item freqüentemente empregado em redes de sensores sem-fio era importante ferramenta a ser adotada no desenvolvimento do *software*. Trata-se do sistema operacional de tempo-real (RTOS), cuja utilização simplifica bastante o desenvolvimento do *software*. Por isso, um dos capítulos é dedicado a introduzir os conceitos relacionados a um RTOS e sobre sua utilização em sistemas embarcados.

Através do conjunto de ferramentas adotadas, ao final, chega-se à geração de um novo dispositivo que, quando integrado a um sistema de iluminação pública trará diversos

benefícios, sanando muitos dos problemas hoje encontrados em tais sistemas.

1.2 Justificativa e objetivos

O emprego de uma rede de sensores sem-fio aplicada ao gerenciamento da iluminação pública, foco desta dissertação, já foi documentado em alguns trabalhos recentes (JING, 2007; LEE, 2006). Jing *et alli* (2007) propuseram a utilização de uma rede de sensores sem-fio para controle e monitoramento da iluminação pública, através da utilização de transceptores com modulação FSK na faixa ISM de 315/433/868 e 915 MHz funcionando em conjunto com módulos GPRS. Já Lee *et alli* (2006), por sua vez, propuseram a utilização do protocolo de comunicação ZigBeeTM para redes de sensores sem-fio. No sistema, os autores utilizaram transceptores compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4 na faixa ISM de 2.4 GHz em conjunto com módulos CDMA.

Em ambos os trabalhos, os autores mesclaram duas tecnologias de comunicação sem-fio na constituição dos sistemas. No entanto, isto acarreta um aumento considerável no custo da rede, além de tornar o sistema dependente de outros sistemas de comunicação utilizados como *backbone* - caso de redes celulares CDMA ou GSM. Um sistema que empregue apenas uma tecnologia de comunicação sem-fio - a ser aqui proposto - além de ter um menor custo associado ao nó, torna a rede mais segura e menos susceptível a eventuais ocorrências de falhas em outras redes.

Além disso, pretende-se trazer outras sugestões de melhorias às contribuições citadas, de forma a permitir o emprego adequado da rede de sensores aos sistemas de iluminação pública presentes nos municípios brasileiros. Em suma, busca-se oferecer uma proposta para a implementação de uma rede de comunicação sem-fio a ser instalada ao longo das vias públicas de uma cidade, de forma semelhante ao que ocorre atualmente com as redes de distribuição de energia elétrica e de serviços telefônicos. Esta terá como funções principais a prestação de serviços de interesse público, tal qual o gerenciamento do sistema de iluminação pública.

1.3 Contribuição

No início das pesquisas científicas na área de iluminação, que remete aos dias de Edison, a iluminação pública era a força propulsora primordial dos avanços tecnológicos observados. Entretanto, nas últimas décadas, pouco avanço significativo tem sido visto

nesta área. Nos sistemas de iluminação pública atuais, percebe-se que os poucos avanços se restringiram à melhoria das lâmpadas empregadas em sua eficiência energética. Passou-se a empregar lâmpadas de alta pressão de vapor de sódio em substituição as lâmpadas de alta pressão de vapor de mercúrio, menos eficientes energeticamente.

Nos últimos anos, se percebe um aumento nas contribuições nesta área, principalmente na busca de melhorias na forma de acionamento das lâmpadas via substituição dos reatores eletromagnéticos - até hoje empregados - por reatores eletrônicos de maior eficiência energética. Porém, há ainda desafios a vencer, como a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica (MARCHEZAN, 2007; COSTA, 2009).

Além destes esforços, vale destacar os avanços promissores que têm sido feitos na área de iluminação de estado sólido. O emprego de diodos emissores de luz (os LEDs) para geração de luz branca já se mostra real (PINTO, 2008). Sua aplicação direta na iluminação pública possui forte apelo, não só pela elevada eficiência energética e pela qualidade da luz produzida, mas também pela sua elevada vida útil. É bastante provável que, nas próximas décadas, a presença de lâmpadas de estado sólido nos sistemas de IP se torne realidade e traga consigo muitos avanços, não apenas na lâmpada em si, mas também nas próprias tecnologias de acionamento, bem como, na forma de administração dos sistemas e de sua interação com o ambiente e com as pessoas.

Contudo, apesar dos avanços na forma de conversão de energia em luz - lâmpadas e reatores, do ponto de vista de gerenciamento e controle dos sistemas de iluminação, ainda se utiliza a mesma tecnologia de várias décadas passadas, não havendo qualquer avanço significativo. Até hoje, apesar de todo o progresso científico e tecnológico observado nos campos de informação, computação e comunicação, as lâmpadas continuam a ser controladas da mesma forma e os mesmos problemas continuam presentes.

Este trabalho vai de encontro a esta realidade, trazendo uma contribuição significativa em uma área, até hoje, alheia aos avanços tecnológicos. Lançando mão das tecnologias de computação embarcada e comunicação sem-fio, uma solução inovadora para os diversos problemas observados nos sistemas de iluminação pública é proposta.

Através do emprego efetivo de tecnologias de última geração na solução do problema em foco, uma importante contribuição de cunho social é apresentada. Pode-se resumir este problema à dificuldade existente para o gerenciamento dos parques de iluminação pública. Isto acarreta uma série de outros problemas, tais como elevados custos de manutenção e de consumo de energia elétrica, bem como, desempenho ineficiente, pela ausência de métodos de diagnosticação de equipamentos danificados (como lâmpadas, relés e reatores).

Salienta-se que, apesar dos investimentos que se façam necessários, o retorno econômico dos recursos públicos pelo emprego da solução proposta tende a ser positivo. Com isto, as grandes somas gastas pelos municípios, na manutenção de seus parques de iluminação pública, cuja importância é incontestável, poderão ser minimizadas, e as economias resultantes poderão, futuramente, ser empregadas em outras áreas sempre carentes de investimentos, como saúde e educação.

A lista a seguir resume os problemas e as respectivas contribuições para cada caso.

- Os parques de iluminação pública, em sua maioria, não possuem medidores de energia. O consumo de energia é calculado pela potência instalada e pelo tempo estimado de utilização (considera-se 360 horas mensais). Obviamente, isto leva a um resultado incorreto, porque não se leva em consideração o tempo correto de utilização, os pontos de iluminação inoperantes e o consumo efetivo de energia. Neste sentido, se contribui ao apontar uma solução de medição efetiva de energia, realizada, ponto a ponto, e, portanto, resultando em um valor mais próximo do valor correto.
- A inexistência de um método de diagnóstico de falhas dos elementos do sistema, como lâmpadas, relés e reatores, faz com haja pontos inoperantes no sistema, prejudicando seu desempenho. Assim, contribui-se com um método que permite a rápida identificação dos pontos de iluminação danificados, de forma que o reparo possa ser feito em menor tempo do que é feito hoje.
- Contribui-se, ainda, com o gerenciamento do sistema no que tange ao controle dos pontos à distância e ao monitoramento dos tempos de utilização, que permitem a realização de manutenções preventivas - capacidades, hoje, ausentes nos sistemas de iluminação pública.

1.4 Organização textual

No segundo capítulo, tem-se uma breve revisão sobre redes de comunicação de dados, incluindo, em destaque, o caso particular das redes de sensores sem-fio. Este capítulo visa fornecer ao leitor ferramentas básicas para melhor compreensão das análises realizadas posteriormente.

As redes de sensores sem-fio são abordadas em detalhes no capítulo terceiro, a partir do ponto de vista dos padrões de comunicação (protocolos) existentes. Neste capítulo, há um maior destaque com relação ao padrão ZigBeeTM, por ser o padrão mais fortemente

estabelecido atualmente para redes de sensores sem-fio.

O capítulo quarto é focado em introduzir alguns conceitos sobre sistemas operacionais de tempo real (RTOS), por se tratar de um elemento importante no desenvolvimento do sistema proposto. Espera-se que este capítulo sirva para esclarecer o funcionamento de um RTOS, bem como, os objetivos de sua utilização.

A concepção e o desenvolvimento do sistema são apresentados no capítulo quinto. Este capítulo traz informações acerca do desenvolvimento do *hardware* e do *software* que compõem os dispositivos principais do sistema. Há uma descrição das partes que os compõem e a apresentação de alguns protótipos desenvolvidos.

O sexto capítulo discute resultados obtidos em testes realizados com protótipos. Finalmente, o capítulo sétimo - último capítulo - apresenta as conclusões do autor e traz sugestões para trabalhos futuros.

Em suma, a linha seguida neste trabalho consiste, basicamente, na introdução de conceitos sobre as ferramentas adotadas para se alcançar o objetivo principal. Seguida de uma análise do objeto alvo das contribuições - o sistema de iluminação pública. A partir da qual se iniciou o processo de desenvolvimento de idéias, a seleção de uma idéia e sua concretização, a qual é descrita na seqüência. Então, se parte para a etapa de validação da idéia através de testes em laboratório, que não englobam todas as possibilidades, porém permitem vislumbrar se o caminho escolhido poderá, quando totalmente percorrido, conduzir aos resultados almejados.

2 REDES DE SENSORES SEM-FIO

2.1 Introdução a redes de comunicação de dados

Redes de comunicação de dados possuem características comuns, como a topologia, meio físico, a taxa de transmissão de dados, alcance, as mensagens, as formas de endereçamento, número de nós, protocolo e o transceptor. Estas características compõem o conjunto das especificações de uma rede.

2.1.1 Mensagens

Uma rede de comunicação de dados deve conter mensagens específicas para o fim que se destina. Dentre essas informações, pode-se incluir consumo de energia, vida útil dos elementos do sistema, detecção de ocorrência de falhas, etc. Quando a rede pode ser dividida em sub-redes ou células, as mensagens podem ser classificadas em internas ou externas. Mensagens internas são específicas de uma sub-rede ou célula, enquanto mensagens externas são trocadas entre sub-redes em um contexto global. O método de destino das mensagens pode ser ponto-a-ponto (P2P), para um grupo de nós (*multicast*) ou para todos os nós (*broadcast*).

2.1.2 Topologia da rede

A topologia da rede determina como a rede é organizada e como um nó pode acessar o meio de comunicação. Existem várias maneiras de interligar um conjunto de nós a fim de formar uma rede de comunicação de dados. Basicamente, é possível separar os métodos de ligação de rede em método convencional e método *fieldbus*. No primeiro caso, tem-se um nó mestre e vários nós escravos conectados diretamente ao mestre por uma ligação exclusiva (figura 3). Já no método de ligação *fieldbus*, todos os nós são conectados a um mesmo barramento (figura 4).

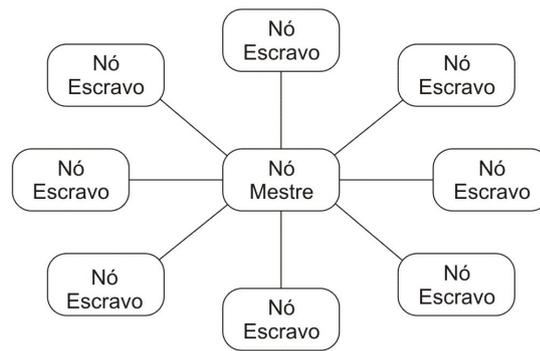
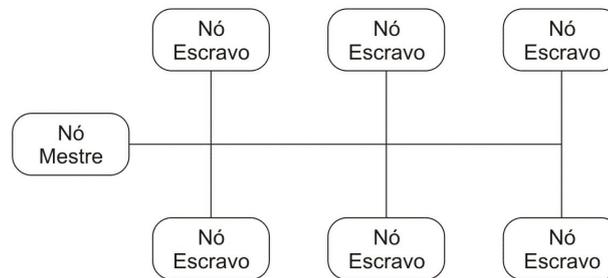


Figura 3: Cabeamento convencional de rede.

Figura 4: Cabeamento de rede *fieldbus*.

Considerando-se uma rede com elevado número de nós, a topologia de rede *fieldbus* é preferível por simplificar a conexão entre eles, uma vez que utiliza uma conexão comum a todos.

2.1.3 Taxa de transmissão de dados

A taxa de transmissão de dados expressa o quão rápido a informação é passada de um nó para outro e é medida em número de bits transferidos por segundo (bps). Ao se projetar a taxa de transmissão de uma rede, existem algumas considerações que afetam a escolha de uma taxa de bits específica a ser utilizada. Se o processo não demanda mensagens longas e alta atividade de mensagens transferidas para realizar suas tarefas, taxas de transmissão baixas são mais apropriadas. Desta forma é possível a utilização de processadores com baixa capacidade de processamento e, portanto, de menor custo.

2.1.4 Número de nós e modos de endereçamento

O número de nós de uma rede refere-se ao número máximo de dispositivos endereçáveis que podem se comunicar utilizando um meio comum de comunicação. A especificação do número de nós deve prever a possibilidade de expansão da rede (escalabilidade). Para que cada nó possa enviar e receber mensagens corretamente, é necessário identificá-lo através de um endereço específico. Isto é feito através de um modo de endereçamento, que pode ser de dois tipos, estático ou dinâmico. No primeiro caso, um endereço específico é atribuído a cada nó e este endereço não pode ser alterado. Já no modo de endereçamento dinâmico, o endereço do nó pode ser alterado. Este modo é utilizado, principalmente, quando existem nós móveis na rede ou quando a rede permite a entrada e saída de nós a qualquer momento.

2.1.5 Controle de erros e confinamento de falhas

Uma das especificações mais importantes no projeto de uma rede é sua capacidade de controle de erros. Usar as estratégias de controle de erros corretas para uma determinada aplicação é essencial para melhorar o desempenho da rede. Existem muitos métodos de correção e controle de erros, mas os mais utilizados são a correção posterior de erro e a requisição de resposta automática. Quando um erro ocorre em uma rede, a unidade mestre deve registrar os nós envolvidos na transação da mensagem corrupta, para prevenir futuros problemas de funcionamento da rede. As redes existentes atualmente implementam diferentes técnicas de confinamento de falhas.

2.1.6 Meio físico de transmissão e alcance

No processo de especificação de uma rede, a escolha do meio de transmissão é um fator importante. Geralmente, a aplicação a que a rede se destina define o meio de transmissão mais apropriado. Existem redes que definem mais de um meio de transmissão na especificação do protocolo, sendo que a única alteração nos nós é a forma de acesso ao meio (*driver*). Os meios de transmissão mais utilizados em protocolos de redes *fieldbus* são par trançado, linha de energia, infravermelho, rádio-freqüência, cabo coaxial e fibra ótica. Em grande parte das aplicações existentes os meios de par trançado e rádio-freqüência permitem uma relação custo/benefício viável.

2.1.7 Protocolos de comunicação

Toda e qualquer rede *fieldbus* é baseada no modelo de referência OSI (Open System Interconnection), mostrado na figura 5 (DENARDIN, 2004; SILVEIRA, 2004). Estas podem implementar todas ou apenas algumas camadas do modelo OSI, dependendo do nível de sofisticação necessário. Cada camada implementa seu próprio protocolo. E, em geral, as informações do protocolo são inseridas no pacote de informações pela adição de um cabeçalho específico, cujos campos serão processados (conforme protocolo) pela respectiva camada no ponto de destino.

7	Camada de Aplicação
6	Camada de Apresentação
5	Camada de Sessão
4	Camada de Transporte
3	Camada de Rede
2	Camada de Enlace de Dados
1	Camada Física

Figura 5: Camadas do modelo de referência OSI

A idéia básica em dividir o conjunto de protocolos de comunicação em camadas (modelo OSI) se deve ao fato de que isto simplifica o entendimento do funcionamento geral - divide-se o problema em pequenas partes. Cada camada corresponde a novas funções agregadas ao conjunto de funções disponibilizadas pelas camadas inferiores. As camadas são totalmente independentes, sendo que cada uma fornece serviços à camada superior subsequente, a qual não interfere nem sofre interferência pela forma de como esses serviços são implementados. A interação entre elas se dá apenas através de pontos de acesso de serviço (SAP) (ZIMMERMANN, 1980).

A camada física corresponde à primeira camada e está diretamente relacionada ao meio físico de transmissão a ser utilizado, bem como, a forma de representação física dos bits (sinais elétricos, óticos, mecânicos, etc). Em seguida, tem-se a camada de enlace de dados, identificada como camada de acesso ao meio (MAC) nos padrões IEEE 802¹. Esta tem como função dar significado lógico ao conjunto de bits recebidos da camada física e realizar correções de erros. Também realiza o endereçamento físico das entidades que compõem o sistema de comunicação.

¹Isto será importante mais adiante no texto.

A camada de rede se faz presente sempre que há a necessidade de se repassar a informação entre muitas entidades que compõem uma rede até se chegar ao destino almejado. Assim, o principal serviço prestado por esta camada é o roteamento da informação a partir da fonte até seu destino, passando por pontos intermediários.

Sobre a camada de rede se encontra a camada de transporte, a qual se responsabiliza por realizar o controle do transporte dos dados (que não é realizado nos pontos intermediários da rota), assegurando, assim, a confiabilidade dos dados. Um exemplo do conjunto de camadas de rede e transporte é o bem conhecido TCP/IP utilizado para transações de informação na internet. O protocolo IP realiza o roteamento dos pacotes que contém parte da informação total, sendo que o TCP se responsabiliza por realizar a agregação dos pacotes e disponibilizar a informação de forma confiável às camadas subsequentes.

A camada de sessão realiza a conexão lógica entre duas entidades através do estabelecimento de uma sessão de comunicação. Ela realiza o controle da troca de dados e a sincronização da comunicação.

A camada de apresentação auxilia na interpretação das informações a ser realizada na camada de aplicação, através da representação correta dos mesmos. Exemplos de serviços realizados pela camada de apresentação são a criptografia de dados e a compactação de dados. Finalmente, a camada de aplicação é a fonte e o destino últimos dos dados. As aplicações que compartilham esta camada são responsáveis por dar às informações o fim a que elas se destinam.

2.1.8 Transceptor

O transceptor corresponde ao *hardware* necessário para realizar a transmissão e a recepção do sinal de comunicação (ex.: sinal sonoro, eletromagnético, ótico, etc.). A escolha pelo transceptor adequado para uma rede deve levar em consideração, não apenas os principais fatores utilizados para especificar a rede, mas também o custo unitário do transceptor. Isto porque, no caso de redes com elevado número de nós, o custo unitário do transceptor tem uma contribuição significativa no custo total de implantação da rede.

2.2 Rede de sensores sem-fio

Uma rede de sensores é composta por quatro elementos (SOHRABY K; MONOLI, 2007):

- Um conjunto de sensores localizados ou distribuídos;
- Uma rede de comunicação de dados;
- Um ponto central para agregação de informação;
- Um conjunto de recursos computacionais para realizar processamento de dados e eventos, e verificação de estados.

Sensores são tipicamente empregados em larga escala. Uma rede de sensores sem-fio consiste em nós densamente distribuídos, que suportam sensoriamento, processamento de sinais, computação embarcada e conectividade sem-fio. Os sensores estão logicamente conectados de forma auto-organizável e, geralmente, transmitem suas informações até estações coletoras que agregam parte ou toda a informação da rede. Uma rede de sensores sem-fio possui algumas características principais, tais como restrições de energia e vida útil de bateria, aquisição redundante de dados, ciclo de trabalho curto e fluxos convergentes (de muitos pra um)(SOHRABY K; MONOLI, 2007).

Cada nó da rede é composto por um microcontrolador, um transceptor de RF, sensores e atuadores necessários, bem como, uma fonte de energia (normalmente uma bateria). Os nós devem estar interconectados, sendo todos (ou a maioria deles) capazes de rotear as informações pela rede até um ponto de coleta, através de algum algoritmo de roteamento por múltiplos saltos.

O mínimo consumo de energia é um dos maiores desafios para uma rede de sensores. Espera-se que, futuramente, os nós possam absorver energia do próprio ambiente onde se encontram, como energia de vibrações, energia luminosa, energia calórica, etc. Além disso, com o constante avanço da indústria microeletrônica, estima-se que os nós passem a ter dimensões extremamente reduzidas - menores do que um grão de areia - podendo ser, virtualmente, utilizados em qualquer lugar e em muitas aplicações nunca antes imaginadas.

3 PADRÕES DE COMUNICAÇÃO PARA REDES DE SENSORES SEM-FIO

As redes de sensores sem-fio de curto alcance, baixa taxa de transmissão de dados, baixo custo e baixo consumo são também conhecidas como redes de área pessoal (PAN). Redes PAN podem ser classificadas em dois tipos: com sinal piloto de sincronização (*Beacon-enabled*) e sem sinal piloto de sincronização (*Nonbeacon-enabled*).

A diferença entre elas está no fato de que a comunicação entre dois dispositivos da rede com sinal piloto (ex. entre coordenador e escravo) é sempre precedida pelo envio deste sinal por parte do coordenador, como forma de avisar o nó escravo que a comunicação será iniciada. Enquanto que em redes do tipo sem sinal piloto, a comunicação pode ser iniciada a qualquer momento.

A rede do tipo com sinal piloto é ideal para os casos onde se deseja minimizar o consumo de energia, pois o nó escravo pode ficar hibernando entre os intervalos de envio do sinal e acordar apenas quando o mesmo for recebido.

Para os casos onde os nós da rede tenham disponibilidade de alimentação permanente, pode-se utilizar uma rede do tipo sem sinal piloto e manter os nós sempre em estado de alerta.

3.1 Especificação IEEE 802.15.4TM

Dentre os vários esforços realizados com intuito de tornar as redes de sensores sem-fio operacionais, destaca-se as especificações de padronização definidas pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Em 2003, o IEEE publicou a especificação IEEE 802.15 do grupo de tarefa 4,

cujo principal objetivo era a determinação de um padrão para comunicações sem-fio com baixo consumo de energia, de pouca complexidade e baixa taxa de transmissão de dados.

A especificação é direcionada a definir a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC) para redes sem-fio de área pessoal (WPAN), conforme o modelo de referência OSI. Sua aplicação é específica a rede WPAN, que conforme a especificação (IEEE, 2003) é "uma rede usada para transferir informações a distâncias relativamente curtas". Além de possuir pouca ou nenhuma infra-estrutura, uma rede WPAN permite soluções baratas, pequenas e energeticamente eficientes; podendo ser implementada em uma grande gama de dispositivos.

Uma rede WPAN, de acordo com o padrão IEEE 802.15.4TM, é composta por dois tipos de dispositivos: dispositivo de função completa (FFD) e dispositivo de função reduzida (RFD). O dispositivo FFD pode atuar como coordenador da rede (coordenador PAN), coordenador local ou dispositivo-terminal. Um dispositivo FFD pode se comunicar com qualquer outro dispositivo, seja FFD ou RFD; enquanto que um dispositivo RFD pode se comunicar apenas com um dispositivo FFD. Por ter menos recursos, um dispositivo RFD pode ser implementado com menor custo do que um dispositivo FFD.

3.1.1 Descrição da camada física (PHY)

A camada física fornece uma interface entre a camada de controle de acesso ao meio (MAC) e o canal físico de RF, através do *firmware* e do *hardware* de RF. Ela é responsável pelas seguintes tarefas:

- Ativação e desativação do transceptor RF;
- Medição de energia (ED) de canal RF;
- Medição de qualidade de sinal (LQI) para os pacotes recebidos;
- Verificação de atividade em canal (CCA);
- Seleção de canal;
- Recepção e transmissão de dados.

Duas opções de camadas físicas são propostas no documento (IEEE, 2003). As bandas de frequências utilizadas e respectivas taxas de transmissão estão descritas na tabela 2.

Tabela 2: Bandas de frequências e taxas de transmissão

PHY (MHz)	Bandas (MHz)	Modulação	Taxa de bits (kb/s)
868/915	868-868.3	BPSK	20
	902-928	BPSK	40
2450	2400-2483.5	O-QPSK	250

Fonte: IEEE 802.15.4, 2003

Foram definidos 27 canais, numerados de 0 a 26, disponíveis nas três bandas de frequências. Há 16 canais na banda de 2450 MHz, 10 canais em 915 MHz e 1 canal em 868 MHz. Emprega-se espelhamento espectral por sequência direta (DSSS) com modulação por deslocamento binário de fase (BSPK) para os canais em 868 e 915 MHz (2 MHz por canal) e modulação por deslocamento de fase em quadratura (O-QPSK) para os canais na banda de 2450 MHz (5 MHz por canal), resultando nas taxas de transmissão conforme tabela 2.

3.1.2 Descrição da camada de controle de acesso ao meio (MAC)

A camada MAC administra o acesso ao transceptor RF, sendo responsável pelas seguintes tarefas:

- Geração do sinal piloto da rede (caso coordenador);
- Sincronização ao sinal piloto;
- Suporte à associação e desassociação da rede PAN;
- Suporte à segurança;
- Emprego do mecanismo de acesso ao canal (CSMA-CA);
- Manipulação e manutenção do mecanismo de espaços de tempo reservados (GTS).
- Fornecimento de um enlace confiável entre dois pontos.

O objetivo último do protocolo da camada MAC é tornar eficiente e confiável o acesso ao meio compartilhado por vários dispositivos diferentes (Stallings, 2002 *apud* (MISIC J.; MISIC, 2008)). Para isso, o protocolo faz uso de algumas técnicas. Uma técnica muito utilizada é a técnica de evitar colisões de pacotes, a qual se baseia em detectar possíveis interferências através da verificação do meio antes de tentar transmitir um pacote ("ouvir

antes de falar”). Outras técnicas incluem a solicitação de permissão para acessar o meio e a divisão do tempo em fatias que são alocadas para quem solicitar o acesso.

No padrão IEEE 802.15.4, o mecanismo de acesso ao meio é conhecido por CSMA-CA. Neste mecanismo, o nó que deseja acessar o meio, primeiro verifica se o canal está ocupado (“ouve o meio”). Se não estiver, ele pode transmitir o pacote. Caso o canal esteja ocupado, o nó aguarda um tempo pré-determinado antes de realizar novamente o mesmo procedimento.

Quando este mecanismo não for suficiente para garantir uma enlace com desempenho aceitável, o padrão IEEE 802.15.4 fornece um mecanismo que permite o acesso livre ao canal. Trata-se do emprego dos espaços de tempo reservados (GTS). Neste caso, o nó transmissor solicita ao coordenador da rede um espaço de tempo reservado. Caso o coordenador aceite o pedido, o nó terá acesso livre ao canal durante determinado tempo, enquanto os outros nós não poderão acessá-lo. Porém, este mecanismo só é possível em redes com sinal de sincronização (*beacon-enabled*), pois os nós devem estar sincronizados.

3.1.3 Formato dos pacotes MAC e PHY

Cada pacote da camada PHY é formado, conforme a ordem de listagem, pelos seguintes elementos:

- campo de sincronização (SHR), que permite ao receptor sincronizar a transmissão recebida;
- campo (PHR), que contém o tamanho da carga do pacote (*payload*);
- carga do pacote (PSDU), que contém o pacote da camada MAC.

Os campos do quadro PHY podem ser vistos na figura 6. O campo SHR contém o preâmbulo, composto por 32 zeros binários, e o campo de 8 bits SFD, que indica o fim da sincronização e corresponde ao valor 11100101b.

Octetos:4	1	1		Variável
Preâmbulo	SFD	Tamanho do quadro (7 bits)	Reservado (1bit)	PSDU
SHR		PHR		Carga do pacote PHY

Figura 6: Formato do quadro PHY IEEE 802.15.4™

Tabela 3: Campo de identificação do tipo de quadro

Valor do campo	Descrição
000	Beacon
001	Dados
010	Reconhecimento
011	Comando MAC
100 - 111	Reservados

Fonte: Padrão IEEE 802.15.4TM, 2003

O campo que contém o tamanho do pacote é representado por um valor de 7 bits, portanto, seu tamanho máximo é de 127 bytes.

Já o pacote da camada MAC contém os campos de controle (MHR), com informações administrativas e de segurança, a carga do pacote de tamanho variável e um campo (MFR) que contém a verificação da integridade dos dados (FCS). O campo MHR contém controle de quadro, número de seqüência e informações de endereçamento. O formato do quadro está representado na figura 7.

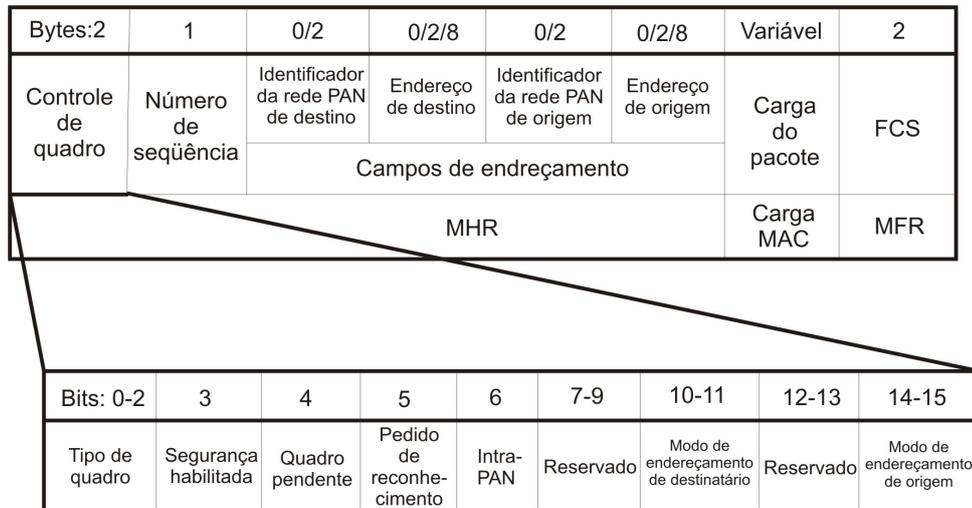


Figura 7: Formato do quadro MAC IEEE 802.15.4TM

O campo de controle de quadro possui tamanho de dois bytes. Sua estrutura e os significados dos campos de bits podem ser conferidos na figura 7. O campo que indica o tipo de quadro tem um tamanho 3 bits, cujo significado se encontra na tabela 3. Já os campos de modo de endereçamento de destino e de origem com tamanho de 2 bytes, possuem significado de acordo com a tabela 4. O bit 3 indica se a carga do pacote está ou não criptografada. O bit 4 indica se há algum dado ainda para ser transferido. O bit 5 indica se o quadro necessita de reconhecimento. E o bit 6 indica se o quadro deve ser transmitido na mesma rede PAN ou para outra rede PAN (inter-PAN).

Tabela 4: Campo de modo de endereçamento

Valor do campo	Descrição
00	Identificador PAN e campos de endereços ausentes
01	Reservado
10	Endereçamento contém endereço curto de 16 bits
11	Endereçamento contém endereço longo de 64 bits

Fonte: Padrão IEEE 802.15.4TM, 2003

O último campo do quadro MAC contém a verificação da integralidade dos dados. Trata-se de um valor de verificação de redundância cíclica (CRC) de 16 bits, usado para detectar erros na transmissão e calculado utilizando o campo MHR e a carga do pacote MAC, através do polinômio gerador padrão de grau 16 (3.1):

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (3.1)$$

3.2 Especificação do Padrão ZigBee

Seguindo a iniciativa do IEEE, algumas grandes empresas da indústria de microeletrônica formaram uma aliança - denominada Aliança ZigBee - com o intuito de definir um protocolo padrão que, tendo como base a especificação IEEE 802.15.4, pudesse estendê-la de forma a permitir a dispositivos de múltiplos fabricantes condições de organizar uma rede de comunicação e interagir de forma transparente, assim como ocorre entre os computadores e a internet.

Então, no final de 2004, a Aliança ZigBee lançou a primeira versão da especificação do padrão ZigBeeTM(¹). Em 2006, o padrão IEEE 802.15.4 foi atualizado e a Aliança ZigBee lançou uma nova versão da especificação (ZigBee 2006) (ALLIANCE, 2006). Por fim, em 2007, foi publicada a última versão da especificação (ZigBee 2007), também conhecida por ZigBee Pro. Atualmente, o padrão ZigBee é um forte candidato a ser reconhecido internacionalmente como a tecnologia que possibilitará conectar os objetos entre si e às pessoas, através de redes de sensores sem-fio.

3.2.1 Dispositivos ZigBee

Em uma rede ZigBee pode-se ter até três tipos diferentes de dispositivos:

¹ZigBee é marca registrada da ZigBee Alliance. O identificador de marca registrada será omitido no restante deste documento.

- Coordenador ZigBee: coordenador geral de toda a rede. Trata-se de um dispositivo com recursos completos, conforme padrão IEEE 802.15.4-2003 (FFD).
- Roteador ZigBee: um participante da rede ZigBee que pode agir como coordenador em seu espaço "pessoal" de operação, sendo capaz de rotear mensagens entre dispositivos e suportar associações. Trata-se de um dispositivo com recursos completos, conforme padrão IEEE 802.15.4-2003 (FFD).
- Escravo ou dispositivo final ZigBee: participante da rede ZigBee, mas que não é coordenador ou roteador. Trata-se de um dispositivo com recursos reduzidos, conforme padrão IEEE 802.15.4-2003 (RFD).

3.2.2 Camadas da pilha ZigBee

A pilha do protocolo ZigBee é composta por camadas, conforme modelo de referência OSI representado na figura 5. Cada camada realiza um conjunto específico de serviços para a camada imediatamente superior. Uma entidade de dados fornece o serviço de transmissão de dados e uma entidade de administração fornece todos os outros serviços. Cada entidade expõe uma interface para a camada superior através de um ponto de acesso de serviço (SAP). E cada ponto de acesso SAP suporta um número de chamadas de serviço, permitindo alcançar a funcionalidade necessária.

O ZigBee é construído sobre as camadas acesso ao meio (MAC) e física (PHY) do padrão IEEE 802.15.4-2003. O ZigBee define a camada de rede (NWK) e uma estrutura para a camada de aplicação. Sobre a camada de rede está a camada de aplicações. Esta é constituída pelos objetos de aplicação ZigBee. A definição dos objetos é de responsabilidade de quem emprega o protocolo, com exceção de um objeto especial, definido pelo padrão. Trata-se do objeto de dispositivo ZigBee (ZDO). Este objeto é responsável por definir o papel do dispositivo na rede (coordenador, roteador ou dispositivo final), bem como, gerenciar as tarefas a ela relacionadas (início da rede, associação, busca de rotas, etc). Cada objeto acessa às camadas inferiores do protocolo através dos pontos de acesso de serviço (SAP). Assim, a estrutura de aplicações consiste de uma sub-camada de suporte à aplicação (APS) e do objeto ZDO. Objetos de aplicações definidas pelo desenvolvedor utilizam a estrutura de aplicação e compartilham a APS e os serviços de segurança com o ZDO. A estrutura completa da pilha ZigBee pode ser vista na figura 8.



Figura 8: Camadas da pilha ZigBee

3.2.2.1 Camada de rede

A camada de rede (NWK) define a topologia da rede e suporta as topologias estrela, árvore e malha (representadas em 9). Na topologia estrela, a rede é controlada por um único dispositivo (coordenador ZigBee), responsável por inicializar e manter os dispositivos na rede. Todos os outros dispositivos ("dispositivos finais") comunicam-se diretamente com o coordenador ZigBee. Nas topologias árvore e malha, o coordenador inicializa a rede, mas a mesma pode ser expandida através de dispositivos roteadores ZigBee. Na topologia árvore, os roteadores ZigBee retransmitem dados e mensagens de controle utilizando uma estratégia de roteamento hierárquica. A topologia malha permite comunicação completa ponto-a-ponto (P2P). As diversas topologias estão representadas na figura 9.

3.2.2.2 Sub-camada de suporte à aplicação (APS)

Fornece uma interface entre a camada de rede (NWK) e a camada de aplicação (APL) através de um conjunto geral de serviços que são usados pelo ZDO e os objetos definidos pelo fabricante. Os serviços são fornecidos por duas entidades:

- A entidade de dados APS (APSDE) através do ponto de acesso (APSDE-SAP) - para serviços de troca de dados.
- A entidade de administração APS (APSME) através do ponto de acesso (APSME-

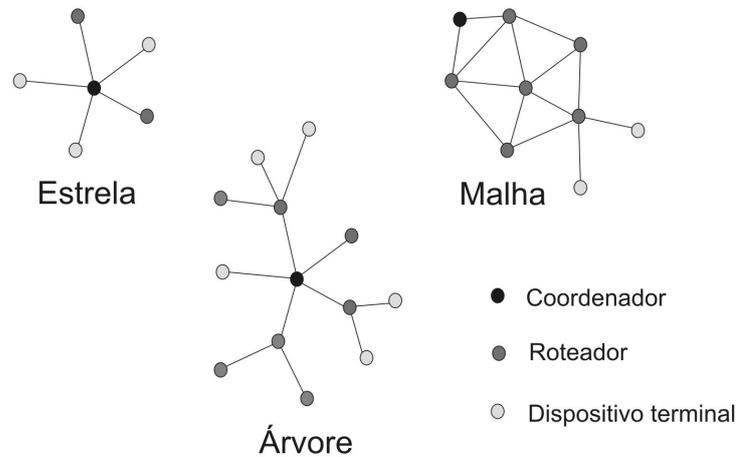


Figura 9: Topologias de rede ZigBee

SAP) - para serviços de segurança e associação (*binding*) .

3.2.3 Estrutura de aplicação

Trata-se do ambiente no qual objetos de aplicação são hospedados. Pode haver até 240 objetos de aplicação compartilhando o mesmo rádio ZigBee (transceptor), cada qual com um endereço (*endpoint*) de 1 a 240. O endereço 0 (*endpoint* 0) é usado pelo objeto ZDO e o 255 é reservado para transmissão de dados a todos os objetos de aplicação. Endereços 241 a 254 são reservados para uso futuro.

3.2.4 Atributos e clusters

Uma variável (estado ou quantidade física) é conhecida no protocolo ZigBee como um *atributo*. Uma mensagem trocada entre dois nós da rede (p .ex. um comando ou uma resposta) é conhecida, no protocolo ZigBee, como um *cluster*. Um *cluster* é um conjunto de um ou mais *atributos*.

Um nó ZigBee contém um único rádio. Porém, cada nó pode ter até 240 objetos de aplicações (dispositivos físicos a ser controlados). Ou seja, é possível enviar mensagens para controlar até 240 objetos que compartilham um mesmo transceptor. No exemplo da figura 10, as quatro lâmpadas compartilham apenas um rádio ZigBee e podem ser controladas através de duas chaves que compartilham outro rádio ZigBee. Além disso, o controle de cada lâmpada pode envolver diversas variáveis (atributos) e mensagens a ser

trocadas (clusters). Como exemplo, pode-se ligar ou desligar uma lâmpada, alterar sua luminosidade, fazê-la piscar, deixá-la em um determinado estado por determinado tempo, medir (ler) sua temperatura, etc. No caso do primeiro exemplo, de se desejar controlar o estado da lâmpada (ligada ou desligada), tem-se um cluster (mensagem que define a troca de estado) e dois possíveis atributos (lâmpada ligada e lâmpada desligada).

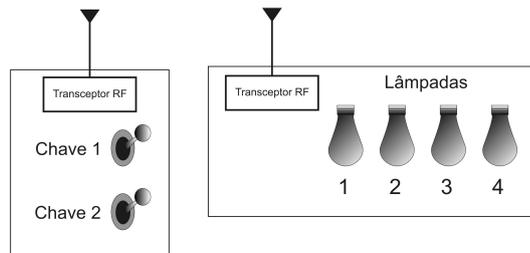


Figura 10: Compartilhamento do rádio ZigBee entre vários objetos.

3.2.5 Perfis de aplicação ZigBee

Para implementar uma rede ZigBee é necessário desenvolver um perfil ZigBee, isto é, um acordo com relação às mensagens que podem ser trocadas entre os dispositivos e às respectivas ações a ser tomadas por estes. Os perfis permitem criar um sistema distribuído e interoperável. Eles possibilitam que as aplicações enviem comandos, solicitem informações e processem comandos e pedidos.

Um perfil ZigBee deve ter um identificador único e pode conter até 65.536 descrições de dispositivos e até 65.536 identificadores de clusters. Cada cluster pode ter até 65.536 atributos. Contudo, um único dispositivo ZigBee pode oferecer suporte a múltiplos perfis.

Um dispositivo ZigBee contém apenas um rádio, um único endereço IEEE e um único endereço de rede (NWK address). Porém, um dispositivo ZigBee pode ter até 240 endpoints (campo de 8-bits que descreve diferentes aplicações suportadas). Cada endpoint suporta apenas um perfil ZigBee. As informações a respeito do perfil e de suas funcionalidades são armazenadas em descritores, os quais são enviados a outros dispositivos quando houver solicitações de descoberta de serviço.

Os perfis de aplicação podem ser públicos ou proprietários (definidos pelo desenvolvedor). Cada perfil de aplicação deve ter um identificador único. Até o presente momento, há dois perfis de aplicação públicos, definidos pela Aliança ZigBee: o perfil público de automação residencial (*ZigBee Home Automation Public Profile*) e o perfil público de energia inteligente (*ZigBee Smart Energy Public Profile*).

3.2.6 Serviços de rede

3.2.6.1 Descoberta de dispositivo

É o processo onde um dispositivo ZigBee descobre outros dispositivos ZigBee. Há duas formas: pedido de endereço de rede (endereço de 16 bits) ou de endereço IEEE (endereço de 64 bits).

O pedido de endereço IEEE é enviado a um dado dispositivo e se assume que o endereço de rede é conhecido. Já o pedido de endereço de rede é transmitido a todos os dispositivos (*broadcast*) e o mesmo carrega o endereço IEEE conhecido.

3.2.6.2 Descoberta de serviço

É o processo onde as capacidades de um dispositivo ZigBee são descobertas por outros dispositivos ZigBee. É realizado através de uma solicitação a cada dispositivo (*unicast ou broadcast*).

3.2.7 Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO)

O objeto de dispositivo ZigBee (ZDO) contém a aplicação que emprega a camada de rede para implementar os diferentes tipos de dispositivos ZigBee (coordenador, roteador e dispositivo final).

O objeto ZDO corresponde à primeira e única aplicação que faz parte da especificação do padrão. Seu endereço (de aplicação) é o *endpoint* 0. Portanto, todas as mensagens que são trocadas entre os dispositivos em virtude da criação e da manutenção da estrutura da rede são originadas deste endereço e destinadas a este mesmo endereço.

3.2.8 Redes ZigBee

Cada rede ZigBee (rede do tipo PAN) contém uma identificação (PAN ID) de 16 bits. A rede é composta por três tipos de dispositivos: coordenador, roteador e dispositivo final (escravo).

O coordenador inicia a rede (escolhe PAN ID e canal) e permite que outros dispositivos se juntem a ela. Ele pode transmitir, receber e rotear dados. Não pode ser alimentado à bateria, apenas pela rede elétrica. Não pode entrar em estado de dormência. Há apenas um coordenador em toda a rede.

O roteador deve se juntar a uma rede antes de poder operar. Após, pode permitir outros dispositivos ingressar na rede. Ele pode transmitir, receber e rotear dados. Não pode ser alimentado à bateria, apenas pela rede elétrica. Não pode entrar em estado de dormência. Pode haver vários em uma rede.

O dispositivo final (escravo) precisa ingressar na rede através de um roteador ou do coordenador. Não pode permitir outros dispositivos ingressar na rede nem pode rotear dados. Pode receber e transmitir dados. E pode ser alimentado à bateria, pois pode entrar em estado de dormência. Pode haver vários em uma rede.

3.2.8.1 Iniciando a rede ZigBee

O processo de criação de uma rede ZigBee é feito através dos seguintes procedimentos:

1. O coordenador deve selecionar uma PAN ID e um canal.
 - (a) O canal é escolhido através da detecção de energia dos canais (energy scan).
 - (b) O coordenador seleciona um canal com baixo nível de energia.
 - (c) O coordenador realiza uma procura por redes próximas existentes (PAN scan).
 - (d) Ele envia uma mensagem de transmissão a outros coordenadores e roteadores.
 - (e) Os mesmos respondem enviando sua identificação (PAN ID).
 - (f) O coordenador, então, inicia a rede com uma PAN ID e um canal não utilizados.
2. O coordenador tem o endereço da rede igual a zero (0).

3.2.8.2 Associando-se à uma rede ZigBee

O processo de associação de um dispositivo à rede ZigBee é feito através dos seguintes procedimentos:

1. Dispositivos roteadores e/ou escravos podem se conectar à rede.
 - (a) Eles realizam uma procura por redes próximas (PAN scan).
 - (b) Recebem uma lista de redes disponíveis dos dispositivos próximos.
 - (c) Caso haja a rede desejada por eles e que permita novos ingressos, eles enviam um pedido de associação ao dispositivo coordenador ou roteador da rede.
2. Cada dispositivo recebe um endereço de rede de 16 bits.

3.2.8.3 Permissão de ingresso

Um roteador ou coordenador pode permitir o ingresso de novos dispositivos dependendo do estado do seu atributo de permissão de ingresso, bem como, do número máximo de dispositivos associados que ele suporta. Este número depende da capacidade máxima de armazenamento de pacotes do dispositivo.

3.2.8.4 Segurança

O coordenador pode iniciar a rede com uma chave de segurança AES de 128 bits. Somente os dispositivos com a mesma chave de segurança podem ingressar na rede. A chave pode ser conseguida via pré-instalação ou durante o processo de ingresso do dispositivo na rede diretamente.

3.2.9 Endereçamento na rede ZigBee

Uma rede ZigBee apresenta dois tipos de endereçamento: endereçamento de dispositivo (para onde o pacote será enviado) e endereçamento da camada de aplicação (para qual aplicação o pacote serve) , sendo que um mesmo dispositivo pode conter até 240 aplicações.

3.2.9.1 Endereçamento de dispositivo

Um dispositivo possui dois endereços: um endereço IEEE único e permanente de 64 bits e um endereço de rede de 16 bits (recebido quando o dispositivo ingressa na rede). O endereço de rede é único para cada nó que se encontra numa rede, porém não é estático.

Há dois casos onde um dispositivo pode mudar de endereço na rede:

1. Quando perde a comunicação com o roteador ou coordenador. Ele pode necessitar sair da rede e entrar novamente através de outro roteador ou coordenador.
2. Quando ele muda de tipo (roteador para escravo ou vice-versa), ele precisa sair da rede e ingressar novamente como o novo tipo de dispositivo.

Como no ZigBee o pacote de dados deve ser endereçado pelo endereço de rede de 16 bits do dispositivo destinatário, há a necessidade de se descobrir esse endereço antes da transmissão dos dados.

3.2.9.2 Endereçamento de aplicação

A camada de aplicação do ZigBee define pontos finais (endpoints) e identificadores (cluster IDs) que servem para endereçar serviços individuais e aplicações em um mesmo dispositivo ZigBee. Um ponto final (endpoint) é uma tarefa ou aplicação específica (p. ex. Controle de iluminação). Enquanto que um identificador (cluster ID) define uma função específica ou uma ação do dispositivo (p. ex. Ligar lâmpada).

O padrão ZigBee Pro (ZigBee 2007) suporta endereço de rede (PAN ID) de 16 bits e de 64 bits (PAN ID estendida). O endereço de rede estendido é usado durante o processo de ingresso de dispositivos na rede e para resolver conflitos que podem ocorrer com endereços de 16 bits. Para transmissão de dados se utiliza o endereço de 16 bits.

3.2.10 Transmissão de dados e roteamento

Pacotes de dados devem ser endereçados com o endereço do dispositivo destinatário e da camada de aplicação. Eles podem ser enviados a todos (broadcast) ou apenas a um único dispositivo (unicast). No caso da transmissão *broadcast*, todos os nós devem receber os dados. Por isso, cada nó que recebe o pacote, o retransmite três vezes. Já na transmissão *unicast*, os dados são endereçados através do endereço de rede de 16 bits do dispositivo destinatário. Caso este não seja conhecido, é necessário realizar a descoberta do mesmo, bem como, da rota a ser utilizada.

3.2.10.1 Descoberta do endereço da rede

É realizada através do envio de uma mensagem enviada a toda a rede (broadcast) que contém o endereço de 64 bits do dispositivo a ser o destinatário do pacote. Os dispositivos que recebem o pacote verificam se o endereço de 64 bits coincide com seu próprio endereço e, em caso positivo, reenviam um pacote contendo o endereço de 64 bits e o correspondente endereço de 16 bits.

3.2.10.2 Descoberta de rota

O ZigBee emprega roteamento de malha para estabelecer uma rota entre o dispositivo remetente e o destinatário. O processo de descoberta de rota é baseado no protocolo AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*), que utiliza tabelas em cada nó contendo o próximo salto até o nó de destino.

Tabela 5: Tabela de roteamento - ZigBee AODV

Campo	Tamanho
Endereço de destino	2 bytes
Estado	3 bits
Endereço do próximo salto	2 bytes

Fonte: Aliança ZigBee, 2007

Quando um nó remetente precisa descobrir a rota até um nó destinatário, ele envia um comando de pedido de rota (*broadcast RREQ*). O comando contém o endereço do remetente, do destinatário e um campo de custo de rota (medida usada para determinar a qualidade da rota). O custo da rota $C\{P\}$, expresso em 3.2, é definido pelo somatório do custo dos enlaces $C\{l\}$. $C\{l\}$ varia no intervalo $[0, 7]$ e é dado por 3.3:

$$C\{P\} = \sum_{i=1}^{L-1} C\{[D_i, D_{i+1}]\} \quad (3.2)$$

$$C\{l\} = \min \left(7, \text{arredondamento} \left(\frac{1}{p_l^4} \right) \right) \quad (3.3)$$

Onde o valor p_l é a probabilidade de entrega do pacote através do enlace l entre os nós D_i e D_{i+1} .

Conforme o pacote se propaga pela rede, cada nó retransmite (*broadcast*) a mensagem com o campo custo de rota atualizado e cria uma entrada temporária em sua tabela de descoberta de rota.

Quando o nó de destino recebe o pedido de rota, ele compara o campo custo de rota com relação aos pedidos de rota anteriormente recebidos. Se o campo de custo de rota for melhor do que os anteriores, ele envia ao nó remetente (nó que originou o pedido) um pacote de resposta de rota (*RREP*). Os nós intermediários recebem o pacote e repassam-no ao nó que originou o pedido. O processo completo está ilustrado na figura 11.

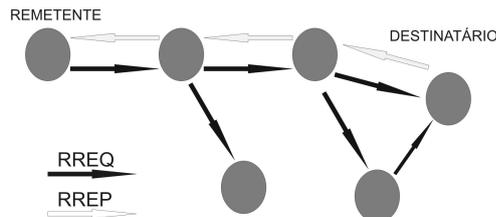


Figura 11: Descoberta de rota na rede ZigBee

Tabela 6: Tabela de descoberta de rota - ZigBee AODV

Campo	Tamanho
ID do pedido de rota	1 byte
Endereço do remetente	2 bytes
Endereço do destinatário	2 bytes
Custo de encaminhamento	1 bytes
Custo residual	1 byte
Tempo de expiração	2 bytes

Fonte: Aliança ZigBee, 2007

3.2.10.3 Retransmissões e reconhecimentos

O ZigBee possui pacotes de reconhecimento (*Ack*) tanto nas camadas de acesso ao meio quanto de suporte à aplicação. O reconhecimento *Ack* é transmitido ao nó remetente cada vez que o pacote for recebido pelo próximo nó. Se não houver recebimento do *Ack*, o dispositivo transmissor vai retransmitir o pacote até quatro vezes. Este *Ack* é o reconhecimento fornecido pela camada de acesso ao meio (MAC) do padrão IEEE 802.15.4. Além deste reconhecimento, o nó destinatário retorna um pacote de reconhecimento ao nó remetente ao receber o pacote. Caso o destinatário não receba o reconhecimento, ele retransmitirá o pacote até duas vezes. Este reconhecimento é fornecido pela camada de suporte à aplicação do ZigBee.

3.2.10.4 Conclusão

Este capítulo foi uma introdução sobre os padrões para comunicação sem-fio em redes de sensores. Basicamente, ele descreve o padrão IEEE 802.15.4TM para redes pessoais de baixa taxa de transmissão de dados, bem como, o padrão ZigBee, que acrescenta algumas funcionalidades ao padrão IEEE 802.15.4TM, através da definição de redes auto-organizáveis em diversas topologias e de perfis para determinadas aplicações.

De um ponto visto prático, o emprego dessas tecnologias é feito através de um conjunto de *hardware* e de *software*, sendo o *hardware* composto pelo transceptor RF compatível e pelo microcontrolador, que implementa o *software*. Este, por sua vez, corresponde a uma biblioteca de procedimentos programados de acordo com a pilha de protocolos.

Normalmente, a pilha de protocolos estará integrada ao *software* aplicativo, o qual realiza as tarefas esperadas do sistema, bem como, as tarefas relativas à comunicação na rede. Isto aumenta a complexidade da estrutura do *software* e faz surgir a necessidade de se ter um gerenciamento eficiente de todas as tarefas. Para estes casos, a melhor solução

se baseia no emprego de um sistema operacional. Vários trabalhos encontrados na literatura endossam esta posição (DUNKELS A.; GRONVALL, 2004; BHATTI, 2005; ROSSETTO S.; RODRIGUES, 2006; ZHOU, 2006; ESWARAN A.; ROWE, 2005; MELKONIAN M. ; WU, 2005). Também é este o caminho seguido neste trabalho. Por isso, o capítulo seguinte introduz os conceitos relativos aos sistemas operacionais de tempo real, suas funcionalidades e aplicações.

4 SISTEMA OPERACIONAL DE TEMPO REAL - RTOS

4.1 Introdução

O avanço da indústria de microeletrônica permitiu a diminuição de tamanho e custo dos microcontroladores e o aumento da oferta de modelos e configurações disponíveis no mercado. Com isso, microcontroladores passaram a ser integrados a diversos sistemas eletrônicos, exercendo uma ou mais funções específicas e, assim, dando origem ao que hoje se conhece pelo termo "sistema embarcado".

Um sistema embarcado é algo que possui em sua constituição um ou mais dispositivos lógicos programáveis (ex. microcontroladores) dedicados a exercer uma ou algumas poucas funções, freqüentemente havendo necessidade de apresentar respostas a estímulos internos ou externos dentro de determinado prazo (resposta em tempo real).

Outro constituinte de extrema relevância em um sistema embarcado é o software ou o conjunto de softwares gravados na memória dos dispositivos lógicos programáveis que o compõem. No jargão dos especialistas em sistemas embarcados, se encontra o termo firmware para se designar este tipo de software, o qual corresponde ao conjunto de instruções que devem ser seguidas para a correta execução das funções que determinam a finalidade para a qual o sistema embarcado se destina.

Para os casos onde o sistema embarcado deve apresentar um comportamento em tempo real, caracterizando-se, portanto, um sistema de tempo real, deve-se empregar uma estrutura de firmware que permita ao sistema atingir este comportamento. Um tipo de estrutura comumente utilizada é conhecida por sistema operacional de tempo real (RTOS), e sua principal finalidade é permitir ao sistema embarcado a execução de múltiplas tarefas com restrições de tempo para início, término e freqüência de execução através de um gerenciamento eficiente do uso dos recursos de hardware disponíveis, tais como memória, processador e periféricos.

Basicamente, tem-se como características desejadas em um RTOS o comportamento multitarefas associado à previsibilidade dos prazos de execução das mesmas, o fornecimento de uma estrutura com recursos que permitam a comunicação e a sincronização inter-tarefas e a estímulos internos ou externos, bem como, a organização da sua estrutura de software em código dependente e independente de máquina com vistas a facilitar a portabilidade entre diversas plataformas (abstração de hardware).

Porém, o principal motivo para se utilizar um RTOS como elemento-chave na elaboração de software para um sistema embarcado se deve à sua capacidade de simplificar o projeto, conseguindo melhores resultados em menor tempo. Isto porque permite ao(s) desenvolvedor(es) dividir o projeto em partes menores (as tarefas), as quais podem ser elaboradas separadamente e de forma muito mais fácil. Esta grande vantagem torna um RTOS em um elemento essencial no desenvolvimento de um sistema embarcado complexo. Talvez, por isso, exista tanta disponibilidade de sistemas operacionais de tempo real, variando em tamanho, configuração e complexidade. Existem RTOSs tanto para microcontroladores de baixo custo de 8 e 16 bits quanto para processadores de alto desempenho de 32 bits ou mais. Há RTOSs para aplicações simples de consumo e entretenimento, bem como, para aplicações complexas militares, aeronáuticas e médicas. Há RTOSs comerciais e não-comerciais, de código-livre e código restrito, pagos e gratuitos.

4.2 Conceitos sobre sistemas operacionais de tempo real (RTOS)

Para melhor compreensão, pode-se dividir o núcleo (ou *kernel*) de um RTOS em três componentes principais (LI Q.; YAO, 2003):

- Gerenciador de tarefas (também conhecido como escalonador (do inglês *scheduler*))
- Objetos
- Serviços

Serviços são operações que o RTOS executa em algum objeto, de temporização, manipulação de interrupções ou administração de recursos. Alguns serviços comuns de um RTOS incluem sistemas de arquivos, serviços de rede, serviços de tempo (alarmes e temporizadores), mecanismos de entrada e saída (E/S) e gerenciamento de memória. A seguir, explica-se mais detalhadamente o funcionamento do gerenciador de tarefas e os objetos principais de um RTOS (tarefas, semáforos e filas de mensagens).

4.2.1 O gerenciador de tarefas

Basicamente RTOSs podem ser preemptivos ou cooperativos, ou ainda, misto de ambos. Em um RTOS preemptivo as tarefas são executadas conforme suas respectivas prioridades, sendo que a tarefa de maior prioridade é executada em detrimento das outras tarefas. Mesmo que uma tarefa esteja sendo executada, ela pode ser interrompida por uma tarefa de maior prioridade. Neste caso, se diz que a tarefa de menor prioridade foi preemptada pela tarefa de maior prioridade. Quando esta estiver concluída, o sistema retornará à execução da tarefa que foi interrompida.

Já em um RTOS cooperativo, as tarefas de maior prioridade são executadas preferencialmente. Entretanto, caso uma tarefa de menor prioridade esteja sendo executada, ela não poderá ser interrompida mesmo que por uma tarefa de prioridade maior, a qual deverá aguardar que a tarefa em execução seja concluída.

A tomada de decisão sobre qual tarefa deverá ser executada em cada instante é realizada pelo gerenciador de tarefas do sistema operacional através de algum algoritmo específico (ex. algoritmo de gerenciamento baseado em prioridade). O qual também administra o tempo de processamento e a memória (pilha).

Cada tarefa possui um contexto associado, que corresponde as informações sobre o estado da tarefa (em execução, em espera, pronta para executar), bem como, sobre o estado de sua execução quando da ocorrência de alguma interrupção (endereço da próxima instrução e conteúdo das variáveis locais e dos registradores).

O contexto é armazenado pelo gerenciador de tarefas em um espaço da memória reservado para a tarefa (pilha da tarefa) toda vez que a mesma é retirada de execução (por conclusão ou interrupção) e restaurado no momento que a tarefa torna a ser executada. Este processo é denominado troca de contexto. E o armazenamento do contexto pelo gerenciador é realizado através de uma estrutura de dados conhecida por bloco de controle de tarefa (TCB). É este funcionamento do gerenciador de tarefas que permite ao RTOS ser considerado um sistema multi-tarefas.

4.2.2 Objetos de um RTOS

Os objetos mais comuns do núcleo de um RTOS são:

- Tarefas
- Semáforos

- Filas de mensagens

4.2.2.1 Tarefas

As tarefas correspondem a pequenas rotinas de software independentes que compõem a aplicação e são executadas separadamente pelo processador, cada uma à sua vez. A vez de cada tarefa corresponde a um período do tempo de processamento e é decidida pelo gerenciador de tarefas que escalona as mesmas conforme sua prioridade de execução ou outro algoritmo de escalonamento, conforme explicado anteriormente.

A divisão da aplicação em pequenas unidades que são executadas concorrentemente caracteriza um projeto concorrente. Pode-se ver a aplicação como um conjunto de tarefas que competem pela utilização do processador e de outros recursos de *hardware*. Portanto, para tornar este tipo de projeto realizável, um RTOS deve fornecer recursos que permitam a administração e o agendamento das tarefas. Cada tarefa é definida por um conjunto de parâmetros. Quando da sua criação no RTOS, a tarefa é associada a um nome, uma identificação única (ID da tarefa), uma prioridade (no caso, de escalonamento preemptivo), um bloco de controle de tarefa (TCB), uma pilha (espaço contíguo na memória RAM) e uma rotina de execução (conjunto de instruções da tarefa). A figura 12 ilustra os componentes de uma tarefa.

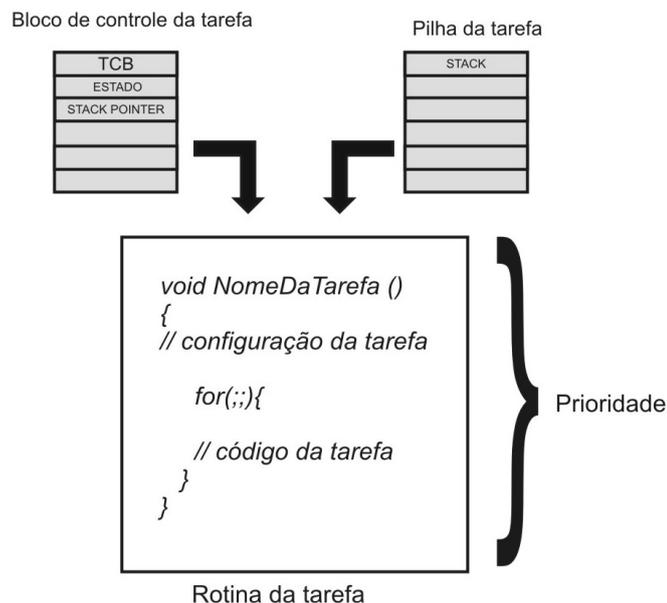


Figura 12: Componentes de uma tarefa

O RTOS possui algumas tarefas próprias. Estas possuem prioridades mais elevadas em comparação às tarefas da aplicação para não competir por tempo de processamento

e, assim prejudicar o desempenho do sistema. Estas tarefas incluem a inicialização do sistema e das tarefas que compõem a aplicação, bem como, tarefas de manipulação de exceções e a tarefa de tempo ocioso (do inglês *idle task*). A tarefa de tempo ocioso possui a mínima prioridade e, normalmente, consiste de um laço infinito ou de alguma instrução que coloca o processador em estado de espera ou desligado para baixar o consumo de energia. Ela é executada toda vez que não há outras tarefas disponíveis para execução.

A qualquer momento uma tarefa está em um dos seguintes estados: executando, pronta (para executar) ou bloqueada. Conforme o RTOS executa, cada tarefa altera seu estado de acordo com uma máquina de estados simples. Obviamente, apenas uma tarefa pode se encontrar no estado de execução em um determinado instante, enquanto as outras tarefas estarão bloqueadas ou prontas para executar. A troca de estado das tarefas pode desencadear um troca de contexto. Quando uma tarefa bloqueada passa para o estado pronta para executar e possui maior prioridade do que a tarefa em execução ou quando a tarefa em execução passa para o estado bloqueada e há alguma tarefa pronta para executar, uma troca de contexto ocorre. A figura 13 ilustra o processo de troca de estados de uma tarefa.

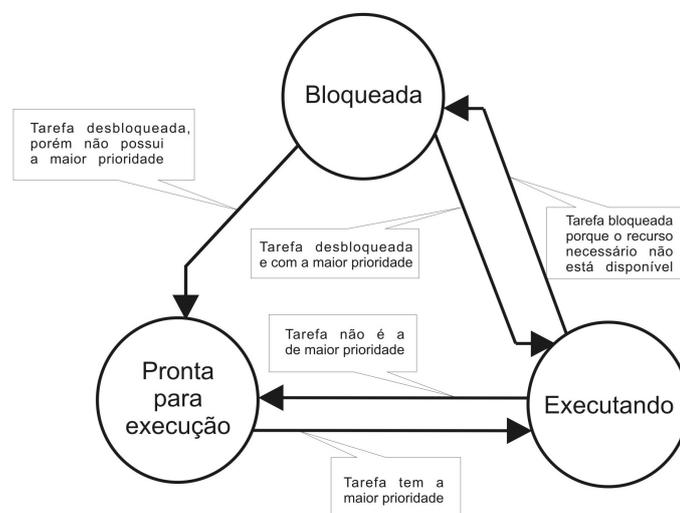


Figura 13: Máquina de estados de uma tarefa

Além de gerenciar os estados das tarefas, o RTOS gerencia as pilhas das tarefas e seus blocos de controle (TCBs). Fornece, também, uma interface de programação (API) para se manipular as tarefas. As principais operações suportadas são: a criação e destruição de tarefas, o controle do agendamento das tarefas e a obtenção de informações sobre a tarefa em execução (como identificação e TCB).

Uma tarefa consiste em uma função contendo um laço infinito com o código a ser executado. Antes do laço, é realizada qualquer inicialização necessária. E, no interior do

laço, deve haver alguma chamada a algum tipo de estrutura fornecida pelo RTOS que permita à tarefa entrar em estado bloqueado, assim, dando oportunidade para que outras tarefas de prioridades menores sejam executadas.

4.2.2.2 Semáforos

Apesar de as tarefas serem rotinas isoladas umas das outras, deve haver algum tipo de inter-comunicação entre elas, permitindo que possam sincronizar sua execução e coordenar à utilização de recursos compartilhados sem risco de dano ao sistema. Para tanto, todo e qualquer RTOS fornece um objeto conhecido como semáforo. O semáforo é utilizado como meio de sincronização e exclusão mútua entre tarefas.

Quando um semáforo é criado, o núcleo do RTOS associa a ele um bloco de controle de semáforo (SCB), uma identificação única (ID do semáforo), um valor (binário ou contador) e uma lista de tarefas em espera, como mostrado na figura 14.

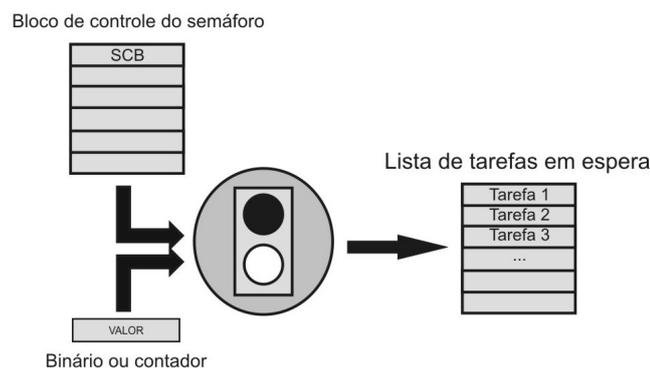


Figura 14: Componentes de um semáforo

Um semáforo funciona como uma chave que controla o acesso a algum recurso ou a realização de uma ação. Se uma tarefa adquire o semáforo, ela pode ter acesso a este recurso ou realizar a ação pretendida. O semáforo pode ser adquirido por um número finito de vezes. Quando este número é alcançado, uma tarefa só poderá adquirir o semáforo, se outra devolvê-lo.

O núcleo mantém o número de vezes que o semáforo foi tomado através de um contador. Este contador é inicializado com o valor limite quando o semáforo é criado. Este valor é decrementado toda vez que uma tarefa adquire o semáforo e, incrementado, toda vez que uma tarefa o libera. Se o contador atinge o valor zero, qualquer tarefa que tente tomar o semáforo ficará bloqueada e deverá aguardar até que algum semáforo seja liberado para pegá-lo e poder executar. Este tipo de semáforo é também conhecido por semáforo

contador.

Há também o semáforo do tipo binário. Um semáforo binário só pode ser tomado por uma vez, devendo ser solto para que outra tarefa possa tomá-lo novamente. Convencionase que o semáforo binário possui apenas dois valores: 0 e 1. Quando valer 1, ele estará disponível, ficando indisponível quando tiver valor 0.

Um caso especial de semáforo binário é o semáforo de exclusão mútua (*mutex*). O *mutex* possui características adicionais em relação ao semáforo binário; tais como, tarefa proprietária e algum mecanismo de proteção contra o problema de inversão de prioridade.

Diferentemente do semáforo binário convencional, que pode ser tomado ou solto por qualquer tarefa, o *mutex* só pode devolvido pela tarefa que o tomou. Isto é, a tarefa torna-se proprietária do semáforo toda vez que o toma. Por isso, alguns RTOSs utilizam os termos travar (do inglês *lock*) e destravar (do inglês *unlock*) para se referir às ações de tomar e soltar o *mutex*.

Outro importante ponto de diferenciação entre semáforo binário e *mutex* é a presença de algum mecanismo de proteção contra a inversão de prioridade, a qual pode ocorrer em qualquer sistema preemptivo. A inversão de prioridade acontece quando uma tarefa de maior prioridade fica bloqueada por estar aguardando a liberação de algum recurso exclusivo em utilização por uma tarefa de menor prioridade, que foi preemptida por uma tarefa de prioridade intermediária. Esta situação equivale a afirmar que a tarefa de maior prioridade teve sua prioridade invertida para uma prioridade menor. Trata-se de um problema sério e que pode causar graves prejuízos ao sistema.

Para evitar a inversão de prioridade, o *mutex* apresenta algum mecanismo de proteção, como o protocolo de herança de prioridade e o protocolo de prioridade teto. O protocolo de herança de prioridade faz com que a prioridade da tarefa que tomou o *mutex* seja elevada à maior prioridade referente à tarefa que solicitou o *mutex*. Somente após liberar o *mutex*, a tarefa tornará a ter a prioridade anterior. Já o protocolo de prioridade teto eleva a prioridade da tarefa que toma o *mutex* à máxima prioridade entre todas as tarefas que podem solicitar o *mutex*, até que a tarefa, então, o libere. Após a liberação, a tarefa retorna a ter a prioridade original.

4.2.2.3 Filas de mensagens

Filas de mensagens são objetos que representam espaços de armazenamento temporário (*buffers* circulares). Através das filas, tarefas e interrupções podem enviar e

receber dados. Assim, uma tarefa pode enviar um dado para a fila e a outra tarefa, quando estiver pronta, poderá ler o respectivo dado. Esta é uma forma conveniente de desacoplar as tarefas de escrita e de leitura, tornando possível que ambas possam enviar e receber dados simultaneamente. Geralmente, a primeira mensagem inserida na fila será a primeira mensagem a ser retirada da fila (FIFO). Porém, pode haver implementações onde a última mensagem inserida é a primeira a ser retirada (LIFO).

Assim como ocorre com os semáforos, uma fila de mensagens tem vários componentes usados pelo núcleo para administrá-la. Quando criada, a mesma é associada a um bloco de controle da fila (QCB), um nome, uma identificação única (ID), um espaço alocado na memória, um tamanho máximo dela, um tamanho máximo da mensagem e uma lista de uma ou mais tarefas usuárias. O diagrama dos componentes respectivos de uma fila de mensagens está ilustrado na figura 15.

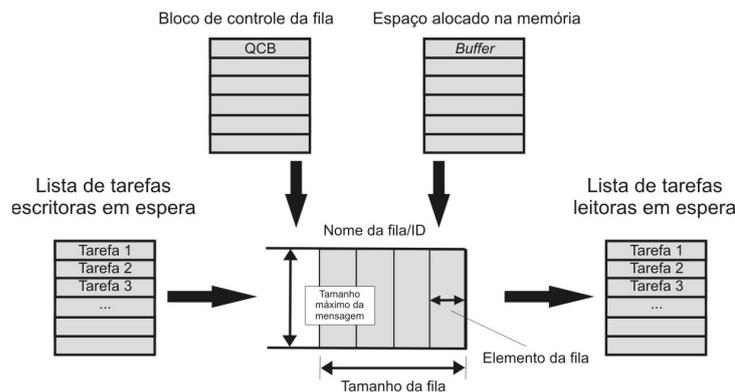


Figura 15: Componentes de uma fila de mensagens

Um caso especial de fila de mensagem ocorre quando o tamanho da fila é unitário. Neste caso, tem-se o que se denomina caixa de mensagem (*mailbox*). Trata-se, normalmente, de um ponteiro de tipo variável que aponta para a mensagem (passagem por referência). Há também casos onde a passagem da mensagem é feita por cópia.

4.2.3 O BRTOS

Como dito anteriormente, há uma variedade enorme de RTOSs disponíveis. Entretanto, uma dada aplicação requer um tipo específico de implementação. Assim, há núcleos de RTOS especialmente desenvolvidos para aplicações com poucos recursos computacionais e de memória. Ainda, considerando-se os requisitos adicionais de uma rede de sensores sem-fio, como baixo consumo de energia, disponibilidade de pilhas de protocolos de comunicação e tratadores de dispositivos específicos (p. ex. *drivers* de interface

RF), alguns sistemas operacionais estão sendo desenvolvidos, exclusivamente, para este segmento de aplicação (DUNKELS A.; GRONVALL, 2004; MOZUMDAR, 2008; ROSSETTO S.; RODRIGUES, 2006; ZHOU, 2006).

Apesar das várias opções disponíveis, optou-se, neste trabalho, pela utilização de um RTOS desenvolvido dentro do próprio grupo de pesquisa ¹ - denominado BRTOS. Ele está sendo desenvolvido para ser empregado em redes de sensores sem-fio. Assim, buscou-se, também, uma oportunidade de colocá-lo à prova e verificar seu funcionamento.

O BRTOS possui todos os recursos citados anteriormente, isto é, gerenciador de tarefas preemptivo, semáforos binários, contadores e de acesso mútuo exclusivo (*mutex*), filas e caixas de mensagens. No quinto capítulo, comenta-se a etapa de desenvolvimento empregando o BRTOS e os resultados obtidos. No próximo capítulo, analisa-se os sistemas atuais de iluminação pública brasileiros para, posteriormente, ter-se condições de propor soluções de melhoria através da utilização da rede de sensores sem-fio.

¹O BRTOS está sendo desenvolvido no grupo GEDRE/UFMS por Gustavo W. Denardin

5 **CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO**

Apesar de o padrão ZigBee permitir a criação de uma rede de comunicação de dados, a forma de como utilizá-la deve ser feita através de uma ou mais aplicações, assim como, para tirar proveito da internet é necessária a utilização de um navegador ou outro aplicativo, bem como, do próprio dispositivo a ser conectado à rede. Porém, não faz parte do escopo da especificação do ZigBee a definição de tais aplicações nem de tais dispositivos. Contudo, o padrão define uma estrutura de trabalho (*framework*) que visa facilitar o desenvolvimento de aplicações, além de incentivar um certo nível de padronização das mesmas.

Em outros termos, o desenvolvimento de aplicações para a utilização efetiva da tecnologia ZigBee faz parte do escopo deste trabalho. Para tanto, necessita-se a criação de algum dispositivo que seja incluído no sistema de iluminação pública - o nó sensor/atuador sem-fio. Este dispositivo deverá, por sua vez, conter um software capaz de empregar a tecnologia ZigBee de forma a prover os benefícios desejados ao sistema. A união de *hardware* e *software* feita de acordo com esta premissa constituirá a aplicação de gerenciamento da rede de iluminação pública, cujos elementos - *hardware* e *software* - serão descritos detalhadamente a seguir.

5.1 **Descrição geral do sistema proposto**

Após uma análise minuciosa do sistema de iluminação pública atual, propõe-se a integração de um dispositivo de controle e medição ao relé fotoelétrico existente. Como o relé é instalado em uma tomada que há no poste, a sua substituição é bastante simples ¹, além de se tratar do dispositivo mais simples e barato do sistema. Este novo dispositivo realiza as funções do relé (ligar/desligar a lâmpada conforme nível de luminosidade), além

¹Com relação aos outros elementos.

de possuir as funcionalidades necessárias para melhorar o sistema, tais como, medição de consumo de energia, tempo de uso e ciclo de trabalho, capacidade de comunicação e diagnósticos. O dispositivo possui as mesmas dimensões do relé fotoelétrico utilizado atualmente, tendo a instalação totalmente compatível, sem nenhuma alteração necessária. A seguir, lista-se as funcionalidades acrescidas pelo nó sensor/atuador ao sistema atual.

1. Medição do consumo de energia elétrica do conjunto reator-lâmpada
2. Medição do tempo de uso do conjunto reator-lâmpada
3. Medição do ciclo de trabalho do conjunto reator-lâmpada
4. Diagnóstico de falha do reator, da lâmpada ou do próprio dispositivo.
5. Capacidade de controle à distância (ligamento/desligamento remoto)

Para atingir as funcionalidades almejadas é necessário que o dispositivo seja composto por microcontrolador, transceptor de RF, fonte de alimentação, sensores de tensão, corrente e luminosidade e relé ou chave para acionamento. A figura 16 representa o diagrama de blocos do dispositivo proposto e sua integração ao sistema.

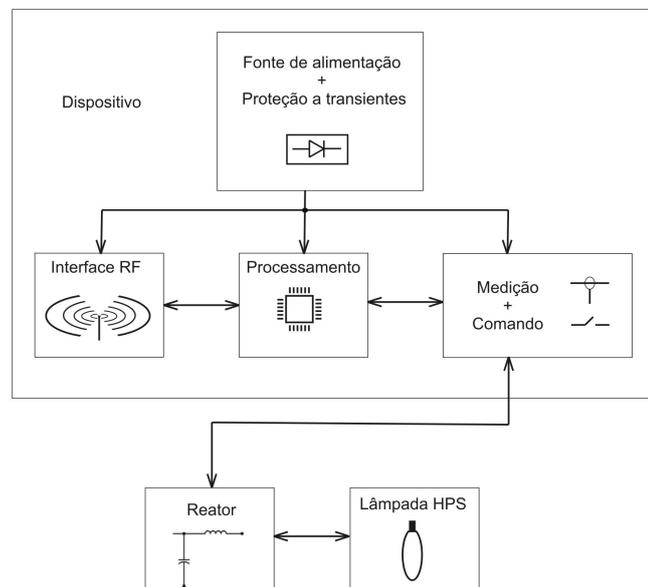


Figura 16: Diagrama de blocos do dispositivo proposto

Obviamente que, caso nem todas as funcionalidades sejam desejadas ou novas funcionalidades devam ser acrescidas, alguns blocos deverão ser suprimidos ou acrescentados ao dispositivo. Assim, considerando-se a complexidade de um parque de iluminação e suas

diversas peculiaridades, novos modelos de dispositivos podem ser concebidos de forma a atender completamente às necessidades de cada sistema.

Por exemplo, poder-se-ia imaginar um dispositivo que, além dos recursos de comunicação e processamento, tivesse uma interface operacional (p. ex. teclado e visor alfanumérico ou gráfico), de maneira a permitir que um operário pudesse realizar uma verificação *in loco* do funcionamento de cada dispositivo durante o processo de instalação e/ou manutenção.

Por isso, durante o presente trabalho foram concebidos dois modelos diferentes do dispositivo. Um modelo completo com recursos que permitem todas as funcionalidades listadas anteriormente (modelo A) e um modelo que inclui uma interface operacional (teclado, visor alfanumérico e interface serial RS232) e a interface de acesso à rede (modelo B), a ser utilizado por um operário com vistas à instalação e manutenção da rede.

O modelo A possui todos os blocos representados na figura 16. Trata-se de um dispositivo que possui todas as funcionalidades requeridas para um nó da rede. Ele é capaz de medir o consumo do conjunto reator-lâmpada e a luminosidade do ambiente, comandar o estado da lâmpada, verificar seu funcionamento, etc.

Já o modelo (modelo B) se diferencia em sua aplicação na rede. Trata-se de um dispositivo que, apesar de fazer parte da rede, não se encontra conectado ao conjunto reator-lâmpada. Este é o dispositivo que se encontra em uma central de controle, conectado ao um computador e coletando os dados da rede, ou nas mãos de um operador, quando da instalação ou operação de manutenção da rede.

5.2 Desenvolvimento do hardware

5.2.1 Módulo transceptor RF

O módulo transceptor RF é um componente básico do dispositivo. Durante o projeto, optou-se pela utilização de um módulo compatível com o padrão IEEE 802.15.4, pois a rede de sensores ZigBee é baseada neste protocolo. Há vários modelos disponíveis no mercado. Porém, após uma análise que considerou as funcionalidades disponíveis e o custo associado, foi selecionado um modelo que satisfazia as necessidades do projeto: o módulo XBeeTM (vide figura 17).

5.2.2 Microcontrolador

O microcontrolador é o "cérebro" do dispositivo, sendo incumbido de gerenciar todas as tarefas associadas ao dispositivo, como o envio e recebimento de pacotes através da rede, a leitura dos sensores e o acionamento da lâmpada.

Nos protótipos desenvolvidos, optou-se pela utilização de um microcontrolador de 32 bits, em ambos os modelos. A principal vantagem de se utilizar um microcontrolador de 32 bits é o fato de ele permitir que tarefas matemáticas, como o cálculo de consumo de energia, sejam programadas mais facilmente e executadas com melhor desempenho do que em plataformas de 8 ou 16 bits comercializadas a um preço semelhante.

Além disso, o microcontrolador empregado possui um conversor analógico-digital (ADC) com resolução de 12 bits e com referência interna de tensão (independente da tensão de alimentação e da temperatura), o que facilita na tarefa de medição de tensão, corrente e luminosidade. Também possui interface de comunicação serial assíncrona para comunicação com o módulo RF e uma boa quantidade de memória *flash* (até 128 KB) e memória RAM (até 8 KB) necessárias para a implementação dos códigos de rede e de aplicação.

5.2.3 Os sensores

Nos protótipos, para efeito de demonstração, foram utilizados o sensor de medição de corrente, o sensor de medição da tensão da rede e o sensor de medição de luminosidade. Opcionalmente, entretanto, pode-se utilizar outros sensores, como sensor de temperatura, etc.

5.2.3.1 O sensor de medição de corrente

Basicamente, há duas classificações possíveis para os métodos de medição de corrente. Dependendo do tipo de sensor utilizado, resistivo ou magnético, e dependendo de ter ou não isolamento galvânica, método isolado ou não-isolado (BODE, 2008).

O método resistivo se baseia na inserção de um resistor de pequena resistência em série com a carga. Este resistor, conhecido por resistor *shunt*, normalmente é colocado entre a carga e a referência de terra. Este método é conhecido por medição do lado de baixo (*low side measurement*). Como a medida da tensão sobre o resistor é diretamente proporcional ao valor da corrente que passa por ele, a partir dessa se calcula a corrente.

Já no método magnético, encontram-se dois tipos de sensores: o transformador de corrente e o sensor de efeito Hall. O primeiro, se baseia no princípio do transformador, onde a corrente do lado primário é convertida em uma corrente proporcional no lado secundário, sendo esta proporção definida pela relação de espiras do transformador.

O sensor de efeito Hall, por sua vez, se baseia no efeito descoberto por Edwin F. Hall em 1879. O efeito Hall corresponde ao surgimento de uma tensão entre os terminais de um material condutor presente em um campo magnético pelo qual flui uma corrente elétrica transversal a esta tensão, sendo as linhas de campo magnético perpendiculares à corrente (figura 18). A tensão que surge é conhecida por tensão Hall.

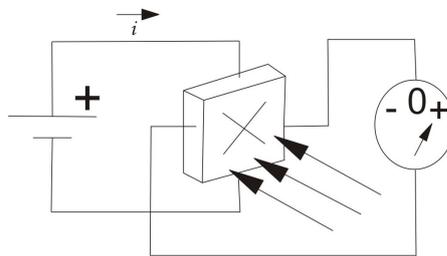


Figura 18: Sensor de efeito Hall

As principais vantagens de se utilizar o método magnético são a isolação inerente, a ampla faixa de medição e o fato de ser um método não intrusivo. Diferentemente, o método resistivo é intrusivo, pois o resistor inserido no circuito causa distúrbios, como o deslocamento da referência de terra da carga e a dissipação de potência proporcional ao valor quadrático da corrente. Em contrapartida, este método é simples e barato, quando comparado ao método magnético.

Como uma lâmpada HPS tem uma corrente na ordem 1 A (por exemplo, uma lâmpada de 150W drena uma corrente RMS de 0,8 A)², a potência dissipada pode atingir valores não-aceitáveis. Um resistor de 1 Ω , dissipa uma potência de 0,64 W quando passa por ele uma corrente de 0,8 A RMS. Já, quando se considera uma lâmpada HPS de 400 W, que drena uma corrente RMS de 2,05 A, ter-se-ia a dissipação de 4,2 W, equivalente a cerca de 1% da potência nominal da lâmpada. Algumas informações elétricas sobre lâmpadas de vapor de sódio e reatores eletromagnéticos podem ser conferidas na tabela 7.

A solução para esse problema está na diminuição do valor do resistor. Entretanto, isto implica em menores valores de tensão sendo medidos e, conseqüentemente, na necessidade de utilização de um amplificador operacional com reduzido valor de tensão de

²Fator de potência de 0,92.

Tabela 7: Informações elétricas - lâmpadas HPS e reatores eletromagnéticos

Potência da lâmpada (W)	Corrente RMS (A)	FP	Perdas no reator (W)
70	0,4	0,92	14
100	0,56	0,92	17
150	0,8	0,92	22
250	1,3	0,92	30
400	2,05	0,92	38

Fonte: Intral (www.intral.com.br), 2009

descasamento de entrada (*offset*)³, de forma a condicionar o sinal de tensão para medição através do conversor A/D do microcontrolador⁴. Mas, a adição deste amplificador acaba aumentando consideravelmente o custo desta solução.

Por isso, concluiu-se que a melhor solução, devido às restrições de custo, consumo de energia e espaço disponível, é a utilização de um sensor de efeito Hall fabricado em circuito integrado. Esta solução está disponível a um custo aceitável quando comparada à solução do método resistivo. Além disso, ocupa um espaço extremamente reduzido quando comparada à solução com transformador de corrente. A figura 19 mostra um diagrama de blocos de um sensor de efeito Hall em circuito integrado para medição de corrente. Basicamente, ele é composto pelo elemento sensor Hall e por elementos condicionadores de sinal.

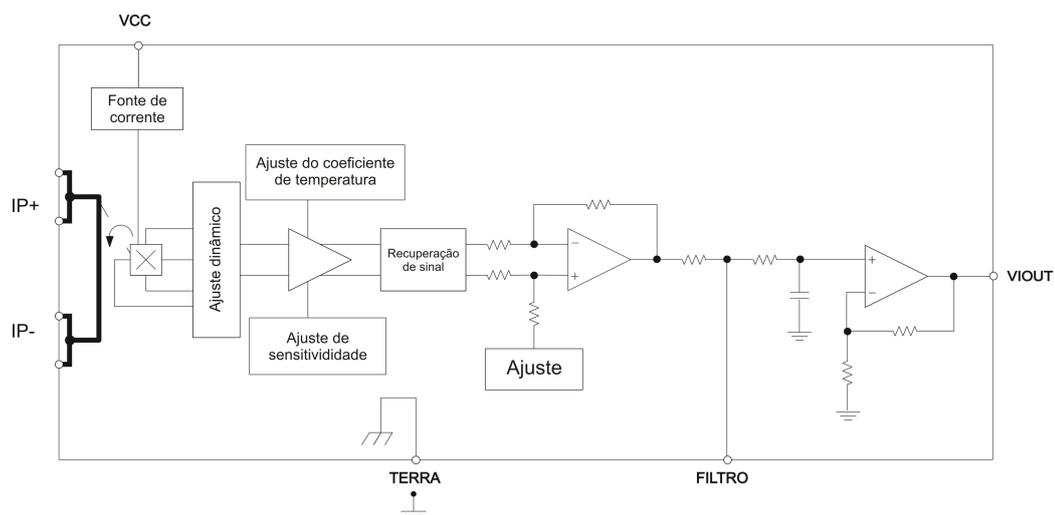


Figura 19: Blocos de sensor de efeito Hall em circuito integrado

Nos protótipos montados em laboratório, utilizou um sensor de efeito Hall em circuito

³Como a tensão sobre resistor é da ordem de mV, tensões de *offset* na ordem de μV são desejadas para se ter um erro aceitável na medição.

⁴O conversor A/D possui uma resolução de 12 bits.

integrado fabricado pela empresa Allegro Inc. O mesmo possui saída em tensão, com sensibilidade de 185 mV/A, podendo efetuar medições de corrente na faixa de -5 A a 5 A, ocupando uma área de 30mm².

5.2.3.2 O sensor de medição de tensão

O sensor de medição de tensão utilizado é extremamente simples, consistindo de um divisor de tensão resistivo após um retificador de ponte completa. Os valores de resistência foram calculados para permitir um nível de tensão a ser medido dentro da faixa de especificação do conversor A/D de acordo com o valor máximo possível da tensão da rede. O circuito do sensor pode ser visto na figura 20.

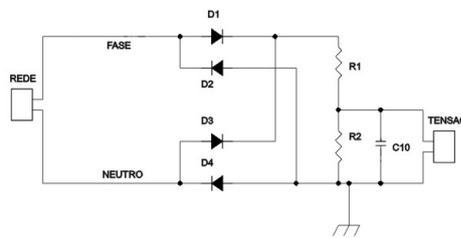


Figura 20: Configuração do sensor de tensão

5.2.3.3 O sensor de medição de luminosidade

Como sensor de luminosidade utilizou-se um resistor variável conforme incidência de luz, conhecido por LDR (do inglês, *Light Dependent Resistor*). Este tipo de sensor é feito de sulfeto de cádmio (CdS) ou seleneto de cádmio (CdSe), sendo muito utilizado nos relés fotoelétricos de iluminação pública. A resistência do LDR diminui quando a incidência de luz é alta, e aumenta quando a incidência de luz é baixa. Portanto, a medição da resistência do LDR é uma indicação do nível de luminosidade sobre o mesmo.

5.2.4 Conversor CA/CC

Em virtude da necessidade de se ter um baixo nível de tensão disponível ao dispositivo proposto (5V em tensão contínua), optou-se pela utilização de um conversor CA/CC, de forma a fornecer a alimentação do dispositivo diretamente da rede de distribuição. Assim, tem-se uma maior confiabilidade, pois o dispositivo pode ter um ciclo de trabalho completo, sem necessidade de entrar em estado de dormência, assegurando que os pacotes por

Tabela 8: Consumo de corrente por bloco

Bloco	Consumo (mA)
Microcontrolador	30 mA
Transceptor RF	40 mA
Medição de corrente	15 mA
Medição de tensão	4 mA
Medição de luminosidade	1 mA
Acionamento	10 mA
Total	100 mA

Fonte: O autor, 2009

ele recebidos sejam corretamente processados ou reencaminhados ao seu destino. Também, isto facilita a manutenção do sistema, pois não há a necessidade de se realizar troca de bateria.

Porém, a norma NBR5123 define, dentre outros, que a potência máxima a ser demanda pelo dispositivo utilizado no acionamento da lâmpada (relé fotoelétrico) não deve exceder 1,5 W. Isto significa que, considerando-se um consumo de corrente máximo de cerca de 100 mA (distribuídos entre os componentes do dispositivo conforme tabela 8) é necessário fornecer uma potência de 0,5 W. Portanto, o rendimento do conversor deve ser de, no mínimo, 33%. O qual, devido a grande diferença de tensão de entrada (90 Vac a 240 Vac, considerando-se entrada universal) e de tensão de saída (aprox. 5 Vcc), impossibilita a utilização de um conversor linear.

Assim, optou-se pela utilização de um conversor CA/CC chaveado. Por se tratar de um conversor abaixador de tensão de potência reduzida e necessidade de baixo custo, as topologias recomendadas são de conversor Buck e de conversor Flyback. Entretanto, neste caso, o conversor Flyback é o mais adequado, pois permite uma relação entre tensão de entrada e saída maior em comparação ao conversor Buck, pois se beneficia da relação de espiras do transformador, quando se considera que ambos os conversores têm sua tensão de saída mínima limitada pela mínima razão cíclica possível no acionamento do interruptor. Além disso, o conversor Flyback propicia isolamento galvânica do restante do circuito eletrônico, acarretando um grau maior de proteção. Isto é muito importante, quando se considera que o dispositivo se encontra em ambiente hostil e sujeito a eventuais distúrbios elétricos.

Outrossim, nota-se a grande disponibilidade no mercado de circuitos integrados monolíticos dedicados à implementação de fontes chaveadas de pequena potência. Estes dispositivos permitem a operação em alta frequência (na ordem de dezenas de KHz),

As etapas do projeto estão descritas no apêndice A. Para verificar a validade do projeto, realizou-se uma simulação SPICE ⁷. Na simulação, obteve-se uma tensão média na saída de aproximadamente 5,1 V figura (23), com uma variação de aproximadamente 0,1 V, que representa cerca de 2% do valor nominal. Esta tensão é suficiente para a alimentação do sensor de corrente. O restante do circuito (microcontrolador, transceptor RF, etc.) é, então, alimentado via um regulador linear cuja tensão de saída é ajustada em 3,3V.

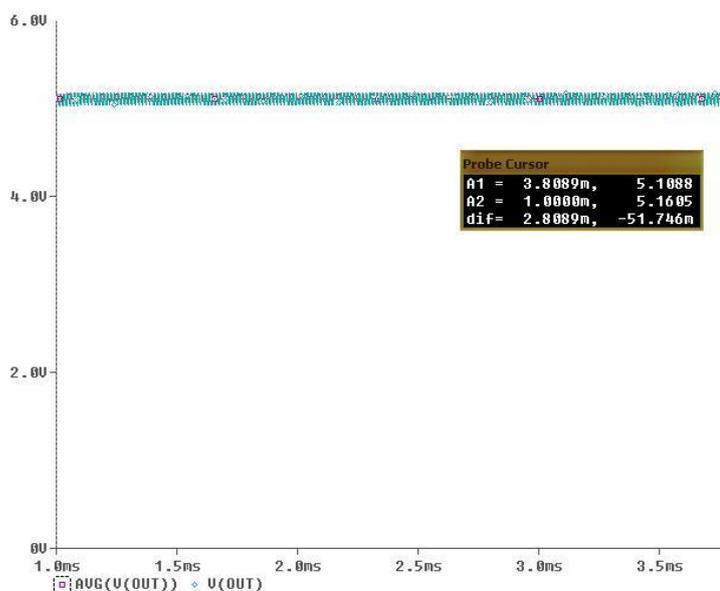


Figura 23: Tensão na saída do conversor Flyback - simulação

Antes do circuito do retificador deve-se colocar, ainda, componentes de proteção contra surtos. Normalmente, utiliza-se um varistor de óxido metálico (MOV) para proteção de surtos de tensão. Segundo a norma NBR 5123, o varistor deve suprimir surtos de tensão de, no mínimo, 10000 V a 5000 A (NBR5123 *apud* (CPFL, 2009)).

5.2.5 Circuito de acionamento da lâmpada

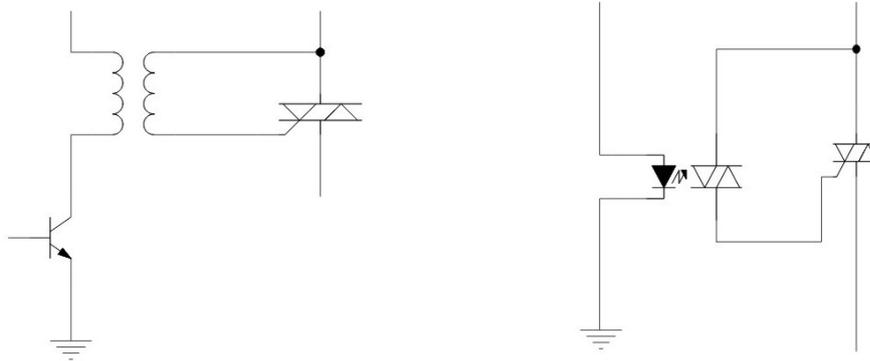
Normalmente, os relés fotoelétricos encontrados no mercado utilizam um relé eletromecânico para ligar e desligar a lâmpada. Entretanto, o uso deste relé no dispositivo proposto encontra duas dificuldades principais: (1) necessita de um nível de tensão de alimentação diferente do restante do circuito ⁸ e (2) ocupa um volume consideravelmente grande com relação ao restante do circuito e com relação ao invólucro padrão do dispositivo.

⁷Utilizou-se o software Pspice da suíte Orcad .

⁸Os relés estão disponíveis nos valores de múltiplos de 6 V (6V, 12 V, 24V, etc); enquanto o restante do circuito do dispositivo é alimentado em 5 V (sensor de corrente) e 3,3 V (restante dos componentes).

A primeira dificuldade pode ser resolvida pela adição de mais um enrolamento na saída do conversor Flyback. Porém, a segunda dificuldade acaba sendo um fator limitante, pois requereria a modificação do invólucro. Por isso, a solução encontrada para o problema de acionamento da lâmpada se deu por outro caminho. O acionamento passou a ser feito por uma chave semicondutora (TRIAC). Esta solução é um pouco mais cara se comparada com a utilização do relé, pois requer um circuito de disparo isolado. Porém, a redução significativa do volume ocupado compensa seu uso.

Quanto ao circuito de disparo, duas opções foram cogitadas. A primeira solução é o disparo via transformador de pulso, mostrada na figura 24(a). Esta é uma opção clássica encontrada na literatura. Outra opção é o disparo via circuito isolado fotoeletricamente (MOC), mostrado na figura 24(b). Ambas as soluções são simples e possuem custo parecido. Entretanto, optou-se pelo disparo via MOC, cujo circuito ocupa uma área um pouco menor do que o circuito com transformador de pulso.



(a) Disparo via transformador de pulso

(b) Disparo via MOC

Figura 24: Circuitos de disparo de TRIAC

Um problema relacionado ao uso de TRIAC em detrimento de relé é a maior parcela de perda em condução. Entretanto, esta perda é aceitável, uma vez que é inferior a 2% da potência nominal da lâmpada e a norma NBR 5123 não impõe limites para as perdas em condução do dispositivo de acionamento. A figura 25 traz a curva de perdas em condução no TRIAC conforme o valor da corrente RMS. Percebe-se que, para uma corrente na ordem de até 2A (RMS), correspondente à uma lâmpada de 400W, ter-se-ia uma potência dissipada na ordem de 2W.

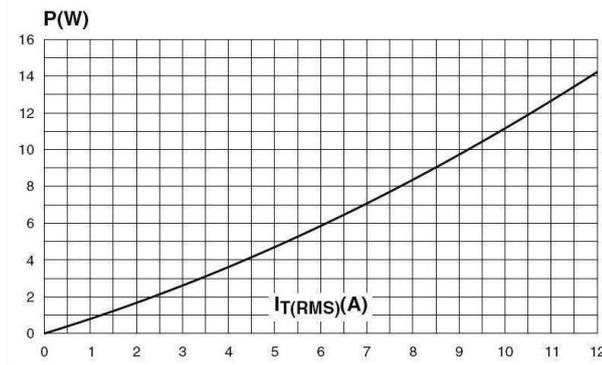


Figura 25: Perdas em condução x corrente RMS - TRIAC modelo BTA12-600

5.3 Desenvolvimento de *software*

Apesar de ser um muito importante a minimização do custo e volume associados ao *hardware* do dispositivo, pode-se afirmar que o principal valor do dispositivo reside no *software* que ele contém. Por isso, é justificável despende um esforço considerável na otimização deste *software*, bem como, na maximização das funções do dispositivo, de forma a justificar sua empregabilidade nos sistemas de iluminação pública em substituição aos relés fotoelétricos existentes.

A seguir, descreve-se a estrutura do *software* do dispositivo. Este é constituído pelo RTOS que contém as tarefas da rede, de medição e controle do dispositivo. A tarefa da rede emprega o protocolo ZigBee para iniciar e manter a rede, bem como, para enviar e receber mensagens associadas à aplicação⁹. Já as tarefas de medição e controle são responsáveis pelo acionamento da lâmpada e pelas medições dos parâmetros de interesse. A estrutura geral de *hardware* e *software* pode ser vista na figura 26.



Figura 26: Estrutura de *hardware* e *software* do dispositivo

Na camada de aplicação residem as tarefas. Cada tarefa realiza uma função específica. Há uma tarefa principal que gerencia a rede. Ela envia, recebe, monta e desmonta os

⁹Referente à camada de aplicação ZigBee

pacotes. Esta tarefa possui acesso exclusivo ao módulo RF. Além desta, há outras tarefas responsáveis pelas funcionalidades do dispositivo, conforme lista a seguir.

Tarefa de comando da lâmpada: tarefa que liga e desliga a lâmpada e possui acesso exclusivo ao interruptor.

Tarefa de medição de energia: tarefa que mede a corrente da lâmpada e a tensão de entrada, acumulando o consumo de energia do conjunto reator-lâmpada. Possui acesso exclusivo ao sensor de corrente e ao sensor de tensão.

Tarefa de medição de luminosidade: tarefa que realiza medição de luminosidade e possui acesso exclusivo ao sensor de luminosidade.

Tarefa de diagnóstico de falhas: tarefa que realiza diagnóstico das condições do sistema e eventuais falhas de *hardware* (lâmpada, sensores, interruptor, rede, etc.).

Tarefa de registro de tempo: tarefa que mantém o relógio local do nó e conta o tempo que a lâmpada permanece ligada e desligada.

Há ainda uma tarefa que é executada apenas uma vez - quando se dá a instalação do nó na rede. Esta tarefa deve realizar os procedimentos de instalação, como a gravação da posição geográfica do ponto e a confirmação da instalação com sucesso. Um possível esquema ilustrativo do software está representado na figura 27. Devido à sua modularidade, em virtude do uso do RTOS, novas tarefas poderão ser acrescentadas ao *software* mais tarde, sem interferir nas tarefas já existentes ¹⁰.

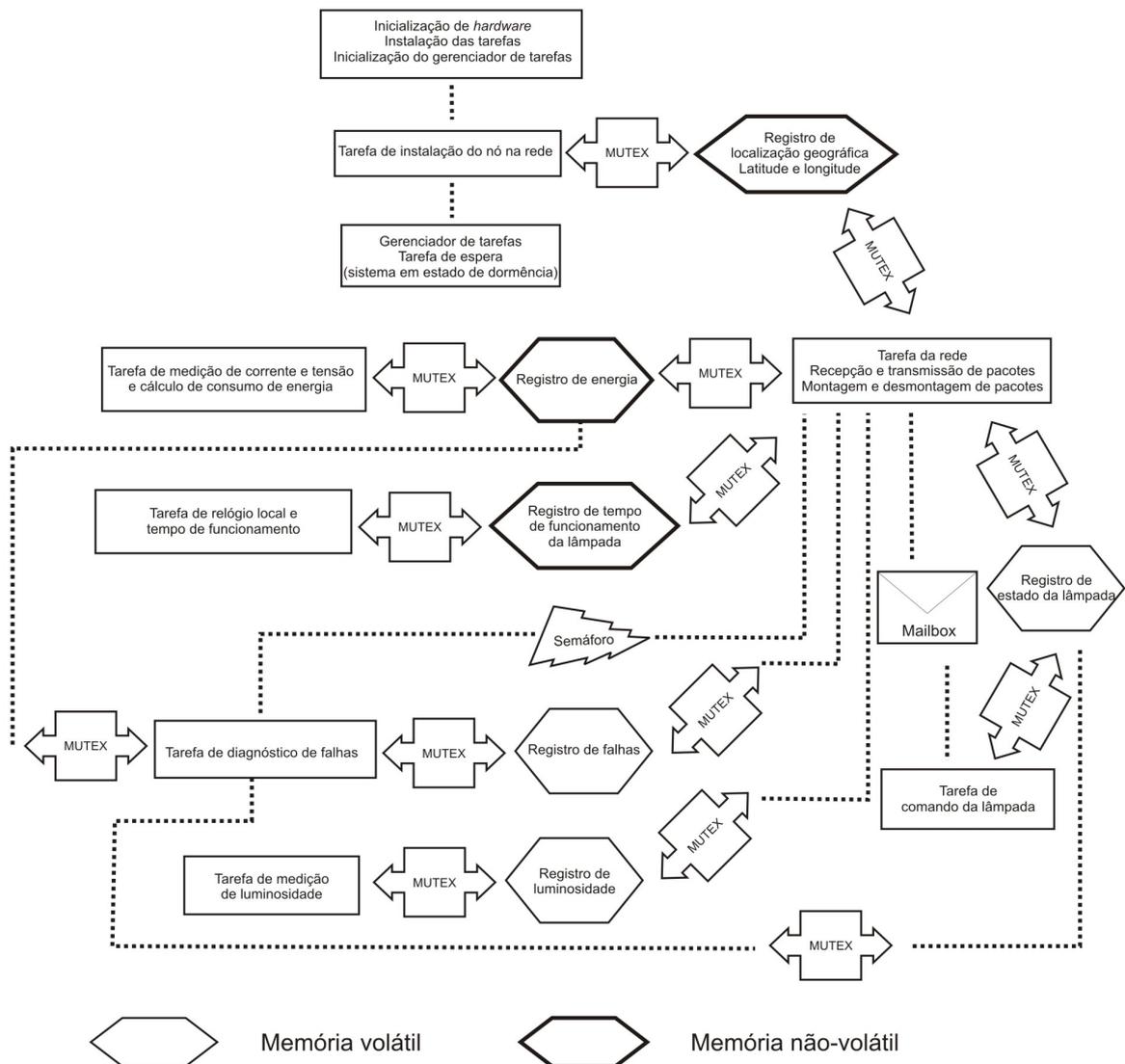
5.3.1 Tarefas

Após a definição das tarefas que devem ser suportadas pelo dispositivo, fica a necessidade de se realizar sua implementação. A seguir descreve-se cada uma das tarefas, incluindo-se, para cada descrição, o respectivo algoritmo na forma de pseudo-código.

5.3.1.1 Tarefa de comunicação pela rede

A comunicação entre a tarefa da rede e as outras tarefas é feita por estruturas fornecidas pelo RTOS, como semáforos e caixas de mensagem (*mailbox*). Assim, quando a tarefa da rede recebe um pacote, o desmonta e, quando necessário, o pedido é enviado para

¹⁰Desde de que o esforço computacional esteja de acordo com as especificações do microcontrolador.

Figura 27: Diagrama do *software* do dispositivo

a tarefa que pode atendê-lo (ex.: solicitação para ligar lâmpada). Quando alguma das tarefas tem a resposta para algum pedido ou alguma solicitação a enviar, ela a envia para a tarefa da rede, também via caixa de mensagem ou semáforo. Com base no remetente da mensagem, a tarefa da rede monta o pacote e o envia.

Já quando não há a necessidade de comunicação direta entre a tarefa de rede e as outras tarefas, mas a montagem dos pacotes de resposta depende de acesso a variáveis compartilhadas (como registros de tempo, energia, localização geográfica, etc.), este é conseguido via estruturas de acesso mútuo exclusivo (*mutexes*).

Sem dúvida, a tarefa de rede é, de todas as tarefas, a mais complexa de ser implementada. Sua estrutura pode ser conferida no algoritmo (1). No entanto, esta tarefa é

um bom exemplo da contribuição advinda do emprego do RTOS, que fica fácil perceber pelo esquema da figura (26). Uma tarefa que seria muito complicada de ser implementada através de outras formas de programação, como laço infinito ou máquina de estados, teve sua dificuldade bastante reduzida pela utilização das estruturas de comunicação fornecidas pelo sistema operacional.

5.3.1.2 Tarefa de medição de corrente/tensão e cálculo de consumo de energia

Esta tarefa é encarregada de tirar amostras da tensão e da corrente na entrada do conjunto reator-lâmpada e realizar o cálculo da potência média (potência ativa) consumida e acumular o consumo de energia, medido em Wh. A potência ativa P é a média do somatório do produto dos valores de tensão e corrente (5.1), onde N é o número de amostras adquiridas a uma frequência de amostragem F_s . O cálculo do consumo C (em Watts x segundos) é feito multiplicando-se a potência pelo tempo no qual as N amostras são tomadas (5.2). A uma frequência F_s são adquiridas N amostras em $\frac{N}{F_s}$ segundos.

$$P = \frac{\sum_{k=1}^N V_k * I_k}{N} \quad (5.1)$$

$$C = \frac{\sum_{k=1}^N V_k * I_k}{F_s} \quad (5.2)$$

$$C = \frac{\sum_{k=1}^N K_v V'_k * K_i I'_k}{F_s} \quad (5.3)$$

Para se ter o cálculo do consumo em Wh é necessário acumular o valor calculado em (5.2) até 3600¹¹. Na implementação da tarefa optou-se por acumular este valor até 36000 Ws, portanto, 10Wh ou 0,01 KWh. Assim, este valor é acrescentado ao acumulador total do consumo (em KWh), de forma que a resolução do medidor fica limitada a 0,01 KWh. Para se realizar uma comprovação desta abordagem optou-se pela verificação através de uma simulação no software MATLABTM. Os resultados obtidos foram satisfatórios e podem ser verificados no apêndice B. O algoritmo (2) descreve a tarefa em pseudo-código.

Como, no microcontrolador, os valores das amostras de tensão e corrente V'_k e I'_k estão escalonados¹², os ganhos K_v e K_i (em 5.3) são calculados de forma a se recuperar os valores reais de tensão e corrente V_k e I_k . Os valores de K_v e K_i devem ser calibrados na etapa de fabricação do dispositivo.

¹¹3600 Ws correspondem a 1Wh.

¹²No caso do conversor A/D de 12 bits, os valores estão entre 0 e 4095.

Algoritmo 1 Tarefa de comunicação pela rede

se novo pacote recebido **então**
 desmonta pacote em *endpoint*, *cluster* e atributos;
se pacote de comando da lâmpada **então**
 envia mensagem para tarefa de comando da lâmpada;
 retorna pacote de resposta;
fim se

se leitura de estado da lâmpada **então**
 pede acesso ao registro de estado da lâmpada;
 lê estado da lâmpada;
 libera o acesso ao registro de estado da lâmpada;
 retorna pacote de resposta;
fim se

se leitura de consumo de energia **então**
 pede acesso ao registro de energia;
 lê registro de energia;
 libera o acesso ao registro de energia;
 retorna pacote de resposta;
fim se

se leitura de luminosidade do ambiente **então**
 pede acesso ao registro de luminosidade;
 lê registro de luminosidade;
 libera o acesso ao registro de luminosidade;
 retorna pacote de resposta;
fim se

se leitura de localização geográfica **então**
 pede acesso ao registro de latitude;
 lê registro de latitude;
 libera o acesso ao registro de latitude;
 pede acesso ao registro de longitude;
 lê registro de longitude;
 libera o acesso ao registro de longitude;
 retorna pacote de resposta;
fim se

se leitura de tempo de lâmpada ligada **então**
 pede acesso ao registro de tempo de lâmpada ligada;
 lê tempo de lâmpada ligada;
 libera o acesso ao registro tempo de lâmpada ligada;
 retorna pacote de resposta;
fim se

se leitura de tempo de lâmpada desligada **então**
 pede acesso ao registro de tempo de lâmpada desligada;
 lê tempo de lâmpada desligada;
 libera o acesso ao registro tempo de lâmpada desligada;
 retorna pacote de resposta;
fim se

fim se
 aguarda semáforo de alarme com estouro de tempo;
se há alarme de falhas **então**
 envia pacote com respectivo alarme;
fim se
 aguarda próxima execução

Algoritmo 2 Tarefa de medição de energia

```
mede V e I;
acumula V x I;
se acumulou 0.01 KWh então
    pede acesso ao registro de energia;
    incrementa registro de energia;
    libera o acesso ao registro de energia;
fim se
aguarda próxima execução;
```

5.3.1.3 Tarefa de comando da lâmpada

Esta é uma tarefa relativamente simples. Toda vez que a mesma recebe um comando através da rede para ligar ou desligar a lâmpada, ela deverá realizar a respectiva ação e atualizar o registro do estado da lâmpada. Então, a tarefa volta a ficar em estado de espera. A passagem do comando para esta tarefa é realizada via um estrutura do tipo caixa de mensagem (*mailbox*) e o acesso ao registro do estado da lâmpada deve ser feito via uma estrutura de acesso mútuo exclusivo (*mutex*), uma vez que este registro pode ser acessado por outras tarefas, como a tarefa de diagnóstico da lâmpada. Esta tarefa está representada no algoritmo (3). Ao invés de caixa de mensagens, poder-se-ia utilizar um semáforo. Neste caso, o comando seria repassado através de uma variável compartilhada.

Algoritmo 3 Tarefa de comando da lâmpada

```
aguarda mensagem da tarefa de rede;
se mensagem para ligar a lâmpada então
    aciona interruptor;
senão
    se mensagem para desligar a lâmpada então
        desativa interruptor;
    fim se
fim se
pede acesso ao registro de estado da lâmpada;
grava estado de lâmpada;
libera o acesso ao registro de estado da lâmpada;
```

5.3.2 Tarefa de diagnóstico de falhas

É importante que o sistema possa detectar possíveis falhas de funcionamento. Para efeito de demonstração, implementou-se uma tarefa capaz de detectar falhas de funcionamento da lâmpada (p. ex.: lâmpada danificada) e do acionamento (interruptor danificado). Estes testes poderiam ser realizados, pelo menos, uma vez ao dia, ou periodicamente.

mente durante o dia (p. ex.: a cada minuto). Futuramente, pode-se acrescentar, ainda, um teste capaz de detectar se o nó continua conectado à rede. Por exemplo, nós vizinhos poderiam solicitar a presença de um determinado nó e, em conjunto, decidir se houve algum problema com o nó, como perda de comunicação com a rede. A tarefa está representada no algoritmo (4).

Algoritmo 4 Tarefa de diagnóstico de falhas

```
pede acesso ao registro de energia;
guarda valor do consumo até o momento;
libera o acesso ao registro de energia;
aguarda tempo suficiente;
pede acesso ao registro de energia;
guarda diferença do valor atual com valor anterior;
libera o acesso ao registro de energia;
pede acesso ao registro de estado da lâmpada;
lê estado da lâmpada;
libera o acesso ao registro de estado da lâmpada;
se lâmpada ligada e consumo de energia igual a zero então
    sinaliza semáforo de alarme - lâmpada danificada;
senão
    se lâmpada desligada e consumo de energia maior que zero então
        sinaliza semáforo de alarme - interruptor danificado;
    fim se
fim se
aguarda próxima execução;
```

5.3.3 Tarefa de relógio local e tempo de funcionamento

Esta tarefa é responsável por manter o relógio local do nó em sincronia com o restante da rede. Além disso, ela é utilizada, também, para acumular os tempos totais de lâmpada ligada e desligada. Estas informações permitem determinar o ciclo trabalho da lâmpada. Durante alguma interrupção no fornecimento de energia, o nó perderá o sincronismo com a rede. Quando houver o retorno do fornecimento, esta tarefa deverá executar a sincronização do relógio. O algoritmo da tarefa pode ser visto em (5).

5.3.4 Tarefa de medição de luminosidade

Periodicamente, esta tarefa deve fazer a medição da luminosidade do ambiente. Se estiver habilitada para controlar a lâmpada, ela deverá decidir, com base na informação de luminosidade, se deverá alterar ou não o estado da lâmpada. Caso não esteja habilitada, a

Algoritmo 5 Tarefa de relógio local e tempo de funcionamento

```
aguarda 1 segundo;
incrementa relógio local;
pede acesso ao registro de estado da lâmpada;
lê estado da lâmpada;
libera o acesso ao registro de estado da lâmpada;
se lâmpada está ligada então
    pede acesso ao registro de tempo de lâmpada ligada;
    incrementa o tempo de lâmpada ligada;
    libera o acesso ao registro de tempo de lâmpada ligada;
fim se
se lâmpada está desligada então
    pede acesso ao registro de tempo de lâmpada desligada;
    incrementa o tempo de lâmpada desligada;
    libera o acesso ao registro de tempo de lâmpada desligada;
fim se
```

tarefa arquiva a informação em um registro de memória e aguarda a sua próxima execução. A tarefa está representada no algoritmo (6).

Algoritmo 6 Tarefa de medição de luminosidade

```
mede luminosidade do ambiente;
pede acesso ao registro de luminosidade;
grava estado da luminosidade;
libera o acesso ao registro de luminosidade;
se possui habilitação para controle da lâmpada então
    se ambiente claro então
        desliga a lâmpada;
    fim se
    se ambiente escuro então
        liga a lâmpada;
    fim se
fim se
pede acesso ao registro de estado da lâmpada;
grava estado de lâmpada;
libera o acesso ao registro de estado da lâmpada;
aguarda próxima execução;
```

5.3.5 Desenvolvimento da camada de aplicação ZigBee

Uma vez que seja tomada a decisão do emprego do protocolo ZigBee no desenvolvimento do sistema, fica a necessidade de se criar a camada de aplicação do protocolo com base na estrutura de aplicação disponível. Conforme descrito em 3.2, inicialmente define-se qual será o perfil de aplicação e se este será público ou proprietário. Até o momento,

Tabela 9: Dispositivos do perfil ZigBee *Smart Energy*

Dispositivo	Identificação
Portal de serviço de energia	0x0500
Dispositivo de medição	0x0501
Mostrador local	0x0502
Termostato programável	0x0503
Dispositivo de controle de carga	0x0504
Aparelho inteligente	0x0505
Terminal de pré-pagamento	0x0506
Reservados	0x0507 - 0x05FF

Fonte: Aliança ZigBee, 2008

Tabela 10: Dispositivos do perfil ZigBee *Home Automation* para iluminação

Dispositivo	Identificação
Lâmpada liga/desliga	0x0100
Lâmpada dimerizável	0x0101
Lâmpada com dimerização de cor	0x0102
Interruptor de luz liga/desliga	0x0103
Interruptor de dimerização	0x0104
Interruptor de dimerização de cor	0x0105
Sensor de luminosidade	0x0106
Sensor de ocupação	0x0107
Reservados	0x0108 - 0x01FF

Fonte: Aliança ZigBee, 2007

dois perfis públicos foram disponibilizados pela Aliança ZigBee, o perfil *Home Automation* (ALLIANCE, 2007b) para automação residencial e o perfil *Smart Energy* (ALLIANCE, 2008) para gerenciamento de energia. No presente trabalho, ambos os perfis são utilizados, uma vez que definem mensagens e dispositivos equivalentes aos utilizados, como medição e acionamento. A tabela 9 lista os dispositivos definidos no perfil *Smart Energy* e a tabela 10 lista os dispositivos do perfil de automação residencial específicos para iluminação ¹³.

De acordo com as funções do dispositivo proposto, os perfis 0x0501 (dispositivo de medição), 0x0100 (lâmpada liga/desliga) e 0x0106 (sensor de luz) são suportados ¹⁴. Além destes, utiliza-se alguns valores reservados (faixa de 0xC000 - 0xFFFF) para definir outro dispositivo que deve ser suportado. Este dispositivo passa, então, a ser parte de um perfil ZigBee proprietário para iluminação pública - é o dispositivo 0xC000, ponto de iluminação pública. As mensagens suportadas pelos dispositivos 0x0501, 0x0100 e 0x0106

¹³Pois apenas estes são de interesse da aplicação em questão.

¹⁴No futuro, o perfil 0x0500 (portal de serviço de energia) poderá ser suportado, permitindo que clientes das concessionárias de energia sejam conectados à rede

Tabela 11: Mensagens suportadas pelos dispositivos 0x0501, 0x0100 e 0x0106

Dispositivo	Mensagem	Identificação
0x0501	medição simples	0x0702
0x0100	liga/desliga	0x0006
0x0106	medição de luminosidade	0x0400

Fonte: Aliança ZigBee, 2008

Tabela 12: Mensagens suportadas pelo dispositivo 0xC000

Mensagem	Identificação
tempo	0x000A
localização geográfica	0x07FD
tempo de funcionamento	0x07FE
alarme de falhas	0x07FF

Fonte: O autor, 2009

estão listados na tabela 11, incluindo respectivas identificações (*clusterIDs*). Estas são as mensagens obrigatórias conforme os perfis.

O perfil 0xC000 é utilizado para atender outras funcionalidades não suportadas pelos dispositivos 0x0501, 0x0100 e 0x0106, como a informação da localização geográfica do ponto. Para o dispositivo 0xC000 foram elaboradas as mensagens apresentadas na tabela 12 com suas respectivas identificações. Estas dão suporte a funcionalidades adicionais necessárias ao gerenciamento de um sistema de iluminação pública. Novas funcionalidades poderão ser acrescentadas futuramente.

Cada tipo de mensagem possui sua própria formatação de resposta. Assim, uma mensagem possui 65536 atributos possíveis. A especificação do perfil *Smart Energy* separou esses atributos em 256 grupos de 256 atributos cada, de forma que o primeiro octeto representa o grupo e o segundo representa o atributo desejado. Por exemplo, a mensagem 0x0702 (medição simples) que contém valor de atributo 0x0000, representa o atributo 0x00 do grupo 0x00, cujo nome, conforme o perfil, é "*CurrentSummationDelivered*" e cujo significado é o valor total de energia entregue pela concessionária ao ponto, medido em KWh. Este é um valor de 48 bits que está contido no campo seguinte da mensagem. Todas as possíveis formatações das mensagens, incluindo seus possíveis atributos e tipos de valores do perfil *Smart Energy* podem ser encontrados em sua especificação (ALLIANCE, 2008).

O mesmo ocorre com os perfis 0x0100 e 0x0106 que possuem atributos já definidos no perfil público ZigBee de automação residencial (ALLIANCE, 2007b). Por exemplo, o sensor

de luminosidade possui uma única mensagem suportada (0x0400), a qual possui atributos divididos em grupos de dezesseis (16) atributos cada, conforme (ALLIANCE, 2007a). Apenas o primeiro grupo foi definido (Informação sobre Medição de Luminosidade), ficando o restante reservado para uso futuro. Os atributos obrigatórios são:

- *MeasuredValue* (0x0000): valor de 16 bits que representa a medida de iluminância em lux como $10000 * \log(valor) + 1$, onde o valor de iluminância é dado entre 1 lx e 3576 Mlx.
- *MinMeasuredValue* (0x0001): valor de 16 bits que indica qual o valor mínimo de iluminância que pode ser medido.
- *MaxMeasuredValue* (0x0002): valor de 16 bits que indica qual o valor máximo de iluminância que pode ser medido. Deve ser maior que *MinMeasuredValue*.

Para a mensagem 0x0006 (liga/desliga), há apenas um atributo de identificador 0x0000, cujo nome é "OnOff" e que possui dois valores possíveis, 0 (desliga) e 1 (liga).

Seguindo a recomendação da Aliança ZigBee, que incentiva o reuso dos atributos já definidos, todos os atributos descritos anteriormente serão empregados. Quanto ao perfil de dispositivo criado, ponto de iluminação pública, deve-se especificar também quais são os atributos das mensagens suportadas por ele. A Aliança ZigBee publicou um documento, conhecido como biblioteca de mensagens (*clusters*) e atributos (ALLIANCE, 2007a), que contém diversas mensagens e atributos que podem ser reusados por quem adota a tecnologia Zigbee. Entretanto, neste documento, com exceção dos atributos da mensagem de tempo (0x000A), não foram encontrados atributos que pudessem ser empregados nas mensagens definidas para o perfil ponto de iluminação pública, sendo necessária a elaboração dos mesmos.

Um resumo de todos os perfis de aplicação, perfis de dispositivo e *clusters* que são suportados é apresentado na tabela 13. E, na tabela 14, tem-se a lista dos *clusters* e respectivos atributos implementados. Portanto, ao todo são suportados dois perfis de aplicação ZigBee, quatro perfis de dispositivo, sete *clusters* e onze atributos.

O *cluster* Tempo possui o atributo 0x0000, cujo nome é *Time*. Este atributo tem como argumento um número de 32 bits que representa o tempo total em segundos desde 0h0m0s de 1º janeiro de 2000 (UTC). Este *cluster* está contido na biblioteca de *clusters* ZigBee e é reusado na presente aplicação.

Tabela 13: Resumo dos perfis de aplicação, perfis de dispositivos e *clusters* suportados

Perfil de aplicação	Perfil de dispositivo	Clusters
<i>Smart Energy</i>	dispositivo de medição (0x0501)	medição simples (0x0702)
	sensor de luminosidade (0x0106)	medição de luminosidade (0x0400)
	lâmpada liga/desliga (0x0100)	liga/desliga (0x0006) tempo (0x000A)
<i>Iluminação pública</i>	ponto de iluminação (0xC000)	localização geográfica (0x07FD)
		tempo de funcionamento (0x07FE)
		alarme de falhas (0x07FF)

Fonte: O autor, 2009

Tabela 14: Tabela de *clusters* e atributos

Cluster	Atributos	Fonte
Medição simples	<i>CurrentSummationDelivered</i> (0x0000)	<i>Smart Energy</i>
	<i>MeasuredValue</i> (0x0000)	
Medição de luminosidade	<i>MinMeasuredValue</i> (0x0001)	<i>ZigBee Cluster Library</i>
	<i>MaxMeasuredValue</i> (0x0002)	
Liga/desliga	<i>OnOff</i> (0x0000)	<i>ZigBee Cluster Library</i>
Tempo	<i>Time</i> (0x0000)	<i>ZigBee Cluster Library</i>
Localização geográfica	<i>LatitudeLongitude</i> (0x0000)	Autor
Tempo de funcionamento	<i>TmpLampLig</i> (0x0000)	Autor
	<i>TmpLampDeslig</i> (0x0001)	Autor
Alarme de falhas	<i>FalhaLamp</i> (0x0000)	Autor
	<i>FalhaInterruptor</i> (0x0001)	Autor

Fonte: O autor, 2009

O *cluster* Localização Geográfica possui apenas o atributo 0x0000 (*LatitudeLongitude*), tendo como argumento um número concatenado de 64 bits que representa latitude (32 bits) e longitude (32 bits) na forma GGG°MM'SS.SS". Já o *cluster* Tempo de Funcionamento possui dois atributos. Um atributo 0x0000 (*TmpLampLig*), cujo argumento é um número 32 bits que representa o tempo total em segundos que a lâmpada permaneceu ligada. E o atributo 0x0001 (*TmpLampDeslig*), cujo argumento é um número 32 bits que representa o tempo total em segundos que a lâmpada permaneceu desligada.

Por último, o *cluster* Alarme de Falhas também possui dois atributos. O atributo 0x0000 (*FalhaLamp*) é usado para indicar que a lâmpada está danificada. E o atributo 0x0001 (*FalhaInterruptor*) é usado para indicar que o interruptor está danificado. Os *clusters* Localização Geográfica, Tempo de Funcionamento e Alarme de Falhas com seus respectivos atributos foram criados pelo autor.

5.4 Considerações práticas

Até o momento apresentou-se a composição do dispositivo que corresponde ao nó da rede de sensores sem-fio proposta. Foram descritos os seus constituintes, seja de *hardware* ou de *software*. Entretanto, para haver, realmente, um sistema de gerenciamento da rede de iluminação pública completo, é necessário se apresentar, ainda, algumas considerações práticas acerca da instalação do sistema, bem como, da central responsável por gerenciar todo o sistema.

5.4.1 Central de gerenciamento

Normalmente, os municípios possuem um cadastro dos pontos de iluminação instalados em seu parque. Este cadastro contém informações sobre a localização do ponto, rua e número da residência ou ponto de referência mais próximo, e a potência instalada do ponto de iluminação. Além destas, informações sobre o tempo de utilização, as condições de operação e o consumo de energia são interessantes de ser armazenadas em um banco de dados. Este banco de dados, então, ficaria armazenado em um computador dotado de *hardware* e *software* específicos para permitir o acesso à rede e coletar os dados do sistema, bem como, permitir o tratamento adequado desses dados.

Estes recursos formam, então, a central de gerenciamento da rede. Através desta, é possível se ter acesso aos dados coletados pela rede de forma segura, isto é, via conexão criptografada. O padrão ZigBee possui, em sua especificação, maiores detalhes sobre como tornar a rede segura através criptografia AES de 128 bits. Entretanto, não é do escopo deste trabalho tratar dos aspectos de segurança da rede.

Dependendo do tamanho do parque de iluminação pública considerado, pode-se aumentar o número de coordenadores na central de gerenciamento. Desta forma, poder-se-ia subdividir a rede em sub-redes com identificações diferentes e operando em canais diferentes, assim evitando possíveis interferências e facilitando a tarefa de instalação da rede e de sua manutenção. Uma possível divisão seria baseada em direções geográficas a partir da central. Assim, por exemplo, ter-se-ia sub-redes nas regiões norte, sul, leste e oeste; ou com outras possíveis divisões. A vantagem desta abordagem está na maior capilarização do fluxo de dados convergentes para a central, que de outra forma deveria passar totalmente por apenas um coordenador e pelos nós adjacentes à central.

5.4.2 Instalação da rede

Conforme a especificação do ZigBee, a rede se inicia quando o coordenador da rede é iniciado. A partir deste instante, roteadores e dispositivos finais ZigBee podem ingressar na rede. No sistema de iluminação pública proposto, o coordenador da rede ZigBee corresponde à central de gerenciamento da rede. O coordenador é único em qualquer rede ZigBee. A partir da central, então, inicia-se à instação da rede. É importante que o coordenador possua alimentação constante, não sendo desligado em hipótese alguma.

Devido ao grande fluxo de mensagens que chegam até o coordenador é interessante que haja um número considerável de roteadores conectados diretamente a ele. Estes por sua vez devem ter um número menor de roteadores conectados a eles. Este número deve ser reduzido continuamente até se chegar a um valor de dois dispositivos máximos conectados aos próximos roteadores, de forma a se criar uma estrutura de rede aproximadamente linear, conforme a rede de iluminação pública. Assim, é possível maximizar-se o alcance da rede, limitada pelo número máximo de 65536 nós definido pelo padrão ZigBee. Todos os nós da rede são capazes de rotear mensagens (roteadores), não havendo dispositivos finais na rede.

Na instalação da rede é interessante que cada nó possua uma identificação única no sistema. O endereço MAC IEEE de 64 bits é uma das opções a ser adotada, uma vez que este valor é definido quando da fabricação do dispositivo, conforme padrão IEEE 802.15.4. De um ponto de vista prático, também é interessante se obter a localização geográfica do ponto quando houver sua instalação no sistema. Para que esta informação seja única e não possua qualquer ambiguidade, a melhor opção é a utilização dos dados geodésicos de localização obtidos através de um receptor GPS. Assim, antes de se habilitar o nó na rede, a informação de sua localização geográfica obtida via receptor GPS deve ser gravada no dispositivo. Isto pode ser feito via um dispositivo de instalação dotado de uma interface operacional (visor e teclado), tranceptor RF e receptor GPS. Através deste, um operador obtém as informações de posição via receptor GPS e as transmite ao ponto via interface RF. Após receber estes dados, o nó estará habilitado na rede. Este nó então envia seus dados de localização, data de instalação e outros dados pertinentes até a central. A partir deste momento, o nó poderá permitir que novos nós ingressem na rede. As informações relativas ao nó são arquivadas no banco de dados do sistema e o nó entra em funcionamento, passando a coletar e enviar dados sobre o conjunto reator-lâmpada até a central.

6 RESULTADOS

6.1 Resultados experimentais de *hardware*

Os protótipos desenvolvidos foram submetidos a testes de laboratório. Inicialmente, testou-se os sensores presentes no nó. Então, após a validação destes, realizou-se testes diretamente com o nó, com ênfase no protocolo de troca de mensagens da aplicação. A seguir se descreve cada um dos testes efetuados e se apresenta os resultados obtidos, incluindo alguns comentários a respeito. O circuito completo utilizado se encontra no anexo C.

6.1.1 Teste do sensor de corrente

O sensor de corrente foi testado com uma lâmpada de vapor de sódio de 70W com reator eletromagnético compatível. Obteve-se a forma de onda apresentada na figura 28. Neste caso, o sensor estava sendo alimentado através do conversor Flyback, cuja tensão de saída média estava em torno de 4,7V. Percebe-se, claramente, que há um envoltória de ruído em torno do sinal de interesse. A título de comparação, a figura 29 traz a forma de onda da corrente drenada pela mesma carga, porém obtida por medição direta com osciloscópio e ponteira de corrente.

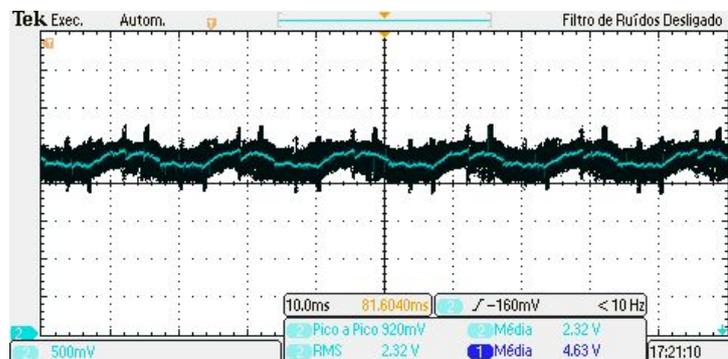


Figura 28: Tensão na saída do sensor de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CC com escala de 500mV/div)

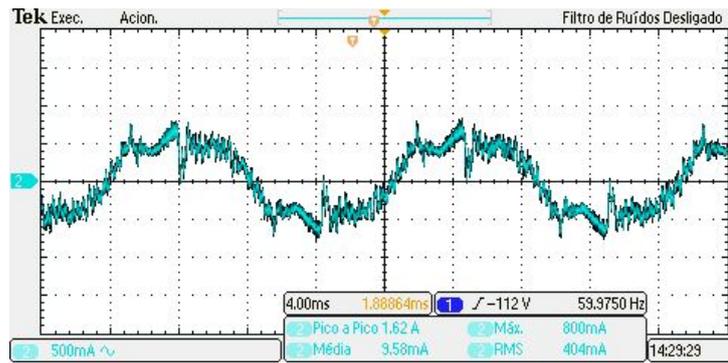


Figura 29: Forma de onda de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 500mA/div)

A tensão na saída do sensor de corrente possui uma parcela contínua (tensão média) em torno da metade da tensão de alimentação, conforme especificado pelo fabricante ¹. Por isso, para medição da corrente na carga, interessa apenas a componente alternada da forma de onda, que pode ser vista na figura 30. Percebe-se, destacadamente, que a razão sinal-ruído ficou extremamente reduzida, prejudicando a medição.

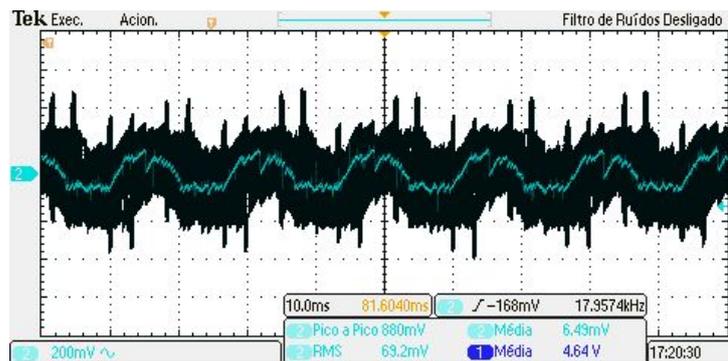


Figura 30: Componente alternada da tensão na saída do sensor de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 200mV/div)

Cogitou-se que a principal origem do ruído era a tensão de alimentação do sensor oriunda do conversor Flyback. Esta suspeita pôde ser comprovada quando, ao se aumentar a resolução de tempo, se comparou a tensão de alimentação do sensor com o sinal obtido do mesmo (figura 31). Na figura 31, nota-se que uma pequena variação na tensão na saída do conversor Flyback acaba sendo amplificada pelo sensor de corrente e aparece no sinal na saída do sensor ².

Outra verificação desta hipótese pôde ser feita analisando-se a resposta do sensor de corrente com a mesma carga, porém alimentado por um fonte de tensão linear. A figura 32 evidencia a resposta obtida, onde se percebe uma redução significativa do ruído com o conseqüente aumento da relação sinal-ruído.

¹Na medição, obteve-se uma média de 2,32 V.

²Sinal mais abaixo na figura.

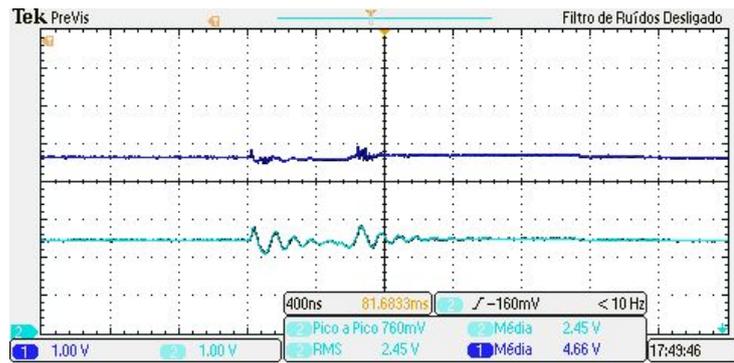


Figura 31: Comparação da tensão na saída do sensor de corrente (mais abaixo na figura) x tensão de saída do conversor Flyback (acoplamento CC com escala de 1V/div)

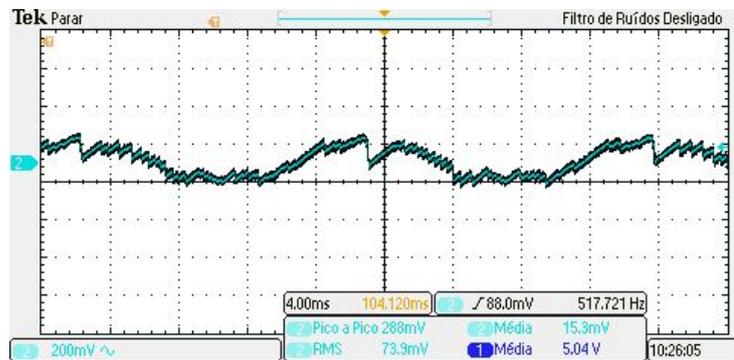


Figura 32: Tensão na saída do sensor de corrente com alimentação por fonte linear - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 200mV/div)

Por isso, para melhorar a relação sinal-ruído, alguns ajustes foram realizados no conversor, como a inclusão de um *snubber* RC no diodo secundário e a substituição do capacitor eletrolítico da saída do conversor por um capacitor de tântalo, cuja resistência série equivalente é muito menor. O resultado obtido pode ser conferido na figura 33. Há ainda a presença de ruído, porém a relação sinal-ruído aumentou.

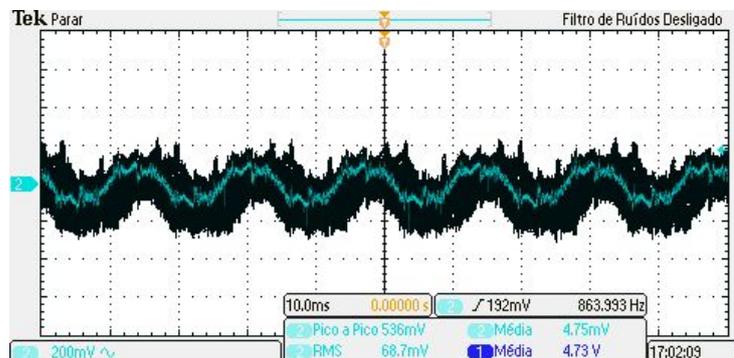


Figura 33: Tensão na saída do sensor de corrente - reator com lâmpada HPS 70W (acoplamento CA com escala de 200mV/div)

6.1.2 Teste do sensor de tensão

O ruído presente na resposta do sensor de corrente, induzido pelo conversor Flyback, também foi observado na resposta do sensor de tensão (34). Entretanto, neste caso, a adição de um capacitor de pequeno valor ($100nF$) minimizou o problema, aumentando a relação sinal-ruído. O resultado está evidenciado na figura 35.

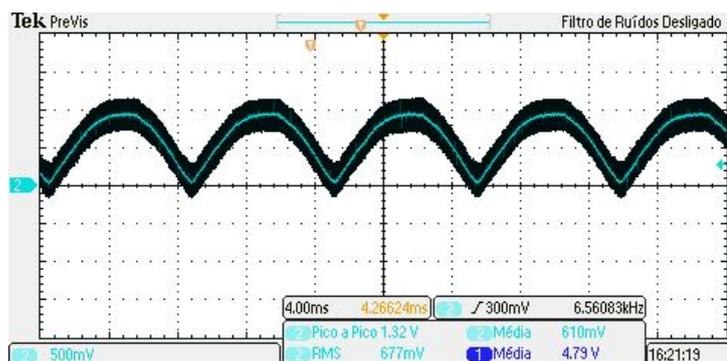


Figura 34: Resposta do sensor de tensão (acoplamento CC com escala de 500mV/div)

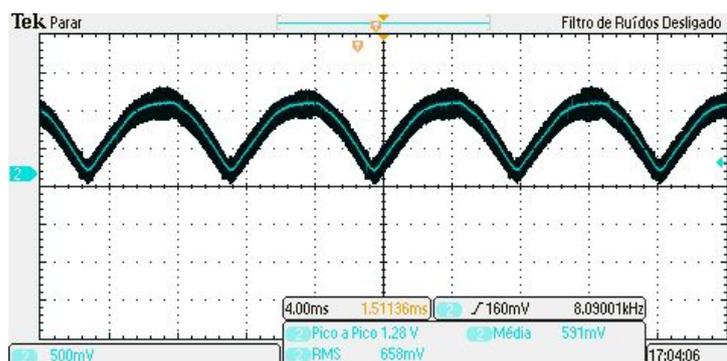


Figura 35: Resposta do sensor de tensão com filtro RC (acoplamento CC com escala de 500mV/div)

6.1.3 Teste do sensor de luminosidade

A figura 36 mostra a resposta do sensor de luminosidade obtida quando da transição de um ambiente claro para um ambiente escuro e, em seguida, de um ambiente escuro para um ambiente claro.

6.2 Resultados experimentais de *software*

6.2.1 Teste de medição de energia

As respostas dos sensores de tensão e corrente foram digitalizadas através do conversor analógico-digital do microcontrolador e os valores obtidos foram utilizados para se calcular

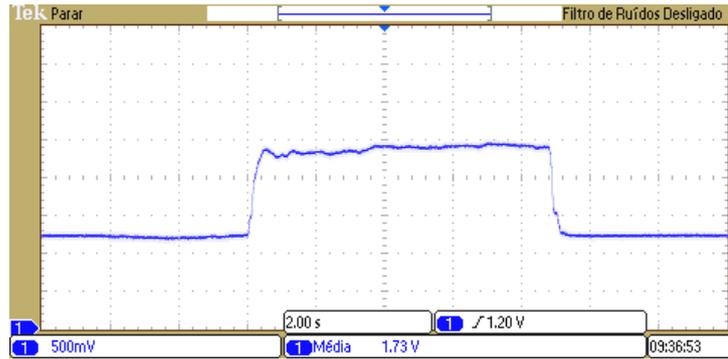


Figura 36: Resposta do sensor de luminosidade (acoplamento CC com escala de 500mV/div)

o consumo de energia do conjunto reator-lâmpada. As figuras 37 e 38 correspondem aos sinais de tensão e corrente após amostragem, obtidos nos testes com a lâmpada HPS de 70W. E as figuras 39 e 40 correspondem aos respectivos sinais de tensão e corrente reconstruídos através dos valores obtidos por amostragem.

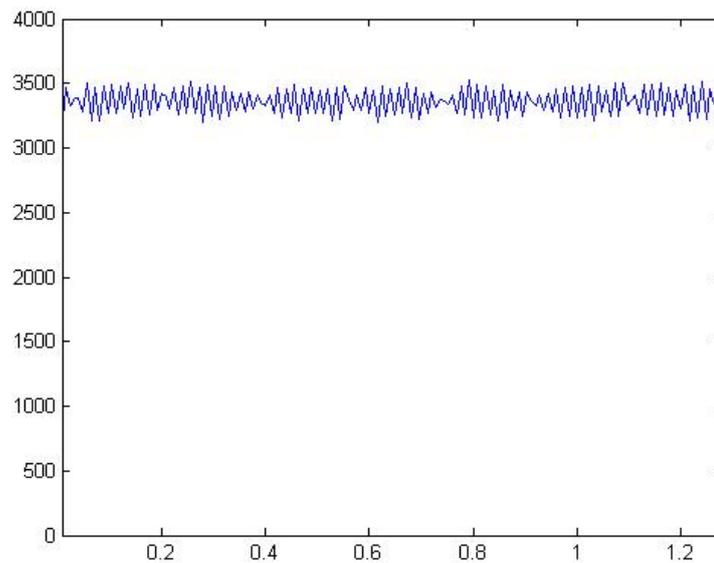


Figura 37: Corrente amostrada pelo conversor A/D (12 bits)

Através destes valores estimou-se uma potência ativa de 85,35 W. Este valor está de acordo com o valor esperado, em torno, de 84W (70W da lâmpada HPS mais 14W de perdas no reator eletromagnético). Ainda, estimou-se uma tensão de valor eficaz de 226,63 V e uma corrente eficaz de 0,423 A, cujos valores também estão de acordo com o esperado.

6.2.2 Teste do protocolo ZigBee

De forma a verificar o funcionamento da rede e das mensagens de aplicação, desenvolveu-se, para efeito de demonstração, um *software* aplicativo para ambiente Win-

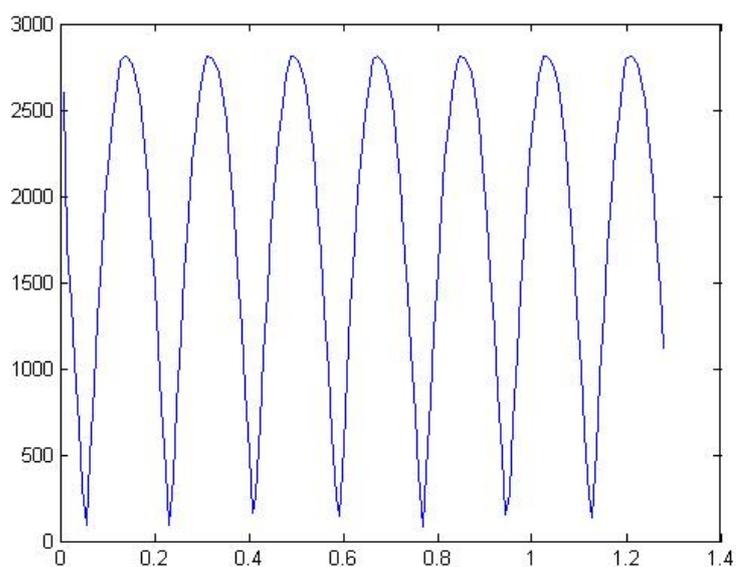


Figura 38: Tensão amostrada pelo conversor A/D (12 bits)

dows na plataforma MicrosoftTM Visual C# .NET. Uma amostra da janela do aplicativo pode ser vista na figura 41.

Através deste aplicativo, testou-se as mensagens criadas para a rede de gerenciamento de iluminação pública. Os testes foram realizados entre dois nós, na configuração cliente/servidor. O nó cliente corresponderia, na aplicação final, à central de gerenciamento do sistema e estaria conectado a um computador executando o aplicativo da rede. O nó servidor, corresponderia a cada nó da rede instalado no ponto de iluminação. Um exemplo de teste realizado é demonstrado na figura 42, onde se tem o envio da mensagem de ligar/desligar lâmpada para o ponto de iluminação. Todas as mensagens foram enviadas com sucesso. Na figura, pode-se perceber ainda a formatação do quadro conforme API do fabricante do módulo XBee.

As figuras 43 e 44 correspondem à resposta esperada em *hardware*, respectivamente, aos comandos de ligar/desligar lâmpada.

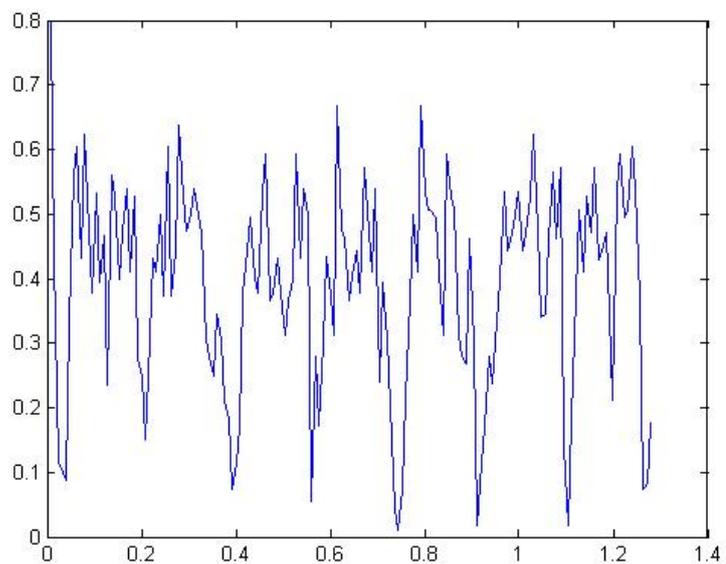


Figura 39: Corrente reconstruída com os valores amostrados

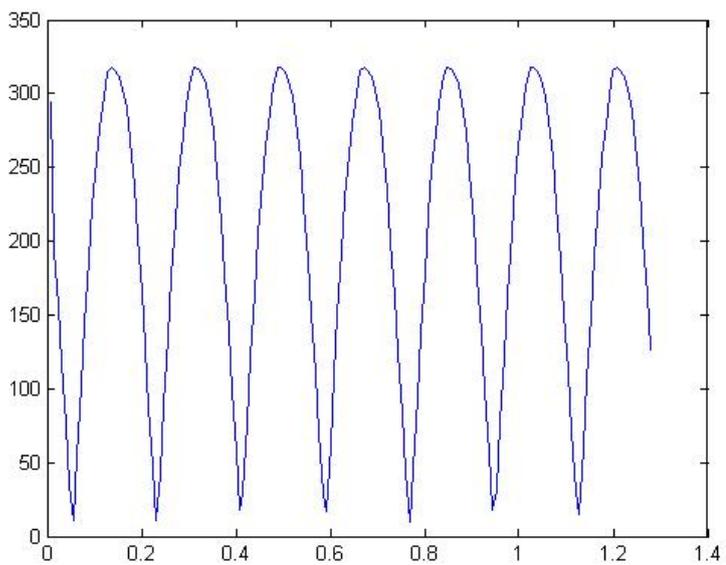


Figura 40: Tensão reconstruída com os valores amostrados

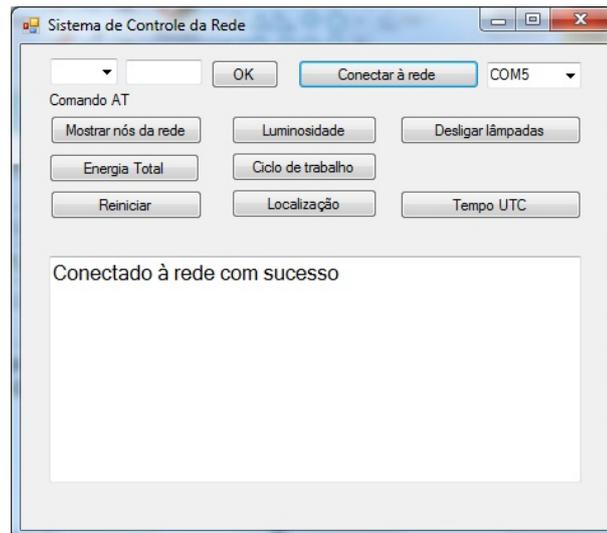


Figura 41: Janela do *software* de teste da rede

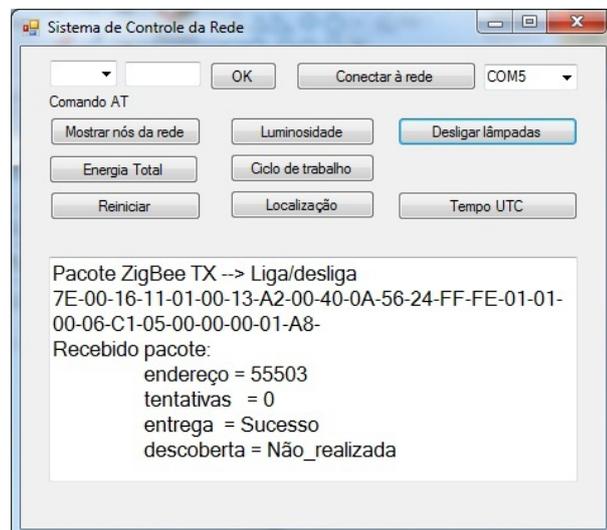


Figura 42: Janela do *software* de teste da rede - mensagem liga/desliga

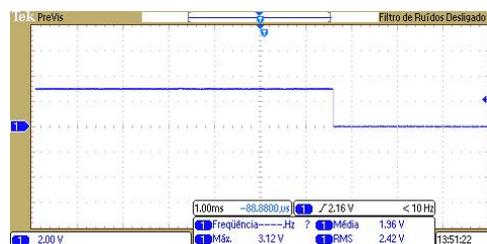


Figura 43: Resposta do nó à mensagem ligar a lâmpada

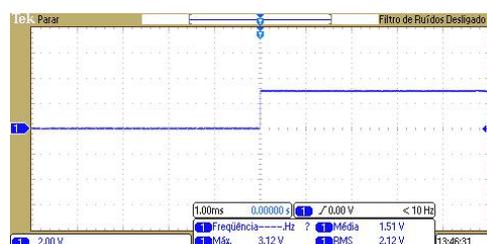


Figura 44: Resposta do nó à mensagem desligar a lâmpada

7 CONCLUSÃO

7.1 Conclusão

O presente trabalho propôs uma modificação nos sistemas de iluminação pública presentes nos municípios brasileiros. Esta modificação consistiu na substituição dos relés fotoelétricos, empregados nesses sistemas, por um novo dispositivo capaz de se comunicar com dispositivos próximos, formando uma rede urbana, e desta forma, monitorar os parâmetros da lâmpada e alterar seu estado à distância. As razões para tal modificação foram apresentadas no trabalho e são motivadas, principalmente, pela possibilidade de redução dos custos de manutenção do sistema e dos gastos em energia elétrica. Para o desenvolvimento do dispositivo utilizou-se tecnologia de redes de sensores sem-fio ZigBee™ em conjunto com o emprego de um sistema operacional de tempo real (RTOS).

Um protótipo foi desenvolvido e testado em laboratório. Foram obtidos resultados favoráveis tanto com relação ao *hardware* quanto com relação ao *software* do dispositivo. Entretanto, para se ter um sistema em operação há ainda muitos pontos a se trabalhar. É necessário se aprovar o dispositivo dentro das normas vigentes e buscar reduzir ao máximo seu custo de produção. As soluções empregadas no projeto do circuito são algumas das diversas soluções existentes. Por isso, faz-se importante, ainda, confrontar as soluções de acordo, não só com os requisitos técnicos, mas também com requisitos de manufaturabilidade e viabilidade econômica.

Um ponto forte no projeto do dispositivo é o emprego de microcontrolador para realizar as funcionalidades desejadas. Isto torna o dispositivo interessante de um ponto de vista comercial, uma vez que há um valor agregado significativo em *software*, que consiste em um capital intelectual e é facilmente protegível na etapa de fabricação. Além disso, esta condição permite a adição de novas funcionalidades ao dispositivo sem aumento significativo de custo de produção, desde que tais funcionalidades sejam realizadas apenas em nível de *software* e que haja recursos computacionais ainda disponíveis (principalmente memória *flash* e RAM).

Vale ressaltar, inclusive, que a aplicação do dispositivo proposto não se restringe apenas aos sistemas de iluminação pública que empregam lâmpadas HPS. Sistemas que empreguem lâmpadas de LEDs, por exemplo, poderiam se beneficiar ainda mais do mesmo dispositivo. Isto porque, considerando-se que estas lâmpadas oferecessem a possibilidade de dimerização, a rede de comunicação existente poderia encaminhar comandos aos pontos para alterar sua intensidade luminosa, conforme medidas de consumo de energia, luminosidade do ambiente, condições de tráfego, etc. Também, permitiria o monitoramento das condições da lâmpada, como temperatura de operação e número de LEDs em funcionamento (BARRIQUELLO, 2008).

Mesmo a utilização do protocolo ZigBee não limita a idéia proposta, sendo este apenas uma opção para a implementação da rede. Ao invés do ZigBee, poder-se-ia desenvolver e empregar outro protocolo para comunicação. A escolha pelo ZigBee se deu em virtude da facilidade de sua utilização, uma vez que já há no mercado módulos disponíveis (como o módulo XBee) que já são compatíveis com o padrão e, assim, diminuem consideravelmente o tempo de desenvolvimento.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros

A lista a seguir apresenta algumas sugestões do autor para trabalhos futuros.

1. Um algoritmo otimizado de roteamento de pacotes para a rede pode ser proposto. O algoritmo de roteamento empregado pelo ZigBeeTM é o AODV modificado. Este algoritmo é apropriado para uma rede que possui nós móveis. Porém, o mesmo utiliza transmissões de pacotes para todos os nós (*broadcasting*) que inundam a rede, tornando a rede sobrecarregada e menos eficiente. Por isso, um algoritmo otimizado, que considere a posição fixa dos pontos de iluminação e a distribuição destes em um ambiente urbano, pode ser proposto. Desta forma, ter-se-ia um melhor aproveitamento da capacidade da rede, evitando-se múltiplas retransmissões de pacotes.
2. Novas aplicações podem ser propostas. Devido ao fato de que a rede terá grandes momentos de ociosidade quando utilizada apenas para monitoramento e controle da iluminação pública, novas aplicações que aproveitem a capacidade ociosa da rede podem ser propostas.
3. Toda o conjunto de *softwares* (pilha de rede e camada de aplicação) pode ser integrado em um único microcontrolador, desta forma reduzindo-se o custo e o tamanho da solução. Para tanto, faz-se necessária a implementação da pilha ZigBeeTM.

4. Devido ao alto grau de complexidade do *software* da rede e da aplicação, a possibilidade de haver erros no *software* é bastante significativa. Além disso, devido ao elevado número de nós que a rede pode conter e do alto custo de reposição dos dispositivos (tempo e mão-de-obra), é interessante haver uma possibilidade de atualização do *software* diretamente pela rede. Para tanto, pode-se propor um mecanismo de atualização de *software* via rede, a ser empregado na reprogramação dos dispositivos, para correção de erros ou adição de novas funcionalidades.
5. Infelizmente, devido à necessidade de se realizar modificações no sistema, mesmo que mínimas, não foi possível testar o funcionamento do novo dispositivo em campo. Entretanto, espera-se que, futuramente, os sistemas de iluminação pública passem a empregar tal dispositivo ou algum dispositivo semelhante. Isto trará, além dos benefícios citados, muitos outros relativos à melhoria da qualidade de vida dos centros urbanos. Principalmente, devido à grande variedade de novos serviços que podem ser oferecidos em torno da rede formada pelos dispositivos presentes no sistema de IP e cuja abrangência se estende, virtualmente, a qualquer ponto de uma cidade. Assim, os próximos passos deverão incluir o desenvolvimento de mais pontos para os testes a ser realizados diretamente no sistema de iluminação pública.

REFERÊNCIAS

- ALLIANCE, Z. *ZigBee Specification*. 2006.
- ALLIANCE, Z. *ZigBee Cluster Library Specification*. Oct. 2007.
- ALLIANCE, Z. *ZigBee Home Automation Public Application Profile*. Oct. 2007.
- ALLIANCE, Z. *ZigBee Smart Energy Profile Specification*. Dec. 2008.
- ANEEL. *RESOLUÇÃO N.º 456, DE 29 DE NOVEMBRO DE 2000*. NOV. 2000.
- BARBI, I. e. a. Projeto físico de indutores e transformadores. Apostila INEP/UFSC. 11 pg. Mar. 2002.
- BARRIQUELLO, C. H. . e. a. Sistema inteligente baseado em zigbee para iluminação pública com lâmpadas de leds. In: *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática*. Juiz de Fora, MG, BR: [s.n.], 2008.
- BASSO, C. *Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook*. xiv. New York: McGraw-Hill, 2001. 263 p.
- BASSO, C. *AND8125/D: Evaluating the Power Capability of NCP101X Members*. Jul. 2003.
- BASSO, C. *AND8134/D: Designing Converters with the NCP101X Family*. Oct. 2003.
- BHATTI, S. e. a. Mantis os: an embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms. *Mob. Netw. Appl.*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 10, n. 4, p. 563–579, 2005. ISSN 1383-469X.
- BODE, P. A. *AN39 - Current measurement applications handbook*. Jan 2008.
- COSTA, R. E. d. *Sistematização do projeto de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão para iluminação pública*. Tese (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.
- CPFL. *Iluminação Pública - Relé Fotoeletrônico*. Fev. 2009. Disponível em: <http://www.cpfl.com.br/LinkClick.aspx?fileticket=8QSPI09&mid=1085>.
- DENARDIN, G. W. *Desenvolvimento de uma Rede Fieldbus para Gerenciamento do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.
- DUNKELS A.; GRONVALL, B. V. T. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on*, p. 455–462, Nov. 2004. ISSN 0742-1303.

- ELEKTROBRÁS. *Iluminação Pública no Brasil*. 2008. Disponível em www.elektrobras.com. Acessado em 30/12/2008. Disponível em: <www.elektrobras.com>.
- ESWARAN A.; ROWE, A. R. R. Nano-rk: an energy-aware resource-centric rtos for sensor networks. *Real-Time Systems Symposium, 2005. RTSS 2005. 26th IEEE International*, p. 10 pp.–265, Dec. 2005. ISSN 1052-8725.
- GARCIA-GARCIA, J. e. a. New control strategy in a square-wave inverter for low wattage metal halide lamp supply to avoid acoustic resonances. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 1, p. 243–253, Jan. 2006. ISSN 0885-8993.
- IEEE. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. Secretary, IEEE-SA Standards Board, 445 Hoes Lane, P.O.Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, USA, 2003.
- JING, C. e. a. Design of streetlight monitoring and control system based on wireless sensor networks. In: IEEE. *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications - ICIEA 2007*. [S.l.], 2007. p. 57–62.
- LEE, J. e. a. Development of zigbee based street light control system. In: PSCE '06. *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 2236–2240.
- LI Q.; YAO, C. *Real-Time Concepts for Embedded Systems*. [S.l.]: CMP Books, 2003. 294 pages p.
- MARCHEZAN, T. B. *Integração de Conversores Estáticos Aplicados a Sistemas de Iluminação Pública*. Tese (Tese de Doutorado) — PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
- MELKONIAN M. ; WU, J. ZwoS - a lightweight operating system for lightweight embedded wireless devices. *TENCON 2005 2005 IEEE Region 10*, p. 1–6, Nov. 2005.
- MISIC J.; MISIC, V. B. *Wireless Personal Area Networks: Performance, Interconnections and Security with IEEE 802.15.4*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
- MOZUMDAR, M. e. a. Porting application between wireless sensor network software platforms: Tinyos, mantis and zigbee. *Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. IEEE International Conference on*, p. 1145–1148, Sept. 2008.
- ONSEMICONDUCTOR. *Self-Supplied Monolithic Switcher for Low Standby-Power Offline SMPS*. Oct. 2007. Disponível em www.onsemi.com. Acessado em 14/04/2009.
- PINTO, R. A. *Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDs)*. Tese (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.
- PRESSMAN, A. *Switching power supply design*. 2nd. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1998. 671 p.
- ROSSETTO S.; RODRIGUES, N. A cooperative multitasking model for networked sensors. *Distributed Computing Systems Workshops, 2006. ICDCS Workshops 2006. 26th IEEE International Conference on*, p. 91–91, July 2006. ISSN 1545-0678.

SILVEIRA, R. P. *Aplicação de uma rede Fieldbus ao Controle de Reatores Eletrônicos para Lâmpadas HPS*. Tese (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

SOHRABY K; MONOLI, D. Z. T. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ZHOU, H. e. a. Limos: A tiny real-time micro-kernel for wireless objects. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2006. WiCOM 2006. International Conference on*, p. 1–4, Sept. 2006.

ZIMMERMANN, H. Osi reference model - the iso model of architecture for open systems interconnection. In: *IEEE Transactions on Communications*. [S.l.]: IEEE, 1980. v. 28, n. 4, p. 425–432.

APÊNDICE A – PROJETO DO CONVERSOR FLYBACK

O projeto do conversor Flyback foi realizado conforme as seguintes premissas:

- 1.O conversor deve funcionar em modo de condução descontínua (DCM). Isto porque, por se tratar de um controlador em modo de corrente, o NCP1015 é susceptível a oscilações sub-harmônicas, as quais somente ocorrem quando o conversor opera em modo de condução contínua (CCM) com uma razão cíclica superior a 50% (ONSEMI-CONDUCTOR, 2007). Assim, a operação em condução descontínua é a mais indicada, independentemente da razão cíclica que seja necessária ¹.
- 2.A potência de entrada do conversor é limitada em 1,5 W conforme NBR5123.
- 3.A potência de saída deve ser aproximadamente 1,0 W (5,0 V a 200 mA). Portanto o rendimento esperado é de aproximadamente 65%.
- 4.A máxima tensão suportada pelo MOSFET integrado é de 700 V.
- 5.O conversor deve operar com entrada universal de 110V/220V.
- 6.O conversor deve ocupar o menor volume e a menor área possíveis.

Sendo a máxima tensão suportada pelo MOSFET integrado do NCP1015 de 700 V ² e supondo que a máxima tensão de entrada é de aproximadamente 360 V ³ e a tensão sobre o indutor secundário é de 6V ⁴, tem-se por (A.1) a máxima relação de espiras N .

¹A razão cíclica máxima é de 65%

²No cálculo usa-se o valor de 600 V, sendo 100 V de margem

³Isto é, $1,15 * 220 * \sqrt{2}$ V (variação de 15%)

⁴Tensão de saída de 5 V + tensão sobre o diodo de 1 V

$$N = (V_{DSmax} - V_{INmax}) / (V_{out} + V_{diodo}) \quad (A.1)$$

Portanto,

$$N = (600 - 360) / (5 + 1) = 240 / 6 = 40 \quad (A.2)$$

Entretanto, no projeto é importante que este valor seja escolhido de forma adequada para minimizar o esforço de tensão sobre o interruptor integrado. Conforme o fabricante (ONSEMICONDUCTOR, 2007), o valor adequado para N é dado por (A.3).

$$N * (V_{out} + V_{diodo}) < V_{INmin} \quad (A.3)$$

$$N < V_{INmin} / (V_{out} + V_{diodo}) \quad (A.4)$$

Onde V_{INmin} a tensão mínima na entrada, considerando-se uma variação de 15% na tensão retificada mais 10% da tensão do capacitor de entrada. Portanto, $V_{INmin} = 120$ V⁵.

$$N < 120 / 6 < 20 \quad (A.5)$$

No projeto, escolheu-se $N = 18$.

Neste ponto já é possível se especificar o diodo de saída. Por (A.6), a tensão de pico reversa máxima do diodo $V_{dr_{max}}$ é calculada.

$$V_{dr_{max}} = \frac{V_{in_{max}}}{N} + V_{out} \quad (A.6)$$

$$V_{dr_{max}} = \frac{360}{18} + 6 = 26V \quad (A.7)$$

Um diodo Schottky 1N5819 de 40V/1A é suficiente.

A partir daí, pode-se encontrar o valor da indutância crítica do enrolamento primário $L_{p_{crit}}$ (A.8). Este valor corresponde a máxima indutância a partir da qual a operação em DCM é perdida.

⁵(0,85 * 0,9 * 110 * √2)

$$Lp_{crit} = \frac{(V_{INmin} * V_r)^2 * \eta}{2 * f_{sw} * [P_{out} * (V_r^2 + 2 * V_{INmin} * V_r + V_{INmin}^2)]} \quad (A.8)$$

Onde, V_r é a tensão refletida ⁶, f_{sw} é a frequência de comutação, P_{out} é a potência de saída do conversor ⁷ e η é a eficiência ⁸.

Usando os valores de $V_r = 18 * 6 = 108$ V, $\eta = 0.8$, $f_{sw} = 65$ KHz e $P_{out} = 1.2$ W, tem-se:

$$Lp_{crit} = \frac{(120 * 108)^2 * 0.8}{2 * 65 * 10^3 * [1.2 * (108^2 + 2 * 120 * 108 + 120^2)]} = 20 \text{ mH} \quad (A.9)$$

Além disso, deve-se fixar a máxima razão cíclica em 40% ⁹. Este valor é escolhido para assegurar a operação em DCM. Então, se utilizar a equação que define a indutância máxima para que a corrente de pico no interruptor fique abaixo do seu valor máximo (A.10).

$$Lp_{max} = \frac{D_{max} * V_{INmin}}{Ip_{max} * f_{sw}} \quad (A.10)$$

Onde Ip_{max} é a máxima corrente de pico suportada pelo interruptor. Para o NCP1015 este valor é de 450 mA. Deixando-se uma margem de 10%, utiliza-se o valor de 405 mA ¹⁰.

Assim, tem-se:

$$Lp_{max} = \frac{(0.4 * 120)}{0.405 * 65 * 10^3} = 1.8 \text{ mH} \quad (A.11)$$

Como $Lp_{max} < Lp_{crit}$, o valor escolhido ($Lp = 1.8 \text{ mH}$) pode ser utilizado.

Com estes valores, a potência máxima teórica que pode ser fornecida é calculada por:

$$P_{out_{max}} = \frac{1}{2} * Lp_{max} * Ip_{max}^2 * f_{sw} * \eta \quad (A.12)$$

Então,

⁶ $V_r = N * (V_{out} + V_{diodo})$

⁷Igual a 1,2 W, considerando-se 6V a 200 mA (5V na carga mais 1V no diodo)

⁸Igual 80%(1,2/1,5)

⁹Por sugestão do fabricante (BASSO, 2003a)

¹⁰Valor mínimo da corrente especificada conforme *datasheet* (ONSEMICONDUCTOR, 2007)

$$P_{out_{max}} = \frac{1}{2} * 1.8 * 10^{-3} * 0.405^2 * 65 * 10^3 * 0.8 \cong 7.7W \quad (A.13)$$

Portanto, a potência desejada (1.2 W) pode ser fornecida pelo conversor dentro da faixa de operação escolhida.

Após, é necessário se especificar os valores do circuito RCD utilizado no grampeamento do transformador *Flyback*. Para tanto, assume-se uma indutância de dispersão de 2% do valor nominal ($0.02 * 1.8mH = 36\mu H$). Como a tensão máxima refletida é de 108 V, pode-se grampear o transformador em 200 V e, a tensão sobre o interruptor ficará limitada em 560V ($360 V + 200V$), portanto, menor do que a tensão de 700 V máxima suportada pelo dispositivo.

Considerando-se, então, o pico de corrente máximo no pior caso de 450 mA + 10% (495 mA), pode-se calcular os valores de R e C através de (A.14 e A.15)(BASSO, 2003b), pg. 8 e 9:

$$R_{clamp} = \frac{2 * V_{clamp} * (V_{clamp} - V_{out} * N)}{L_{leak} * I_{p_{max}}^2 * f_{sw}} \quad (A.14)$$

$$C_{clamp} = \frac{V_{clamp}}{V_{ripple} * R_{clamp} * f_{sw}} \quad (A.15)$$

Onde, R_{clamp} e C_{clamp} representam os valores de R e C do circuito RCD, V_{clamp} a tensão de grampeamento do transformador *Flyback*, L_{leak} a indutância de dispersão e V_{ripple} a variação de tensão sobre o capacitor (escolheu-se o valor de 20 V).

Resolvendo (A.15) e (A.14), tem-se:

$$R_{clamp} = \frac{2 * 200 * (200 - 6 * 20)}{36 * 10^{-6} * 0.495^2 * 65 * 10^3} = 56K\Omega \quad (A.16)$$

$$C_{clamp} = \frac{200}{20 * 56 * 10^3 * 65 * 10^3} = 27nF \quad (A.17)$$

Por sugestão do fabricante (BASSO, 2003b), pg. 9, utiliza-se o diodo ultra-rápido MUR160 de 600V/1A.

Por último, especifica-se os valores dos capacitores de entrada (C_{in}) e de saída (C_{out}). O primeiro é calculado, por (A.18), de forma a garantir uma variação aceitável ¹¹ do nível

¹¹Cerca de 10% do valor considerado

de tensão durante o instante em que a energia é acumulada no transformador *Flyback*. Já o segundo é calculado, por (A.19), para armazenar energia suficiente para manter a tensão adequada na carga durante esse mesmo instante (PRESSMAN, 1998).

$$C_{in} = \frac{2 * P_{out}}{f_{sw} * \eta * 0.2 * V_{in_{min}}^2} \quad (A.18)$$

$$C_{out} = \frac{D_{max} * I_{out}}{f_{sw} * V_{out_{ripple}}} \quad (A.19)$$

Onde $V_{out_{ripple}}$ corresponde a uma variação de 5% do valor nominal da tensão de saída e I_{out} é a corrente de saída.

De (A.18) tem-se:

$$C_{in} = \frac{2 * 1.2}{65 * 10^3 * 0.8 * 0.2 * (120)^2} = 0.16 \mu F \quad (A.20)$$

O valor comercial escolhido é de 0.22 μF , com tensão de 400V.

De (A.19) tem-se:

$$C_{out} = \frac{0.4 * 0.2}{65 * 10^3 * 0.05 * 5} = 4.9 \mu F \quad (A.21)$$

O valor comercial escolhido é de 10 μF , considerando-se uma certa margem de variação dos parâmetros de projeto.

A.0.1 Projeto do transformador *Flyback*

Valores de projeto:

- Indutância do enrolamento primário = 1.8 mH;
- Relação de espiras $N = 18$;
- Núcleo escolhido EE-16/7/4 IP12R;

A partir dos dados disponibilizados pelo fabricante do núcleo, obtem-se as seguintes informações:

- Máxima densidade de campo magnético $B_{max} = 0.51 T$

- Área transversal do caminho magnético $A_e = 14.9mm^2$
- Comprimento médio do caminho magnético $L_e = 34.4mm$
- Área da janela $A_w = 39.4mm^2$
- Comprimento médio por espira $L_t = 37.7mm$

Inicialmente, calcula-se o número de espiras do enrolamento primário N_p , por (A.22).

$$N_p = \frac{D_{max} * V_{INmin}}{f_{sw} * B_{max} * A_e} \quad (A.22)$$

Deixando uma margem de 0,21T, usou-se 0,3T para o valor de B_{max} . Então,

$$N_p = \frac{0.4 * 120}{65 * 10^3 * 0.3 * 14.9 * 10^{-6}} = 165 \text{ espiras} \quad (A.23)$$

Sabendo-se o valor de N_p pode-se calcular o valor de N_s por (A.24).

$$N_s = \frac{N_p}{N} \quad (A.24)$$

$$N_s = \frac{124}{18} = 9 \text{ espiras} \quad (A.25)$$

Então, especifica-se a bitola dos condutores S_p e S_s (A.26 e A.27). Para tanto é necessário conhecer a corrente eficaz I_{rms} que circula nos condutores e a densidade de corrente máxima J_{max} . O valor de J_{max} usado é de $400A/cm^2$.

$$S_p = \frac{I_{p_{rms}}}{J_{max}} \quad (A.26)$$

$$S_s = \frac{I_{s_{rms}}}{J_{max}} \quad (A.27)$$

O valor da corrente eficaz, no enrolamento primário, é dado por (A.28), e no enrolamento secundário, por (A.29) (PRESSMAN, 1998).

$$I_{p_{rms}} = \frac{I_{p_p}}{\sqrt{3}} * \sqrt{D_{max}} \quad (A.28)$$

$$I_{s_{rms}} = \frac{I_{p_p} * N}{\sqrt{3}} * \sqrt{1 - D_{max}} \quad (\text{A.29})$$

Onde I_{p_p} representa a corrente de pico no enrolamento primário.

O cálculo da corrente de pico é feito através de (A.30).

$$I_{p_p} = \frac{2 * P_{out}}{\eta * V_{INmin} * D_{max}} \quad (\text{A.30})$$

Que resulta em:

$$I_{p_p} = \frac{2 * 1.2}{0.8 * 120 * 0.4} = 62.5mA \quad (\text{A.31})$$

Portanto, tem-se que:

$$I_{p_{rms}} = \frac{62.5}{\sqrt{3}} * \sqrt{0.4} = 23mA \quad (\text{A.32})$$

$$I_{s_{rms}} = \frac{62.5 * 18}{\sqrt{3}} * \sqrt{0.6} = 500mA \quad (\text{A.33})$$

Então,

$$S_p = \frac{0.023}{400} = 0,0000575cm^2 \quad (\text{A.34})$$

$$S_s = \frac{0.5}{400} = 0,00125cm^2 \quad (\text{A.35})$$

Assim, os diâmetros dos fios podem ser calculados por (A.36) e (A.37).

$$D_p = \sqrt{\frac{4 * S_p}{\pi}} \quad (\text{A.36})$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4 * S_s}{\pi}} \quad (\text{A.37})$$

De onde tem-se:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 * 0.0000575}{\pi}} = 0,0086cm \quad (\text{A.38})$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4 * 0.00125}{\pi}} = 0,040cm \quad (A.39)$$

Como na frequência de operação o efeito pelicular (*efeito skin*) pode ser considerável, deve-se verificar se os raios dos condutores são menores que a profundidade *skin* δ , dada por (A.40) (BARBI, 2002):

$$\delta = \frac{7.5}{\sqrt{f}} = \frac{7.5}{\sqrt{65 * 10^3}} = 0,03cm \quad (A.40)$$

Como δ é maior que a metade do diâmetro calculado para ambos os fios dos enrolamentos, pode-se utilizar apenas um único condutor. Assim, no enrolamento primário utiliza-se um condutor AWG 39 e, no enrolamento secundário, um condutor AWG 26.

O cálculo da espessura do entreferro l_g é feito por (A.41).

$$l_g = \frac{N_p^2 * \mu_0 * A_e}{L_p} \quad (A.41)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do ar. De (A.41), obtém-se:

$$l_g = \frac{165^2 * 4\pi * 10^{-7} * 14.9 * 10^{-6}}{1.8 * 10^{-3}} = 0.283mm \quad (A.42)$$

Finalmente, verifica-se a viabilidade do projeto. Primeiro, calcula-se a área mínima da janela Aw_{min} por (A.43).

$$Aw_{min} = \frac{N_p * NC_p * S_{AWG39} + N_s * NC_s * S_{AWG26}}{K_w} \quad (A.43)$$

Onde K_w é o fator de ocupação do cobre dentro do carretel. Utiliza-se $K_w = 0,5$, portanto, uma ocupação de 50% da área da janela. Assim,

$$Aw_{min} = \frac{165 * 1 * 0.000063 + 9 * 1 * 0.001287}{0.5} = 0,043956cm^2 = 4.4mm^2 \quad (A.44)$$

Como $Aw_{min} < A_w$, conclui-se que o projeto é viável.

***APÊNDICE B - SIMULAÇÃO EM
MATLAB DA
AMOSTRAGEM DE
TENSÃO E CORRENTE
E DO CÁLCULO DE
POTÊNCIA E
CONSUMO DO
CONJUNTO
REATOR-LÂMPADA***

Contents

- [início - dados de simulação](#)
- [graficos](#)
- [cálculo da potência e do consumo reais](#)
- [amostragem de v e i](#)
- [gráfico do sinal real x sinal amostrado](#)
- [cálculo da potência média e do consumo total](#)
- [valores calculados](#)

```
clc;  
clear all;  
close all;
```

início - dados de simulação

```
% freqüência da tensão da rede  
f = 60;  
w = 2*pi*f;  
% número de ciclos da rede  
nc = 60; %25722 --> 0.01 KWh  
% número de pontos por ciclo  
np = 100;  
%determinação do tempo de simulação  
T = 1/f;  
tmin = 0;  
tmax = nc*T;  
dt = T/np;  
t = tmin:dt:tmax;  
  
% tensão de pico da rede  
vamp = 311;  
% corrente de pico para uma HPS de 70W (reator com perdas de 14W)  
iamp = 0.587;  
%fator de potência  
fp = 0.92;  
teta = acos(fp);  
  
% sinais de tensão e corrente sobre o conjunto reator-lâmpada  
v = vamp * sin(w*t);  
i = iamp * sin(w*t + teta);
```

graficos

```
% figure;  
% plot(t,v,'r');  
% hold on;  
% plot(t,i,'b');  
% ylabel('Tensão (vermelho) e Corrente (azul)');  
% xlabel('Tempo');
```

cálculo da potência e do consumo reais

```
p = v*i'/length(v);  
c = p * tmax;  
  
disp('Potência média real (W):');  
disp(p);  
  
disp('Consumo real (KWh):');  
disp(c/3600000);
```

```
% atraso para o início da amostragem
atraso = 0e-3;
% tempo entre amostras - DelayTask
dtask = 8e-3;
dts = dtask;
%frequência de amostragem
fs = 1/dts;
%tempo total do sinal amostrado
ts = atraso:dts:tmax+atraso;
```

Potência média real (W):
83.9622

Consumo real (KWh):
2.3323e-005

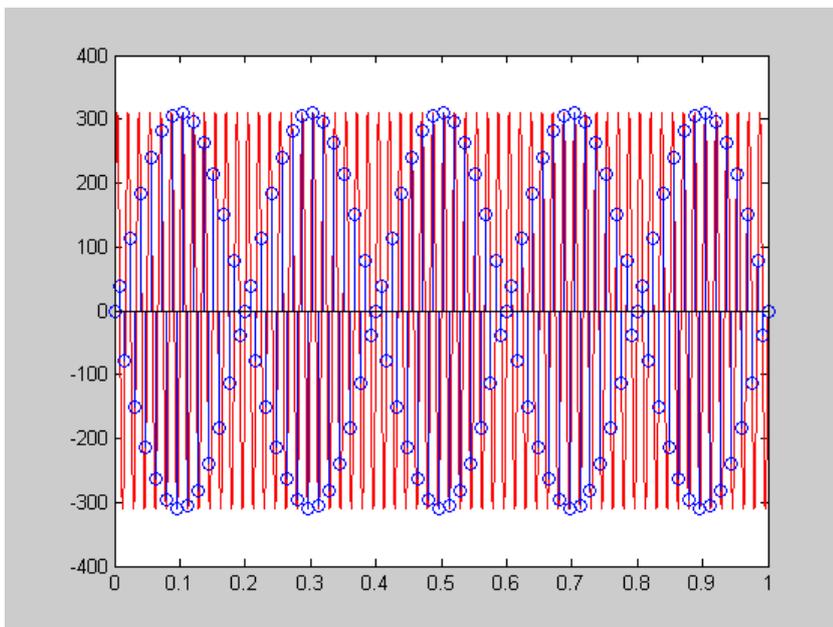
amostragem de v e i

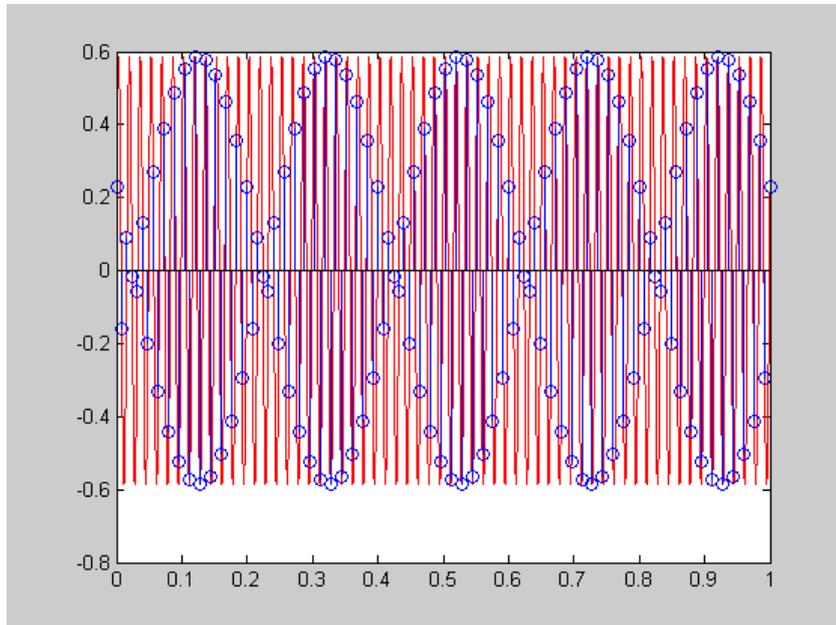
```
vs = vamp * sin(w*ts);
is = iamp * sin(w*ts + teta);
```

gráfico do sinal real x sinal amostrado

```
%tensão
figure;
plot(t,v,'r');
hold on;
stem(ts,vs);

%corrente
figure;
plot(t,i,'r');
hold on;
stem(ts,is);
```





cálculo da potência média e do consumo total

```
ps = vs*is'/length(vs);  
cs = vs*is'/fs;
```

valores calculados

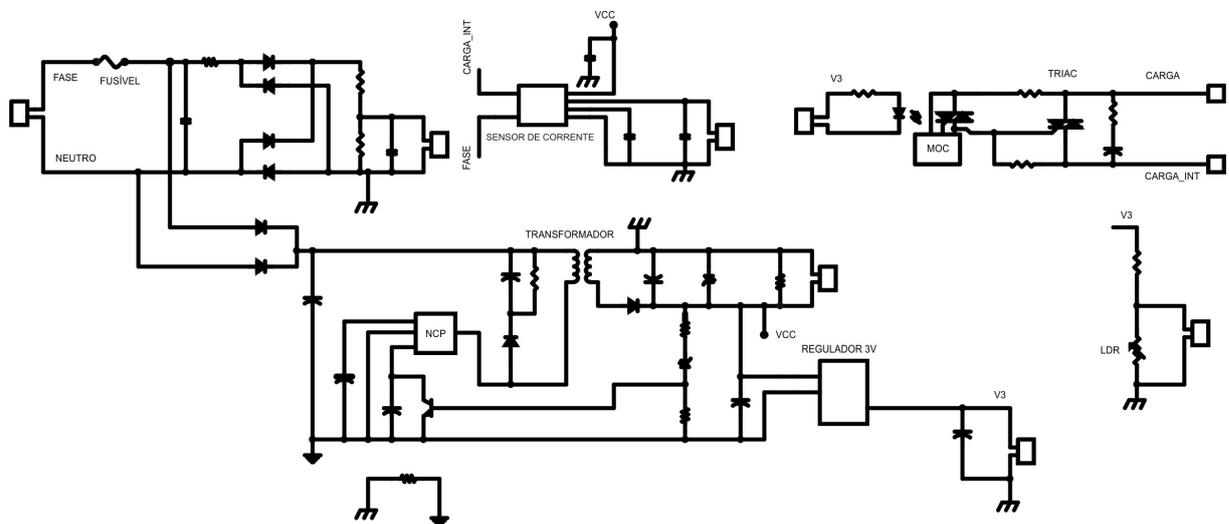
```
disp('Potência média medida (W):');  
disp(ps);  
  
disp('Consumo medido (KWh):');  
disp(cs/3600000);  
  
disp('Erro do consumo medido (KWh):');  
disp(abs(cs-c));
```

```
Potência média medida (W):  
83.3097
```

```
Consumo medido (KWh):  
2.3327e-005
```

```
Erro do consumo medido (KWh):  
0.0140
```

APÊNDICE C - CIRCUITO DESENVOLVIDO



O circuito do microcontrolador e do módulo RF não são mostrados.

ANEXO A – DATASHEET NCP1015

NCP1015

Self-Supplied Monolithic Switcher for Low Standby-Power Offline SMPS

The NCP1015 integrates a fixed-frequency current-mode controller and a 700 V voltage MOSFET. Housed in a PDIP-7 or SOT-223 package, the NCP1015 offers everything needed to build a rugged and low-cost power supply, including soft-start, frequency jittering, short-circuit protection, skip-cycle, a maximum peak current set-point and a Dynamic Self-Supply (no need for an auxiliary winding).

Unlike other monolithic solutions, the NCP1015 is quiet by nature: during nominal load operation, the part switches at one of the available frequencies (65-100 kHz). When the current set-point falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the so-called skip cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at typically 0.25 of the maximum peak value, no acoustic noise takes place. As a result, standby power is reduced to the minimum without acoustic noise generation.

Short-circuit detection takes place when the feedback signal fades away e.g. un-true short-circuit or is broken optocoupler cases. Finally soft-start and frequency jittering further ease the designer task to quickly develop low-cost and robust offline power supplies.

For improved standby performance, the connection of an auxiliary winding stops the DSS operation and helps to consume less than 100 mW at high line.

Features

- Built-in 700 V MOSFET with typical $R_{DS(on)}$ of 11 Ω
- Large Creepage Distance between High-voltage Pins
- Current-mode Fixed Frequency Operation: 65 kHz - 100 kHz
- Skip-cycle Operation at Low Peak Currents Only: No Acoustic Noise!
- Dynamic Self-Supply, No Need for an Auxiliary Winding
- Internal 1 ms Soft-start
- Auto-recovery Internal Output Short-circuit Protection
- Frequency Jittering for Better EMI Signature
- Below 100 mW Standby Power if Auxiliary Winding is Used
- Internal Temperature Shutdown
- Direct Optocoupler Connection
- SPICE Models Available for TRANSient and AC Analysis
- This is a Pb-Free Device

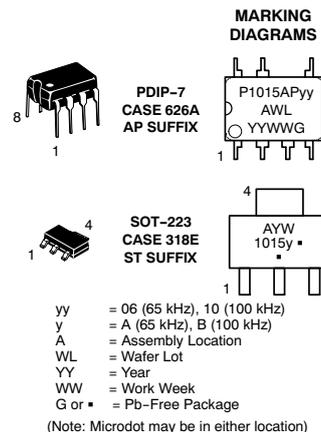
Typical Applications

- Low Power ac-dc Adapters for Chargers
- Auxiliary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)

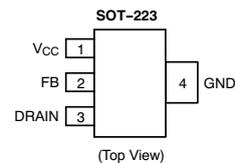
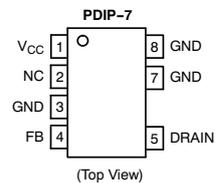


ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 20 of this data sheet.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)