

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Milena Faria Pinto

**SISTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAÇÃO, GERENCIAMENTO E
CONTROLE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E ANÁLISE DE PARÂMETROS DA
REDE ELÉTRICA**

Juiz de Fora
2015

Milena Faria Pinto

**SISTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAÇÃO, GERENCIAMENTO E
CONTROLE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E ANÁLISE DE PARÂMETROS DA
REDE ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Sistemas Eletrônicos (Eletrônica de Potência), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.

Juiz de Fora

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pinto, Milena Faria.

Sistema inteligente para monitoração, gerenciamento e controle de iluminação pública e análise de parâmetros da rede elétrica / Milena Faria Pinto. -- 2015.

116 f.

Orientador: Henrique Antônio Carvalho Braga

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

1. Comunicação entre luminárias. 2. Diodos emissores de luz. 3. Controle digital. 4. Iluminação inteligente. 5. Qualidade de energia. I. Braga, Henrique Antônio Carvalho, orient. II. Título.

Milena Faria Pinto

**SISTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAÇÃO, GERENCIAMENTO E
CONTROLE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E ANÁLISE DE PARÂMETROS DA
REDE ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Sistemas Eletrônicos (Eletrônica de Potência), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de junho de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.
Universidade Federal de Juiz de Fora
Orientador

Prof. Carlos Augusto Duque, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Fabrício Pablo Virgínio Campos, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Lenin Martins Ferreira Moraes, D. Sc.
Universidade Federal de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao apoio dos meus pais, que por todos esses anos foram os meus grandes incentivadores. Agradeço também aos meus irmãos, que mesmo morando longe, sempre demonstraram o significado do companheirismo, afeto e amizade.

Gostaria de agradecer também a todos os professores do curso de pós-graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, pois me fizeram compreender não apenas a função de um pesquisador, mas também compreender o verdadeiro significado de fazer ciência.

O meu agradecimento especial ao meu orientador Henrique Braga pela oportunidade da realização deste trabalho, por acreditar na minha pesquisa e pela sabedoria na tomada de decisões.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho do Núcleo de Iluminação Moderna pela ajuda na realização deste trabalho. Finalmente, aos meus queridos e inesquecíveis amigos do PPEE, Thiago, João, Bruno, Pablo, Rodolfo, Karina, Henrique, Carlinhos, Pedro Machado, Igor e Gabriel pelos ótimos momentos de distração e conversa.

“Be less curious about people and more curious about ideas”

Marie Skłodowska-Curie

RESUMO

O presente trabalho propõe um sistema eletrônico que permite gerenciar, monitorar parâmetros e controlar de forma descentralizada um conjunto de luminárias à LED pertencentes a um sistema de iluminação pública. Estes parâmetros incluem nível de iluminação, consumo de energia, detecção da presença de pedestres, problemas na própria luminária e monitoração de variáveis ambientais como temperatura e umidade. Adicionalmente, o mesmo sistema é capaz também de detectar falhas na rede elétrica, permitindo monitorar e gerenciar os parâmetros de qualidade de rede de uma forma global. Basicamente, o sistema pode ser dividido em três partes. A primeira parte consiste de um módulo inteligente, chamado neste trabalho por SM, que é conectado a uma determinada luminária e à rede elétrica, sendo assim responsável por medir tanto os parâmetros provindos da luminária quanto da rede elétrica. Na segunda parte encontra-se o módulo controlador (CM) que possui a finalidade de coordenar as informações oriundas dos módulos inteligentes instalados nas luminárias, armazenando e posteriormente enviando os dados para um sistema supervísório. Além disso, o mesmo possui sensores de temperatura e umidade para prover informações sobre as condições climáticas, objetivando confiabilidade nos dados medidos pelos sensores dos módulos inteligentes. O sistema supervísório (SS) consiste da etapa final deste sistema proposto, o qual é responsável por salvar os dados obtidos em um certo período de tempo, analisar e monitorar possíveis falhas e enviar comandos para cada CM e/ou um respectivo SM. Com a finalidade de avaliar experimentalmente o sistema proposto neste trabalho, foram realizados experimentos para demonstrar tanto as funcionalidades do módulo bem como da avaliação dos algoritmos de processamento de sinais propostos, e obtendo ao final projeções econômicas para o protótipo. Os resultados obtidos mostraram eficiência, flexibilidade e interoperabilidade do sistema proposto.

Palavras-chave: Comunicação entre luminárias. Controle digital. Diodos emissores de luz. Iluminação inteligente. Qualidade de energia.

ABSTRACT

The present paper proposes a system to manage, control and monitor a group of LED luminaires of a street lighting system, being able to control the light intensity of the luminaire and monitoring the power consumption, detection of pedestrians, fault conditions, environmental parameters such as temperature and humidity. Additionally, the system contains a voltage sensor coupled to the grid in order to monitor and manage the power quality parameters. Basically, the system can be divided in three essential parts. The first one regards the smart module, called in this work as SM, which has the responsibility to sensing the parameters stemming from power grid as well as luminaire. The second part is the control module (CM), which has the aim to coordinate the data received from each smart module, storing and subsequently sending the data to the supervisory system. Besides, the control module also has temperature and humidity sensors in order to check and register environmental conditions, providing, in this way, reliability of the measured data. The supervisory system (SS) consists of the final part of the proposed system and it is responsible to save the data in a local memory, to analyze and to monitor problems or even possible faults and sending commands to each CM and/or a respective SM. With the aim to evaluate the proposed system, it was performed experiments to demonstrate the system operation as well as the quality analysis capability. Due to the energy savings potential provided by the technology, it was also studied the economic feasibility of the prototype, aiming a future commercial product. The results have shown that the proposed system is scalable, flexible and efficient.

Keywords: Communication between luminaires. Digital control. Light-emitting Diodes. Smart lighting. Power Quality.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Pontos de instalação de iluminação pública no Brasil (PROCEL, 2014).....	18
Figura 2 - Comparação da eficácia luminosa de tecnologias empregadas em iluminação – adaptado de CRAFTORD (CRAFTORD, 2007).....	20
Figura 3 - Projeção do custo relativo de fabricação de uma luminária à LED. (DOE, 2012)..	22
Figura 4 - Níveis de integração em sistemas de iluminação inteligentes. (CASTRO, 2013)...	23
Figura 5 - Conexão física possível para o protocolo DALI (ATMEL, 2014).	34
Figura 6 - Comparativo entre os meios de transmissão.....	36
Figura 7 - Transmissão DALI.....	37
Figura 8 - Codificação Manchester de um bit.	37
Figura 9 - Formato lógico do <i>frame</i> de dados DALI.....	38
Figura 10 – Exemplo de uma estrutura de rede de controle mista.	40
Figura 11 - Arranjo físico de uma vizinhança utilizando o equipamento proposto.	42
Figura 12 - Conceito do equipamento proposto instalado em uma determinada rua.	42
Figura 13 - Esquemático simplificado do módulo inteligente (SM).	43
Figura 14 - Exemplo de luminária pública à LED.	44
Figura 15 - Exemplo de inserção do módulo inteligente na luminária à LED.	44
Figura 16 - Esquemático elétrico do SM.	45
Figura 17 - Esquemático elétrico do sistema de bateria.	47
Figura 18 - Esquemático simplificado do algoritmo do dispositivo SM.....	48
Figura 19 - Ilustração do comportamento destes eventos. (a) Representação de um <i>sag</i> no sinal. (b) Representação de um <i>swell</i> no sinal.	52
Figura 20 - Sinal distorcido pela 3ª (30%) e 7ª (20%) harmônica.....	53
Figura 21 - Esquemático do sensor de tensão.....	53
Figura 22 - Diagrama de distribuição das luminárias às fases da rede elétrica em vários setores.	54
Figura 23 - Esquemático do sensor de tensão.....	55
Figura 24 - Fluxograma de cálculo das funções de qualidade de energia.	56
Figura 25 - Forma de cálculo do valor de tensão RMS de meio ciclo.	58
Figura 26 - Resposta em magnitude do filtro DFT recursivo.....	59
Figura 27 - Estrutura de filtragem baseada na SWRDFT.....	60
Figura 28 - Filtragem do sinal de entrada desconsiderando o regime transitório.	60
Figura 29 - Curva de corrente vs. tensão de um LED.	62
Figura 30 - Diagrama do conversor utilizado neste trabalho. (MeanWell, 2014).	62
Figura 31 - Disposição física do arranjo de LEDs.....	63
Figura 32 - Distribuição espectral do arranjo de LEDs.	63
Figura 33 - Estratégia de dimerização utilizada neste trabalho.	64
Figura 34 - Curva de resposta do LDR.....	66
Figura 35 - Corrente versus irradiação da micro célula solar BPW34 (VISHAY SEMICONDUCTORS, 2015).	66
Figura 36 - Sensibilidade espectral da micro célula solar BPW34 (VISHAY SEMICONDUCTORS, 2015).	67
Figura 37 – Esquemático simplificado do módulo gerenciador (CM).	69
Figura 38 - Esquemático elétrico do dispositivo CM.	71
Figura 39 – Fluxograma do algoritmo simplificado do CM.....	72
Figura 40 - Interação entre os módulos.	73
Figura 41 – Diagrama de sequência da troca de mensagens entre os módulos.	75
Figura 42 - Tela Principal.....	76

Figura 43 - Tela para monitoração e análise dos parâmetros de qualidade de energia.	76
Figura 44 - Tela para controle e dimerização remota das luminárias.....	77
Figura 45 - Tela para geração de relatório.....	77
Figura 46 - Tela para configuração do CM.	78
Figura 47 - Algoritmo de DFT implementado.....	80
Figura 48 - Tela para configuração dos recursos de dimerização automática.....	82
Figura 49 - Tela de envio de comandos pela interface WEB.	84
Figura 50 - Sistema de bateria	87
Figura 51 - Sensor de tensão.....	87
Figura 52 - Módulo de controle inteligente.....	88
Figura 53 - Módulo de gerenciamento descentralizado.	89
Figura 54 – Potência radiante emitida pela lâmpada utilizada neste trabalho para valores diferentes de potência.	90
Figura 55 – Fluxo luminoso x potência para a luminária utilizada neste trabalho.	90
Figura 56 - Consumo versus variação do nível de fluxo luminoso.	91
Figura 57 - Eficiência versus variação do nível de dimerização.	92
Figura 58 - Informações sobre o tempo que o supervisor está ligado e o horário do último comando recebido.....	92
Figura 59 - Dados provenientes do sensor de temperatura e humidade.	92
Figura 60 - Níveis de corrente da luminária em diversas condições de dimerização.....	93
Figura 61 - Acionamento automático da luminária a partir da célula solar. (a) Iluminância maior que 40 lux. (b) Iluminância menor que 40 lux.	94
Figura 62 – Detecção do evento SAG. (a) Tela do supervisor. (b) Medição efetuada na entrada do sensor.	95
Figura 63 - Detecção do evento Swell. (a) Tela do supervisor. (b) Medição efetuada na entrada do sensor.	96
Figura 64 - Resultado da análise de conteúdo espectral medindo uma tensão de rede gerada sem ruídos.....	97
Figura 65. Resultado da análise de conteúdo espectral medindo a tensão provinda da rede elétrica.....	97
Figura 66. Relatório gerado contendo análise de qualidade de energia e características de elétricas da luminária.	98
Figura 67 - Payback e TIR para o quarto cenário considerando a variação do tráfego de pedestres.	103
Figura 68 - TIR considerando a variação do custo do projeto.....	104
Figura 69 - Payback considerando a variação do custo do projeto.	104
Figura 70 - Variação da TIR considerando o melhoramento da eficiência do LED.	105
Figura 71 - Variação do Payback considerando o melhoramento da eficiência do LED.	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de lâmpadas usadas na iluminação pública no Brasil (RODRIGUES, 2010).	18
Tabela 2 - Características correspondentes as lâmpadas vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapor metálico e LED de potência. (CEMIG, 2012) (OSRAM, 2010)	19
Tabela 3 - Características de IRC e TCC das lâmpadas vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapor metálico e LED de potência. (CEMIG, 2012; OSRAM, 2010).....	20
Tabela 4 - Comparação da eficiência das lâmpadas de vapor de sódio e LEDs. (LI <i>et al</i> , 2009)	21
Tabela 5 – Características dos principais produtos do mercado.....	24
Tabela 6 - Especificações do módulo XBee PRO S1 (DIGI INTERNATIONAL INC, 2014).	29
Tabela 7 - Características do WiFi.	30
Tabela 8 - Características do Bluetooth.....	31
Tabela 9 - Características do UWB.	32
Tabela 10 - Especificações da <i>International Telecommunication Union</i> para aplicações em Smart Grid utilizando PLC para diferentes faixas de frequência. (ITU TELECOM, 2014).	33
Tabela 11 - Atributos relevantes do microcontrolador TM4C123G.	45
Tabela 12 - Tabela de controle automático.	50
Tabela 13 - Principais parâmetros do conversor utilizado neste trabalho.	62
Tabela 14 - Características do dispositivo ACS712.	68
Tabela 15 - Atributos relevantes do microcontrolador TM4C1294.	69
Tabela 16 - Tabela de comando.....	74
Tabela 17 - Casos de estudo para análise econômica.	100
Tabela 18 - Comparação entre os parâmetros da lâmpada.	100
Tabela 19 - Custo unitário dos elementos pertencentes ao protótipo.	102
Tabela 20 - Indicadores econômicos dos principais cenários.....	102

ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT.	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP.	Ponto de acesso (sigla do inglês, Access point)
ANEEL.	Agência Nacional de Energia Elétrica
BMS.	Sistema de gestão de prédios (sigla do inglês, Building Management System)
CA.	Corrente Alternada
CAN.	(Sigla do inglês, Controller Area Network)
CC.	Corrente Contínua
CEMIG.	Companhia de Energética de Minas Gerais.
CM.	Módulo de gerenciamento descentralizado (sigla do inglês, Control Module).
DALI.	Interface de iluminação endereçável digital (sigla do inglês, Digital Addressable Lighting Interface)
DOE.	Departamento de Energia Americano (Department of Energy – U.S.A.)
DFT.	Transformada discreta de Fourier (sigla do inglês, Discrete Fourier Transform)
GPS.	Sistema Global de Posicionamento (sigla do inglês, Global Positioning System)
HID.	Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão (sigla do inglês, High-intensity discharge)
IEC.	Comissão eletrotécnica internacional (sigla do inglês, International Electrotechnical Commission)
IP.	Iluminação pública
IRC.	Índice de reprodução de cores
LDR.	Resistor dependente de luz (sigla do inglês, Lighting Dependent Resistor)
LED.	Diodo emissor de luz (sigla do inglês, Lighting-Emitting Diode)
MH.	Iodetos metálicos (sigla do inglês, Metal Halide)
PIR.	Sensor Infravermelho Passivo (sigla do inglês, Passive Infrared Sensor).
PROCEL.	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.
PLC	Comunicação via rede elétrica (sigla do inglês, Power Line Communication)
PPS	Pulso por segundo (sigla do inglês, Pulse per Second)
PWM.	Modulação por largura de pulso (sigla do inglês, Pulse Width Modulation)
RF.	Rádio Frequência
FFD.	Função completa (sigla do inglês, Full Function Device)
RFD.	Função reduzida (sigla do inglês, Reduced Function Device)
RMS.	Valor médio quadrático (sigla do inglês, Root Mean Square)
SM.	Módulo de controle inteligente (sigla do inglês, Smart Module)

SNR.	Relação sinal-ruído (sigla do inglês, Signal-to-Noise Ratio)
SPI.	Interface Periférica Serial (sigla do inglês, Serial Peripheral Interface)
SS.	Sistema supervisorio (sigla do inglês, Supervisory System)
SWRDFT.	Transformada Discreta de Fourier Recursiva com Janela Deslizante (Slide Window Recursive Discrete Fourier Transform)
TCC.	Temperatura correlata de cor
TCP.	Protocolo de controle de transmissão (sigla do inglês, Transmission Control Protocol)
TIR.	Taxa Interna de Retorno.
THD.	Distorção harmônica total (sigla do inglês, Total Harmonic Distortion)
UART.	Receptor-Transmissor Assíncrono Universal (sigla do inglês, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
UWB.	Banda ultralarga (sigla do inglês, Ultra-Wideband)
VSAP.	Vapor de sódio em alta pressão
VMT.	Vapor Metálico
VM.	Vapor de Mercúrio
VS.	Vapor de Sódio
WAN.	Rede de área alargada (sigla do inglês, Wide Area Network)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTE.....	17
2.1	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA ATUAL NO BRASIL	17
2.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE FONTES LUMINOSAS UTILIZADAS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA	18
2.3	ATRATIVIDADE ECONÔMICA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA UTILIZANDO LEDS DE POTÊNCIA	21
2.4	SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTES	22
2.5	CONCLUSÃO PARCIAL.....	24
3	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO UTILIZADOS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTE	26
3.1	MEIOS DE COMUNICAÇÃO	26
3.1.1	SEM FIO	28
3.1.1.1	IEEE 802.15.4	28
3.1.1.2	IEEE 802.11	29
3.1.1.3	IEEE 802.15.1	30
3.1.1.4	IEEE 802.15.3	31
3.1.2	COM FIO.....	32
3.1.2.1	PLC.....	32
3.1.2.2	DALI.....	34
3.1.2.3	FIBRA ÓTICA	34
3.2	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO ENTRE AS LUMINÁRIAS	36
3.2.1	DALI (Lógico).....	37
3.2.2	ETHERNET	38
2.2.3	PROPRIETÁRIO	39
3.3	CONCLUSÃO PARCIAL.....	40
4	SISTEMA DE CONTROLE INTELIGENTE	41
4.1	MÓDULO DE CONTROLE INTELIGENTE	42
4.2	MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS DE REDE	50
4.3	ACIONAMENTO DO LED	61
4.4	SENSORES PARA CONTROLE AUTOMÁTICO DA LUMINOSIDADE, CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E MEDIÇÃO DE CORRENTE	65
4.5	MÓDULO DE GERENCIAMENTO	68
4.6	COMUNICAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS E O SISTEMA SUPERVISÓRIO	72
4.7	SOFTWARE DO SISTEMA DE SUPERVISÓRIO	75
4.8	INTERFACE WEB	83

4.9 CONCLUSÃO PARCIAL.....	84
5 RESULTADOS	86
5.1 PROTÓTIPOS	86
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	89
5.2.1 – LUMINÁRIA E O SISTEMA DESENVOLVIDO.....	89
5.2.2 – SUPERVISÓRIO	92
5.3 ANÁLISE ECONÔMICA.....	98
5.4 CONCLUSÃO PARCIAL.....	106
6 CONCLUSÃO.....	107
PRODUÇÃO CIENTÍFICA DO AUTOR	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1 INTRODUÇÃO

A importância da pesquisa sobre sistemas de iluminação surgiu primeiramente do fato de que estes são um dos principais meios existentes para se manter a segurança tanto dentro das casas quanto nos logradouros públicos. Além disso, influenciam diretamente no bem-estar das pessoas, pois torna possível com estes a realização de atividades de lazer e profissionais, como também possibilitam agregar características positivas na aparência das cidades (CASTRO *et al*, 2013).

De acordo com LECCESSE (2013), a maioria dos sistemas de iluminação pública são projetados utilizando técnicas e equipamentos obsoletos. Contudo, com o advento de novas tecnologias, tornou-se possível a utilização de certos dispositivos que permitem controle, gerenciamento e medição com a finalidade de prover confiabilidade, redução de custos e alta eficiência em sistemas de iluminação. Observa-se que várias melhorias foram decorrentes em função de um crescimento no número de pesquisas relacionadas à inserção de novas tecnologias às luminárias e aos circuitos de acionamento das mesmas.

Dentro deste contexto, os sistemas inteligentes de iluminação pública podem gerar outros benefícios tais como dimerização adaptativa, ou seja, variação da intensidade da luz da luminária de acordo com o tempo, condições climáticas ou simplesmente pela detecção de pedestres durante um certo período de operação. Neste contexto, é necessário que o sistema de iluminação seja composto por luminárias flexíveis e de alta eficiência, além de possuírem capacidade de gerenciamento. Sendo assim, a tecnologia LED é apresentada como a melhor alternativa para os sistemas de iluminação pública devido a sua capacidade de prover baixo consumo de energia, baixo impacto com o meio ambiente e longo tempo de vida (LECCESSE E LEONOWICZ, 2013).

Como visto em DENARDIN *et al* (2009), a maioria dos sistemas de iluminação pública não conta com a possibilidade de se comunicar com outros dispositivos. Assim, informações pertinentes, tais como consumo de energia, status da luminária (dimerização e problema nas lâmpadas) e outros relatórios não podem ser facilmente obtidos, reduzindo a capacidade do operador do sistema em prover manutenção rápida e apropriada e realizar o planejamento financeiro. Quando dispositivos de iluminação são conectados com dispositivos inteligentes, torna-se possível a adição de características de comunicação, permitindo então a transmissão de dados online a fim de prover informações acerca de tolerâncias, falhas na rede, consumo de energia, além de enviar comandos para realização de dimerização remota (SMARTGRID, 2014).

Conforme visto em KASAHARA (2011), os sistemas de iluminação inteligentes são um conjunto de dispositivos, que incluem sensores, controladores, luminárias, receptores e dispositivos de medição de energia conectados ao longo da linha de distribuição e possuem capacidades tecnológicas além daquelas observadas em lâmpadas tradicionais. Muitos dispositivos e métodos foram propostos com o objetivo de solucionar os problemas inerentes aos sistemas de iluminação. Além disso, essas tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de melhorar a utilização dos recursos disponíveis, como a dimerização, consumo e informações de estado de funcionamento (BRITO, 2012; TAN, 2013; ZHANG, 2010).

Devido ao rápido desenvolvimento de dispositivos que podem ser aplicados aos sistemas de iluminação, muitos trabalhos têm sido publicados no que diz respeito a novas tecnologias e equipamentos para melhorar o desempenho destes sistemas de iluminação. Por exemplo em LONG (2009) é apresentado um sistema de controle avançado para reduzir o consumo de energia da iluminação pública e ao mesmo tempo aumentar a eficiência elétrica e a qualidade de iluminação. Já em relação à comunicação entre as luminárias, em ANDREI *et al* (2009) é abordado o desenvolvimento de um sistema eletrônico utilizando módulo ZigBee com protocolo DALI para enviar e receber comandos.

Como pode ser observado, muitos trabalhos propuseram equipamentos e algoritmos para aplicações em iluminação. Todavia, apesar de serem trabalhos com temas distintos, todos possuem o mesmo objetivo, melhorar o desempenho da infraestrutura de iluminação. Dessa forma, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema inteligente composto por dois módulos que operam em conjunto para controle, gerenciamento e monitoramento das luminárias bem como extração de dados importantes da rede elétrica para análise de qualidade de energia. O primeiro módulo, chamado de CM (*Control Module*), é destinado ao controle, monitoramento e gerenciamento descentralizado dos parâmetros provenientes tanto da rede elétrica quanto de um conjunto de luminárias conectadas a ele. Os parâmetros de cada luminária e da rede elétrica são medidos através de um outro dispositivo inteligente que é conectado à luminária e foi denominado no presente trabalho por SM (*Smart Module*). Este possui sensores de tensão, detecção de presença, corrente e intensidade luminosa.

Este trabalho foi dividido em 8 capítulos, onde no Capítulo 2 são realizadas análises de funcionamento e comparação das tecnologias encontradas nos sistemas de iluminação pública convencionais com os sistemas de iluminação pública (IP) inteligentes. É abordado ainda uma análise da viabilidade econômica dos sistemas de IP inteligentes, mostrando as tecnologias atuais disponíveis no mercado e na indústria. Além disso, é apresentado o aumento da

potencialidade dos recursos promovidos pela inserção de tecnologias de automação nas luminárias à LED.

É feito um estudo detalhado no Capítulo 3 sobre os protocolos de comunicação de um modo geral. São ressaltados os protocolos utilizados neste trabalho tanto para o envio de dados das luminárias para a central de comando quanto para a comunicação de uma luminária com o seu respectivo módulo de gerenciamento (CM). Este estudo é realizado com o intuito de definir a melhor metodologia para o envio e recebimento de sinais de comandos em sistemas inteligentes de iluminação.

O Capítulo 4 mostra os aspectos de funcionamento, construção e desenvolvimento do módulo de controle inteligente (SM) projetado neste trabalho. Pretende-se apresentar de forma simplificada a funcionalidade de cada tecnologia pertencente ao mesmo bem como os parâmetros utilizados na seleção de cada tecnologia. Além disso também é realizado um estudo sobre parâmetros de qualidade de energia e o desenvolvimento do sistema para detecção dos eventos eletromagnéticos da rede elétrica. O desenvolvimento do módulo de gerenciamento descentralizado (CM) também é abordado e são mostradas as características de construção do mesmo e suas funcionalidades. É apresentada, detalhadamente, cada interface de comunicação para troca de dados tanto com o sistema de gerenciamento quanto com as luminárias e os sensores utilizados para prover as informações sobre as condições climáticas. Ao final do capítulo é apresentado o sistema de gerenciamento, abordando o desenvolvimento da arquitetura para gerenciamento, a rota das informações recebidas e enviadas por este e o desenvolvimento da plataforma de interação entre o usuário e os módulos de gerenciamento e controle.

No Capítulo 5 são apresentados o *hardware* dos protótipos desenvolvidos. Adicionalmente, são exibidos os resultados experimentais correspondentes aos sistemas de controle, de comunicação e monitoramento da qualidade de energia.

Finalmente no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho bem como as propostas para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTE

Neste Capítulo é efetuada uma revisão detalhada acerca dos sistemas de iluminação pública no Brasil, provendo informações atuais sobre a distribuição dos pontos de iluminação, os principais tipos de lâmpadas utilizadas, as tecnologias usadas nos sistemas convencionais e uma avaliação técnico-econômica. Adicionalmente, é realizada uma revisão sobre os sistemas inteligentes de iluminação pública, onde são abordadas as principais funcionalidades que podem ser agregadas e suas características construtivas.

Neste capítulo ainda são mostradas as tecnologias de iluminação pública inteligente desenvolvidas pelas principais empresas no setor de iluminação e que são encontradas atualmente no mercado.

2.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA ATUAL NO BRASIL

O sistema de iluminação pública é um serviço fundamental no cotidiano das pessoas, seja em área rural ou urbana, onde através da sua utilização é possível realizar tarefas essenciais tais como segurança pessoal e rodoviária (CASA, 1999). Como exemplo desta afirmação, de acordo com AMERICAN (2000), a taxa de acidentes que acarretam em mortes no período noturno em vias não iluminadas é aproximadamente três vezes maior que a correspondente ao período diurno. Em relação à qualidade das cidades, se a iluminação pública for adequada, representará um fator positivo às atividades de turismo e comércio, acarretando em desenvolvimento social e econômico da população.

De acordo com o PROCEL (2011), o sistema de iluminação pública no Brasil corresponde à aproximadamente 3% do consumo de energia elétrica total, ou seja, apresenta um consumo de aproximadamente 9,7 bilhões de kWh/ano. Outra informação relevante encontra-se na Figura 1, onde é possível observar a distribuição dos pontos de instalação de iluminação pública no Brasil. Existem aproximadamente 15 milhões de pontos instalados e percebe-se que a maioria se encontra na região Sudeste. Devido ao grande consumo de energia elétrica dos sistemas de iluminação, vários programas governamentais foram lançados com a finalidade de pesquisar o emprego de tecnologias eficientes de iluminação, como por exemplo, pode-se citar o programa PROCEL Reluz (PROCELRELUZ, 2014), o qual é conduzido pela Eletrobrás e objetiva a instalação de fontes de luz eficientes de forma a reduzir o consumo de energia dos sistemas de iluminação pública.

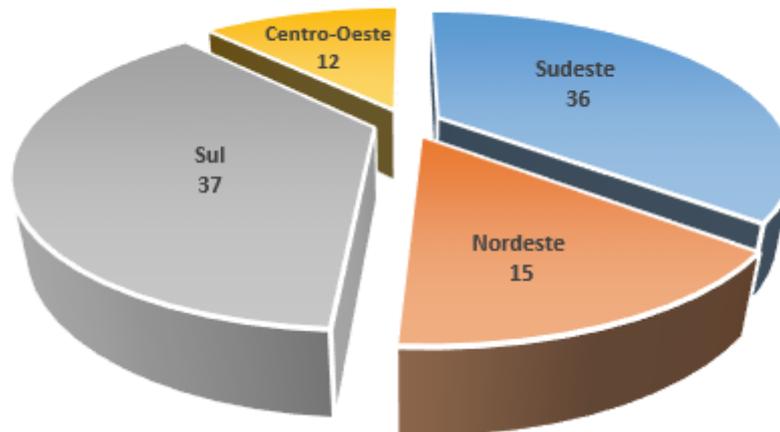


Figura 1 - Pontos de instalação de iluminação pública no Brasil (PROCEL, 2014).

Na Tabela 1 é mostrado o percentual de tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública no Brasil. Percebe-se que houve um significativo incremento no emprego de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão (VSAP) devido ao fato destas apresentarem uma alta eficácia luminosa. Contudo, outro tipo de lâmpada ainda bastante utilizada é a lâmpada de mercúrio, que pode ser considerada obsoleta e tende a ter sua participação mais reduzida a médio prazo.

Tabela 1 - Tipos de lâmpadas usadas na iluminação pública no Brasil (RODRIGUES, 2010).

Tipo de Lâmpada	Percentual [%]	
	1995	2008
Vapor de sódio	7,30	62,93
Vapor de Mercúrio	80,70	31,84
Mista	7,00	2,22
Incandescente	3,80	1,42
Fluorescente	1,20	0,81
Multi-Vapores Metálico	-	0,73
Outras	0,00	0,03
Total de Unidades Instaladas:	8.782.000 unidades	14.769.309 unidades

2.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE FONTES LUMINOSAS UTILIZADAS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

No contexto da iluminação pública, o tempo de vida útil é fator imprescindível, pois é diretamente relacionado aos gastos de manutenção e substituição dos componentes utilizados. Na Tabela 2 é possível comparar as características técnicas correspondentes a cada uma das três principais lâmpadas utilizadas na iluminação pública no Brasil em relação ao LED de potência.

Para escolher um determinado tipo de lâmpada a ser utilizada em uma aplicação, deve-se considerar alguns critérios, tais como a eficácia luminosa, índice de reprodutibilidade de cores (IRC) e a temperatura de cor correlata (TCC). Na Tabela 3 é apresentado um resumo acerca destes critérios das lâmpadas de vapor metálico, vapor de mercúrio, vapor de sódio e do LED de potência. Percebe-se que apesar de elevada vida útil, as lâmpadas de vapor de sódio possuem baixo índice de reprodutibilidade de cor. Já o LED de potência, apresenta-se com alto índice de reprodução de cor e flexibilidade na temperatura de cor.

Tabela 2 - Características correspondentes as lâmpadas vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapor metálico e LED de potência. (CEMIG, 2012) (OSRAM, 2010)

Vapor de Sódio		
Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Vida média (horas)
70	6.600	28.000
100	10.700	32.000
150	17.500	
250	33.200	
400	55.000	
Vapor de Mercúrio		
Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Vida média (horas)
80	3.800	10.000
125	6.300	12.000
250	13.000	15.000
400	22.000	
Vapor Metálico		
Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Vida média (horas)
70	6.300	12.000
150	15.000	
400	32.000	
LEDs de potência		
Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Vida média (horas)
14	660	50.000
19	1000	
30	1600	
120	14100	

Tabela 3 - Características de IRC e TCC das lâmpadas vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapor metálico e LED de potência. (CEMIG, 2012; OSRAM, 2010)

Fonte Luminosa	IRC [%]	TCC (K)
Vapor metálico	80 - 89	3.000 (Cerâmica) - 5.000 (Quartzo)
LED de potência	75 - 90	2700 - 6500
Vapor de mercúrio	40 - 59	4.500
Vapor de sódio	20 - 39	2.100

Para avaliação da Figura 2 é possível notar que nos últimos anos as tecnologias empregadas em sistemas de iluminação passaram por avanços profundos, principalmente no que se relaciona aos progressos do emprego da eletrônica tanto no processo de acionamento quanto no tempo de vida útil. Nos últimos anos é fácil perceber que a utilização dos diodos emissores de luz (LEDs – do inglês *Light Emitting Diodes*) em sistema de iluminação, seja em ambientes internos ou externos, teve um aumento significativo. Este fato pode ser explicado parcialmente pelas suas características construtivas e o seu baixo impacto ambiental.

Conforme TSAO (2004), estima-se que com o emprego em larga escala de LEDs em iluminação, podendo ser residencial, comercial ou industrial, cerca de 50% da energia consumida em iluminação poderia ser reduzida, ocorrendo em um decréscimo de 10% do total da energia consumida no mundo.

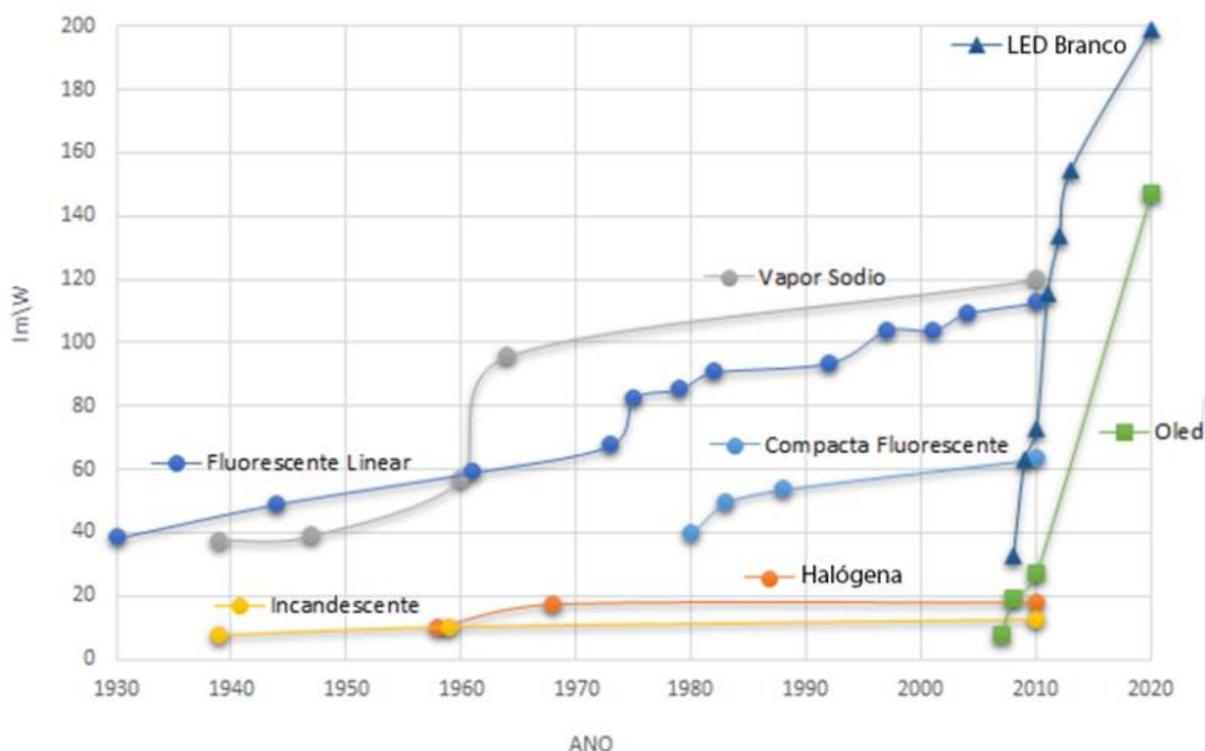


Figura 2 - Comparação da eficácia luminosa de tecnologias empregadas em iluminação – adaptado de CRAFTORD (CRAFTORD, 2007).

2.3 ATRATIVIDADE ECONÔMICA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA UTILIZANDO LEDS DE POTÊNCIA

Além das características fotométricas e tempo de vida útil, as fontes luminosas devem possuir uma atratividade econômica favorável para sua inserção na iluminação de vias públicas. Portanto, deve-se analisar também a eficiência do sistema. Na Tabela 4 é apresentada uma comparação da eficiência das lâmpadas de vapor de sódio e de LEDs de potência. Percebe-se que apesar da lâmpada de vapor de sódio possuir uma boa e maior eficácia luminosa, os LEDs de potência possuem uma maior eficácia global do sistema em função da luminária, tornando-se uma excelente alternativa para iluminação de vias públicas.

Tabela 4 - Comparação da eficiência das lâmpadas de vapor de sódio e LEDs. (LI *et al*, 2009)

Parâmetros	Vapor de Sódio	LED
Eficácia luminosa	110 lm/W	100 lm/W
Eficiência da luminária	75 %	90 %
Eficácia global do sistema	82,5 lm/W	90 lm/W

Ao longo dos anos, com o crescente número de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de projetos eficientes para o acionamento de LEDs, o custo relativo de fabricação dos mesmos reduziu rapidamente. Existe ainda uma forte tendência para a queda desse custo conforme mostrado na Figura 3. Percebe-se que o custo esperado em 2020 é de cerca de 30% do custo atual de fabricação de luminárias LEDs.

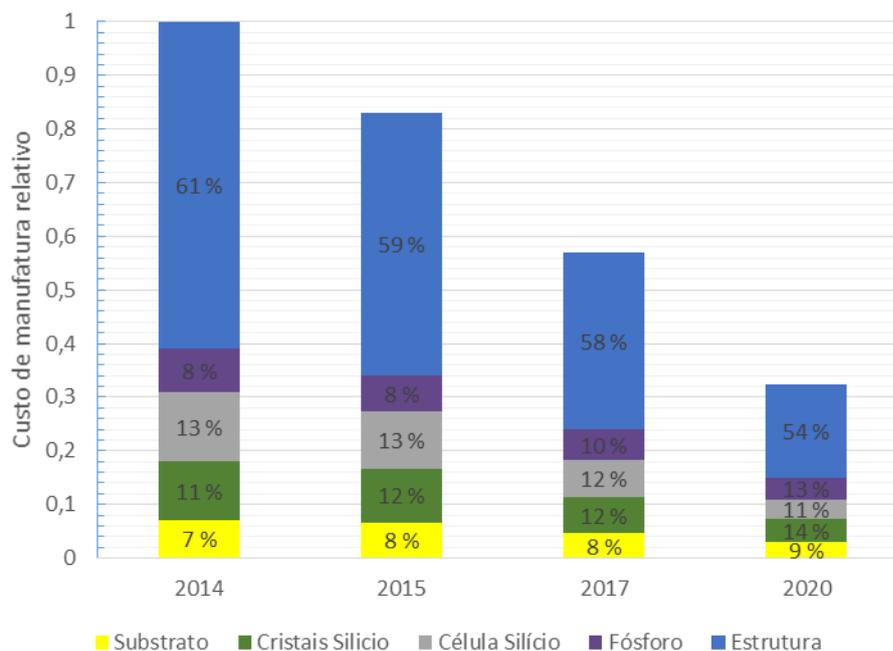


Figura 3 - Projeção do custo relativo de fabricação de uma luminária à LED. (DOE, 2012).

2.4 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTES

Os sistemas inteligentes de iluminação compreendem um espaço heterogêneo e multidisciplinar na gestão de iluminação, possuindo várias tecnologias. Dentre estas, destaca-se a possibilidade de tais sistemas se comunicarem com sistemas supervisórios e até com outras luminárias. Além disso, são capazes de condicionar os sinais oriundos de sensores, tais como luminosidade, presença, tensão, corrente, entre outros. A finalidade do monitoramento destes parâmetros é permitir que o sistema venha a tomar ações de controle automatizadas a fim de aumentar a vida útil do sistema e promover economia de energia.

Devido à crescente melhoria da qualidade de vida e a vasta aplicação de tecnologias mais avançadas de iluminação, como por exemplo LEDs de potência, é possível a realização de diferentes níveis de intensidade luminosa para cada luminária, obtendo assim um valor médio de iluminação reduzido e acarretando então em uma redução do consumo de energia elétrica (GUANG, 2007).

De acordo com CASTRO (2013), a iluminação inteligente compreende a integração de funcionalidades e interfaces em quatro níveis essenciais onde cada camada agrega mais tecnologia aos dispositivos. O primeiro e o segundo nível representam a integração da própria fonte de luz e o sistema de iluminação (luminárias), respectivamente. Já o terceiro nível compreende a gestão, monitoração e distribuição de fontes de energia. E finalmente, no quarto

nível são encontradas as soluções completas de iluminação, ou seja, controle, gestão e monitoramento. O sistema de iluminação atual brasileiro concentra-se no primeiro nível apenas, não permitindo integração de fontes inteligentes, comunicação ou mesmo qualquer controle além do que seja ligar e desligar.

Conforme observado na Figura 4, na camada mais interior encontra-se a própria fonte de luz, no caso deste trabalho, compreende a tecnologia LED. Devido a característica de acionamento deste tipo de lâmpadas, utilizou-se um conversor CA/CC e em seguida um CC/CC regulável para obter a energia da rede elétrica e realizar o acionamento controlado das luminárias.

Na camada relativa às fontes integradas encontram-se as fontes de alimentação, sendo utilizado no trabalho a alimentação proveniente apenas da rede elétrica para acionamento das luminárias. Espera-se que em trabalhos futuros seja realizada integração de baterias e geradores fotovoltaicos. Na camada mais externa estão presentes os elementos de comunicação e sensoriamento, permitindo características inteligentes a luminária.



Figura 4 - Níveis de integração em sistemas de iluminação inteligentes. (CASTRO, 2013).

Atualmente existem várias soluções inteligentes para iluminação pública disponíveis comercialmente, como por exemplo pode-se citar o sistema de gerenciamento e operação remota LightGrid™, desenvolvido pela fabricante GE (GE, 2014), que permite o gerenciamento de várias luminárias à LED através de um sistema de gerenciamento central com acesso à Internet. Outra solução eficiente para controle e gestão inteligente de luminárias é a

Owlet Schröder (SCHRÉDER, 2014). Já o inteliLIGHT® system, desenvolvido pela inteliLIGHT® (INTELILIGHT®, 2014), compõe-se não apenas de um *software*, mas também de um *hardware*, permitindo o gerenciamento centralizado de várias luminárias compatíveis com o protocolo DALI, e adicionalmente, possui vários módulos integrados que podem ser adicionados ao sistema com a finalidade de gerenciar também parâmetros provindos do sistema de energia elétrica. Visualiza-se na Tabela 5 um comparativo das características de cada um destes módulos descritos conforme o tipo de *hardware* disponível.

Tabela 5 – Características dos principais produtos do mercado.

Produto	Lâmpada	Conversor	Fontes	Inteligência	
				Comunicação	Sensores
LightGridTM	LED	CA/CC/CC	Rede elétrica	IEEE 802.15.4	GPS, Corrente, Luminosidade
Owlet	Somente saída de controle (DALI, 0 a 10V)		Rede elétrica	IEEE 802.15.4	Não especificado.
InteliLIGHT	LED	CA/CC/CC	Rede elétrica	Ethernet	Tensão, Luminosidade
Protótipo	LED	CA/CC/CC	Rede elétrica	IEEE 802.15.4, Ethernet	GPS, Corrente, Luminosidade, Presença, Umidade, Temperatura

Avaliando-se os recursos disponíveis em cada um dos produtos apresentados, observa-se que o protótipo proposto é capaz de se adequar aos principais requisitos apresentados pelos outros produtos, mostrando ainda maior disponibilidade de dados sensoriais, o que permite que complexas técnicas de dimerização sejam efetuadas. Além disso, como outras vantagens, cita-se a possibilidade da criação de um mapa térmico através do monitoramento das condições climáticas através do sensor de temperatura e umidade, entre outras vantagens.

2.5 CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foi apresentada uma revisão sobre as fontes de luz utilizadas nos sistemas de iluminação pública, ressaltando as características elétricas, fotométricas, índices de reprodutibilidade de cor e temperaturas de cor. Observou-se que o LED se apresenta como uma alternativa viável para substituição de outras lâmpadas devido a sua alta vida útil, grande versatilidade com relação ao TCC e elevado IRC.

Apesar de o LED possuir um alto custo inicial de implantação, nota-se que há uma forte tendência de queda relacionada ao “amadurecimento” da tecnologia. Com isto é possível

concluir que a viabilidade econômica do uso de LED para iluminação pode se tornar mais evidente nos próximos anos.

Verificou-se que o nível de evolução atual do sistema de iluminação brasileiro ainda é baixo em relação à disponibilidade de tecnologias utilizadas em iluminação inteligente, ou seja, em relação ao estado da arte. Desta forma, é possível afirmar que existe grande margem para aplicação de tecnologias modernas.

Percebe-se que o LED representa uma das melhores alternativas para confecção de sistemas inteligentes de iluminação em função da flexibilidade tecnológica, ou seja, da facilidade de dimerização, controle de temperatura de cor e modularidade.

3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO UTILIZADOS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTE

Neste capítulo serão introduzidos os principais conceitos de protocolos de comunicação. De um modo geral, serão explicitadas as principais diferenças entre estas e suas características de funcionalidade, tais como segurança, tempo de transmissão, canais, tamanho da rede, entre outros. Finalmente, também serão ressaltados os principais protocolos usados em sistemas de iluminação pública inteligente,

3.1 MEIOS DE COMUNICAÇÃO

Com a demanda interminável de maior produtividade por partes das indústrias, a total integração de sensores para a tomada de decisão conduziu a várias exigências, dentre essas podem-se citar a automação em todos os níveis e a padronização que permitiu que diferentes fabricantes pudessem projetar e construir diferentes equipamentos que fossem capazes de comunicar entre si, sem depender da propriedade tecnológica de um fornecedor específico (NORSTRÖM e HANSSON, 2005).

Ainda de acordo com NORSTRÖM e HANSSON (2005), nos últimos anos houve um desenvolvimento considerável das redes de comunicação, podendo ser explicado pela necessidade da combinação de vários sensores, controladores e diferentes máquinas utilizando uma mensagem de especificação em comum. Atualmente, existem diversas soluções de rede, porém ainda permanecem algumas questões pendentes a serem solucionadas para que requisitos como confiabilidade e disponibilidade sejam alcançados com maior qualidade e produtividade.

A busca por maior confiabilidade e segurança no provimento de energia elétrica não se faz sem a utilização de equipamentos de medição e monitoramento, os quais por sua vez, necessitam de um sistema de transmissão de dados confiável, robusto e escalável. O processo de transmissão de dados pode ser realizado por meio da utilização de cabos (*wired communication*), tais como fibras óticas, par trançado, cabos coaxiais ou mesmo aproveitando a própria fiação da rede de distribuição elétrica através da tecnologia PLC (do inglês *power line communication*), entre outros. Porém, muitas vezes, devido ao custo, complexidade de implementação e interferências eletromagnéticas, torna-se mais viável o uso de tecnologias de comunicação sem fio (*wireless communication*). Existem diversos protocolos operando na faixa de 2.4GHz ou 900MHz, como por exemplo podem-se citar o WiFi (do inglês *Wireless Fidelity*) e ZigBee.

A fim de prover flexibilidade, mobilidade, baixo custo, fácil instalação e formação de uma rede dinâmica, é crescente o uso de tecnologias de comunicação sem fio (WILLIG, 2004). Dentro deste cenário, quatro protocolos podem ser utilizados: WiFi, ZigBee, Bluetooth e UWB, onde os mesmos obedecem às normas IEEE 802.11, 802.15.4, 802.15.1 e 802.15.3, respectivamente. Nessas normas são definidas as camadas físicas PHY e MAC para a comunicação sem fio dentro de um range de 10 a 100 metros de alcance.

Vários trabalhos foram publicados com o intuito de comparar as principais características das mesmas, onde incluem-se capacidade, topologia da rede, segurança, qualidade de serviço e consumo de energia. Por exemplo, em BAKER (2005) é realizada uma comparação relativa entre as tecnologias sem fio, ressaltando o ZigBee como um protocolo que pode atender a uma ampla variedade de necessidades reais industriais quando comparado ao Bluetooth, devido ao seu longo tempo de funcionamento utilizando bateria, maior alcance útil (podendo chegar até 100 metros), flexibilidade em relação a possibilidade de conectar-se com um grande número de dispositivos e confiabilidade da topologia para arquitetura de redes do tipo *mesh*.

Em WANG *et al* (2004) é feito um estudo comparativo das camadas físicas dos protocolos UWB e WiFi. Apesar das diferenças citadas serem bem pequenas, conclui-se que a gestão de energia do 802.15.3 é mais fácil que a do 802.11e. Já em relação ao Bluetooth e WiFi, no trabalho de FERRO e POTORTI (2005) é realizado um estudo comparativo das principais divergências e características de cada um. Finalmente, em LEE *et al* (2006) é abordada uma comparação entre os protocolos sem fio com o intuito de selecionar o mais apropriado para uma determinada aplicação.

As comunicações com fio comumente usadas incluem a utilização da rede de telefonia, fibra ótica e até mesmo a rede elétrica (NADUVATHUPARAMBIL, 2002). A escolha depende da disponibilidade da estrutura de comunicação bem como do custo de implementação e taxas de transmissão possíveis de serem obtidas.

Por exemplo, considera-se a comparação entre uma estrutura de telefonia e uma com fibra ótica. Com linhas de telefonia é possível atingir taxas da ordem de 56 Kbps em condições ideais, não sendo o caso para transmissão de dados em uma subestação de energia (local com muito ruído). Já a utilização de uma estrutura em fibra ótica permite valores na faixa de 50.000 Kbps a 1.000.000 Kbps (NADUVATHUPARAMBIL, 2002). Porém, o custo inicial para implantação de um sistema de comunicação utilizando a rede de telefonia é muito menor visto que a estrutura já é existente.

Atualmente, uma outra forma de comunicação por fio tornou-se popular, a transmissão de dados pela rede elétrica (PLC – sigla do inglês para *Power Line Communication*). Com o

advento de novas tecnologias presentes no mercado, essa técnica já é considerada viável para diversas aplicações, seja indoor ou outdoor.

Em relação aos trabalhos publicados sobre comparação entre os protocolos de rede que se utilizam de fios para a transmissão de dados, em MARIHART (2001) é apresentado uma análise a respeito dos diversos tipos de sistemas de comunicação, tratando inclusive da transmissão de dados pela rede elétrica, ressaltando as vantagens e desvantagens para cada aplicação. Acerca da utilização de PLC, em GALLI (2011) são descritos os avanços tecnológicos mais recentes na área bem como uma discussão detalhada sobre a aplicação de PLC em soluções *Smart Grid*.

3.1.1 SEM FIO

Nos próximos subtópicos serão abordados os principais protocolos de redes sem fio de curto alcance, os quais são IEEE 802.15.4, 802.11, 802.15.3 e 802.15.1, que correspondem respectivamente ao ZigBee, WiFi, UWB e *Bluetooth*. Serão introduzidas as principais características de funcionalidade dos mesmos.

3.1.1.1 IEEE 802.15.4

Os módulos de rádio frequência XBee (DIGI INTERNATIONAL INC,2014) comunicam-se utilizando a norma IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2014) na frequência ISM (sigla do inglês para *Industrial, Scientific and Medical*). No Brasil essa frequência é 2,4 GHz (16 canais) e não necessita de licença para operação. Uma das vantagens da utilização de redes ZigBee encontram-se em sua comunicação robusta, uma vez que estes possuem uma boa imunidade contra interferências e capacidade de suportar mais de 65.000 dispositivos em uma rede com taxas de transferências de dados em uma faixa de 20 Kbps à 250 Kbps.

Os módulos XBee podem ser utilizados nas mais distintas aplicações, dentre estas citam-se sistemas de controle de acesso, iluminação, aquecimento, monitoramento de pacientes, gerenciamento de energia e rastreamento de equipamentos. Devido ao seu grande uso em sistemas embarcados, a velocidade não é crítica em uma implementação ZigBee. Um exemplo de especificações para um tipo de módulo XBee pode ser visto na Tabela 6.

Existem várias divisões do sistema ZigBee, o que faz existir assim, características diferentes para cada tipo de aplicação. Suas principais vantagens são fornecer uma rede auto

organizada, *multi-hop*, confiável e de topologia *mesh*, com pouco consumo de energia, resultando então em um longo tempo de vida útil de bateria em sistemas embarcados.

Existem dois tipos de dispositivos, os quais são os de função completa (FFD – sigla do inglês para *Full Function Device*) e os de função reduzida (RFD – sigla do inglês *Reduced Function Device*). Os dispositivos FFD funcionam em qualquer modo de operação, ou seja coordenador, roteador ou dispositivo final. Ademais, os mesmos podem comunicar-se tanto com outros FFD quanto com dispositivos do tipo RFD. Já os dispositivos RFD apenas comunicam-se com dispositivos do tipo FFD. Devido a isso, estes apenas atuam como “*end-pointings*” da rede. São considerados dispositivos mais simples, de menor custo e possuem um consumo de energia reduzido (LEE, 2006).

Tabela 6 - Especificações do módulo XBee PRO S1 (DIGI INTERNATIONAL INC, 2014).

Faixa de frequência	2.4000 à 2.4835 GHz
Frequência de operação	ISM 2,4 GHz
Alcance em ambientes urbanos	30 metros
Alcance em linha visível	100 metros
Taxa de dados em RF	250.000 bps
Taxa de dados da Interface	115.200 bps
Propriedades Elétricas	
Tensão de alimentação	2,8 à 3,4 V
Corrente de transmissão	45 mA (3.3 V)
Corrente de Recepção	50 mA (3.3 V)
Rede	
Topologias	Ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto e malha
Manipulação de erro	Retransmite e reconhece
Endereçamento (cada canal)	65.000 endereços disponíveis
Número de canais	16 canais
Criptografia	128-bit AES

3.1.1.2 IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 é um padrão mundial para implementação de redes locais sem fio (WAN – *Wide Area Network*), sendo comumente conhecido como WiFi e permite os usuários utilizarem a internet a velocidades de banda larga quando conectados a um ponto de acesso *ap* ou em redes ponto-à-ponto em *ad-hoc*.

Devido a versatilidade necessária para interconexão de computadores em massa e a banda requerida pelos sistemas, este protocolo acaba por se tornar mais complexo que os outros apresentados. Porém, uma grande vantagem do uso de redes WiFi é sua fácil interconexão com

a internet, permitindo um sistema de monitoramento extremamente robusto e pouco dependente de tecnologias restritas a fabricantes.

O uso de redes WiFi permite ainda que sejam mesclados vários dispositivos de interconexão em topologias extremamente difusas e complexas, sem um limite para o número de nós acessíveis diretamente pelos sistemas supervisórios.

Do ponto de vista da segurança, o WiFi apresenta complexos protocolos de encriptação, podendo ser considerado o padrão de redes sem fio mais seguro do mercado. No XBee, por exemplo, não é implementado sistemas de encriptação, assim a implementação desta camada de rede fica a cargo do usuário, criando, portanto, possibilidades para sistemas IP.

A grande desvantagem consiste no custo computacional apresentado pelo protocolo de rede TCP/IP e no fato de que muitas vezes a faixa de 2,4GHz encontra-se densamente ocupada, reduzindo a distância máxima entre os nós da rede e os pontos de acesso.

Tabela 7 - Características do WiFi.

Características	Valores
Especificação IEEE	802.11
Frequência de banda	2,4GHz, 5GHz
Taxa máxima de sinal	54 Mb/s
Alcance típico	100 a 300 m
Potência nominal de transmissão	15 – 20 dBm
Número de canais de RF	14 (2,4 GHz)
Largura do canal	22 MHz
Autenticação	WEP, WPA, WPA2 (802.11i)
Número máximo de conexões	2007
Criptografia	RC4 (WEP), TKIP, AES

3.1.1.3 IEEE 802.15.1

A tecnologia Bluetooth, definido pela norma IEEE 802.15.1, é baseado em um sistema via rádio e foi projetado para ser utilizado em curtas distâncias bem como ser implementado em dispositivos baratos com a finalidade de substituir cabos em aplicações de redes pessoais sem fio, considerados do tipo WAN, como por exemplo cabos dos periféricos de computador. Este protocolo foi projetado para atender requisitos de baixo consumo de energia e com baixo alcance.

As características do Bluetooth podem ser analisadas através da Tabela 8. Existem dois tipos de topologia para conectividade de tecnologias do tipo Bluetooth, que são *piconet* e *scatternet*. A primeira topologia de conectividade, *piconet*, é uma rede *ad-hoc* formada por um dispositivo Bluetooth que serve como mestre e interconecta-se com até sete outros dispositivos escravos, que são também do tipo Bluetooth. Contudo, um dispositivo do tipo escravo pode-se tornar mestre a qualquer instante. Já a outra topologia, *scatternet*, é um conjunto de dispositivos Bluetooth do tipo *piconet* que se sobrepõe em tempo e espaço, ou seja, dois ou mais dispositivos *piconet* podem ser conectados a fim de formar uma *scatternet*.

Tabela 8 - Características do Bluetooth.

Características	Valores
Especificação IEEE	802.15.1
Frequência de banda	2,4 GHz
Taxa máxima de sinal	1 Mb/s
Alcance nominal	10 m
Potência nominal de transmissão	0 – 10 dBm
Número de canais de RF	79
Largura do canal	1 MHz
Autenticação	-
Número máximo de conexões	8
Criptografia	E0

Os protocolos ZigBee, WiFi e Bluetooth podem operar na faixa de 2,4GHz, que usualmente compreende uma banda fortemente congestionada, principalmente em grandes centros urbanos. Portanto, dispositivos que possuem maior capacidade de potência de saída serão aqueles que dominarão o canal.

3.1.1.4 IEEE 802.15.3

De acordo com PORCINO & HIRT (2003), o UWB, correspondente à norma IEEE 802.15.3, foi originalmente desenvolvida para comunicação militar. Porém, anos mais tarde, idealizou-se para aplicações para redes de área pessoal, contemplando-se na maioria das aplicações de multimídia, tais como a recepção de áudio e vídeo além da transmissão em alta velocidade entre aparelhos domésticos, como por exemplo, impressoras, mouses, teclado,

dentre outras. As características técnicas desta tecnologia podem ser vistas na Tabela 9. É possível observar que o protocolo UWB possui um grande espectro de atuação e taxas de transmissão mais altas quando comparado ao WiFi.

Tabela 9 - Características do UWB.

Características	Valores
Especificação IEEE	802.15.3
Frequência de banda	3,1 GHz; 10,6 GHz
Taxa máxima de sinal	110 Mb/s
Alcance nominal	100 m
Potência nominal de transmissão	15 – 20 dBm
Número de canais de RF	14 (2,4 GHz)
Largura do canal	22 MHz
Autenticação	WPA2 (802.11i)
Número máximo de conexões	2007
Criptografia	RC4 (WEP); AES
Célula base	BSS

3.1.2 COM FIO

Nos subtópicos seguintes serão apresentados funcionalidades e aplicações de alguns sistemas de comunicação que se utilizam de fios para a transmissão de dados. Estes sistemas que serão descritos a seguir compreendem o PLC, DALI e a Fibra ótica.

3.1.2.1 PLC

Nesse tipo de sistema de comunicação, o sinal é modulado em uma frequência diferente da utilizada pelo sinal de energia elétrica (normalmente 50 ou 60 Hz). A modulação é feita em frequências mais elevadas e com baixa energia, evitando a distorção severa do sinal da rede elétrica.

A grande vantagem desse tipo de transmissão consiste no fato de que toda a estrutura de transmissão de energia elétrica poder ser aproveitada para a transmissão de dados, evitando gastos iniciais de infraestrutura (GALLI et al, 2011; OKSMAN e ZHANG, 2011). Sabe-se que para maiores taxas de transmissão, maior será a utilização da banda espectral (SKLAR, 2001).

Dessa forma, existe uma série de regulamentações para a divisão do espectro. Como exemplo, pode-se citar a *International Telecommunication Union*, instituição responsável pela padronização de tecnologias de informação, comunicação entre outras, e que possui algumas especificações para aplicações em Smart Grid utilizando PLC. Na Tabela 10 são apresentadas algumas dessas especificações para três bandas distintas. Recomendações, como por exemplo a G.9955/56, apresentada na Tabela 10, abordam algumas determinadas aplicações, como a integração de sistemas de medição inteligente, gerenciamento de energia, automação residencial e automação da distribuição (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2012).

Tabela 10 - Especificações da *International Telecommunication Union* para aplicações em Smart Grid utilizando PLC para diferentes faixas de frequência. (ITU TELECOM, 2014).

Especificação	Faixa da portadora	Taxa de transmissão de dados
G.9960/61 (G.hn)	2 – 100 MHz	100 Mb/s até 1 Gb/s
G.9960/61 (G.hn LCP)	2 – 25 MHz	5 a 20 Mb/s
G.9955/56 (G.hnem)	<500 KHz	Até 1 Mb/s

Esse tipo de comunicação poderia ser utilizado para a aplicação discutida na presente dissertação, visto que a taxa de transmissão de dados não precisa ser alta. Porém note que, caso fosse implementar um sistema de monitoramento em tempo real, a frequência de amostragem deveria ser maior e conseqüentemente haveria a necessidade de se enviar mais bits por segundo, precisando então de aumentar a largura de banda para o PLC. Observa-se que é preciso avaliar a demanda de taxa de cada aplicação para se verificar a viabilidade.

Um grande problema deste tipo de sistema de comunicação é a incompatibilidade magnética, já que o sistema de distribuição e transmissão é extremamente ruidoso e interfere excessivamente no canal de comunicação utilizado para o PLC (FERREIRA *et al*, 2012). Assim não é possível prever com grande precisão se o sistema será capaz de operar com as taxas de transmissão desejadas.

3.1.2.2 DALI

O uso de uma interface física DALI requer um par de cabos (TX e RX), podendo conectar múltiplos dispositivos ao mesmo meio físico. O fornecimento de potência ao barramento, em geral, pode ser realizado pelo mestre da rede ou por uma fonte externa (STMICROELECTRONICS, 2014).

Devido a distância envolvida entre nós de comunicação, o protocolo é definido para baixas taxas de transmissão, até 1200 bps, usando protocolo Manchester, também conhecido como bifase, para codificação dos dados, o que em geral permite longas distâncias entre os nós. A distância máxima entre os nós da rede dependerá de sua área de secção transversal e da imunidade a ruído dos mesmos, sendo a distância típica máxima entre nós na extremidade da rede de aproximadamente 300m e não há uso de resistores de terminação.

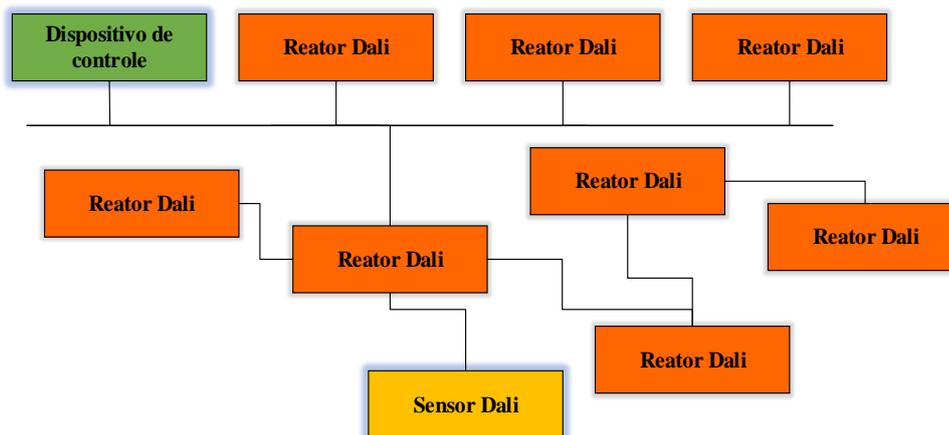


Figura 5 - Conexão física possível para o protocolo DALI (ATMEL, 2014).

A interface física DALI opera a 1,2kHz, sendo os *frames* lógicos formados por 19 bits. Poderão ocorrer colisões de dados, uma vez que o protocolo é multi-mestre, e neste caso, o controle de acesso ao meio se dará através da prioridade entre os mestres, o que definirá um tempo de nova tentativa de acesso para cada um (IEC 60929, 2006).

3.1.2.3 FIBRA ÓTICA

Pelo princípio da reflexão interna total é possível construir um guia de onda do espectro da luz visível que garanta a reflexão interna total dentro da fibra. Quando isso ocorre, toda a luz é refletida dentro do guia de onda, não sendo refratada, ou seja, toda a luz fica contida dentro

do material. Uma fibra ótica possui um núcleo revestido com material reflexivo, sendo normalmente vidro ou plástico, e externamente existe uma casca com material de índice de refração menor que a do núcleo, impossibilitando que o feixe de luz seja refratado e atenuado no caminho (BUSH, 1993). É comum existir ainda uma camada de proteção denominada de revestimento primário da fibra. Mais detalhes sobre aspectos construtivos da fibra ótica podem ser vistos no capítulo introdutório de AGRAWAL (1989).

Essa forma de transmissão de dados é extremamente útil para cobrir grandes distâncias, uma vez que a propagação da luz pela fibra sofre pequena atenuação e quase nenhuma interferência eletromagnética em comparação com transmissão de sinal elétrico em cabos condutores. Segundo MARIHART (2001), distâncias da ordem de 140 Km, sem utilização de repetidores, eram possíveis desde 2001. A transmissão dos dados ocorre de forma similar à transmissão de sinal elétrico, porém o sinal binário é ausência ou presença de luz no sensor. Portanto, para utilizar a comunicação por fibra ótica, é preciso ter um sensor de luz em uma extremidade e um emissor em outra.

Um fator que afeta a eficiência da transmissão de dados pela fibra ótica é a chamada de dispersão cromática (AGRAWAL, 1989). A luz que percorre a fibra pode ser composta por mais de um espectro de frequência, ou seja, possui mais de um comprimento de onda na composição do sinal luminoso. Isso faz com que uma faixa de frequência seja mais refratada do que outras (possuem ângulos de reflexão total diferentes) e conseqüentemente podem percorrer maiores caminhos dentro da fibra, fazendo com que cheguem ao receptor em momentos diferentes. Esses diversos componentes do sinal luminoso que chegam com atrasos entre si são interpretados como ruídos e são muito perceptíveis em longas distâncias, condição no qual o atraso é mais evidente. Uma forma de evitar isso é a utilização de lasers, como feixe de luz a ser transmitida, já que esta fonte é considerada como quase monocromática.

Atualmente, com o desenvolvimento desta tecnologia, existem diversas modificações de fibras para aplicações específicas para automação em sistemas de potência, tais como fibras com alto isolamento, capazes de serem presas aos cabos de energia sem interferências e fibras que podem ser acopladas ao condutor neutro da rede elétrica, entre outras (MARIHART, 2001).

Outra grande vantagem deste sistema de transmissão de dados consiste no fato de não ser preciso o licenciamento para operação, como ocorre em sistemas sem fio e PLC, uma vez que a transmissão de sinal luminoso não interfere e nem sofre interferências eletromagnéticas. Portanto, independente da largura de banda a ser transmitida, não é preciso preocupar-se com uma determinada faixa de frequência está sendo utilizada no local da aplicação. Por essa razão, não

é comum encontrar normas regulamentadoras quanto ao uso de fibra ótica para transmissão de dados.

Uma avaliação destes meios de transmissão é mostrada no infográfico da Figura 6. O uso de fibras óticas permite uma maior velocidade e menor interferência a ruído. Porém, possui um maior custo de implantação em função do custo do cabeamento bem como dos dispositivos de conversão.

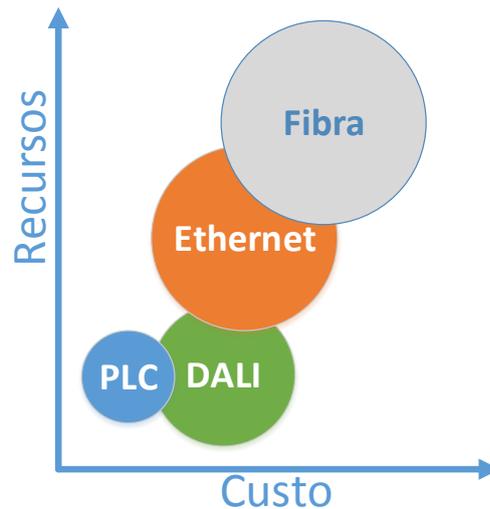


Figura 6 - Comparativo entre os meios de transmissão.

3.2 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO ENTRE AS LUMINÁRIAS

Neste tópico serão abordados os principais protocolos de comunicação usualmente utilizados em sistemas inteligentes de iluminação. Serão ressaltadas as características referentes a cada protocolo bem como as especificações exigidas pelas normas regentes.

Observa-se que neste trabalho utilizou-se a interface ZigBee para a troca de informações entre os módulos SM/SM e SM/CM. Ademais, é utilizado o protocolo Ethernet com a finalidade de enviar os dados oriundos do módulo de controle (CM) para o supervisor de gerenciamento, fornecendo flexibilidade de acesso as informações através de dispositivos portáteis. Conforme mencionado em FARHANGI (2010), existe um grande número de dispositivos utilizando esse protocolo de comunicação, o que o torna ainda viável para certas aplicações em *Smart Grid*. Contudo, possui a desvantagem de operar na frequência de banda altamente utilizada (2,4 GHz), o que ainda vem sendo estudado em vários trabalhos, como em (YI, 2011).

3.2.1 DALI (Lógico)

De acordo com IEC 60929 (IEC60929, 2014), o protocolo DALI (sigla do inglês para *Digitally Addressable Lighting Interface*) é uma interface de iluminação digitalmente endereçável e surgiu como um padrão para enfrentar os crescentes problemas de energia na Europa, especialmente em propósitos comerciais e industriais. Este protocolo permite que o sistema de iluminação seja flexível e possua capacidade de controle. Além disso, é mais simples e barato que sistemas de gerenciamento predial convencional, como por exemplo o BMS (sigla do inglês para *Building Management System*).

Como já mencionado anteriormente neste mesmo capítulo, a interface física do DALI consiste basicamente de dois barramentos e requer uma fonte de alimentação especial. Com respeito à interface lógica, o DALI utiliza a codificação Manchester (bifase) para enviar tanto o bit de início quanto os bits da informação. O fluxo de informação do sistema DALI é bidirecional, a taxa de informação é de aproximadamente 1200 bps com um range aceitável de $\pm 10\%$ e o bit mais significativo é enviado primeiramente. Um esquemático da transmissão DALI pode ser verificado na Figura 7 e na Figura 8 é mostrado a codificação de um bit através da codificação Manchester.

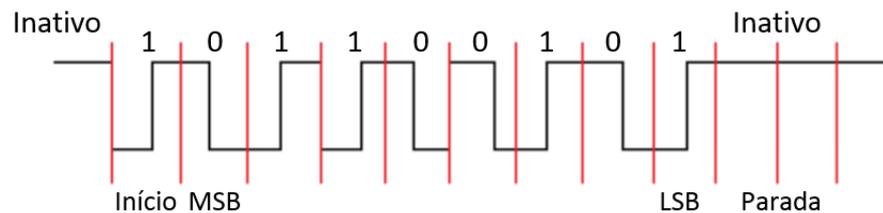


Figura 7 - Transmissão DALI.

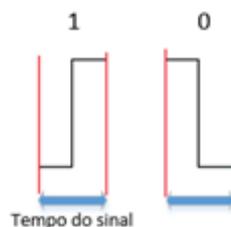


Figura 8 - Codificação Manchester de um bit.

O mestre envia 16-bits de dados codificados empacotados e os receptores podem responder com pacotes de 8-bits. Múltiplos mestres são permitidos e dois mestres podem compartilhar o mesmo receptor. Existem 64 canais ou endereços individuais disponíveis para

serem conectados a cada linha de interface. Cada barramento DALI pode ter 16 grupos de luminárias no máximo e não existe verificação de erro neste protocolo. Na codificação e decodificação Manchester, qualquer pacote enviado entre o dispositivo de controle e os dispositivos elétricos será Manchester bifase codificado. O pacote é decodificado e os endereços e mensagens são processadas de acordo.

Desta forma, pode-se resumir uma comunicação DALI ao formato lógico apresentado na Figura 9. Verifica-se que há uma limitação de endereçamento para cada mestre bem como do conjunto de dados a ser enviado a cada transmissão.

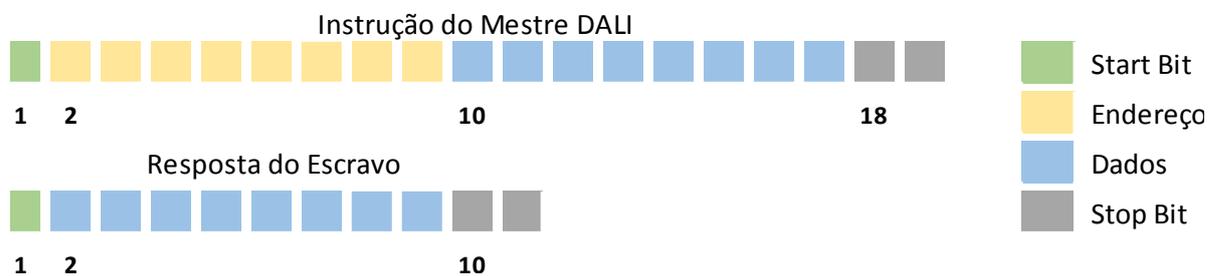


Figura 9 - Formato lógico do *frame* de dados DALI.

3.2.2 ETHERNET

Este protocolo foi padronizado pelo IEEE como 802.3 (IEEE 802.3, 2014) e tornou-se a tecnologia de rede local mais difundida do mundo. Além disso, é barata, fácil de instalar e permite a construção de redes mais amplas geograficamente. A ethernet é especificada para velocidades de operação que variam de 1 à 10.000 Mb/s, conforme mostrado abaixo:

- (IEEE 802.3) – 10 Mb/s: 10Base-T Ethernet;
- (IEEE 802.3u) – 100 Mb/s: Fast Ethernet;
- (IEEE 802.3z) – 1 Gb/s: Gigabit Ethernet;
- (IEEE 802.3ae) – 10 Gb/s: 10 Gigabit Ethernet.

Existem algumas topologias de rede que podem ser utilizadas para comunicação Ethernet, dentre estas citam-se a ponto-à-ponto, barramento e estrela. Os dados enviados por Ethernet existem em formas de *frames*. Um *frame* contém um cabeçalho, a seção de dados e um rodapé contendo a combinação do tamanho de até 1518 bytes. O cabeçalho possui tanto o endereço do remetente quanto do destinatário. Os dados enviados através do protocolo Ethernet são automaticamente transmitidos para todos os dispositivos na rede. Em seguida, comparando o

endereço Ethernet com o endereço encontrado no cabeçalho, cada dispositivo é testado com a finalidade de determinar se a mensagem foi enviada para ele mesmo.

Uma das principais desvantagens deste protocolo se refere ao fato de que a implementação das várias camadas do modelo e a conjugação de recursos necessárias torna-o complexo e computacionalmente custoso para dispositivos embarcados.

2.2.3 PROPRIETÁRIO

Apesar dos padrões industriais serem completos e oferecerem interoperabilidade, muitas vezes isto acaba por aumentar os custos computacionais e envolve uma certa complexidade de implementação. Desta forma, o desenvolvimento de um protocolo de comunicação focado nas necessidades específicas dos projetos pode representar uma alternativa viável, e, talvez, a melhor opção.

O grande desafio neste caso pode consistir na complexidade de programação das diversas variáveis envolvidas. Entretanto, neste caso, são necessárias apenas implementações relacionadas às necessidades do projeto, reduzindo então o número de estruturas e tornando a comunicação mais eficiente.

Devido a implementação única, este tipo de programação pode tornar-se mais seguro e caso exista algum tipo de invasão, o invasor não possuirá conhecimento prévio da arquitetura e a configuração dos sinais necessários.

No caso do protocolo DALI, por exemplo, há várias implementações relacionadas ao comando das luminárias, mas poucas estruturas específicas para comando de outros dispositivos e também sensoriamento.

Pode-se mesclar a utilização destes vários meios lógicos e físicos de acordo com a necessidade do ambiente, criando assim estruturas de redes mistas como o da Figura 10. Este tipo de estrutura permite que os custos sejam reduzidos, aproveitando-se da vantagem de cada estrutura de rede.

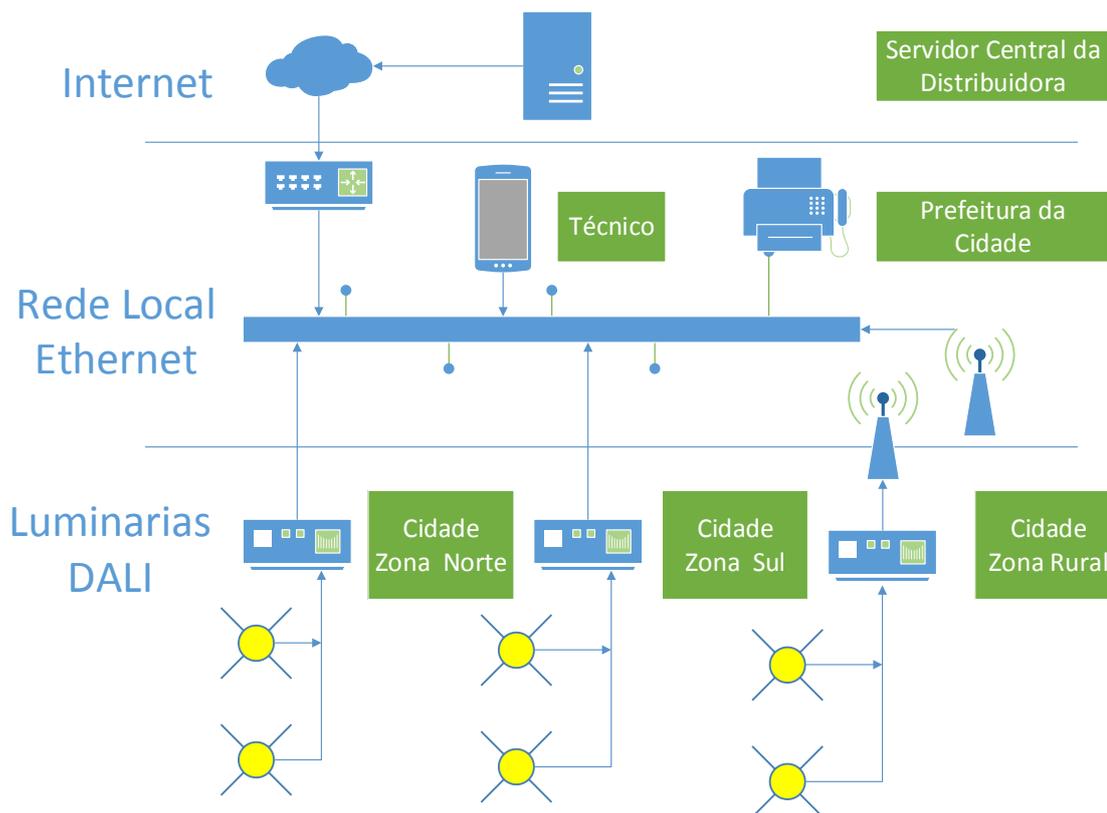


Figura 10 – Exemplo de uma estrutura de rede de controle mista.

3.3 CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foram apresentados os principais protocolos de comunicação que são utilizados atualmente. Foram descritas as especificações e características referentes às normas estabelecidas para cada caso. Foram também verificadas as melhores opções de estruturas de rede que podem ser utilizadas no contexto de iluminação pública bem como as características físicas e lógicas de cada uma.

É possível concluir que criar uma estrutura utilizando apenas um protocolo de comunicação, a priori, pode não tornar vantajoso devido às grandes diferenças entre os ambientes que receberão estes dispositivos. Portanto, a melhor opção consiste no desenvolvimento de uma arquitetura flexível e escalável, permitindo a adaptação aos mais diversos tipos de cenários.

Para este estudo, escolheu-se a utilização do protocolo ZigBee para comunicação entre SM/SM e SM/CM devido ao fato de apresentar baixo consumo de energia (EROL-KANTARCI, 2015) e também facilidade de implementação (YI, 2011). Porém, deve-se avaliar em trabalhos futuros análise sobre tráfego de dados, testando inclusive com outros protocolos.

4 SISTEMA DE CONTROLE INTELIGENTE

Nos capítulos anteriores foram apresentados breves resumos acerca dos protocolos de comunicação para o envio de dados bem como os aspectos da iluminação pública convencional e da iluminação pública inteligente. Sendo assim, é possível para os capítulos seguintes abordar o sistema desenvolvido no presente trabalho. O sistema inteligente para monitoração, gerenciamento e controle de iluminação pública e análise de parâmetros de qualidade de energia da rede elétrica é dividido em três partes: O módulo de controle inteligente; O módulo de gerenciamento descentralizado; E o sistema supervisorio.

Neste capítulo será abordado o sistema de controle inteligente, onde o mesmo é responsável pelas medições dos sinais provindos da rede elétrica, sendo capaz então de informar eventos eletromagnéticos tais como afundamento, elevação e interrupções bem como problemas vindos da luminária. Outra possibilidade é a dimerização do arranjo de LEDs da luminária de forma automática, tornando-se assim uma ferramenta poderosa para concessionárias de energia elétrica, uma vez que faz ser possível o aumento da eficiência operacional e utilização racional da energia elétrica em horários de pico, reduzindo assim custos. Outro fator interessante é que esta ferramenta pode representar uma nova forma de faturamento de IP, pois permite realizar a medição do consumo real das luminárias. De acordo com a ANEEL, sempre que viável tecnicamente e economicamente, o consumo de energia elétrica ativa mensal, para fins de faturamento, deverá ser aquele registrado pelos equipamentos de medição instalados. Como o sistema de IP instalado atualmente não possui aparelhos de medição, o consumo de energia elétrica é calculado com base na carga instalada considerando a respectiva potência nominal e considerando um tempo de consumo de onze horas e cinquenta e dois minutos, conforme estabelecido no artigo 24 da Resolução ANEEL nº 414/2010.

Posteriormente será abordado o dispositivo para gerenciamento descentralizado das informações provenientes de um determinado grupo de luminárias. Estas informações dizem a respeito ao nível de iluminação, consumo de energia, detecção da presença de pedestres, problemas na própria luminária, monitoração de variáveis ambientais como temperatura e umidade, falhas na rede elétrica, permitindo monitorar e gerenciar os parâmetros de qualidade de rede de uma forma global. Por fim será apresentado o desenvolvimento do sistema supervisorio e o algoritmo de funcionamento do mesmo através da utilização de fluxogramas. Adicionalmente, as funções relacionadas tanto à monitoração dos parâmetros de qualidade de energia quanto ao controle das luminárias serão discutidos detalhadamente a fim de prover um melhor entendimento do gerenciamento dos dados.

4.1 MÓDULO DE CONTROLE INTELIGENTE

Como já mencionado anteriormente, o sistema completo desenvolvido neste trabalho consiste basicamente de um módulo inteligente (SM), que é conectado a uma determinada luminária e à rede elétrica, um módulo de gerenciamento descentralizado (CM) e um centro de supervisão (SS), o qual é responsável por salvar os dados obtidos em um certo período de tempo, analisar e monitorar problemas de possíveis falhas e enviar comandos para cada CM e/ou um respectivo SM, conforme mostrado na Figura 11. Já na Figura 12, observa-se a integração de cada SM em uma determinada lâmpada, representado pelos números 2, 3 e 4, e um CM instalado na mesma rua, o qual foi representado pelo número 1.

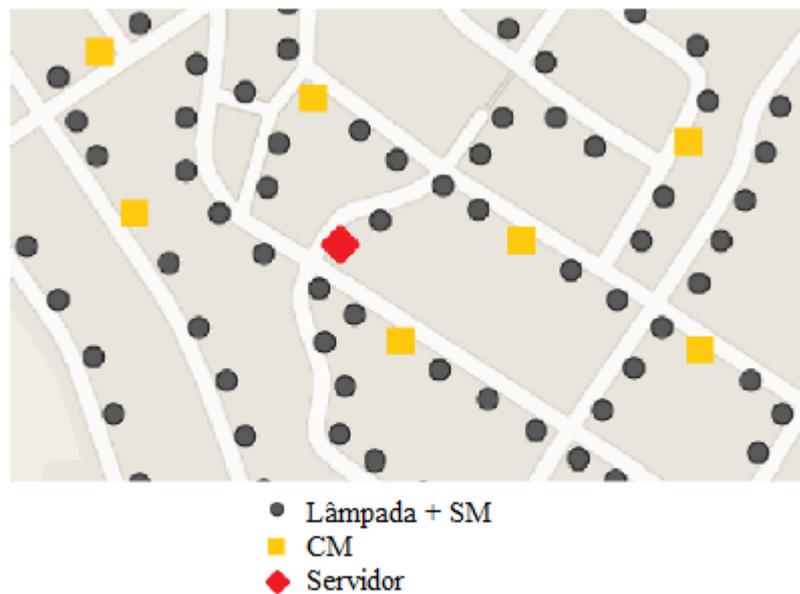


Figura 11 - Arranjo físico de uma vizinhança utilizando o equipamento proposto.

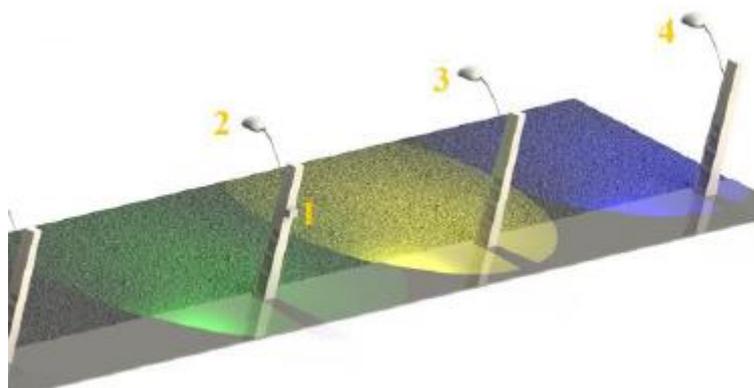


Figura 12 - Conceito do equipamento proposto instalado em uma determinada rua.

O esquemático do presente módulo inteligente pode ser visto na Figura 13 e na Figura 14 e Figura 15 são mostrados exemplos da luminária à LED e da inserção do módulo inteligente em uma luminária, respectivamente. O módulo SM tem a capacidade de gerenciar e comandar uma luminária e também prover comunicação com o seu determinado CM. Percebe-se que cada SM contém um relógio de tempo real para prover sincronização de tempo entre os sensores e a rede, uma bateria auxiliar com a finalidade de assegurar uma fonte de energia ininterrupta, uma interface de programação USB e uma interface de controle para oferecer um sinal de controle para a luminária e reunir as informações dos sensores.

Além do sistema básico, existe um sensor acoplado à rede elétrica para medir os parâmetros provenientes da rede elétrica, fornecendo assim informações relevantes para companhias de distribuição de energia. Estas informações são enviadas para um determinado CM, o qual armazenará e enviará os dados para um sistema supervisor. Note que cada módulo é conectado a uma fase da rede elétrica, permitindo a realização de uma análise monofásica da qualidade de energia.

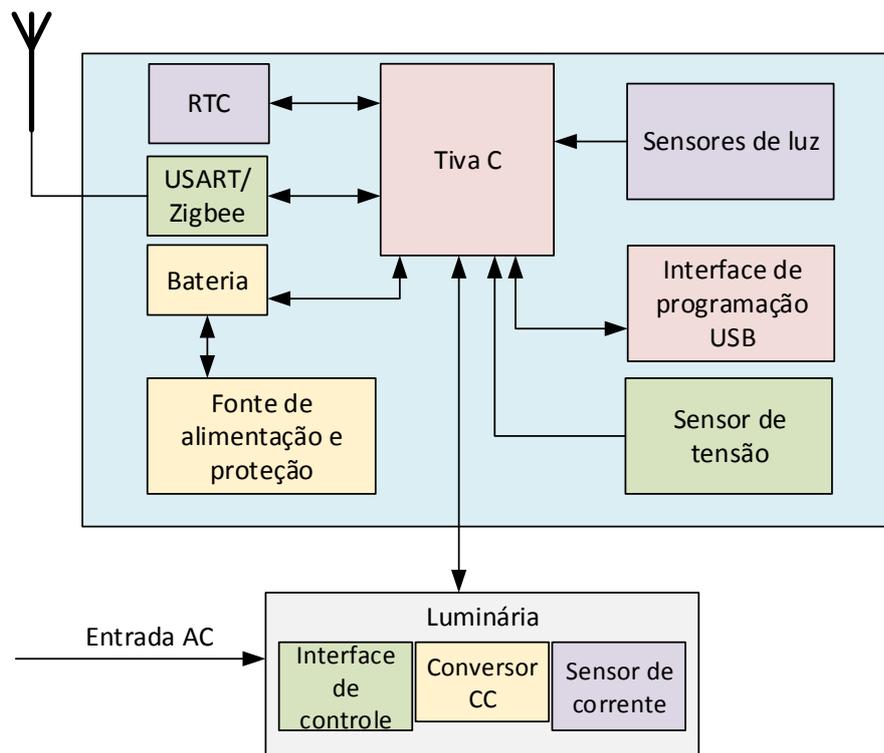


Figura 13 - Esquemático simplificado do módulo inteligente (SM).

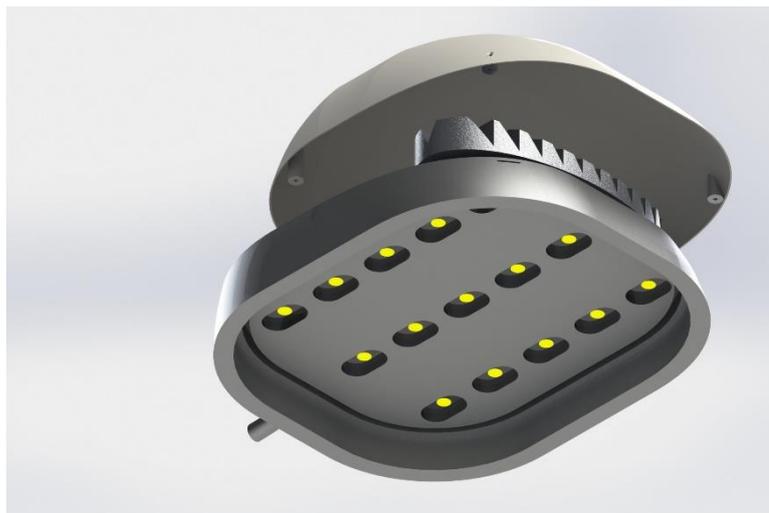


Figura 14 - Exemplo de luminária pública à LED.

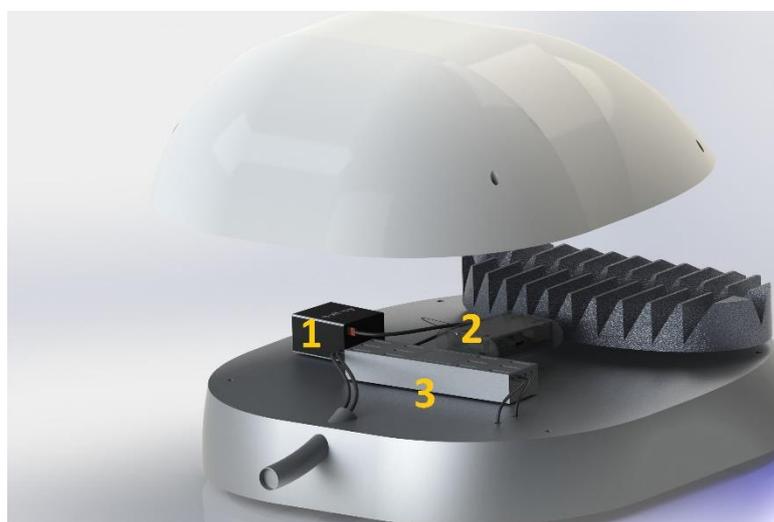


Figura 15 - Exemplo de inserção do módulo inteligente na luminária à LED.

Utilizou-se um microcontrolador ARM TM4C123GH6PM (TEXAS INSTRUMENT INCORPORATED TM4C123G, 2014) operando em 80MHz que foi escolhido devido a sua grande capacidade de processamento e por possuir interfaces de comunicação com vários protocolos, tais como I2C, UART, CAN e SPI. Além disso, o mesmo possui muitos canais ADC (sigla do inglês para *Analogic to Digital Converter*) disponíveis, fazendo com que seja possível a leitura e controle de vários sensores e outros dispositivos. Os principais atributos deste microcontrolador podem ser verificados na Tabela 11. A interface de programação USB permite rapidez e confiabilidade no diagnóstico e atualização do *software*, permitindo assim, em casos de falha no equipamento, uma rápida manutenção do sistema uma vez que é compatível com a maioria dos computadores.

Tabela 11 - Atributos relevantes do microcontrolador TM4C123G.

Propriedades	Característica
Núcleo	ARM Cortex-M4F
Memória Flash	256 KB
Memória RAM	32 KB
Memória EEPROM	2 KB
Desempenho	100 DMIPS – 80 MHz
Conversores Analógico-Digital	2 conversores
Comunicação Serial UART	8 módulos
Saídas PWM	16 saídas

O esquemático do SM pode ser visto na Figura 16, observa-se que existem saídas para os sensores de presença, corrente, tensão e iluminação. O sistema foi preparado para receber uma alimentação de 5V proveniente do sistema de alimentação ininterrupto e possui um CI RM1117T para fornecer 3,3V para os dispositivos internos, uma vez que Tiva e o ZigBee operam nesta faixa de tensão. Além disso, é possível monitorar o estado da bateria do sistema de alimentação através da conexão de monitoramento da fonte, que corresponde a uma saída digital que indica se há ou não tensão fluindo para as baterias.

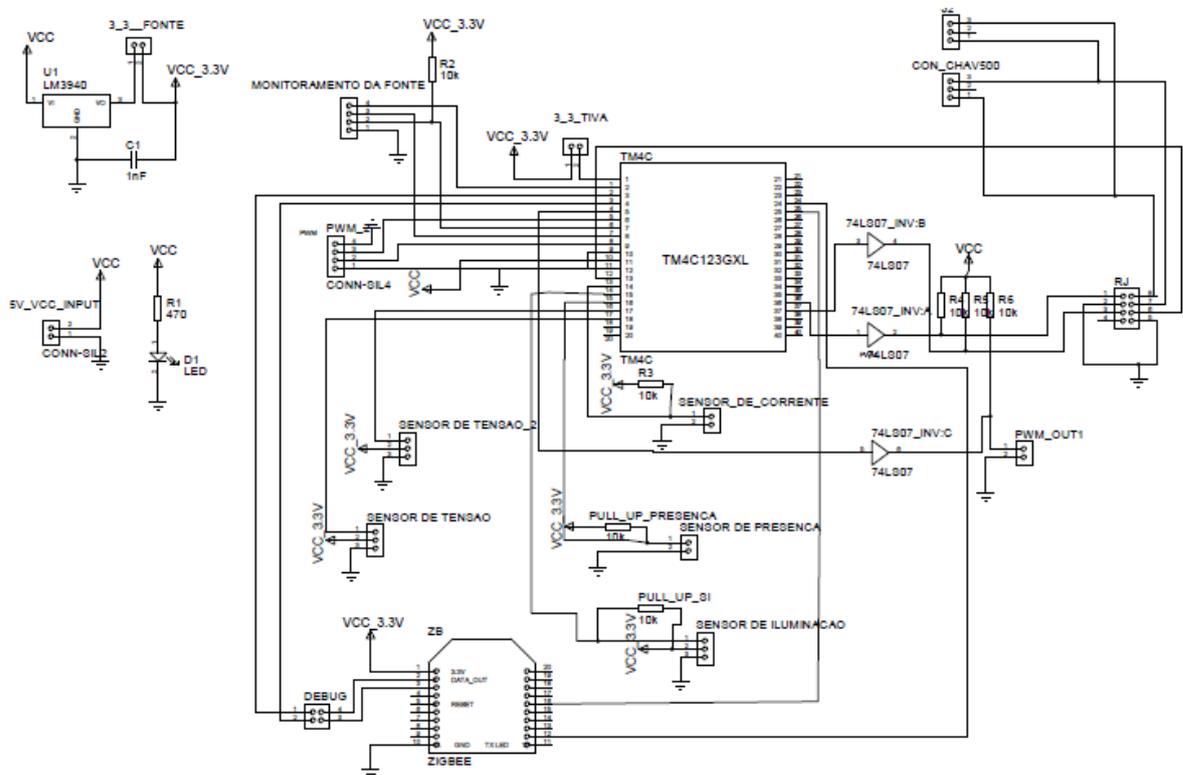


Figura 16 - Esquemático elétrico do SM.

Como um dos pontos mais sensíveis para operação do projeto corresponde ao módulo de comunicação ZigBee, foi adicionada uma entrada de *debug*, que permite que seja realizado facilmente o teste da porta serial do Tiva conectada ao ZigBee.

Para o controle das luminárias foram adicionadas duas saídas de expansão PWM, permitindo a utilização posterior de fontes chaveadas mais complexas, ou outras luminárias conectadas ao mesmo SM, sendo instalada ainda uma entrada adicional para um segundo sensor de tensão.

O módulo de alimentação ininterrupto possui uma bateria, permitindo que o SM possa se comunicar mesmo quando a rede elétrica não esteja operando, garantindo que o sistema seja capaz de informar ao supervisor sobre falhas da rede elétrica em uma certa localidade. Como a maioria das interrupções é resolvida rapidamente o sistema foi projetado para operar por pelo menos duas horas sem fonte de alimentação principal.

O módulo de alimentação realiza o controle da carga de duas baterias de lítio em série (3,6 V cada) com corrente máxima de 650 mA, onde o esquemático do mesmo é mostrado na Figura 17.

O circuito opera de forma a permitir que uma vez que a bateria atinja a tensão máxima, nenhuma carga adicional será entregue a ela, ou seja, à medida que o nível de carga da bateria aumenta em direção ao máximo, a corrente de carga decresce a 0. É esperado que a partir de 95% da capacidade de carga, a corrente que flui pela mesma seja reduzida para alguns miliâmpères. Em teoria, a bateria nunca terminará a carga, ou seja, quanto mais perto ela fica de 100% de carga, menos corrente requer. As resistências R5, R6, R10 e R11 provocam uma alteração na corrente do coletor do transistor Q2, que ajusta o nível de corrente no terminal ADJ do regulador de tensão LM317. Assim, na saída deste é gerado um nível de tensão proporcional na bateria. A resistência R7 seleciona o valor de tensão que a bateria carregará. As capacitâncias C1 e C2 são utilizadas para eliminar ruído e garantir que o CI LM317 não se torne instável.

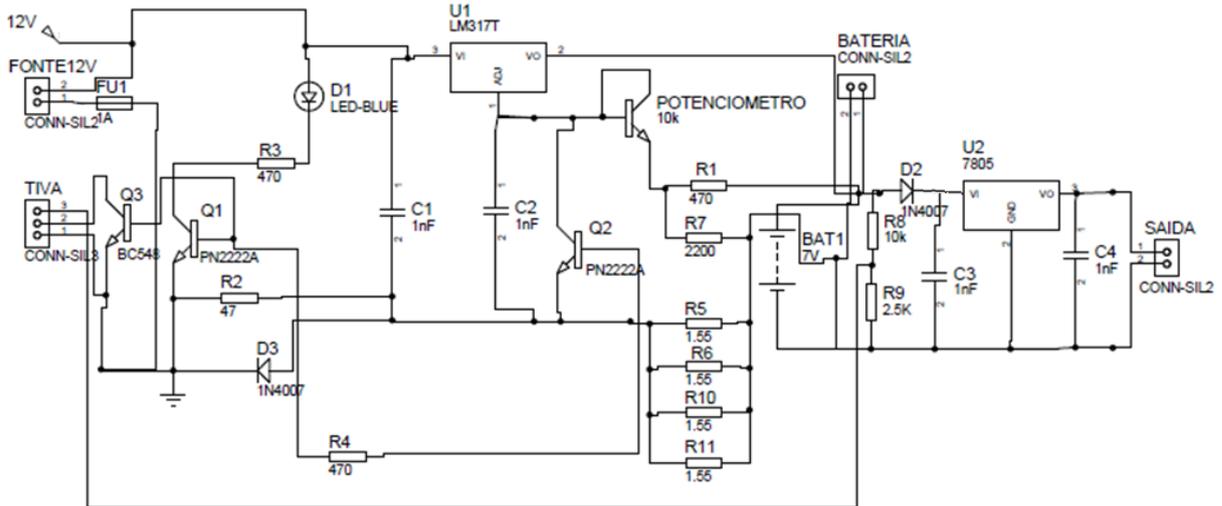


Figura 17 - Esquema elétrico do sistema de bateria.

O algoritmo do dispositivo SM é responsável por reunir as informações dos sensores e gerar sinais de controle para a luminária. O fluxograma simplificado é mostrado na Figura 18. Observa-se que existe um laço principal e interrupções de dimerização e controle automático. A interrupção de processamento de sinais não é representada neste fluxograma devido ao fato de ser abordada posteriormente neste mesmo capítulo em maiores detalhes. Percebe-se que no laço principal são inicializadas as portas seriais, PWM para dimerização e as portas conversoras analógico-digital dos sensores de tensão, corrente e luminosidade, respectivamente.

Após a inicialização das variáveis no laço principal, é verificado continuamente a presença de comandos provenientes da porta serial, sendo a execução dos outros processos realizados através de interrupções temporizadas. Os comandos provenientes do CM são processados e o programa retorna ao laço principal verificando a existência de novos comandos.

O uso de interrupções para execução das outras atividades se faz necessário devido a criticidade das mesmas, o que não permite que estas tenham de concorrer com os tempos de processamento necessários para execução de comandos.

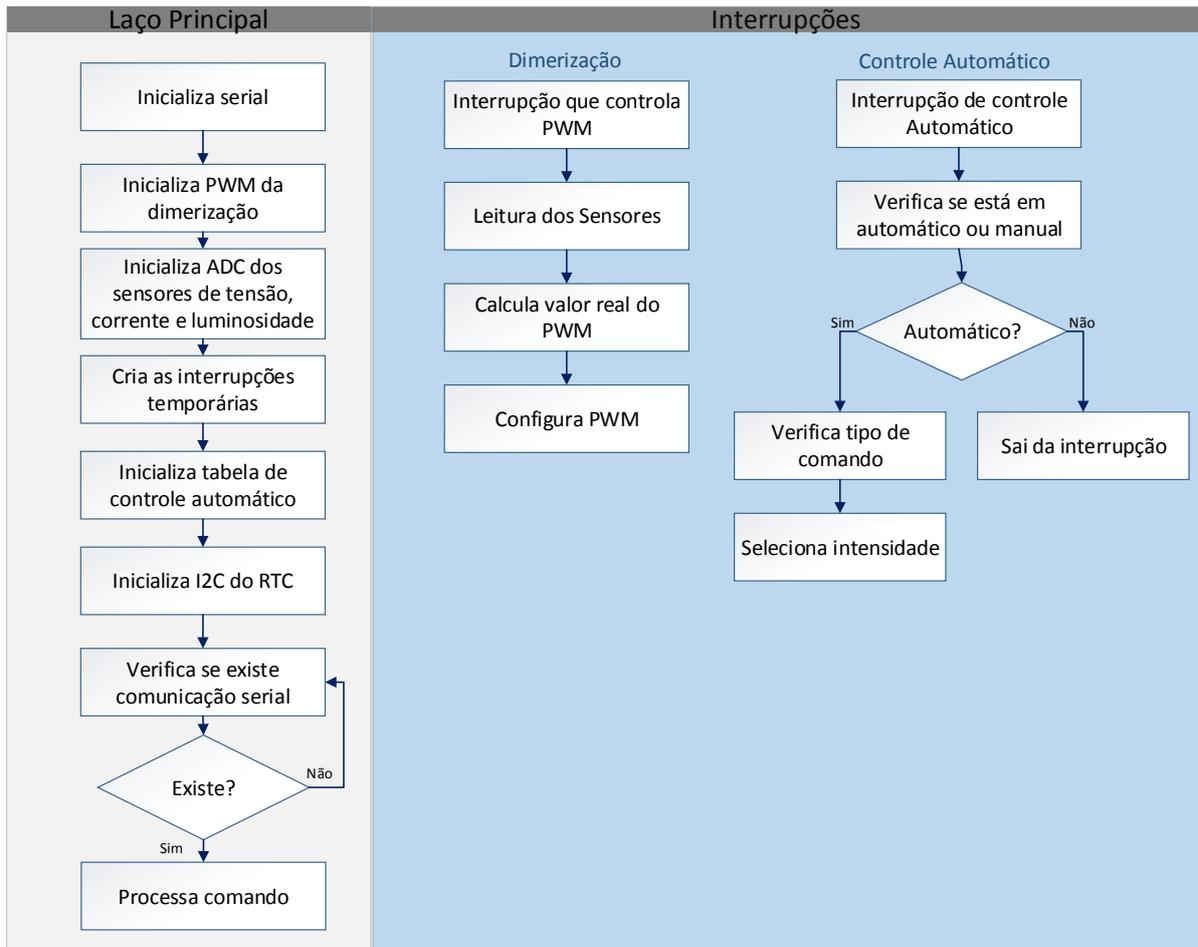


Figura 18 - Esquemático simplificado do algoritmo do dispositivo SM.

O controle automático de luminosidade é processado pelo SM através interrupções periódicas inseridas no código principal. Assim, o SM interrompe a execução do código principal a cada 1 segundo e verifica o tipo de controle automático a ser realizado e em seguida, provê o processamento do mesmo.

Para que o sistema possua uma flexibilidade na operação do sistema, foi desenvolvido um modelo de dimerização baseado em uma tabela de comando, onde o usuário é capaz de realizar a configuração de diferentes esquemas de dimerização a serem alternados a cada 30 minutos. Desta forma as luminárias podem operar em determinados intervalos de tempo baseados na informação de um sensor (luminosidade ou presença), enquanto que durante outros períodos pode apresentar uma taxa de dimerização pré-fixada. Isto se faz necessário, pois diferentes aplicações podem requerer diferentes esquemas de dimerização, implicando em um complexo conjunto de possibilidades para que o sistema possa ser previamente programado.

Pode-se tomar alguns exemplos para ilustrar essa situação. O primeiro caso pode-se utilizar uma rodovia em uma área não povoada, onde neste caso deseja-se que a mesma

permaneça com o mínimo de luminosidade para permitir a segurança da área durante toda a noite e que ocorra o acendimento completo sempre que houver fluxo de veículos pelo local, permitindo o tráfego seguro dos mesmos. Em outra situação, como o estacionamento de um campus universitário, deseja-se que as luminárias permaneçam completamente acessas durante o início do período noturno e até 30 minutos após o período de término das aulas, provendo segurança e acessibilidade para os alunos, e posteriormente, que as mesmas apresentem apenas 50% do brilho no período subsequente, garantindo a segurança do local e respondendo, se necessário à presença de pedestres e veículos.

A tabela programada no microcontrolador contém três colunas, “Tipo”, “Intensidade” e “Critério”. Na Tabela 12 é apresentado um exemplo contendo uma coluna adicional na qual é apresentado o horário onde cada tipo de controle deve ser realizado, tendo o intuito de permitir uma melhor visualização do esquema de dimerização. A coluna Tipo pode assumir quatro valores, “0” para indicar controle de dimerização fixa, “1” para controle de dimerização por tempo, “2” para controle de dimerização através do sensor de luminosidade e “3” para controle através do sensor de presença. A coluna do “critério” é somente aplicável caso o controle de dimerização seja feito pelo sensor de luminosidade, e neste caso representa o valor de fluxo luminoso na qual a luminária deverá ser ligada. A última coluna representa o percentual de luminosidade na qual a luminária deve ser ligada caso o critério seja atendido. Uma vez que ocorra uma interrupção, é verificado se o sistema está em modo automático ou manual, e caso o mesmo esteja em automático é lido o horário através do barramento I2C. A partir do horário lido no RTC, verifica-se a linha correspondente da tabela de controle, e desta forma, é identificado o tipo de controle a ser executado.

O controle apresentado na Tabela 12 mantém o sistema desligado durante o dia, iniciando uma dimerização pelo sensor de luminosidade a partir das 17:30, sendo que a partir das 23:30, o controle passa a ser realizado pelo sensor de presença, simulando assim uma situação semelhante à apresentada pelo segundo exemplo. Foram omitidos os valores entre 8:00 e 15:00 por serem repetidos.

A tabela de controle é individualizada para cada SM e desta forma o sistema de controle permite que parte das luminárias sejam dimerizadas, por exemplo, enquanto outras são mantidas acessas, o que permite ainda mais flexibilidade e potencial econômico ao sistema de iluminação.

Tabela 12 - Tabela de controle automático.

	Tipo	Critério	Intensidade
00:00	3	0	50
00:30	3	0	50
01:00	3	0	50
01:30	3	0	50
02:00	3	0	50
02:30	3	0	50
03:00	3	0	50
03:30	3	0	50
04:00	3	0	50
04:30	3	0	50
05:00	3	0	50
05:30	3	0	50
06:00	2	10	50
06:30	2	10	50
07:00	0	0	0
07:30	0	0	0
08:00	0	0	0
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
15:00	0	0	0
15:30	0	0	0
16:00	0	0	0
16:30	0	0	0
17:00	0	0	0
17:30	2	10	80
18:00	2	10	80
18:30	2	10	80
19:00	2	10	80
19:30	2	10	80
20:00	2	10	80
20:30	2	10	80
21:00	2	10	80
21:30	2	10	80
22:00	2	10	80
22:30	2	10	80
23:00	2	10	80
23:30	3	0	50

4.2 MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS DE REDE

Atualmente, a qualidade da energia elétrica é tema central de vários estudos e pesquisas. Isto pode ser explicado pela importância da mesma para empresas fabricantes de equipamentos, consumidores, empresas que distribuem energia, entre outras. Para classificar os problemas

relacionados à qualidade de energia, existem algumas normas internacionais, entre estas cita-se a IEC 61000-4-30 (IEC, 2008).

Os fenômenos eletromagnéticos podem ser divididos de acordo com o seu tempo de permanência sobre o sinal, sua amplitude e seu conteúdo espectral. Os fenômenos mais comuns nos sistemas elétricos e que estão relacionados a esta norma são os transitórios, harmônicos, desequilíbrio de tensão, distorções nas formas de onda, flutuações tanto de tensão quanto de frequência e variações de curta e longa duração na tensão.

As variações de tensão, sejam curtas ou não, são geralmente causadas por condições de falta, perda intermitente de conexão nos cabos, energização de grandes cargas que precisam de altas correntes de partida, entre outros motivos. As variações de curta duração são classificadas de acordo com a duração, ou seja, 0,5 ciclo à 30 ciclos e caracteriza-se por variações instantâneas, já as momentâneas ou temporárias por 30 ciclos à 3 segundos e 3 segundos à 1 minuto. Estas faltas podem causar:

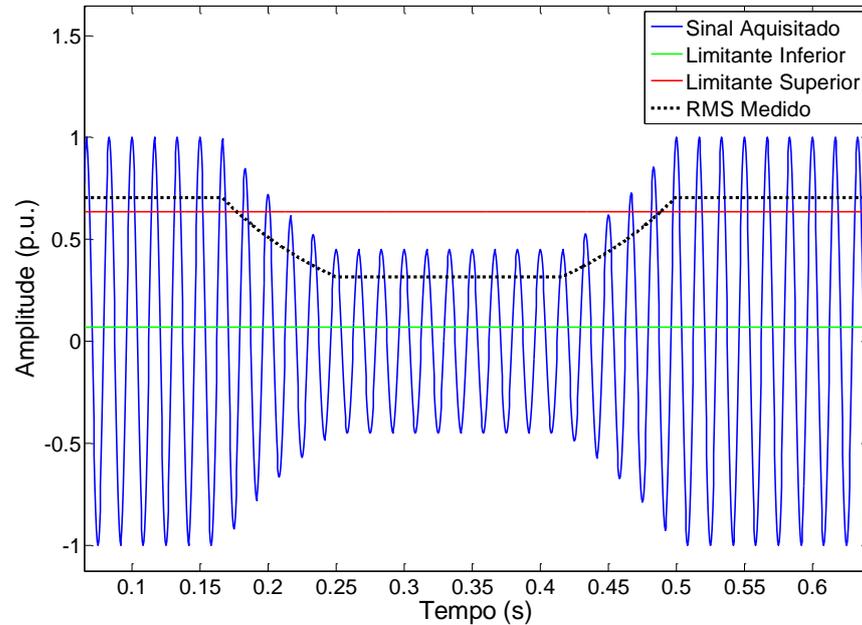
- **Afundamento de tensão (Sag):** Caracteriza-se por uma breve redução do valor eficaz de tensão, igual ou superior a 10% e inferior a 90%;
- **Elevação de tensão (Swell):** Define-se por um aumento superior a 110% e inferior a 180% do valor eficaz da tensão;
- **Interrupção de tensão:** Caracteriza-se por um decréscimo para um valor inferior a 10% do valor da tensão eficaz do sistema por um período de até 1 minuto.

As variações de tensão de longa duração possuem uma duração superior a 1 minuto e são classificadas em:

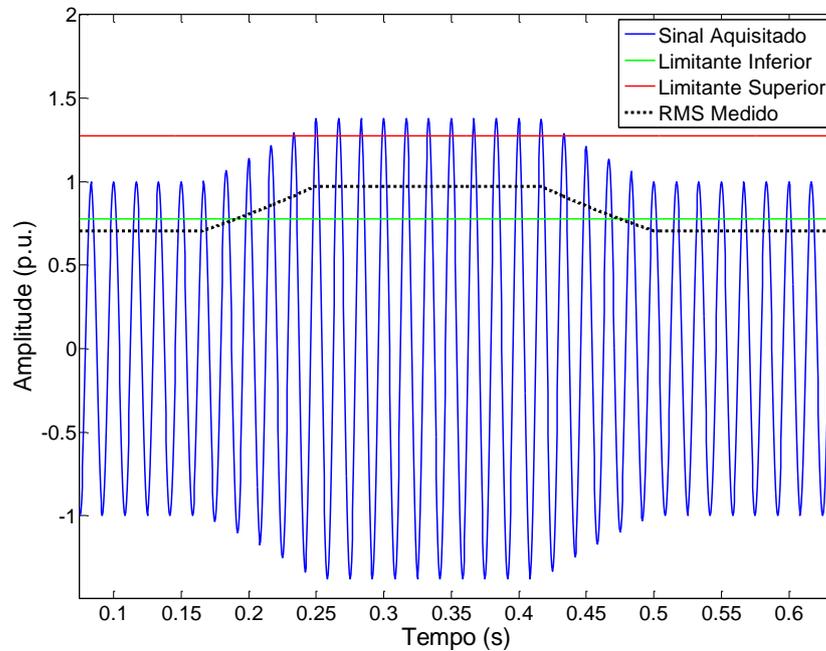
- **Sobretensão:** Define-se como um acréscimo superior a 110% da tensão eficaz com duração superior a 1 minuto;
- **Subtensão:** Caracteriza por um decréscimo inferior a 90% da tensão eficaz durante um tempo superior a 1 minuto;
- **Interrupção sustentada:** Ocorre quando o valor eficaz da tensão permanece em zero por um tempo superior a 1 minuto.

Para ilustrar essas elevações e afundamentos da tensão da rede que são detectadas no algoritmo do SM, conforme a norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2008), é apresentada a Figura 19. Na Figura 19 (a) é exemplificada a ocorrência de um *sag* no sinal da rede normalizado em p.u. a partir do quinto ciclo, com duração de três ciclos e meio. Já, na Figura 19 (b) é mostrado o evento *swell* no sinal da rede também a partir do quinto ciclo e com mesma duração do fenômeno anterior. Os limitantes superiores e inferiores para a caracterização de um *sag* são

definidos segundo a norma IEC 61000-30-4 como 90% e 10% do valor RMS nominal, e para a caracterização do evento *swell* os limitantes devem ser de 110% e 180% do valor RMS regulamentado. Ressalta-se ainda que a norma define um valor de 1% do valor nominal de RMS como histerese. Sendo 1% a mais para o evento *sag* e 1% a menos para o evento *swell*.



(a)



(b)

Figura 19 - Ilustração do comportamento destes eventos. (a) Representação de um *sag* no sinal. (b) Representação de um *swell* no sinal.

A análise do conteúdo espectral do sinal da rede elétrica é relevante para a qualidade de energia uma vez que existem vários efeitos degradantes causados pelas componentes harmônicas presentes na rede, tais como sobrecarga nos capacitores, podendo causar condições de ressonância, perda de potência e diminuição da vida útil dos equipamentos conectados à rede elétrica (MOHAN, 2012). Esta condição não desejada presente no sinal da rede pode ser visualizada na Figura 20, onde o sinal é distorcido pela 3ª e 7ª harmônica com amplitudes de 30% e 20%, respectivamente.

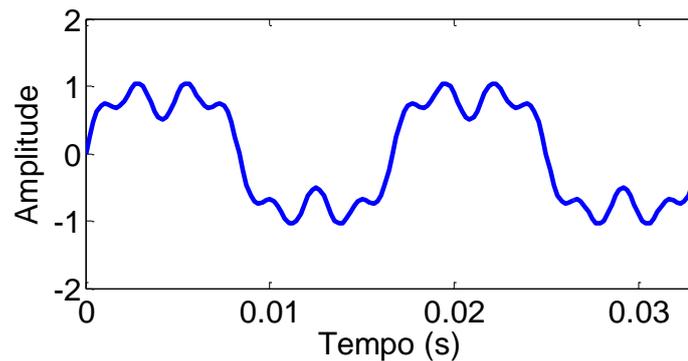


Figura 20 - Sinal distorcido pela 3ª (30%) e 7ª (20%) harmônica.

Existem vários equipamentos disponíveis comercialmente com a finalidade de monitorar a qualidade de energia através da detecção dos problemas dos sistemas elétricos citados anteriormente. Contudo, estes equipamentos, por sua maioria, são caros, pouco acessíveis ou mesmo possuem limitação na identificação de certos problemas.

Devido a isso, neste trabalho foi desenvolvido um sensor de tensão para ser conectado entre a entrada do SM e a rede elétrica a fim de fornecer dados sobre o estado da tensão na entrada do *driver* da luminária, o que permite a análise de alguns parâmetros relacionados à qualidade de energia. O esquemático do mesmo é apresentado na Figura 21. Considerando-se que cada luminária monofásica estará alocada em uma determinada fase do sistema, torna-se possível o monitoramento das três fases, conforme mostrado na Figura 22.

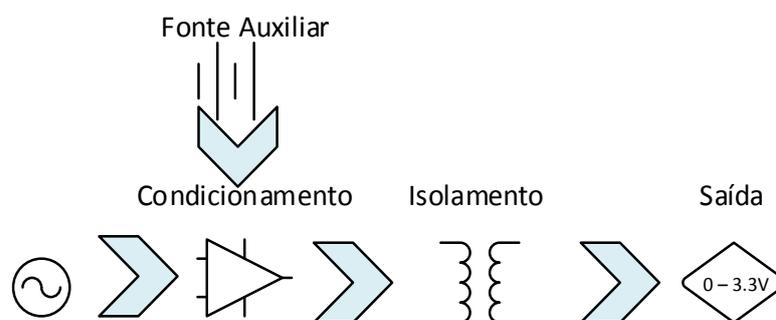


Figura 21 - Esquemático do sensor de tensão.



Figura 22 - Diagrama de distribuição das luminárias às fases da rede elétrica em vários setores.

O esquemático elétrico do sensor de tensão pode ser visualizado na Figura 23. O condicionamento de tensão é realizado em etapas, primeiramente a tensão alternada da rede é reduzida utilizando-se um transformador com núcleo fabricado com uma liga de ferrosilício 52 (baixa histerese), permitindo então que sinais de até 20kHz tenham distorção de amplitude minimizada. A tensão máxima no enrolamento primário é de 300 V de pico entre as conexões de enrolamentos 1-2 ou 2-3 e de 600 V de pico entre a conexão de enrolamento 1-3. Já a tensão máxima no enrolamento secundário é de 3 V de pico (300V) ou 6 V de pico (600V).

Na saída do transformador foram conectados dois amplificadores operacionais. O primeiro amplificador tem a função de fornecer uma tensão centrada igual a metade da tensão de alimentação CC, esta referência será somada a onda de saída do transformador de forma a controlar o nível médio da onda. Isto faz-se necessário devido a saída do transformado produzir valores negativos e positivos, enquanto o conversor ADC permite apenas valores positivos entre 0 e 3,3V.

O segundo amplificador operacional tem uma dupla função. Primeiramente atua como somador, adicionando a tensão de referência produzida pelo primeiro amplificador à onda advinda do transformador. Sua segunda função consiste em ponderar o valor de tensão produzido pela soma das ondas de entrada de forma que o valor de saída fique compreendido entre 0 e 3,3V.

Os amplificadores operacionais foram selecionados de forma a permitir que o circuito fosse construído utilizando-se apenas de uma fonte de tensão positiva de 3,3V, eliminando

assim a necessidade de construção de fontes simétricas reguladas para conversão do sinal e também possivelmente ruídos de chaveamento.

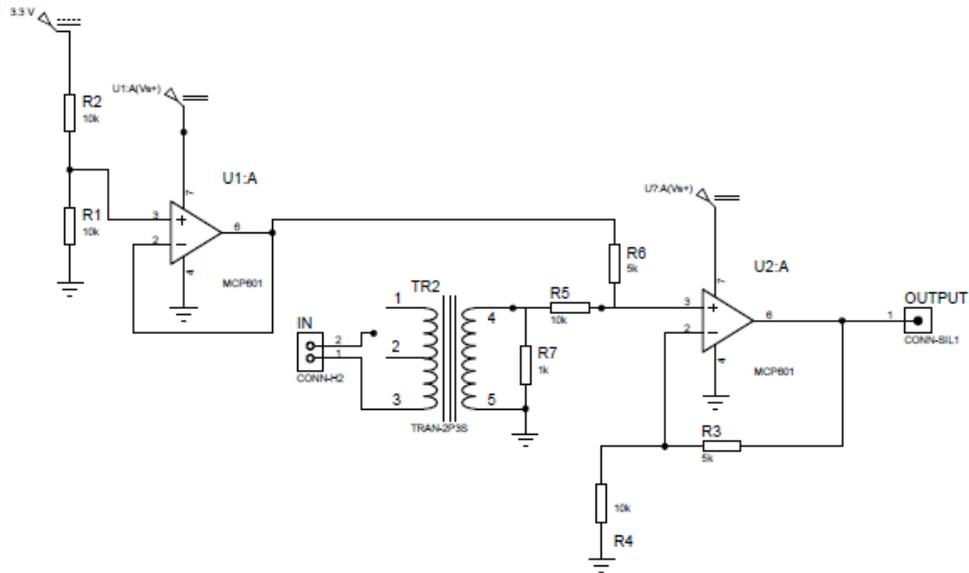


Figura 23 - Esquemático do sensor de tensão.

Assim, através do cálculo do valor RMS da tensão detectada, foram desenvolvidas algumas funções básicas, tais como a detecção de afundamentos, elevações e interrupções da rede elétrica. O fluxograma de funcionamento da aplicação de qualidade de energia do SM é apresentado na Figura 24. Outras análises que não necessitam de serem feitas em tempo real e demandam maior esforço computacional, como por exemplo, a análise espectral que se baseiam em algoritmos de DFT (sigla do inglês para *Discrete Fourier Transform*), serão executadas pelo sistema supervisor através dos dados enviados por oscilografia da tensão da rede.

A fim de detectar corretamente esses eventos de qualidade de energia e atender as exigências da norma, é preciso definir as especificações de *hardware*. Segundo a norma IEC 61000-4-30 (2003), para um equipamento classe “A”, é necessário que seja medido até o quinquagésimo harmônico em um sistema que possui uma frequência fundamental de 60 Hz com uma resolução de 5 Hz no domínio da frequência.

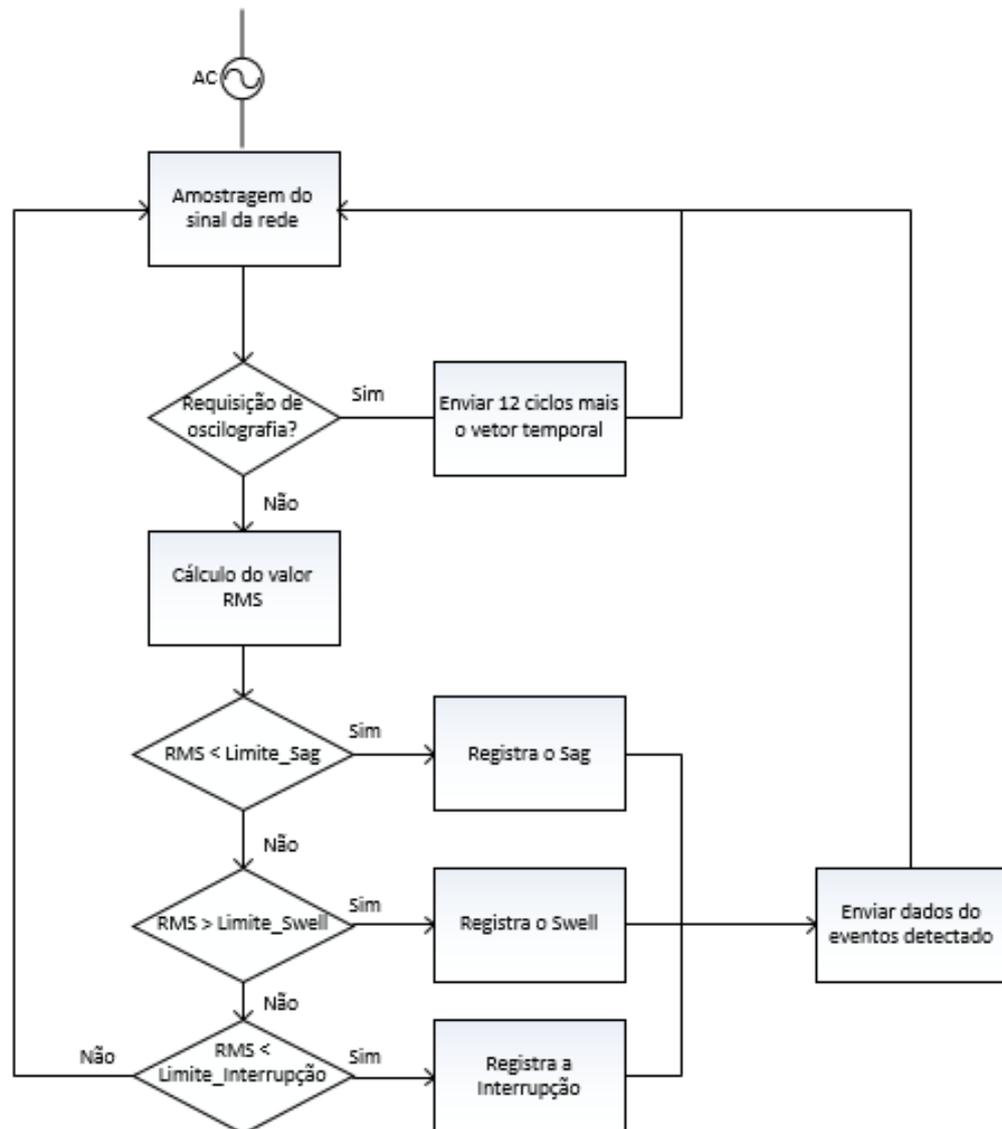


Figura 24 - Fluxograma de cálculo das funções de qualidade de energia.

Conforme mostrado na Figura 24, é realizada inicialmente a amostragem do sinal da rede. Em seguida é verificado se o usuário solicitou a análise espectral do sinal, sendo realizado o envio dos 12 ciclos para o servidor. Já, em caso negativo é realizado o cálculo do valor RMS e verificado a existência de distúrbios. Esta última etapa é descrita em detalhes na Figura 25. O valor RMS ou mesmo valor eficaz, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável que estima um valor CC que forneceria a mesma potência do circuito CA. O seu nome vem do simples fato de que sua medida é a raiz (do inglês *root*) quadrada da média (do inglês *mean*) do valor quadrado (do inglês *square*) da função. Este valor é calculado de acordo com a norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2008), cuja expressão que sugere a utilização do valor RMS de tensão de meio ciclo, para uma série de valores discretos, pode ser vista através de (4.1). Onde

N é o número de amostras em um ciclo inteiro do sinal conforme apresentado na equação (4.2), sendo f_s a frequência de amostragem, f a frequência fundamental da rede e v_i o valor de tensão de uma determinada amostra i de tensão da rede.

$$V_{rms_{\left(\frac{1}{2}\right)}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^2} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N}} \quad (4.1)$$

$$N = \frac{f_s}{2 \cdot f} \quad (4.2)$$

Note que o valor de tensão RMS é calculado para cada ciclo completo, porém o mesmo deve ser atualizado a cada passagem por zero, ou seja, a cada meio ciclo, conforme recomendado pela referente norma. É possível ver na Figura 25 que a aquisição de uma nova amostra é sempre comparada com a amostra anterior com a finalidade de verificar a passagem por zero, já que esta indica o fim de um semi-ciclo. Ressalta-se que enquanto o semi-ciclo não tiver completo, as amostras são utilizadas para o incremento de um *buffer* que conterà as amostras referentes a meio ciclo para serem utilizadas no somatório da equação (4.1). Caso contrário, finaliza-se o cálculo do valor RMS referente a um ciclo inteiro utilizando os dois *buffers* que possuem as amostras de cada semi-ciclo. Observa-se que este *buffer* é inicializado com valor nulo, impossibilitando que a primeira iteração resulte no valor do RMS de um ciclo completo. Porém, a partir do segundo meio ciclo, torna-se possível que a saída do algoritmo seja o valor RMS de um ciclo completo atualizado conforme a referida norma.

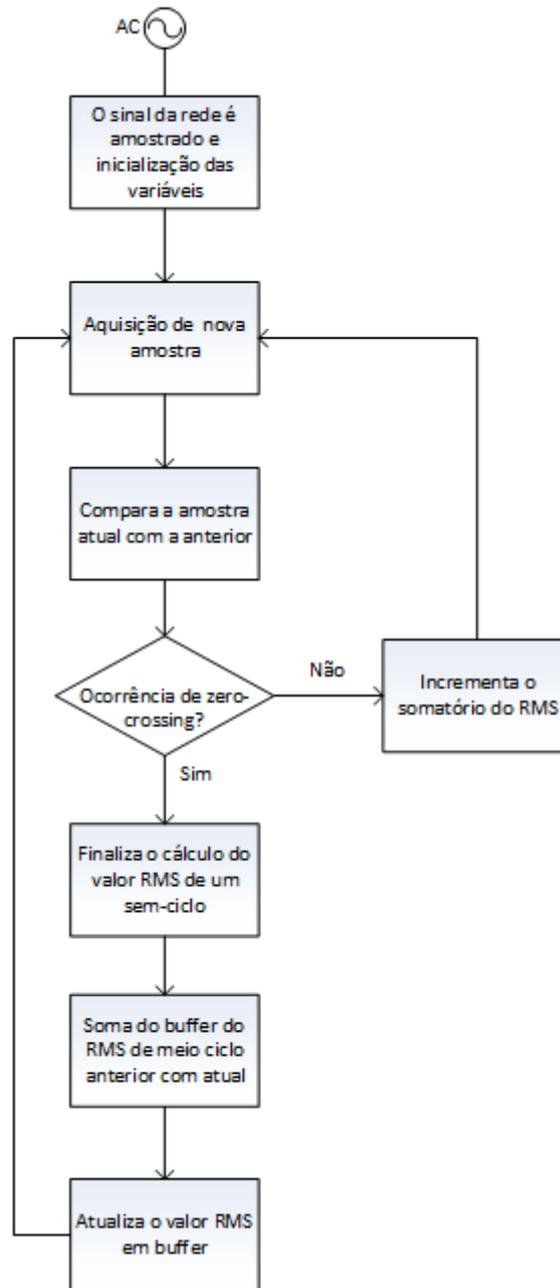


Figura 25 - Forma de cálculo do valor de tensão RMS de meio ciclo.

Note que, para a correta detecção da passagem por zero de um sinal corrompido por ruído, é necessário que o sinal de entrada do sensor de tensão seja filtrado evitando contagens indevidas. O filtro escolhido para essa finalidade foi a SWRDFT (sigla do inglês para *Slide Window Recursive Discrete Fourier Transform*), que possui rápida atenuação próxima a frequência fundamental e remoção de harmônicos, e sua função de transferência é apresentado em (4.3).

$$H_{SWRDFT}(z) = \frac{1 - z^{-L}}{1 - e^{j2k\pi/L}z^{-1}} \quad (4.3)$$

Onde L é o número de amostras por ciclo e k é a componente harmônica que se deseja filtrar. Para o caso em que se deseja medir a passagem por zero da componente fundamental, se L é escolhido como o número de amostras dentro de um ciclo inteiro, k deveria ser escolhido como 1, porém com o intuito de evitar cálculos com números complexos em *hardware*, optou-se por utilizar k igual a zero. A resposta em magnitude do filtro selecionado é apresentada na Figura 26. Note que o filtro desenvolvido é um filtro passa baixa, com boa atenuação das frequências próximas à componente fundamental e eliminação de componentes harmônicos. A vantagem deste tipo de filtro recursivo é em detrimento de sua simplicidade de implementação bem como sua característica de fase linear, o que não é fácil de se obter com filtros passa baixa como *Butterworth*, *Chebyshev*, entre outros que para a mesma frequência de corte, possa precisar de ordens mais elevadas e conseqüentemente maior esforço. Para que o sinal da rede elétrica esteja na banda de passagem é preciso realizar a modulação do sinal com a frequência fundamental.

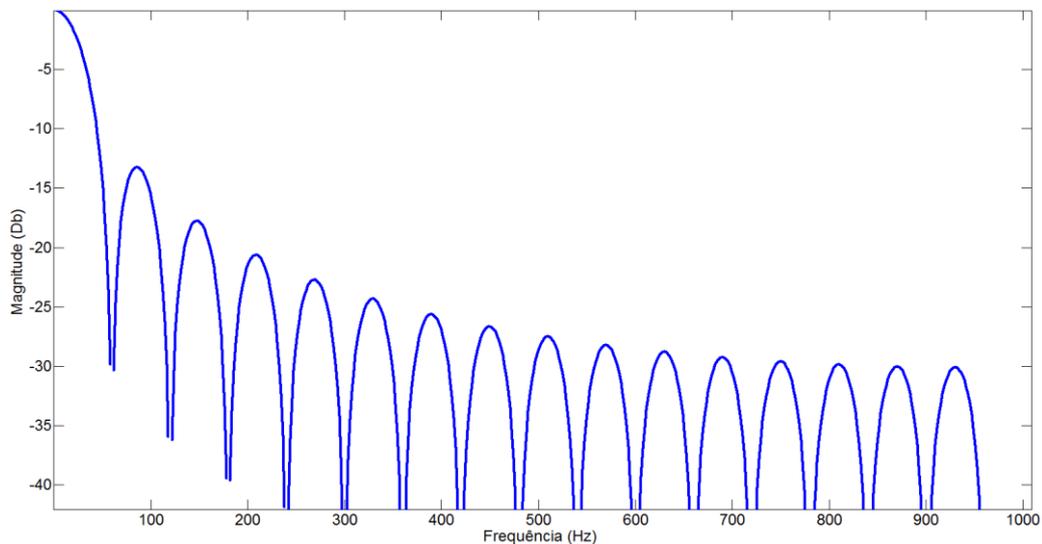


Figura 26 - Resposta em magnitude do filtro DFT recursivo.

A estrutura de modulação é apresentada na Figura 27. Note que a saída do filtro do sinal modulado será constante e igual a amplitude da componente fundamental, sendo, portanto, necessário a modulação da saída de forma a obter a componente fundamental filtrada. Ressalta-se a importância de fazer a modulação utilizando-se de funções seno e cosseno para que seja

possível obter as componentes em fase e em quadratura, levando em consideração as variações do ângulo de fase do sinal. A soma de suas modulações equivale à componente fundamental.

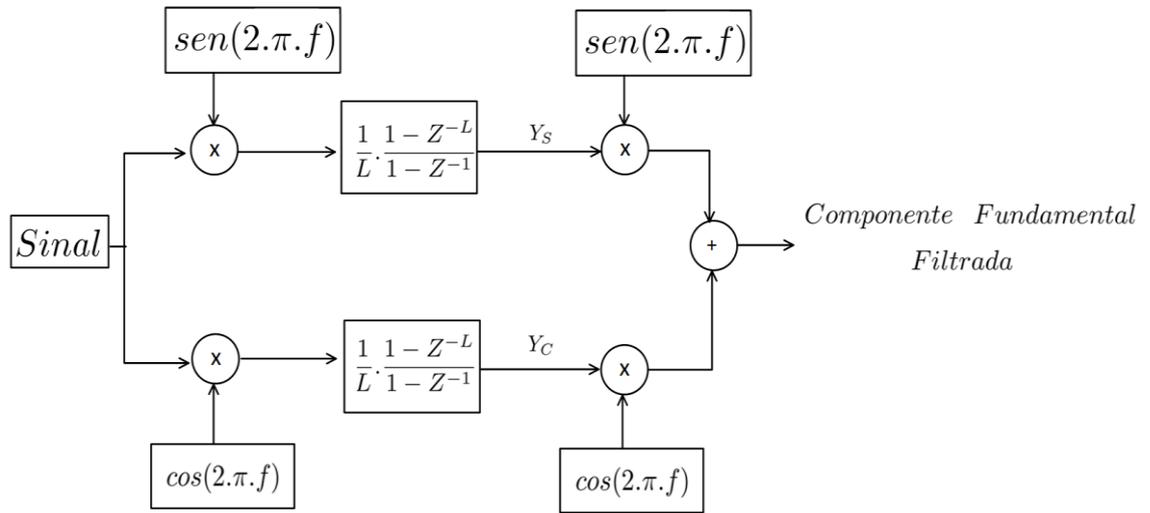


Figura 27 - Estrutura de filtragem baseada na SWRDFT.

O resultado da filtragem é apresentado na Figura 28, na qual um sinal com SNR (sigla do inglês para *Signal to Noise Ratio*) de 30 dB foi filtrado. Note que o ruído foi removido, com pouca alteração da forma de onda da componente fundamental, não acarretando erros na contagem das passagens por zero. Vale ressaltar que o cálculo do valor RMS de cada ciclo é realizado considerando a forma de onda original, sendo o sinal filtrado utilizado apenas para reconhecer os instantes de cada meio ciclo a ser utilizado na equação (4.1).

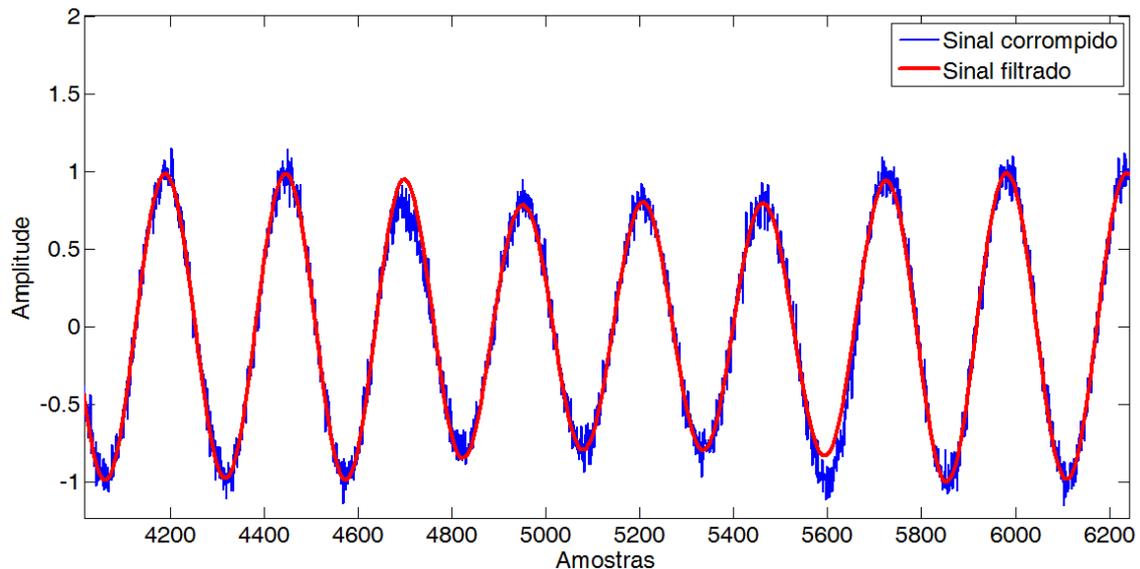


Figura 28 - Filtragem do sinal de entrada desconsiderando o regime transitório.

4.3 ACIONAMENTO DO LED

Atualmente, existem uma infinidade de dispositivos que podem ser facilmente encontrados comercialmente e que são ainda capazes de operar em redes de controle para sistemas de iluminação. Voltando-se para estes tipos de sistemas, citam-se o ActiLume DALI (ACTILUME, 2014) da fabricante Philips e o DALI PRO PB Coupler (DALI PRO, 2014) da fabricante OSRAM. Estes equipamentos contêm sensores e controladores que são integrados de forma fácil nas luminárias e também possuem compatibilidade com o protocolo DALI, permitindo assim o gerenciamento da iluminação e atingindo uma economia de até 75% no consumo de energia. Como pode ser notado, os sistemas tradicionais estão evoluindo para um conceito inteligente, sendo capazes de agregar várias tecnologias. O requisito prévio para este tipo de sistema é que a luminária tenha alta eficiência, baixo impacto ambiental e flexibilidade para executar dimerização. Desta forma, a tecnologia à LED é a mais adequada. Será abordado de forma detalhada nos itens a seguir o sistema de iluminação utilizado e as estratégias de controle escolhidas para realização da dimerização de forma mais otimizada.

4.3.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO UTILIZADO

O LED é um tipo de diodo que possui uma curva característica de tensão por corrente mostrada na Figura 29, no qual pequenas variações de tensão podem levar a grandes variações de corrente sobre o mesmo. Dessa forma, em geral, para o acionamento destes dispositivos, são aplicados conversores CC devido às características de performance e eficiência. Uma grande vantagem na utilização de luminárias a LED é a facilidade no controle do fluxo luminoso, podendo ser utilizadas técnicas de controle por corrente nos conversores, admitindo o ajuste de acordo com condições externas que permitem menor consumo no decorrer do dia, contrastando com as lâmpadas a alta pressão, cujo controle de luminosidade é inviável nos sistemas atuais de iluminação.

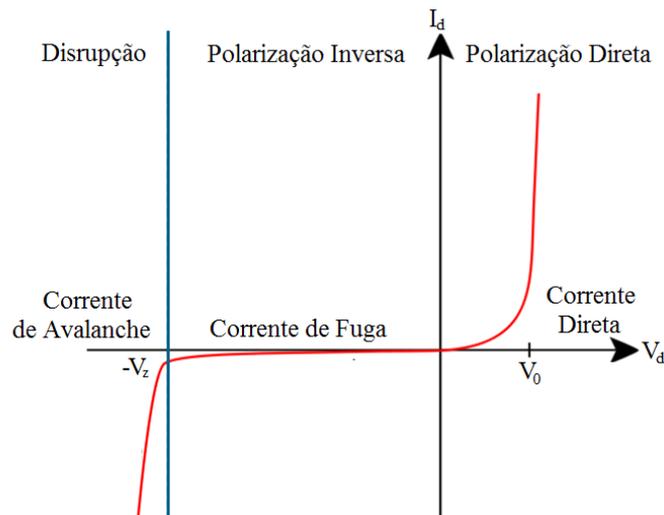


Figura 29 - Curva de corrente vs. tensão de um LED.

Neste trabalho utilizou-se um driver capaz de permitir o controle da lâmpada de forma eficiente durante toda a faixa de acionamento dos LEDs. De forma a obter um bom resultado, optou-se pela utilização do driver ELN-60 series da fabricante MeanWell (MEANWELL, 2014). O diagrama do conversor é apresentado na Figura 30 e os principais parâmetros de funcionamento na Tabela 13. É possível observar que o driver possui uma potência de 63W, compatível com algumas luminárias para iluminação publica.

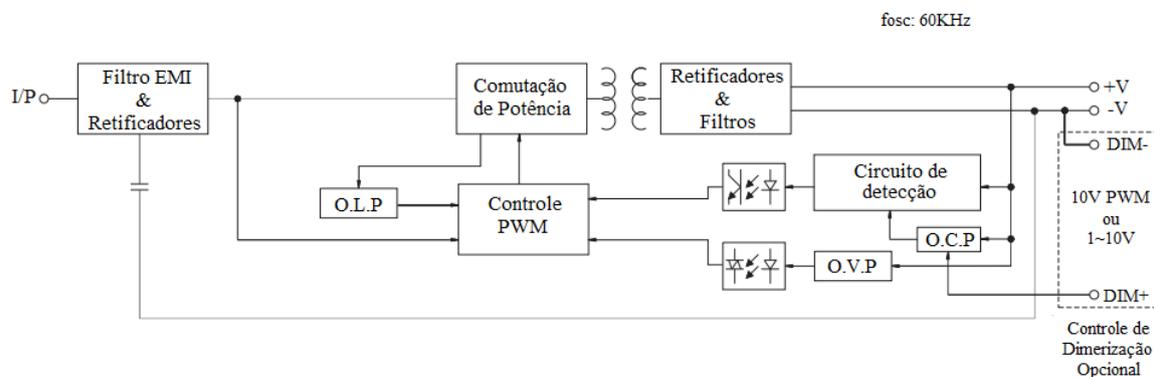


Figura 30 - Diagrama do conversor utilizado neste trabalho. (MeanWell, 2014).

Tabela 13 - Principais parâmetros do conversor utilizado neste trabalho.

Parâmetro	Valor
Tensão de saída	13.5-27V
Tensão de entrada	127-370 V
Frequência	47-63 Hz
Corrente nominal	2.3 A
Potência nominal	62.1 W
Frequência de PWM	100Hz-3KHz
Eficiência	87%

A luminária à LED utilizada neste trabalho é composta por 36 LEDs do tipo Nichia NF2L757ART SW30 / P16-V1 - P18 / R8000 da Fabricante Everlight. A disposição física deste arranjo é apresentada na Figura 31 e a distribuição espectral na Figura 32.

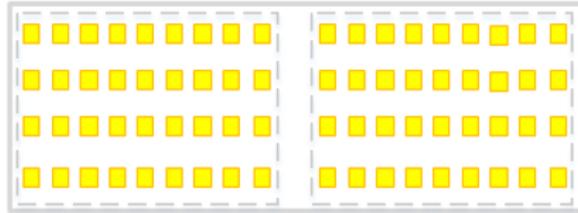


Figura 31 - Disposição física do arranjo de LEDs.

Como pode ser observado, a curva espectral apresentada pelo LED apresenta uma boa correlação com a curva espectral padrão CIE (1983). Isto indica que a maior parte da luminosidade produzida pelo LED será visível ao olho humano e, portanto, aproveitada para iluminação efetiva.

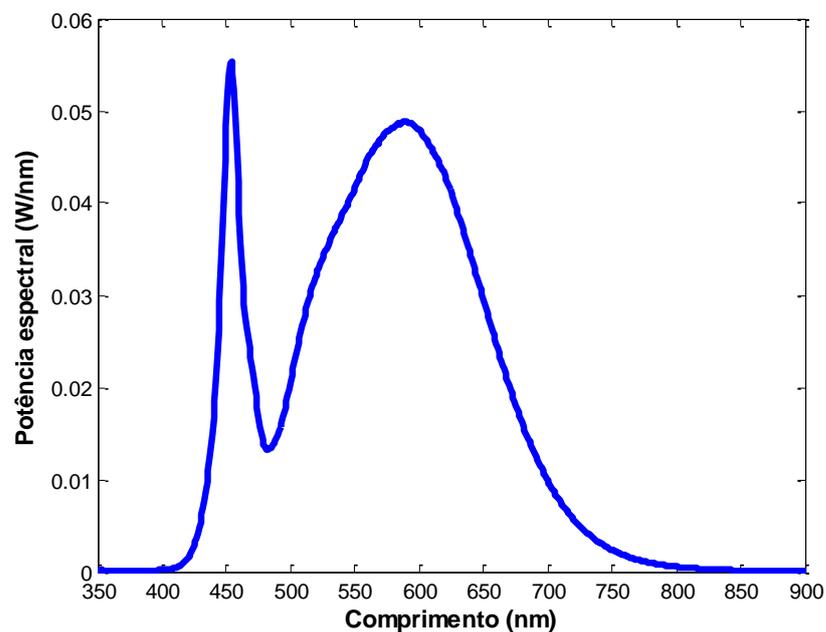


Figura 32 - Distribuição espectral do arranjo de LEDs.

4.3.2 ESTRATÉGIA DE DIMERIZAÇÃO

O método de dimerização deve ser tal que garanta uma corrente de pico constante nos LEDs. Existem duas principais técnicas encontradas na literatura para dimerização das lâmpadas à LED. A mais simples, chamada de dimerização por modulação de amplitude ou

dimerização analógica, baseia-se na variação linear da corrente de saída para uma luminosidade adequada, aproveitando-se da vantagem da linearidade existente entre a corrente de injeção e a luminosidade de saída dos LEDs. Contudo, uma das piores desvantagens deste método encontra-se no fato do desvio do nível de cromaticidade. Contrariamente, a dimerização por PWM (*Pulse Width Modulation*) é baseada no chaveamento da lâmpada de LED, alternando-a entre ligado e desligado, de forma que a corrente direta eficaz seja a média do sinal modulado, mantendo uma corrente de pico constante. Contudo, tem como desvantagem a lógica adicional para criar essas formas de onda com largura de pulso variável (GACIO et al, 2012). Vale ressaltar que a frequência de chaveamento deve ser maior que a frequência perceptível pelo ser humano com o intuito de evitar o efeito visual de iluminação intermitente, referenciado na literatura pelo termo *flicker*. Para fins práticos, frequências acima de 500 Hz são suficientes.

Para esse tipo de controle do sistema de iluminação, é preciso a geração do sinal de PWM. O algoritmo deve garantir uma largura de pulso ajustável de forma a permitir o controle da corrente direta eficaz. A porcentagem em que o sinal permanece em estado alto é denominada de *duty cycle*, ou seja, razão cíclica. Na Figura 33 é apresentado um exemplo de sinal PWM com frequência de 1 KHz e *duty cycle* alterando de 30% para 80%. Note que com essa mudança o valor médio eficaz passa de 0.3 p.u para 0.8 p.u., conforme esperado.

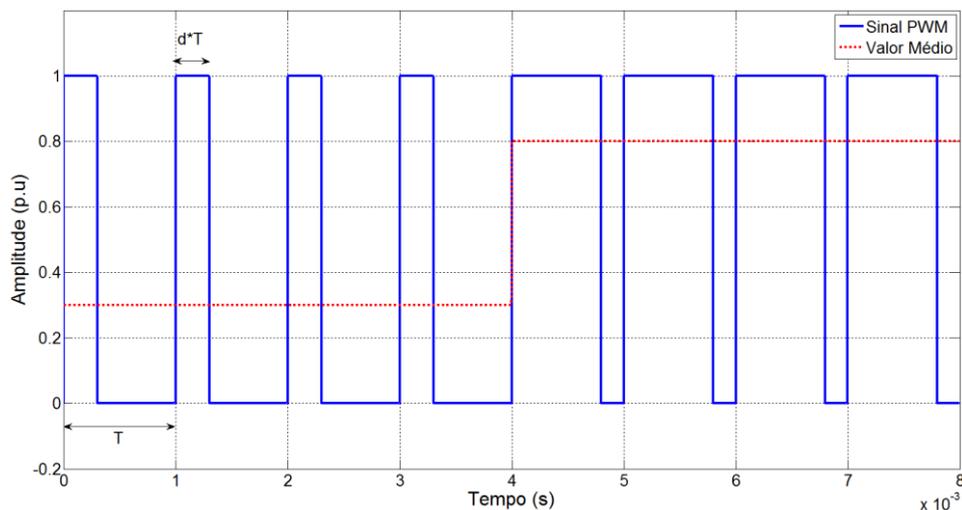


Figura 33 - Estratégia de dimerização utilizada neste trabalho.

4.4 SENSORES PARA CONTROLE AUTOMÁTICO DA LUMINOSIDADE, CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E MEDIÇÃO DE CORRENTE

Com o intuito de inserir capacidades autônomas ao dispositivo e conseqüentemente melhorar a eficiência e confiabilidade, os equipamentos SM e CM foram acoplados com diversos sensores. Foram inseridos sensores de luminosidade e presença para auxiliar no controle de luminosidade e acionamento das lâmpadas; sensores de umidade e temperatura para prover informações das variações climáticas da região; e para que estas informações tenham uma estampa coerente de tempo, os dispositivos foram equipados também com um RTC (sigla do inglês para *Real Time Clock*).

No contexto de confiabilidade das informações trocadas entre os dispositivos, os sensores de umidade e temperatura provêm formas de se estimar o quão confiável são os eventos transitórios ou queima de luminárias detectadas dependendo das condições climáticas, visto que distúrbios elétricos na rede são mais comuns em período chuvoso além de interferências eletromagnéticas mais intensas que podem atrapalhar o canal de comunicação.

O sensor de luminosidade tem como principal função estimar a iluminância do ambiente no qual a luminária está inserida, de forma que o algoritmo de controle possa definir o brilho e consumo ideal das luminárias para uma determinada situação, garantindo dessa forma o uso mais racional da energia elétrica para iluminação pública. O sensor de presença também auxilia nessa economia, uma vez que consegue detectar presença de pedestres em certas regiões com pouco movimento, permitindo que o fluxo luminoso seja baixíssimo até que a presença de um passante seja detectada, momento em que a iluminação deve voltar as condições normais em acordo com as normas vigentes de iluminação.

Existem diversas formas para realizar a estimação da iluminância, entre elas as mais importantes são por meio de fotodiodos, fotoresistências ou fototransistores, cada um com suas especificidades e desempenho. Para esta tarefa usualmente as concessionárias de energia elétrica fazem uso de sensores do tipo LDR (sigla do inglês para *Light Dependent Resistor*) que são embutidos em fotocélulas. A instalação destes dispositivos usualmente se dá por postes ou por rua, sendo sua regulagem essencial para que não ocorra desperdício de energia, ligando e desligando as lâmpadas no momento certo. Um fator crucial a ser analisado quando se pretende medir a luminosidade do ambiente com maior precisão, é a linearidade com a qual o fluxo luminoso interfere no sensor.

A utilização de LDR, como sensor de luminosidade, não permite que seja realizada uma medição acurada da luminosidade presente no ambiente, haja visto que o mesmo não possui

uma relação muito linear entre a luminosidade incidente e a resistência apresentada, tal como apresentado na Figura 34. Assim, neste trabalho utilizou-se a micro célula solar modelo BPW34 (VISHAY SEMICONDUCTORS, 2015), onde este dispositivo gera uma tensão nos seus terminais em função da radiação incidente. Sua banda espectral varia entre 430 e 1100 nm, com uma relação bem linear entre radiação e luminosidade, além de baixo tempo de resposta e pouca variação à temperatura. Na Figura 35 é possível observar o gráfico de corrente versus irradiação. Percebe-se que existe uma relação fortemente linear entre essas variáveis para uma dada temperatura, permitindo uma medição acurada.

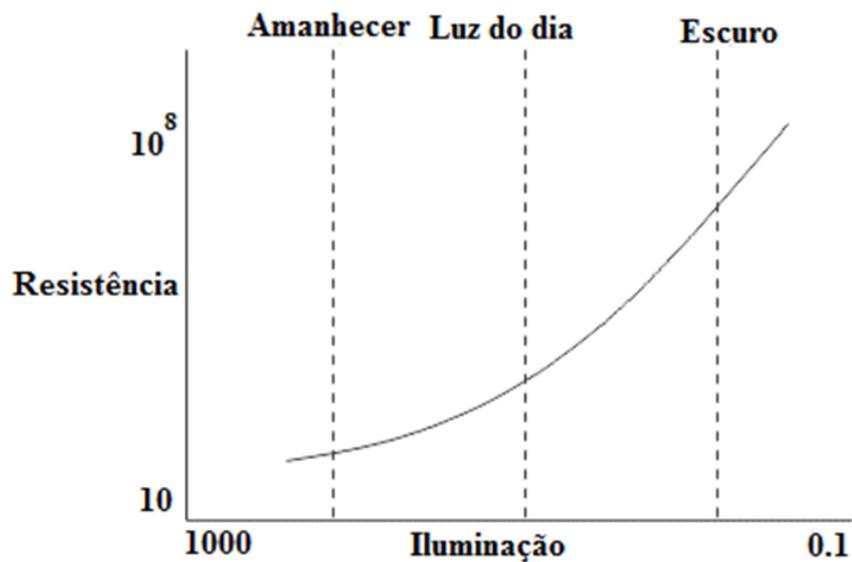


Figura 34 - Curva de resposta do LDR.

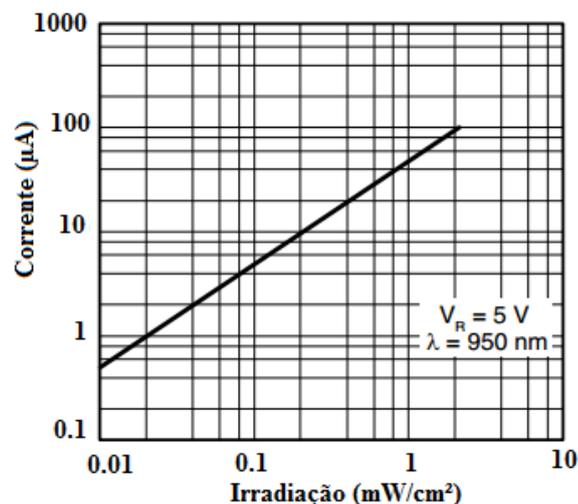


Figura 35 - Corrente versus irradiação da micro célula solar BPW34 (VISHAY SEMICONDUCTORS, 2015).

Na Figura 36 é mostrado um gráfico de sensibilidade espectral da célula solar BPW34, este gráfico possui uma boa correlação com o espectro de frequências apresentado pela luz solar, indicando, portanto, uma boa sensibilidade do sensor para a mesma.

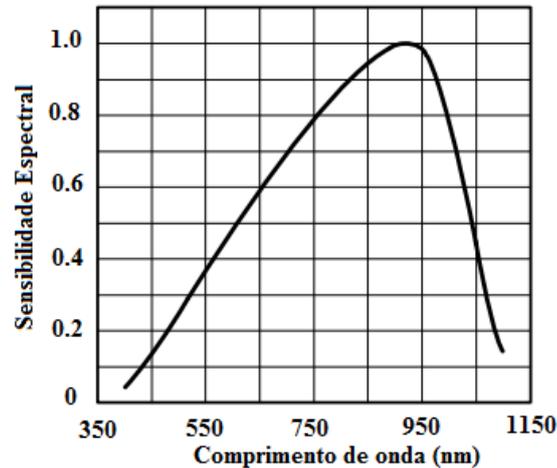


Figura 36 - Sensibilidade espectral da micro célula solar BPW34 (VISHAY SEMICONDUCTORS, 2015).

O sensor de presença ou também sensor de movimento é responsável por captar a presença de pessoas através da reflexão de raios de luz infravermelha, ou seja, será ativado quando uma pessoa entrar em seu raio de detecção. Neste trabalho utilizou-se o sensor microcontrolado frontal modelo SBF0ZD, devido ao fato de ser encontrado facilmente no mercado e possuir um alcance de até 12 metros e com 110° de cobertura.

Utilizou-se também um sensor de corrente com a finalidade de medir e monitorar a corrente da luminária e realizar estudos sobre seu consumo. Escolheu-se o dispositivo ACS712, que é baseado no efeito Hall para medição de corrente. As características principais estão apresentadas na Tabela 14. Note que com a sensibilidade do dispositivo, cada variação de 1 A acarretará uma variação de 63~69 mV na saída e sabendo que o conversor analógico digital do microcontrolador utilizado é de 3,3V e 12 bits, então tem-se a capacidade de se medir variações de 15 miliâmpères, o que é suficiente para medições de consumo de luminárias LED. Além disso, possui histerese e ruído desprezíveis bem como isolamento mais do que suficiente para circuito de distribuição, não sendo necessário acopladores ópticos.

Tabela 14 - Características do dispositivo ACS712.

Características	Valor	Unidade
Sensibilidade	63 ~ 69	mV/A
Histerese	~ 0	-
Baixo ruído	7	mV
Isolação Elétrica	2.1	KV (RMS)

4.5 MÓDULO DE GERENCIAMENTO

Conforme abordado anteriormente, o módulo de gerenciamento é um dispositivo intermediário entre o sistema de aquisição de parâmetros e controle da luminária (SM) e o sistema supervisorio (SS). Na Figura 37 é possível observar os componentes pertencentes ao módulo gerenciador. O presente equipamento contém uma interface ethernet com a finalidade de permitir a troca de dados com o sistema supervisorio, sensores de temperatura e umidade para prover informações sobre as condições climáticas, um cartão de memória para armazenamento de dados das várias luminárias conectadas a ele, interface de comunicação entre o módulo gerenciador e os módulos inteligentes e um sistema para prover trabalho ininterrupto mesmo quando não existir energia vindo da rede elétrica.

Uma vantagem acerca da utilização de um dispositivo para gerenciamento descentralizado está no fato da diminuição do tráfego de informações até a central de supervisão, maior confiabilidade no envio e recebimento de dados, uma vez que apenas um controlador envia informações de um conjunto de luminárias para o sistema de supervisão, e finalmente, o aumento da flexibilidade, uma vez que é possível estabelecer comunicação via celular, *tablet* e computador para uma determinada luminária, ou seja, individualmente, ou até mesmo para um conjunto de luminárias.

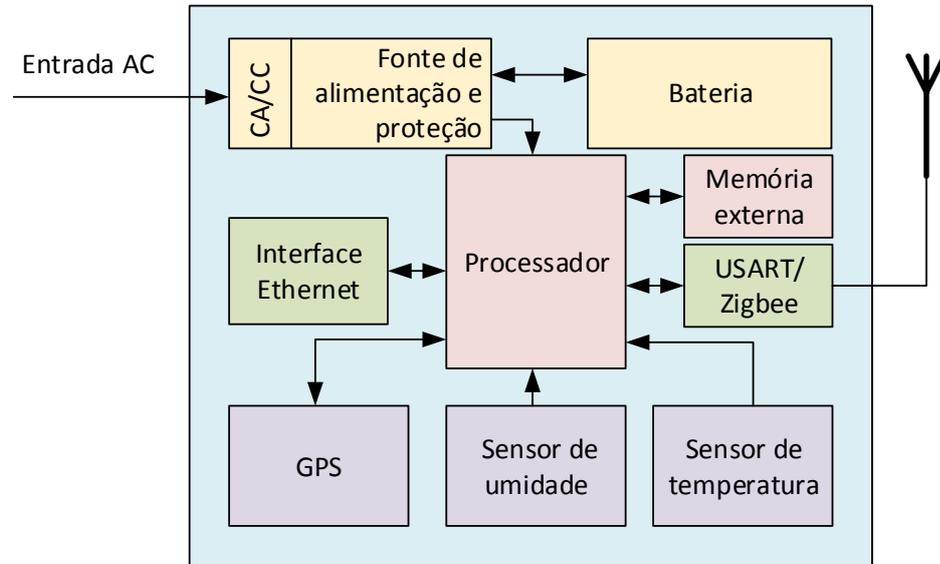


Figura 37 – Esquemático simplificado do módulo gerenciador (CM).

Utilizou-se o microcontrolador TM4C1294 (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED TM4C1294, 2014) operando em 120 MHz e seus principais atributos podem ser verificados na Tabela 15. Nota-se que o mesmo possui maior capacidade de processamento e desempenho se comparado ao microcontrolador pertencente ao módulo SM.

Tabela 15 - Atributos relevantes do microcontrolador TM4C1294.

Propriedades	Característica
Núcleo	ARM Cortex-M4 CPU
Memória Flash	1 MB
Memória RAM	256 KB
Memória EEPROM	6 KB
Desempenho	150 DMIPS – 120 MHz
Conversores Analógico-Digital	12-bit módulos ADC
Comunicação Serial UART	8 módulos
Saídas PWM	8 saídas
Ethernet MAC	10/100 Ethernet MAC
Ethernet PHY	PHY com IEEE 1588 PTP

Utilizou-se um módulo de localização GPS com a finalidade de facilitar a localização das luminárias dentro das cidades, permitindo que operadores e técnicos de campo saibam com maior precisão onde os equipamentos estão instalados, oferecendo dessa forma agilidade na solução de possíveis problemas tanto na rede quanto nas luminárias. Utilizou-se o sensor NEO-6 Series, ideal para aplicações que necessitam de menor consumo de bateria. Outra funcionalidade inerente a este módulo diz a respeito da utilização do sinal PPS (sigla do inglês *Pulse per Second*) do GPS, uma vez que torna necessário garantir a sincronização temporal dos dispositivos geograficamente distantes, permitindo assim uma análise trifásica através dos dados monofásicos sincronizados.

A finalidade do sensor de temperatura e umidade é de prover ao sistema de gerenciamento e monitoramento confiança nas medições, visto que em certas condições meteorológicas, o envio de dados entre dispositivos pode ser prejudicado. Adicionalmente, possibilita a validação na detecção de distúrbios na rede elétrica. Usou-se o sensor DHT11 devido ao fato de ser previamente calibrado, não necessita de componentes extras, apenas um resistor de “PULL-UP” no pino de leitura. Este utiliza internamente um sensor capacitivo e um termistor para medir umidade e ar circundante, respectivamente. E como saída produz um sinal digital no pino de dados. Como desvantagem, cita-se o tempo lento de resposta de obtenção de novos dados, que é a cada 2 segundos. A temperatura é dada em graus Celcius (°C) e a umidade relativa em percentual (%). Adicionalmente, oferece rápida resposta, capacidade anti-interferência, custo-efetividade e é facilmente integrado a um microcontrolador.

O dispositivo CM ainda conta com um sistema de armazenamento que serve como *backup* dos dados recebidos dos módulos SM, garantindo assim redundância de informações e protegendo o sistema contra possíveis falhas.

O esquemático elétrico deste módulo descentralizado é mostrado na Figura 38. Neste dispositivo, além das funcionalidades já mencionadas, foi inserido também uma chave DIP para possibilitar configurações locais, caso seja impossível acessar o supervisor.

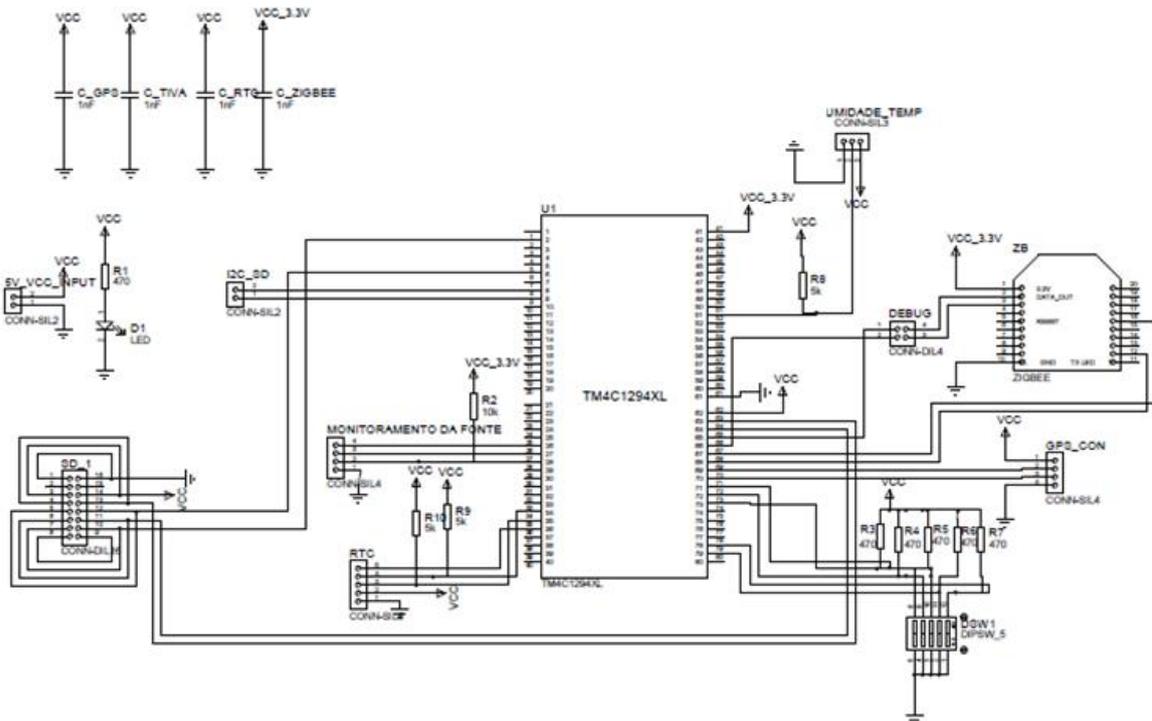


Figura 38 - Esquema elétrico do dispositivo CM.

O fluxograma simplificado do algoritmo do dispositivo CM pode ser visto na Figura 39. Como pode ser observado, o programa é basicamente dividido em um laço principal e em três interrupções: ZigBee, USB e Ethernet. No laço principal é realizada primeiramente a inicialização dos dispositivos e configuração tanto da Ethernet quanto da porta USB. Em seguida, é feita uma leitura dos sensores presentes no protótipo do dispositivo CM, os quais são o GPS e o sensor de umidade e temperatura. Observa-se ao final que a USB é sempre mantida ativa através de um loop infinito, garantindo que os dados sejam sempre armazenados.

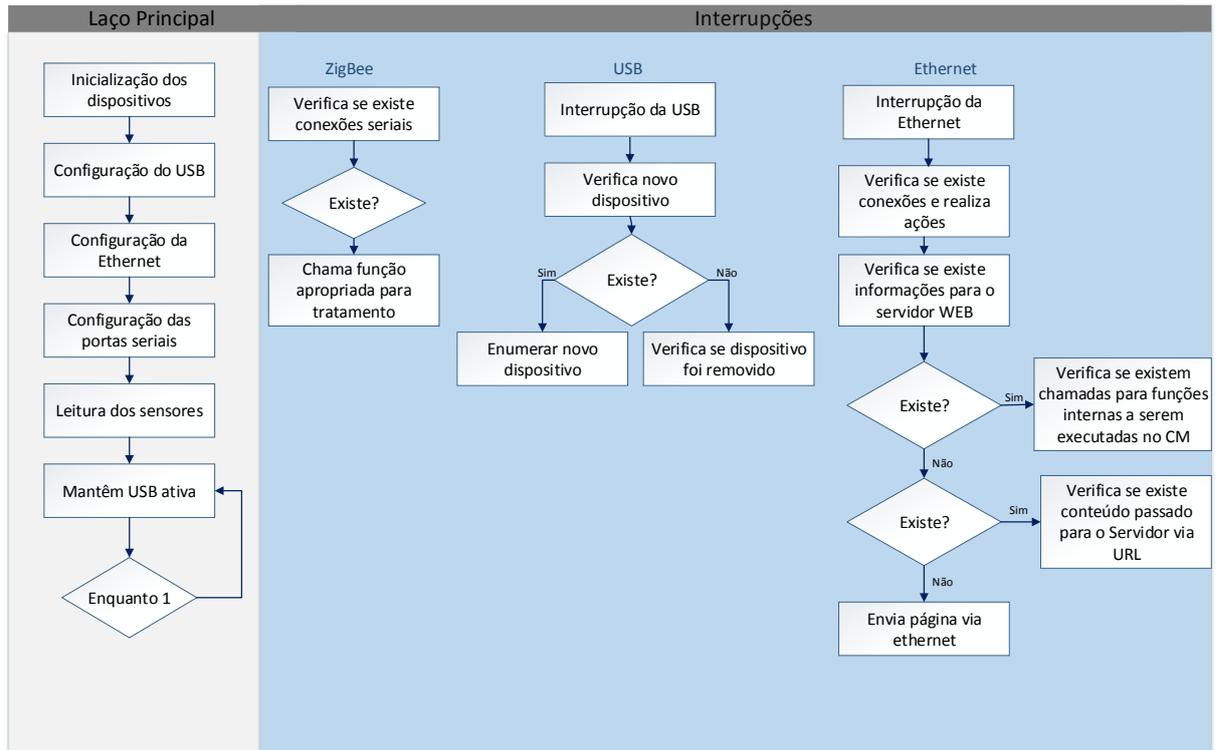


Figura 39 – Fluxograma do algoritmo simplificado do CM.

4.6 COMUNICAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS E O SISTEMA SUPERVISÓRIO

Como já abordado anteriormente, existem várias metodologias para transmissão de dados usando redes sem fio, como a transmissão infravermelha e algumas tecnologias que utilizam rádio frequência (RF), destacando-se o ZigBee, Bluetooth e Wireless Ethernet. O módulo CM faz uso tanto de uma interface Ethernet quanto de ZigBee. Basicamente, a comunicação entre os módulos pode ser explicada através dos passos descritos na Figura 40. Inicialmente, o supervisor acessa o dispositivo CM através de uma interface WEB, que por sua vez recebe os comandos enviados pelo operador do supervisor e repassa para um determinado SM, onde as outras luminárias descartam o comando, ou para um respectivo grupo que irá executar os comandos. Caso seja necessário que a luminária responda, o SM enviará os dados para o seu CM através da interface ZigBee. Por conseguinte, o CM armazena esses dados para que o SS acesse e realize a leitura das informações e proceda de acordo.

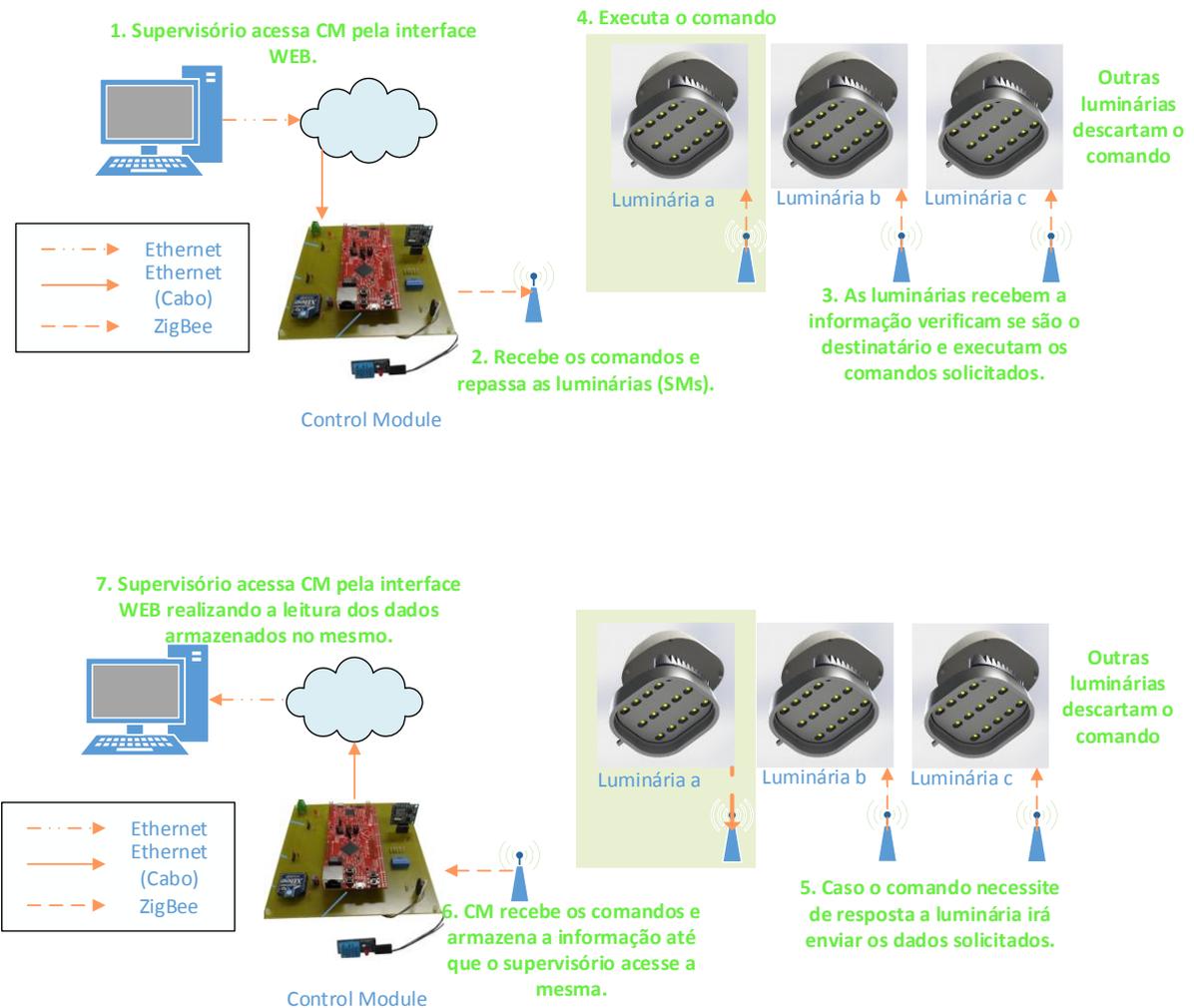


Figura 40 - Interação entre os módulos.

Neste trabalho foi criado um protocolo de comunicação entre os módulos com a finalidade de facilitar as trocas de mensagens entre os dispositivos, conforme visto na Tabela 16. Como pode ser visto na Figura 41, inicialmente o usuário interage com o sistema supervisor requisitando o valor de corrente da luminária. Em seguida, o SS envia uma mensagem para o CM via web solicitando esse dado, que por sua vez, envia uma mensagem via ZigBee para o referido SM. Logo, o Smart Module realiza a medição e envia uma resposta ao seu respectivo CM, que processa e retorna os dados armazenados ao SS.

Tabela 16 - Tabela de comando.

Comando	Byte 2	Byte 3	Byte 4	CM	SM	Função
a	Endereço do SM	-	-	-	1	Liga em 60%
b	Endereço do SM	-	-	-	1	Desliga
c	Endereço do SM	-	-	-	1	Aumenta Brilho
d	Endereço do SM	-	-	-	1	Reduz Brilho
e	Endereço do SM	-	-	-	1	Controle automático
f	Endereço do SM	-	-	-	1	Retorna Dados
i	Dado	Dado	-	-	1	Sincronização de estampa de tempo (segundos)
j	Dado	Dado	-	-	1	Sincronização de estampa de tempo (hora)
k	Dado	Dado	-	-	1	Sincronização de estampa de tempo (meses)
l	-	-	-	-	-	-
m	Endereço do SM	Índice	Tipo /Critério	-	1	Seta configuração tipo/Critério controle automático
n	Endereço do SM	Índice	Intensidade	-	1	Configura Intensidade
o	Endereço do SM	-	-	-	-	Ativa SAG/SWELL
r	Endereço do SM	-	-	-	1	Mestre Solicita análise de qualidade de energia
s	Endereço do SM	Valor	-	1	-	Dados de análise de qualidade de energia
t	Endereço do SM	a/e/i	-	1	-	Informa o início sag/swell/interrupção
u	Endereço do SM	a/e/i	Duração	1	-	Informa o fim sag/swell/interrupção
v	Endereço do SM	-	-	1	-	Informa resíduo/máximo do sag/swell
x	Endereço do SM	Dado	Valor	1	-	Informa dados solicitados pelo mestre
z	-	-	-	1	-	-
Rede						
A	-	-	-	1	-	Solicitação de endereço do mestre
B	-	-	-	-	1	Requisitar dispositivos com acesso mestre
C	Endereço do Mestre que pergunta	Endereço do SM	-	-	1	Solicitação de identificação do SM
V	Endereço do SM	-	-	1	-	Resposta dos SM's aos respectivos mestres sobre seus endereços
X	Device	-	-	-	1	Resposta a requisição de dispositivos com acesso mestre
Z	N	-	-	-	1	Responde a solicitação do mestre
Computador						
	-	-	-	0	0	Retorna dados para PC

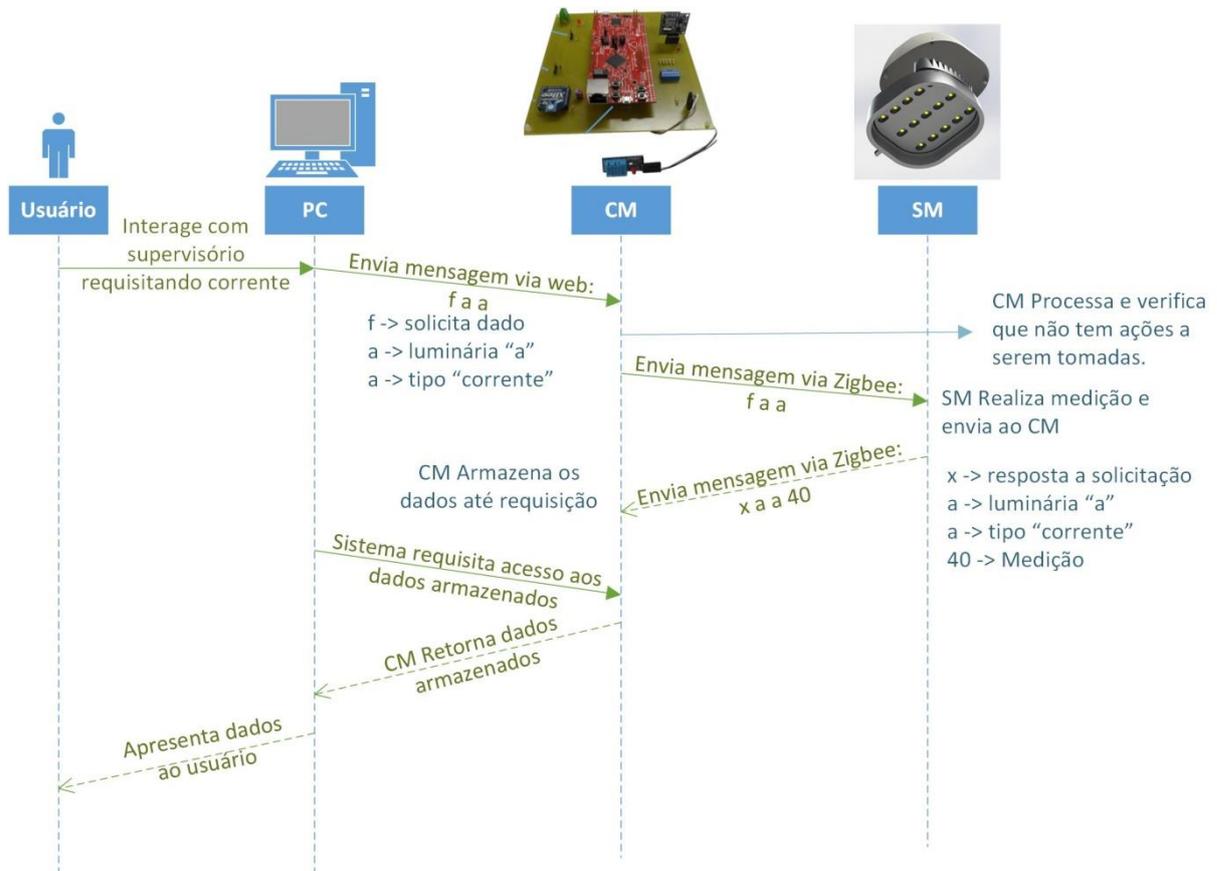


Figura 41 – Diagrama de sequência da troca de mensagens entre os módulos.

4.7 SOFTWARE DO SISTEMA DE SUPERVISÓRIO

O monitoramento e análise contínua de parâmetros relacionados com a qualidade de energia elétrica permite determinar com precisão como e onde os problemas da energia ocorrem, fornecendo deste modo uma solução para minimizar estes problemas ou até mesmo evitá-los. Além disso, fornecem dados de grande utilidade para o planejamento de eventuais expansões da rede de distribuição, uma vez que é possível avaliar através dos parâmetros, se as infraestruturas atuais são adequadas.

No procedimento de aquisição de dados, todas as informações recebidas do módulo gerenciador (CM) necessitam de um alto esforço computacional para serem processadas e também de uma grande capacidade de armazenamento. Uma vez que os módulos discutidos anteriormente não possuem essas características, faz-se a necessidade de um sistema robusto para supervisão e processamento dos dados. Este sistema de supervisor foi implementado na linguagem computacional C sharp (C#).

O sistema supervisorio é basicamente constituído de aplicações tanto para o monitoramento e análise de parâmetros pertinentes à qualidade da energia elétrica quanto para o controle do nível de intensidade de luz das luminárias, que pode ocorrer individualmente, escolhendo-se uma determinada luminária, ou de um conjunto de luminárias, através da escolha de um determinado CM. Os ambientes gráficos das principais aplicações podem ser vistos nas Figuras 42, 43, 44, 45 e 46. Percebe-se que o sistema de gerenciamento possui uma interface bem simplificada e intuitiva para o usuário.

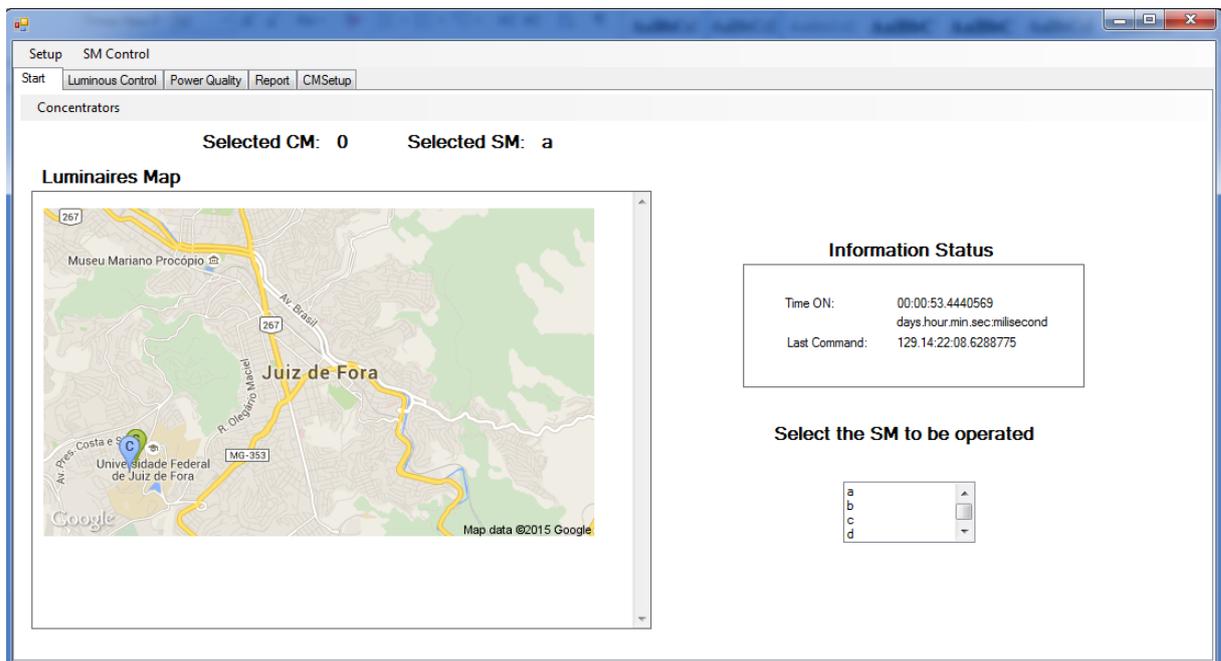


Figura 42 - Tela Principal.

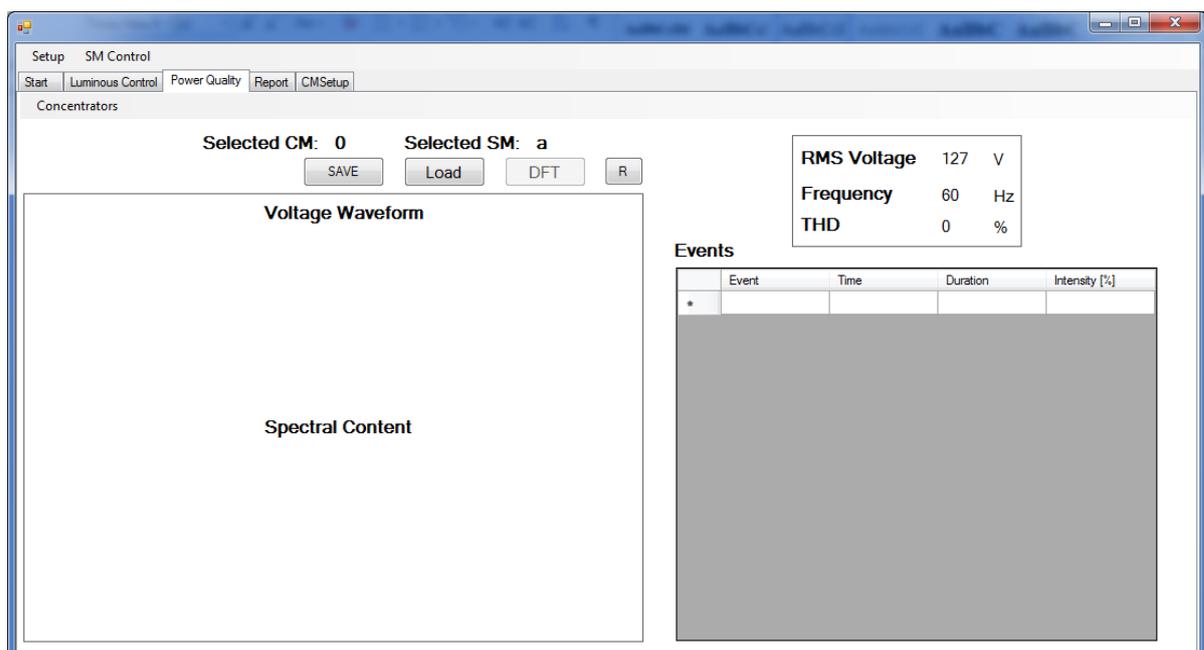


Figura 43 - Tela para monitoração e análise dos parâmetros de qualidade de energia.

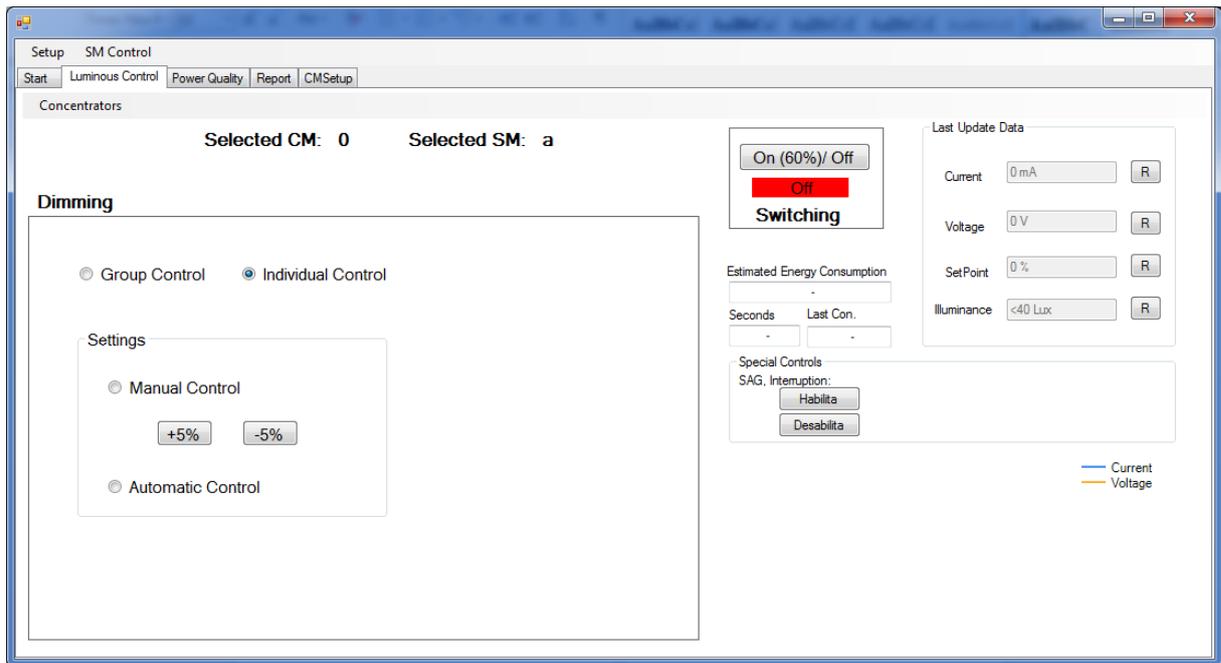


Figura 44 - Tela para controle e dimerização remota das luminárias.

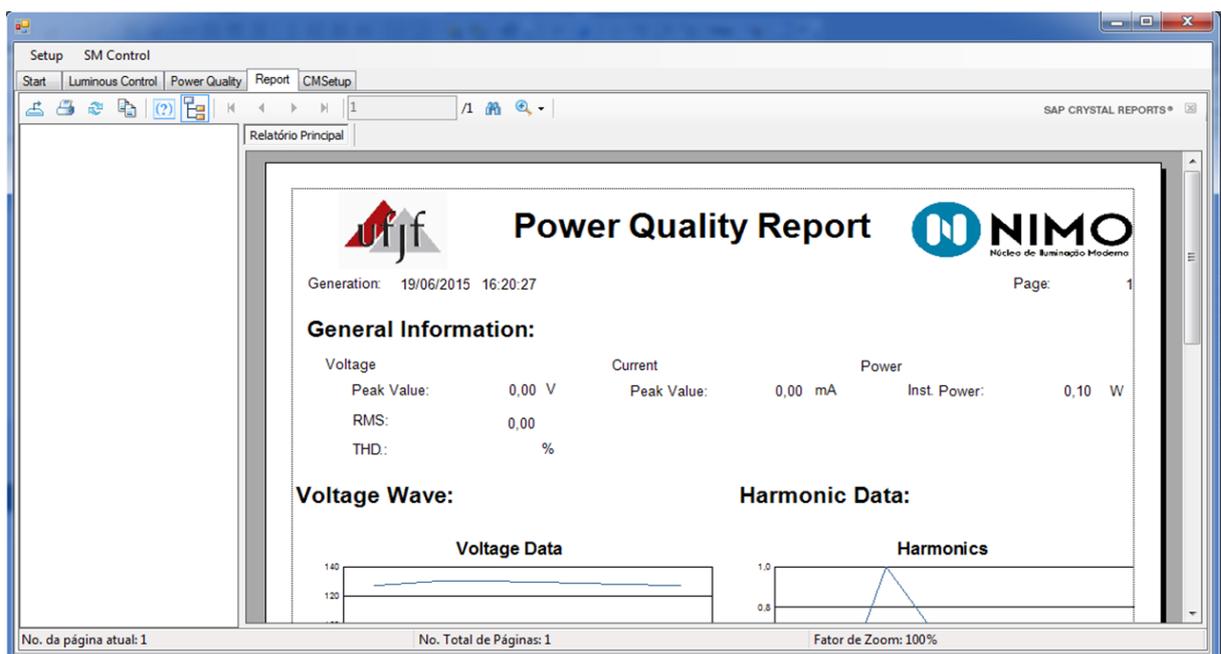


Figura 45 - Tela para geração de relatório.

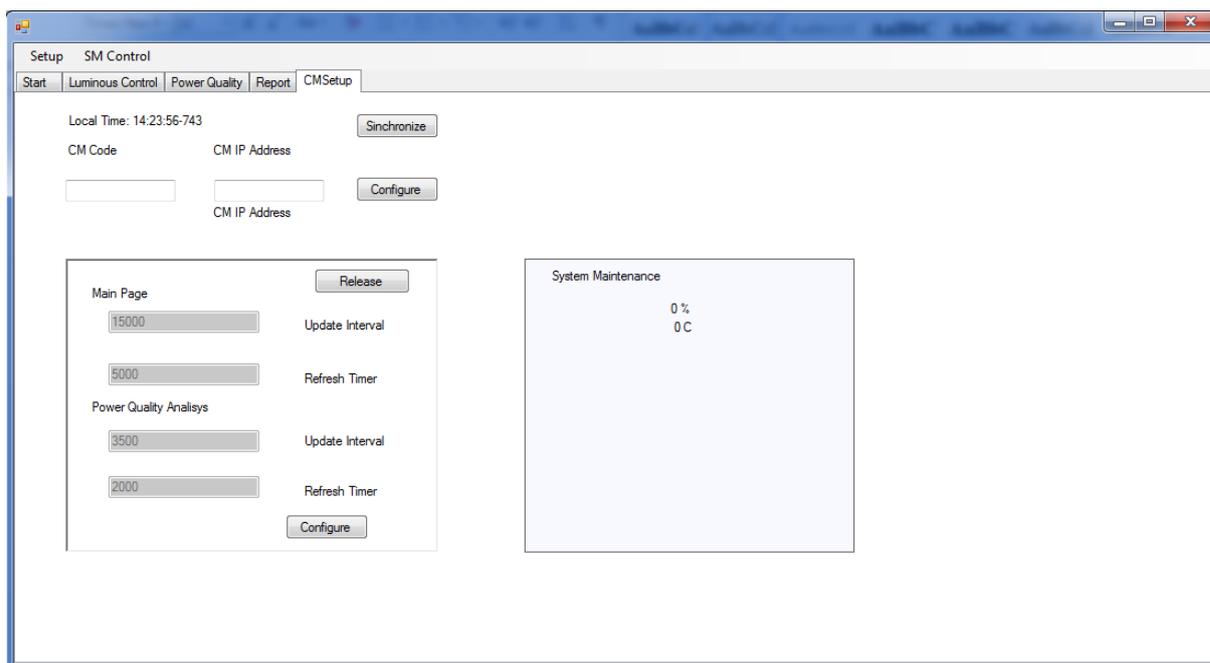


Figura 46 - Tela para configuração do CM.

4.7.1. Aplicação *Start*

Esta aba é a tela principal do sistema supervisor e é através desta que o usuário selecione qual dispositivo deseja obter informações ou controlar além de poder verificar a localização dos componentes SM e CM, facilitando a manutenção quando necessário. Pode-se também averiguar o tempo de funcionamento do *software* e o tempo decorrente do último comando recebido. É de grande importância esta aplicação devido ao fato de ser através deste ambiente gráfico que o usuário escolhe qual luminária ou módulo gerenciador poderá monitorar.

4.7.2. Aplicação *Power Quality*

Nesta aplicação, é realizada a aquisição do sinal da tensão fase-neutro da alimentação de uma determinada luminária. Em seguida é realizado o processamento necessário para detecção dos *sags* e *swells* através da análise do valor RMS efetuada ciclo a ciclo, conforme explicado anteriormente. É possível que o usuário identifique o tipo de evento que ocorreu, quando aconteceu, a intensidade e o tempo de duração do mesmo.

Adicionalmente, nesta aplicação, foi criada a função “Oscilografia”, que tem por finalidade registrar os dados da forma de onda da tensão da rede. É possível então incrementar outros tipos de análises que não necessitam de ser realizadas em tempo real, como por exemplo, a análise de harmônicos e interharmônicos. Vale lembrar que como cada luminária se encontra

em uma determinada fase, é possível a monitoração e fiscalização de todas as fases do sistema da rede elétrica.

Para a determinação e estudo do conteúdo espectral, a técnica utilizada neste trabalho, que provavelmente é a mais utilizada neste cenário, é a Transformada Discreta de Fourier (DFT, sigla do inglês para *Discrete Fourier Transform*) que é escrito pela fórmula (4.4).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{L-1} x[n] \cdot e^{-(j \cdot 2 \cdot \pi / L)kn} \quad (4.4)$$

Onde $X[k]$ é a sequência discreta e L é o tamanho da janela, que deve compreender números inteiros do período fundamental para evitar espalhamento devido a amostragem assíncrona. (DINIZ et al, 2004).

Além disso, o tamanho da janela também é um fator crucial para se determinar a resolução em frequência, conforme mostrado na equação (4.5).

$$R = \frac{f_o}{C} \quad (4.5)$$

Onde R é a resolução em frequência da DFT, f_o é a frequência da componente fundamental e C é o número de ciclos da componente fundamental contidos na janela analisada. Para atender a norma, a resolução deve ser de 5 Hz. Portanto, em um sinal de 60 Hz, 12 ciclos devem ser analisados. Observa-se ainda pela equação (4.5), que caso seja necessário maior precisão da decomposição espectral, pode-se aumentar o número de ciclos analisados. Porém, os custos computacionais bem como o tempo de estimação tornam-se maiores.

A frequência de amostragem é normalmente calculada em função da frequência do componente fundamental do sinal e do número de pontos por ciclo (N_{pc}), conforme descrito na equação (4.6). Esta é diretamente ligada à componente de maior frequência possível de ser representada pelo algoritmo de DFT, tal como representado em (4.7).

$$f_s = N_{pc} \cdot f_o \quad (4.6)$$

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} \quad (4.7)$$

De acordo com a norma, para aplicações de qualidade de energia é necessário à análise até o quinquagésimo harmônico, ou seja, 3.000 Hz. Portanto, taxa de amostragem calculada por (4.7) deve ser de no mínimo 6.000 amostras por segundo. O fluxograma do algoritmo de DFT implementado neste trabalho para análise da curva de tensão enviada pela oscilografia pode ser visto na Figura 47.

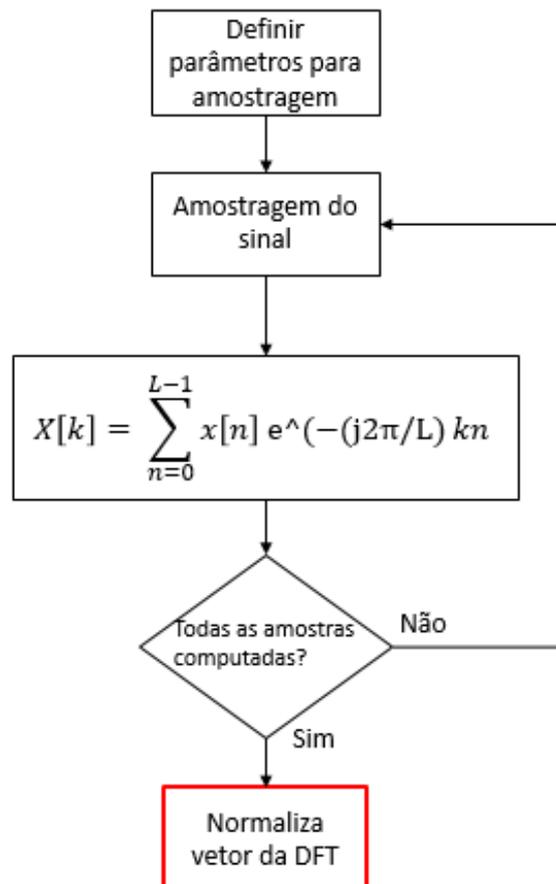


Figura 47 - Algoritmo de DFT implementado.

É possível que o operador do sistema faça a requisição e salve os dados de oscilografia, referentes aos doze ciclos da rede. Ressalta-se que esta função foi programada com o intuito de facilitar a inspeção visual por parte do usuário, uma vez que é possível que o mesmo verifique a forma da onda, os valores RMS e de frequência da onda em análise.

Como o valor da frequência da rede não é fixo, faz-se necessário o cálculo do número de pontos por ciclo de forma a obter os harmônicos acuradamente. Assim foi medido o número de pontos entre o primeiro *zero crossing* amostrado e o décimo segundo, de forma a obter o vetor que será usado no algoritmo de DFT.

Em função dos requisitos de acurácia da DFT, utilizou-se uma taxa de amostragem constante de 6.000Hz para obtenção da tensão da rede elétrica. Esta frequência de amostragem resulta em 100 pontos por ciclo quando a rede elétrica se apresenta em 60Hz. Assim, se a frequência de rede variar, o número de pontos por ciclo irá ser alterado devido a diferença entre as taxas. Portanto, a frequência pode ser obtida indiretamente medindo-se o número de pontos entre as passagens por zero.

4.7.3. Aplicação *Luminous Control*

Dentre as funções inseridas nesta aplicação, a função dimerização das luminárias possui a capacidade de controlar a intensidade, conforme a necessidade, tanto de uma determinada fonte luminosa quanto de um determinado grupo de luminárias (apenas escolhendo um determinado concentrador) de forma automática ou também de forma manual através dos botões de +-5% de dimerização. É possível também ligar em 60% ou desligar uma certa luminária ou um determinado grupo de luminárias através da funcionalidade “*switching*”, permitindo que lâmpadas que não tenham necessidade de trabalharem o tempo todo sejam desligadas. Essas funcionalidades permitem a redução do consumo de energia elétrica sem comprometer a vida útil das lâmpadas.

Nesta mesma aba existe a possibilidade de que o operador do sistema faça a requisição das últimas atualizações referentes a corrente, luminosidade, porcentagem máxima que a lâmpada foi configurada para acender e estimação da potência consumida.

Finalmente, outro recurso inserido é a ativação da dimerização automática para as luminárias. O usuário deve acessar “*SM control*” e em seguida clicar em “*Control Table*”, aparecendo imediatamente uma nova janela. É possível então que o usuário preencha um formulário em que cada linha representa o tipo de controle a ser executado a cada 30 minutos. Em adição, através dos botões de seleção rápida, é possível também escolher de forma rápida o tipo de acendimento, i.e., pelo sensor de presença, luminosidade ou lâmpada sempre acesa (botão denominado fixo).

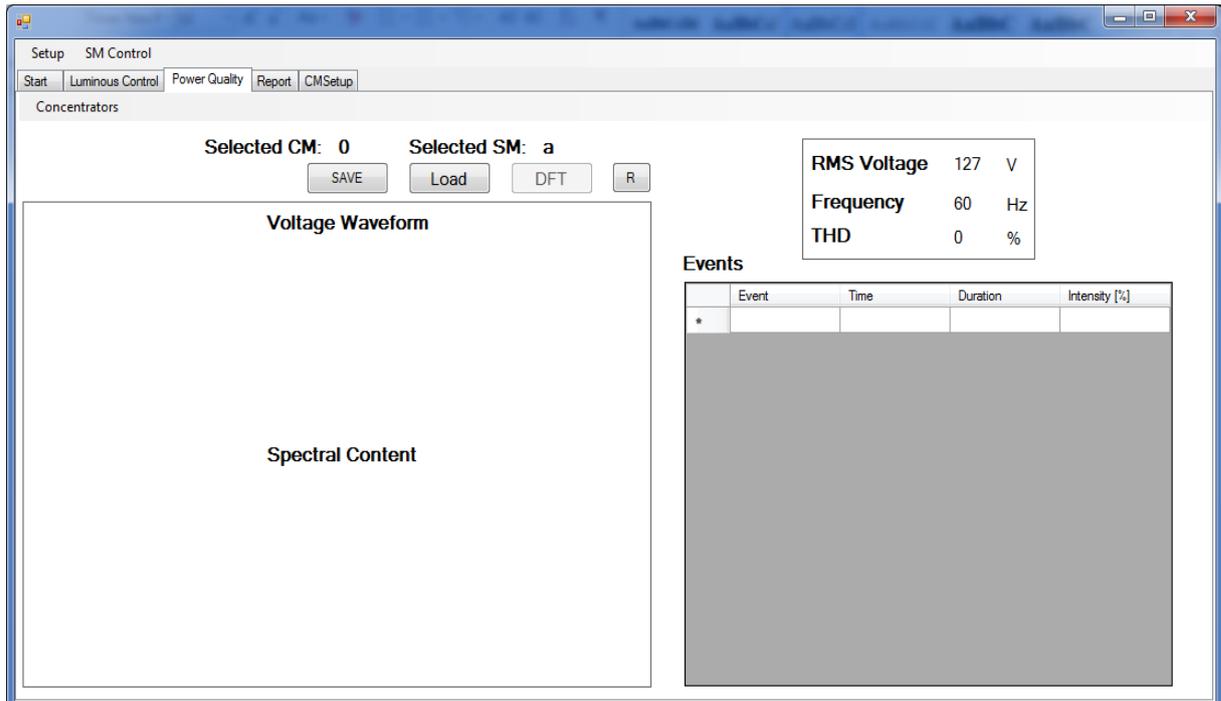


Figura 48 - Tela para configuração dos recursos de dimerização automática.

4.7.4. Aplicação *Report*

A aplicação *Report* tem como função a geração de um relatório contendo as aferições pertinentes tanto das luminárias quanto dos dados de qualidade de energia em um certo período de tempo. Os indicadores analisados neste relatório são informações gerais de consumo da luminária (corrente, tensão e potência) e conteúdo espectral dos dados de oscilografia da tensão da rede elétrica. Ao final, é possível que o usuário salve os dados, em um formato eletrônico PDF ou imprima os mesmos.

4.7.4. Aplicação *CM Setup*

É nesta aba que o usuário poderá configurar um determinado CM, como por exemplo o endereço de rede e seu código, para que o supervisor consiga requisitar as informações do mesmo, facilitando então o gerenciamento e desbloqueando então a opção de seleção dos módulos SM da aplicação “Start”. Além disso, é possível que o usuário verifique os dados provindos do sensor de temperatura e umidade através do bloco “*System Maintenance*”.

4.8 INTERFACE WEB

O envio de comandos e recebimento de dados no sistema supervisorio é feito através de uma interface WEB desenvolvida no presente trabalho e na Figura 49 pode ser verificada a tela de envio de comandos. Essa interface foi desenvolvida baseando-se na implementação lwIP (sigla do inglês para *light-weight implementation*) do protocolo TCP/IP. A vantagem do uso desta implementação é o seu uso adequado em sistemas embarcados com dezenas de kilobytes de memória RAM livre e espaço para cerca de 40 kilobytes de código ROM, fazendo que o mesmo seja usado em muitos dispositivos comerciais. O lwIP inclui os seguintes protocolos e recursos:

IP (Internet Protocol) - incluindo o encaminhamento de pacotes através de múltiplas interfaces de rede;

ICMP (Internet Control Message Protocol) - para a manutenção da rede e depuração;

IGMP (Internet Group Management Protocol) - para a gestão do tráfego multicast;

UDP (User Datagram Protocol) - incluindo extensões experimentais UDP-Lite;

TCP (Transmission Control Protocol) - com controle de congestionamento, a estimativa RTT e recuperação rápida / retransmissão rápida;

Raw / native API - para um melhor desempenho;

DNS (Domain names resolver);

SNMP (Simple Network Management Protocol);

DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol);

AUTOIP (para IPv4, conforme com a RFC 3927);

PPP (Point-to-Point Protocol);

ARP (Address Resolution Protocol) - para Ethernet.

Figura 49 - Tela de envio de comandos pela interface WEB.

4.9 CONCLUSÃO PARCIAL

Realizou-se inicialmente uma breve descrição do sistema de controle inteligente proposto. Foram mostrados os diagramas de funcionamento do módulo e das características associadas a cada componente, demonstrando então a escolha de cada dispositivo inserido.

Foi também abordado o funcionamento do algoritmo em forma de fluxograma com a finalidade de explicar e analisar a sequência de passos necessários para a execução dos comandos, controle e monitoramento da luminária e dos parâmetros de qualidade de energia.

Em relação a função de análise dos parâmetros de qualidade de energia, inicialmente foram discutidos os aspectos dos distúrbios que degradam a qualidade do sinal da rede elétrica e em seguida as características de classificação das mesmas, sendo apresentadas as fórmulas de cálculo desses parâmetros no dispositivo SM.

Foi descrito ainda o sistema de gerenciamento descentralizado proposto, o qual corresponde a uma interface intermediária entre os módulos SM e o sistema supervisor, que possui como uma das suas principais finalidades a diminuição do tráfego de informações. Foram mostradas as características associadas aos sensores presentes no módulo e suas respectivas funcionalidades.

Apresentou-se o esquemático elétrico do mesmo e o fluxograma do algoritmo do sistema a fim de demonstrar os passos necessários para a execução dos comandos e das interrupções do sistema. Outro importante ponto abordado foi o processo de comunicação entre os módulos e suas principais características.

Por fim foram mostrados o desenvolvido da plataforma de supervisão e suas principais funcionalidades. Este *software* de gerenciamento foi desenvolvido com o intuito de oferecer uma maior capacidade de processamento dos dados oriundos dos sistemas de aquisição, permitindo paralelamente o armazenamento destas informações, possibilitando uma consulta e análise posterior.

Esta ferramenta possui uma interface amigável, permitindo que usuários sem treinamento e conhecimento a priori dos *hardwares* sejam capazes de utilizar o mesmo. Com a plataforma de supervisão é possível a monitoração e análise dos parâmetros de qualidade de energia elétrica, tornando-se uma ferramenta de grande valia para agências de regulamentação, concessionárias e consumidores finais. Ao final deste capítulo, foi mostrado a interface WEB desenvolvida para acessar e enviar comandos para a luminária através do protocolo TCP/IP.

5 RESULTADOS

Nos capítulos anteriores foram mostradas as diversas especificações e requisitos necessários que compõe tanto o *software* quanto o *hardware* dos protótipos propostos. Portanto, neste capítulo, serão mostradas as características construtivas de cada protótipo bem como os experimentos efetuados com a integração de todos sensores.

Os resultados constituem-se basicamente de aspectos construtivos das placas eletrônicas dos dois módulos que compõem o sistema inteligente proposto neste trabalho e resultados obtidos experimentalmente com os mesmos. São mostrados o posicionamento dos componentes nas placas e também o desempenho atingido com o protótipo. Todas as medições do conjunto de LED utilizado neste trabalho, tais como curva de intensidade luminosa, eficiência do conjunto entre outras além dos resultados referentes às análises concluídas pelo sistema supervisor são também apresentadas neste capítulo.

Ao final é realizado uma análise econômica para sistemas inteligentes de iluminação como forma de estudar a viabilidade de implementação deste tipo de projeto no sistema atual de iluminação pública.

5.1 PROTÓTIPOS

Na Figura 50 é mostrado o sistema de bateria que é utilizado tanto pelo SM quanto pelo CM e que possui como finalidade permitir o diagnóstico e comunicação de ambos os sistemas mesmo quando a rede elétrica não estiver operando. Este dispositivo é composto basicamente por 2 baterias de lítio, possui uma entrada da rede elétrica que alimenta continuamente o sistema de baterias, uma saída que provê 5V para as placas do SM e CM e um circuito eletrônico simples para garantir proteção e um nível adequado de tensão de saída.

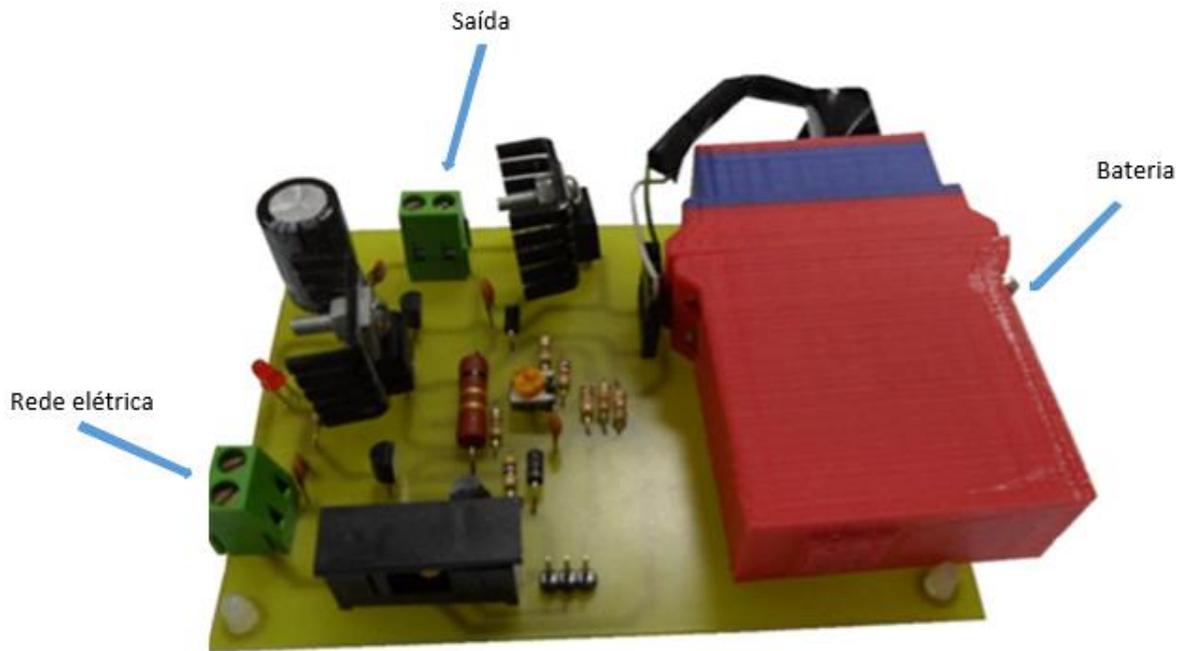


Figura 50 - Sistema de bateria

O sensor de tensão pode ser visualizado na Figura 51. Com intuito de prover maior segurança ao equipamento, foi realizado um isolamento entre os diferentes circuitos periféricos. O sensor possui uma entrada relativa a medição da tensão da rede elétrica com valor de pico de 220V e é gerada na saída uma tensão proporcional à tensão de entrada na faixa de 0 à 3,3V. Quando o circuito apresentar 0V na entrada, o sensor deve apresentar uma tensão na saída de 1,65V, assim valores negativos na entrada são representados na saída entre 0 e 1,65V e valores positivos entre 1,65V e 3,3V. Os dois potenciômetros permitem calibrar o ganho do sensor e o *offset* de tensão criando maior precisão e flexibilidade de operação.

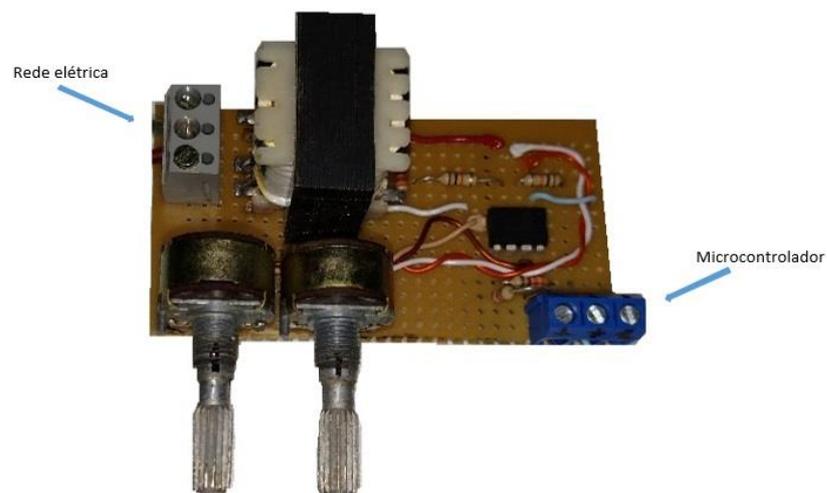


Figura 51 - Sensor de tensão.

O protótipo do SM é mostrado na Figura 52. É possível observar que neste protótipo existe uma entrada de alimentação do sistema de bateria, o microcontrolador TM4C123G, várias saídas que são conectadas a sensores de presença, iluminação, corrente, tensão e monitoramento da bateria, além de duas saídas para expansão futura. Utilizou-se também um módulo ZigBee XBee PRO S1 (DIGI INTERNATIONAL INC, 2014), responsável pela comunicação entre módulos SM/SM e SM/CM. As especificações do módulo ZigBee foram utilizadas como exemplo na Tabela 6.

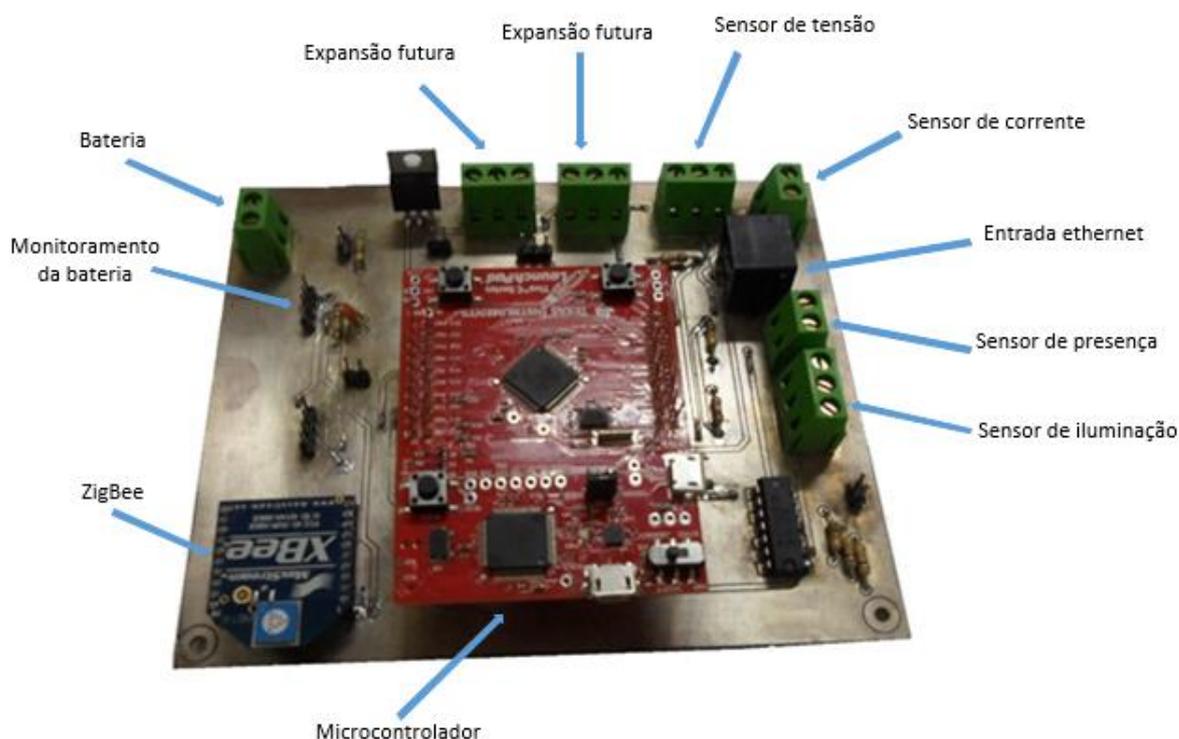


Figura 52 - Módulo de controle inteligente.

O protótipo do módulo de gerenciamento descentralizado pode ser visto na Figura 53. Neste encontra-se o microcontrolador TM4C1294, o módulo ZigBee XBee PRO S1 utilizado no protótipo do SM, um módulo GPS (U-BLOX, 2014) responsável por prover uma localização geográfica para o protótipo, um sensor de temperatura e umidade (D-ROBOTICS, 2014) com a finalidade de validar os dados medidos pelo sensor de tensão e também construção de um mapa térmico da cidade e um RTC (MAXIM INTEGRATED, 2014) a fim de garantir uma marca de tempo confiável entre os sensores. Ademais, utilizou-se também a própria saída ethernet do microcontrolador para conectá-lo a um modem e assim garantir comunicação do módulo com o sistema supervisor e também com dispositivos portáteis. Os dados enviados ao sistema supervisor podem ser bidirecionais que incluem os sinais de controle da luminária

(dimerização, desligar e ligar) ou unidirecionais que são os parâmetros de qualidade da rede elétrica, informações dos sistemas de baterias, sensores e status da luminária.

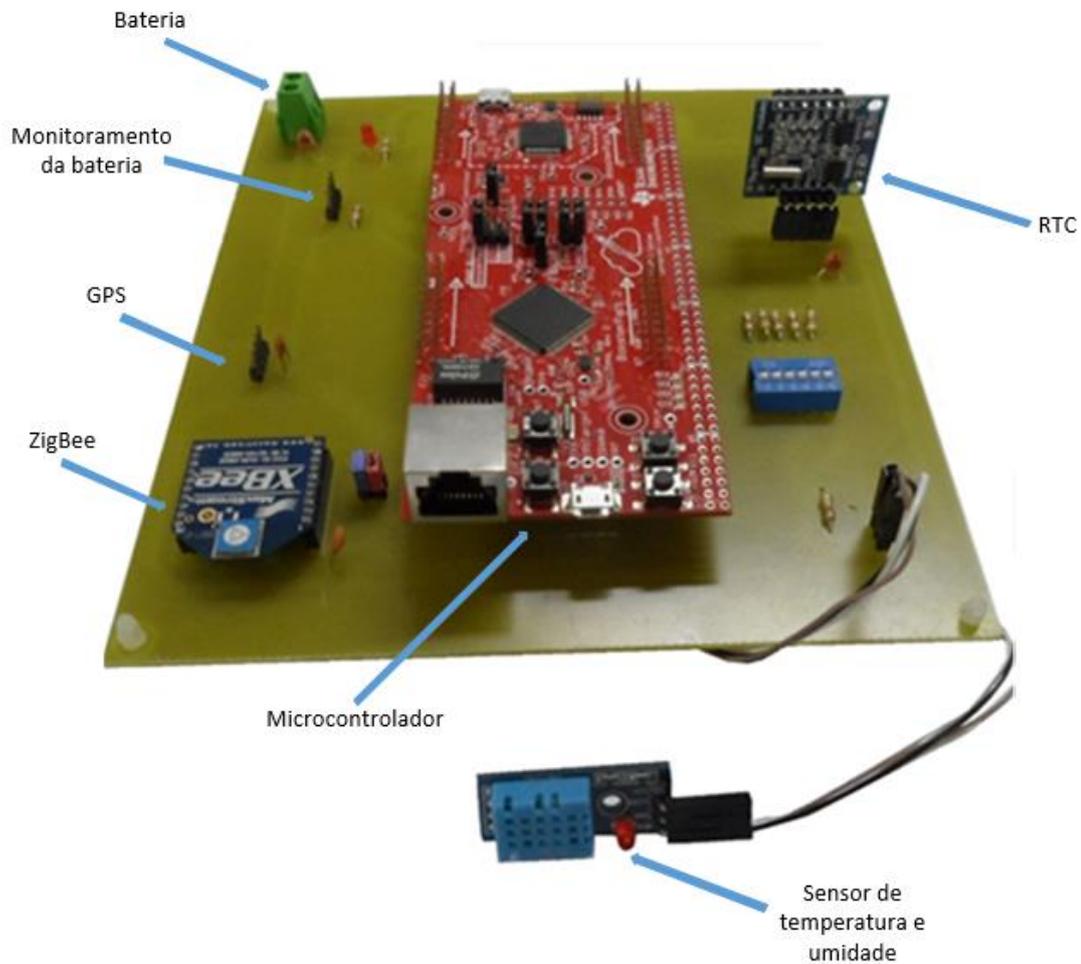


Figura 53 - Módulo de gerenciamento descentralizado.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.2.1 – LUMINÁRIA E O SISTEMA DESENVOLVIDO

Para a obtenção dos resultados experimentais foram utilizados um driver de LEDs com as especificações apresentadas na Tabela 13 e um arranjo de LEDs da fabricante Everlight mostrada na Figura 31. A Figura 54 mostra a intensidade emitida por esse arranjo de LEDs em cada comprimento de onda para vários valores de potência diferentes. Este processo foi realizado com auxílio de uma esfera integradora e um wattímetro. É possível observar que o comportamento característico da lâmpada não varia significativamente ao longo dos vários

pontos de operação, o que não ocorre para todos os tipos de lâmpada utilizadas comercialmente, como exemplo pode-se citar a lâmpada incandescente, que quando submetida a uma tensão maior, a temperatura de seu filamento, seu fluxo luminoso e corrente aumentam, enquanto que sua vida útil reduz. Portanto, como resultado pode-se concluir que a dimerização da lâmpada não resultará na variação das características de luminosidade, e, portanto, não afetará a eficiência da lâmpada do ponto de vista da percepção humana.

Verifica-se na Figura 55 a relação quase linear entre fluxo luminoso e potência para a luminária à LED utilizada neste trabalho. Observa-se que quando a potência requerida é de 20W, a eficácia apresentada é de 120 lm/W. Este valor mais elevado significa que há menos calor gerado pelo LED (auto-aquecimento) com correntes mais baixas, podendo alterar tanto o comprimento de onda e a intensidade da luz emitida quanto a tensão, elevando a temperatura da junção.

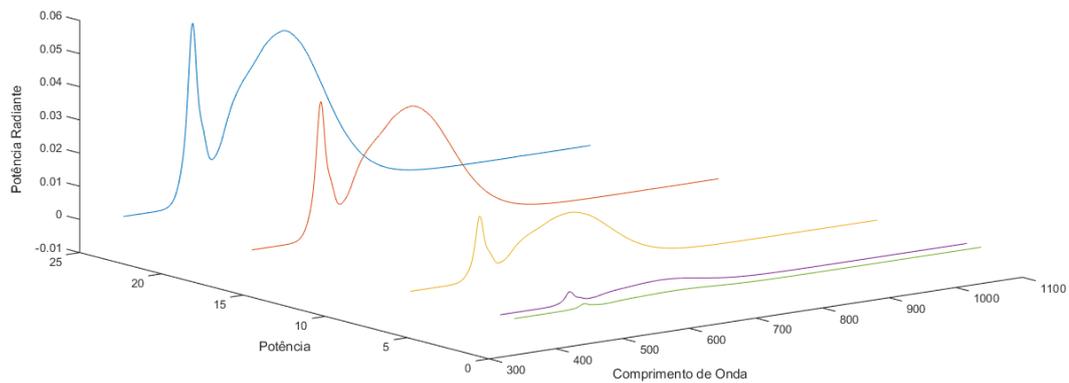


Figura 54 – Potência radiante emitida pela lâmpada utilizada neste trabalho para valores diferentes de potência.

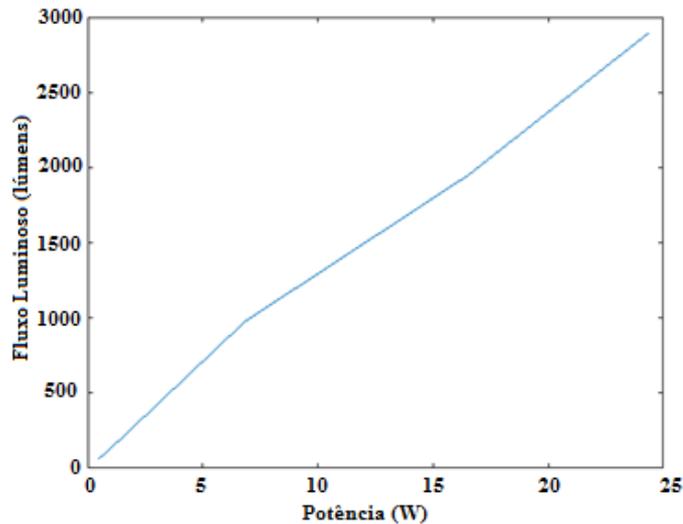


Figura 55 – Fluxo luminoso x potência para a luminária utilizada neste trabalho.

Em relação à avaliação de operação do sistema, realizou-se a medição do consumo da lâmpada e do conjunto completo com auxílio de um wattímetro, sendo os resultados apresentados na Figura 56. Observa-se que quando ocorre a aplicação de um nível de fluxo luminoso em 2,5%, a lâmpada ainda não apresenta nenhum brilho sendo observado consumo menor que 1W/h devido a operação dos circuitos de controle. À medida que o nível de brilho da lâmpada aumenta, as perdas do *driver* também aumentam proporcionalmente, mantendo a eficiência do sistema nos mesmos patamares.

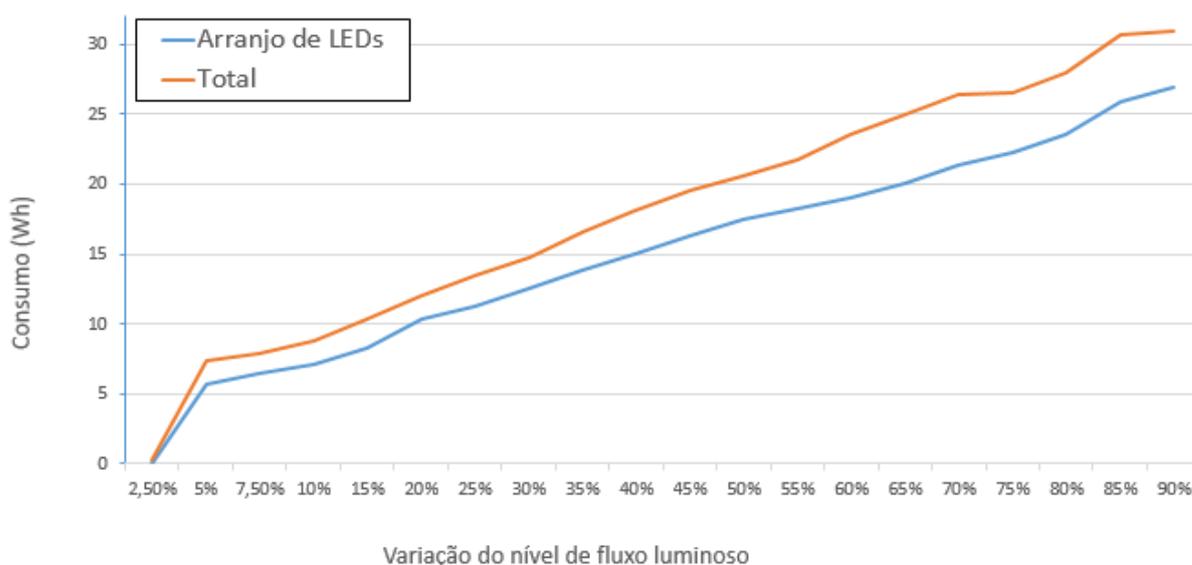


Figura 56 - Consumo versus variação do nível de fluxo luminoso.

Na Figura 57 é apresentada a curva de eficiência do sistema em função do brilho apresentado pela lâmpada. Observa-se que em 2,5% como não há nenhum brilho, ou seja, nenhuma potência sendo dissipada na lâmpada, a eficiência é nula, uma vez que apenas os circuitos de controle irão consumir energia. Outro fator importante é que a eficiência do sistema se mantém sempre acima de 80% para qualquer valor de dimerização, chegando a 87% com máximo brilho apresentado pela lâmpada, o que é compatível com outros sistemas comerciais.

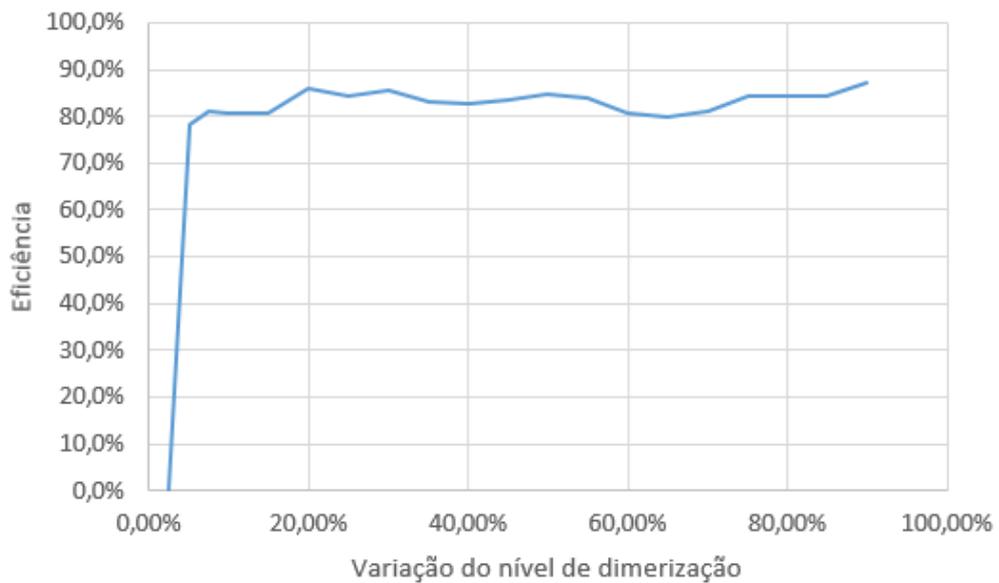


Figura 57 - Eficiência versus variação do nível de dimerização.

5.2.2 – SUPERVISÓRIO

Os resultados deste item constituem basicamente da avaliação das funcionalidades do sistema supervisor. Como resultado da aba inicial “Start” é possível verificar as informações relacionadas ao tempo que o supervisor está ligado e o último comando recebido pelo mesmo, tal como mostrado na Figura 58. Já na aba de configuração e gerenciamento do módulo de controle descentralizado, “CMsetup”, verificam-se os dados do sensor de temperatura e umidade na Figura 59.

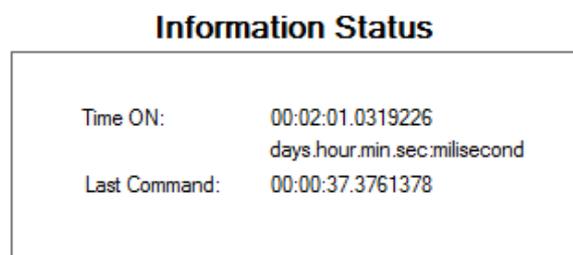


Figura 58 - Informações sobre o tempo que o supervisor está ligado e o horário do último comando recebido.

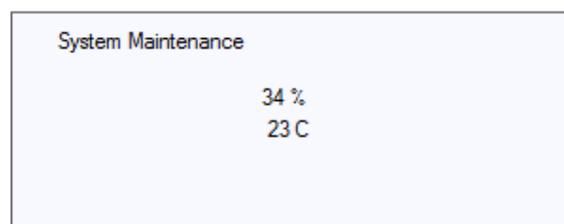


Figura 59 - Dados provenientes do sensor de temperatura e umidade.

Na Figura 60 é possível observar os diferentes níveis de corrente na entrada do driver quando submetida em diversas condições de dimerização como também é mostrado o consumo de corrente da luminária e *setpoint* de dimerização configurado para estas diversas condições de dimerização indicadas no sistema supervisor. Como pode ser visto, o processo de dimerização manual é funcional e é possível extrair informações pertinentes da luminária.

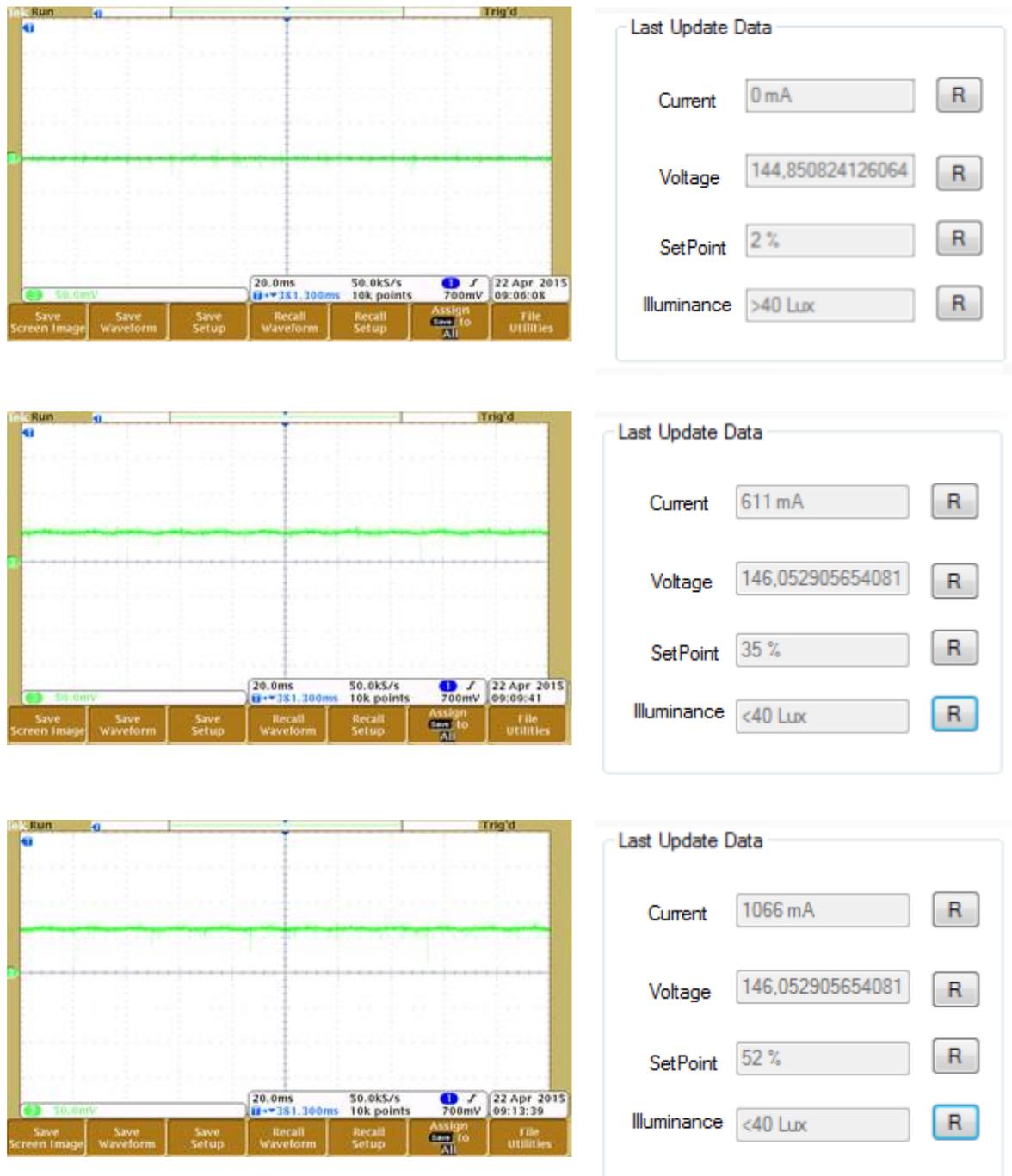
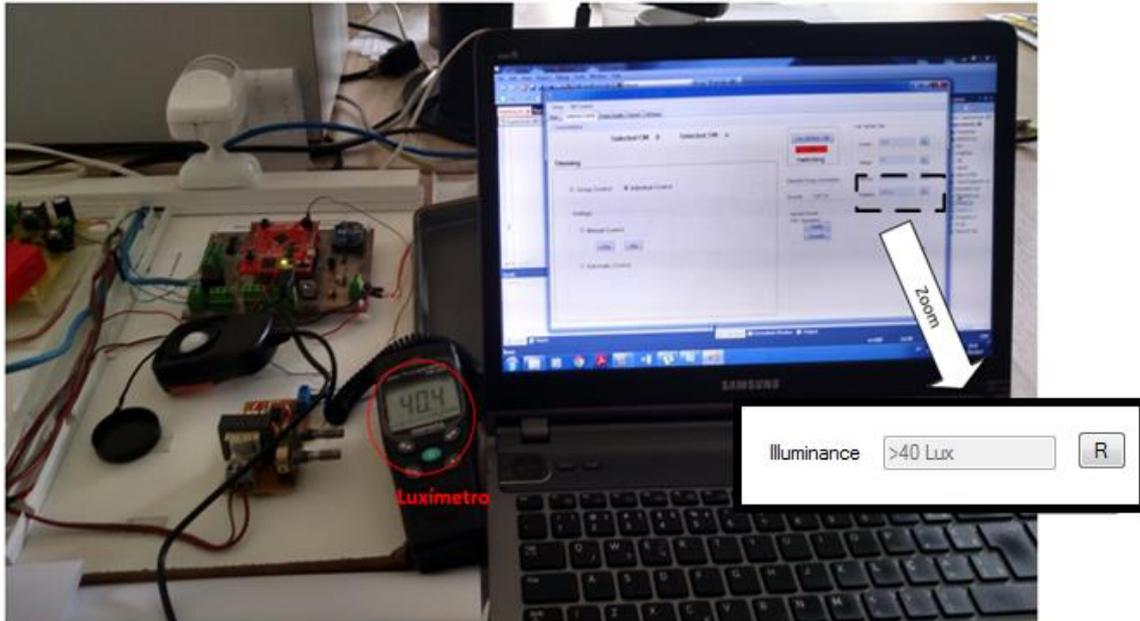
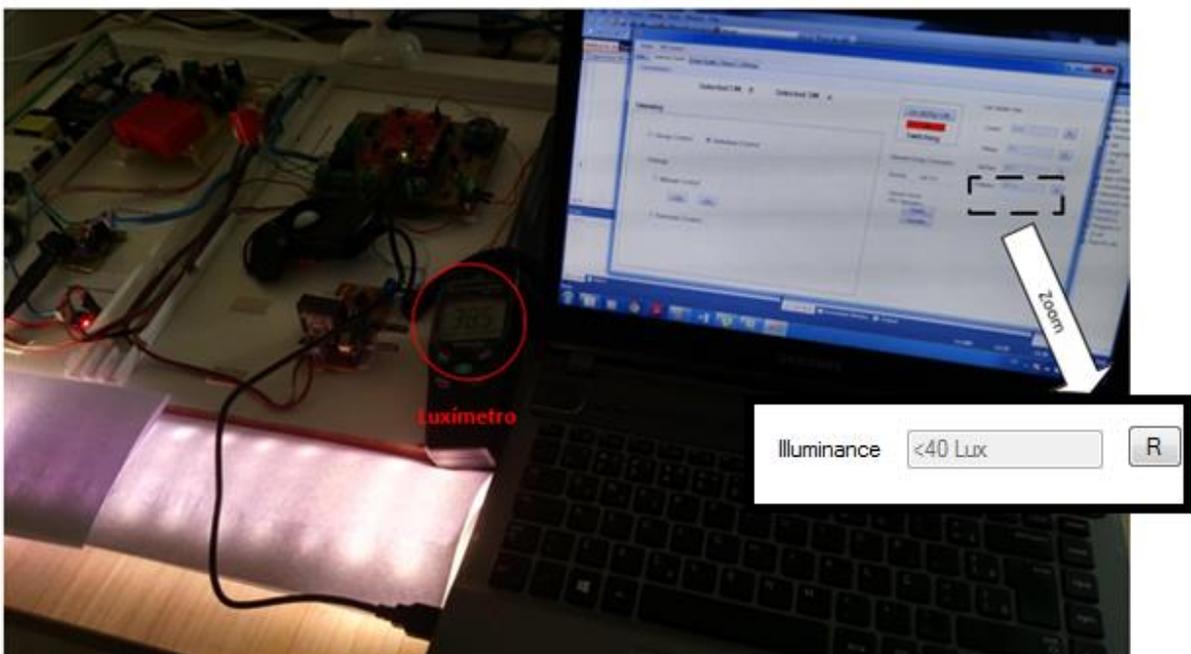


Figura 60 - Níveis de corrente da luminária em diversas condições de dimerização.

Outro resultado em relação ao processo de dimerização é apresentado na Figura 61 (a) e (b). É possível observar o acendimento da luminária através do nível de iluminância do ambiente medido pela célula solar. Destacam-se também nesta figura os níveis de iluminância medidos pelo luxímetro e o valor de limiar apresentado pelo supervisor.



(a)



(b)

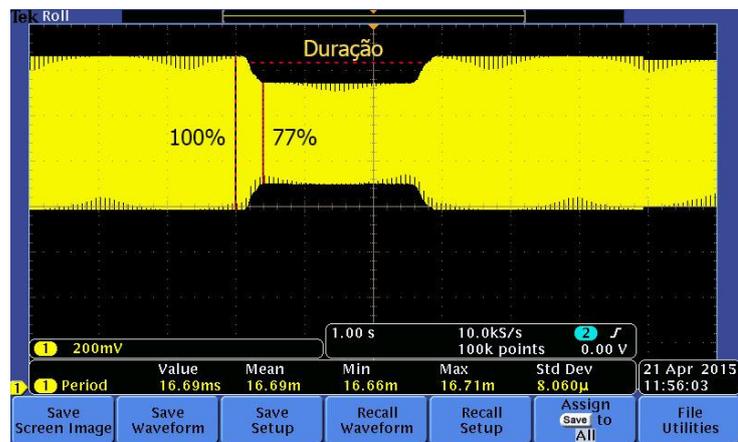
Figura 61 - Acionamento automático da luminária a partir da célula solar. (a) Iluminância maior que 40 lux. (b) Iluminância menor que 40 lux.

Foram avaliadas também experimentalmente as características recorrentes do sistema de monitoramento da qualidade de energia. A Figura 62 (a) e a Figura 63 (a) representam o registro de detecção dos eventos de *sag* e *swell* com o recurso do equipamento de monitoração e análise desenvolvido neste projeto. Nesta aplicação são detalhados a intensidade em porcentagem (de acordo com a norma), duração em ciclos e tempo da ocorrência (hora e data). Já a Figura 62 (b) e a Figura 63 (b) apresentam esses problemas de qualidade de energia elétrica adquiridos na entrada do sensor de tensão. Percebe-se que foi possível identificar também a duração e data de ocorrência do evento. Portanto, pode-se afirmar que o sistema conseguiu identificar de maneira satisfatória esses eventos de qualidade de energia.

Events

	Event	Time	Duration (cycles)	Intensity [%]
▶	SAG	21/04/2015 11:5...	306	77.6394899318
*				

(a)



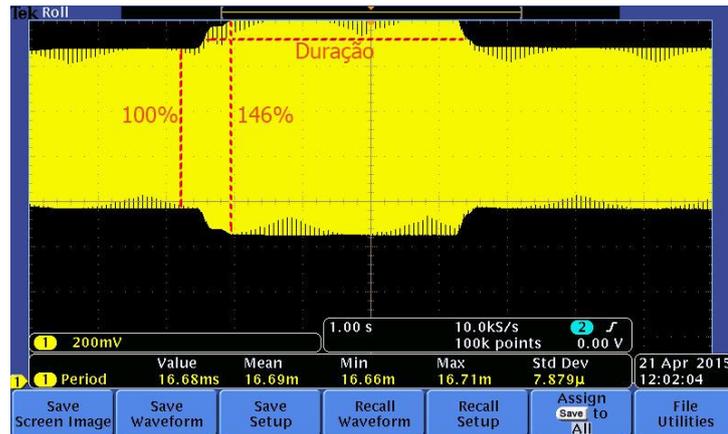
(b)

Figura 62 – Detecção do evento SAG. (a) Tela do supervisor. (b) Medição efetuada na entrada do sensor.

Events

	Event	Time	Duration (cycles)	Intensity [%]
▶	SWELL	4/21/2015 12:04...	481	146.92317369412...
*				

(a)



(b)

Figura 63 - Detecção do evento Swell. (a) Tela do supervisor. (b) Medição efetuada na entrada do sensor.

Em relação ao conteúdo espectral, a validação do algoritmo inicialmente foi realizada a partir de uma forma de onda de tensão gerada sem ruídos, conforme visto na Figura 64, e observa-se, portanto, a fidelidade do resultado. Dessa forma, após esse teste, é possível então obter o conteúdo espectral de um sinal real provindo da rede elétrica tal como mostrado na Figura 65. Percebe-se que devido a oscilação de frequência e ruído presente no sinal elétrico, o resultado da DFT apresenta alguns erros de espalhamento, já que é extremamente difícil amostrar exatamente 12 ciclos com uma taxa de amostragem fixa e com sinal de frequência oscilante. Esses erros podem ser percebidos em variações nas amplitudes das componentes analisadas.

Na Figura 66 é apresentado o relatório gerado contendo aspectos tanto da análise de qualidade de energia quanto das características elétricas da luminária.

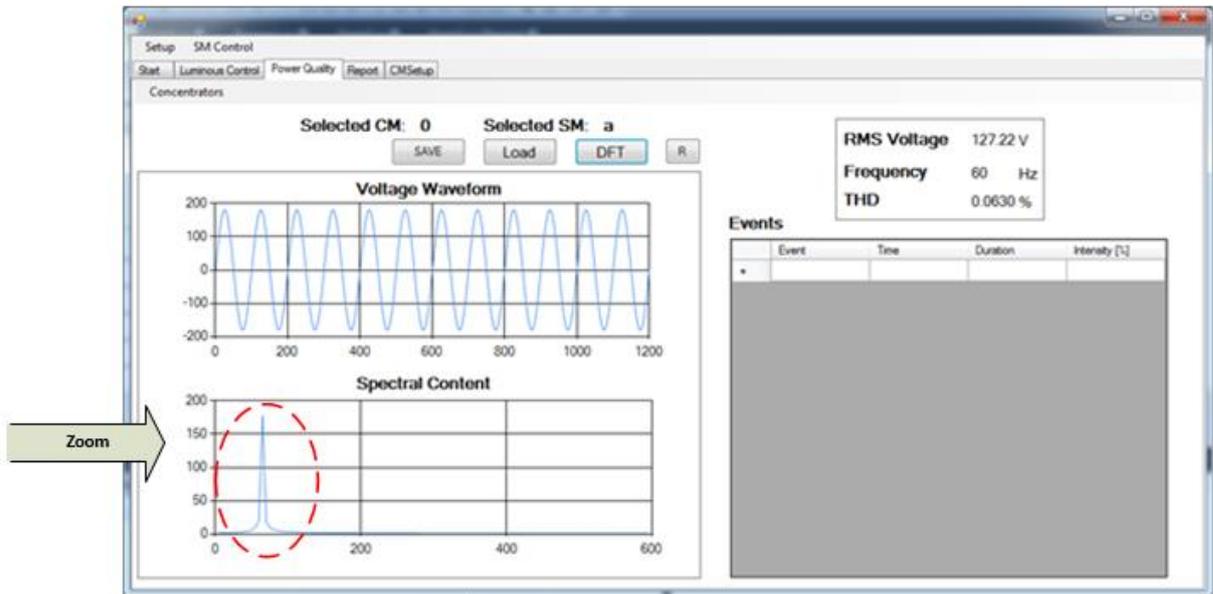


Figura 64 - Resultado da análise de conteúdo espectral medindo uma tensão de rede gerada sem ruídos.

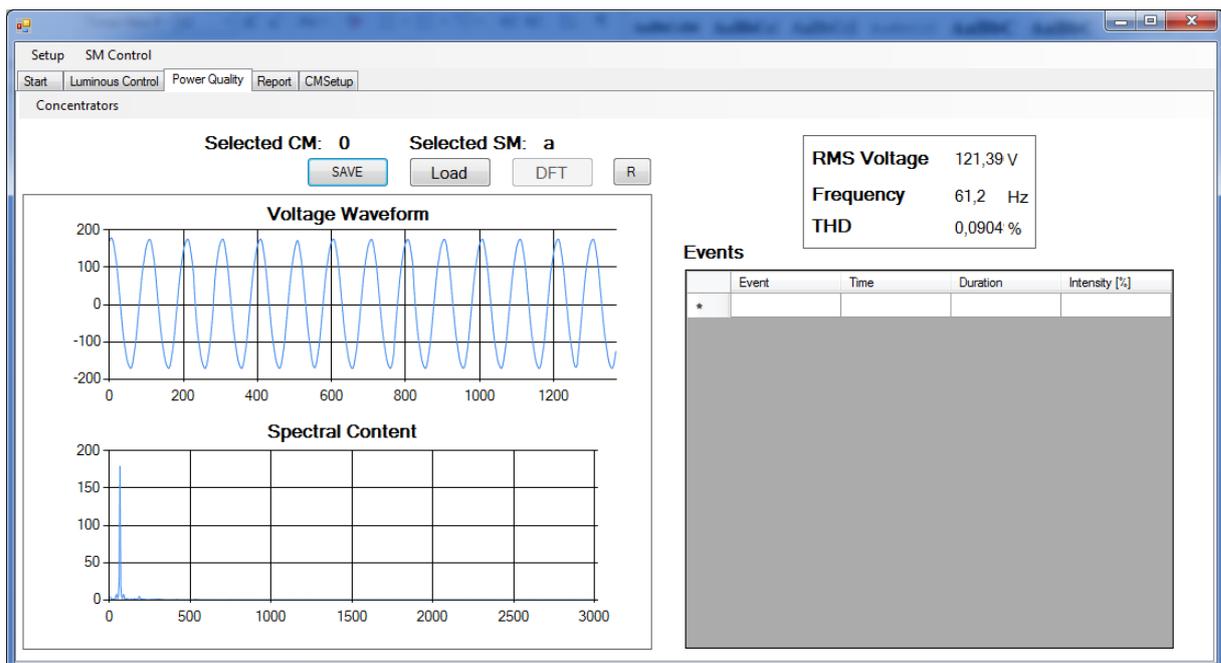


Figura 65. Resultado da análise de conteúdo espectral medindo a tensão provinda da rede elétrica.

Observa-se na Figura 65 que o valor de variação da frequência encontra-se relativamente alto. Isto pode ser explicado devido ao processo de estimação de frequência utilizado neste trabalho, que conforme mencionado anteriormente, este método indireto possui baixa resolução e conseqüentemente resulta em erros consideráveis. Porém, este valor não influencia na análise do conteúdo espectral, visto que foi utilizado uma frequência fixa de 60 Hz.



Quality Energy Report



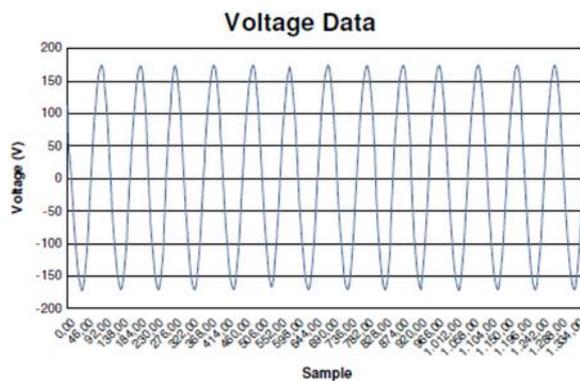
Generation: 25/05/2011 12:03:29

Page: 1

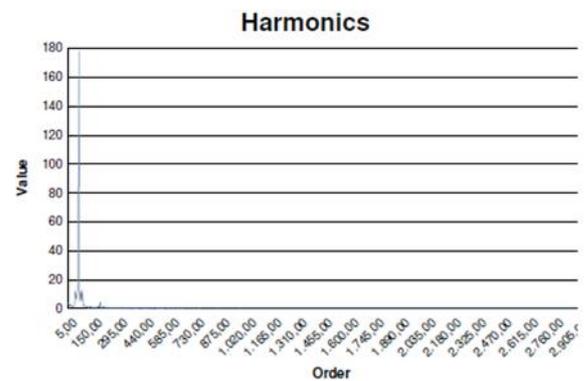
General Information:

Voltage		Current		Power	
Peak Value:	179,00 V	Peak Value:	57 ,00 mA	Inst. Power:	16,00 W
RMS:	126,00				
THD.:	0,09 %				

Voltage Wave:



Harmonic Data:



Generated By: Nimo WebLight

Figura 66. Relatório gerado contendo análise de qualidade de energia e características de elétricas da luminária.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Para realizar a análise econômica, foram propostos dois cenários básicos. O primeiro consiste na instalação do módulo SM em luminárias que já possuem lâmpadas de LED. Já, o segundo cenário, é a substituição de lâmpadas de vapor de sódio e de mercúrio da iluminação pública por lâmpadas à LED com o correspondente sistema proposto nessa dissertação. Note que essas lâmpadas foram escolhidas devido ao seu uso extensivo no sistema de iluminação pública brasileira. Além disso, foram também considerados dois casos de dimerização, onde o primeiro diz a respeito da operação total do sistema de iluminação durante o período de 18:00 às 24:00 e com 50% de dimerização de 24:00 às 6:00. No segundo, é considerado 50% de dimerização durante o período de 18:00 às 6:00 e operação total quando há detecção de pedestres.

A primeira metodologia de dimerização é adequada para ser utilizada em lugares onde existe pouca ou quase nenhuma presença de pedestres depois de um certo tempo (e.g. meia-noite). Esta condição pode ocorrer frequentemente em universidades e praças, quando depois de um tempo específico, o sistema de iluminação tem a função primária de prover segurança. Já, o outro tipo de metodologia de dimerização é bastante apropriado em situações onde o tráfego de pedestres pode não ser esperado consistentemente, como ruas e avenidas em áreas centrais. Neste caso, existe um fluxo ocasional de pedestres devido a atividades diversas, sendo extremamente difícil determinar um período de tempo seguro e específico para proceder com a dimerização. Ressalta-se que nessa estratégia existe um período de histerese que a lâmpada permanece ligada, o qual é apropriada no caso em que o tráfego de pessoas varia em curto prazo, tendo, portanto, o objetivo de não afetar o tempo de vida da luminária. Adicionalmente, nestes lugares é possível determinar um nível máximo de tráfego de pedestres que a implementação do sistema não é praticável.

Para o processo de dimerização baseado em horas, é possível determinar o consumo do sistema de iluminação facilmente apenas relacionando o número de horas que o sistema permanece ligado em um certo estado de iluminação com uma requerida potência, resultando diretamente no consumo de um certo período de tempo. Contudo, não é uma tarefa fácil calcular o consumo de energia do sistema em função do tráfego de pessoas. É necessário estimar o tráfego na área a ser avaliada, permitindo a determinação de um tempo em cada estado de dimerização, respectivamente. Neste sentido, pretende-se utilizar um fator que representa a porcentagem de tempo que o sistema opera com um certo fluxo de pedestres, chamado neste trabalho de fator “T”.

O fator “T” determina qual o valor de tráfego é factível para implementar o sistema de controle de dimerização. Para entender a variação dos resultados com base nesse fator, os parâmetros econômicos são analisados no range de 10% e 90% do tráfego, ou seja, porcentagem em relação ao tempo que a luminária ficará ligada. Um breve resumo dos casos propostos pode ser visto na Tabela 17. Como pode ser notado nas equações presentes nesta tabela é que um dos parâmetros é o número de horas em que a luminária permanece ligada e este valor pode ser determinado através do número de horas de sol que poderiam fortemente influenciar o resultado econômico.

A análise de experimentação foi realizada na cidade de Juiz de Fora, Brasil. Nesta cidade, o número de horas varia entre 10:00 e 30 minutos no solstício de inverno (21 de Junho) e 13 horas e 10 minutos no solstício de verão (21 de dezembro). Portanto, as simulações foram feitas nesses dois períodos extremos.

Tanto os parâmetros elétricos quanto fotométricos do arranjo de LEDs utilizado nesse trabalho são comparados com as lâmpadas de vapor de sódio e mercúrio, conforme visto na Tabela 18. Apesar da alta resposta escotópica dada pelas lâmpadas de vapor de sódio, a tecnologia LED possui distribuição espectral que coincide com a resposta fotópica do olho humano, permitindo menor potência bem como melhor reprodução das cores (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Tabela 17 - Casos de estudo para análise econômica.

Caso	Metodologia	Período de Consumo
Sistema de iluminação que já possui arranjo de LEDs	- De 18:00 às 24:00: 100% ligada - De 24:00 às 6:00: 50% de dimerização	Consumo = número de horas em 100% · potência em 100% + número de horas em 50% · potência em 50%
Substituição das lâmpadas de vapor e de sódio	- De 18:00 às 24:00: 100% ligada - De 24:00 às 6:00: 50% de dimerização	Consumo = número de horas em 100% · potência em 100% + número de horas em 50% · potência em 50%
Substituição das lâmpadas de vapor e de mercúrio	- De 18:00 às 24:00: 100% ligada - De 24:00 às 6:00: 50% de dimerização	Consumo = número de horas em 100% · potência em 100% + número de horas em 50% · potência em 50%
Sistema de iluminação que já possui arranjo de LEDs	- De 24:00 às 6:00: 50% de dimerização - 100% ligada quando há tráfego de pessoas	Consumo = (1 – T) · noite · potência em 100% + T · noite · potência em 50%

Tabela 18 - Comparação entre os parâmetros da lâmpada.

Parâmetro	LED	Vapor de Sódio	Vapor de Mercúrio
Potência	60 W	100 W	125 W
Eficácia luminosa	80 lm/W	90,41 lm/W	53,75 lm/W
Tempo de vida	>50.000h	28.000h	16.000h
IRC	>80	23	54
Luminosidade	4800 lm	9041 lm	6800 lm
Modelo	SC-LD045003	ALP-VS-100W-B-N/A- 09LM-N/A	Luxe HRL 125W/DL/230/E27

Para a análise sobre o retorno do investimento, foi realizada uma comparação entre os custos e benefícios produzidos ao longo da vida do protótipo. A análise de custo consiste de um levantamento detalhado do custo do protótipo bem como estudos dos principais indicadores econômicos que são o *payback* e taxa interna de retorno (TIR).

O período de *payback* é calculado pela simples relação entre o investimento total dividido pela poupança gerada a cada mês, calculando quanto tempo é possível obter lucros a partir deste sistema, conforme visto na equação (5.1). Onde R_j é a receita bruta do projeto em um ano (\$/ano) e C_T é o custo total do projeto (\$).

$$Payback = \frac{C_T}{R_j} \quad (5.1)$$

A TIR é uma taxa capaz de equilibrar os benefícios com o fluxo negativo de investimento, e essa taxa de cálculo é apresentada na equação (5.2). Nota-se que um grande valor de TIR representa um bom investimento. Adicionalmente, com a finalidade de prover referências para comparações, no Brasil a caderneta de poupança tem apresentado uma TIR de aproximadamente 7%. Na equação, o símbolo R_j é a receita anual do projeto no ano j (%/ano), C_j é o custo total do projeto (\$) e n é o tempo de vida do protótipo (ano).

$$\sum_{j=0}^n R_j + (1+i)^j = \sum_{j=0}^n C_j + (1+i)^j \quad (5.2)$$

Para avaliar a análise prevista, é importante estabelecer primeiro o custo do sistema apresentado. Vale ressaltar que, embora as características de qualidade de energia trazem vários benefícios para as concessionárias e consumidores, não é fácil de quantificar sua avaliação econômica e, portanto, não é considerado neste estudo. Neste sentido, os custos incluem somente os gastos necessários para implementar o controle de dimerização, no qual para o primeiro e quarto cenário serão suficientes. Contudo, no segundo e terceiro cenários, os parâmetros econômicos podem mudar devido aos custos referentes à instalação das luminárias à LED.

Na Tabela 19 é mostrado o custo de cada componente do sistema de controle além do custo total. Contudo, não foi considerado os custos de fabricação uma vez que estes podem variar fortemente em relação ao número de unidade produzidas. Como o custo final do protótipo irá mudar de acordo com muitos fatores, na análise econômica considerou-se um custo de \$220, o qual corresponde ao valor similar do produto encontrado no mercado, visto em SCHREDER (2015), sem os impostos de importação.

Tabela 19 - Custo unitário dos elementos pertencentes ao protótipo.

Elemento	Unidade	Custo por unidade	Custo total
Microcontrolador	1	\$12,99	\$12,99
ZigBee	1	\$37,95	\$37,95
Placa	1	\$2,07	\$2,07
Sistema de luminosidade	1	\$2,08	\$2,08
Sensor de presença	1	\$16,04	\$16,04
Conectores	10	\$0,40	\$4,00
Resistor	40	\$0,10	\$4,00
Capacitor	10	\$0,40	\$4,00
Caixa	1	\$34,56	\$34,56
Outros	1	\$15,00	\$15,00
Total		\$132,68	

Considerando que a lâmpada de LED pode operar durante 50.000 horas, foi possível ajustar a avaliação do sistema por volta de 12 anos. Obviamente, essa avaliação é dependente do número de horas que a luminária ficará ligada e da duração média da noite. Os parâmetros econômicos são estimados baseados nas Tabela 17 e Tabela 18 e são apresentados na Tabela 20. Vale ressaltar que o uso de controle de dimerização em torno de 50% do tempo apresenta um baixo tempo de retorno e uma taxa interna de retorno interessante quando comparado ao retorno gerado pela caderneta de poupança.

Tabela 20 - Indicadores econômicos dos principais cenários.

Cenário	TIR	Payback
Sistema de iluminação que já possui arranjo de LEDs	4,7%	11,1 anos
Substituição das lâmpadas de vapor de sódio	49,20%	3,0 anos
Substituição das lâmpadas de vapor de mercúrio	92,60%	2,1 anos

Para o quarto cenário, os valores foram analisados em relação a porcentagem de tempo que o sistema está sobre tráfego a noite. Os resultados são apresentados na Figura 67. Considerando um tempo de vida proposto de 12 anos, a praticabilidade econômica poderia ser restrita a uma porcentagem de tráfego de 50% do tempo de operação. Este alto valor indica um forte potencial econômico para este tipo de sistema. Portanto, na TIR, a viabilidade econômica é restrita a um máximo de 40% do tráfego durante toda noite, resultado assim em taxa maior que a caderneta de poupança.

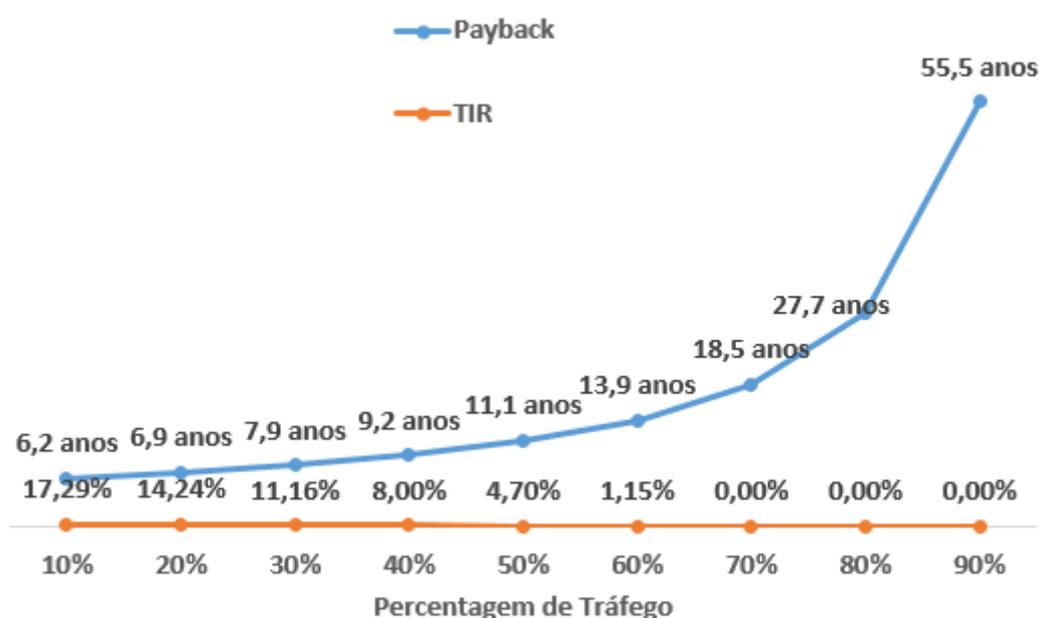


Figura 67 - Payback e TIR para o quarto cenário considerando a variação do tráfego de pedestres.

O custo de fabricação é afetado por muitas razões, dentre elas citam-se quantidade de unidades produzidas, maturidade tecnológica, redução de custo dos componentes, otimização do projeto, entre outros. Considerando que é importante avaliar os parâmetros econômicos do sistema mudando o custo de dimerização do sistema, a Figura 68 mostra a TIR para os três primeiros cenários em relação à redução do custo do projeto em até 40%, e na Figura 69 é apresentada a evolução do tempo de *payback* nas mesmas condições.

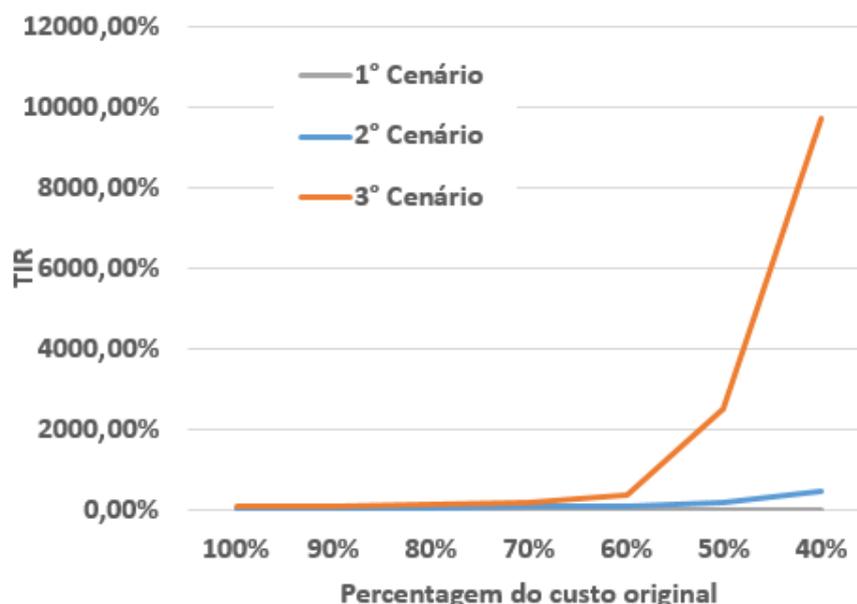


Figura 68 - TIR considerando a variação do custo do projeto.

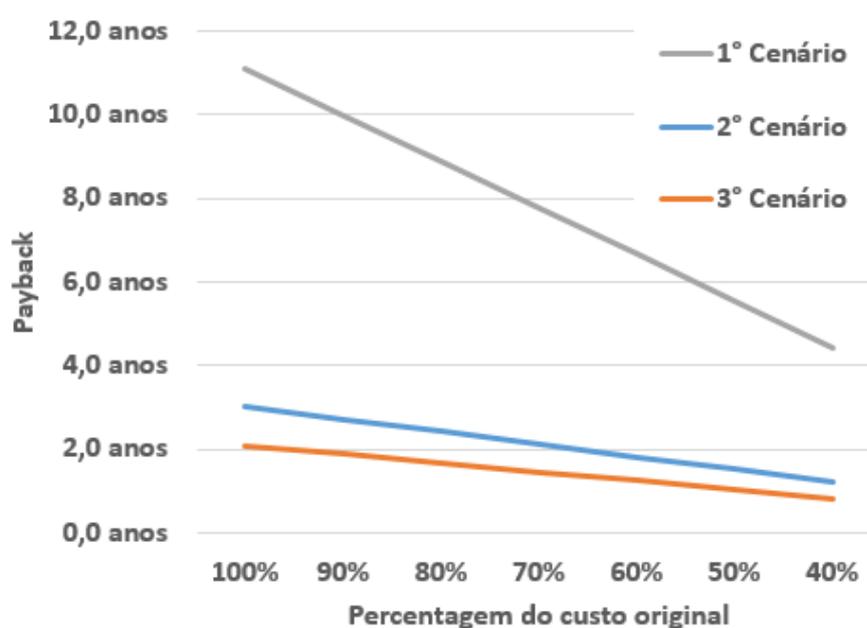


Figura 69 - Payback considerando a variação do custo do projeto.

É possível notar que o tempo de *payback* apresenta-se linearmente quando considerado o custo de redução do sistema enquanto que a TIR varia drasticamente. Embora a redução de 40% pareça grande, os custos são mais elevados que o protótipo em atacado. De acordo com a Figura 2, as perspectivas têm mostrado que a eficiência da iluminação à LED pode aumentar em até 200 lm/W nos próximos anos e levando em consideração essa previsão, torna-se importante avaliar os parâmetros econômicos nessas situações. Na Figura 70 é mostrado o TIR para um controle de dimerização em relação a eficiência atual em até 180 lm/W. Na Figura 71

é realizada a mesma análise para um tempo de *payback*. Observa-se que melhorando a eficiência, a viabilidade de dimerização em comparação com outras tecnologias é aumentada, como esperado. Contudo, é possível notar que se a eficiência do LED aumentar demais, existirá apenas uma pequena margem de ganho para o controle de dimerização, reduzindo fortemente a praticabilidade econômica desta estratégia.

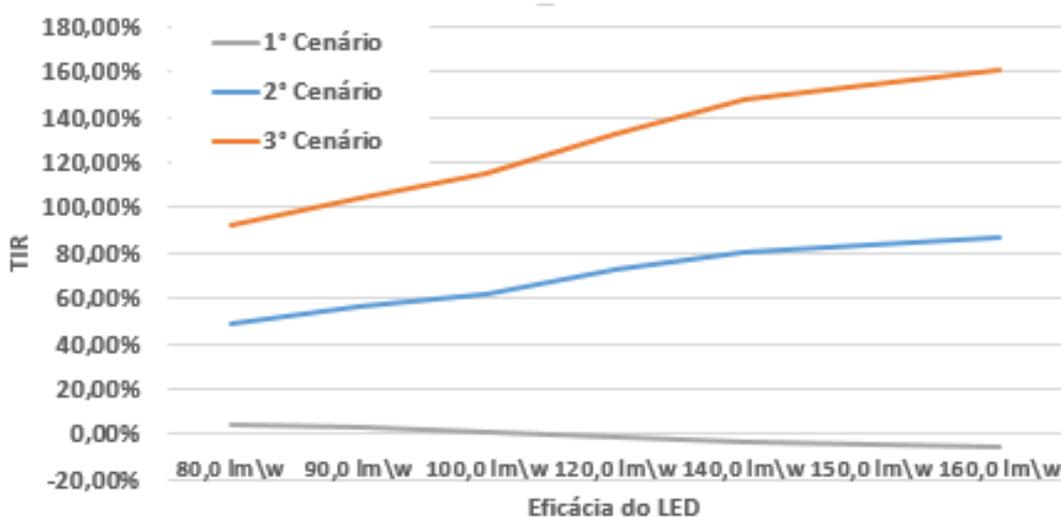


Figura 70 - Variação da TIR considerando o melhoramento da eficiência do LED.

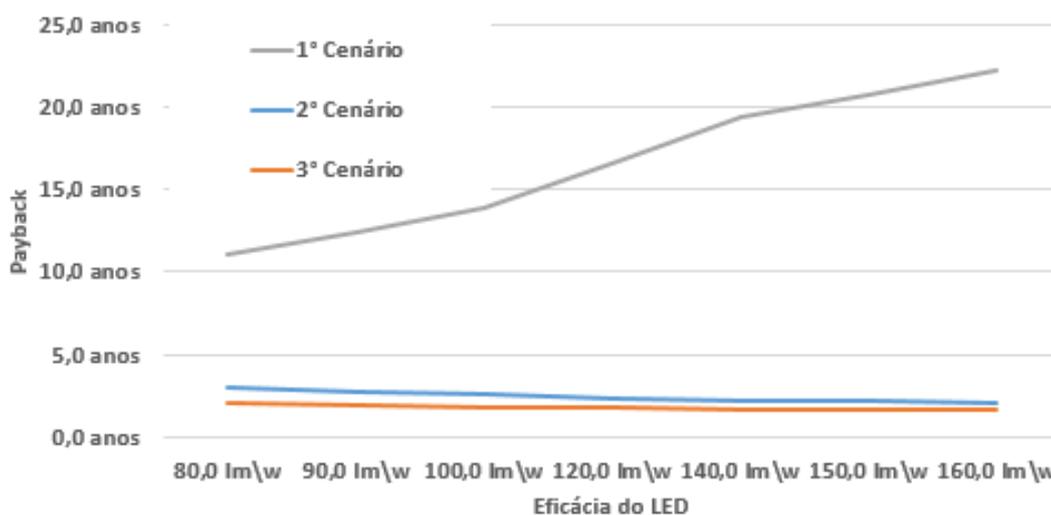


Figura 71 - Variação do Payback considerando o melhoramento da eficiência do LED.

Adicionalmente, existem outras vantagens da utilização do controle de dimerização que não estão sendo retratos nesta seção, como por exemplo o aumento do tempo de vida devido a redução da produção de calor, controle do fator de potência, novas possibilidades para estratégias de dimerização que sejam mais apropriadas para determinados lugares, entre outros.

Além da vantagem da utilização de controladores de intensidade da luz, como o proposto neste trabalho, a tecnologia proposta tem a capacidade de adicionar várias outras funcionalidades, tais como a análise de qualidade de energia, controle de fator de potência, implementação de estratégias de dimerização complexas e específicas, integração com fontes renováveis, dentre outros. Todas estas caracterizam-se de benefícios econômicos e modernização do sistema atual de iluminação pública.

5.4 CONCLUSÃO PARCIAL

Inicialmente foram mostrados os protótipos construídos, detalhando-se tanto o *layout* da placa do SM quanto da placa do CM além de descrever os aspectos construtivos das mesmas. Foram apresentadas todas as medições referentes ao módulo de iluminação escolhido para testar o protótipo. Como pode-se observar também, os resultados obtidos com o sistema supervisorio foram satisfatórios, realizando com boa precisão a análise de alguns parâmetros relevantes para qualidade de energia. Ao comparar o LED com sistemas de iluminação convencionais, foi demonstrado neste trabalho a viabilidade econômica dessa tecnologia, o que proporcionou um tempo real de retorno entre 3 e 11 anos.

Além disso, realizou-se uma avaliação do controle de dimerização considerando uma melhoria na projeção futura da tecnologia de LED e a redução dos custos do sistema de controle. Observou-se que essa redução do custo pode afetar fortemente a viabilidade do sistema, produzindo tempos de retorno menores que 5 anos quando considerando a redução de cerca de 40% no custo de protótipo.

6 CONCLUSÃO

Foi apresentado neste trabalho o desenvolvimento de um equipamento inteligente e modular denominado de CM (sigla do inglês *Control Module*) que possui a finalidade de controlar, monitorar e gerenciar de forma descentralizada os parâmetros da rede elétrica e também as informações pertinentes a certo conjunto de luminárias. Os parâmetros providos de cada luminária e também da rede elétrica são medidos através de um dispositivo inteligente que pode ser conectado em qualquer luminária e foi chamado de SM (sigla do inglês para *Smart Module*), onde é provido de sensores de tensão, de presença, de corrente e luminosidade.

Apresentou-se inicialmente neste trabalho um breve estudo sobre as diversas fontes de luz que são usualmente utilizadas em sistemas de iluminação pública. Foram destacadas todas as características pertinentes das mesmas, tais como características fotométricas, elétricas, IRC e TCC. Além do mais, foi também mostrado as razões na qual a tecnologia LED apresenta-se como uma atual alternativa para substituição das lâmpadas do sistema de iluminação pública convencional, dentre estas foram citadas a sua alta vida útil, seu elevado IRC, sua versatilidade em relação a TCC e viabilidade econômica.

Foi realizado também um breve estudo acerca dos sistemas inteligentes de iluminação, onde foram explicitados os benefícios que podem ser produzidos por estes, tais como dimerização adaptativa, seja em função do horário programado ou seja pela simples detecção de pedestres, o gerenciamento e medições das informações pertinentes ao estado da luminária, acarretando em redução de custos e eficiências dos dispositivos de iluminação, dentre outras. Adicionalmente, vários sensores podem ser integrados aos sistemas inteligentes de iluminação, como por exemplo sensores de tensão, corrente, condições climáticas, entre outros.

Foram apresentados os principais protocolos de comunicação que utilizam tanto de fios ou dispositivos *wireless* para transmissão de dados. As principais diferenças dos mesmos e suas respectivas características foram abordadas de modo a identificar os melhores protocolos que podem ser associados ao sistema inteligente de iluminação desenvolvido no presente trabalho. Conclui-se que a utilização do ZigBee para o envio de informações até o módulo CM é uma alternativa viável uma vez que permite o fácil desenvolvimento da rede *mesh* e também devido ao seu baixo consumo e possibilidade de integração de diversos módulos. Já, a preferência pela utilização do protocolo ethernet para a troca de informações entre o SS e CM foi devido à grande taxa de transferência permitida, popularidade da tecnologia, desempenho e velocidade.

Foram apresentados todos os requerimentos para a construção dos dois módulos propostos neste trabalho, sendo mostrado também os resultados obtidos nos testes de validação

dos mesmos. Foi possível observar que os módulos atingiram os objetivos de troca de informações entre eles, medição de alguns parâmetros relevantes de qualidade de energia além de permitir o controle e gerenciamento das luminárias.

Foi apresentado também o sistema supervisorio criado e todas suas funcionalidades para controle e gerenciamento das luminárias e análise dos parâmetros de qualidade de energia. Esse sistema facilita a interação entre usuários e os módulos, sendo a principal forma de visualização das informações provenientes dos dispositivos instalados ao longo da rede de distribuição de energia. Pode-se concluir que o sistema atingiu satisfatoriamente os objetivos principais, sendo possível analisar dados de oscilografia para extração de informações uteis além da possibilidade de controle e gerenciamento das luminárias.

Ao final deste trabalho, pode-se concluir que os resultados foram satisfatórios, sendo alcançados todos os objetivos propostos, como a construção de uma ferramenta para controle e gerenciamento das luminárias que tem capacidade também de extrair informações uteis para qualidade de energia do sistema de distribuição. Tudo isso com um aplicativo para interface com usuário que facilita a utilização do sistema apresentado. Vale salientar que todas as informações foram descritas em detalhes, de forma que seja possível a reprodução total ou parcial do sistema inteligente apresentado.

Para trabalhos futuros pretende-se desenvolver uma rede privada VPN utilizando protocolos de criptografia a fim de prover segurança dos dados trafegados entre os módulos e o sistema supervisorio. Para validação da rede *mesh*, pretende-se integrar uma quantidade suficiente de módulos trocando informações entre si.

Observa-se que com esta infraestrutura de comunicação desenvolvida e todo o hardware de aquisição de sinal acoplados na rede de distribuição, é possível que em trabalhos futuros possa ser desenvolvido novos algoritmos para detecção de furto de energia elétrica.

Para trabalhos futuros é necessário que este projeto seja testado em um ambiente real, analisando confiabilidade e consistência de dados. Assim, através da capacidade de análise monofásica usando sincronismo de tempo entre os SMs, é possível que seja feito posteriormente um estudo trifásico da rede elétrica.

Em relação aos algoritmos de qualidade de energia, pretende-se melhorá-los findando maior confiabilidade dos resultados quando considerando a natureza oscilante do sinal da rede elétrica. A estimação de frequência precisa ser realizada com maior precisão e de forma mais rápida, sendo necessário inclusive que esta seja desenvolvida para rodar dentro do processador do SM, evitando dessa maneira que a estimação de frequência só ocorra quando a oscilografia se complete. O filtro utilizado baseia-se em um modulador fixo, portanto, torna-se interessante

avaliar futuramente o desempenho de uma estrutura retroalimentada com a informação do estimador de frequência, de forma que a modulação seja ajustável, acompanhando a oscilação de frequência do sinal.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA DO AUTOR

Artigos Publicados Em Conferências Internacionais:

ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, P. S.; MONTEIRO, N. R. C.; PINTO, M. F. BRAGA, H. A. C. LED-based Electronic System to Support Plant Physiology Experiments. IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Turquia, 2014.

ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, P. S.; PINTO, M. F.; VALLE, R.L.; MARTINS, H.N.; BRAGA, H.A.C. A Fast Dynamics and PWM-Dimmable LED Driver for Accurate Control of Illumination in Plants Physiology Experiments. IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON). Brasil, 2014.

PINTO, M. F.; MENDONÇA, T. R. F; OLIVI, L. R.; COSTA, E. B. Costa; MARCATO, A.L. M. A modified approach of potential field method for control of trajectory tracking and obstacle avoidance. IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON). Brasil, 2014.

MENDONÇA, T. R. F; PINTO, M. F.; DUQUE, C. A. Least Squares Optimization of Zero Crossing Technique for Frequency Estimation of Power System Grid Distorted Sinusoidal Signals. IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON). Brasil, 2014.

PINTO, M. F.; SOARES, G. M.; MENDONÇA, T. R. F.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H. A. C. Smart Modules for Lighting System Applications and Power Quality Measurements. IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON). Brasil, 2014.

MENDONÇA, T. R. F.; PINTO, M.F.; DUQUE, C. Variable Window Length Applied To A Modified Hanning Filter For Optimal Amplitude Estimation Of Power Systems Signals. 2015 IEEE PES General Meeting. Estados Unidos, 2015.

PINTO, M. F.; MENDONÇA, T. R. F.; DUQUE, C. A.; BRAGA, H. A. C. Power Quality Measurements Embedded in Smart Lighting Systems. IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Brasil, 2015.

PINTO, M. F.; MENDONÇA, T. R. F.; COELHO, F.;BRAGA, H. A. C. Economic Analysis of a Controllable Device with Smart Grid Features Applied to LED Street Lighting System. IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Brasil, 2015.

MENDONÇA, T. R. F.; PINTO, M.F.; MARCATO, A. L. M. Electric Field Intensity for Nonlinear Classifier: A Novel Approach. IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Brasil, 2015.

MENDONÇA, T. R. F.; PINTO, M.F.; DUQUE, C. A. Adjustable Window for Parameter Estimation Considering the Time-Varying Frequency of Power Systems Signals. IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Brasil, 2015.

Artigos Publicados Em Conferências Nacionais:

PINTO, M. F.; MELO, A. G.; LOPES, L. C. G.; JUNIOR, L. O. A.. Calibração De Imagens Estereoscópicas De Objetos Em 3 Dimensões Para Geração Automática De Trajetória De Manipuladores Robóticos Industriais. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI). 2011.

PINTO, M. F.; LANES, M. M.; TOLEDO, O. M. Módulo Didático Flexível de Baixo Custo para Sensoriamento de Velocidade. Congresso Brasileiro de Automação (CBA). 2012.

PAULA, B. F. S., PINHEIRO, C. V., PINTO, M. F., SILVEIRA, D. D. Comparação estatística entre a educação presencial e a educação a distância. XLII Congresso brasileiro de educação em engenharia (COBENGE). 2014.

PINTO, M. F.; MELO, A. G.; LANES, M. M.; TOLEDO, O. M. Desenvolvimento de um kit didático para controle e acionamento de motores CC. XLII Congresso brasileiro de educação em engenharia (COBENGE). 2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACTILUME. **Actilume Controller**. Disponível em http://www.ecat.lighting.philips.com.br/l/controles-de-iluminacao/sistemas-de-controle-de-iluminacao-interior/actilumedali/913700613772_eu/. Acessado no dia 11/03/2015.
- AGRAWAL, G.P. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 1989.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **American National Standard Practice for Roadway Lighting**. USA, 200, RP-08-00.
- ANDREI, H.; CEPISCA, C.; DOGARU-ULIERU, B.; IVANOVICI, T.; STANCU, L.; P. C., ANDREI. **Measurement Analysis of An Advanced Control System For Reducing The Energy Consumption Of Public Street Lighting Systems**. IEEE Bucharest PowerTech, 2009.
- ATMEL. Application Note Atmel AT04022: Dali Slave with XMEGA e Hardware User Guide. Disponível em www.atmel.com/images/atmel-42174-avr-xmega-dali-slave-with-xmega-hardware-user-guide_application-note_at04022.pdf. Acessado no dia 21/10/2014.
- BAKER, N. **ZigBee and Bluetooth: Strengths and Weakness for industrial Applications**. IEEE Computing & Control Engineering, vol 16, no.2, pp20-25, 2005.
- BRITO, M. A. G.; FERREIRA, C. S.; SAMPAIO L. P.; CANESIN, C. A. **Automatic Dimming Mult-Lamp Fluorescent Management System With Active Input Power Factor Corrector Stage**. IET Power Electronics, 2012.
- BUSH, D. W. *High Speed Fiber Optic Networks*. Northcon/93. Conf. Rec., 1993.
- CASA, G.; VERONI, F. **A New Way To Manage Public Lighting**. IEEE Meeting and Tariffs for Energy Supply, no. 462, pp. 91 – 95, 1999.
- CASTRO, M.; JARA, A. J.; SKARMETA, A. F. G. **Smart Lighting solutions for Smart Cities**. 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2013.
- CEMIG. **Manual de Distribuição – Projetos de Iluminação Pública**. 2012.
- CIE (1983) “**The Basis of Physical Photometry**”. Publicação CIE No 18. Commission Internationale de L’Éclairage, France.
- CRAFORD, M. G. **Current State of the art in high brightness LEDs**. American Physical Society Meeting, 2007.
- DALIPRO. **Dali Pro PB Coupler**. Disponível em http://www.osram.com.br/osram_br/produtos/tecnologia-led/sistemas-de-gerenciamento-da-iluminacao/dali-professional/controladores/dali-pro-pb-coupler/index.jsp?search_result=%2fosram_br%2fsearch%2fadvanced_search.jsp%3faction%3ddosearch%26inp_searchterm_1%3ddali%26website_name%3dosram_br. Acessado em 11/03/2015
- DENARDIN, G. W.; BARRIQUELLO, C.H.; CAMPOS A.; PRADO, R. N. **An Intelligent System For Street Lighting Monitoring And Control**. COBEP Power Electronics Conference, 2009.
- DIGI INTERNATIONAL INC., **Datasheet XBee®/XBee-PRO® RF Modules**. Disponível em: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module>. Acessado no dia 20/08/14.
- DINIZ, P. S. R.; DA SILVA, E. A. B. & NETTO, S. L. **Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas**. Trad. Luiz W. P. Biscainho. Porto Alegre: Bookman, 2004. 590p
- DOE. **Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap**. U. S. Department of Energy. [S.l.], p. 1-93, 2012.

- D-ROBOTICS. **DHT11 Humidity & Temperature Sensor**. Disponível em <http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>. Acessado no dia 03/11/2014.
- EROL-KANTARCI, M.; MOUFTAH, H.T. **Energy-Efficient Information And Communication Infrastructures In Smart Grid: A Survey on Interactions And Open Issues**. IEEE Communication Survey & Tutorials, vol.17, no. 1, 2015.
- FARHANGI, H. **The path of the smart grid**. IEEE Power Energy Mag., vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Feb. 2010
- FERREIRA, A.L.;QUAN, Z.; RIBEIRO. M.V. **Robust and Reduced-Rank UWB Receiver for Green and Smart Home Communication Based on Power Line**. IEEE International Symposium on Power Line Communication and its Applications, 2012.
- GACIO, D. et al. **PWM Series Dimming for Slow-Dynamics HPF LED Drivers: the High-Frequency Approach**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 59, n. 4, p. 1717-1727, 2012.
- GALLI, S.; SCAGLIONE, A.; WANG, Z. **For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid**. Proc. IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 998–1027, Jun. 2011.
- GE. **LightGrid™ Outdoor Wireless Control System**. Disponível no site: <http://www.gelighting.com/LightingWeb/na/solutions/control-systems/lightgrid-outdoor-wireless-control-system.jsp>. Acessado em 29/09/2014.
- GUANG, Y. **The Intelligent Lighting Control System and its Appliance**. Fujian Architectural Technology, no. 2, pp.49-50, 2007.
- IEC. **IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods**. [S.l.]. 2008.
- IEC. **IEC 60929. AC-Supplied Electronic Ballasts for tubular Fluorescent Lamps – Performance Requirements**. 2006.
- IEEE 802.15.4, **Local and metropolitan area network standards**. Disponível em <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf> e acessado no dia 20/08/2014.
- IEEE 802.3, **IEEE Standard for Ethernet**, Disponível em <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html> e acessado no dia 20/09/2014.
- INTELILIGHT. **Intelilight® STREET LIGHTING MANAGEMENT SYSTEM**. Disponível em <http://intelilight.eu/>. Acessado em 29/09/2014.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU-T). **G.9956 - Narrow-band OFDM Power Line Communication Transceivers – Data Link Layer Specification**. 2012.
- ITU TELECOM. Disponível no site: <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. Acessado no dia 14/10/2014.
- KASAHARA, Y.; MIKI, M.; YOSHIMI, M. **Preliminary Evaluation of the Intelligent Lighting System with Distributed Control Modules**. 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2011.
- LECCESSE, F. **Remote-Control System of High Efficiency and Intelligent Street Lighting Using a ZigBee Network of Devices and Sensors**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 28, NO. 1, JANUARY 2013.
- LECCESSE, F.; LEONOWICZ, Z. **Intelligent Wireless Street Lighting System**. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2012.
- LEE, J.S. **Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks**. IEEE Transactions Consumer Electron., vol.52, no.3, pp.724-729, 2006.
- LI, F.; CHEN, D.; SONG, X.; CHEN, Y. **LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting**. Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific. [S.l.]: [s.n.]. p. 1-3, 2009.

- LONG, X.; LIAO R.; ZHOU, J. **Development of Street Lighting System-Based Novel High-Brightness LED Modules**. IET optoelectronics, vol.3, pp; 40-46, 2009.
- MARIHART, D. J. **Communications Technology Guidelines for EMS/SCADA Systems**. IEEE Transaction Power Delivery, vol. 16, no. 2, pp. 181–188, 2001.
- MAXIM INTEGRATED. **DS1307 DATASHEET**. Disponível em <http://www.dfrobot.com/image/data/DFR0151/V1.1/DS1307%20datasheet.pdf>. Acessado no dia 03/11/2014.
- MEANWELL, **60W Single Output Class 2 Switching Power Supply ELN-60 series**. Disponível em <http://www.meanwell.com/search/eln-60/ELN-60-spec.pdf> e acessado em 10/08/2014.
- MICROCHIP. **Digitally Addressable Lighting Interface (DALI) Communication**. Disponível em ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01465A.pdf. Acessado no dia 21/10/2014.
- MOHAN, Ned. **Power Electronics: A First Course**. John Wiley & Sons, 2012.
- NADUVATHUPARAMBIL, B.; VALENTI, M. C.; FELIACHI, A.; ENG, E. **Communication Delays in Wide Area Measurement Systems**. Proc. Thirty-Fourth Southeast. Symp. Syst. Theory, pp. 118–122, 2002.
- NORSTRÖM, C.; HANSSON, H. **Editorial Special Section on Factory Communication Systems**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.1, pp.149-150, 2005.
- OKSMAN, V.; ZHANG, J. **G.HNEM: The New ITU-T Standard on Narrowband PLC Technology**. *IEEE Commun. Mag.*, no. December, pp. 36–44, 2011.
- OSRAM, 2010 Disponível em: http://olafsson.is/resources/Files/Olafsson_is/fyrirlestrar/1010-OSRAM-LED.pdf e em: <http://www.osram.com.br/media/resource/HIRES/494652/luxvance-led-street-light.pdf>. Acessado no dia 29/09/2014.
- PORCINO, D.; HIRT, W. **Ultra Wideband Radio Technology: Potential and Challenges Ahead**. IEEE Communications Magazine, vol.41, pp.66-77, 2003.
- PROCEL. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel**. Disponível em www.eletrobras.gov.br/procel. Acessado em 26/09/2011.
- PROCEL Reluz. **Resultados Procel 2014 Ano Base 2013**. [S.l.], p. 37. 2014.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; JORGE, M. J.; PINTO, P. D.; BRAGA, H. A. C. **Um Estudo Comparativo de Sistemas de Iluminação Pública: Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão**. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2010.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; JORGE, M. J.; PINTO, P. D.; BRAGA, H. A. C. **Na Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps**. IEEE/IAS International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011.
- SCHREDER. **The Owllet Telemangement system**. Disponível em <http://www.schreder.com>. Acessado em 30/01/2015.
- SKLAR, B. **Digital Communications - Fundamentals and Application**. Second Ed., 2001.
- SMARTGRID. Disponível em: <http://www.smartgrids.eu/>. Acessado em: 18/09/2014.
- STMICROELECTRONICS. UM1629 – User Manual. Disponível em www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00082096.pdf. Acessado no dia 21/10/2014.
- TAN, Y. K.; HUYNH, T. P.; WANG, Z. **Smart Personal Sensor In DC Grid Powered LED Lighting System**. IEEE Transactions on smart grid, vol. 4, no. 2, 2013.
- TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED **TM4C123. ARM TM4C123 MICROCONTROLLER**. Disponível em <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf>. Acessado no dia 21/10/2014.

- TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED TM4C123. **ARM TM4C1294 MICROCONTROLLER.** Disponível em <http://www.ti.com/lit/ug/spmu365a/spmu365a.pdf>. Acessado no dia 03/11/2014.
- TSAO, J. Y. **Solid State Lighting: Lamps, Chips and Materials for Tomorrow.** IEEE Circuits & Devices, vol. 20, no.3, pp. 28 – 37, 2004.
- U-BLOX. **NEO-6 u-blox 6 GPS Modules.** Disponível em [http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). Acessado no dia 03/11/2014.
- VISHAY SEMICONDUCTORS. **BPW34, BPW34S.** Disponível em <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>. Acessado no dia 24/05/2015.
- WANG, X.; REN, Y; ZHAO, J.; GUO, Z.; YAO, R. **Comparison of IE 802.11e and IEEE 802.15.3 MAC.** Proceeding IEEE CAS Symposion Emerging Technologies: Mobile & Wireless Commum, pp.675-680, 2004.
- WILLIG, A. **An Architecture for Wireless Extension of Profibus.** Proceedings IEEE International Conference on Industrial Electronics (IECON'04), pp.2369-2375, 2004.
- YI, P.; IWAYEMI, A.; ZHOU, C. **Developing ZigBee Deployment Guideline Under WiFi Interference for Smart Grid Applications.** IEEE Transactions on Smart Gird, vol.2, no.1, March, 2011.
- ZHANG, Y.; ZHAO, L.; WANG, L.; ZHANG, S. **A Web-based Management System for Urban Road Lighting.** International conference on web informations systems and mining, 2010.