



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MONTES CLAROS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL E SISTEMAS

Raphael Pereira Alkmim

SISTEMA DE GESTÃO PARA CONTROLE E
MONITORAMENTO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM
LUMINÁRIAS DO TIPO LED

Montes Claros – MG
Outubro de 2018

Raphael Pereira Alkmim

**SISTEMA DE GESTÃO PARA CONTROLE E MONITORAMENTO
DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LUMINÁRIAS DO TIPO LED**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, da Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes), como exigência para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional e Sistemas.

Orientador: **Prof. Dr. Marcel Veloso Campos**

Montes Claros – MG
Outubro de 2018

Raphael Pereira Alkmim

SISTEMA DE GESTÃO PARA CONTROLE E MONITORAMENTO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LUMINÁRIAS DO TIPO LED

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, da Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes), como exigência para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional e Sistemas.

Montes Claros, 19 de outubro de 2018.

Orientador: _____

Prof.º Dr. Marcel Veloso Campos
Universidade Estadual de Montes Claros

Membros:

Prof.º Dr. Maurílio José Inácio
Universidade Estadual de Montes Claros

Prof.º Dr. Nilton Alves Maia
Universidade Estadual de Montes Claros

Montes Claros – MG
Outubro de 2018

A415s

Alkmim, Raphael Pereira.

Sistema de gestão para controle e monitoramento de iluminação pública com luminárias do tipo LED [manuscrito] / Raphael Pereira Alkmim. – Montes Claros, 2018.

108 f. : il.

Bibliografia: f. 92-95.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas/PPGMCS, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Veloso Campos.

1. Iluminação pública – Monitoramento - Controle. 2. Redes de sensores sem fio. 3. Dimerização. 4. Tecnologia – Luminária - LED (*Light Emitting Diode*). I. Campos, Marcel Veloso. II. Universidade Estadual de Montes Claros. III. Título.

1 - Identificação do Aluno

Nome: Raphael Pereira Alkmim

Matrícula: 10009639

Linha de Pesquisa: Modelagem Computacional e Sistemas

2 - Sessão de Qualificação

Título: "Sistema de Gestão para controle e monitoramento de iluminação pública com luminárias do tipo Led".

3 - Comissão Examinadora

Nome	Função	Assinatura
Prof. Dr. Marcel Veloso Campos (UNIMONTES)	Orientador(a)	<i>M. Veloso</i>
Prof. Dr. Maurílio José Inácio (UNIMONTES)	Examinador(a)	<i>J. Inácio</i>
Prof. Dr. Nilton Alves Maia (UNIMONTES)	Examinador(a)	<i>N. Maia</i>

4 - Resultado

A comissão Examinadora, em **19/10/2018** após Defesa de Dissertação e arguição do(a) candidato(a), decidiu:

- pela aprovação da Dissertação
- pela reprovação da Dissertação
- pela revisão de forma, indicando o prazo de 30 dias para apresentação definitiva.
- pela reformulação da Dissertação, indicando o prazo de _____ dias para nova versão.

Preencher somente em caso de revisão de forma:

- O(a) aluno(a) apresentou a revisão de forma e a Dissertação foi aprovada.
- O(a) aluno(a) apresentou a revisão de forma e a Dissertação foi reprovada.
- O(a) aluno(a) não apresentou a revisão da forma.

Preencher somente em caso de revisão de reformulação:

- O(a) aluno(a) apresentou a reformulação e a Dissertação foi aprovada.
- O(a) aluno(a) apresentou a reformulação e a Dissertação foi reprovada.
- O(a) aluno(a) não apresentou a reformulação.

Autenticação

Orientador(a) Comissão Examinadora

19/10/2018 *M. Veloso*
 Data Assinatura

Autenticação

Coordenador

 Data Assinatura

Prof. René Rodrigues Veloso
 Coordenador do PPGMCS
 Unimontes - Masp 1135131-9

Dedico este trabalho aos que
contribuíram para a sua
concretização e a aqueles que
acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela presença na minha vida, por me proporcionar saúde, força e iluminar meus caminhos para alcançar a vitória mesmo diante das dificuldades.

Ao professor Dr. Marcel Veloso, pela sabedoria e amizade durante as atividades e conversas sobre o desenvolvimento deste trabalho, apontando os rumos essenciais para a sua concretização.

À empresa Minera Sistemas, na pessoa do Agnaldo, pela parceria firmada durante o desenvolvimento deste trabalho e pelos esclarecimentos prestados.

À empresa DEMAPE, em especial na pessoa do Cristyano, responsável pela articulação da parceria firmada, disponibilizando a luminária para realização dos testes.

À minha família, especialmente aos meus pais Jurandir e Deuseni, pelo amor, paciência, confiança, incentivo e educação que ofereceram durante minha vida, e pelo esforço e dedicação para que meus sonhos se concretizem.

Aos meus irmãos Rodrigo e Junior, pelo apoio e incentivo durante minha vida.

À minha namorada Bruna, pelo incentivo e contribuição, por apresentar questionamentos e auxiliar no desenvolvimento de trabalhos científicos. E pelo seu amor, carinho e companheirismo.

A todos os professores que contribuíram com minha vida acadêmica, transmitindo conhecimento para a minha formação profissional, e contribuíram para o meu crescimento pessoal e intelectual. Em especial aos professores do PPGMCS, pelos ensinamentos e dedicação ao ministrar as disciplinas, que foram muito importantes para o meu crescimento profissional e para a realização desta pesquisa.

Aos meus colegas de sala e amigos, com os quais tive a oportunidade de aprender muitas coisas e compartilhar momentos de diversão e preocupação. Agradeço pela amizade, incentivo e compreensão nos momentos de ausência.

Enfim, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento profissional. Meus sinceros agradecimentos.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin.

RESUMO

Tecnologias que auxiliam no desenvolvimento de infraestruturas urbanas são cada vez mais utilizadas por trazerem inovação e agilidade no prosseguimento de atividades. Desse modo, as *smart cities* trazem eficiência e auxiliam no controle e monitoramento de estruturas urbanas, atuando, dentre outras áreas, na iluminação pública que utiliza tecnologias viáveis, como a LED. Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo principal desenvolver um sistema de gestão capaz de controlar e monitorar os pontos de iluminação pública com luminárias do tipo LED, utilizando uma rede de comunicação sem fio. De modo específico, buscou-se realizar o levantamento bibliográfico sobre a temática, desenvolver o hardware e a programação das placas instaladas nos pontos de iluminação para controlá-los e monitorá-los por meio das leituras de sensores, realizar a configuração das placas de comunicação sem fio, desenvolver o hardware e programação das placas concentradoras e desenvolver a interface gráfica do sistema. A metodologia adotada privilegiou a pesquisa bibliográfica e documental sobre a temática que mais tarde sustentaram as escolhas dos equipamentos do produto, desenvolvimento do sistema e realização de testes para comprovação da sua viabilidade. Foram realizadas as simulações das falhas para verificação do funcionamento e também a variação da potência. Os resultados se mostram satisfatórios, visto que com a utilização do sistema é possível realizar o controle em uma grande faixa de valores para reduzir a potência da luminária. O alcance da comunicação está relacionado diretamente com o ambiente em que os rádios de comunicação estão inseridos. Nesses testes, a comunicação direta alcançou 122,8 metros; já nos ambientes com barreiras a distância de comunicação, sofre atenuações à medida que se aumentam as barreiras. A condição máxima de obstáculos testados foram 5, nesta a distância máxima atingida foi de 19,8 metros. São raras as condições de se ter barreiras entre os rádios instalados nos pontos de iluminação, pois a grande maioria está em visada direta e a distância média entre os mesmos é de 40 metros. De acordo com os dados obtidos com a distância atingida em visada direta é possível realizar saltos de comunicação de até 2 pontos de iluminação, deste modo todos os testes mostram a viabilidade de instalação e utilização do sistema.

Palavras-chave: Iluminação Pública. Monitoramento da iluminação pública. Controle de iluminação pública. Redes de sensores sem fio. Dimerização.

ABSTRACT

Technologies supporting urban infrastructure development are increasingly used for they lead to innovation and agility in the progress of activities. Therefore, *smart cities* bring efficiency and assistance to the control and monitoring of urban structures, acting, among other areas, in public lighting that employ viable technologies, such as LED. Based on the above considerations, the main objective of this work is to develop a management system capable of controlling and monitoring public lighting points with LED lighting fixture, using a wireless communication network. Specifically, measures to achieve the objective included a bibliographical survey covering the subject, hardware development and programming of the boards installed in the lighting points to control and monitor them through the sensor readings, configuration of wireless communicator boards, development of hardware and programming of the concentrator boards and development of a system graphical interface. The methodology adopted focused on the bibliographical and documentary research on the theme, which later on supported product equipment choice, system development and testing to prove its feasibility. Failure simulations were performed in order to verify the operation and also power variation. The results herein presented are satisfactory, as the use of the system makes it possible to control a large range of values to reduce the lighting fixture power. Communication range is directly related to the environment in which communication radios are inserted. In these tests, direct communication reached a distance of 122.8 meters; whereas in environments with barriers, communication suffered mitigations as the barriers increased. The maximum number of obstacle conditions tested was five, in which the maximum distance reached was 19.8 meters. The conditions of having barriers between the radios installed in illumination points are rare, since the vast majority are in direct sight and the average distance between them is 40 meters. According to the data obtained with the distance reached in direct sight, it is possible to perform communication leaps of up to two points of illumination; thus, all the tests demonstrate the viability of installation and use of the system.

Keywords: Public Lighting. Public lighting monitoring. Public lighting control. Wireless sensor networks. Dimerization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Relação entre dispositivos e tipo	29
FIGURA 2 – Topologia estrela em Zigbee	30
FIGURA 3 – Topologia árvore em Zigbee	31
FIGURA 4 – Topologia Mesh em Zigbee	32
FIGURA 5 – Redes com a tecnologia Bluetooth	34
FIGURA 6 – Estrutura de uma rede de celular.....	36
FIGURA 7 – Representação do sinal PWM.....	41
FIGURA 8 – Tipos de filtros.....	43
FIGURA 9 – Funcionamento do sistema.....	45
FIGURA 10 – Operação do sistema.....	48
FIGURA 11 – Ligação da placa no ponto de iluminação pública.....	49
FIGURA 12 – Mensagens utilizadas na comunicação do sistema	56
FIGURA 13 – Filtro Utilizado	63
FIGURA 14 – Gráfico de Ganho(dB) e phase.	64
FIGURA 15 – Simulação do circuito do filtro no Proteus.....	65
FIGURA 16 – Medições do filtro em placa final.....	66
FIGURA 17 – Circuito montado para teste do sensor de corrente.	67
FIGURA 18 – Local de realização do teste de comunicação de visada direta, apresentando a máxima distância obtida.....	72
FIGURA 19 – Distância entre os xbee's.....	74
FIGURA 20 – Cadastro do ponto de iluminação..	76
FIGURA 21 – Ponto de iluminação com o seu status identificado no sistema.	78
FIGURA 22 – Circuito montado com chaves para simular defeitos.....	79
FIGURA 23 – Imagem dos valores de dimerização na interface e o ponto de iluminação.....	81
FIGURA 24 – Procedimento para realizar medidas de iluminância.....	82
FIGURA 25 – Módulo de gráfico.	85
FIGURA 26 - Planta do primeiro andar do prédio de ciências exatas da UNIMONTES.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampère.

A/D – Analógico / Digital.

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais.

CI – Circuito Integrado.

D/A – Digital / Analógico.

dB - Decibéis.

DSP's - *Digital Signal Processor* (Processador de sinal digital).

FFD - *Full Function Device* (Dispositivo de Função Completa).

GHz - Giga Hertz.

GND – Ground (Terra).

Hz - Hertz.

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos).

ISM - *Industrial Scientific and Medical* (Industrial, científico e médico).

Kb - KiloByte.

LAN - *Local Area Network* (Rede de área local).

LED - *Light Emitting Diode* (Diodo emissor de luz).

Man - Metropolitan Area Network (Rede de Área Metropolitana).

Mb - Megabyte.

Mbps - Megabyte por segundo.

Mt - Metro.

PCB - Printed Circuit Board (Placa de circuito impresso).

PWM - *Pulse Width Modulation* (Modulação por largura de pulso).

RF - Radiofrequência.

RFD - Reduced Function Device (Dispositivo de função reduzida).

UNIMONTES - Universidade Estadual de Montes Claros.

V- Volts.

Wam - Wide Area Network (Rede de Longa Distância).

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparação das características dos vários tipos de lâmpadas.....	22
TABELA 2 – Especificações IEEE 802.11.....	33
TABELA 3 – Combinações de leituras dos sensores indicando situações ideais de leitura do ponto.....	50
TABELA 4 – Combinações de leituras dos sensores que indicam problema de alimentação do ponto, quando existe falha em sensores.....	51
TABELA 5 – Combinações de leituras dos sensores que indicam falha no relé do ponto, quando existe falha em sensores.....	53
TABELA 6 – Combinações de leituras dos sensores que indicam luminária queimada.....	54
TABELA 7 – Significado dos termos da mensagem de comunicação	56
TABELA 8 – Valores de entrada e saída do filtro.....	96
TABELA 9 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do sensor, utilizando o módulo sensor de corrente no teste	97
TABELA 10 – Resposta ao utilizar as equações para aproximar as leituras do módulo ao valor do alicate amperímetro	99
TABELA 11 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do módulo sensor com a equação de 4° grau para aproximar as leituras.....	101
TABELA 12 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do sensor, utilizando o circuito do sensor de corrente conforme o datasheet	103
TABELA 13 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do sensor montado conforme datasheet (com a equação linear).	105
TABELA 14 – Distância máxima de comunicação de acordo com o ambiente.	107
TABELA 15 - Identificação realizada pelo sistema de acordo com as situações simuladas.....	80
TABELA 16 – Medidas de iluminância em lux de acordo com a distância entre o luxímetro e a luminária	83

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
CAPÍTULO 1.....	19
1.1 Iluminação pública.....	19
1.1.1 Tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública.....	20
1.2 Tecnologias de comunicação para iluminação pública.....	23
1.2.1 Tecnologias de comunicação a cabo para iluminação pública.....	23
1.2.1.1 PLC.....	23
1.2.1.2 DALI.....	25
1.2.1.3 ETHERNET.....	26
1.2.2 Tecnologias de comunicação sem fio.....	27
1.2.2.1 ZigBee (IEEE 802.15.4).....	27
1.2.2.2 IEEE 802.11 (Wireless Local Area Network - WLAN) ou Wi- Fi.....	32
1.2.2.3 IEEE 802.15.1 (Bluetooth).....	34
1.2.2.4 Tecnologias de comunicação para dispositivos móveis.....	35
1.3 Protocolos de controle para luminárias de LED.....	37
1.3.1 Conceituação sobre tecnologias empregadas no desenvolvimento da placa de controle.....	40
1.3.1.1 PWM (Pulse Width Modulation).....	41
1.3.1.2 Filtros.....	42
CAPÍTULO 2 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	44
2.1 Metodologia.....	44
2.2 Desenvolvimento do projeto.....	44
2.3 Características da interface gráfica.....	57
CAPÍTULO 3 RESULTADOS.....	61
3.1 Implementação do filtro passa-baixas para o protocolo de controle de 1 a 10 volts.....	61
3.2 Testes e calibração do sensor de corrente.....	67
3.3 Testes de comunicação com Xbee.....	70
3.3.1 Testes de Alcance de comunicação.....	71
3.3.2 Teste da topologia Mesh.....	73
3.4 Resultados dos testes realizados do funcionamento de todo o sistema.....	75
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXOS.....	96

INTRODUÇÃO

Cada vez mais têm surgido tecnologias para auxiliar na vida humana, trazendo comodidade e melhorando o dia a dia das pessoas. Um grande exemplo que vem acompanhando este cenário são as *smart cities*, que permitem resultados satisfatórios em várias esferas, tais como na economia, na saúde, na educação e na segurança. Hoje se vê um mundo interligado onde as regiões, mesmo distantes, se fazem próximas em cada instante. As cidades inteligentes são exemplo do uso da tecnologia em prol da vida, conforme Strapazzon (2009, p. 93) elas são “a etapa mais avançada do relacionamento entre convergência tecnológica, gestão de cidades, qualidade de vida e competitividade econômica”. O termo começou a ter visibilidade após Singapura ter sido considerada uma cidade inteligente, ainda no ano de 1999. A partir desse momento, ocorreu uma expansão desse modelo e outras cidades passaram a empregar suas tecnologias em diversas aplicações, como controle de trânsito, monitoramento ambiental (inundações, controle de áreas preservadas etc.), aplicações para segurança pública, transporte público, iluminação pública, dentre outras áreas.

É possível perceber que as aplicações deste modelo buscam trazer melhorias na qualidade de vida, segurança e desenvolvimento da população. Conforme Kanter e Litow (2009), *smart cities* conectam infraestruturas físicas através de tecnologias da informação e comunicação de forma eficaz, a fim de melhorar as condições de sustentabilidade e de qualidade vida da população. Hall et al (2000) completa ao informar que elas auxiliam no monitoramento e controle de infraestruturas urbanas, atuando de forma a manter a continuidade de atividades fundamentais.

Neste conceito de cidades inteligentes, uma área que tem ganhado proporções é a de soluções voltadas para a iluminação pública. A tecnologia de LED, nessa finalidade, tem ganhado destaque e se apresenta como uma revolução, pois muitos acreditam na sua capacidade de se expandir fortemente no mercado pelo menor consumo energético e maior vida útil das lâmpadas. Muitos estudos estão sendo realizados demonstrando a viabilidade do LED. Mckinsey (2012) apresenta um relatório sobre as perspectivas do mercado global de iluminação e destaca a importância dessa tecnologia. Conforme esse relatório, a expectativa mundial é que, até 2020, 70% da iluminação seja de LED, isso porque os governos, cada vez mais, têm realizado fortes pressões para políticas ambientais e

energéticas. Nesse sentido, têm-se criado e aprimorado regulamentações para fontes de luz mais eficientes. Ainda conforme o documento, o mercado destinado a componentes que fazem parte de sistemas de controle de iluminação é o que mais cresce, principalmente em questão de hardware, porque esses sistemas de controle, combinados com LED, podem trazer vários benefícios, como o da economia de energia, o aumento da vida útil dos LEDs e a contribuição para ambientes mais confortáveis.

Tendo em vista essa perspectiva de iluminação pública incorporada ao conceito de cidades inteligentes, muitas pesquisas no mundo foram concluídas e outras se desenvolvem para que sejam encontradas soluções cada vez mais aprimoradas. Estas se diferenciam em alguns fatores, como no protocolo de controle, na tecnologia de comunicação, no tipo de rede, tipos de sensores, tipo de lâmpada, diferenciação do software em recursos implementados, entre outros aspectos definidos conforme a utilização.

Nesse contexto, Lucia (2014) apresenta um sistema de gestão de iluminação pública com comunicação sem fio utilizando o zigbee e topologia mesh, este foi desenvolvido para luminárias de vapor de sódio de alta pressão. O sistema conta com placas que são instaladas nos pontos de iluminação e um software que é instalado em um computador, através dele é possível realizar a dimerização em 3 níveis: 50%, 80% e 100% da potência nominal. Quanto ao sensoriamento, foi implementado somente o sensor LDR para capturar a luminosidade do ambiente. Já Bellido-Outeiriño et al (2016) apresentam um sistema inteligente para iluminação pública que utiliza a comunicação sem fio através do zigbee e o protocolo Dali para realizar o controle e monitoramento das luminárias, sendo instalada uma placa em cada ponto de iluminação que realiza a transmissão dos dados para o protocolo. Esse sistema também conta com um aplicativo para dispositivos móveis, cujos responsáveis pela manutenção da iluminação pública podem acompanhar os pontos que estão com falhas.

A presente pesquisa se difere da de Lucia (2014) e de Bellido-Outeiriño et al (2016) pela diferença de recursos na interface. A de Lucia (2014) ainda se difere do tipo de tecnologia da luminária, na forma de apresentação dos dados de monitoramento, no processo de dimerização e no designer da interface; a de Bellido-Outeiriño et al (2016), nos protocolos de controle, na forma de sensoriamento e na comunicação do sistema.

Nesse contexto, este estudo proporciona uma infraestrutura de rede de comunicação sem fio entre os pontos de iluminação utilizando a topologia mesh, além disso, permite que sistemas em outras áreas possam aproveitar essa infraestrutura em suas aplicações, que podem ser: medição de consumo energético e do consumo de água nas residências, ligação e desligamento do fornecimento de forma remota desses serviços, monitoramento do sistema elétrico, das condições ambientais e de frotas (ambulâncias, transporte público, viaturas, entre outros veículos), e muitos outros serviços que podem ser integrados.

O monitoramento dos pontos de iluminação, presente na pesquisa, permite saber de forma praticamente instantânea a localização e o modo de funcionamento dos pontos de iluminação, identificando se eles estão operando normalmente ou com falhas. Caso esteja, o tipo de falha que pode se enquadrar nos seguintes aspectos: falta de energia, falha no relé, falha na luminária, tudo isso através de uma interface que mostra esses pontos, no mapa, com suas localizações. O monitoramento permite que as falhas sejam identificadas e notificadas em tempo muito inferior ao sistema atual, reduzindo assim o tempo de correção das falhas.

Já o controle dos pontos de iluminação permite a dimerização das luminárias em diversos ambientes, como praças, parques, ruas e avenidas que possuem necessidades de iluminação diferentes. Outro ponto positivo para esse controle é que ele permite realizar o agrupamento de luminárias por critérios a sua escolha.

A interface gráfica deste projeto apresenta um conjunto de funcionalidades que permite uma melhor gestão do sistema de iluminação pública. Esta opera em nuvem, o que torna possível ser acessada através de qualquer dispositivo com acesso à internet para que seja atualizada. Entre as funcionalidades implementadas, tem-se: sistema de cadastro dos pontos de iluminação com a descrição de todos os materiais e características, que permite que o responsável pela manutenção visualize todos os materiais necessários antes da chegada ao ponto, módulo com mapa e todos os pontos georreferenciados, módulo de abertura e acompanhamento de serviços, módulo que permite a geração de relatórios de diversas atividades relacionadas à iluminação.

O desenvolvimento do sistema foi para luminárias de LED pelo fato de estudos realizados pontuarem que essa tecnologia terá grande atuação no cenário de iluminação em um futuro próximo.

O cenário atual da iluminação pública no Brasil mostra que as luminárias de LED ainda não são predominantes, mas muitas iniciativas estão sendo tomadas rumo a modernização. Um exemplo é a inserção das luminárias LED na instalação de novos pontos de iluminação ou quando se é necessário realizar a substituição dos materiais, o que demonstra que os municípios têm investido aos poucos na atualização desses antigos pontos. Infelizmente, a maioria dos municípios ainda não dispõem de sistemas de iluminação pública que são capazes de identificar de maneira automática os pontos de iluminação com falhas ou mesmo sistemas para dimerizar as luminárias remotamente. Os municípios que não dispõem desses serviços contam com a própria população ou com os técnicos de vistoria de campo para informar a localização dos pontos com falha.

Conforme pode ser observado, os investimentos nesta área já se iniciaram, porém ainda existe uma grande lacuna de investimentos a serem realizados a fim de se obter melhorias. Todas as características aqui apresentadas e as que serão tratadas no decorrer do trabalho evidenciam o potencial de gestão do sistema, demonstrando a pertinência da pesquisa.

Objetivos

O objetivo geral do trabalho consiste em desenvolver um sistema de gestão capaz de controlar e monitorar os pontos de iluminação pública com luminárias do tipo LED, utilizando uma rede de comunicação sem fio. Para alcançar esse objetivo, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre os temas: iluminação pública, sistemas de controle de iluminação, redes de comunicação sem fio, topologias de rede, filtros e sensores;
- Desenvolver o hardware e a programação das placas que foram instaladas nos pontos de iluminação para controlá-los e monitorá-los através das leituras de sensores;
- Realizar a configuração das placas de comunicação sem fio;
- Desenvolver o hardware e a programação das placas concentradoras;
- Desenvolver a interface gráfica do sistema.

Organização do trabalho

A estrutura necessária para que o trabalho se apresente de forma clara está dividida da seguinte maneira: inicialmente é apresentada a introdução com a caracterização do problema e a motivação para seu desenvolvimento, o objetivo geral e os específicos. No capítulo 1, é realizada uma revisão bibliográfica referente aos principais conceitos dos temas que envolvem o trabalho, que são: iluminação pública, tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública, tecnologias de comunicação a cabo para iluminação pública, tecnologias de comunicação sem fio, zigbee, protocolos de controle para luminárias de LED, conceituação de PWM (Pulse Width Modulation) e filtros que são tecnologias utilizadas no desenvolvimento do protocolo de controle. No capítulo 2, é apresentada a metodologia utilizada, o desenvolvimento e o funcionamento do projeto. No capítulo 3, são tratados os resultados alcançados no trabalho, desde os resultados do filtro utilizado na saída PWM para o controle do sinal 1 a 10 volts, a calibração de sensores, testes de comunicação até os resultados da solução completa, bem como a caracterização dos cenários em que foram realizados os testes. Por último, são apresentadas as considerações finais. Tendo em vista que a temática é ampla, algumas implementações são sugeridas para estudos futuros como forma de sofisticar ainda mais a solução.

CAPÍTULO 1

Este capítulo apresenta o referencial teórico da presente pesquisa, que subsidiará o direcionamento sobre o desenvolvimento deste trabalho, abordando os temas: evolução da iluminação pública, as tecnologias de lâmpadas e seus comparativos, as tecnologias de redes de comunicação, como o seu funcionamento, suas características, configuração, função dos dispositivos e topologias de rede que podem ser implementadas.

Também é abordado sobre os protocolos de controle (dimerização) utilizados em luminárias de LED e a conceituação básica sobre PWM e filtro para um melhor entendimento posterior das técnicas utilizadas para o desenvolvimento do sistema de controle desenvolvido.

1.1 Iluminação pública

A iluminação surgiu a partir da necessidade do homem de clarear a área próxima de si para que diversas atividades fossem realizadas de maneira mais fácil, principalmente em momentos em que a luz natural se encontra em pequena intensidade. Nesse contexto, segundo Rosito (2009), a iluminação pública surge na Inglaterra, em 1.415, como alternativa adotada pelos comerciantes que necessitavam combater o crime, que já se fazia presente. As luminárias da época possuíam óleos que ao serem queimados davam claridade aos ambientes. O acendimento e desligamento destas eram realizados por pessoas designadas a realizarem esses serviços diariamente.

Com o passar dos anos, diversas cidades espalhadas pelo planeta começaram a utilizar alternativas que pudessem prover fontes de iluminação com melhorias e inovações. De acordo com Rosito (2009), esta busca por mudanças alterou também o conceito de iluminação pública, que antes tinha como objetivo fornecer luz ou claridade artificial aos logradouros públicos, no período noturno ou diurno, com escurecimentos ocasionais, incluindo locais com necessidade de luminosidade permanente. Foi posteriormente alterado para o serviço com objetivo de iluminar de maneira adequada os pontos públicos, seguindo a sua especificidade e atendendo a normas técnicas vigentes para gerar benefícios, como a sensação de segurança e conforto à população.

Segundo a Copel (2012), a iluminação pública pode trazer diversos benefícios, como melhorar a imagem da cidade, tornando-a mais atraente; favorecer o turismo e o comércio, gerando mais renda para o município; proporcionar melhoria no lazer noturno e melhorar a segurança pública no tráfego de pedestres e veículos, o que pode ser considerado um fator de desenvolvimento das cidades. Diversos aspectos dos benefícios são reforçados e acrescentados por Mascaró (2006) ao retratar que os objetivos podem ser distintos, como gerar segurança e visibilidade para os motoristas e criar a sensação de segurança entre os moradores de uma determinada área, pois um local bem iluminado permite melhor visualização das condições do local e até mesmo desestimula a prática de crimes.

Com o decorrer dos anos, ocorreu no Brasil uma grande expansão da iluminação pública, o que ocasionou a necessidade de atuação do governo em 1988. Segundo Rosito (2009, p.32) a Constituição Brasileira a definiu como “serviço público de interesse local, sendo responsabilidade de o município gerir ou delegar a terceiros a gestão desse sistema.” Ainda de acordo com o autor, a partir dessa Constituição, a gestão desses serviços em diversos municípios brasileiros passaram a ser diferenciados, uma vez que, em alguns, as concessionárias se tornaram responsáveis pela gestão; em outros, os municípios se mantiveram a frente; já nos demais, a responsabilidade se tornou de empresas especializadas.

Este modelo de gestão se manteve atuante durante muitos anos, porém foram observados muitos equipamentos ultrapassados e com elevado consumo de energia, além de outros problemas. Assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa n.º 414/2010 que transferiu a responsabilidade pela manutenção e operação da iluminação pública das distribuidoras de energia elétrica para a pessoa jurídica de direito público competente, os municípios. Essa transferência foi realizada com a expectativa de que ocorram melhorias no sistema em termos de eficiência energética e luminosa, esperando maiores investimentos em modernização.

1.1.1 Tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública

Com o passar dos anos, a iluminação pública muito se avançou e trouxe vários benefícios para as cidades, como a redução de consumo, a rapidez nos acionamentos das luminárias, melhorias no serviço prestado à população, etc. Um

grande exemplo de tecnologia empregada nesse meio que se evoluiu são as lâmpadas, que passaram por diversos modelos. Nesse contexto, será realizada uma breve descrição sobre cada uma das principais lâmpadas utilizadas na iluminação pública, que são: de vapor de mercúrio, de vapor de sódio à alta pressão, de vapor de sódio à baixa pressão, de iodeto metálico, até as recentes lâmpadas de LED.

As lâmpadas de vapor de mercúrio são compostas por quatro eletrodos, sendo dois principais e dois auxiliares, colocados dentro de um tubo de descarga com a mistura de mercúrio e argônio em alta pressão. Durante o funcionamento, ela é aquecida e, gradualmente, o mercúrio é vaporizado, passando a emitir luz em intensidade baixa. Para controlar esse aquecimento, é adicionado na lâmpada, entre o tubo de descarga e a ampola exterior, um gás inerte para permitir a estabilidade térmica (SANTOS, 2011).

As lâmpadas de vapor de sódio são encontradas em duas variações: as de baixa pressão e as de alta pressão. Nas de alta pressão, o tubo de descarga é colocado dentro de uma ampola de vidro em vácuo, que forma o invólucro exterior da lâmpada. Nessa cápsula de vidro é colocada uma mistura de sódio, mercúrio e xênon. No aquecimento da lâmpada, o sódio e o mercúrio vaporizam-se gradualmente de forma que passem a emitir luz, e a intensidade da luminosidade é aumentada à medida que a pressão se eleva até um determinado ponto, onde é estabilizado. Nas lâmpadas de baixa pressão, o sódio é inserido no tubo com néon e argônio. O tubo de descarga é em formato de "U", com um eletrodo em cada extremidade para ser gerado o arco elétrico e refletir a radiação infravermelha, garantindo a temperatura ideal para a vaporização do sódio (SANTOS, 2011).

As lâmpadas de iodetos metálicos têm estrutura parecida com as de vapor de mercúrio, alterando-se a mistura do interior do tubo de descarga. Nestas são adicionadas ao mercúrio misturas com emissores iônicos ou com emissores moleculares. Um exemplo de mistura com emissores iônicos utilizada é formado por iodetos de sódio, tálio e índio. Como exemplo de emissores moleculares, tem-se a junção de iodeto e cloreto estanho (SANTOS, 2011).

LED (*light emitting diode*) trata-se de uma tecnologia diferente das demais que não conta com filamentos ou descarga elétrica. Esta se caracteriza por ser um dispositivo semicondutor que converte a energia elétrica em luz, devido às interações dos elétrons. Essa iluminação praticamente não emite radiação infravermelha (IV) e ultravermelha (UV) (SANTOS, 2011).

Com base nos conceitos apresentados, é possível observar diferenças entre as lâmpadas abordadas, sendo que a Tabela 1 apresenta uma comparação, em vários aspectos, dessas luminárias para melhor identificação das melhores alternativas.

Tabela 1 – Comparação das características dos vários tipos de lâmpadas

	Vapor de mercúrio	Vapor de sódio de alta pressão	Vapor de sódio de baixa pressão	Iodetos metálicos	LED
Rendimento Luminoso [lm/W]	De 40 a 60	De 80 a 150	De 120 a 200	De 65 a 120	Por vezes >150.
Temperatura de cor	De 3000K a 4000K	De 2000K a 3200K	De 1800K a 2000K	De 3000K a 6000k	3000K
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	De 40 a 55	De 20 a 70	≈ 0	De 81 a 95	>75
Duração média (horas)	De 10000 a 12000	De 8000 a 12000	De 12000 a 18000	De 3000 a 9000	60000
Tempo de partida (minutos)	≈ 4	≈ 5	≈ 10	≈4	Instantâneo
Luminância [cd/m ²]	De 4 a 15	De 25 a 500	6	De 100 a 6000	Dependente do nível de iluminação pretendido.
Período de manutenção	2 anos	3 a 4 anos	3 a 4 anos	3 anos	12 anos
Equipamento auxiliar	Reator e capacitor.	Ignitor, reator e capacitor	Ignitor, reator e capacitor	Ignitor, reator e capacitor/reator eletrônico.	Inexistente

Fonte: Adaptado de Santos (2011).

A Tabela 1 mostra as principais características de cada tipo de lâmpada, sendo possível identificar, de acordo com suas características, a melhor alternativa para o ambiente ou aplicação que será utilizada. Mas, de um modo geral, é possível perceber que o tipo de tecnologia que oferece o melhor conjunto de características para utilização na iluminação pública é o LED, que oferece baixo consumo, vida útil longa e alto índice de reprodução de cores (IRC) se comparada às demais, sendo apresentados em vários estudos os seus benefícios e a viabilidade, como em Santos (2011), McKinsey (2012) e Sales (2011). McKinsey (2012) ainda realiza uma projeção de participação dessas luminárias no mercado futuro e também aborda que o custo

da tecnologia LED no seu lançamento representava um alto valor, mas ela segue a tendência de redução custo, possibilitando um retorno mais rápido do investimento. Sales (2011) apresenta em seu estudo que mesmo o custo desse tipo de luminária ser mais alto, ela ainda é uma boa alternativa devido aos benefícios gerados.

1.2 Tecnologias de comunicação para iluminação pública

O surgimento das redes contribui expressivamente para o processo de comunicação, pois conecta pessoas ou tecnologias que estão a distâncias consideráveis. Gallo e Hancock (2003) reforçam ao relatar que o conceito de redes se resume em conectar um grupo de sistemas com o objetivo de realizar troca de informações entre eles. É importante lembrar que essa busca contínua por melhores alternativas para realizar a troca de informações tem se tornado objeto de estudo de muitas pesquisas que permitiram o desenvolvimento de tecnologias. Assim, serão apresentadas as principais tecnologias de comunicação utilizadas em iluminação pública, sendo que estas se enquadram em duas categorias: a cabo e sem fio.

1.2.1 Tecnologias de comunicação a cabo para iluminação pública

O meio físico em que as informações são transportadas é um aspecto importante no processo de comunicação, as tecnologias que serão aqui apresentadas utilizam o cabeamento para realizar o transporte dos dados. As tecnologias de comunicação a cabo, para iluminação pública, que serão tratadas são PLC, Dali e Ethernet.

1.2.1.1 PLC

O *Power line communication* (PLC) ou comunicação por linha de energia consiste em uma tecnologia para transmissão de dados pela rede elétrica, sendo possível aproveitar a infraestrutura de cabos de energia instalados em redes elétricas para realizar a comunicação. O sinal de comunicação é modulado em uma frequência diferente da energia elétrica, que no Brasil é 60 Hz.

Padua (2014) assinala que a tecnologia PLC realiza a superposição de um sinal com informações em um sinal de corrente alternada de alta potência,

transformando a rede elétrica em uma rede de comunicações.

Segundo Usman e Shami (2013), o PLC se classifica em duas categorias: os de banda estreita e de banda larga. Os de banda estreita operam entre as frequências de 3-500 kHz e têm baixas taxas de transferência de dados, sendo utilizados em *Smart Grid*; já a de banda larga utiliza as frequências de 2-250 MHz e tem grande utilização para acesso a internet.

Para a comunicação por PLC ocorrer, alguns processos e equipamentos são necessários. Entre os processos, pode ser citada a modulação, que transforma o sinal de informação em outro formato de sinal para ser transmitido no meio desejado, e a multiplexação, que é responsável por realizar a combinação dos sinais para serem transmitidos no mesmo canal simultaneamente. Com esses dois processos é possível transformar uma informação em um sinal modulado em frequência e anexar aos sinais elétricos para serem transmitidos, de forma que tenha na rede elétrica dados e energia elétrica. Entre os equipamentos que devem ser utilizados nessa tecnologia, tem-se o modem, concentrador mestre e o demodulador repetidor. O modem é usado para a recepção e transmissão dos dados, este é instalado no local onde são adicionados os dispositivos que se conectarão à rede, sua função é conectar os dispositivos à rede PLC. O concentrador mestre é responsável por controlar toda a rede. Entre o modem e o concentrador mestre pode se ter ruídos ou problemas de comunicação, o demodulador repetidor é então responsável por interligar o concentrador e o modem e também melhorar a qualidade do sinal transmitido. Estes são os equipamentos básicos para conectar dispositivos à rede PLC. É importante lembrar que a partir do concentrador mestre as empresas de telecomunicações ou concessionárias de energia elétrica podem optar por tecnologias distintas para conexão desta rede a outras.

Costa (2013) apresenta as desvantagens da utilização da tecnologia PLC, citando que, devido à comunicação ocorrer em cabos elétricos, vários aspectos não são constantes ao longo do tempo, como resposta em frequência, impedância, indutância, capacitância, valendo ressaltar que este é um meio muito suscetível a ruídos e interferências. Devido a esses fatos, são necessárias uma grande quantidade de componentes para realização da comunicação, o que gera um alto valor de implementação do sistema e uma grande dificuldade em superar os problemas relatados.

1.2.1.2 DALI

O *Digital Addressable Lighting Interface* (DALI) consiste em um sistema para iluminação ao qual é integrado aspectos de controle e comunicação. Alguns autores tratam-no levando em consideração algum dos dois aspectos, entretanto, como neste tópico o foco é em comunicação, a abordagem aqui tratada será concentrada nesse quesito.

Couras (2011) aborda que o Dali é um protocolo de comunicação baseado no padrão standard RS-485, que utiliza tecnologia totalmente digital e tem um funcionamento simples com vários recursos de gestão e controle de iluminação.

Esse processo de comunicação é realizado através de um barramento de fios que conecta os pontos de iluminação ao dispositivo central, que é responsável por comunicar e controlar as luminárias. Xavier Junior (2011) descreve o processo de comunicação Dali de maneira mais detalhada. Conforme o autor, a comunicação ocorre através de um barramento de dois fios de dados, que são o tx e o rx, e é nele que os dispositivos são conectados para se comunicarem. A potência para o barramento é realizada por uma fonte especial, que pode ser o mestre ou uma fonte externa. A comunicação depende de 5 fios, sendo 2 para comunicação e 3 para alimentação (fase, neutro e terra), ela conta com baixas taxas de transmissão de dados e utiliza o protocolo Manchester (bifase), nos quais os bits de mensagem são codificados em uma sequência de bits que variam entre nível lógico alto e baixo. É considerado nível alto os sinais que estejam entre os níveis de 11,5V a 20,5V, e para nível lógico baixo os valores de -6,5v a 6,5v. Esse sinal não pode ter uma queda superior a 2v entre o transmissor e o receptor para uma corrente máxima de 250mA e a distância máxima entre o transmissor e o receptor depende da bitola dos cabos conectados entre eles. Os condutores de 0,5mm² alcançam a distância máxima de até 100 metros; os condutores com bitola de 0,75mm² alcançam a distância máxima de até 150 metros; e os cabos de bitola de 1,5mm² a distância máxima de até 300 metros. Esse protocolo é bastante robusto a interferências porque tem uma baixa taxa de transferência de dados e alta relação sinal-ruído.

Existem vantagens e desvantagens da utilização do sistema Dali. As vantagens são a possibilidade de utilizar a mesma tubulação para passar os fios de potência e comunicação, a possibilidade de controle das luminárias através da fiação do protocolo e o endereçamento dos dispositivos do protocolo. Como

desvantagens, existe a mão de obra para instalação de alto custo, já que é necessária mão de obra especializada, e também os equipamentos com custo elevado (OLIVEIRA, 2014).

1.2.1.3 Ethernet

A tecnologia Ethernet tornou-se um padrão para sistemas de comunicação de LAN'S amplamente difundido mundialmente e que teve grande contribuição para melhorias no sistema de comunicação computacional.

Segundo Peterson (2013), a tecnologia Ethernet foi desenvolvida em 1970 por pesquisadores do *Xerox Palo Alto Research Center* (PARC). Essa tecnologia também utiliza outra nomeação: acesso múltiplo com detecção de portadora e detecção de colisão (*Carrier sense, multiple access with collision detect* – CSMA/CD).

Zacker e Doyle (2000) completam ao informar que em 1980 foi publicada a primeira versão do padrão conhecida com DIX Ethernet, que era formado por um comitê de três empresas: Digital Equipment Corporation, Intel e Xerox. Em 1985, esse padrão passou por uma revisão conhecida como Ethernet II que foi modificada para o IEEE, que tornou a tecnologia como padrão 802.3, documentado como “IEEE 802.3 *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*”. Esse padrão define os tipos de cabos que podem ser utilizados, como coaxial, par trançado, fibra óptica, os tipos de conectores, limitações ao comprimento dos cabos, quantidade de nós em um segmento e quantidade de segmentos que podem se agrupar para formar a rede.

Sousa (1999) descreve a forma que ocorre a comunicação Ethernet. Segundo ele, quando as estações pretendem transmitir algum dado, elas realizam inicialmente uma verificação do meio para identificar se ele está livre e quando esta enviam os dados ao barramento para serem transmitidos. Quando várias estações tentam transmitir dados simultaneamente, ocorrem as colisões, então, cada estação deve esperar um intervalo de tempo aleatório para tentar transmitir novamente seus dados. As estações de destino não enviam confirmações de recebimento de dados, e o acesso ao barramento então é classificado como assíncrono e aleatório. Quanto ao tamanho do bloco de dados a serem transmitidos, ele é entre 64 bytes a 1.518bytes.

O padrão Ethernet, como toda tecnologia, apresenta vantagens e

desvantagens. Como vantagens podem ser citadas:

- Alta popularidade da tecnologia e grande número de mão de obra qualificada, apresentando valores atraentes em treinamento e manutenção;
- Baixo custo;
- Constante atualização da tecnologia;
- Segue o padrão das camadas de comunicação.

E como desvantagens, tem-se:

- Sensibilidade dos cabos a torções, e o rompimento do cabo interfere diretamente na conexão;
- Em altas taxas de tráfego, se tem altas taxas de colisões.

É importante lembrar que, com o passar dos anos, esta tecnologia passou por grandes avanços, o que possibilitou alcançar altas taxas de transmissão de dados. Devido aos avanços e vantagens desta tecnologia, ela se manteve no mercado, tornando-se a tecnologia de rede local mais utilizada. O padrão Ethernet ainda permite a utilização das seguintes topologias: ponto a ponto, barramento e estrela.

1.2.2 Tecnologias de comunicação sem fio

As redes de comunicação sem fio surgiram para prover conectividade em locais inacessíveis e em lugares onde há dificuldades para a instalação de cabos, devido à inviabilidade nessas localidades. Essas redes se alavancaram com o avanço das tecnologias, que possibilitaram dispositivos computacionais produzidos a custos atraentes e moldados para permitir uma maior mobilidade aos usuários. Serão apresentadas neste trabalho as principais tecnologias de comunicação sem fio, que são: Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth e tecnologias de comunicação de telefonia celular.

1.2.2.1 ZigBee (IEEE 802.15.4)

O protocolo de comunicação Zigbee foi desenvolvido por um conjunto de empresas que formaram a Zigbee Alliance. Ele foi pensado para ser utilizado em

diversos ambientes, como indústrias, comércio e residências (SALEIRO; EY, s/d).

O nome dado a esse protocolo provém de uma analogia entre a forma de trabalho da topologia mesh e o deslocamento das abelhas. As abelhas que vivem em colmeias se deslocam em zig zag em busca de néctar e, no percurso realizado, comunicam-se com as abelhas da mesma colmeia para transmitir informações da localização do alimento. Já as redes mesh são utilizadas principalmente quando se pretende que dois nós, que estão fora do alcance de comunicação entre si, se comuniquem. Para resolver esse problema, esta topologia de rede utiliza os nós intermediários que estão entre os dois, para fazer o redirecionamento das informações, com a finalidade de restabelecer a comunicação (LEE, 2006).

Este protocolo opera nas frequências ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) que são faixas de frequências liberadas para o desenvolvimento de aplicações industriais, científicas e médicas. Existem três faixas de frequências de operação: 868 - 868,8 MHz, utilizada na Europa; 902 - 928 MHz, utilizada nos Estados Unidos, e 2.400 - 2.4835 MHz, utilizada e liberada globalmente e no Brasil. Outras características da rede é que ela suporta pouco mais de 65.000 nós na rede com taxas de transferências de dados entre 20 kbs a 250 kbps. Além disso, possui boa imunidade contra interferências, baixo consumo de energia, baixo custo e segurança da informação, através de processo de criptografia utilizando o algoritmo AES-128 bits (SALEIRO; EY, s/d).

Nas redes de comunicação ZigBee, os dispositivos podem ser utilizados para envio e recebimento de dados no mesmo dispositivo ou então exercer apenas uma das funções, que é definido de acordo com as configurações realizadas. Esses mesmos dispositivos ainda podem ser classificados de três formas: *coordinator*, *end devices* e *router*. O *Coordinator* (coordenador) tem a função de controlar toda a rede. Os *end devices* (dispositivos finais) têm a função de receber leituras de sensores e transmitir para a rede, receber dados para realizar o acionamento dos atuadores ou ambas as funções. O *router* (roteador) tem o papel de rotear a informação de forma que, ao receber um determinado dado, ele verifica o endereço de destino e retransmite este dado até chegar ao destinatário e ainda pode executar as funções de um *end device* (FALLUDI, 2011). O protocolo IEEE 802.15.4 define ainda outra forma de classificação dos dispositivos em dois tipos: FFD e RFD. A Figura 1 mostra a relação entre as duas classificações.

Figura 1 - Relação entre dispositivos e tipo

Dispositivo	Tipo de dispositivo físico associado (IEEE)	Função
Coordinator	FFD	Forma a rede, atribui endereços, faz a manutenção da rede, suporta <i>binding table</i> . Existe apenas um por rede, mas pode servir de ponte entre várias redes.
Router	FFD	Permite que mais nós se juntem à rede aumentando o seu alcance físico. Pode também efectuar funções de controlo ou monitorização, para além do reencaminhamento de dados. A sua existência é opcional.
Endpoint	RFD ou FFD	Efectua uma acção de controlo ou monitorização através de dispositivos que lhe esteja associado (sensores, microcontrolador, actuador, etc.). É o que consome menos energia, pois muitas vezes está em modo <i>sleep</i> .

Fonte: SALEIRO, Mário; EY, Emanuel. (s/d).

Conforme pode ser observado na Figura 1, os *FFD* (*Full Function Device*) possuem aplicações que demandam uma maior quantidade de dados e parâmetros, necessitando assim de um hardware mais poderoso em termos de processador. Já os dispositivos *RFD* (*Reduced Function Device*) demandam menos processamento e só podem ser *end devices*, podendo comunicar-se apenas com *coordinators* ou *routers* que são os *FFD*.

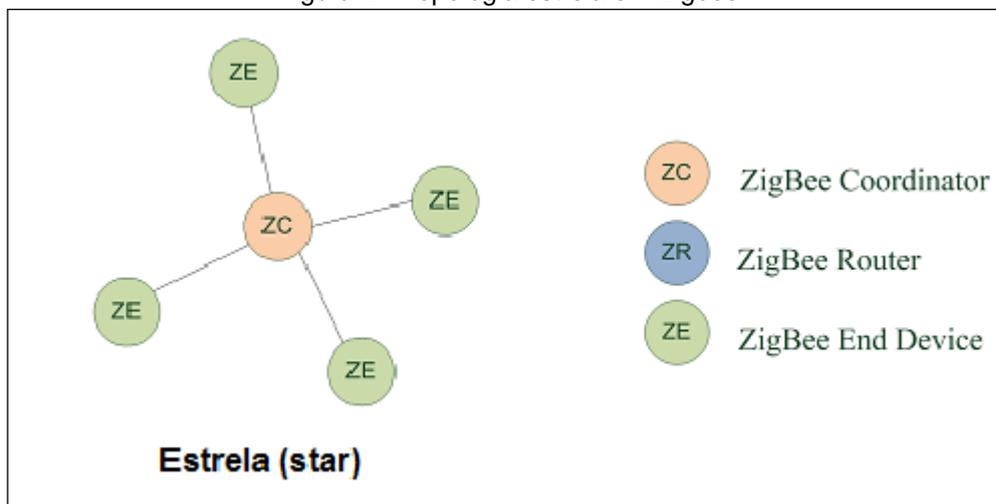
Outro critério importante para as redes são a forma como os dispositivos a que ela pertence são interligados, sendo essas conexões conhecidas também como topologia. Para a tecnologia Zigbee podem ser usadas: estrela (*star*), árvore (*cluster tree*) e *mesh* (malha). Essa topologia tem as seguintes características:

- Topologia em estrela (*star*)

Esta topologia é composta apenas por dispositivos *end devices* e o *coordinator*, que é responsável por todos os dispositivos da rede. Nela, os dispositivos finais se comunicam diretamente com o *coordinator*, caracterizando-se como a de menor alcance. A distância máxima a que essa rede pode chegar é a

máxima distância que o *end device* consegue se comunicar com o *coordinator* (SALEIRO; EY, s/d). A Figura 2 apresenta as ligações realizadas nessa topologia.

Figura 2 - Topologia estrela em Zigbee



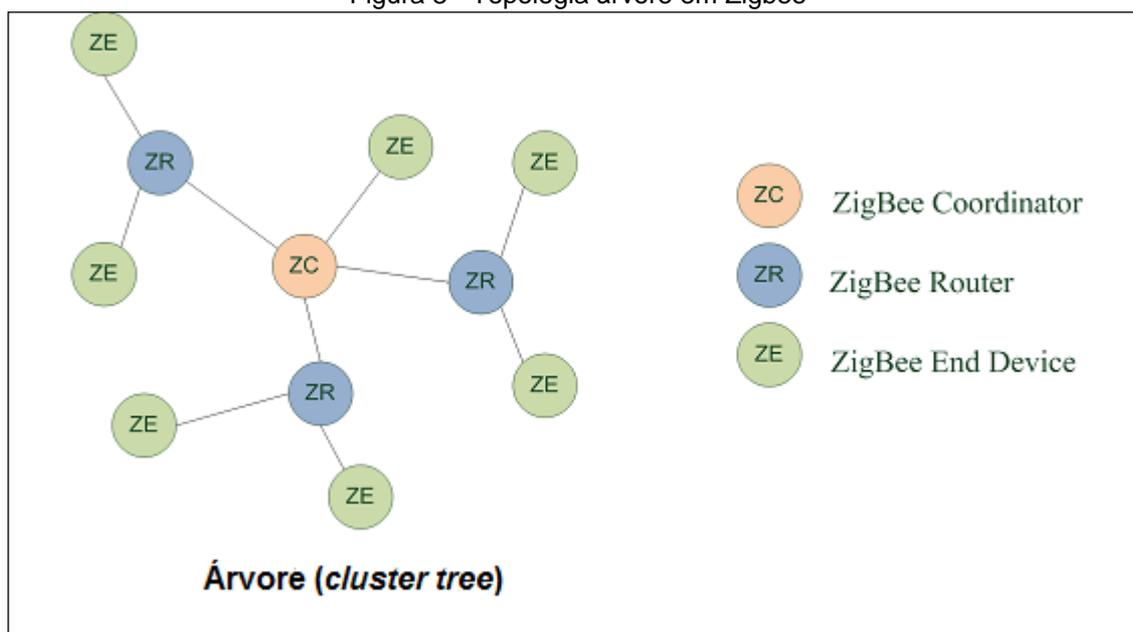
Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme pode ser observado na Figura 2, esta topologia conta com um elemento centralizador que é o Zigbee coordinator, sendo responsável por se comunicar diretamente com os zigbee end device, não sendo possível desenvolver uma rede de grande abrangência.

- Topologia em árvore (cluster tree)

É uma topologia em que as ligações são estabelecidas de forma que os dispositivos routers de uma determinada ramificação não realizam comunicação com os routers de outra ramificação. O problema dessa topologia de rede é que caso o dispositivo router falhe, parte da rede estará comprometida, já que os dispositivos end devices, que estavam conectados a ele, não terão outro caminho de comunicação (SALEIRO; EY, s/d). A Figura 3 demonstra as ligações realizadas nessa topologia.

Figura 3 - Topologia árvore em Zigbee



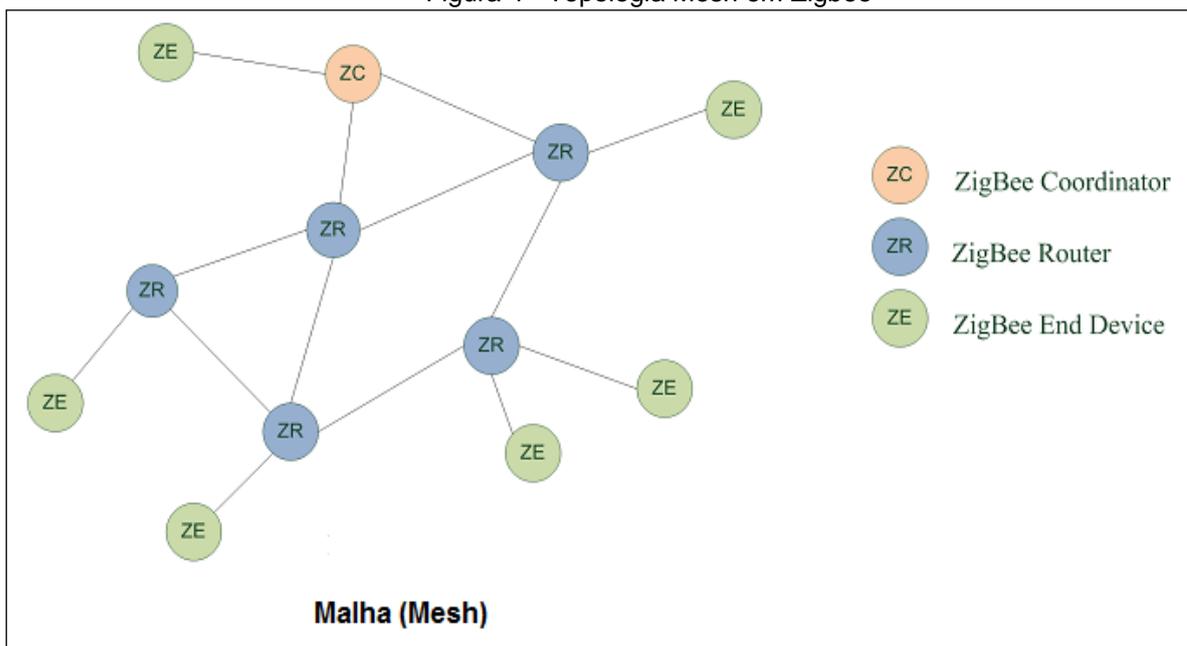
Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme pode ser observado na Figura 3, cada ramificação formada nessa rede compõe uma sub-rede nos quais os elementos que fazem parte dela não podem se comunicar com elementos de outra sub-rede. Assim, é possível desenvolver redes de longo alcance adicionando dispositivos intermediários, porém, caso este dispositivo intermediário falhe e o módulo não alcance o próximo dispositivo da sequência desta sub-rede, a comunicação se perde.

- Topologia em malha (*mesh*)

Nessa topologia, os dispositivos *routers* podem estabelecer comunicação com qualquer outro dispositivo que esteja ao seu alcance. Caso um *router* falhe, a rede automaticamente se organiza para que as funções daquele dispositivo sejam redistribuídas de forma que não afete a rede. O *coordinator* é responsável por registrar a entrada e saída de dispositivos na rede. As grandes vantagens da utilização dessa topologia é que ela é de fácil expansão, consegue abranger uma grande área, possui definição automática da rota da mensagem e tem a função autocura, ou seja, quando um dispositivo falha ou sai da rede, automaticamente é proposta uma nova rota para a informação (SALEIRO; EY, s/d). A Figura 4 apresenta as ligações dos dispositivos dessa topologia.

Figura 4 - Topologia Mesh em Zigbee



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nessa topologia, a rede é atualizada constantemente e automaticamente, quando um dispositivo detecta que não é possível mais se comunicar com o dispositivo que ele estava se comunicando, ele identifica o dispositivo mais próximo que é possível se comunicar, oferecendo melhor rota de comunicação e se conecta a ele.

1.2.2.2 IEEE 802.11 (*Wireless Local Area Network - WLAN*) ou Wi- Fi

O padrão de tecnologias de comunicação sem fio 802.11 *Wireless Local Area Network* (Rede local sem fio) consiste em um conjunto de especificações definidas pelo IEEE para as Lans sem fio que em muitos países ficaram conhecidas como *Wi-Fi* – originada do termo *Wireless Fidelity* que significa fidelidade sem fio. A responsável pela certificação dessa tecnologia é a *WiFi Alliance*, que é uma associação industrial global formada por mais de 300 empresas que se dedicam pelo crescimento e desenvolvimento dessa tecnologia (FOUROZAN; MOSHARRAF, 2013).

Devido ao crescimento da utilização dos dispositivos portáteis, como notebooks, smartphones, tablets e outros dispositivos, essa tecnologia se tornou a mais utilizada para a Internet de alta velocidade. O fato de ela ser sem fio faz com

que a comunicação se realize através de frequências. Essa tecnologia de comunicação conta com algumas especificações, conforme apresentado pela Tabela 2. Nesta são atribuídas as bandas de frequências e as velocidades de comunicação possíveis de cada especificação.

Tabela 2 - Especificações IEEE 802.11

IEEE	Banda	Taxa de Transmissão (Mbps)
802.11 ^a	5,725 – 5,850 Ghz	Até 54.
802.11b	2,400 – 4,835 Ghz	Até 11.
802.11g	2,400 – 4,835 Ghz	Até 54
802.11n	5,725 – 5,850 Ghz	Até 600.

Fonte: Adaptado (Fourozan e Mosharraf, 2013).

Entre as especificações apresentadas, é possível perceber que algumas operam dentro da faixa de frequências do ISM liberadas no Brasil para aplicações de comunicação sem fio, que são as frequências de 2,400 – 2,4835 GHz. É possível observar também que o padrão conta com especificações que possuem altas taxas de transmissão de dados.

Peterson (2013) descreve o funcionamento das redes *wireless*. A comunicação neste padrão ocorre através de equipamentos que detêm essa tecnologia. O equipamento recebe um determinado sinal a ser transmitido e o transforma em um sinal eletromagnético para que os dispositivos se comuniquem entre si através das antenas. O funcionamento da rede pode ser de duas maneiras: a primeira, são as redes ad hoc ou malha; e a segunda, com comunicação através da configuração estação base. Na primeira, todos os dispositivos pertencentes a mesma rede podem trocar informações. Não há um nó especial que atua como base, ou seja, todos os dispositivos que desejam trocar informações devem estar dentro da área de alcance uns dos outros. O tamanho da rede pode ser estendido, passando a informação nó a nó. A segunda maneira de configuração possui nós clientes que se comunicam com um elemento central da rede chamado de estação base, que pode se comunicar com outra rede ou outro dispositivo. O caminho inverso também é possível, cuja estação base se comunica com os nós clientes.

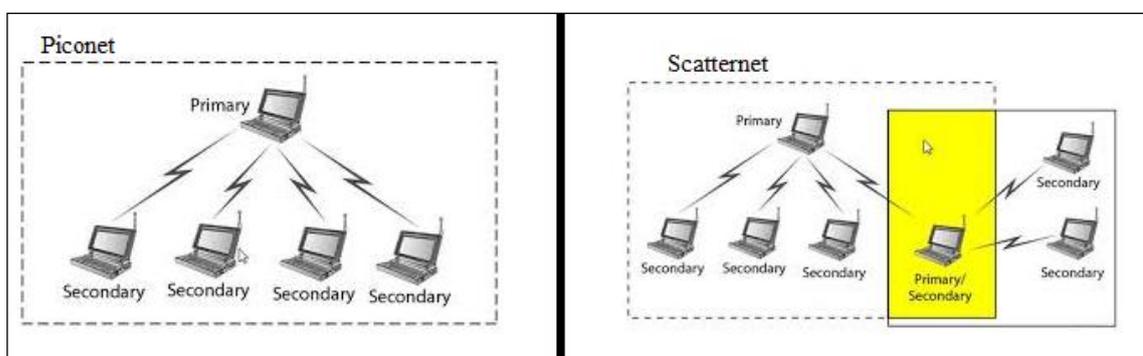
1.2.2.3 IEEE 802.15.1 (Bluetooth)

A tecnologia *Bluetooth* foi desenvolvida em 1994, pela empresa Ericsson, e, posteriormente, um grupo de indústrias com interesse nessa tecnologia se uniu e formou o *Bluetooth SIG* que é responsável por publicar os padrões dessa tecnologia. A ideia principal dessa tecnologia é fornecer a capacidade de se formar redes sem fio de curto alcance, atingindo a distância de aproximadamente 10m, na banda de frequência de 2,4GHz, podendo compartilhar até 720kbps (STALLINGS, 2005).

Esta é uma tecnologia para a rede de área pessoal (*wireless personal area network – Wpan*). Os aparelhos dessa tecnologia podem ter potência baixa, porque ele é mais utilizado para comunicações que não necessitam de longo alcance ou mesmo uma largura de banda grande.

O modo de comunicação do *Bluetooth* pode ser através de duas estruturas de redes diferentes, que são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Redes com a tecnologia Bluetooth



Fonte: Adaptado (Fourozan e Mosharraf, 2013).

Fourozan e Mosharraf (2013) descrevem o funcionamento desta tecnologia abordando os dois tipos de rede: piconet e a scatternet. A piconet pode ser formada por no máximo oito dispositivos ativos na rede, sendo apenas um dispositivo primário (mestre) e os outros sete secundários (escravos). Essa rede permite que sejam adicionados mais dispositivos secundários no modo inativo para que ele possa ser ativado para se comunicar, mas, caso a rede já conte com sete dispositivos secundários, um deles deve passar para o modo inativo para que outro seja ativado. A rede configurada no modo scatternet permite que sub-redes sejam formadas. Nessa configuração, um dispositivo que é secundário de uma piconet pode ser um dispositivo primário de outra piconet. Essa tecnologia utiliza o método

de espalhamento espectral por saltos em frequência (FHSS) que significa que os dispositivos da rede ficam trocando as suas frequências 1.600 vezes por segundo para evitar interferências na comunicação. Já a rede conhecida como piconet pode ter até 255 dispositivos a mais no modo inativo.

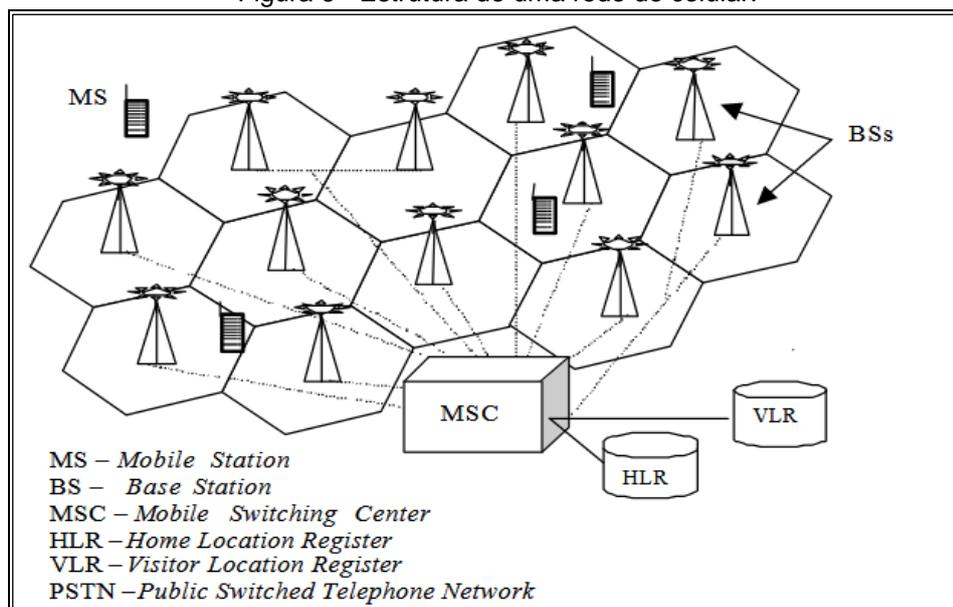
1.2.2.4 Tecnologias de comunicação para dispositivos móveis.

As tecnologias de comunicação para dispositivos móveis foram desenvolvidas inicialmente somente para a comunicação por voz. Com o passar dos anos, essa tecnologia passou por transformações que permitiram alguns benefícios, como a troca de dados através dos smartphones, maiores taxas de transferência dos dados e maiores áreas de coberturas.

Segundo Peterson (2013), o custo de utilização dessa tecnologia ainda é cara devido às operadoras pagarem um alto valor para licenciamento e utilização das faixas de frequência de comunicação. As bandas de frequências utilizadas variam pelo mundo; na Europa, por exemplo, são utilizadas as bandas de 900 e 1.800 MHz; já na América do Norte é utilizada as bandas 850 e 1.900 MHz. Devido a esse fato, vários dispositivos são projetados para operar em diversas frequências.

Conforme Kurose (2006), deve-se ter em mente que as grandes áreas geográficas cobertas por essas tecnologias são divididas em áreas menores denominadas células, cada uma delas conta com uma estação base que é responsável por enviar e receber dados para os dispositivos que estão dentro da área de abrangência da célula. A área de cobertura possível em cada célula pode variar de acordo com alguns fatores, como potência de transmissão dos aparelhos, obstáculos que podem dificultar a propagação do sinal, altura das antenas, dentre outros. A Figura 6 realiza uma demonstração dessas células e a estrutura básica da rede.

Figura 6 - Estrutura de uma rede de celular.



Fonte: Dias e Sadok (S/D).

Conforme Dias e Sadok (S/D), estas redes funcionam da seguinte maneira: dentro das células estão os dispositivos móveis (MS) que se comunicam através de ondas de rádio com as estações base (BS), que são responsáveis por prover a conectividade na área de abrangência da célula. Essas estações convertem as ondas de rádio para o sinal ideal, comunicando-se através de cabos ou redes sem fio com os (MSC), que coordenam e roteiam as chamadas para os telefones conectados à rede pública de telefonia (PSTN). Para encontrar o telefone a qual se deseja comunicar, tem-se dois pontos importantes para considerar: o HLR e o VLR. O HLR é a base de dados onde são cadastradas todas as informações sobre os dispositivos móveis de uma determinada área, e o VLR é um sistema de registro temporário que armazena os dados dos dispositivos móveis que estão fora de sua área de serviço. Através desses dois é possível a realização do *roaming*¹ de forma automática. Toda esta estrutura é responsável para que a tecnologia alcance longas distâncias de comunicação.

No processo evolutivo das tecnologias de comunicação para dados móveis, foram desenvolvidas e lançadas várias gerações, são elas: 1G, 2G, 2.5G, 2,75G, 3G, 4G, até a recente 5G que ainda entrará em operação, cada uma delas conta

¹ O roaming é o serviço que permite que um assinante móvel utilize os serviços de chamada de voz ou dados mesmo quando está fora da área de cobertura da rede onde ele é cadastrado, utilizando outras redes como visitante. Caso a rede visitada se encontre no mesmo país da rede cadastrada o roaming é nacional e se a rede visitada estiver em outro país é roaming internacional (GSMA, 2018).

com tecnologias com características diferenciadas. Na primeira geração, o foco era a comunicação por voz de forma analógica, com o passar dos anos, o mercado viu a necessidade de alteração dos sistemas analógicos para sistemas digitais e também a necessidade de troca de dados em baixo volume, sendo lançada a segunda geração que permitia a transmissão de voz ou dados através do serviço de SMS. Posteriormente, na rede 2,5G, além das características da rede 2G, também possibilitou a conexão dos dispositivos móveis à internet através da tecnologia GPRS. Já nas redes 2,75G, além das características da rede 2,5G, possibilitou a transmissão de dados multimídia. A partir de então, as novas gerações tiveram seu maior foco em possibilitar maiores taxas de transferências de dados.

A troca de dados através da internet e por SMS estão entre os serviços de telefonia móveis mais utilizados em aplicações que integram a automatização. De acordo com Dias; Sadok, s/d, o SMS significa serviço de mensagem curta e tem como característica a garantia da entrega. Ele consegue identificar falhas na transmissão e armazena a mensagem na rede até que seja possível a entrega, além disso, esse serviço pode enviar ou receber mensagens quando outro serviço está sendo realizado, como exemplo, a chamada de voz.

1.3 Protocolos de controle para luminárias de LED

Com o passar dos anos, o cenário de iluminação tem evoluído em busca de soluções cada vez mais eficientes, e o controle da luminosidade tem se tornado um aspecto importante. Nesse contexto, diversas indústrias de produtos de iluminação têm desenvolvido soluções que possibilitem controlar a intensidade luminosa de suas lâmpadas, técnica esta conhecida como dimerização. Esse controle possibilita que alguns benefícios sejam alcançados, como redução do consumo energético, níveis de iluminação de acordo com as necessidades do ambiente, criação de cenários diferenciados com os mesmos produtos, aumento da vida útil dos produtos em alguns casos, entre outros benefícios. Será tratado neste tópico o controle para luminárias de LED.

Os LEDs não podem ser conectados diretamente a rede elétrica devido a incompatibilidade da tensão e corrente, estes devem ser ligados a drivers que têm como função fornecer os níveis ideais de tensão e corrente contínua para os leds através da rede elétrica. Segundo Bley (2012), todos os leds podem ser

dimerizados, porém, para realizar esse controle, é necessário que o driver utilizado seja dimerizável, e nem todos possuem essa funcionalidade.

De acordo com Agostini Júnior (2008), existem dois métodos para realizar a variação da intensidade luminosa do led através do controle de corrente. Os métodos utilizados são ajuste da amplitude da corrente contínua ou através do controle da corrente modulada por larguras de pulso (PWM). Nesse propósito de se realizar a dimerização dos leds foram desenvolvidos modelos de controle que são utilizados por fabricantes dessas luminárias, que são 0-10 volts, 1-10 volts, PWM, DALI. Essas interfaces serão tratadas a seguir.

Entre os assuntos tratados na norma IEC 60929 (2006), são abordadas as definições do comportamento dos sistemas de controle. Para serem seguidas pelos fabricantes dessa tecnologia, de acordo com essa norma, a dimerização 0-10 volts trata-se de um controle do fluxo luminoso da luminária realizado através de um sinal de tensão DC aplicado à entrada dos terminais de dimerização do driver, sendo o nível de tensão o indicador de características do controle, as relações entre estes são: quando aplicado um sinal entre 10 V e 11 V, é fornecida a máxima potência na saída; quando o sinal for entre 0 V e 1 V, é fornecida a mínima potência na saída; quando aplicado entre 1 V e 10 V, é possível variar a potência entre o mínimo e o máximo.

De acordo com Dyble et al (2005), uma maneira muito utilizada de dimerizar o LED é por meio da relação de variação de tensão na entrada do driver com a corrente de saída fornecida para controlar o LED, os autores ainda afirmam que controlar o LED abaixo de 10% é difícil, então a maneira mais simples e econômica de realizar a dimerização é na faixa de 10% a 100%.

É comum encontrar no mercado empresas fabricantes destas luminárias públicas dimerizáveis, a LED, que utilizem a denominação para o controle 0-10volts ou 1-10volts, mas, de uma maneira geral, é possível perceber que as empresas que seguem a norma ao utilizar alguma dessas denominações vão realizar o controle de maneira muito parecida. Nas que utilizam o protocolo 0-10 volts, na faixa de tensão entre 0 e 1 volt, será fornecida a potência mínima para controle dos leds, e à medida que a tensão é aumentada até o valor de 10 volts, é acrescida a potência fornecida para os leds. No protocolo 1-10 volts, quando é aplicada a tensão de 1 volt a luminária fornece a potência mínima na saída, e à medida que a tensão é aumentada até o valor de 10 volts, a potência fornecida para os leds é aumentada.

Como alternativa para desligamento total dos leds nos dois métodos, deve ser utilizado um procedimento que impeça o fornecimento de energia para o driver, sendo uma das alternativas possíveis a utilização da fotocélula.

Sobre o controle por PWM, Dyble et al (2005) relatam que essa técnica consiste em ligar e desligar rapidamente um sinal em uma determinada frequência de forma que é gerado um efeito de variação da tensão, controlando a corrente média que vai para o LED. Com a utilização desse método, é possível alcançar uma maior faixa de dimerização de valores próximo a 0% até 100%, sendo necessária a utilização de altas frequências para evitar a percepção de pulsos de luz que é chamado de *flicker*.

Segundo Scopacasa (2016), o *flicker* é definido como uma alteração temporal da luz emitida que é percebida através de uma cintilação na luz. Esse fenômeno pode trazer impactos aos humanos, que variam entre distrações ou aborrecimentos, e pode causar problemas neurológicos. Quando este ocorre em baixa frequência, pode levar a convulsões em pessoas com epilepsia fotossensível e também pode provocar fadiga, dores de cabeça, visão turva e, conseqüentemente, baixa de rendimento. Ainda de acordo com o autor, diversas características podem interferir nos efeitos causados pelo *flicker*, características estas que podem ser: condições de luz do ambiente, sensibilidade das pessoas que utilizam o espaço e os serviços realizados por elas.

Conforme pode ser observado, quando a dimerização é realizada por controle PWM e não são utilizados sinais de alta frequência, pode haver impactos à vida humana. Deve-se, portanto, ter cuidado em relação a esse fenômeno em espaços públicos por serem ambientes de alto fluxo de pessoas com características distintas.

Conforme mencionado no tópico sobre tecnologias de comunicação para iluminação pública, alguns autores abordam o DALI como tecnologia de comunicação e outros como protocolo de controle. Neste tópico, será realizada uma complementação das características apresentadas anteriormente, sendo direcionada a questões de controle.

Segundo Xavier Júnior (2011), o *Digital Addressable Lighting Interface* (DALI) ou Interface de Iluminação Endereçável Digital é um padrão internacional aberto para controle de iluminação, regido pela norma IEC 60929. Oliveira (2014) afirma que o DALI realiza algumas atividades, como monitoramento do status de operação dos endereços atribuídos às luminárias, dimerização e o monitoramento dos

equipamentos do sistema para alcançar a identificação de problemas, tornando assim o sistema de iluminação inteligente.

O controle com o protocolo DALI ocorre através da troca de mensagens entre o dispositivo mestre e o driver dimerizável de cada luminária. O mestre é responsável por realizar a gestão de todos os pontos de iluminação conectados a ele, enviando mensagem para dimerizar os pontos de iluminação ou mesmo recebendo dados relativos ao funcionamento desses pontos. Já os drivers dimerizáveis com esse protocolo devem ser capazes de realizar a leitura do modo de operação do ponto de iluminação e se comunicar com o mestre através dos cabos tx e rx, que são destinados à comunicação desse protocolo. Eles também devem ser capazes de processar a mensagem de dimerização recebida e controlar os LEDs.

Sobre o controle pelo DALI, a norma IEC 60929 (2006) relata que é possível realizar a dimerização de luminárias em até 254 níveis diferentes com a utilização deste protocolo, a mensagem de controle contém um dado numérico com valor entre 1 e 254 que representa o nível da dimerização, que segue uma curva de variação logarítmica entre 0,1% e 100% do fluxo luminoso da luminária.

Couras (2011) relata que existem duas possibilidades para o controle e monitoramento das luminárias pertencentes ao sistema DALI. Na primeira possibilidade, podem ser realizadas as duas atividades em luminárias individualmente, ou seja, podem ser dimerizadas ou sensoriadas de forma individual até 64 luminárias. Já a outra possibilidade consiste em realizar um agrupamento das luminárias para serem controladas conjuntamente, atribuindo um endereço para todas as luminárias pertencentes ao grupo, podendo formar até 16 grupos.

1.3.1 Conceituação sobre tecnologias empregadas no desenvolvimento da placa de controle.

Conforme observado no item anterior, existem protocolos padrões utilizados para realizar o controle (dimerização) das luminárias de LED. Neste trabalho foi utilizado o protocolo 1-10 volts, sendo necessário um sinal analógico nessa faixa para realizar a dimerização. Como o microcontrolador utilizado não dispõe de saídas analógicas, tendo apenas saídas digitais, entre elas algumas PWM, foi utilizada a combinação das tecnologias PWM e de filtro para alcançar o sinal necessário para

realização do controle. Este tópico tem como objetivo realizar uma abordagem sobre a definição e funcionamento do sinal PWM e de filtro. Essa abordagem permite o melhor direcionamento quanto ao tipo de sinal utilizado e como este sinal é tratado.

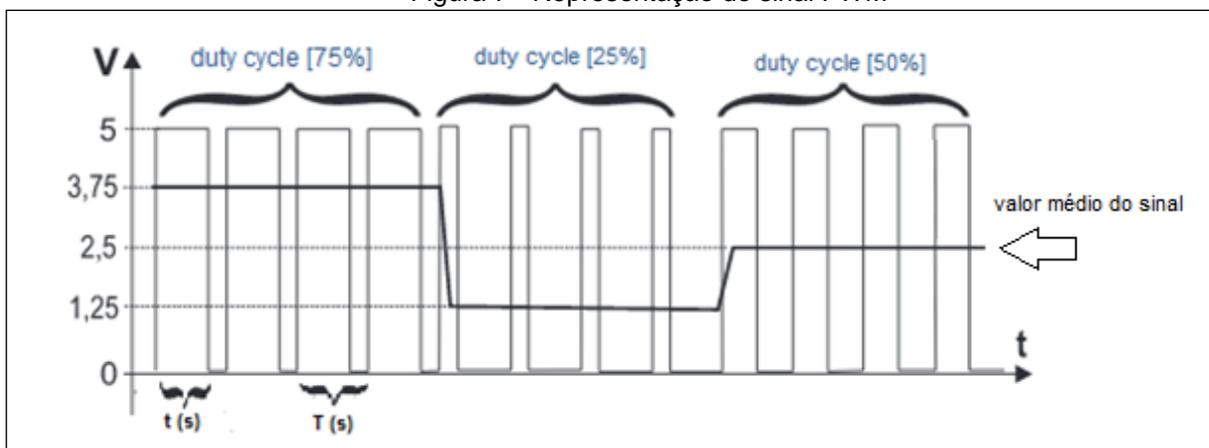
1.3.1.1 PWM (*Pulse Width Modulation*)

O PWM é uma técnica muito utilizada em sistemas digitais para várias aplicações como: controle do brilho do led, controle de velocidade de motores, fontes chaveadas, servomecanismos, controle de posição, sistemas de controle de temperatura, dentre outras aplicações.

Segundo Monk (2013), o termo PWM (modulação por largura de pulsos) é um modo de controlar uma saída digital, ligando-a e desligando-a rapidamente em uma determinada frequência que é constante, sendo regulada a duração dos pulsos.

No método PWM, é controlado o tempo que o sinal fica em nível alto e baixo conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Representação do sinal PWM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme observado na figura 7, o *duty cycle* corresponde à porcentagem do período que o sinal fica em nível alto em relação ao período total do sinal, este valor pode ser encontrado através da equação (1.1):

$$\text{Ciclo de Trabalho [\%]} = \frac{t \text{ [s]}}{T \text{ [s]}} \times 100 \quad (1.1)$$

Ciclo de trabalho = *duty cycle*.

$t[s]$ = período do sinal em nível alto.

$T[s]$ = período total do sinal.

O valor de tensão média do sinal PWM é calculado através da equação (1.2):

$$\text{Valor Médio} = \frac{\text{Ciclo de Trabalho [\%]}}{100} \times V_{\text{max}} [\text{V}] \quad (1.2)$$

PWM = valor médio.

V_{max} = máxima tensão gerada pela porta digital.

Pode-se observar, por meio das citações e das equações apresentadas acima, que a técnica PWM consiste em controlar o tempo que o sinal fica em nível alto, chegando a um valor de saída, que consiste no valor médio desse sinal de acordo com esse controle.

1.3.1.2 Filtros

Conforme Oppenheim e Schafer (1999), filtrar um sinal significa selecionar de determinado sinal as frequências desejadas e descartar as demais. Assim, é possível perceber que a principal função de um filtro é extrair informações de um sinal e remover componentes indesejadas, como ruídos ou frequências.

Duas importantes utilidades dos filtros são a separação e restauração do sinal. Quando um sinal contém ruídos ou componentes indesejados, é utilizada a separação de sinal; quando um sinal é distorcido de alguma forma, é utilizada a restauração. Vale lembrar que os filtros se dividem em dois tipos: os digitais e os analógicos.

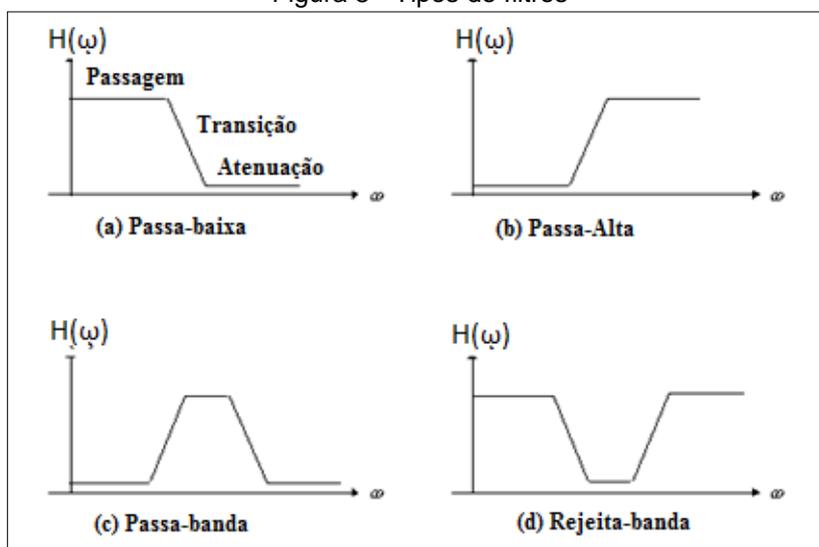
Os filtros digitais usam DSPs (Processador de sinal digital) ou um computador para realizar os cálculos numéricos envolvidos nos filtros, estes são implementados em software. Caso o sinal a ser filtrado for analógico, primeiro ele deve ser convertido usando um conversor analógico/digital (A/D). Esse filtro tem como vantagens a facilidade de alteração, o alto desempenho e a alta confiabilidade.

Os filtros analógicos são constituídos de circuitos eletrônicos feitos de componentes como resistores, indutores, capacitores e amplificadores operacionais

para operar conforme o desejado.

Para se analisar um filtro, existem alguns conceitos importantes que definem as regiões de um sinal em filtro, são eles: banda de passagem, que são as frequências inalteradas ao passar pelo filtro; banda de bloqueio ou banda de rejeição, que são as frequências que devem ser eliminadas na saída do filtro; banda de transição, que é a região localizada entre a banda de passagem e a banda de rejeição; frequência de corte, que é o ponto onde o sinal sofre 3 dB de atenuação (YNOGUTI, s/d). A figura 8 apresenta os quatro tipos de filtros existentes, sendo mostrado no primeiro a localização das três bandas no sinal de um filtro.

Figura 8 - Tipos de filtros



Fonte: Acesso em 22/06/2017. Disponível em:
<http://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap_12/filtelec.htm>

Conforme observado na Figura 8, existem quatro tipos de comportamento de filtros, o primeiro representado pela letra (a) passa-baixas que só deixa passar as baixas frequências, as altas são atenuadas; o segundo (b) passa-altas que deixa passar as altas frequências e atenua as baixas; o terceiro (c) passa-banda que deixa passar uma determinada faixa de valores, atenuando os valores acima e abaixo desta faixa; o quarto (d) rejeita faixas que realiza a atenuação de uma determinada faixa de valores do sinal.

De acordo com as características apresentadas sobre filtros, é possível perceber que eles podem ser empregados em sinais com múltiplas frequências e também em sinais como o PWM e atenuar as frequências desse sinal, podendo extrair, dependendo do tipo de filtro empregado, um valor médio do sinal, aproximando-o do sinal DC desejado em função de sua largura de pulso.

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é abordada a metodologia utilizada neste trabalho e o tipo de pesquisa realizada. Além disso, nele é descrito como foi realizado o desenvolvimento e funcionamento do projeto que consiste em um sistema de controle e monitoramento de iluminação pública para luminárias de led, com comunicação sem fio, utilizando uma rede *mesh*.

2.1 Metodologia

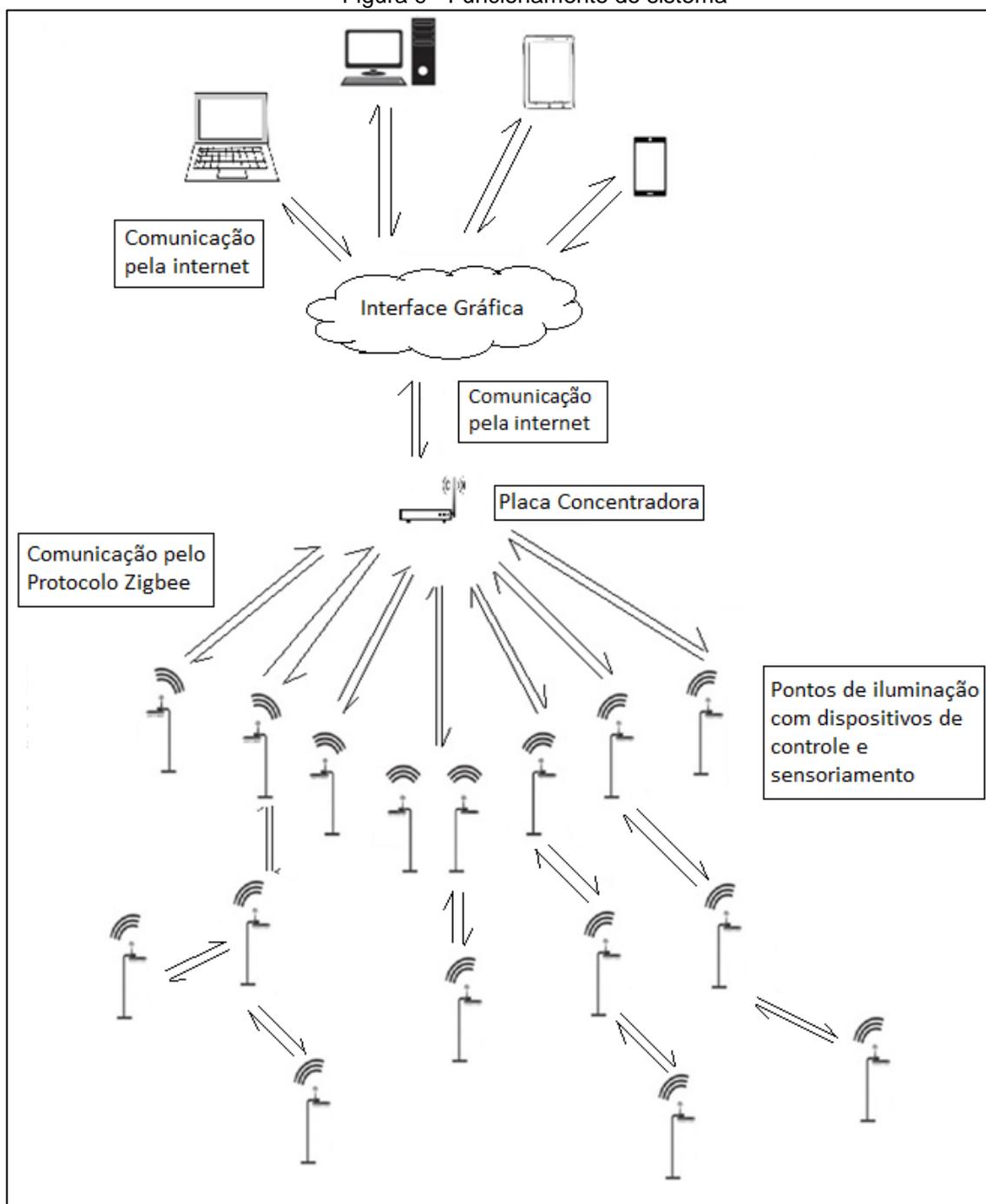
Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica e documental sobre sistema de iluminação pública, tipos de equipamentos e tecnologias empregadas nos pontos de iluminação pública, redes de comunicação, protocolos de comunicação, zigbee, comunicação a cabo e sem fio, interface gráfica, tipos de sinais: analógicos e digitais, PWM, filtros e técnicas de controle de sistemas de iluminação.

Posteriormente foi realizado o desenvolvimento do protótipo para realização de testes, sendo observado que o trabalho consiste em uma pesquisa quantitativa, que é classificada por mensurar variáveis, com a intenção de estabelecer relações entre elas. Utiliza-se da análise de dados primários, uma vez que estes são levantados pelo próprio pesquisador através de experimentos para o desenvolvimento do sistema proposto. Esses dados são coletados com a observação do sistema em funcionamento.

2.2 Desenvolvimento do projeto

Inicialmente foi realizada uma pesquisa sobre as tecnologias que poderiam ser utilizadas na elaboração deste projeto. Com base nesta pesquisa foi idealizada a estrutura apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Funcionamento do sistema



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme pode ser observado na Figura 9, o modelo proposto consiste em um sistema com vários módulos. O primeiro são as placas que são instaladas nos pontos de iluminação, que são responsáveis por realizar a identificação de falhas por meio dos sensores, pelo controle das luminárias e pela comunicação por radiofrequência com o concentrador. O segundo módulo é o concentrador, que é uma placa responsável por realizar a interconexão entre as placas do ponto de

iluminação e a interface gráfica que está na nuvem, sendo assim ele recebe as mensagens com os dados de sensores de um grupo de luminárias por radiofrequências e as transmite através da internet para a interface gráfica. Ele também realiza o caminho inverso, recebendo mensagens de controle da interface através da internet e a transmite para os pontos de iluminação.

O terceiro módulo é a interface gráfica, local onde é possível visualizar todo o funcionamento do sistema, podendo acompanhar, através do mapa, todos os pontos de iluminação que estão operando normalmente e os que estão com falhas e visualizar quais são as falhas apresentadas. Também é possível selecionar as luminárias que se deseja alterar a sua luminosidade. Essa interface trabalha em nuvem, para que seja possível acessá-la de qualquer lugar para acompanhar e a atualizar de maneira mais rápida. Por último, são apresentados na imagem os dispositivos que não são aplicações desenvolvidas especificamente para o projeto. Na verdade, eles podem ser quaisquer dispositivos que se conectem a internet para que seja possível acessar e acompanhar todo o processo, realizando a visualização e controle. Estes dispositivos podem ser: desktops, notebooks, smartphones, tablets, palmtops etc., o que permite uma maior mobilidade para acompanhamento do sistema. A interface pode ser acessada de locais fixos, como departamento de manutenção, ou de maneira móvel pelos eletricitistas de manutenção e todos aqueles que utilizarão o sistema.

Observando a Figura 9, também é possível perceber que o modelo proposto consiste em um sistema de comunicação em vários níveis, sendo estudadas as seguintes tecnologias de comunicação: Ethernet, PLC, Dali, Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth e tecnologias de comunicação de telefonia celular (GSM e GPRS), com objetivo de definir a melhor tecnologia que seria utilizada em cada nível. O primeiro nível trata da comunicação dos pontos de iluminação com os concentradores. Nesse caso, foi definido a comunicação por radiofrequência, utilizando o protocolo *ZigBee*. A sua escolha foi devido às outras tecnologias apresentarem aspectos que tornariam a implementação desse sistema inviável economicamente. As três tecnologias de comunicação por cabo: Dali, Ethernet e PLC tem como desvantagens o alto custo de implementação da rede, com a mão de obra, cabeamento e equipamentos. Além disso, possui um custo de operação, uma vez que, para a implementação dessas tecnologias, é necessária a utilização dos postes que são propriedade das concessionárias de energia, sendo cobrada uma taxa de utilização, para instalação

de cabeamento nestes. Já as tecnologias sem fio Wifi e tecnologias de comunicação de telefonia celular (GSM e GPRS) apresentaram como desvantagem o custo mensal de operação, já que para a sua utilização é necessário o fornecimento de serviços de operadoras de telecomunicações, e a tecnologia Bluetooth apresentou com desvantagem o baixo alcance de comunicação e impossibilidade de formação de rede *mesh*.

A escolha pela utilização do *ZigBee* neste nível ocorreu por essa tecnologia apresentar as seguintes vantagens: custo de instalação reduzido ao se comparar com as tecnologias a cabo; não apresenta custos de operação da rede, devido à comunicação ocorrer por radiofrequência em um espectro livre de frequências; não ocasiona gastos com as concessionárias de energia, pois o sistema pode ser instalado no braço da luminária ou mesmo na luminária que é de propriedade da prefeitura, conforme a resolução normativa nº.414/2010, formulada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); e não há gastos com operadoras de telecomunicações, uma vez que os próprios dispositivos realizam a infraestrutura de comunicação.

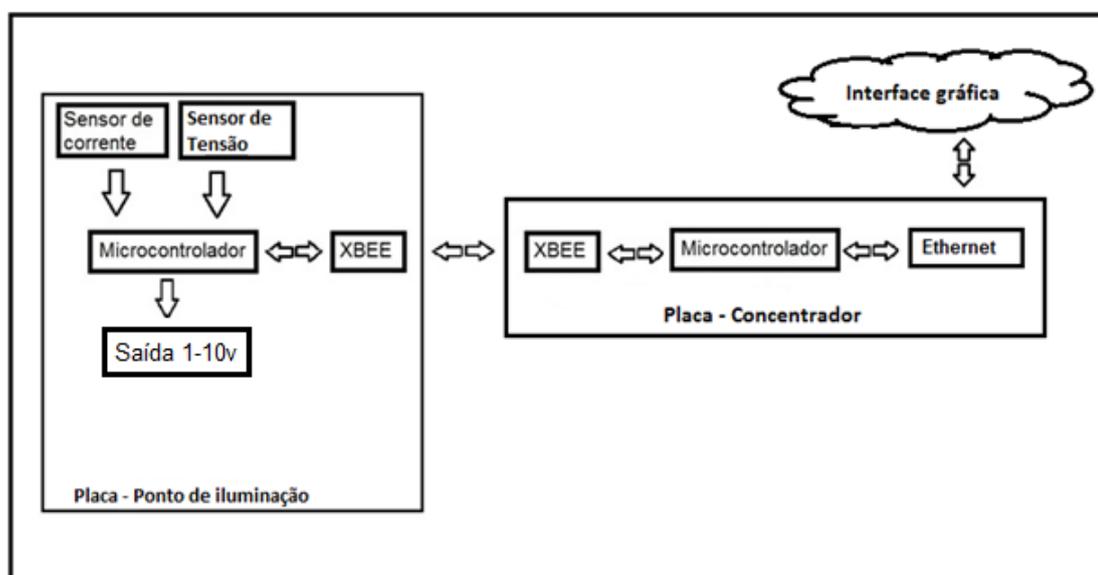
Outro ponto de grande importância da utilização do *ZigBee* é a possibilidade da implementação da rede *mesh*, pois ela possui várias vantagens, como: longo alcance de abrangência da rede, já que os dispositivos podem trocar informações entre si desde o *coordinator* até os dispositivos situados nas pontas da rede, passando os dados por dispositivos intermediários; a auto-organização da rede de forma a otimizar o tráfego de dados, buscando as melhores rotas; a realização automática do reconhecimento de entrada e saída de dispositivos na rede e a auto-organização, ou seja, novos pontos de iluminação podem ser instalados e conectados ao sistema, assim como, em caso de falha em algum rádio de transmissão, a rede pode se adaptar automaticamente para suprir a falta desse dispositivo para que não ocorra problemas na comunicação; o baixo consumo energético e a capacidade de suportar alta quantidade de dispositivos, até 65.535. Como a distância média entre postes é de 40 metros, (conforme o documento da CEMIG ND-3.1 ND Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas), podem ser utilizados *xbee's* de baixa potência, que são encontrados no mercado com baixo custo. Todas as características dessa topologia de rede evidenciam o *ZigBee* como a melhor alternativa.

Para a comunicação entre o concentrador e a interface gráfica ocorrer, é

necessária a utilização da internet, pois a interface opera em nuvem. Assim, serão necessárias duas tecnologias de comunicação diferentes na placa concentradora. A primeira tecnologia utiliza o sistema de comunicação de radiofrequência do *Xbee*, que realiza a comunicação entre os pontos de iluminação e o concentrador. A segunda tecnologia de comunicação utiliza a tecnologia a cabo padrão *Ethernet*, que realiza a comunicação entre o concentrador e a interface.

A Figura 10 apresenta a ligação entre todos os componentes do sistema e o sentido do fluxo de informações.

Figura 10 - Operação do sistema



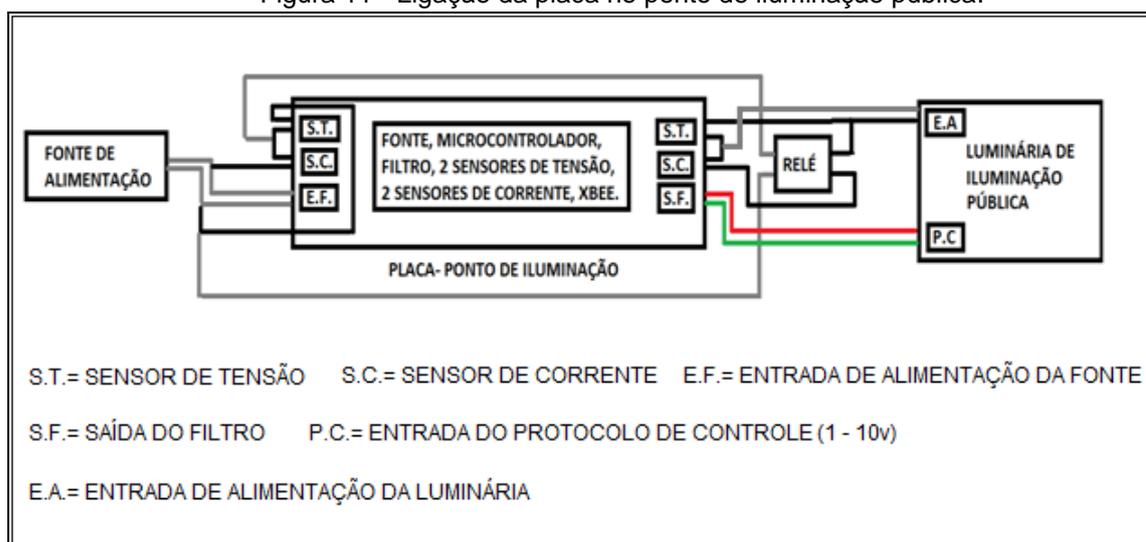
Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme pode ser observado na Figura 10, há duas placas principais, uma é a placa concentradora e a outra é a placa instalada em cada ponto de iluminação. Como o próprio nome sugere, a placa concentradora é responsável por concentrar todos os dados de comunicação, de um grupo de pontos de iluminação, para apenas este ponto ter acesso à internet, reduzindo os custos de operação do sistema, tendo em vista que se fosse utilizadas tecnologias com acesso a internet em cada luminária, seria necessário pagar um determinado valor mensal relativo ao serviço de acesso a internet. A estratégia utilizada é colocar vários pontos de iluminação para se comunicar com o concentrador por radiofrequência, e esse concentrador ter acesso a internet para se comunicar com a interface.

Configurada a rede, a placa concentradora recebe os dados para dimerizar os

pontos de iluminação, através do padrão Ethernet pela interface, e transmite os dados da *xbee* do concentrador (*coordinator*) para o *xbee* do ponto de iluminação (*router*). Os dispositivos que ficarão nos pontos de iluminação receberão os dados através da rede, e os microcontroladores processarão estes dados para ativar a porta PWM de acordo com o requerido em cada ponto. Como a porta PWM produz uma saída de 0 a 5 volts modulada por larguras de pulsos, é necessário a amplificação e filtragem deste sinal, para que produza uma saída de 0 a 10 volts, que é possível ajustar esta saída para ser utilizada no protocolo de dimerização (1-10 volts) do driver da luminária, para que seja viável controlar a sua intensidade luminosa. A Figura 11 apresenta como é realizada a ligação dessa placa em um ponto de iluminação.

Figura 11 - Ligação da placa no ponto de iluminação pública.



Fonte: Elaborada pelo autor

Para realizar a identificação se os pontos de iluminação estão operando normalmente ou se estão com falhas e caso esteja identificar qual é a falha, foram utilizados sensores de corrente e de tensão. Conforme pode ser observada na Figura 11, a placa instalada em cada ponto de iluminação conta com: um microcontrolador, uma fonte de alimentação, um filtro projetado pelo autor, dois sensores de tensão, dois sensores de corrente e uma placa de comunicação Xbee. O microcontrolador é responsável por toda a parte lógica do circuito; a fonte de alimentação é responsável por regular a alimentação da rede elétrica (que é conectada a entrada da fonte E.F) em valores ideais para os componentes da placa; o filtro é responsável por atuar no sinal PWM de forma a produzir o sinal de 1 a 10

volts (fornecido na saída do filtro S.F) para a entrada do protocolo de controle da luminária (PC); os sensores realizam a leitura de tensão e corrente para auxiliar na identificação das possíveis falhas, e o *xbee* é responsável por realizar a transmissão de dados sem fio.

O microcontrolador dos dispositivos instalados nos postes de iluminação realizará a leitura dos sensores de corrente e de tensão antes e depois do relé fotoelétrico, processará os dados e os envia para o dispositivo *coordinator*, através da rede *zigbee*. Estes são transmitidos através da internet para a interface que processa as informações e, de acordo com os valores, identifica o modo de operação ou a falha existente e atualiza a interface. A tabela 3 apresenta as leituras realizadas pelos sensores que descreve o funcionamento ideal do sistema.

Tabela 3 - Combinações de leituras dos sensores indicando situações ideais de leitura do ponto.

Leitura do 1° sensor de corrente. 0=S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 1° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Leitura do 2° sensor de corrente e após o relé. 0 = S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 2° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Período do dia. (turno). 0 = h/d 1 = h/l	Status de operação.
I=1	V=1	I=0	V=0	P=0	Comportamento correto, lâmpada apagada. Há alimentação no ponto, porém neste período o relé não aciona a lâmpada.
I=1	V=1	I=1	V=1	P=1	Comportamento normal, lâmpada acionada. Há alimentação no ponto e neste período o relé aciona a lâmpada.
I=0	V=0	I=0	V=0	P=0	Lâmpada apagada: o problema é falta de alimentação, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=0	V=0	I=0	V=0	P=1	Lâmpada apagada: o problema é falta de alimentação, a lâmpada deveria estar acionada neste horário.
I=1	V=1	I=1	V=1	P=0	Lâmpada acesa: há problema no relé. Mas a lâmpada deveria estar apagada neste horário.
I=1	V=1	I=0	V=0	P=1	Lâmpada apagada: problema no relé, a lâmpada deveria estar acionada neste horário.
I=1	V=1	I=0	V=1	P=1	Lâmpada apagada: luminária queimada. A lâmpada deve estar acionada neste horário.

Org.: ALKMIM, 2018.

Conforme a Tabela 3, os primeiros sensores de tensão e corrente são aqueles instalados antes do relé fotoelétrico para identificar como está a alimentação do ponto de iluminação, os outros dois sensores de tensão e corrente são instalados depois do relé fotoelétrico para identificar se ele está funcionando normalmente. Na simbologia utilizada para os sensores de corrente, o valor 0 (zero) é utilizado quando os sensores não identificam a passagem de corrente ou mesmo quando a leitura de corrente está fora dos valores aceitáveis. O valor 1 (um) significa que há passagem de corrente e que os valores estão dentro dos valores aceitos. Os valores adotados para os sensores de tensão: 0 (zero) significa que não há diferença de potencial nos terminais do sensor, e 1 (um) significa que há tensão aplicada no sensor e está dentro dos parâmetros. O valor intitulado como período do dia representa os horários que a luminária deve estar acionada ou desligada. Quando esse valor for 0, significa que nesse horário a lâmpada deve estar desligada; quando o mesmo for 1, significa que a lâmpada deve estar acionada.

Como são utilizados vários sensores no sistema, ele apresenta várias combinações possíveis de leituras. Como existe a possibilidade de ocorrer falhas nos sensores, foram desenvolvidas as tabelas 4,5,6, que apresentam as combinações dos sensores caso ocorra falhas e as possíveis descrições do modo de operação. A tabela 4 apresenta todas as combinações possíveis de ter ocorrido falha em algum sensor quando existe problema de alimentação do ponto de iluminação.

Tabela 4 – Combinações de leituras dos sensores que indicam problema de alimentação do ponto, quando existe falha em sensores.

Leitura do 1° sensor de corrente. 0=S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 1° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Leitura do 2° sensor de corrente e após o relé. 0 = S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 2° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Período do dia. (turno). 0 = h/d 1 = h/l	Status de operação.
I=0	V=0	I=0	V=1	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de tensão, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=0	V=0	I=0	V=1	P=1	Lâmpada apagada o problema é falta de

					alimentação e problema no 2° sensor de tensão, a lâmpada deveria estar acionada neste horário.
I=0	V=0	I=1	V=0	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de corrente, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=0	V=0	I=1	V=0	P=1	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de corrente, a lâmpada deveria estar acionada neste horário.
I=0	V=0	I=1	V=1	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de corrente e no 2° sensor de tensão, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=0	V=0	I=1	V=1	P=1	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de corrente e no 2° sensor de tensão, a lâmpada deveria estar acionada neste horário. Ou Lâmpada acesa e o problema no 1° sensor de tensão e no 1° sensor de corrente.
I=0	V=1	I=0	V=0	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° sensor de tensão, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=0	V=1	I=0	V=0	P=1	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° sensor de tensão, a lâmpada deveria estar acionada neste horário.
I=0	V=1	I=0	V=1	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° e 2° sensor de tensão, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário
I=0	V=1	I=1	V=0	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° sensor de tensão e 2° sensor de corrente, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=0	V=1	I=1	V=0	P=1	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de corrente e no 1° sensor de tensão, a lâmpada deveria estar acionada neste horário. Ou Lâmpada acesa e o problema no 2° sensor de tensão e no 1° sensor de corrente. Ou Lâmpada apagada: o problema é no relé e nos dois sensores de corrente.
I=1	V=0	I=0	V=0	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° sensor de corrente, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário. Ou Lâmpada apagada: em situação normal

I=1	V=0	I=0	V=0	P=1	e o problema é no 1° sensor de tensão. Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° sensor de corrente, a lâmpada deveria estar acionada neste horário.
I=1	V=0	I=0	V=1	P=0	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 1° sensor de corrente e 2° sensor de tensão, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.

Org.: ALKMIM, 2018.

Conforme pode ser observado na tabela 4, mesmo que ocorram falhas em um dos sensores ainda é possível identificar quando existe a falta de alimentação do ponto de iluminação, por meio da combinação da leitura dos demais sensores. Na tabela 5 são apresentadas as combinações quando se tem falha no relé.

Tabela 5 - Combinações de leituras dos sensores que indicam falha no relé do ponto, quando existe falha nos sensores.

Leitura do 1° sensor de corrente. 0=S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 1° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Leitura do 2° sensor de corrente e após o relé. 0 = S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 2° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Período do dia. (turno). 0 = h/d 1 = h/l	Status de operação.
I=0	V=1	I=1	V=0	P=1	Lâmpada apagada o problema é falta de alimentação e problema no 2° sensor de corrente e no 1° sensor de tensão, a lâmpada deveria estar acionada neste horário. Ou Lâmpada acesa e o problema no 2° sensor de tensão e no 1° sensor de corrente. Ou Lâmpada apagada: o problema é no relé e nos dois sensores de corrente.
I=0	V=1	I=1	V=1	P=0	Lâmpada acesa problema no relé e no primeiro sensor de corrente. mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=1	V=0	I=1	V=1	P=0	Lâmpada acesa: problema no relé e no 1° sensor de tensão, mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário.
I=1	V=1	I=0	V=0	P=1	Lâmpada apagada problema no relé, ou lâmpada apagada devido a lâmpada queimada e problema no 2° sensor de tensão, a lâmpada deveria estar acionada

					nesses horários.
I=1	V=1	I=0	V=1	P=0	Lâmpada acesa: problema no relé e no 2° sensor de corrente, mas a lâmpada deveria estar apagada neste horário.
I=1	V=1	I=1	V=0	P=0	Lâmpada apagada e problema no 2° sensor de corrente. Mas a lâmpada deve se manter apagada neste horário. Ou Lâmpada acesa: problema no relé e no 2° sensor de tensão.
I=1	V=1	I=1	V=0	P=1	Lâmpada acesa: problema no 2° sensor de tensão. A lâmpada deve estar acionada neste horário. Ou lâmpada apagada: problema no relé e no 2° sensor de corrente.
I=1	V=1	I=1	V=1	P=0	Lâmpada acesa há problema no relé. Mas a lâmpada deveria estar apagada neste horário.

Org.: ALKMIM, 2018.

Conforme pode ser observado na tabela 5, mesmo que ocorram falhas em um dos sensores ainda é possível identificar quando existe problema no relé do ponto de iluminação, através da combinação da leitura dos demais sensores. Na tabela 6 é apresentado as combinações quando a luminária está queimada.

Tabela 6 - Combinações de leituras dos sensores que indicam luminária queimada.

Leitura do 1° sensor de corrente. 0=S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 1° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Leitura do 2° sensor de corrente e após o relé. 0 = S/c. ou f/c. 1 = C/c.	Leitura do 2° sensor de tensão. 0 = s/t. 1 = c/t	Período do dia. (turno). 0 = h/d 1 = h/l	Status de operação.
I=0	V=1	I=0	V=1	P=1	Lâmpada apagada o problema é lâmpada queimada e problema no 1° sensor de corrente. Ou Lâmpada acesa e o problema no 1° e 2° sensor de corrente.
I=1	V=1	I=0	V=0	P=1	Lâmpada apagada: devido a lâmpada queimada e problema no 2° sensor de tensão. Ou Lâmpada apagada problema no relé. A lâmpada deveria estar acionada neste horário.

Org.: ALKMIM, 2018.

Conforme pode ser observado na tabela 6, mesmo que ocorram falhas em um dos sensores ainda é possível identificar quando a luminária está queimada.

É importante lembrar que a interface gráfica conta com um banco de dados que armazena todas as informações do funcionamento da luminária, identificando, por exemplo, como se comportam os valores de tensão e corrente quando a luminária está operando em sua potência máxima ou mesmo quando ela está sendo dimerizada. Como os sensores não apresentam alta precisão, existe uma faixa de valores aceitáveis, que é o valor de referência com uma faixa de erro aceitável. É importante ter esses dados armazenados para que eles sirvam como valores de referência quando a interface interpretar as leituras dos sensores. Ela realiza a comparação dos dois valores para identificar como está o comportamento do ponto de iluminação. Deve ser realizado esse registro de referência para cada potência de luminária de marcas ou modelos diferentes, pois cada uma pode ter um comportamento diferente da outra, principalmente no momento em que estiver sendo dimerizada e, conseqüentemente, apresentar valores distintos.

As falhas detectadas através deste sistema proposto são luminárias queimadas, problemas no relé e problemas de alimentação do circuito. É importante ressaltar que não é o objetivo do sistema identificar defeitos dentro da luminária, como led ou driver danificado, pois, para a sua identificação, seria necessário realizar a instalação de sensores dentro dela e essa não é uma estratégia muito atraente porque as luminárias do tipo led apresentam um grande período de garantia (10 a 12 anos) e a sua abertura para instalação dos sensores acarretaria em perda da garantia. Quando as luminárias estão com defeito e não se encontram mais na garantia, o procedimento realizado pela área técnica é a sua substituição, levando-a ao laboratório para verificação do defeito e manutenção para posteriormente ser disponibilizada para o estoque para ser utilizada.

A comunicação do sistema ocorre em um processo de comunicação com duas mensagens. Dentro de cada uma dessas mensagens existe uma nomenclatura para identificá-las, no qual $t=1$ representa a comunicação enviada dos pontos de iluminação para a interface, informando todos os dados coletados pelos sensores para que a interface interprete estes e atualize o status de operação da luminária. E $t=2$ que representa a comunicação enviada da interface para os pontos de iluminação, indicando o valor que se deseja dimerizar o ponto de iluminação. Nesse modelo desenvolvido, as placas que estão nos pontos de iluminação devem primeiro

se comunicar com o concentrador e este se comunicar com a interface gráfica, passando a mensagem t=1. No momento em que essa mensagem chega na interface, ela gera a mensagem de resposta t=2, que faz o caminho inverso, saindo da interface para o concentrador e, posteriormente, para o ponto de iluminação. A Figura 12 apresenta os dois tipos de mensagens utilizados na comunicação:

Figura 12 - Mensagens utilizadas na comunicação do sistema

```
i=1&t=1&gl=111&l=000000003&s1=1.280&s2=127&s3=1.180&s4=127&f=1

i=1&t=2&gl=999&l=999999999&p1=128&f=1
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 7, apresenta os significados dos termos utilizados nas mensagens de comunicação mostradas na figura 12.

Tabela 7 – Significado dos termos da mensagem de comunicação

Termos:	Significado
i=1	Indica o início da mensagem.
&	É utilizado como separador de conteúdos na mensagem.
t=1	Indica qual dos dois tipos de mensagem é. Neste caso a mensagem é a de leitura dos sensores dos pontos de iluminação. Esta mensagem contém as leituras dos sensores de cada ponto de iluminação.
T=2	Indica qual dos dois tipos de mensagem é. Neste caso a mensagem é a de dimerização para controlar os pontos de iluminação.
gl=111	Este termo atua como um identificador do grupo de luminárias, através dele é possível indicar quais grupos de luminárias devem processar a mensagem ou mesmo identificar quais grupos estão enviando a mensagem. Estes três dígitos (neste exemplo representado por 111) indica para qual grupo de luminárias é a mensagem, se estes dígitos for 999 indica que vão ser todos os grupos de luminárias, se for de 001 até 998 indica o grupo de luminárias (o grupo de luminárias pode ser: parques, bairros, regiões, zonas, etc.). Se for 000 indica que a mensagem é para apenas uma luminária.
l=999999999	Este termo atua como um identificador, através dele é possível indicar quais pontos de iluminação devem processar a mensagem ou mesmo identificar qual está enviando a mensagem. Estes dígitos (neste exemplo representado por 999999999) fazem a identificação dos pontos de iluminação, se o número for 999999999 significa que a mensagem é para todas as luminárias de acordo com o grupo selecionado pelos três caracteres anteriores. Ou o valor pode representar também apenas uma luminária, este valor pode ser de: 000000000 até 999999998.
p1=000	Indica em qual valor será acionado a saída pwm. A mesma pode ser acionada por um sinal de 8 bits (podendo ser selecionado 256 níveis diferentes), Como a saída é um sinal em frequência de 0 a 5 volts, este deve passar por um filtro e um amplificador para que seja um sinal de 0 a 10volts para controlar a luminária.

s1=1.280	Indica o valor de leitura do primeiro sensor de corrente, aquele instalado antes do relé. (neste exemplo o sensor está medindo 1.280 A).
s2=127	Indica o valor de leitura do primeiro sensor de tensão, aquele instalado antes do relé. (neste exemplo o sensor está medindo 127 V).
s3=1.180	Indica o valor de leitura do segundo sensor de corrente, aquele instalado depois do relé. (neste exemplo o sensor está medindo 1.180 A).
s4=127	Indica o valor de leitura do segundo sensor de tensão, aquele instalado depois do relé. (neste exemplo o sensor está medindo 127 V).
f=1	Indica o fim da mensagem.

Org.: ALKMIM, 2018.

Todo esse processo de comunicação ocorre automaticamente. O usuário define o tempo ou horários que ele deseja que o sistema realize a atualização das leituras dos sensores, é possível também programar a forma como a dimerização deve ocorrer.

Outra estratégia adotada é o agrupamento de luminárias através dos seus endereços, com isso o processo opera de maneira mais automatizada, sendo possível realizar a dimerização de um grupo de luminárias com apenas um comando. Essa estratégia é importante devido ao fato de que diversos ambientes necessitam de procedimentos de iluminação diferentes, há locais em que o período de iluminação em alta intensidade pode ser menor que os demais, como é o caso de parques, por exemplo, em que ele só é aberto durante o dia, necessitando de iluminação artificial apenas no entardecer em um pequeno período do seu horário de funcionamento, após o horário de fechamento, ele poderia ter a sua iluminação reduzida. Existem também locais em que a iluminação deve estar acionada durante todo o período do dia, então a dimerização desses pontos em determinados horários seria uma alternativa interessante. Vale lembrar que diversas características podem influenciar sobre a iluminação de um determinado local, desse modo, agrupar essas luminárias de acordo com suas características e do lugar instalado é uma estratégia interessante para a automatização.

2.3 Características da interface gráfica

Para idealização da interface gráfica foi observado o cenário atual da iluminação pública no Brasil. Primeiramente, é possível perceber que as luminárias de led ainda não são predominantes, mas estudos como os de McKinsey (2012) apresentam os benefícios e demonstram perspectivas para que essas luminárias se

tornem maioria em um futuro próximo. Dessa maneira, é interessante o desenvolvimento de soluções para esse tipo de luminária, já que outros modelos passarão a ser substituídos. É possível observar também que a maioria dos municípios brasileiros não conta com um sistema de gestão inteligente, em que seja possível controlar as luminárias remotamente ou mesmo realizar o processo de identificação de pontos de iluminação com problemas de forma automática. A grande maioria dos municípios conta apenas com os serviços de uma central de atendimentos para que a população entre em contato para informar sobre o problema e também com a vistoria em campo por técnicos para a identificação de falhas.

Observado esse cenário e com o intuito de otimizar o serviço prestado, o desenvolvimento da interface gráfica do projeto contou com uma parceria com a empresa Minera Engenharia, localizada em Montes Claros/MG. Essa empresa conta com um sistema de Call Center para iluminação pública e presta serviços a diversos municípios do Norte de Minas. Os cidadãos podem ligar para determinado número de telefone disponibilizado pelas prefeituras para informar pontos de iluminação com problemas, como lâmpadas queimadas, luminárias acesas durante o período que deveriam estar desligadas, entre outros. A parceria com essa empresa voltou-se para a integração do software de Call Center da Minera Engenharia com o controle e monitoramento desenvolvido nesta pesquisa. Foram inseridas algumas implementações na interface gráfica, como o sensoriamento, que mostra no mapa todos os pontos de iluminação do município, de forma que seja possível identificar os que estão operando normalmente e os que apresentam falhas e quais os tipos de falhas. Além disso, foi desenvolvido um módulo para dimerização onde é possível controlar a intensidade luminosa de luminárias.

Através dessa parceria, com a integração entre as funcionalidades já existentes e as implementadas, a interface gráfica passa a ter as seguintes funções:

- 1) Níveis de acesso ao sistema de acordo com o usuário (gestor, electricista, operador de Call Center, encarregado);
- 2) Interface gráfica com pontos georreferenciados em mapa;
- 3) Sistema de identificação com cores diferenciadas para identificar no mapa os pontos de iluminação e os concentradores, de modo que seja possível identificar a sua localização. Os pontos de iluminação podem assumir duas cores diferentes, que se distinguem quando está operando normalmente e quando está com falha;

- 4) Sistema de registro de ocorrências através da central de atendimentos, de forma permite que o usuário informe ao atendente os dados cadastrais, para identificar o endereço e o tipo de problema na iluminação de pontos que o sistema não está instalado;
- 5) Sistema de Cadastramento: permite incluir, alterar ou excluir dados de pontos de iluminação. (Dados a serem cadastrados: identificação do ponto de iluminação, grupo de luminárias pertencentes, endereço, coordenadas geográficas, tipo de luminária, quantidade de luminárias, tipo de lâmpada, potência da luminária, relé, reator, tipo de braço, tipo de poste, tipo de instalação, data de instalação, data de cadastro, estado de funcionamento, data de realização de manutenção e descrição);
- 6) Sistema de visualização de dados dos pontos de iluminação: permite selecionar um determinado ponto de iluminação no mapa, após selecionado é apresentado todos os seus dados: estado de funcionamento, dados de sensores, dados cadastrais, opção de dimerização;
- 7) Seleção de grupos de luminárias: permite selecionar os grupos de luminárias cadastradas, para que seja apresentado apenas os dados das luminárias pertencentes aos grupos selecionados;
- 8) Sistema de controle: permite a dimerização entre 10% e 100% da intensidade luminosa da luminária em 243 níveis diferentes, permite a dimerização individual ou de grupo de luminárias. Também possibilita programar o horário e o valor para dimerizar uma luminária ou grupo de luminárias;
- 9) Sistema de monitoramento: realiza a solicitação automática de leitura dos sensores em determinados períodos para ser atualizada a interface;
- 10) Banco de dados: permite armazenar todas as leituras dos pontos de iluminação e também de todos os dados cadastrados no sistema;
- 11) Sistema de busca dos pontos de iluminação: permite identificar um ponto de iluminação no mapa digitando a sua identificação ou endereço;
- 12) Sistema de Relatórios: permite visualizar diversos dados do sistema como o número de serviços prestados em determinado período, o número de serviços pendentes, o tempo médio de realização de serviços, as equipes com mais serviços prestados, a quantidade de equipamentos trocados e valor gasto, os pontos de iluminação com maior número de manutenções realizadas, os tipos de problema com maior frequência, os pontos que foram realizados a manutenção, o relatório de lâmpadas com falhas, as reclamações realizadas e a previsão de serviços.

Todas as 12 funcionalidades são características de grande importância para o desenvolvimento de uma interface com grande potencial de gestão do sistema de iluminação. Por meio dessas implementações, é possível acompanhar todos os processos da iluminação, como o funcionamento, controle, acompanhamento dos serviços de manutenção e instalação, e o histórico dos pontos de iluminação, além da geração de relatórios. Todos esses aspectos contribuem para a melhoria contínua do serviço prestado.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados e os resultados obtidos para verificar o funcionamento do sistema desenvolvido. Eles serão apresentados por meio de imagens e também de tabelas que mostram os dados de maneira quantitativa. Inicialmente é apresentada a implementação do filtro passa-baixas conectado a saída PWM do microcontrolador para que se tenha um sinal de saída de 1 a 10 volts para o controle da luminária. Foram realizados testes de medida de corrente e o *shield* sensor de corrente apresentou desvios nas leituras, houve uma análise do comportamento de algumas equações propostas para realizar a correção das leituras realizadas pelo *shield*. Nesse teste, foi observado que quando utilizado o CI ACS 712, seguindo as especificações do *datasheet* em uma placa desenvolvida como protótipo, ainda existia uma pequena diferença na leitura, sendo aproximadas as leituras do sensor e real através de uma calibração.

Foram realizados também testes de comunicação para observação das distâncias de comunicação sem barreiras, com barreiras e como elas influenciam na distância de comunicação. Por último, são apresentados os resultados de todo o sistema funcionando de forma integrada. É apresentado o sistema de cadastro dos pontos de iluminação, posteriormente, o mapa onde é possível identificar os pontos de iluminação que estão em funcionamento normalmente e os com falhas, de tal forma que, ao usuário clicar em um dos pontos do mapa, é aberta a aba que apresenta as leituras realizadas pelos sensores e a identificação do modo de operação da luminária, sendo possível também o processo de dimerização de forma remota através desta.

3.1 Implementação do filtro passa-baixas para o protocolo de controle de 1 a 10 volts

Para efetuar a dimerização das luminárias do tipo led, é necessária a utilização de um protocolo para controlar a sua intensidade de iluminação. Geralmente o mais utilizado pelos fabricantes de luminárias no Brasil é o protocolo 1 a 10 volts. Nele é possível controlar a intensidade luminosa entre 10% e 100%, de forma que, ao enviar um sinal de 1 volt para entrada do equipamento com esse protocolo, a luminária é dimerizada em 10% da sua capacidade luminosa. À medida

que esse sinal é aumentado, a intensidade da iluminação é aumentada proporcionalmente até atingir um valor máximo de 10 volts, que é a capacidade máxima de sua iluminação.

Como o microcontrolador utilizado não tem saídas analógicas e tem apenas saídas PWM (*Pulse Width Modulation*), que produzem um sinal modulado em largura de pulsos de 0 a 5 volts, foi necessário o desenvolvimento do filtro passa-baixas com amplificação de duas vezes para que se tenha uma saída de 0 a 10 volts. No entanto, foi ajustado através da programação para gerar uma saída de 1 a 10 volts, pois é o requisito necessário de dimerização da luminária, conforme descrição supracitada. O protocolo de controle projetado é realizado com um sinal de oito bits, o que resulta em 2^8 níveis, ou seja, 256 níveis de possibilidades. Desses níveis, o primeiro corresponde a um conjunto binário onde todos os bits são zeros e tem-se a tensão de zero volts na saída. Devido a isso, este é desconsiderado no cálculo de resolução, pois apenas os próximos níveis apresentaram valores de tensão acima de zero, o cálculo resulta em uma resolução de $10\text{v} / 255 = 0,03921\text{volts}$ ou 39,21mili Volts aproximadamente.

É importante lembrar que 243 desses níveis são de fato utilizados nesse controle, visto que os 13 (treze) primeiros níveis, após passarem pelo filtro, terão uma saída inferior a 1volt. Verificado esses dados, é necessário o desenvolvimento de um sistema de controle que atenda estas especificações do protocolo de 1 a 10 volts e com resolução menor ou igual a 39,21mili Volts. Para isso, foi implementado um filtro ativo passa-baixas *Butterworth* topologia *Sallen Key* de 2° ordem com ganho de 2. O microcontrolador utilizado conta com várias saídas PWM, no qual a maioria delas tem frequência de 490 Hz, porém, há duas saídas que operam em 980 Hz. Dessa forma, decidiu-se desenvolver o filtro para as saídas de 490 Hz, já que o filtro desenvolvido para essa frequência atende as superiores. O filtro projetado produz atenuações nas frequências de 490 Hz, que é a frequência do sinal PWM para que este seja aproximado ao sinal analógico.

Foi escolhido esse tipo de filtro ativo por ele ser bastante simples, não necessitando de indutâncias. Ele apresenta uma boa qualidade, impedância de entrada bastante elevada e impedância de saída praticamente nula, além do ganho que pode ser controlado facilmente. Também foi escolhido o filtro do tipo *Butterworth* por apresentar respostas mais planas nas faixas de passagem e de rejeição do filtro. A frequência de corte escolhida foi a de 10 Hz e a ordem 2, por produzir atenuações

de 40 db/década, para que, na frequência de 490 hertz, a atenuação tenha um *ripple* inferior a 39,21mili Volts, condição esta estabelecida pela resolução de 8 bits utilizada. A topologia *sallen key* também foi usada por apresentar bons resultados e ser de fácil implementação.

Para desenvolvimento do filtro, foi utilizado o software Filter-Pró, pois ele calcula todos os componentes, levando em consideração apenas valores comerciais. Nesse software, são colocados todos os parâmetros que se deseja do filtro, topologia, ordem, ganho e ele realiza a configuração. Os cálculos que envolvem os filtros são: frequência de corte, fator de qualidade e a função de transferência. A seguir serão tratados os cálculos.

A frequência de corte do filtro é dada por:

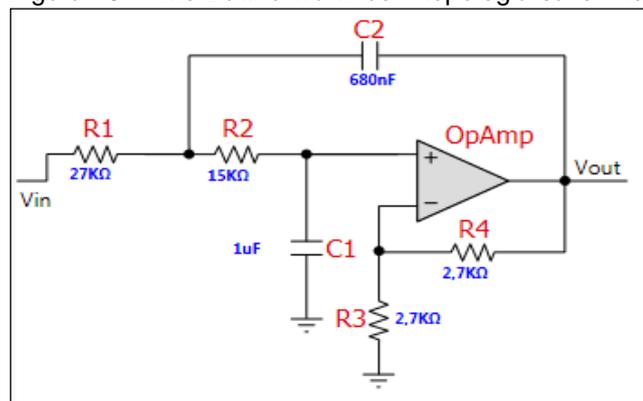
$$F_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Como o filtro é do tipo butterworth por definição o fator de qualidade é 0,707. A função de transferência para este filtro é:

$$H(S) = \frac{1}{1 + C_2(R_1 + R_2)S + C_1 C_2 R_1 R_2 S^2}$$

O software filter-pró realiza automaticamente todos estes cálculos para se encontrar os valores dos componentes comerciais. O filtro desenvolvido pelo mesmo é apresentado na figura 13.

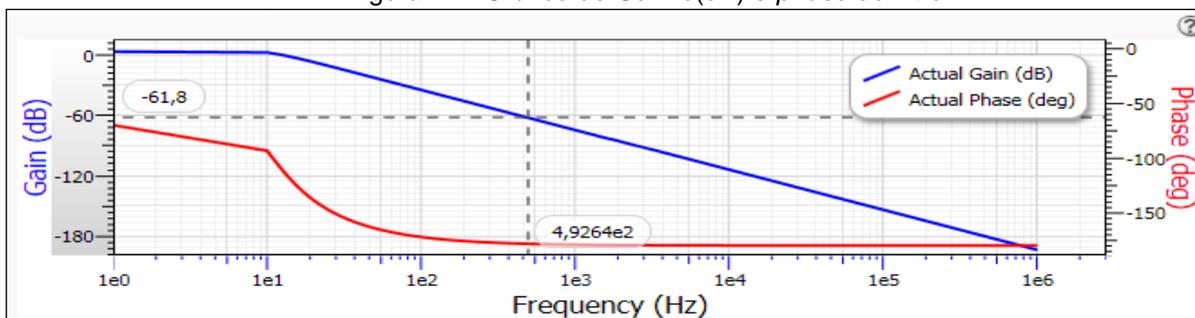
Figura 13- Filtro *Buttherworth* com topologia *sallen key*.



Fonte: Software Filter-Pró.

Este software também gera os gráficos de respostas do filtro de ganho em (dB), fase (*phase*) e atraso de grupo. Na Figura 14 é apresentado o gráfico de ganho e fase.

Figura 14 - Gráfico de Ganho(dB) e *phase* do filtro.



Fonte: Software Filter-Pró.

Analisando o gráfico de ganho (dB) da Figura 14, é possível perceber que, na frequência de 490Hz, o filtro configurado apresenta uma atenuação de aproximadamente 61 dB. A partir desse dado, é possível verificar que o filtro proposto atenderá a demanda. Para realizar a sua validação foi realizado o cálculo para verificar o ripple produzido na saída do filtro, sendo apresentado a seguir:

$$61 = 20 \log (A)$$

$$3.05 = \log (A)$$

$$A = 10^{3.05} = 1122$$

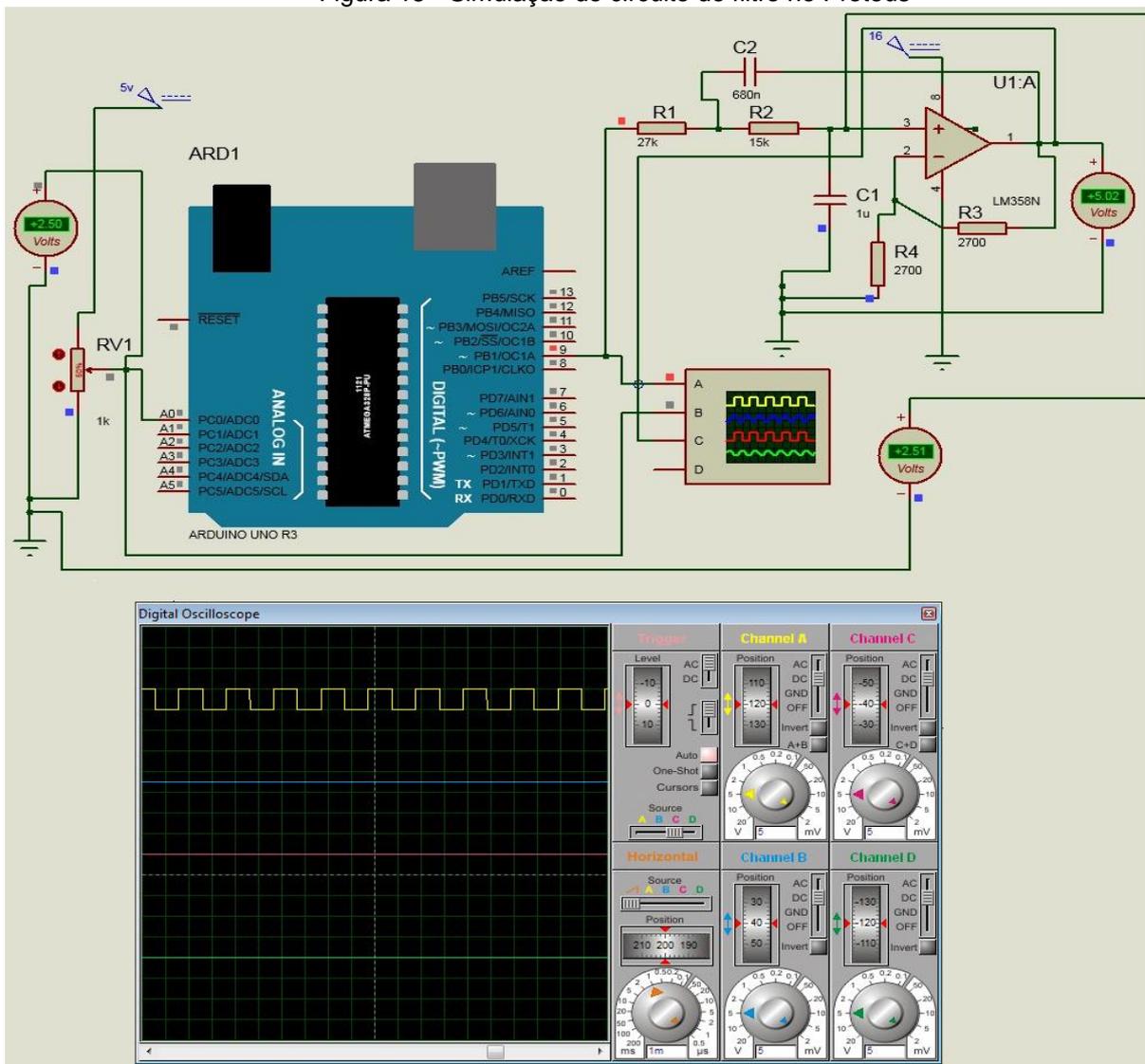
t_m = Tensão máxima de saída no filtro.

$$\text{Ripple} = t_m / A$$

$$\text{Ripple} = 10 / 1122 = 8.9 \text{mili Volt.}$$

Conforme pode ser observado através da Figura 14 e da demonstração do cálculo, o filtro atende às especificações, já que o *ripple* máximo produzido na saída é inferior ao valor da resolução. Foi simulado na plataforma Proteus o funcionamento do filtro, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Simulação do circuito do filtro no Proteus



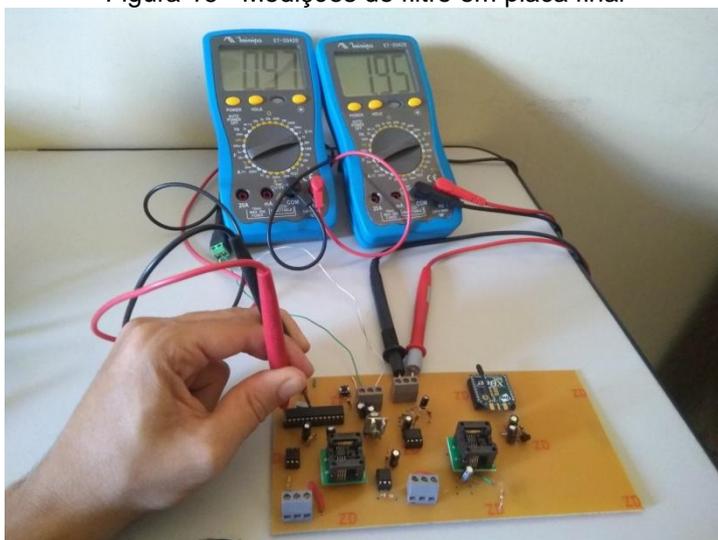
Fonte: Software Proteus (Elaborado pelo Autor).

Conforme pode ser observada na Figura 15, foi realizada uma simulação no software Proteus para demonstrar o funcionamento do filtro. Nessa simulação, é aplicado um sinal de 0 a 5 volts em uma entrada analógica do microcontrolador. Assim, ele processa esse sinal e ativa uma saída PWM com o mesmo valor. Dessa forma, esse sinal é colocado em um filtro que, além de filtrar o sinal, gera um ganho de 2, produzindo uma saída de 0 a 10 volts. É possível observar também a relação entre os valores dos voltmímetro com os apresentados no osciloscópio: a linha amarela representa o canal A, que é a leitura da saída PWM; nesta pode ser observada a atuação da frequência sobre o sinal, este apresenta uma tensão de 2,51 volts demonstrado no voltmímetro ao lado do osciloscópio. A linha azul

representa o sinal aplicado na entrada analógica que tem o valor de 2,50 volts, conforme pode ser observado no voltímetro conectado à saída do potenciômetro e na entrada analógica. A linha rosa representa o canal C, que é o sinal após o filtro, com o ganho de 2 (duas) vezes e sem influência das frequências, este ganho pode ser notado no voltímetro que está próximo do amplificador operacional que apresenta a leitura de 5,02 volts.

Conforme pode ser observado, o filtro atendeu às especificações necessárias para a realização do controle, demonstrando que por meio de sua utilização será possível realizar a dimerização. A resolução do voltímetro utilizado na simulação é de 10 mili volts, e a resolução do filtro, conforme os cálculos, é de 8.9 mili volts, então o equipamento realiza o arredondamento da leitura, que ainda é inferior à resolução necessária para o controle do sistema, demonstrando a viabilidade de sua implementação. Como o filtro apresentou bons resultados na simulação, foi realizada a montagem do circuito em *protoboard* para verificar e comparar se os resultados do circuito real estão de acordo com a simulação e, posteriormente, foi projetada e testada a placa de protótipo. A Figura 16 apresenta um teste realizado com o filtro, no qual é realizada a medida de tensão antes e depois.

Figura 16 - Medições do filtro em placa final



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Conforme pode ser observado na figura 16, o filtro foi montado para a validação experimental dos resultados. Para a realização desse teste, foi realizada a ativação da saída PWM em diversos valores e a medição do sinal antes do filtro, que é apresentado pelo multímetro à esquerda, e, após o filtro, que é apresentado pelo

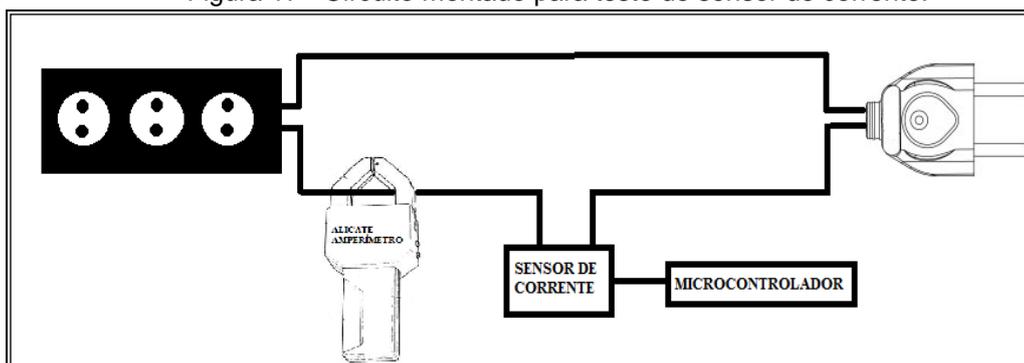
multímetro à direita. Os dados do teste são apresentados na Tabela 8 no anexo.

A Tabela 8 apresenta a resposta do filtro em uma grande gama de valores, para a sua medição foi utilizado o multímetro Minipa, modelo ET-2042D, e o osciloscópio TEKTRONIX para verificação do comportamento do sinal antes e após o filtro. Ele apresentou pequenas oscilações de saída para alguns valores de entrada, sendo então atribuída à tabela o valor que apresentava a maior diferença entre o ideal e o real. Ao observar esses valores, é possível perceber que a saída que contou com a maior diferença teve um sobressinal de 0,46 volts, quando a entrada do filtro é 3,71 volts, que corresponde a um erro máximo de aproximadamente 6% acima do valor ideal. Esse valor é aceitável, visto que, para outros valores de entrada, a diferença foi bem inferior e a percepção do olho humano não consegue captar pequenas diferenças na variação da iluminação, demonstrando assim que ele atende aos requisitos necessários.

3.2 Testes e calibração do sensor de corrente

O sensor de corrente auxilia na identificação do comportamento do ponto de iluminação, sendo possível identificar os pontos onde há passagem de corrente e o seu valor, identificando se os valores de corrente condizem com o esperado. Para realização dos testes, foi utilizado o módulo sensor de corrente ACS712- 5A, 1 microcontrolador, 1 extensão e 1 alicate amperímetro Minipa. O sensor de corrente utilizado é do tipo invasivo, ou seja, necessita da abertura do circuito para instalação e para realização das leituras, que foi instalado em série a um dos fios da extensão. A Figura 17 apresenta um demonstrativo do circuito e os materiais utilizados para realização do teste para verificar as leituras de corrente realizadas.

Figura 17 - Circuito montado para teste do sensor de corrente.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O circuito montado para testes apresentado na Figura 17 foi utilizado para verificar se as leituras realizadas pelo sensor de corrente estavam de acordo com as leituras realizadas pelo alicate amperímetro. Como pode ser observada na instalação, a leitura dos equipamentos, desconsiderando a precisão, devem ser as mesmas. Inicialmente, para validação do projeto, foram realizados os testes com o sensor de corrente ACS712-5A produzido como módulo para microcontrolador. Foram também utilizados diversos aparelhos eletrônicos que utilizam níveis de corrente diferentes na faixa próxima de 0A até correntes próximas de 5A, que é a faixa de operação do sensor. Foram observados os valores no sensor de corrente e no alicate amperímetro, que são apresentados na Tabela 9 em anexo.

A Tabela 9 mostra que ocorreram diferenças entre as leituras do sensor e as leituras do alicate amperímetro em vários valores de corrente na faixa de 0 até 5 ampères, sendo a diferença máxima alcançada de até 1,06 ampère. 8 (oito) medidas apresentaram diferença próxima de 1 ampère, e 29 medidas apresentaram uma diferença superior a 20% do real. É possível perceber que o sensor de corrente não apresentou uma resposta linear, e como é uma diferença considerável, foram realizados novos testes trocando cada um dos equipamentos e anotando as leituras, para verificar se havia defeito nos equipamentos. Primeiro foi substituído o alicate amperímetro, depois o sensor de corrente e por último o microcontrolador, não havendo mudanças significativas nos resultados. Com base nisso, pode-se observar que havia um desvio de leituras, foi então utilizado o Software Excel para realizar o equacionamento de correção das leituras do sensor de corrente, para que elas se aproximassem das leituras do alicate amperímetro.

Para essa correção, primeiramente foi montado um gráfico de dispersão relacionando às leituras do sensor com as leituras do alicate amperímetro. De acordo com os dados apresentados no gráfico, foram atribuídas linhas de tendência para que fosse possível a geração de equações que descrevem o comportamento dessas linhas, de tal maneira que a partir destas é possível realizar a calibração dos sensores. Foram realizados vários testes para verificar qual tipo de tendência e ordem apresentaria as melhores respostas com base nas amostras. Os dados obtidos através dos testes são apresentados na Tabela 10 no anexo.

A Tabela 10 mostra que, quando aplicada cada uma das equações nas leituras realizadas pelo sensor de corrente, elas apresentaram um comportamento próprio com resultados distintos em determinadas faixas de operação. Analisando

cada equação de maneira individual, é possível perceber que a equação linear apresentou um erro diferencial máximo entre a resposta do sensor que possui essa equação e a leitura do alicate amperímetro de 0,160A; a equação polinomial de 2º grau apresentou um erro máximo de 0,160A; a equação polinomial de 3º grau apresentou um erro máximo de 0,167A; a equação polinomial de 4º grau apresentou um erro máximo de 0,158A; a equação polinomial de 5º grau apresentou um erro máximo de 0,164A. Ao observar os dados também é possível perceber que a equação de polinomial de 4º grau obteve a maior quantidade de valores próximos ao real. Como esta apresentou os melhores resultados, ela foi implementada para realizar a correção dos valores. A Tabela 11 anexa apresenta os valores de leitura do alicate amperímetro e do sensor de corrente com essa equação.

Conforme pode ser observado na Tabela 11, após ser aplicada a equação encontrada através da linha de tendência polinomial de 4º grau, as leituras do sensor de corrente apresentaram uma melhoria considerável. Antes de ser aplicada essa equação para correção das leituras de corrente, a diferença máxima entre a leitura do sensor de corrente e do alicate amperímetro era de 1,06A, e a média entre as duas leituras era 0,214A. Após ser aplicada a equação de 4º grau para correção, essas medidas foram reduzidas, respectivamente, a 0,158A e 0,0004A.

Os resultados encontrados atendem a demanda do projeto, visto que a sua necessidade não era medir com exatidão a corrente, mas medir aproximadamente a corrente para auxiliar a identificação do modo de operação da luminária.

Após observados estes dados coletados com os módulos sensores de corrente, foi desenvolvida uma placa eletrônica para ser instalada nos pontos de iluminação, sendo o esquemático eletrônico utilizado para os sensores de corrente o mesmo recomendado pelo *datasheet* do fabricante. No momento da realização dos testes de leituras de corrente, com a placa desenvolvida, observou-se que os sensores de corrente apresentavam um comportamento diferente do relatado no teste anterior com a utilização do *shield*. Ao se utilizar o circuito desenvolvido, as leituras apresentaram um comportamento mais próximo dos dados exibidos no *datasheet*. Para realização desse teste, foi realizada uma maneira parecida com os dados coletados na tabela 9, no qual foram utilizados vários equipamentos elétricos que utilizam correntes diferentes com valores próximos de 0A até valores próximos de 5A. Observados os valores de corrente detectados pela placa desenvolvida com ACS721-05 sem a equação de correção, obtiveram-se os dados apresentados na

tabela 12 em anexo.

Conforme apresentado na Tabela 12, ao utilizar o sensor de corrente com o circuito exposto no *datasheet*, em vários valores de corrente, na faixa de 0 até 5 ampères, a diferença entre a leitura do alicate amperímetro e a leitura do sensor de corrente foi bem inferior do que quando utilizado o módulo sensor de corrente. Com a placa desenvolvida, a diferença máxima na leitura de corrente foi de 0,456 ampère e a diferença média entre as leituras do sensor de corrente foi de 0,19938 ampère, quando utilizado o módulo sensor de corrente sem a equação de correção a diferença máxima era de 1,06 ampère. Ainda de acordo com os dados da Tabela 12, o sensor de corrente não apresentou uma resposta linear, então foi utilizado o *Software Excel* usando as linhas de tendência do gráfico de dispersão para realizar o equacionamento para correção das leituras do sensor de corrente, para que elas se aproximassem das leituras do alicate amperímetro. Ao observar o *datasheet* do sensor de corrente, é possível perceber que a resposta deveria ser linear, foi então utilizada a equação linear para aproximar as leituras do sensor de corrente das leituras do alicate amperímetro. A Tabela 13 em anexo apresenta as leituras do sensor de corrente e as leituras quando aplicado a equação para corrigi-las.

Conforme pode ser observado na Tabela 13, após ser aplicada a equação linear encontrada através da linha de tendência, as leituras do sensor de corrente apresentaram uma melhoria considerável. Antes de ser aplicada essa equação para correção das leituras de corrente, a diferença máxima entre a leitura do sensor de corrente e do alicate amperímetro era de 0,456A e a média entre as duas leituras era 0,199A; após ser aplicada a equação linear para correção, essas medidas foram reduzidas, respectivamente, a 0,219A e 0,00018A. Ao observar os desvios apresentados nas leituras, é possível perceber que eles não têm grande influência no projeto, devido ao fato de que a sua necessidade é desenvolver as placas de baixo custo para serem instaladas nos pontos de iluminação, sendo preciso medir um valor aproximado para que seja possível identificar o comportamento da luminária.

3.3 Testes de comunicação com Xbee

Para realizar a comunicação entre os pontos de iluminação e o concentrador, foi utilizada a tecnologia de comunicação por radiofrequência *Xbee*, que opera em

frequências licenciadas e também possibilita a criação de uma rede de grande abrangência, sem custos de operação, o que oferece uma ótima relação custo/benefício. Para a utilização dessa tecnologia, foram realizados alguns testes que serão tratados a seguir.

3.3.1 Testes de Alcance de comunicação

Para identificar se a tecnologia de comunicação *Xbee* atenderia de fato a demanda do projeto, foram realizados alguns testes para identificar a distância máxima de comunicação entre os rádios em diversas situações. Segundo o *datasheet* do equipamento, a distância máxima de comunicação em ambiente aberto é 1.200 metros, e em ambientes fechados é de 60 metros. Para a realização do teste proposto foram utilizados 2 (dois) *xbee's* modelo S2C, 2 (dois) microcontroladores e 2 (dois) notebooks. Para a realização do teste foi conectado um microcontrolador com um *xbee* configurado como *coordinator*. As mensagens eram enviadas do notebook para o microcontrolador por meio da porta serial, o microcontrolador encaminha a mensagem para o *xbee* conectado, que envia a mensagem por radiofrequência para o outro *xbee*. O microcontrolador conectado a este processa a mensagem e envia pela porta serial para o notebook, que apresenta a mensagem recebida. Esse teste foi efetivado para identificar a distância máxima de comunicação em diversas situações, sendo realizado no primeiro andar do prédio de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes), no qual sua planta é apresentada na Figura 26 em anexo.

Para realização do teste com barreiras na Unimontes, foram utilizadas duas placas de comunicação *xbee* S2C. Os equipamentos eram deslocados para realizar os testes de acordo com o número de barreiras possíveis no espaço escolhido. Desse modo, à medida que se aumentavam o número de barreiras, os rádios também se movimentavam para identificar a distância máxima de comunicação de acordo com a quantidade de barreiras.

Esse teste foi realizado porque em alguns locais pode haver barreiras entre os rádios que se comunicarão. Isso pode ocorrer quando os rádios que estão próximos e na mesma rua param de funcionar por algum motivo. Quando isso ocorre, o rádio deve se comunicar com um ponto de iluminação que esteja em uma rua paralela, mas pode haver obstáculos entre eles, a exemplo das construções

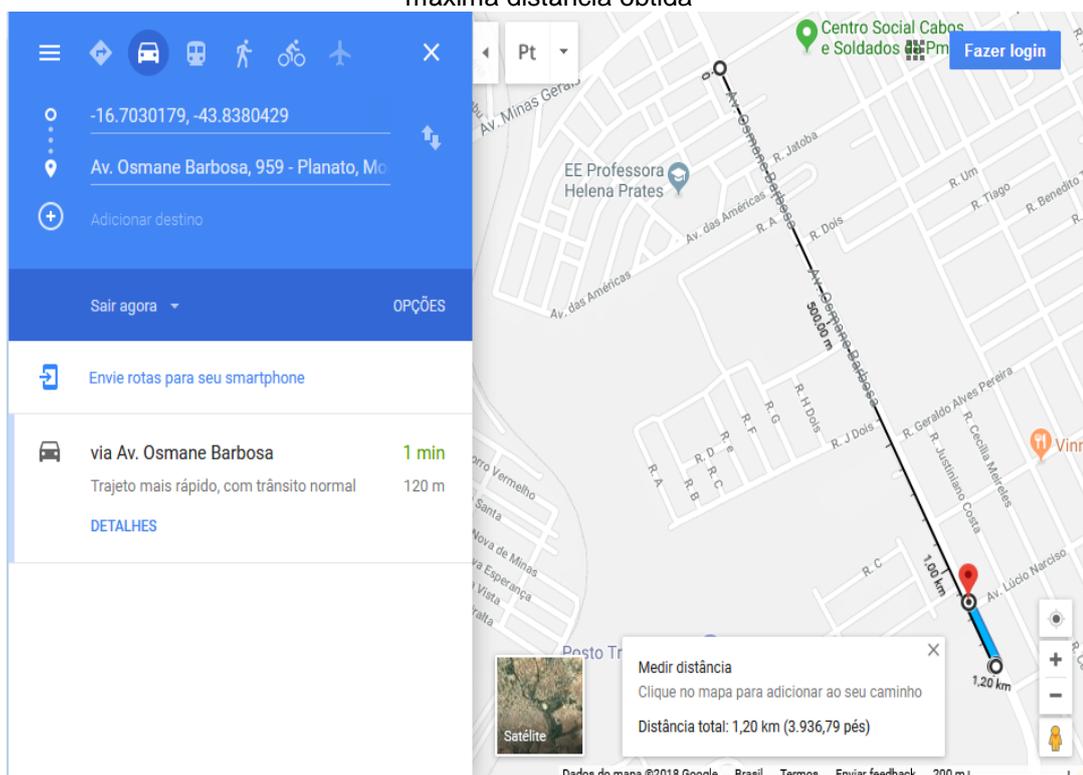
entre os pontos. Devido a isso, foi realizado esse teste, e os dados coletados são apresentados na Tabela 14 em anexo.

Conforme pode ser observado na Tabela 14, foram realizados testes com no máximo 5 (cinco) barreiras, devido ao fato de que, a partir dessa quantidade, os rádios já não conseguiam realizar a comunicação nas distâncias mínimas possíveis entre os obstáculos do local escolhido.

O teste com 1 (uma) barreira atingiu a distância de comunicação de 104,6 metros. O com 2 (duas) barreiras teve 72,93 metros como distância de comunicação. Já o de 3 (três) barreiras se comunicou até 41,3 metros, o com 4 (quatro) barreiras 30,6 metros e, por fim, o de 5 (cinco) barreiras com distância de comunicação de 19,8 metros. Pode ser observado que, à medida que se aumentava a quantidade de barreiras, a distância de comunicação diminuía, o que mostra que a maior quantidade de barreiras influencia na distância de comunicação.

Já para realização do teste em visada direta, foi escolhido um local onde a distância entre dois pontos é de 1200 metros sem barreiras, devido ao fabricante do rádio informar que essa é a máxima distância de comunicação direta. A Figura 18 apresenta, através de um mapa, o local selecionado para esse teste.

Figura 18 - Local de realização do teste de comunicação de visada direta, apresentando a máxima distância obtida



Fonte: Dados inseridos pelo autor na plataforma Google Maps.

Conforme pode ser observado na Figura 18, o local selecionado para realização desse teste é o demonstrado por meio da linha preta, que indica que há uma distância de 1200 metros entre os pontos selecionados que ficam na Avenida Osmane Barbosa, no bairro Planalto, em Montes Claros, localizado entre as coordenadas -16.7030641, -43.8380322 e -16.693483,-43.8432938. Porém, no momento da realização do teste, foi possível observar que a distância máxima de comunicação foi de apenas 122,8 metros, conforme mostrado pela linha azul no mapa que corresponde a localização entre os as coordenadas -16.7030641, -43.8380322 e -16.7019934, -43.8385894 que são as coordenadas que correspondem à localização dos rádios de comunicação no momento em que se atingiu a máxima distância de comunicação.

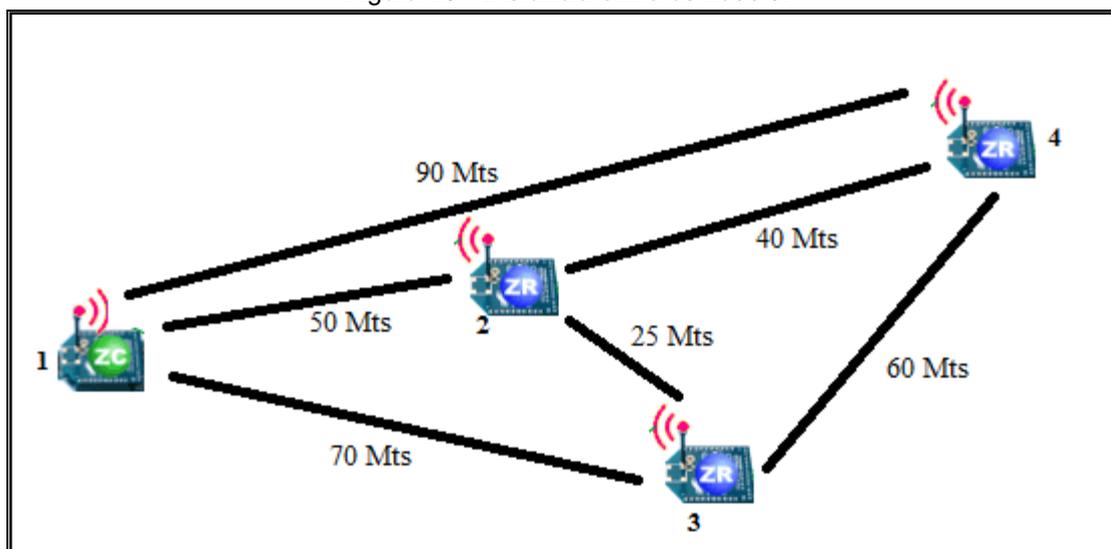
Conforme pode ser observado nos resultados do teste, o *xbee* modelo S2C atende a demanda em visada direta de que os rádios devem se comunicar a uma distância de pelo menos 40mts. Estas são as situações mais comuns, aquelas em que se têm poucas ou não há barreiras entre os postes que se comunicarão. De acordo com o documento da Cemig (ND-3.1 ND Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas), a distância média entre postes é de 40 metros. A pior das situações seria uma comunicação na qual existem dois imóveis de grande altura entre os postes, onde as paredes seriam barreiras para a comunicação. Pensando nessa possibilidade, foram realizados testes de comunicação com barreiras, e pode ser observado que caso o imóvel que esteja na altura dos rádios de comunicação e tenha mais de 2 (duas) barreiras entre eles, a comunicação não atingiria a outra rua. No entanto, em visada direta, os rádios de comunicação atingiram a distância de comunicação de 122,8 metros, caso um rádio intermediário falhe, poderia ser realizada um salto de comunicação de até dois postes de distâncias para compensar a falha.

3.3.2 Teste da topologia *Mesh*

Para a comunicação entre os pontos de iluminação e o concentrador ocorrerem é necessária a utilização da topologia de rede *mesh*, porque ela consegue abranger uma grande área de comunicação. Para a realização desse teste, foram utilizados 4 (quatro) *xbee's* modelo S2C e 4 (quatro) microcontroladores. Para demonstração desse teste, é importante apresentar que os microcontroladores

com seus respectivos *zigbee* foram espaçados de tal forma que foi possível verificar a utilização da rede *mesh*. Esse teste foi realizado no prédio de Ciências Exatas da Unimontes, conforme o teste anterior. A Figura 19 apresenta como foram instalados os rádios de comunicação.

Figura 19 - Distância entre os *xbee*'s.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Conforme pode ser observado na Figura 19, existem algumas distâncias entre os rádios de comunicação de maneira que fosse possível testar a rede *mesh* de acordo com as características do ambiente. O *zigbee* coordenador foi colocado na sala 2 do prédio de Ciências Exatas da Unimontes, e os *zigbee routers* foram colocados na área externa, lembrando que, dessa maneira, há duas barreiras entre os *router's* e o coordenador, então a distância máxima de comunicação é de 72,93 metros. Entre os rádios 1 e 2, há uma distância de 50 metros, sendo possível a comunicação direta. Entre os rádios 1 e 3, há uma distância de 70 metros, próximo a máxima distância direta possível de comunicação entre os dois. Há nesse teste duas possibilidades de comunicação entre os rádios 1 e 3: na primeira, o rádio 1 se comunica diretamente com o 3; e na segunda, o rádio 1 se comunica com o 2 e o 2 com o 3.

Já para a comunicação entre os rádios 1 e 4, a distância é de 90 m, demonstrando que na condição que foram instalados os dois não conseguiriam se comunicar diretamente, necessitando que essa comunicação passe por rádios intermediários, sendo possível três modos de comunicação. Na primeira

comunicação, o rádio 1 se comunica com o 2 e este com 4; na segunda, o rádio 1 se comunica com o 3 e este com 4; e na terceira, o rádio 1 se comunica com o 2 que se comunica com o 3 e este com o 4.

Ao realizar esse teste, foi possível observar a comunicação entre os *xbee's* e a forma que ocorreu os roteamentos dos dados. Os dados observados foram os seguintes: a comunicação entre o *xbee* 1 e 2 ocorreu de forma direta; na comunicação entre o *xbee* 1 e 3, a comunicação também ocorreu de forma direta; já a comunicação entre o *xbee* 1 e 4 necessitou de dispositivos intermediários, então o *xbee* 1 se comunicou com 2 e este se comunicou com 4, podendo observar que a rede se auto-organizou de forma que fosse realizada a melhor rota e que a comunicação de fato ocorresse por meio de saltos entre dispositivos.

3.4 Resultados dos testes realizados do funcionamento de todo o sistema

O teste para verificação do funcionamento de todo o sistema foi realizado na Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes). Durante o período de testes (15 dias), foi analisado o sensoriamento do ponto de iluminação, a parte de comunicação do ponto de iluminação com o concentrador e deste com a interface, a análise de funcionamento de todas as funcionalidades da interface e também o controle de iluminação do ponto de iluminação. Para a realização desse teste, foi instalada a luminária Urbana LED de 120 watts da empresa DEMAPE em laboratório, acoplada a placa desenvolvida para os pontos de iluminação em um local com distância de 52 metros da placa concentradora, por fim, a interface foi colocada em operação na nuvem.

Para realização dos testes, primeiramente, foi realizado o cadastro dos pontos de iluminação existentes na cidade de Montes Claros. A Figura 20 apresenta a imagem do sistema de cadastro desses pontos.

Figura 20 - Cadastro do ponto de iluminação

Minera
Iluminação pública

Home | Admin | Language | Settings | Sair

Cadastro | Atendimento | Fiscalização | Relatório | Gráfico | Sign Out

Search

Ponto IP

1 - Endereço do Ponto IP

Número do Ponto IP: Número Patrimônio: Situação: **INSTALADO** Município:

Localidade: UF: CEP:

Bairro: Logradouro: Logradouro:

2 - Características do Ponto IP

Tipo Braço: Tipo Luminária: Tipo Reator: Potência Reator:

Tipo Relé: Potência Relé: Tipo Lâmpada: Potência Lâmpada:

Medida Lâmpada: Potência Total: Possui Padrão de Medição: Nº da Instalação:

Nº do Cliente: Observações:

3 - Características do Poste

Número do Poste: Número Plaqueta: Situação: **INSTALADO** Tipo Poste: Altura do Poste:

Latitude: Longitude: Direção Fluxo: Posição Luminária: Coordenada: Alimentador:

Barramento: Número Chave: Número Medidor: Número Transformador: Subestação: Potência Total:

Proprietário:

Observações:

Limpar Salvar Excluir

Número	Endereço	Luminária	Potência Lâmpada (W)	Latitude	Longitude	Data
1	... Montes Claros	VAPOR MERCÚRIO	125,00	-16.72626175766	-43.85205365615	13/05/2016
2	... Montes Claros	VAPOR SÓDIO	100,00	-16.51352889841	-43.8825965848	13/05/2016
3	... Montes Claros	VAPOR SÓDIO	100,00	-16.73141625065	-43.89902548577	13/05/2016
4	... Montes Claros	VAPOR MERCÚRIO	125,00	-16.67562688695	-43.86144260171	13/05/2016
5	... Montes Claros	VAPOR SÓDIO	70,00	-16.70981093376	-43.86658602874	13/05/2016
Nº de Pontos IP:						36888

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Conforme pode ser observado na Figura 20, o cadastro dos pontos de iluminação conta com uma ficha completa com os dados da localização e identificação, as características do ponto de iluminação – como tipo de luminária, tipo de lâmpada, tipo de braço, reator entre outras características – e também as características do poste – como identificação, material do poste entre outras. Todos esses dados são importantes no momento que será realizada a manutenção no ponto de iluminação, tendo o responsável pela manutenção o acesso a todos os dados antes mesmo de chegar ao local, para que seja possível providenciar o material antes de se deslocar. Os dados foram cadastrados de acordo com a base de dados da empresa Minera Sistemas correspondente aos pontos de iluminação de Montes Claros.

Após o cadastrado dos pontos de iluminação, o primeiro teste realizado foi o de verificação de atualização dos dados de sensoriamento na interface gráfica, como a luminária de teste não foi instalada em um ponto de iluminação pública, devido a alguns fatores, como liberação para instalação durante o período de teste, a simulação de falhas que seria um problema, com base nisto ela foi instalada em laboratório e foi associada a um ponto de iluminação existente já cadastrado, de maneira que fosse possível acompanhar através do mapa o seu funcionamento. Durante o período que o sistema esteve em funcionamento, foi observada a situação real do ponto de iluminação e os valores coletados pelo sistema, que foram armazenados em um banco de dados para sua comparação. A Figura 21 apresenta a imagem do ponto de iluminação instalado e a identificação do status de operação naquele instante.

Figura 21 - Ponto de iluminação com o seu status identificado no sistema

Minera
Iluminação pública

Home | admin | Language | Settings | Sair

Cadastro | Atendimento | Fiscalização | Relatório | Gráfico | Sign Out

Search

Concentrador Mapa

Opções de pesquisa

Pesquisar por Município

Pesquisar por Bairro

Pesquisar por Endereço

Atualização automática

Localidade: *

Bairro: Endereço:

Pesquisar

INFORMAÇÕES DO PONTO:

Identificação: 000000003
 Grupos pertencente: 111
 Tipo de luminária: LED
 Potência da luminária: 120WTS
 Coordenadas: -16.719004, -43.879418

Dados do sensoriamento:
 i=1&t=1&gl=111&l=000000003&s1=1.029&s2=122&s3=1.014&s4=122&f=1
 Situação: Normal Fluxo luminoso=100%

Dimerização: 100% ENVIAR

i=1&t=2&gl=111&l=000000003&p1=255&f=1

1-A

INFORMAÇÕES DO PONTO:

Identificação: 000000003
 Grupos pertencente: 111
 Tipo de luminária: LED
 Potência da luminária: 120WTS
 Coordenadas: -16.719004, -43.879418

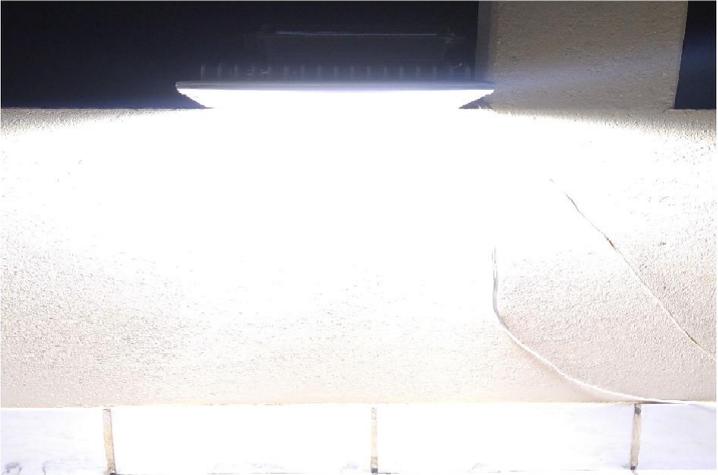
Dados do sensoriamento:
 i=1&t=1&gl=111&l=000000003&s1=1.029&s2=122&s3=1.014&s4=122&f=1
 Situação: Normal Fluxo luminoso=100%

Dimerização: 100% ENVIAR

i=1&t=2&gl=111&l=000000003&p1=255&f=1

1-B

1-C

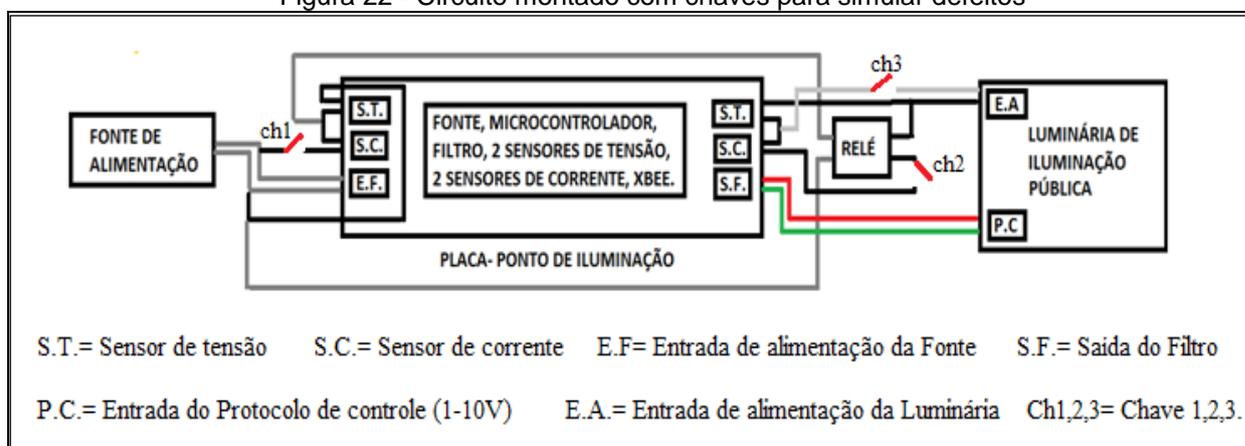


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Conforme pode ser observado na Figura 21, a luminária foi instalada em área externa, sendo possível observar que era o período noturno, momento este que a fotocélula identifica a baixa iluminância do local e ativa a luminária para que o ambiente tenha alta iluminância. A luminária foi instalada em área externa para uma melhor apresentação da diferença na imagem entre os níveis de dimerização. Também pode ser observado que o sistema realizou a leitura dos sensores, apresentando o funcionamento do ponto no determinado instante. Durante todo o período de teste, foi observado o funcionamento em vários instantes, simulando situações distintas em que a luminária deve permanecer acionada ou desligada. Ao confrontar esses dados com o banco de dados do sistema, verificou-se que em todas as situações as leituras dos sensores e a identificação do status de operação do sistema são equivalentes ao real e a comunicação ocorreu normalmente em todos os instantes.

Foram realizados testes em laboratório no qual foram simuladas algumas situações de problemas por meio de chaves que realizavam a abertura do circuito em determinadas partes do sistema. A Figura 22 apresenta essa ligação.

Figura 22 - Circuito montado com chaves para simular defeitos



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 22 apresenta a montagem em laboratório do circuito elétrico implementado com chaves para simular defeitos. De acordo com a abertura ou fechamento das chaves 1, 2 e 3, é possível simular várias situações do funcionamento do ponto de iluminação, como problema de alimentação, problema no relé, luminária com defeito, dentre outros. A Tabela 15 apresenta todas as possíveis simulações das situações com a identificação realizada pelo sistema.

Tabela 15 - Identificação realizada pelo sistema de acordo com as situações simuladas.

Chave 1	Chave 2	Chave 3	Situação real do sistema.	Situação identificada pelo sistema.
0	0	0	Situação não real, falta de alimentação.	Falta de alimentação.
0	0	1	Situação não real, falta de alimentação	Falta de alimentação.
0	1	0	Situação não real, falta de alimentação	Falta de alimentação.
0	1	1	Falta de alimentação	Falta de alimentação.
1	0	0	Situação não real, próximo ao problema de relé	Problema de relé
1	0	1	Problema de relé	Problema de relé
1	1	0	Luminária com defeito	Luminária com defeito
1	1	1	Funcionamento normal	Funcionamento normal

Org.: ALKMIM, 2018.

Na Tabela 15 o número 0 indica chave aberta e o número 1 indica chave fechada, podendo indicar as seguintes situações: caso a chave1 = 0 simule uma falha de alimentação do circuito, a chave1 = 1 seria uma situação normal de alimentação do circuito. A chave 2 = 0 simula um problema no relé que não está ativando e a chave 2 = 1 seria uma situação normal do relé acionado. A chave 3 = 0 simula uma falha na luminária e a chave 3 = 1 indica que a luminária está funcionando corretamente. Como é possível perceber em todas as situações simuladas, o sistema conseguiu identificar a situação ocorrida com a situação que seria real do ponto de iluminação.

O segundo teste realizado foi o de controle da intensidade luminosa da luminária através da interface gráfica. Nesse teste, foi utilizada a mesma estrutura da primeira parte do teste, que é um ponto de iluminação com a placa desenvolvida, um concentrador e um computador para acessar a interface. Nesse teste, foram selecionados vários níveis de dimerização no ponto de iluminação e foi verificada a atuação dessas alterações. A Figura 23 demonstra algumas dimerizações realizadas.

Figura 23 - Imagem dos valores de dimerização na interface e o ponto de iluminação



1-A



2-A

X

INFORMAÇÕES DO PONTO:

Identificação: 000000003
 Grupos pertencente: 111
 Tipo de luminária: LED
 Potência da luminária: 120WTS
 Coordenadas: -16.719004, -43.879418

Dados do sensoriamento:
i=1&t=1&gl=111&l=000000003&s1=0.141&s2=122&s3=0.102&s4=122&f=1
 Situação: Normal Fluxo luminoso=10%

Dimerização:

10%
ENVIAR

i=1&t=2&gl=111&l=000000003&p1=026&f=1

1-B

X

INFORMAÇÕES DO PONTO:

Identificação: 000000003
 Grupos pertencente: 111
 Tipo de luminária: LED
 Potência da luminária: 120WTS
 Coordenadas: -16.719004, -43.879418

Dados do sensoriamento:
i=1&t=1&gl=111&l=000000003&s1=0.522&s2=122&s3=0.514&s4=122&f=1
 Situação: Normal Fluxo luminoso=50%

Dimerização:

50%
ENVIAR

i=1&t=2&gl=111&l=000000003&p1=128&f=1

2-B

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 23 apresenta algumas das dimerizações realizadas durante os testes. Essa imagem apresenta a dimerização de 10% nas figuras 1A e 1B que corresponde ao ponto de iluminação e a identificação realizada pelo sistema respectivamente, e as figuras 2A e 2B que corresponde ao ponto de iluminação e a identificação realizada pelo sistema respectivamente em 50%. Na imagem, é possível perceber a diferença na iluminação do ponto de acordo com o valor de dimerização selecionado. Foi realizada também a dimerização em vários outros níveis da escala de 10% a 100% e foi possível perceber que, quando o valor da dimerização é variado para valores próximos ao estado anterior, não é possível identificar essa diferença a olho nu. Nesse teste, a comunicação também ocorreu normalmente sem falhas.

Como em algumas variações da dimerização, não era tão perceptível às alterações na iluminação pelas imagens da câmera. Como forma de complementação dos resultados, foi realizada a medida de luminância variando a dimerização e também a distância entre a luminária e o aparelho luxímetro. Segundo a Cemig (2012), a luminância corresponde ao fluxo luminoso incidente sobre uma determinada área. Foi utilizado para medir a luminância o luxímetro digital Minipa modelo MLM-1020, utilizando o lux como unidade de medida, que é usado pelo sistema internacional de medidas, sendo este o padrão utilizado em normas e projetos. A Figura 24 apresenta o procedimento realizado para realizar as medidas. O teste foi realizado em período noturno, sem interferência de outras fontes de luz. Observou-se que em todos os pontos do ambiente em que foi realizado o teste, quando a luminária estava desligada, o luxímetro apresentava a medida em 0 lux.

Figura 24 - Procedimento para realizar medidas de iluminância



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme pode ser observada na figura 24, a luminária foi fixada em uma mesa com altura de 76 centímetros do solo, e o luxímetro também foi fixado em outra mesa de mesma altura com o seu sensor direcionado a luminária. Foram registradas as medidas de luminância com a luminária dimerizada nos seguintes valores: 10%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 75%, 80%, 90%, 100%. Registrando as variações também em função da distância entre a luminária e o luxímetro, deslocando a mesa com o luxímetro nas distâncias entre 1 metro e 8 metros, realizando as medidas a cada variação de metro. A Tabela 16 apresenta as medidas realizadas em Lux, através desta é possível observar a redução da medida de luminância em função da distância da luminária a um determinado ponto.

Tabela 16 – Medidas de iluminância em lux de acordo com a distância entre o luxímetro e a luminária.

	1 Metro	2 Metros	3 Metros	4 Metros	5 Metros	6 Metros	7 Metros	8 Metros
10%	322.0	125.4	69.1	48.0	33.7	23.8	17.48	13.12
20%	762.0	259.0	142.0	98.0	68.5	51.3	35.2	28.0
25%	992.0	331.0	181.7	128.0	87.4	63.0	46.0	34.3
30%	1262.0	392.0	217.0	154.6	106.0	75.9	53.4	40.8
40%	1495.0	528.0	292.0	200.0	140.0	98.5	70.8	54.3
50%	1940.0	651.0	357.0	246.0	172.4	120.9	88.4	66.0
60%	2360.0	782.0	431.0	295.0	209.0	143.3	106.3	79.3
70%	2800.0	902.0	510.0	344.0	241.0	167.4	121.6	90.7
75%	2980.0	986.0	521.0	366.0	255.0	177.1	130.3	96.6
80%	3240.0	1039.0	571.0	386.0	270.0	188.0	137.2	102.5
90%	3420.0	1112.0	613.0	422.0	296.0	208.0	150.5	113.3
100%	3420.0	1112.0	613.0	422.0	296.0	208.0	150.8	113.3

Org.: ALKMIM, 2018.

As medidas foram realizadas até a distância máxima de 8 metros devido ao fato de que essa é a distância que deve existir entre a luminária pública e o solo, para as vias classificadas como v4 e v3 e para vias v5 a distância é de 7 metros, parâmetros estes estabelecidos pela norma NBR 5101 de 2012 da ABNT. Essas classificações de vias são destinadas as vias locais e coletoras de médio e leve tráfego, locais estes em que se encontram grande número de pontos de iluminação pública.

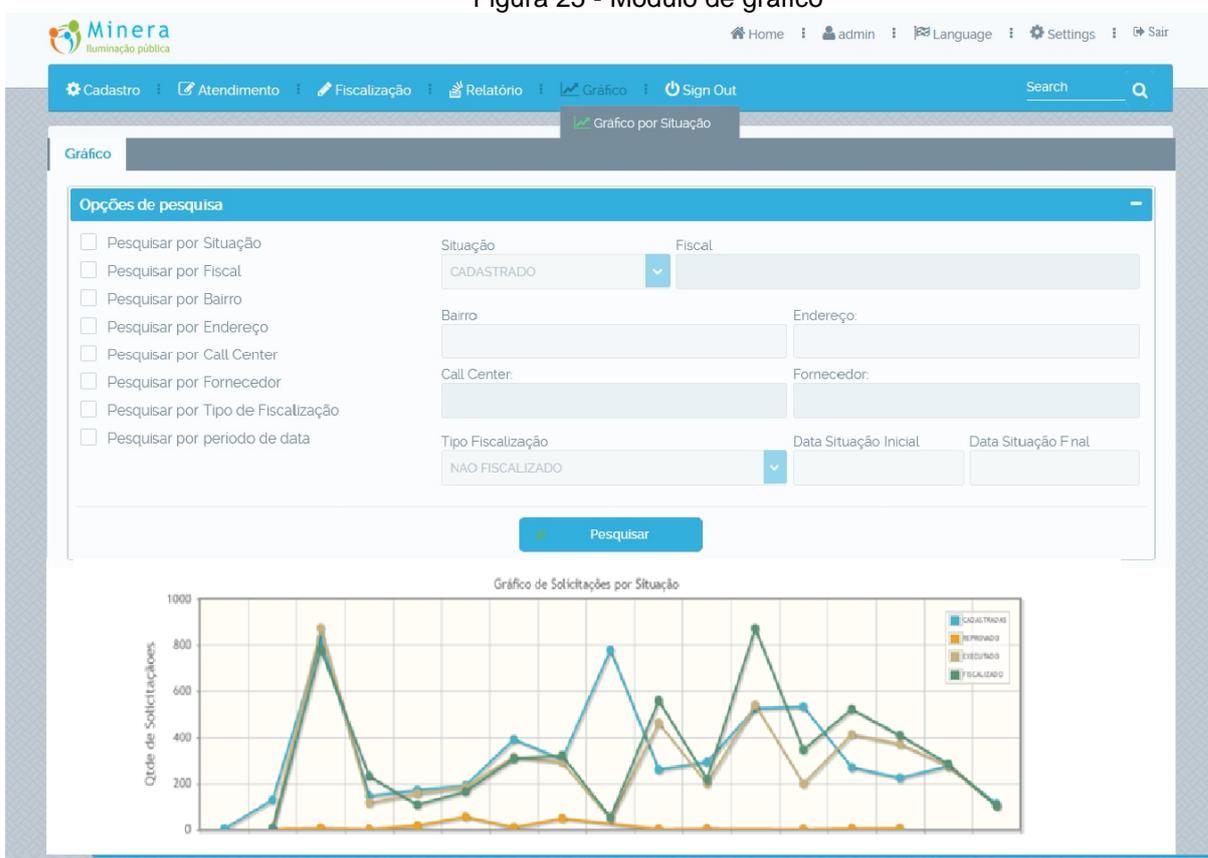
E, por último, foram testadas todas as funções existentes na interface gráfica que serão tratadas a seguir: a primeira funcionalidade foi o de controle de acesso ao sistema, de acordo com o usuário. O sistema gera níveis de acesso diferentes das aplicações de acordo com o usuário, que pode ser: o gestor da iluminação pública que tem acesso a todas as funcionalidades; o fiscal de iluminação que tem acesso às manutenções, ao acompanhamento do modo de operação dos pontos, ao cadastro dos pontos de iluminações e às reclamações registradas; os eletricitas que tem acesso às manutenções a serem realizadas, ao registro de falhas em pontos de iluminação e ao cadastro do ponto de iluminação; e os operadores da central de atendimento que tem acesso apenas ao registro de falhas na iluminação. O sistema respondeu bem a filtragem do acesso de acordo com os usuários. Foram testados também o cadastro e exclusão de usuários no sistema, estabelecendo os seus níveis de acesso de acordo com a função exercida, funcionando sem erros.

O próximo módulo verificado foi o de atendimento, que serve para a realização do cadastro de solicitações de manutenções pela população através do serviço telefônico da central de atendimento. Esse módulo foi implementado porque inúmeros municípios ainda se encontram no processo de transição de outros tipos de lâmpadas pelas de LED, então o sistema foi desenvolvido para ser implementando de acordo com o atual quadro da iluminação pública brasileira. Como a ideia inicial do trabalho era o desenvolvimento de placas de monitoramento apenas para luminárias de LED, estas então não seriam instaladas nos pontos com outros tipos de lâmpadas, necessitando do serviço de Call Center para notificações de falhas desses pontos. O cadastro conta com a localização que, ao ser escrita, aparece no mapa com a marcação da localização, o tipo de problema apontado e a identificação da pessoa que fez o pedido de manutenção. Outro módulo testado é o de fiscalização, que tem como função o cadastramento das fiscalizações realizadas nos pontos de iluminação. São adicionadas informações dos serviços realizados, se o serviço foi aprovado ou reprovado, sua descrição, se o problema foi resolvido, e como foi selecionado o ponto para fiscalização.

O módulo relatório tem várias funções implementadas em si. A primeira delas é a de acompanhamento das ordens de serviço, que podem se encontrar nas seguintes situações: as que estão em aberto para realizar a manutenção, as que estão sendo executadas as manutenções e as que já foram realizadas a manutenção, sendo possível verificar no mapa a localização desses serviços. Na

última funcionalidade (pesquisar pontos IP), há vários filtros de conteúdo no qual é possível procurar os pontos de iluminação no mapa por meio de um dos seguintes termos: número de identificação, localização, endereço, bairro, região, tipo de luminária, potência da lâmpada, tipo de braço, tipo de relé, tipo de poste, data de cadastro, status de operação. Em pontos IP mapa é possível visualizar o status de operação de todos os pontos de iluminação ou individualmente, os pontos são identificados com marcadores em 4 (quatro) cores: verde significa que o ponto está funcionando normalmente e sem falhas, vermelho indica que o ponto de iluminação se encontra com falha, amarelo indica problema de comunicação no ponto, roxo indica que é um concentrador. Caso o ponto de iluminação esteja com falha, ao clicar nele é possível visualizar a falha identificada pelo sistema. E a última aba desse módulo corresponde a telegestão, onde é possível controlar a luminosidade dos pontos de iluminação individualmente, por grupos ou todos os pontos. Os grupos de luminárias selecionadas podem ser de acordo com o bairro, região, tipo de luminária, potência da lâmpada. A Figura 25 apresenta o último módulo que é o de gráficos.

Figura 25 - Módulo de gráfico



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Quando o sistema identifica falhas no ponto de iluminação, elas são registradas para auxiliar na gestão do parque de iluminação, estes são atualizados em diversas funcionalidades como os gráficos. Conforme pode ser observado na Figura 25, neste módulo é possível a visualização de vários indicadores que podem ser filtrados de diversas maneiras, como as solicitações por bairros para identificar os que contam com maior número de manutenções, as solicitações por data de forma que seja possível identificar o número de solicitações em um determinado período e seus desdobramentos, a situação das solicitações podendo ser observada a quantidade de pontos que estão com falhas necessitando de manutenção e quantidade daqueles que já foram reparados, as solicitações realizadas pelos fiscais para observar os seus respectivos desempenho, entre outros tipos de filtros. Conforme pode ser observado, o sistema apresentou um bom funcionamento de todas as funções implementadas.

Discussão dos resultados e Considerações finais

A iluminação pública cada vez mais tem contribuído para a qualidade de vida da população em diversos aspectos, como na segurança, proporcionando uma maior visibilidade de todas as ações que estão acontecendo naquele local, valorização e embelezamento de espaços e monumentos, aumento do aproveitamento das áreas de lazer, entre outros fatores, aspectos estes que reforçam a importância social de investimentos em novas tecnologias nessa área. É importante lembrar que a implementação deste trabalho ainda pode contribuir com outros fatores, como a melhoria na qualidade do serviço prestado à população, sendo identificados de maneira rápida os problemas nos pontos de iluminação para que sejam solucionados rapidamente; a contribuição ambiental, visto que a partir do sistema de controle é possível a redução do consumo energético; e também a contribuição com sistema elétrico brasileiro nos períodos de ponta, através da dimerização das luminárias para que o consumo do parque de iluminação seja reduzido.

A operação do sistema de forma remota através do acesso de uma página web traz melhorias para o método convencional, permitindo que seja acompanhado o funcionamento do parque de iluminação praticamente em tempo real por meio de qualquer dispositivo com acesso a internet, além de trazer benefícios, como o cadastramento de pontos de iluminação, acompanhamento dos serviços de manutenção, entre outros. Os principais resultados obtidos foram as medidas realizadas pelos sensores e enviadas a interface, assim como o controle dos pontos de iluminação e o sistema funcionando de um modo geral. O teste do sistema mostrou a capacidade de integração, conectando a interface na web com as placas instaladas nos pontos de iluminação para que o controle e monitoramento sejam realizados de forma eficaz.

Ao analisar o trabalho, é possível perceber que os objetivos da pesquisa foram alcançados. O primeiro objetivo consistia no levantamento bibliográfico sobre os temas que ajudariam no desenvolvimento da atividade, que foi realizada através de pesquisas em trabalhos publicados e livros sobre as temáticas. O segundo objetivo tratava em desenvolver o hardware e a programação das placas que foram instaladas nos pontos de iluminação para seu controle e monitoramento, por meio das leituras de sensores. Primeiramente, foi implementado um filtro com ganho de 2 (duas) vezes para um sinal PWM de 0 a 5 volts no qual atuou de forma a produzir

uma saída de 0 a 10 volts com oscilações ou erro máximo de aproximadamente 6% acima do valor ideal, que é um valor aceitável devido ao olho humano não ter uma percepção apurada para perceber as variações ocasionadas pelas mudanças dos valores de saída na dimerização. A parte de monitoramento também apresentou ótimos resultados, os sensores de corrente apresentaram um resultado próximo ao esperado com uma pequena alteração média nas leituras e um pequeno erro máximo nas leituras que não excede a 0,219A. Sobre os sensores de tensão, foi observado o valor de tensão de saída quando aplicadas as tensões próximas de 127 volts e 220volts. Com base nos valores, foi possível encontrar uma equação para relacioná-los. Com esse método, o sensor de tensão apresentou um erro máximo na leitura de 5% do valor original do sinal.

O terceiro objetivo tratava de realizar a configuração das placas de comunicação sem fio. Para concretização desse objetivo, foram utilizadas as placas de comunicação sem fio *xbee S2C* configurados com a rede *mesh*, porque ela apresentava um melhor comportamento entre as topologias possíveis. Por meio de testes realizados em diversos cenários simulando situações que poderiam ocorrer em um parque de iluminação pública, foi possível observar que a rede *mesh* se comportou conforme o esperado e que nas diversas situações simuladas a placa atendeu aos requisitos de se comunicar de forma direta e sem barreiras, segundo a norma da Cemig, a distância média entre postes é de 40 metros. De acordo com esse dado, é possível observar que até dois pontos próximos podem falhar e ainda assim o ponto de iluminação se comunica de forma direta com o terceiro. Nos testes também foi possível observar a forte influência que as barreiras exercem sobre a distância de comunicação, caso seja necessário instalar o equipamento em ambientes que sofram interferência de barreiras e o radio utilizado não atenda a demanda, é recomendado a substituição por rádios de comunicação de maior alcance.

O quarto objetivo versava desenvolver o hardware e a programação das placas concentradoras, que são responsáveis por conectar os pontos de iluminação à interface. As placas concentradoras foram desenvolvidas através de uma combinação de duas tecnologias: *Zigbee*, para se conectar aos pontos de iluminação, e a tecnologia *Ethernet*, para se conectar à interface gráfica. Com essa placa foi possível realizar a comunicação nos dois sentidos: do ponto de iluminação, enviando as leituras dos sensores até chegar à interface, e também o comando para

dimerizar os pontos de iluminação partindo da interface para os pontos de iluminação.

O último objetivo específico tratava em desenvolver a interface gráfica do sistema, que foi implementada em parceria com a empresa Minera Sistemas e contou com várias funcionalidades que foram testadas. Os resultados demonstraram um ótimo funcionamento, entre eles podem ser citados o cadastramento da localização e dos materiais utilizados, sendo possível uma descrição dos pontos de iluminação; o módulo para acompanhamento do modo de operação de cada luminária, sendo identificadas por cores diferentes as formas distintas de funcionamento e tipos de dispositivos, como: operando normalmente, ponto com falha, ponto de iluminação, e concentradores; o sistema de controle que permite a dimerização das luminárias na faixa de 10% a 100%, sendo possível controlar as luminárias individualmente, em grupos ou todas as luminárias; os sistemas de relatórios do funcionamento, materiais trocados, números de serviços realizados, tempo gasto nos serviços, custo de manutenção, entre outros; e o módulo de manutenção que permite visualizar como está sendo realizada a manutenção, acompanhamento das equipes, abertura de ordens de serviços. Todas essas características foram testadas e funcionaram de acordo com o requerido.

A concretude dos objetivos específicos permitiu atingir o objetivo geral que consistia em desenvolver um sistema de gestão que controle e monitore os pontos de iluminação pública com luminárias de LED utilizando a comunicação sem fio e rede *mesh* para comunicação entre os pontos de iluminação.

A partir da observação dos dados, é possível verificar que o equipamento atendeu a todos os requisitos necessários com boas respostas, o que demonstra a viabilidade de sua aplicação. Então, o sistema desenvolvido poderá auxiliar na gestão da iluminação pública de diversos municípios, que em sua maioria não utiliza um sistema capaz de identificar o funcionamento ou mesmo controlar o parque de iluminação pública. No modelo atual, essa identificação de pontos defeituosos só ocorre quando a própria população entra em contato com os responsáveis solicitando o reparo, o que pode demorar um longo tempo devido ao serviço de atendimento, na maioria dos casos, funcionar somente durante o horário comercial. Com a utilização desse sistema, os gestores responsáveis pela iluminação pública contam com um conjunto de ferramentas em apenas um sistema, e esses gestores poderão acompanhar em tempo hábil o funcionamento de toda a iluminação do

município, para que sejam tomadas medidas para melhorar a eficiência do serviço de iluminação pública, o que pode agregar um melhor serviço prestado à população e uma possível redução dos custos com a iluminação pela diminuição das equipes de Call Center, pois o sistema identifica as falhas automaticamente e possibilita monitorar as equipes de manutenções.

Como pode ser observado, houve êxito no desenvolvimento do trabalho, pois os objetivos foram alcançados, foi implementada uma solução que atende a proposta inicial. A solução se mostrou abrangente, pois o monitoramento dos pontos de iluminação se aplica a vários tipos de lâmpadas, com facilidade na instalação, e não necessitando a abertura da luminária para instalação do dispositivo, o que poderia gerar perda de garantia. Outro aspecto importante é que o sistema pode ser utilizado em outros ambientes, como estacionamentos, pátios, condomínios etc.

Portanto, o trabalho alcançou os seus objetivos de forma satisfatória. Tendo em vista que a temática é ampla, algumas implementações podem ser realizadas em estudos futuros para sofisticar ainda mais a solução. Sugere-se como exemplos:

- Desenvolver uma placa com sensores precisos capazes de atuar de acordo com as normas vigentes, como um medidor de consumo elétrico dos pontos de iluminação, para que, ao ser instalado um sistema de controle nas luminárias, as prefeituras possam requerer a revisão do consumo elétrico do parque de iluminação;
- Desenvolver um estudo focado na segurança da rede e, caso seja necessária a implementação de mais medidas de segurança, verificando a viabilidade de implementação através de circuitos que usam o *block-chain*;
- Estudo e implementação de outros serviços que podem ser acoplados ao sistema, como monitoramento da rede elétrica, sistema de medição de consumo elétrico nas residências, sendo possível realizar também remotamente o ligamento e desligamento do fornecimento de energia;
- Integrar um sistema de gestão de estoque: permite o cadastramento de estoque de peças com suas quantidades, cadastramento de estoque mínimo e alarme quando as peças ficam abaixo do estoque mínimo;

- Desenvolvimento de um módulo de manutenção que seja capaz de traçar as melhores rotas dos pontos de iluminação defeituosos, apresentando todo o material necessário para manutenção dos pontos da rota apresentada.

Referências

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Iluminação pública — Procedimento, NBR 5101 de 2012**. Acesso em 22/08/2017. Disponível em:
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjLiZW00ZPdAhVlGpAKHZc7C_MQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fpaginapessoal.utfpr.edu.br%2Fvilmair%2Fengenharia-de-iluminacao%2FNBR5101%2520-%2520Arquivo%2520para%2520impressao.pdf%2Fat_download%2Ffile&usg=AOvVaw1gDIGuRULupxS9lxVTIOPn>.
- AGOSTINI JUNIOR, Eloi. **Estudo e implementação de uma estrutura para a alimentação de leds de potência com o controle da cor e da intensidade luminosa**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Mestrado em Engenharia Elétrica. Florianópolis, 2008. Acesso em 25/08/2017. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/91933/258003.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- ANEEL - Agência nacional de energia elétrica. **Resolução normativa nº414/2010**. Acesso em 08/03/2017. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>.
- BELLIDO-OUTEIRIÑO, Francisco José; QUILES-LATORRE, Francisco Javier; MORENO-MORENO, Carlos Diego; FLORES-ARIAS, José María; MORENO-GARCÍA, Isabel; ORTIZ-LÓPEZ, Manuel. Streetlight Control System Based on Wireless Communication over DALI Protocol. In: **Revista Sensors**, 2016. Acesso em 29/06/2017. Disponível em:
<<http://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/597/htm>>.
- BLEY, Francis Bergmann. LEDs versus Lâmpadas Convencionais Viabilizando a troca. In: **Revista especialize on-line**, Maio 2012. Acesso em 28/07/2017. Disponível em:
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjO2JjYnJXdAhUHQpAKHV4vAssQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ipog.edu.br%2Fdownload-arquivo-site.sp%3Farquivo%3Dleds-versus-lampadas-convencionais-1443176.pdf&usg=AOvVaw1_tl-sB7XUjdp_iOPbROoA>.
- CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais. **Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas , ND-3.1**. Belo Horizonte. Janeiro-2014. Acesso em 29/06/2017. Disponível em:<http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas%20T%C3%A9cnicas/nd3_1_000001p.pdf>
- CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais. **Manual de Distribuição: Projetos de Iluminação Pública, ND-3.4**. Belo Horizonte. Novembro – 2012. Acesso em 23/05/2017. Disponível em:<<http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/documents/nd-3-4p.pdf>>.
- COPEL- Companhia Paranaense de Energia- Distribuição. **Manual de iluminação pública. Paraná**, 2012. Acesso em 03/08/2017. Disponível em:
<https://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%E7%E3o%20P%FAblica/Manuais/manual_de_iluminacao_publica_copel_companhia_paranaense_de_energia.pdf>.
- COSTA, Henrique. **Plataforma Inteligente para sistemas de iluminação pública**, 2013. Dissertação. Universidade de Aveiro. Departamento de Eletrônica, telecomunicações e Informática. 2013.

COURAS, Ivan Maurício Marques Valente. **Gestão Técnica de Edifícios:** Aplicação em Edifício Escolar. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dissertação Mestrado em Engenharia Electrotécnica Sistemas Eléctricos de Energia. 2011.

DIAS, Kelvin Lopes; SADOK, Djamel Fauzi Hadj. **Internet Móvel: Tecnologias, Aplicações e QoS.** Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco. (s/d). Acesso em 19/06/2017. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/3737704/artigo_mobinternet.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1530494804&Signature=RsJxamdHHfizb0PV454iCsdIjok%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DInternet_movel_tecnologias_aplicacoes_e.pdf>.

DIGI. **XBee/XBee-PRO S2C:** Zigbee RFModule. 2018. Acesso em 05/02/2017. Disponível em: <<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002002.pdf>>

DYBLE, Marc; NARENDRAN, Nadarajah; BIERMAN, Andrew; KLEIN, Terence. **Impact of Dimming White LEDs:** Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods. Fifth International Conference on Solid State Lighting, (14 September 2005); Acesso em 26/06/2017. Disponível em: <https://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/Impact_of_Dimming_white_LEDs.pdf>.

FALUDI, R. **Building Wireless Sensors Networks.** Sebastopol: O'Reilly. 2011.

FOROUZAN, Behrouz A; MOSHARRAF, Firouz. **Redes de Computadores:** Uma abordagem top-down. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GALLO, Michael . A; HANCOCK, William. M. **Comunicação entre Computadores e Tecnologias de Redes.** Ed. Pioneira Thomson Learning, 2003.

GSMA, **Roaming** (2018). Acesso em 05/03/2018. Disponível em: <<https://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/roaming>>.

HALL, R. E., BOWERMAN, B., BRAVERMAN, J., Taylor, J., Todosow, H., & von Wimmersperg, U. **The vision of a smart city.** In: Proceedings of the 2nd International Life Extension Technology Workshop, 2000. Acesso em 13/07/2017. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/773961-oyxp82/webviewable/773961.pdf>> .

IEC 60929 **INTERNATIONAL STANDARD. AC-supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps– Performance requirements.** 2006). Acesso em 25/10/2017. Disponível em: <<http://jnhb.fszjzx.com/upload/biaozhun/pdf/IEC60929Y2006.PDF>>.

KANTER, R. M.; LITOW, S. S. **Informed and interconnected: A manifesto for smarter cities.** Harvard Business School General Management Unit Working Paper 09-141, 2009. Acesso em 15/11/2017. Disponível em: <http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1420236>.

KUROSE, James F; ROSS, Keith W. **Redes de computadores e a internet:** uma abordagem top-down. 3^o edição. Pearson. 2006.

LEE, Jin-Shyan. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. In: **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, Vol. 52, No. 3, p: 742-749. Agosto de 2006.

LUCIA, Felipe Lorenzo Della. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA ATRAVÉS DE REDES DE SENSORES E ATUADORES SEM FIO**. Tese de Doutorado, Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. 2014.

MASCARÓ, Lucia. **A iluminação do espaço urbano**. Porto Alegre:UFRGS, 2006. Acesso em 20/06/2017. Disponível em:
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/22227/000564845.pdf?sequence=1>>.

MCKINSEY. **Lighting the way**: Perspectives on the global lighting market, 2° ed.2012. Acesso em 14/01/2018, disponível em:
<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/lighting_the_way_perspectives_on_global_lighting_market_2012.ashx>.

MONK, Simon. **Programação Com Arduino: Começando Com Sketches**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

OLIVEIRA, Henrique Quatrin. **Estudo preliminar de um sistema gerenciável de iluminação fluorescente tubular combinado com a iluminação natural para redução do consumo de energia elétrica**. Universidade Federal de Santa Maria. Curso de pós - graduação em eficiência energética aplicada aos processos produtivos. 2014. Acesso em 19/05/2017. Disponível em:
<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1361/Oliveira_Henrique_Quatrin.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

OPPENHEIM, Alan V; Schafer, R.W. **Discrete-Time Signal Processing**. Prentice Hall, 1999.

PADUA, Fabiano João Leoncio de. **Alocação de modem PLC utilizando SNR em uma rede elétrica de baixa tensão**, 2014. Tese, Pós-graduação em Engenharia Elétrica-UNESP, Ilha solteira. Acesso em 13/07/2017, disponível em:
<<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/123359/000825256.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

PETERSON, Larry L; DAVIE, Bruce S. **Redes de computadores: uma abordagem de sistemas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

ROSITO, Luciano Haas. **DESENVOLVIMENTO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL**, Revista: O setor Elétrico, 2009. Acesso em 12/05/2017. Disponível em:
<https://www.fne.org.br/upload/documentos/projetos/iluminacao-publica/desenvolvimento_i_p_no_brasil_-_luciano_haas_rosito.pdf>.

SALEIRO, Mário; EY, Emanuel. **ZigBee: Uma abordagem prática**. Universidade do Algarve. Portugal.(s/d).

SALES, Roberto Pereira. **LED, o novo paradigma da iluminação pública**. (2011). Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia . Acesso em 13/06/2017. Disponível em:
<<http://sistemas.institutoslactec.org.br/mestrado/dissertacoes/arquivos/RobertoSales.pdf>>

SANTOS, Cristiana Raquel Aragão. **Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética**. Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011. Acesso em 15/07/2017. Disponível em:
<<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61677/1/000148456.pdf>>

SCOPACASA, Vicente. Capítulo IX Gerenciamento elétrico – Drivers. In: **Revista o setor elétrico**. (2016). Acesso em 12/06/2017. Disponível em:
<http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/ed-128_Fasciculo_Cap-IX-LED-Evolucao-e-inovacao.pdf >

SOUSA, Lindeberg Barros de. **Redes de Computadores**: dados, voz e imagem. São Paulo: Editora Érica. 1999.

STALLINGS, William. **Redes e sistemas de comunicação de dados**: teoria e aplicações corporativas. Rio de Janeiro: Editora Campus (Elsevier), 2005.

STRAPAZZON, Carlos Luiz. Convergência tecnológica nas políticas urbanas:pequenas e médias “cidades inteligentes”. In: **Revista juridical Unicuritiba** v. 22, n. 6 (2009).

USMAN, Ahmad; SHAMI, Sajjad Haider. Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications. In: **Renewable and Sustainable Energy, Reviews** = 19. (2013). Acesso em 07/04/2017. Disponível em:<www.elsevier.com/locate/rser>.

XAVIER JUNIOR, Sergei Luiz. **Análise de viabilidade da utilização do protocolo dali em projetos de eficiência energética**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.Porto Alegre, 2011. Acesso em 10/07/2017. Disponível em:
<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/33109/000787176.pdf?sequence=1>>

YNOGUTI, Carlos Alberto. **Processamento Digital de Sinais**: Introdução aos Filtros Digitais. Instituto Nacional de telecomunicações (INATEL). Santa Rita do Sapucaí. (S/d).

ZACKER, Craig; DOYLE, Paul. **Redes de computadores**: configuração, manutenção e expansão. São Paulo: Makron Books, 2000.

ANEXOS

Tabela 8 – Valores de entrada e saída do filtro

Valores de entrada do filtro.	de no	Valores de saída do filtro.	de do	Valores de entrada do filtro.	de no	Valores de saída do filtro.	de do	Valores de entrada do filtro.	de no	Valores de saída do filtro.	de do
0,00		0,01		1,76		3,53		3,52		7,16	
0,10		0,21		1,85		3,74		3,61		7,29	
0,20		0,40		1,95		3,96		3,71		7,88	
0,29		0,59		2,05		4,15		3,81		7,74	
0,39		0,79		2,15		4,31		3,91		7,98	
0,49		0,98		2,25		4,55		4,00		8,16	
0,59		1,18		2,34		4,80		4,10		8,43	
0,69		1,37		2,44		4,95		4,20		8,69	
0,78		1,56		2,54		5,28		4,30		8,89	
0,88		1,76		2,64		5,37		4,40		9,07	
0,98		1,95		2,74		5,55		4,49		9,26	
1,08		2,15		2,83		5,84		4,59		9,38	
1,17		2,34		2,93		6,03		4,69		9,81	
1,27		2,55		3,03		6,28		4,79		10,03	
1,37		2,73		3,13		6,45		4,88		10,16	
1,46		2,93		3,22		6,73		4,98		10,30	
1,56		3,13		3,32		6,96					
1,66		3,32		3,42		7,03					

Org.: ALKMIM, 2018.

Tabela 9 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do sensor, utilizando o módulo sensor de corrente no teste.

Leitura de corrente em Ampères realizada pelo alicate amperímetro.	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente.	Diferença em Ampères entre a leitura do alicate amperímetro e a leitura do sensor de corrente.
0	0,117	- 0,117
0	0,118	- 0,118
0,04	0,153	- 0,113
0,06	0,141	- 0,081
0,07	0,166	- 0,096
0,11	0,212	- 0,102
0,12	0,22	- 0,1
0,13	0,225	- 0,095
0,15	0,264	- 0,114
0,15	0,191	- 0,041
0,16	0,264	- 0,104
0,18	0,3	- 0,12
0,21	0,34	- 0,13
0,26	0,26	0
0,29	0,437	- 0,147
0,3	0,438	- 0,138
0,32	0,322	- 0,002
0,34	0,486	- 0,146
0,35	0,32	+ 0,03
0,36	0,337	+ 0,023
0,41	0,383	+ 0,027
0,48	0,458	+ 0,022
0,51	0,49	+ 0,02
0,57	0,56	+ 0,01
0,6	0,508	+ 0,092
0,63	0,64	- 0,01
0,66	0,545	+ 0,115
0,72	0,612	+ 0,108
0,75	0,636	+ 0,114
0,82	0,712	+ 0,108
0,86	0,864	- 0,004
0,93	0,763	+ 0,167
1	0,83	+ 0,17
1,09	0,895	+ 0,195
1,21	0,977	+ 0,233
1,32	1,083	+ 0,237
1,32	1,052	+ 0,268
1,33	1,148	+ 0,182
1,43	1,153	+ 0,277
1,46	1,130	+ 0,33
1,55	1,254	+ 0,296
1,68	1,321	+ 0,359
1,72	1,356	+ 0,364
1,82	1,463	+ 0,357
2,02	1,571	+ 0,449
2,15	1,715	+ 0,435
2,27	1,795	+ 0,475

2,48	2,042	+ 0,438
2,53	2,011	+ 0,519
2,75	2,240	+ 0,51
2,9	2,330	+ 0,57
2,97	2,417	+ 0,553
3,37	2,600	+ 0,77
3,55	2,868	+ 0,682
3,93	3,051	+ 0,879
4,17	3,211	+ 0,959
4,17	3,370	+ 0,8
4,43	3,488	+ 0,942
4,45	3,500	+ 0,95
4,68	3,628	+ 1,052
4,70	3,640	+ 1,06

Org.: ALKMIM, 2018.

Tabela 10 – Resposta ao utilizar as equações para aproximar as leituras do módulo ao valor do alicate amperímetro.

Leitura de corrente em Ampères realizada pelo alicate amperímetro.	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente. (sem equacionamento)	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente. (com equação linear($y=1,3208x - 0,1417$))	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente. (com equação polinomial ($y=-0,0134x^2 + 1,3663x - 0,1609$))	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente. (com equação polinomial ($y=0,014x^3 - 0,0869x^2 + 1,4616x - 0,1841$))	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente. (com equação polinomial ($y=0,0145x^4 - 0,0888x^3 + 0,141x^2 + 1,2932x - 0,1556$))	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente. (com equação polinomial ($y=-0,0157x^5 + 0,1552x^4 - 0,5313x^3 + 0,7213x^2 + 1,0031x - 0,1178$))
0	0,117	0,013	-0,007	-0,014	-0,003	0,009
0	0,118	0,014	-0,005	-0,013	-0,001	0,010
0,04	0,153	0,060	-0,004	0,038	0,045	0,051
0,06	0,141	0,045	-0,003	0,020	0,029	0,037
0,07	0,166	0,078	-0,001	0,056	0,063	0,066
0,11	0,212	0,138	0,000	0,122	0,124	0,123
0,12	0,22	0,149	0,048	0,133	0,135	0,132
0,13	0,225	0,155	0,031	0,141	0,142	0,139
0,15	0,264	0,207	0,066	0,196	0,194	0,188
0,15	0,191	0,111	0,128	0,092	0,096	0,097
0,16	0,264	0,207	0,139	0,196	0,194	0,188
0,18	0,3	0,255	0,146	0,247	0,243	0,235
0,21	0,34	0,307	0,199	0,303	0,297	0,288
0,26	0,26	0,202	0,100	0,190	0,189	0,183
0,29	0,437	0,435	0,199	0,439	0,430	0,419
0,3	0,438	0,437	0,248	0,441	0,431	0,421
0,32	0,322	0,284	0,302	0,278	0,273	0,264
0,34	0,486	0,500	0,193	0,507	0,497	0,487
0,35	0,32	0,281	0,434	0,275	0,270	0,261
0,36	0,337	0,303	0,435	0,299	0,293	0,284
0,41	0,383	0,364	0,278	0,364	0,356	0,346
0,48	0,458	0,463	0,500	0,468	0,458	0,448
0,51	0,49	0,505	0,275	0,513	0,502	0,493
0,57	0,56	0,598	0,298	0,610	0,599	0,591
0,6	0,508	0,529	0,360	0,538	0,527	0,518
0,63	0,64	0,704	0,462	0,719	0,709	0,705
0,66	0,545	0,578	0,505	0,589	0,578	0,570
0,72	0,612	0,667	0,600	0,681	0,670	0,665
0,75	0,636	0,698	0,530	0,714	0,703	0,699
0,82	0,712	0,799	0,708	0,818	0,808	0,807
0,86	0,864	0,999	0,580	1,023	1,018	1,024
0,93	0,763	0,866	0,670	0,887	0,879	0,880
1	0,83	0,955	0,703	0,977	0,971	0,975
1,09	0,895	1,040	0,805	1,064	1,060	1,067

1,21	0,977	1,149	1,010	1,174	1,173	1,183
1,32	1,083	1,289	0,874	1,315	1,317	1,330
1,32	1,052	1,248	0,964	1,274	1,275	1,287
1,33	1,148	1,375	1,051	1,400	1,406	1,419
1,43	1,153	1,381	1,161	1,407	1,412	1,426
1,46	1,130	1,351	1,303	1,377	1,381	1,394
1,55	1,254	1,515	1,262	1,540	1,549	1,562
1,68	1,321	1,603	1,390	1,627	1,638	1,651
1,72	1,356	1,649	1,397	1,673	1,685	1,697
1,82	1,463	1,791	1,366	1,812	1,827	1,836
2,02	1,571	1,933	1,531	1,952	1,968	1,973
2,15	1,715	2,123	1,621	2,138	2,154	2,154
2,27	1,795	2,229	1,667	2,240	2,257	2,253
2,48	2,042	2,555	1,809	2,557	2,569	2,555
2,53	2,011	2,514	1,952	2,518	2,530	2,517
2,75	2,240	2,817	2,143	2,811	2,816	2,799
2,9	2,330	2,936	2,248	2,927	2,927	2,911
2,97	2,417	3,051	2,573	3,039	3,035	3,020
3,37	2,600	3,292	2,533	3,275	3,262	3,255
3,55	2,868	3,646	2,832	3,623	3,599	3,612
3,93	3,051	3,888	2,950	3,864	3,837	3,865
4,17	3,211	4,099	3,063	4,077	4,052	4,090
4,17	3,370	4,309	3,301	4,290	4,275	4,313
4,43	3,488	4,465	3,647	4,451	4,448	4,477
4,45	3,500	4,481	3,883	4,467	4,466	4,493
4,68	3,628	4,650	4,088	4,643	4,664	4,664
4,70	3,640	4,666	4,291	4,660	4,683	4,680

Org.: ALKMIM, 2018.

Tabela 11– Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do módulo sensor com a equação de 4° para aproximar as leituras

Leitura de corrente em Ampères realizada pelo alicate amperímetro.	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente após o ajuste com a equação polinomial de 4° grau.	Diferença em Ampères entre a leitura do alicate amperímetro e a leitura do sensor de corrente.
0	-0,003	-0,003
0	-0,001	-0,001
0,04	0,045	0,005
0,06	0,029	-0,031
0,07	0,063	-0,007
0,11	0,124	0,014
0,12	0,135	0,015
0,13	0,142	0,012
0,15	0,194	0,044
0,15	0,096	-0,054
0,16	0,194	0,034
0,18	0,243	0,063
0,21	0,297	0,087
0,26	0,189	-0,071
0,29	0,430	0,140
0,3	0,431	0,131
0,32	0,273	-0,047
0,34	0,497	0,157
0,35	0,270	-0,080
0,36	0,293	-0,067
0,41	0,356	-0,054
0,48	0,458	-0,022
0,51	0,502	-0,008
0,57	0,599	0,029
0,6	0,527	-0,073
0,63	0,709	0,079
0,66	0,578	-0,082
0,72	0,670	-0,050
0,75	0,703	-0,047
0,82	0,808	-0,012
0,86	1,018	0,158
0,93	0,879	-0,051
1	0,971	-0,029
1,09	1,060	-0,030
1,21	1,173	-0,037
1,32	1,317	-0,003
1,32	1,275	-0,045
1,33	1,406	0,076
1,43	1,412	-0,018
1,46	1,381	-0,079
1,55	1,549	-0,001
1,68	1,638	-0,042
1,72	1,685	-0,035
1,82	1,827	0,007
2,02	1,968	-0,052
2,15	2,154	0,004

2,27	2,257	-0,013
2,48	2,569	0,089
2,53	2,530	0,000
2,75	2,816	0,066
2,9	2,927	0,027
2,97	3,035	0,065
3,37	3,262	-0,108
3,55	3,599	0,049
3,93	3,837	-0,093
4,17	4,052	-0,118
4,17	4,275	0,105
4,43	4,448	0,018
4,45	4,466	0,016
4,68	4,664	-0,016
4,70	4,683	-0,017

Org.: ALKMIM, 2018.

Tabela 12 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do sensor, utilizando o circuito do sensor de corrente conforme o datasheet.

Leitura de corrente em Ampères realizada pelo alicate amperímetro.	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente.	Diferença em Ampères entre a leitura do alicate amperímetro e a leitura do sensor de corrente.
0	0,135	0,135
0,03	0,171	0,141
0,04	0,178	0,138
0,07	0,21	0,14
0,13	0,304	0,174
0,14	0,337	0,197
0,21	0,439	0,229
0,29	0,571	0,281
0,31	0,585	0,275
0,35	0,586	0,236
0,36	0,44	0,08
0,4	0,675	0,275
0,42	0,516	0,096
0,44	0,552	0,112
0,51	0,636	0,126
0,59	0,672	0,082
0,66	0,731	0,071
0,69	0,911	0,221
0,73	0,853	0,123
0,75	0,827	0,077
0,93	1,067	0,137
0,96	1,029	0,069
1,11	1,198	0,088
1,26	1,391	0,131
1,28	1,43	0,15
1,34	1,46	0,12
1,5	1,599	0,099
1,59	1,843	0,253
1,66	1,756	0,096
1,68	1,971	0,291
1,88	2,284	0,404
1,89	2,026	0,136
1,94	2,175	0,235
2,17	2,398	0,228
2,18	2,422	0,242
2,21	2,346	0,136
2,36	2,442	0,082
2,44	2,852	0,412
2,45	2,622	0,172
2,53	2,593	0,063
2,57	2,798	0,228
2,58	3,036	0,456
2,61	2,935	0,325
2,77	3,158	0,388
2,96	3,262	0,302
3,41	3,762	0,352
3,57	3,839	0,269

3,6	3,895	0,295
3,95	4,217	0,267
4,14	4,349	0,209
4,28	4,465	0,185
4,54	4,76	0,22
4,56	4,771	0,211
4,8	5,107	0,307

Org.: ALKMIM, 2018.

Tabela 13 – Comparação entre as leituras de corrente do alicate amperímetro e do sensor montado conforme datasheet (com a equação linear).

Leitura de corrente em Ampères realizada pelo alicate amperímetro.	Leitura de corrente em Ampères realizada pelo sensor de corrente após o ajuste com a equação linear ($y = 0,9666x - 0,1353$).	Diferença em Ampères entre a leitura do alicate amperímetro e a leitura do sensor de corrente.
0	-0,005	-0,005
0,03	0,030	0,000
0,04	0,037	-0,003
0,07	0,068	-0,002
0,13	0,159	0,029
0,14	0,190	0,050
0,21	0,289	0,079
0,29	0,417	0,127
0,31	0,430	0,120
0,35	0,431	0,081
0,36	0,290	-0,070
0,4	0,517	0,117
0,42	0,363	-0,057
0,44	0,398	-0,042
0,51	0,479	-0,031
0,59	0,514	-0,076
0,66	0,571	-0,089
0,69	0,745	0,055
0,73	0,689	-0,041
0,75	0,664	-0,086
0,93	0,896	-0,034
0,96	0,859	-0,101
1,11	1,023	-0,087
1,26	1,209	-0,051
1,28	1,247	-0,033
1,34	1,276	-0,064
1,5	1,410	-0,090
1,59	1,646	0,056
1,66	1,562	-0,098
1,68	1,770	0,090
1,88	2,072	0,192
1,89	1,823	-0,067
1,94	1,967	0,027
2,17	2,183	0,013
2,18	2,206	0,026
2,21	2,132	-0,078
2,36	2,225	-0,135
2,44	2,621	0,181
2,45	2,399	-0,051
2,53	2,371	-0,159
2,57	2,569	-0,001
2,58	2,799	0,219
2,61	2,702	0,092
2,77	2,917	0,147
2,96	3,018	0,058
3,41	3,501	0,091

3,57	3,575	0,005
3,6	3,630	0,030
3,95	3,941	-0,009
4,14	4,068	-0,072
4,28	4,181	-0,099
4,54	4,466	-0,074
4,56	4,476	-0,084
4,8	4,801	0,001

Org.: ALKMIM, 2018.

Tabela 14 - Distância máxima de comunicação de acordo com o ambiente.

Tipo de ambiente	Distância máxima de comunicação alcançada em Metros.
Espaço com barreiras, 1 parede entre os xbee's.	104,6 Mts
Espaço com barreiras, 2 parede entre os xbee's.	72,93 Mts
Espaço com barreiras, 3 parede entre os xbee's.	41,3 Mts
Espaço com barreiras, 4 parede entre os xbee's.	30,6 Mts
Espaço com barreiras, 5 parede entre os xbee's.	19,8 Mts

Org.: ALKMIM, 2018.

Figura 26 – Planta do primeiro andar do prédio de ciências exatas da UNIMONTES

