

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



TALLES PARRINI DANTAS

**UM SISTEMA PARA GESTÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA
USANDO COMUNICAÇÃO SEM FIO**

VITÓRIA – ES
JULHO/2017

TALLES PARRINI DANTAS

UM SISTEMA PARA GESTÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA USANDO COMUNICAÇÃO SEM FIO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Talles Parrini Dantas, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**Prof. Dr.rer.nat. Hans-Jorg Andreas
Schneebeli**

Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. André Ferreira

Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliador

**Prof. Dra. Eliete Maria de Oliveira
Caldeira**

Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliador

VITÓRIA – ES
JULHO/2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família pelo apoio e principalmente o incentivo durante todo o curso de graduação.

Agradeço imensamente o Doutor Hans-Jorg Andreas Schneebeli pelo apoio, ensino e orientação durante o projeto.

Agradeço a Universidade Federal do Espírito Santo, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica pelo conhecimento passado. Aos colegas, em especial Leoni Mota Loris, Pâmela Catrinque Martins e Henrique Oliveira Bodart Soares, agradeço pelo apoio e suporte durante a graduação e no desenvolvimento deste projeto.

Finalmente, agradeço a empresa Sinales-Sinalização Espírito Santo e a todos seus colaboradores, por sugerir e apoiar o desenvolvimento deste projeto de graduação.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta para um sistema de gestão para iluminação pública usando comunicação sem fio. O sistema possui processamento capaz de analisar o nível de luminosidade e controlar a intensidade de luminárias. Além disso as luminárias são capazes de receber e enviar informações que variam desde alarmes até estratégias de funcionamento.

ABSTRACT

This work presents a proposal for a system of public lighting management using wireless communication. The system presents processing capable of luminosity analyses and lamps intensity control. Moreover, the lamps are capable of receive and send information that go from alarms to functionality strategies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Luminárias com painéis solares	13
Figura 2 - Padrão de distribuição de luminárias	16
Figura 3 - Composição da Luminária	17
Figura 4 – Acionador de LED HLG – 60H	19
Figura 5 - Operações de dimerização do acionador HLG -60H	19
Figura 6 - Dimerização do acionador HLG-60H por meio do PWM	20
Figura 7 - Blocos funcionais do controle da luminária.....	20
Figura 8 - Topologias de rede típicas	25
Figura 9 – Comparação entre Zigbee e outras redes de comunicação.....	27
Figura 10 - Comparação Zigbee vs modelo OSI	28
Figura 11 - Módulo XBee PRO S2C	29
Figura 12 - UART com XBee PRO S2C	30
Figura 13 - Sensor de luminosidade TSL2561	31
Figura 14 - Sensor ACS712	32
Figura 15 - Microcontrolador MSP430FR5949	33
Figura 16 - Diagrama de entradas e saídas do sistema de controle	34
Figura 17 - Datagrama do modo API	35
Figura 18 - Blocos funcionais do microcontrolador	37
Figura 19 - Esquema funcional da arquitetura Background e Foreground.....	38
Figura 20 - Camadas de composição do firmware	39
Figura 21 – Detalhamento das camadas de composição do firmware.....	40
Figura 22 - Ambiente do programa XCTU.....	41
Figura 23 - Conexões da rede Zigbee com 4 módulos	42
Figura 24 - Exemplo de rede pouco robusta.....	43
Figura 25 - Criação de datagrama para teste	44
Figura 26 - Datagrama recebido no destino.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplo de datagrama do protocolo.....	36
Quadro 2 - Interrupções.....	39
Quadro 3 - Parâmetros para configuração de módulos.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuição da Iluminação Pública no consumo de energia no Brasil	12
Tabela 2 – Comparação entre as diferentes tecnologias de lâmpadas	17
Tabela 3 - Comparação das tecnologias de comunicação.....	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.1.1	ALIMENTAÇÃO.....	13
1.1.2	COMUNICAÇÃO	13
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	14
1.3	METODOLOGIA.....	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	ARQUITETURA DO SISTEMA	16
2.1	LÂMPADA	17
2.2	ACIONAMENTO	18
2.3	CONTROLE.....	20
2.3.1	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	21
2.3.2	CONTROLE DE DIMERIZAÇÃO	21
2.3.3	SENSOR DE LUMINOSIDADE.....	21
2.3.4	SENSOR DE FUNCIONAMENTO DA LÂMPADA	22
2.3.5	CPU	22
2.4	COMUNICAÇÃO	22
3	APLICAÇÃO.....	27
3.1	PADRÃO ZIGBEE	27
3.2	MÓDULO XBEE	29
3.3	HARDWARE	30
3.3.1	COMUNICAÇÃO	30
3.3.2	SENSOR DE LUMINOSIDADE.....	30
3.3.3	SENSOR DE FUNCIONAMENTO DA LÂMPADA	31
3.3.4	CONTROLE DE DIMERIZAÇÃO	32
3.3.5	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	32
3.3.6	CPU	33
3.4	DIAGRAMA SISTEMA	34
3.5	CIRCUITO DE CONTROLE.....	34
3.6	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO.....	35
3.6.1	MODO COMANDOS	35

3.6.2 PROTOCOLO DA REDE.....	36
4 FIRMWARE	37
4.1 REQUISITOS DE FIRMWARE	37
4.2 ARQUITETURA.....	38
4.3 INTERRUPÇÕES	38
4.4 CAMADAS DO FIRMWARE	39
4.5 FUNÇÕES DO FIRMWARE.....	40
5 TESTES.....	41
5.1 CONFIGURAÇÃO	41
5.2 ROTEAMENTO DA REDE	42
5.3 ENVIO DE DADOS.....	44
6 CONCLUSÃO.....	46
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
APÊNDICE A.....	50
APÊNDICE B.....	53

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia implica em mudanças no cotidiano da humanidade, casos como a revolução industrial são de conhecimento geral como exemplo de como inovações tecnológicas podem reestruturar a base da sociedade. Durante o Século XX o ritmo dos avanços foi intensificado, e diferente das revoluções dos dois séculos anteriores, não ficaram restritos a área da mecânica industrial (CONCEIÇÃO, 2012).

A revolução da informação é possivelmente a que mais influencia a sociedade atualmente. Como as revoluções anteriores, ela contribuiu para o avanço da globalização, fenômeno que pode ser caracterizado como a integração mundial nas áreas econômicas, sociais, culturais e políticas. Por causa disso as fronteiras físicas não são mais razões para a separação das pessoas, produtos, serviços e conhecimento (CONCEIÇÃO, 2012).

Como a informação se tornou algo importante e desejado, a ideia de disponibilizá-la, mesmo em aplicações que aparentemente não precisariam, se tornou uma tendência mundial. Um exemplo disso foi o surgimento do conceito de internet das coisas ou IoT (Internet of Things), onde se procura que todos os equipamentos, não importando a função, fiquem conectados e disponíveis de alguma forma pela internet. Geladeiras, micro-ondas e eletrodomésticos em geral, lâmpadas e fechaduras são alguns dos exemplos de aparelhos que estão sendo incluídos na rede para serem controlados ou simplesmente fiscalizados.

Essa filosofia de disponibilidade e controle também se aplica a casos e sistemas mais amplos como carros, casas, indústrias e cidades. Para esta última surgiu o conceito de cidade inteligente onde a “tecnologia da informação e comunicação é combinada com a infraestrutura física para prover conveniências aos cidadãos como a eficiência energética, aumento da qualidade da água e do ar; identificar e resolver rapidamente qualquer problema no funcionamento dos sistemas da cidade” (TOMAS, 2014, p.32).

O serviço a ser analisado neste trabalho, é que está diretamente ligado a ideia de cidade inteligente, será o de iluminação pública, mais especificamente as estratégias de integração deste sistema de forma a monitorá-lo e controlá-lo.

A ideia para este projeto surgiu da necessidade de melhorar a eficiência e a qualidade da iluminação pública, e com isto provocar um grande impacto nos quesitos de economia de energia, detecção de falhas e segurança, por exemplo (TELIKO). O objetivo é monitorar funcionamento das luminárias e controlar remotamente o seu funcionamento. Entretanto, a implementação de tal sistema passa por diversos empecilhos, dentre os quais pode-se destacar: custo, capacidade de expansão e segurança do serviço.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Uma rede de iluminação pública abrange áreas extensas, cobrindo tanto regiões habitadas quanto não-habitadas. Para tanto, são compostas por milhares de luminárias, como no caso da cidade de Vitória no estado do Espírito Santo que possui uma área de 96,536 km², e 32 mil pontos de iluminação pública (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA).

Essa quantidade de equipamentos dispostos em uma grande área resulta em desafios de gerência como: monitoramento de falhas, consumo de energia, custos tanto de instalação como de manutenção, dentre outros.

As redes de iluminação, em sua maioria, são compostas basicamente de luminárias com lâmpadas de vapor de sódio. O monitoramento é feito por empresas que realizam rondas com verificação visual, pelo órgão público e pelos próprios habitantes. O consumo de energia é relativamente grande, chegando à aproximadamente 4% do total brasileiro no ano de 2012, como pode ser verificado na Tabela 1. Os custos de manutenção incluem gastos com equipes que realizam rondas, equipes de manutenção, equipamentos, dentre outros.

Tabela 1 - Contribuição da Iluminação Pública no consumo de energia no Brasil

Consumo cativo por classe - Brasil (GWh)

	2008	2009	2010	2011	2012	$\Delta\%$ (2012/11)	Part. % (2012)
<i>Total</i>	<i>289.210</i>	<i>295.295</i>	<i>310.368</i>	<i>320.370</i>	<i>327.427</i>	<i>2,2</i>	<i>100,0</i>
Residencial	94.746	100.776	107.215	111.971	117.646	5,1	35,9
Industrial	80.439	76.836	78.790	76.578	69.940	-8,7	21,4
Comercial	60.063	63.398	66.630	70.264	74.707	6,3	22,8
Rural	17.939	17.304	18.903	20.932	22.731	8,6	6,9
Poder público	11.523	12.114	12.755	13.156	14.003	6,4	4,3
Iluminação pública	11.429	11.782	12.051	12.478	12.916	3,5	3,9
Serviço público	10.830	10.904	11.570	11.858	12.355	4,2	3,8
Próprio	2.240	2.182	2.453	3.133	3.130	-0,1	1,0

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013

Os problemas mencionados resultaram em diversas soluções, como o uso de LEDs no lugar das lâmpadas de sódio para diminuir o consumo de energia, e estratégias de gerenciamento com o intuito de substituir grandes quantidades de lâmpadas antes que apresentassem problemas.

Uma das soluções mais pesquisadas consiste no monitoramento remoto dos pontos de iluminação, o que deu origem à área chamada Iluminação Pública Inteligente. Esse conceito, além de otimizar os serviços de manutenção, dispensa a necessidade de rondas para localização de falhas. Se for incluído o controle de funcionamento das lâmpadas, pode-se aplicar estratégias para economia de energia.

A iluminação pública inteligente faz parte de um conceito mais amplo, intensamente pesquisado nos últimos anos, chamado IoT (Internet of Things ou Internet das Coisas).

Para o desenvolvimento e aplicação de uma rede deste tipo, é preciso determinar dois atributos a priori, a forma de alimentação das luminárias e a tecnologia de comunicação.

1.1.1 ALIMENTAÇÃO

Existem padrões de redes que determinam cabos com fios para comunicação e alimentação, mas o custo de instalação, tanto do cabeamento como dos equipamentos de controle (PLCs por exemplo), seria elevado. Outra possibilidade é o uso de energia solar, como na Figura 1, o que contribuiria enormemente para a economia de energia. O custo para tais tipos de equipamentos ainda é alto, e faltam estudos para determinar a viabilidade em grandes aplicações.

Figura 1- Luminárias com painéis solares



Fonte – Loja Energia Extra, 2017

A melhor forma de alimentação é utilizar a rede de energia elétrica. A rede de baixa tensão já é usada para alimentar a rede de iluminação pública, e sua utilização para a nova rede é a forma mais eficiente.

1.1.2 COMUNICAÇÃO

O próximo aspecto a ser definido é a forma de comunicação da rede. Existem basicamente três opções: Comunicação por fio dedicado, por *PowerLine* ou sem fio.

Os padrões que utilizam comunicação por fio dedicado já foram descartados para a aplicação. Existe a opção de comunicação por *PowerLine*, ou seja, os dados são transmitidos pelo cabo de alimentação usando sinais de frequência diferente da rede. Tal tecnologia, apesar de possuir diversas vantagens, fica limitada pela necessidade de subdivisões do sistema em seções devido a limitação de banda e interferência entre equipamentos. Também existe a necessidade de

acordo com a concessionária de energia, sendo que o uso pode ser totalmente vetado. Além disso, o custo dos controladores também é um fator a ser levado em consideração.

A opção restante, e mais utilizada nas soluções já existentes, é a comunicação sem fio. O custo de equipamentos que utilizam tal tecnologia vem diminuindo e sua popularidade, principalmente com o advento do conceito de IoT vem crescendo nos últimos anos.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema a ser resolvido é a implementação de uma rede de monitoramento e controle de um grande número de lâmpadas LED, dispostas em uma grande área, que tenha as seguintes características:

- Escalabilidade;
- Baixo Custo;
- Comunicação sem fio;
- Roteamento Automático;
- Possuir controle da intensidade luminosidade;
- Possuir processamento distribuído;
- Verificar estado de funcionamento do equipamento;

1.3 METODOLOGIA

O primeiro aspecto a ser analisado no trabalho será a especificação da planta a ser controlada, representada pela luminária. A luminária escolhida será padrão, de forma que possa ser usada na maioria dos casos práticos, atendendo as demandas técnicas atuais. A especificação da luminária pode conter a escolha do tipo da lâmpada, como de vapor de sódio, e do tipo de fonte de acionamento, como reatores de lâmpada fluorescente. Outros tipos de luminárias poderão ser estudados, de forma específica, em trabalhos subsequentes.

O segundo aspecto será a especificação e escolha da arquitetura e do protocolo de comunicação da rede. A partir de uma análise será escolhida uma arquitetura, ou tecnologia de comunicação, que melhor atenda aos requisitos listados no Item 1.2 (Definição do problema). Se a arquitetura

escolhida não definir qual o protocolo de comunicação, principalmente no que tange os itens de roteamento da rede, o mesmo deverá ser especificado.

Com a determinação da planta e da arquitetura de comunicação é possível especificar o hardware de controle, levando em consideração quaisquer pré-requisitos que ainda não tenham sido atendidos.

Após o hardware, deve ser definido o *software/firmware*. O software deverá ser capaz de enviar e receber os dados, definidos nas etapas anteriores, usando a arquitetura de comunicação escolhida. Para o software também é necessário estar atento aos pré-requisitos do sistema, uma vez que o software sozinho pode prejudicar toda a rede.

Com a definição de todos os itens mencionados, será feito o teste funcional da rede. Ele se dará com o uso de pelo menos quatro dispositivos, que representarão a planta, sendo que um funcionará como coordenador. Os testes simularão o envio de comandos para as luminárias e o recebimento de status das mesmas, garantindo as duas vias de comunicação. Os testes serão feitos com diferentes arranjos espaciais de equipamentos para simular as possíveis distribuições de luminárias encontradas na prática. Também será analisado o caso de falha de dispositivo para averiguar a robustez da rede.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após a introdução e contextualização do trabalho, será determinada a arquitetura do sistema e seus elementos de hardware. A parte relativa a comunicação será mais detalhada por ser componente crítico do sistema.

A seguir, será proposto um circuito de controle, com especificação de componentes de acionamento e sensoriamento.

Após isso, será proposta uma arquitetura e esboço do *firmware* de controle.

Por último, serão realizados testes para validar a arquitetura de comunicação escolhida para a rede.

2 ARQUITETURA DO SISTEMA

Uma rede de iluminação pública é composta por luminárias distribuídas por ruas ou estradas. A Figura 2 é um mapeamento de pontos de iluminação pública em uma dada região urbana.

Figura 2 - Padrão de distribuição de luminárias

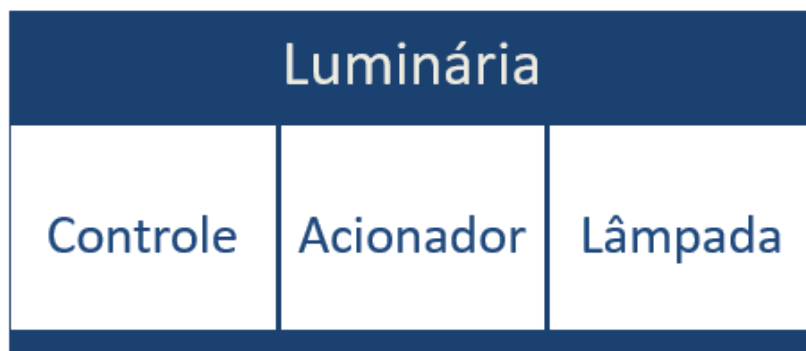


Fonte: Grupo CTAGEO, 2017

Cada círculo da Figura 2 consiste em um ponto de iluminação, sendo que este ponto contém no mínimo uma luminária. Uma luminária é um conjunto que tem como principal componente a lâmpada, elemento que converte energia elétrica em energia luminosa, além de radiação infravermelha e/ou ultravioleta (ASCURRA, 2013).

A luminária é o elemento a ser controlado na rede, sendo que será composta pelas partes descritas na Figura 3.

Figura 3 - Composição da Luminária



Fonte: O Autor, 2017

Os três elementos são descritos a seguir.

2.1 LÂMPADA

Vários padrões de lâmpadas foram usados no Brasil ao longo da história dependendo da tecnologia disponível à época, das exigências normativas, da eficiência e duração das lâmpadas, dentre outras razões. A Tabela 2 apresenta alguns dados referentes as diferentes tecnologias de lâmpadas.

Tabela 2 – Comparação entre as diferentes tecnologias de lâmpadas

TIPO DE LÂMPADA	EFICIÊNCIA (lm/W)	RENDIMENTO (%)	DIMERIZAÇÃO ¹
Incandescentes	10 a 15	1,5 a 2,3	Possui
Halógenas	15 a 25	2,2 a 3,8	Possui
Mista	20 a 35	2,9 a 5,2	Não possui
Vapor de mercúrio	45 a 55	6,6 a 8,2	Não possui
Fluorescente comum	55 a 75	8,1 a 11,1	Possui
Fluorescente compacta	50 a 85	7,3 a 12,5	Possui
Vapor Metálico	65 a 90	9,5 a 13,3	Não possui
Fluorescente eficiente	75 a 90	11,0 a 13,3	Possui
Vapor de Sódio a Alta Pressão	80 a 140	11,7 a 20,6	Não possui
Vapor de Sódio a Baixa Pressão	130 a 200	19,0 a 29,3	Não possui
LED	70 a 208	10,2 a 30,45	Possui

Fonte: O Autor, 2017

¹ Levantamento feito de acordo com produtos de mercado, sendo que o funcionamento não foi verificado.

O padrão mais utilizado atualmente no Brasil, pelo seu rendimento e eficiência, é a lâmpada de Vapor de Sódio a Alta Pressão. No entanto, dada as informações da Tabela 1, a tecnologia a LED se mostra como uma opção melhor, razão pela qual vem ganhando força no mercado. Deve-se levar em conta que lâmpadas de Vapor de Sódio a Baixa Pressão não são usadas para iluminação pública no Brasil (ASCURRA, 2013).

O LED possui vida útil estimada da ordem de 100.000 (cem mil) horas. Mesmo que diversas críticas sejam feitas a esta estimativa, principalmente em relação a eletrônica de acionamento que pode diminuí-la, as lâmpadas LED vêm se provando substitutos viáveis das lâmpadas de Vapor de Sódio a Alta Pressão.

Uma vez que as evidências apontam que as lâmpadas LED serão o padrão de iluminação pública no futuro próximo, essa será a tecnologia usada para o presente trabalho. As outras tecnologias podem ser abordadas, para estudo de caso, em trabalhos futuros.

2.2 ACIONAMENTO

Dependendo do tipo de lâmpada usada na iluminação pública é necessário o uso de uma fonte para acionamento, como no caso das lâmpadas de descarga de vapor de sódio e vapor de mercúrio, que usam reatores específicos. A tecnologia escolhida na sessão anterior foi a lâmpada a LED, sendo que a fonte de acionamento para tal se dá na forma de um circuito do tipo fonte de corrente contínua, principalmente quando se deseja alcançar e manter máxima eficiência (PROCEL, 2011).

Para luminárias de iluminação pública em específico, o circuito é encontrado comercialmente como *driver* de LED, fonte para LED ou acionador de LED. Seu funcionamento é o mesmo de uma fonte de corrente contínua, mas possui outras características, como proteção contra harmônicos e proteção mecânica, para viabilizar seu uso nos ambientes externos.

Os acionadores podem ter funcionalidades além de simplesmente alimentar a carga. Um dos pré-requisitos de projeto é a diminuição do consumo de energia, que foi alcançado com a escolha da lâmpada a LED, no entanto é possível diminuir ainda mais o consumo com o controle de intensidade luminosa, em horários de pouco movimento por exemplo. Este conceito é chamado de dimerização.

Alguns acionadores de LED já são feitos com essa opção, onde o sinal de controle é oriundo de um circuito auxiliar. O circuito em questão será o elemento de controle do sistema, a ser definida em sessão subsequente. O acionador escolhido será o HLG-60H, visto na Figura 4, que é para uso em iluminação pública, possui dimerização (controle de intensidade), além de ser comumente usados por fabricantes de luminárias.

Figura 4 – Acionador de LED HLG – 60H

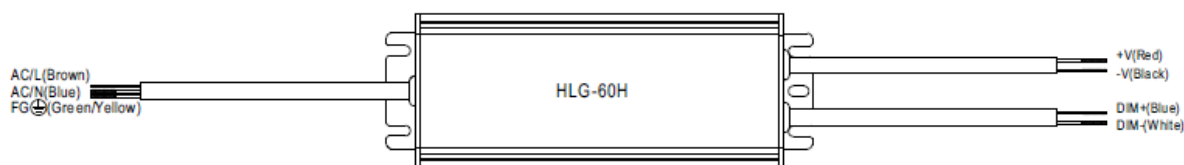


Fonte: *Datasheet HLG-60H*, 2017

Na Figura 5 estão representados os terminais do acionador e as operações de dimerização. Das 3 opções para controle da dimerização, a escolhida é a que usa um sinal PWM de 10V, por ser mais comum de se obter com microcontroladores de custo mais baixo.

Figura 5 - Operações de dimerização do acionador HLG -60H

■ DIMMING OPERATION



※ 3 in 1 dimming function (for B-Type)

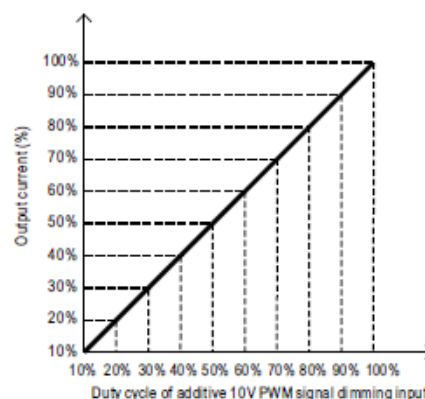
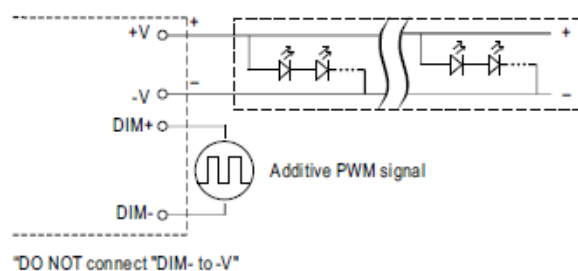
- Output constant current level can be adjusted by applying one of the three methodologies between DIM+ and DIM-:
1 ~ 10VDC, or 10V PWM signal or resistance.
- Direct connecting to LEDs is suggested. It is not suitable to be used with additional drivers.
- Dimming source current from power supply: 100 μ A (typ.)

Fonte: *Datasheet HLG-60H*, 2017

Na Figura 6 está a descrição da operação de dimerização por PWM que deverá ser realizada pelo circuito de controle.

Figura 6 - Dimerização do acionador HLG-60H por meio do PWM

© Applying additive 10V PWM signal (frequency range 100Hz ~ 3KHz):

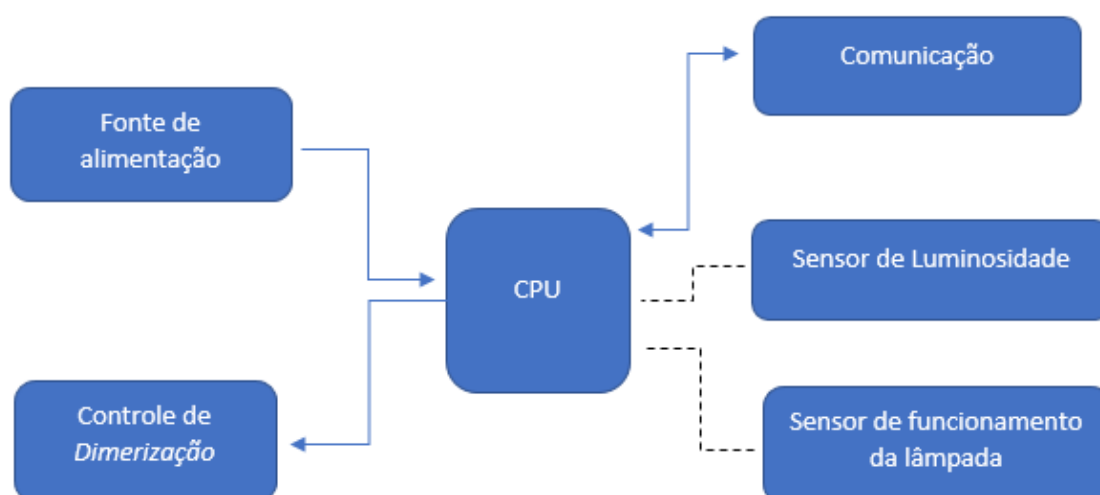


Fonte: Datasheet HLG-60H, 2017

2.3 CONTROLE

O controle é o elemento responsável por gerenciar o funcionamento da luminária, monitorar sensores e realizar a comunicação da luminária com a rede. Sendo assim, o elemento pode ser organizado nos blocos funcionais da Figura 7.

Figura 7 - Blocos funcionais do controle da luminária



Fonte: O Autor, 2017

2.3.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Responsável por fornecer a energia do sistema de controle. Pode ser feito por uma fonte chaveada, transformando a tensão de alimentação da rede elétrica em tensão contínua. O valor da tensão e corrente devem ser suficientes para atender as funcionalidades do circuito como: valor de tensão para acionamento do microcontrolador e circuitos integrados.

Como diferentes circuitos integrados podem usar tensões de alimentação diferentes, devem ser incluídos os circuitos reguladores de tensão.

2.3.2 CONTROLE DE DIMERIZAÇÃO

Como definido no item 2.2, a fonte de acionamento controla o brilho da lâmpada por meio da dimerização. O sinal para o controle da fonte de acionamento é oriundo de um PWM de 10 Volts, que é gerado na CPU do elemento de controle.

O bloco do controle de dimerização compreende todos os elementos eletrônicos que fazem a interface do sinal PMW gerado pela CPU para o sinal PWM a ser aplicado na fonte de acionamento.

2.3.3 SENSOR DE LUMINOSIDADE

A iluminação pública entra em funcionamento em períodos de baixa luminosidade natural, fotocélulas em cada luminária fazem a medição da luminosidade e ligam ou desligam a lâmpada de acordo com a necessidade.

O sensor de luminosidade é responsável por detectar a intensidade luminosa do ambiente para que a CPU determine quando a lâmpada irá funcionar.

A necessidade deste sensor no sistema pode ser questionada, uma vez que ele faz parte de uma rede com comunicação e o comando para ligar ou desligar a lâmpada pode vir de uma central. Neste caso, para evitar tráfego de informações excessivos na rede, a ação será decidida em cada luminária, como é feito atualmente, descentralizando o processamento da rede.

2.3.4 SENSOR DE FUNCIONAMENTO DA LÂMPADA

É responsável por verificar o estado de funcionamento da lâmpada. O método específico para este sensoramento não é foco deste trabalho, mas ele pode ser feito por análise do consumo de corrente, da tensão sobre os LEDs, do fluxo luminoso da lâmpada, ou uma combinação dos elementos.

Como o processamento do funcionamento está na própria luminária, na CPU especificamente, estratégias mais simples ou mais complexas podem ser analisadas.

2.3.5 CPU

Centro de processamento da luminária. Baseado no estado dos sensores, e da estratégia de funcionamento descida para o sistema, determina qual ação deve ser tomada.

As ações podem ser ligar ou desligar a lâmpada, variar a intensidade luminosa, determinar qual estado da luminária, gerar alarmes, e receber novas estratégias de funcionamento por exemplo.

2.4 COMUNICAÇÃO

O bloco de comunicação, e parte da CPU, consiste no item foco deste trabalho. Como já apresentado anteriormente a forma de comunicação será sem fio. Diversos padrões de comunicação sem fio, visando o conceito de IoT, são usados comercialmente (DESIGNSPARK, 2015), dentre eles vale destacar:

Bluetooth: Tecnologia de comunicação a curta distância via rádio muito popular, primariamente por seu uso para transferência de dados em smartphones, e mais recentemente pelas aplicações em IoT. Sua frequência de operação é 2,4 GHz, taxa de transferência de 1Mbps e alcance de até 150m sem obstáculos.

Zigbee: Baseado no protocolo IEEE 802.15.4, é um padrão de comunicação sem fio extensivamente usado na indústria, principalmente em aplicações de sensoramento com baixa taxa de transferência. A vantagem da tecnologia zigbee é que seu protocolo gerencia automaticamente redes complexas, com segurança, robustez e grande escalabilidade. Apesar de não ser um protocolo proprietário, os módulos X-Bee da DiGi, que são os equipamentos mais

conhecidos que utilizam o zigbee, incluem funcionalidades muito úteis para o trabalho. Sua frequência de operação é 2,4 GHz, taxa de transferência de 250kbps e alcance de até 100m (fabricantes afirmam que com antenas maiores o alcance chega a várias centenas de metros, sem obstáculos).

Z-Wave: É uma tecnologia de comunicação low-power por RF (Rádio Frequência). É usada quase que exclusivamente em domótica, para controle de lâmpadas e sensores. Como trabalha com frequências mais baixas (menor do que 1 GHz), não sofre interferências de outros equipamentos mais comuns. Seu protocolo permite redes em malha, e é proprietário. Sua frequência de operação é 900 MHz, taxa de transferência de 100kbits (máximo) e alcance de até 30m.

WiFi: Tecnologia de conexão mais usada, focada na grande transferência de dados. No entanto seu consumo relativamente grande de potência, inviabiliza a maioria das aplicações em IoT. Sua frequência de operação é 2.4 e 5GHz, taxa de transferência de 200Mbps (podendo chegar a 600Mbps) e alcance de até 50m.

GSM/3G/4G: Rede de comunicação capaz de transferir grande quantidade de dados (4G) em distâncias bem maiores comparadas as tecnologias discutidas anteriormente. No entanto o consumo de potência, e principalmente o custo grande, faz com que essa tecnologia se torne menos atraente para aplicações IoT. Provavelmente o maior empecilho para seu uso é a dependência das concessionárias. Sua frequência de operação varia de 900 a 2100 MHz, taxa de transferência de 170kbps (GPRS) a 10Mbps (LTE), e alcance entre 35 e 200Km.

Sigfox: Tecnologia de longo alcance, que fica entre WiFi e GSM/3G/4G. Usa a banda ISM e é usada em aplicações que necessitam de comunicação M2M (*machine-to-machine*) com pouca banda, ou seja, com pouca troca de dados. Vem sendo aplicada em diversos equipamentos em cidades da Europa. Sua frequência de operação é 900 MHz, taxa de transferência de 1000bps (máximo) e alcance de 3 a 10Km em ambientes urbanos.

Neul: Possui conceito similar a SigFox e usa faixas do espectro de espaço branco, faixas de transmissão com frequência menor do que 1 GHz. Está ganhando espaço com o fim das transmissões de televisão analógica, possui grande escalabilidade, cobertura e custo-baixo. Suas

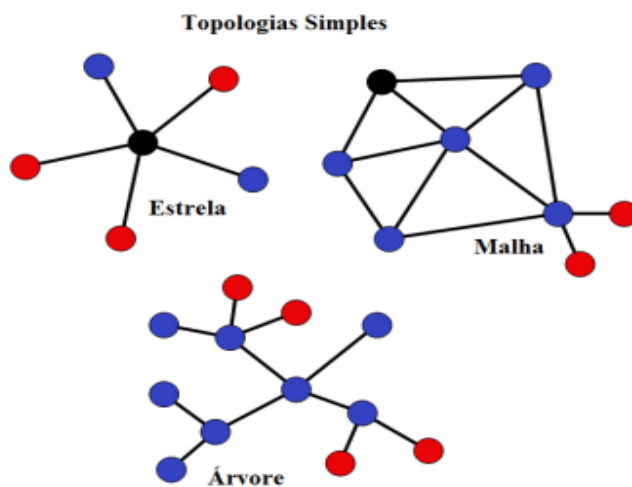
frequências de operação são 900 MHz, 458 MHz e 470-790 MHz (espaço branco), taxa de transferência de 1000kbps (máximo) e alcance de 10 Km.

LoRaWAN: Possui conceito parecido com as duas últimas tecnologias, seu objetivo é fornecer conexões de equipamentos em grandes áreas com custo reduzido. Seu desenvolvimento é discutido na *Lora Alliance* sendo que vem se mostrando uma ótima alternativa futura para a área de IoT. No entanto as pesquisas e padronizações são bem recentes comparadas a outras tecnologias. Possui várias frequências de operação, taxa de transferência de 50kbps (máximo) e alcance de 5 Km em áreas urbanas.

DigiMesh: Protocolo de comunicação em malha. É frequentemente comparado com zigbee, oferecendo algumas vantagens como mais opções de frequência de transmissão, no entanto não possui interoperabilidade com equipamentos de diferentes fabricantes. As frequências de operação são 2.4 GHz, 900 MHz principalmente, com taxas de transferência de até 250 Kbps e distância de até 3 Km dependendo do tipo de antena (DIGI).

Um fator para ser levado em consideração na escolha da tecnologia é a topologia da rede. Na Figura 2 pode-se ver uma distribuição padrão de luminárias e apesar de estarem próximas (20 a 30 metros), elas podem assumir diferentes posicionamentos sem seguir uma regra. Dos tipos de topologias de redes, descritos na Figura 8, pode-se ver que a que mais atende a distribuição das luminárias é a tipo malha, ou *mesh*, assim a escolha da tecnologia deve levar em consideração a possibilidade de uso da mesma.

Figura 8 - Topologias de rede típicas



Fonte: IFSC, 2017

O WiFi e GSM não atendem essa aplicação, principalmente pelo alcance do primeiro e do custo do segundo, por depender de concessionária. A Tabela 3 apresenta um resumo comparativo das tecnologias restantes.

Tabela 3 - Comparação das tecnologias de comunicação

Tecnologia	Frequência	Alcance	Taxa de dados	Proprietário	Problema para a aplicação
Bluetooth	2,4 GHz	150 m	1 Mbps	SIM	Não trabalha em mesh ²
Zigbee	2,4 GHz	100 m	250 Kbps	NÃO	-
Z-Wave	900 MHz	30 m	100 Kbps	SIM	Aplicações indoor
SigFox	900 MHz	3 Km	1 Kbps	SIM	Trabalha em frequência não liberada
Neul	458 MHz a 900 MHz	10 Km	1 Mbps	NÃO	Trabalha em frequência não liberada
LoRaWAN	Semelhante a Neul	5 Km	50 Kbps	NÃO	Não é largamente usada
DigiMesh	2,4 GHz 900, 868 e 865 MHz	3 Km	250 Kbps	SIM	-

Fonte: O Autor, 2017

² A versão mais nova pode trabalhar em mesh. Por ser muito recente ainda não possui garantias.

A maioria dessas tecnologias poderia ser usada para a implementação de redes de comunicação para iluminação pública, dependendo do objetivo do arquiteto da rede. Para este trabalho os problemas apontados na Tabela 3, e que não são únicos, excluem a possibilidade de uso das respectivas tecnologias.

As duas opções restantes são a Zigbee e a DigiMesh, que são parecidas funcionalmente e muito comparadas. Podem ser usadas em um mesmo hardware com mudanças de *firmware*.

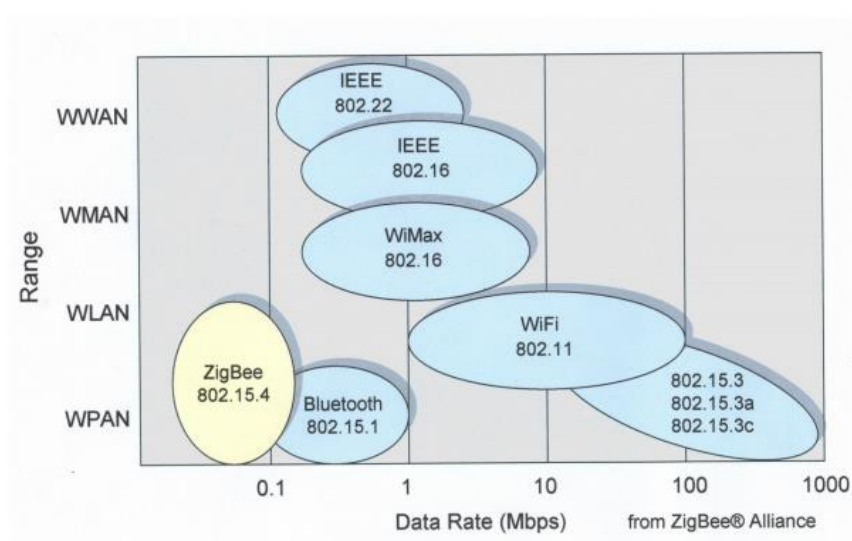
Pelo fato do DigiMesh ser proprietário, o Zigbee será o escolhido como padrão de comunicação para a rede.

3 APLICAÇÃO

3.1 PADRÃO ZIGBEE

O padrão de comunicação zigbee foi definido pela *Zigbee Alliance*, uma associação de centenas de empresas de diferentes seguimentos ao redor do mundo. O objetivo da associação era criar um padrão de comunicação sem fio de baixo consumo de energia e com baixas taxas de transmissão (STOLL, 2008). A Figura 9 mostra como o padrão zigbee está posicionando junto as tecnologias de comunicação wireless.

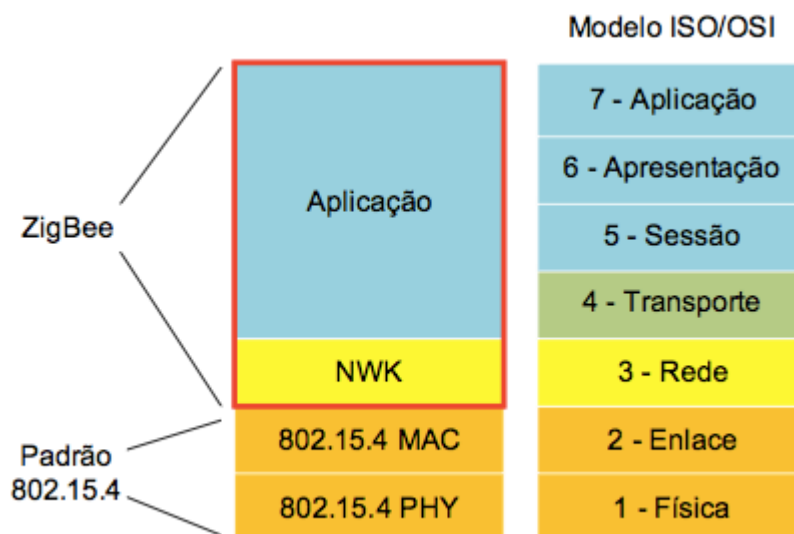
Figura 9 – Comparação entre Zigbee e outras redes de comunicação



Fonte: STOLL, 2008

A *Zigbee Alliance* optou pela norma IEEE 802.15.4, que opera em faixas de frequências livres, para definir a camada física e de enlace. As demais camadas são definidas pela própria *Zigbee Alliance*, exceto a de aplicação que pode ser definida pelo usuário. Na Figura 10 podemos ver como o padrão Zigbee é estruturado em relação ao modelo de camadas OSI.

Figura 10 - Comparação Zigbee vs modelo OSI



Fonte: IPV6BR, 2017

As principais responsabilidades das camadas definidas pela *Zigbee Alliance* são:

- Inicializar uma rede;
- Habilidade de entrar e sair de uma rede;
- Configuração de novos dispositivos;
- Segurança dos dados de saída;
- Distribuição de endereços, pelo coordenador, para os dispositivos que entram na rede;
- Sincronização com a rede;
- Roteamento de “frames” para o destino correto.

Alguns destes itens são mencionados nas predefinições de projeto. A camada de aplicação é basicamente constituída por 3 partes (TELECO):

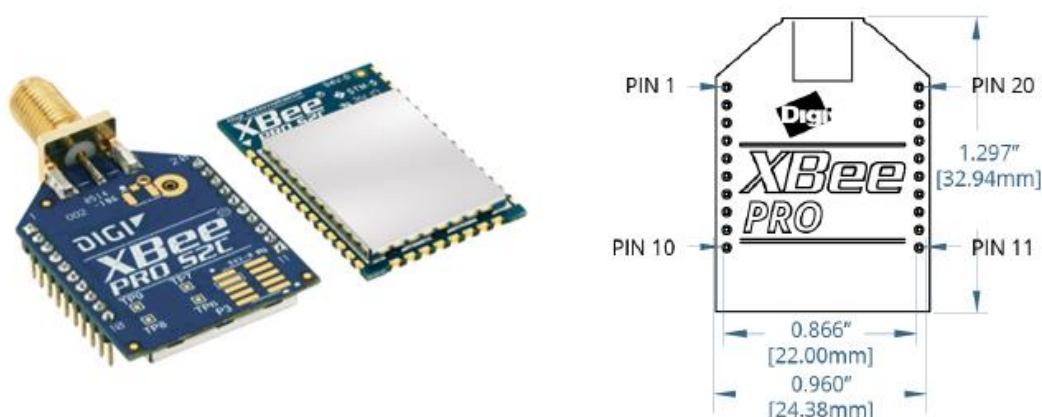
- Suporte à aplicação: Composta pelos serviços de *Discovery* e *Binding*. O primeiro descobre outros pontos ativos na mesma região do dispositivo, o segundo une dois ou mais dispositivos considerando suas necessidades e serviços;
- *Zigbee Device Object*: Onde está definido o papel do dispositivo na rede (coordenador, roteador ou *end device*), o método de segurança usado e o início das solicitações de *Binding*;

- Funções proprietárias da empresa que desenvolveu o dispositivo;

3.2 MÓDULO XBEE

O principal componente do bloco de comunicação, apresentado no Capítulo 2, é o módulo XBee PRO S2C, visto na Figura 11.

Figura 11 - Módulo XBee PRO S2C



Fonte: DIGI, 2017

Este módulo pode ser facilmente encontrado no mercado e é homologado pela ANATEL (DIGI, User Guide). Uma das vantagens deste módulo é permitir o uso de diferentes padrões de comunicação como o Zigbee e o DigiMesh, que foram levantados como padrões capazes de atender os pré-requisitos de projeto.

Dentre as especificações, as mais pertinentes ao projeto são (DIGI, User Guide):

- Chip transceiver: EM357;
- Frequência de comunicação: ISM 2,4 GHz;
- Taxa de dados: 250 Kbps;
- Alcance: 90 metros no perímetro urbano, sendo que para o projeto a distância máxima de segurança considerada para o projeto é 50 metros;
- Interfaces seriais: UART e SPI;
- Entrada analógica de 10 bits;

- Entradas digitais (I/Os): 15;
- Criptografia: AES de 128 bits;
- Tensão de operação: 2,7 a 3,6 V;

3.3 HARDWARE

O controle do sistema, descrito em 2.3, e seus blocos são compostos por componentes como sensores, circuitos integrados e outros. Esses blocos serão especificados a seguir.

3.3.1 COMUNICAÇÃO

Será composto pelo módulo XBee PRO S2C, detalhado em 3.2. A interface desse módulo pode ser feita por meio de UART (Universal Asynchronous receiver/transmitter), como visto na Figura 12, ou SPI (Serial Peripheral Interface). A CPU deverá ter no mínimo uma das duas opções para interface, no entanto a UART será escolhida nesse projeto.

Figura 12 - UART com XBee PRO S2C



Fonte: DIGI User Guide, 2017

3.3.2 SENSOR DE LUMINOSIDADE

Fotocélulas geralmente são utilizadas em iluminação pública para de forma automática acionar a lâmpada em condições de baixa luminosidade. No entanto, o funcionamento é do tipo chave, não havendo nenhuma lógica mais complexa de funcionamento e acesso aos valores de luminosidade.

O sensor de luminosidade escolhido para este projeto será o TSL2561, visto na Figura 13 e definido como um conversor de intensidade de luz em sinal digital com interface I²C (TSL2561).

Figura 13 - Sensor de luminosidade TSL2561



Fonte: FILIPEFLOP, 2017

O uso de sensores que possuem saída digital é vantajoso pois os dados são menos suscetíveis à interferência do que sinais analógicos. O TSL2561 possui 3 endereços de escravo configuráveis, possibilitando o uso de múltiplos sensores com o mesmo microcontrolador.

A disponibilidade do valor de intensidade luminosa para a CPU é importante para se ter flexibilidade na estratégia de funcionamento. O nível de intensidade para acionamento pode ser mudado e configurado remotamente e a CPU segue a estratégia de acordo com o valor recebido.

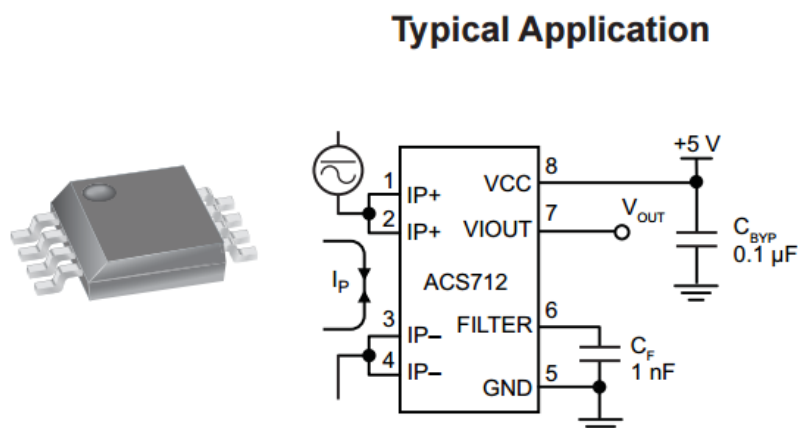
3.3.3 SENSOR DE FUNCIONAMENTO DA LÂMPADA

A lâmpada é composta por um conjunto de LEDs conectados em série, alimentados pelo acionador. A verificação de seu funcionamento pode ser feita de duas maneiras, pela corrente percorrendo a lâmpada ou pela luminosidade gerada por ela.

Para detectar a luminosidade da lâmpada pode-se usar o TSL2561. A comunicação por I²C é uma vantagem nesse ponto, permitindo vários sensores no mesmo barramento.

Para detectar a corrente pode ser usado um sensor por efeito hall conectado em série com a lâmpada. Um sensor comum para essa aplicação é o ACS712, visto na Figura 14, que pode medir correntes alternadas e contínuas de até 30 A.

Figura 14 - Sensor ACS712



Fonte: Datasheet ACS712, 2017

A medida da corrente é disponibilizada em um pino do sensor proporcionalmente a corrente medida em uma relação de 66mV/A. Assim a CPU deve ter no mínimo uma entrada analógica.

Vale ressaltar que o sensor de funcionamento pode utilizar uma das opções, ou as duas para uma lógica mais precisa.

3.3.4 CONTROLE DE DIMERIZAÇÃO

A dimerização é feita por meio de um sinal PWM com amplitude de 10V e frequência entre 100 Hz e 3 KHz. A geração do sinal pode ser feita por um circuito específico, mas nesse caso será originada na própria CPU, no entanto os níveis de tensão serão da ordem de 3 V.

O bloco de controle de dimerização é representado pela componente geradora do sinal PWM na CPU e pelo circuito amplificador que adequa a tensão para o acionador. Será usado um MOSFET de potência como componente amplificador, por suportar a faixa de frequência do PWM, pelo custo e pela simplicidade de uso.

3.3.5 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Bloco que fornece tensão e corrente para o circuito. Será usado uma fonte de tensão chaveada comercial. Deve-se ter atenção para fornecer tensão no nível apropriado para a aplicação.

A fonte deve ser de 10 V no mínimo, e para atender os níveis de tensão dos demais componentes serão usados reguladores, como o LM2596 que pode fornecer 3.3 V por exemplo.

3.3.6 CPU

Componente responsável por processar as informações dos sensores, receber e enviar os dados do bloco de comunicação e controlar o acionador da lâmpada. É composto por um microcontrolador e baseado nos requisitos levantados de todos os blocos deve possuir no mínimo:

- Comunicação UART;
- Comunicação I²C;
- Entrada analógica;
- Saída PWM;

Tais requisitos são encontrados na maioria dos microcontroladores comerciais, dos mais simples aos mais poderosos. Levando em conta a relativa simplicidade de processamento necessária, um microcontrolador RISC de 16 bits é suficiente para a aplicação. O microcontrolador escolhido é MSP430FR5949 da *Texas Instruments*.

No entanto a escolha não está restrita e essa família ou a este fabricante, ela foi feita com base na familiaridade do autor com o microcontrolador em questão.

Figura 15 - Microcontrolador MSP430FR5949



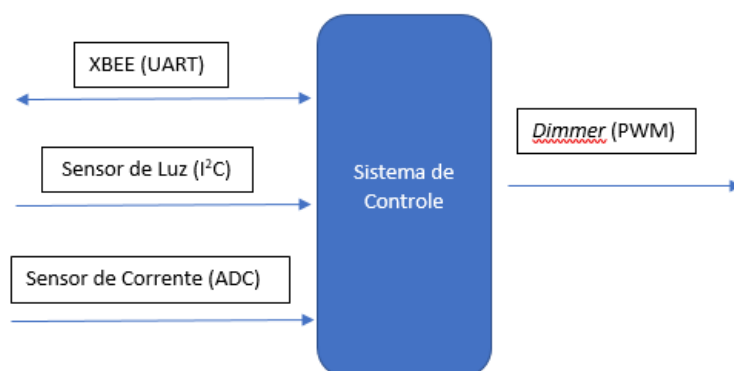
Fonte: MSP430FR59XX datasheet, 2017

Nenhum dos componentes listados anteriormente são absolutos ou opções únicas. Quaisquer elementos capazes de realizar as funcionalidades dos blocos, definidos em 2.3, podem ser usados.

3.4 DIAGRAMA SISTEMA

Com a escolha dos componentes do sistema de controle é possível criar o diagrama simplificado de entrada e saída do sistema. O diagrama, visto na Figura 16, é o primeiro passo para a criação do *firmware*, a ser tratado no próximo capítulo.

Figura 16 - Diagrama de entradas e saídas do sistema de controle



Fonte: O Autor, 2017

3.5 CIRCUITO DE CONTROLE

Os componentes que compõem os blocos funcionais do sistema de controle foram definidos. Assim o próximo passo é o desenho do esquemático do circuito, que pode ser visto no Apêndice A. O esquemático foi feito com o programa Cadsoft Eagle, usando bibliotecas de componentes livres criadas pelos fabricantes, ele é dividido em seções para melhor organização.

A razão para o desenho do circuito é parte da decisão de projeto. Existe a possibilidade do uso de módulos comerciais dos sensores, mas tais componentes são primariamente para protótipos de bancada. Sendo assim, o uso de tais módulos comercialmente pode prejudicar a confiabilidade do sistema. A melhor alternativa na visão da engenharia é a criação de uma placa de circuito impresso com todos os componentes necessários ao sistema.

Das seções do circuito, vale ressaltar as seguintes características:

- Sensor de luminosidade: Possui apenas um sensor. O segundo sensor, responsável por verificar a luminosidade da lâmpada, estará em uma parte em separado da luminária. Por isso existe um conector ligado ao barramento I²C da placa.
- Alimentação: Possui o conector para a fonte de tensão do circuito. Também possui um regulador de tensão (MIC29302WU) para adequar os níveis lógicos, neste caso 3,3 V.
- Módulo XBEE: Compõe as ligações dos pinos do módulo XBee.

3.6 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

O protocolo da rede corresponde aos comando e dados pertinentes ao funcionamento das luminárias organizados em datagrama. Ele contém as ações específicas definidas pelo arquiteto da rede, podendo ser adaptado para atender diferentes necessidades e está localizado acima das camadas do protocolo Zigbee.

3.6.1 MODO COMANDOS

Para definir o protocolo é preciso saber o modo de comunicação da rede Zigbee. Existem dois modos, o transparente e o API (*Application Programming Interface*). O modo transparente é usado para comunicação ponto a ponto, entre dois módulos apenas, o que não atende as necessidades do projeto.

O modo API trabalha com datagrama, visto na Figura 17, sendo que permite a operação em malha.

Figura 17 - Datagrama do modo API

Start Delimiter	Length		Frame Data									Checksum
			Frame type	Data								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	n	n + 1	
0x7E	MSB	LSB	API frame type	Frame-type-specific data							Single byte	

MSB: most-significant byte, LSB: least-significant byte

Fonte: DIGI, 2017

3.6.2 PROTOCOLO DA REDE

Todos os componentes da rede devem transmitir o datagrama do modo API, podendo ser enviado diretamente pelo barramento UART. Assim, o protocolo da rede será representando pelo próprio datagrama do modo API, sendo que o campo DATA conterá o comando e o dado específicos do protocolo, no formato representado no Quadro 1. Também será enviado uma identificação da luminária que corresponde ao endereço do módulo XBee.

Quadro 1 - Exemplo de datagrama do protocolo

ID_Luminaria	Comando	Dado
371	001	0-1000=100; 1000-200=80...

Fonte: O Autor, 2017

ID_Luminária: Para enviar para luminária em específico ou enviar um broadcast, corresponde ao endereço do módulo XBee correspondente;

Comando: Comandos que começam com 0 (001 ou 002) são requisições oriundas da central da rede. Comandos que começam com 1 (101 ou 102) são respostas das luminárias. São exemplos de comandos:

- 001 Set_Perfil: Perfil de funcionamento, como nível de luminosidade para acionar;
- 002 Get_Status: Requisita estado da luminária;
- 103 Alarme_Falha: Falha de funcionamento da luminária. É enviado diretamente da luminária, sem necessidade de requisição.

Dado: Dado correspondente ao comando e ao sentido (envio ou resposta);

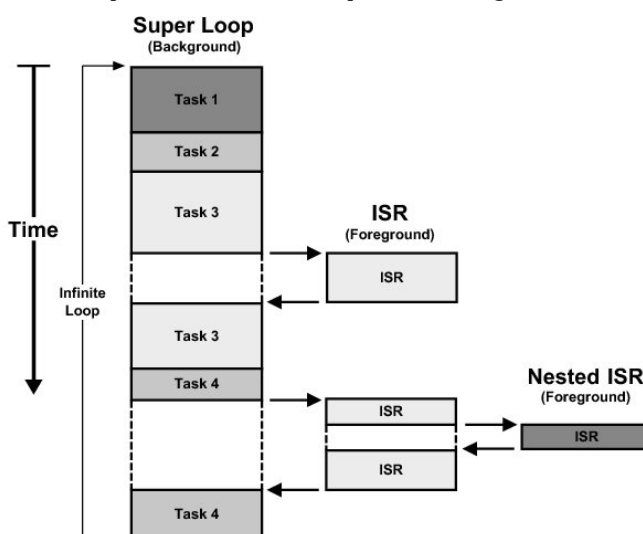
A troca de dados é composta basicamente por alarmes, que são raros, e checagens de rotina que podem ser a cada 10 minutos por exemplo. O perfil de funcionamento é um comando ainda mais raro de ser enviado.

A pequena troca de dados é resultado do processamento descentralizado, em outras palavras, as luminárias são responsáveis pelo próprio funcionamento tirando a responsabilidade da central do sistema.

4.2 ARQUITETURA

A primeira parte na criação do *firmware* consiste na escolha da arquitetura do sistema. Dentre as opções pode-se citar os kernels de tempo real como o μ C/OS e o FreeRTOS, *protothreads* e máquinas de estado. Devido ao hardware escolhido ser um microcontrolador de 16-bits e os requisitos de sistema serem relativamente simples, a arquitetura escolhida pode ser a tradicional *background/foreground*, exemplificadas na Figura 19.

Figura 19 - Esquema funcional da arquitetura *Background* e *Foreground*



Fonte: Micrium, 2017

4.3 INTERRUPÇÕES

As primeiras estruturas definidas são as interrupções de sistema, responsáveis por eventos importantes ou assíncronos (Micrium). A primeira interrupção é a de leitura serial, devido a não se saber quando algum dado vai ser recebido, eles são lidos byte a byte e gravados em um buffer para análise em background.

A segunda interrupção é a de timer cuja razão é realizar uma contagem de tempo. Tal contagem pode ser usada por diversas funções em background que realizam atividades que necessitam de contagem de tempo.

É de extrema importância que as rotinas das interrupções sejam o mais curto possível, de forma a não prejudicar as funções em *background*. A lista de interrupções pode ser vista no Quadro 2.

Quadro 2 - Interrupções

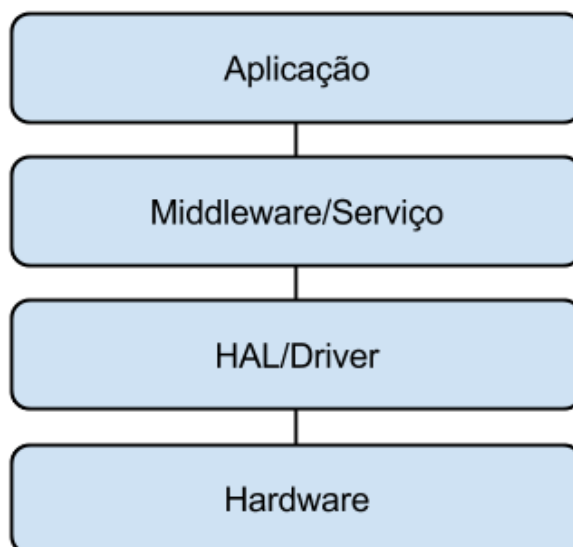
void USCI_A1_ISR(void)	Detecta chegada de dados na UART e os transfere para um buffer
void Timer_A (void)	Interrupção para contagem de tempo

Fonte: O Autor, 2017

4.4 CAMADAS DO *FIRMWARE*

Para fins de estruturação, o *firmware* é organizado em um diagrama de camadas. A diagrama base utilizado irá conter as seguintes camadas descritas na Figura 20.

Figura 20 - Camadas de composição do *firmware*



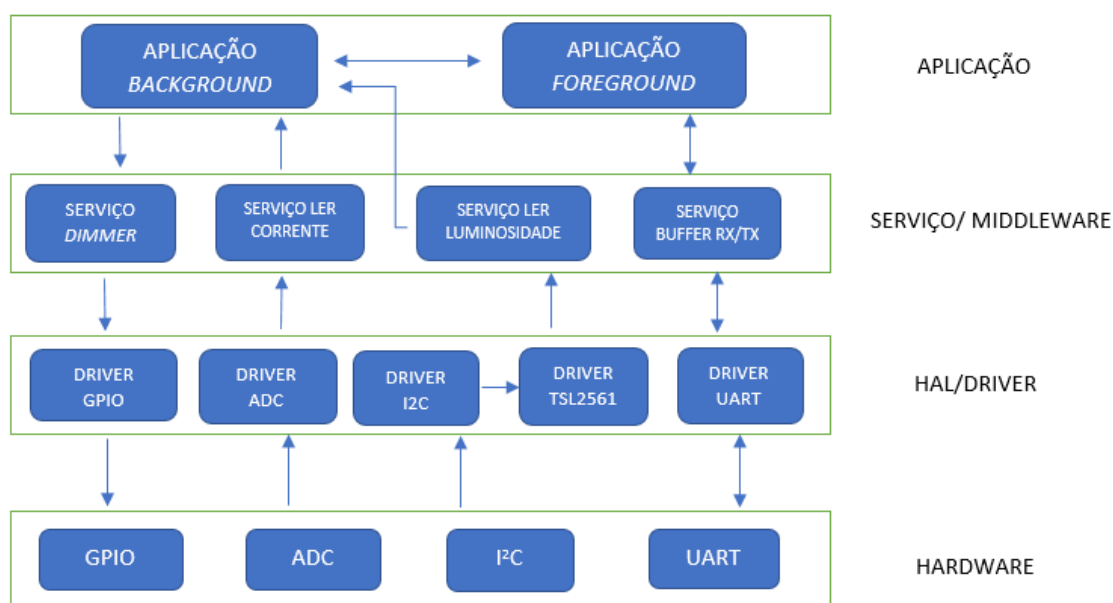
Fonte: ROSSI, 2015

Esse sistema é organizado de forma hierárquica, para que cada camada ofereça serviços para a camada acima e atue como um cliente para a camada abaixo (ROSSI, 2015). As interações entre as camadas são feitas, em sua maioria, por meio de funções.

As duas primeiras camadas, *Hardware* e *HAL/Driver*, são elementos particulares do microcontrolador que podem ser analisados na documentação técnica. Os níveis de serviço e aplicação, e as funções de interface das camadas, são definidos pela equipe de programação. A versão simplificada das camadas do sistema, visto na Figura 20, mostra os blocos e relações correspondentes. A partir das relações pode-se definir as funções de interface, sendo que as equipes responsáveis pela aplicação necessitam analisar detalhadamente os documentos técnicos do microcontrolador e dos periféricos escolhidos.

De posse das informações sobre as camadas, e dos *drivers* do microcontrolador da Figura 18, pode-se detalhar as camadas do *firmware* do sistema como visto na Figura 21. Esse detalhamento vai servir de base para determinação das funções de interface.

Figura 21 – Detalhamento das camadas de composição do *firmware*



Fonte: O Autor, 2017

4.5 FUNÇÕES DO *FIRMWARE*

Baseado nas camadas pode-se determinar os protótipos das funções de interface, disponíveis no Apêndice B. Mais funções podem, e devem ser incluídas dependendo da necessidade. No entanto tal tarefa de análise, além de ser complexa e extensa, é de responsabilidade da equipe de programação, sendo assim fugindo do escopo do trabalho.

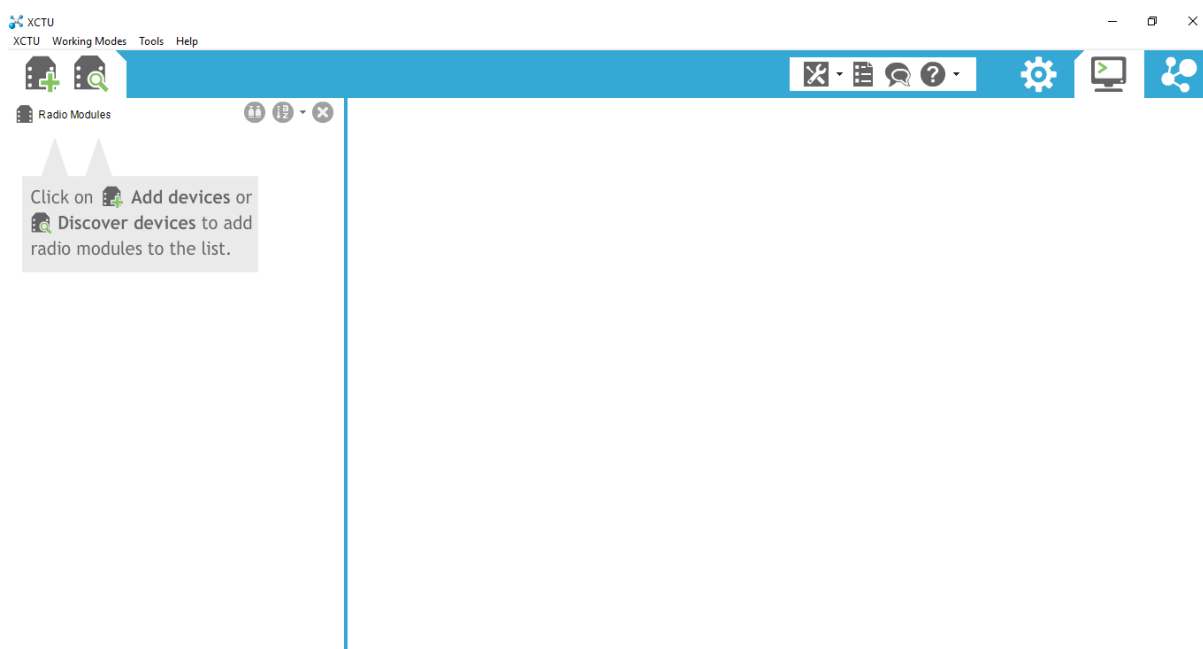
5 TESTES

Como mencionado, o principal item da rede é a comunicação. Por isso os testes cobrirão os aspectos de comunicação dos módulos XBee.

5.1 CONFIGURAÇÃO

O primeiro passo para os testes é a configuração dos módulos XBee. A configuração, bem como muitas outras atividades é feita pelo programa XCTU da Digi International, Figura 22.

Figura 22 - Ambiente do programa XCTU



Fonte: O Autor, 2017

Os módulos são configurados individualmente. Para os testes foram usados 4 módulos, sendo 1 coordenador e 3 roteadores. Existe a possibilidade de configurar módulos como *End-Devices*, no entanto esse tipo de módulo não realiza operações de roteamento. As configurações foram feitas de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros para configuração de módulos

Parâmetros	Coordenador	Roteadores
ID	2015	2015
JV	-	Enable

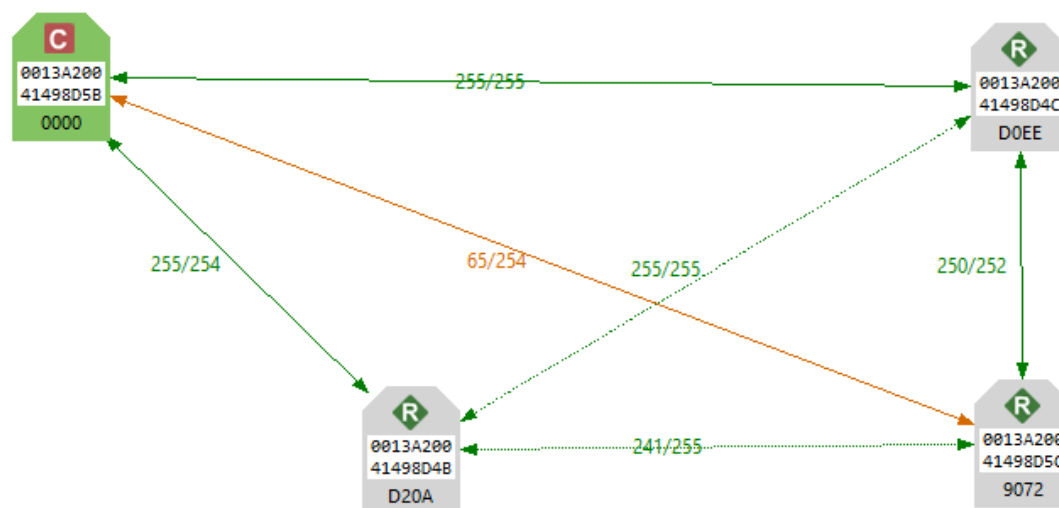
CE	Enable	-
NI	COORDENADOR	ROTEADOR
AP	Enable	Enable
SP	1F4	1F4
SM	-	-
SO	-	-

Fonte: O Autor, 2017

5.2 ROTEAMENTO DA REDE

Após a configuração foi verificado o roteamento da rede. Se pelo menos um módulo estiver conectado no software XCTU, é possível ver todos os outros que estão conectados à rede que ele pertence. Na Figura 23 pode ser visto as conexões da rede, com os módulos distribuídos de forma aleatória.

Figura 23 - Conexões da rede Zigbee com 4 módulos



Fonte: O Autor, 2017

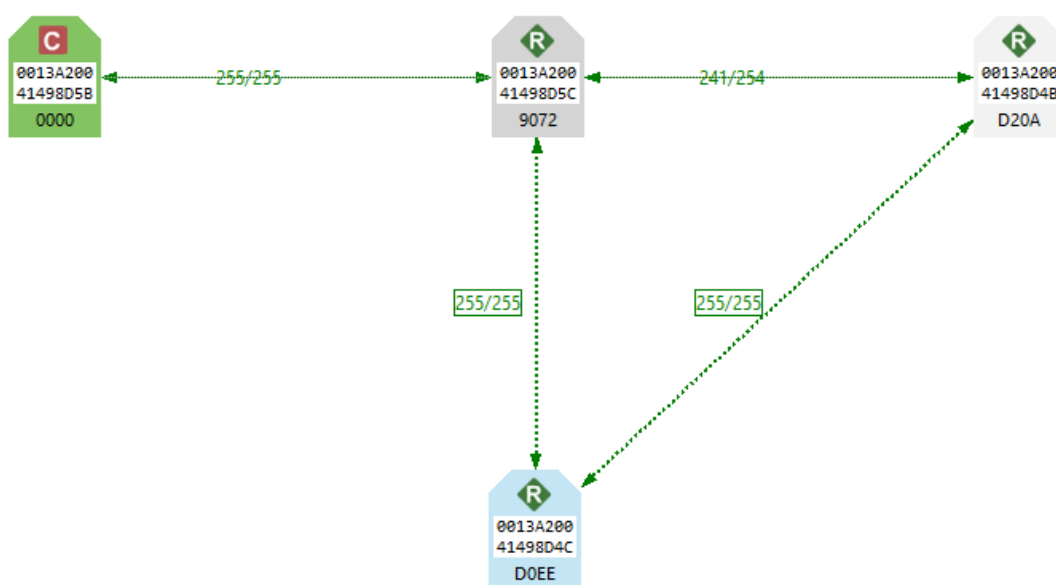
Da Figura 23 pode-se notar as informações básicas dos módulos como: Tipo, endereço de 64 bits e endereço de 16 bits. Para o modo API e envio de dados através da rede o endereço usado é o de 64 bits.

A outra informação é a quantidade de conexões e a qualidade de cada uma, que varia de 0 a 255. A informação da qualidade da conexão é usada pelo protocolo de roteamento da rede para definir qual o melhor caminho dos dados.

É de extrema importância notar a característica básica das redes *mesh*, que consiste nas múltiplas ligações entre seus componentes. Com isso, mesmo que um dos elementos apresente problema, a rede refaz o roteamento dos dados e continua funcionando. Da mesma forma, se surgir um elemento novo, a rede faz sua detecção e cria uma rota para o mesmo.

A pior situação para este tipo de rede é quando a distribuição dos equipamentos não permite conexões redundantes, como no caso da Figura 24 onde os módulos foram afastados de forma a apenas um roteador ficar ao alcance do coordenador.

Figura 24 - Exemplo de rede pouco robusta



Fonte: O Autor, 2017

No entanto, espera-se que casos como o da Figura 24 sejam raros ou inexistentes dado o estudo feito a respeito das características das redes de iluminação pública. As luminárias estarão dispostas de forma que ao menos duas sempre estejam ao alcance de uma, aumentando a robustez da rede.

5.3 ENVIO DE DADOS

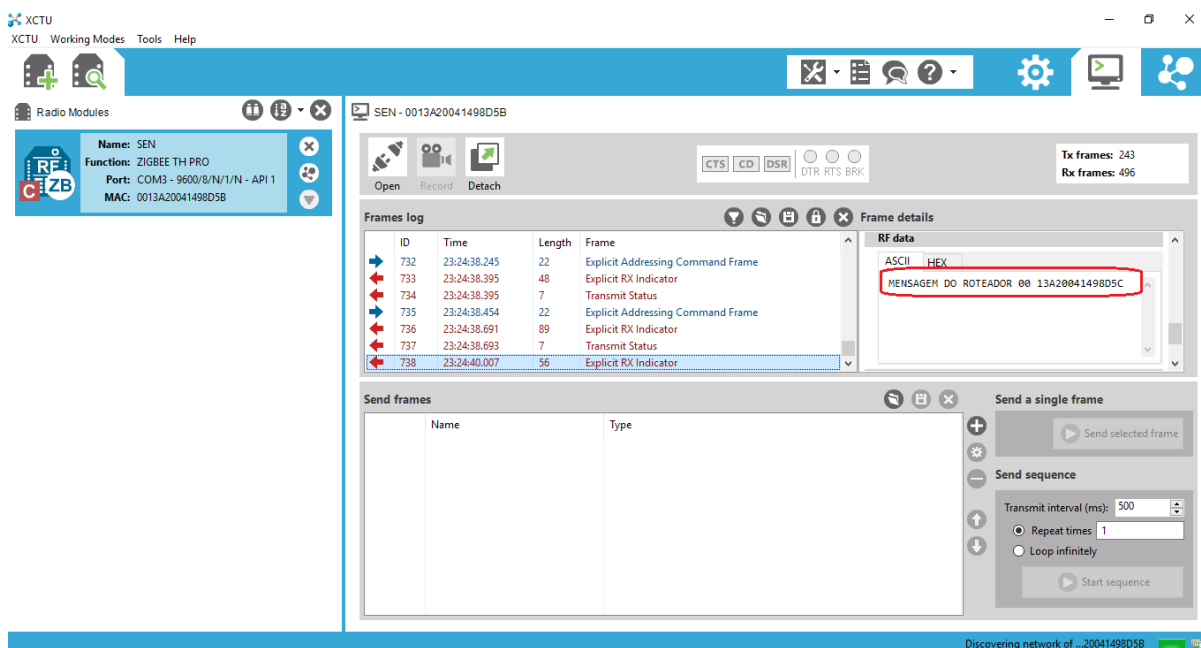
Para simular uma operação da rede, um dado foi enviado de um componente para outro, neste caso do roteador com endereço 0013A20041498D5C, para o coordenador da rede. O datagrama é criado com uma ferramenta do próprio software XCTU, exemplificado na Figura 25, onde foi criado uma mensagem.

Figura 25 - Criação de datagrama para teste

Fonte: O Autor, 2017

Depois de enviar o datagrama do roteador foi verificado o log de frames do coordenador e verificado que a mensagem foi recebida pelo coordenador, como visto na Figura 26.

Figura 26 - Datagrama recebido no destino



Fonte: O Autor, 2017

Como pode ser visto, desde que um elemento esteja conectado na rede, ele pode enviar e receber mensagens dos outros elementos.

As mensagens enviadas serão compostas pelo protocolo específico da rede, sendo que os endereços de 64 bits dos equipamentos devem ser conhecidos previamente. Os endereços podem ser encontrados na parte inferior dos módulos XBee.

6 CONCLUSÃO

A iluminação pública é um dos grandes componentes da sociedade, contribuindo para segurança e cidadania. Devido a sua presença e importância não é surpresa que existam diversas ideias para melhorar o sistema, seja aumentando sua eficiência, diminuindo o consumo de energia ou simplesmente agregando serviços.

Verificar remotamente o funcionamento e controlar a intensidade das luminárias consiste em um grande avanço no modelo atual de gestão da iluminação pública. Este trabalho apresentou uma opção para implementação de tal tipo de sistema onde a comunicação das luminárias é sem fio. Após uma análise, foi verificado que a melhor opção foi usar a tecnologia Zigbee na configuração malha ou *mesh*.

Além da tecnologia de comunicação, foi proposto um sistema de iluminação completo, desde a lâmpada passando pelo acendedor até a circuito de controle.

Vale ressaltar que a título de projeto, o sistema proposto atende os requisitos propostos. Os próximos passos, que podem ser tratados em trabalhos futuros, consistem nos testes de campo com um número grande de equipamentos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCURRA, Rodrigo Esteves. **Eficiência Elétrica em Iluminação Pública Utilizando Tecnologia LED: Um Estudo de Caso**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Cuiabá, 2013.

ACS712. **Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. Allegro MicroSystems. Disponível em: < <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs.aspx>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

COCEIÇÃO, César Stallbaum. **Da revolução industrial à revolução de informação: Uma análise evolucionária da industrialização da América Latina**. 2012. Tese (Pós-Graduação em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DESIGNSPARK. **11 Internet of Things (IoT) Protocols You Need to Know About**. Disponível em: < <https://www.rs-online.com/designspark/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about> >. Acesso em: 3 mar. 2017.

DIGI. **Frame Structure**. Publicado online. Disponível em: < <http://docs.digi.com/display/RFKitsCommon/Frame+structure> >. Acesso em: 21 jul. 2017

DIGI. **Wireless Mesh Networking Zigbee vs. DigiMesh**. Disponível em: < https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2017.

DIGI. **Zigbee RF Modules**. Publicado online. Disponível em: < <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf> >. Acesso em: 16 jun. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro, 2013.

FILIFELOP. **Sensor de Luz TSL2561 Lux Luminosidade**. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-152bd1-sensor-de-luz-tsl2561-lux-luminosidade.html>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

GRUPO CTAGEO. **Cadastro de Iluminação Pública**. Disponível em: < <http://www.grupecta.com.br/cadastro-de-iluminacao-publica.php> >. Acesso em: 9 mai. 2017.

IFSC. **COMUNICAÇÃO XBEE**. WIKI IFSC. Disponível em: < http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php?title=COMUNICA%C3%87%C3%83O_XBEE&oldid=84875 >. Acesso em: 15 mai. 2017.

IPV6BR. **Zigbee usa agora 6LoWPAN! Sua próxima lâmpada terá IPv6?** Disponível em: < <http://ipv6.br/post/zigbee-usa-agora-6lowpan-sua-proxima-lampada-tera-ipv6/> >. Acesso em: 9 jul. 2017.

LOJA ENERGIA EXTRA. **Luminária Solar integrada dupla para poste 3 a 4 m**.

Disponível em:

<http://www.nobreakcerto.com.br/loja/produto.php?loja=404854&IdProd=38&parceiro=3266&gclid=CjwKEAjwJPXIBRDhwICRg-DbgHISJADP6QXpPsu5uWpNbsT6mB_T8kaw28HKxDJ2zf9XqacUh_LQzhoCkWPw_wcB>. Acesso em: 20 abr. 2017.

Micrium. **µC/OS-III Documentation**. Disponível em: <

<https://doc.micrium.com/display/osiidoc/Foreground-Background+Systems>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

MSP430FR59XX. **Mixed-Signal Microcontrollers**. Texas Instruments. Disponível em: < <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr5969.pdf> >. Acesso em: 5 jun. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA. **Iluminação pública**. Disponível em: < <http://www.vitoria.es.gov.br/cidade/iluminacao-publica> >. Acesso em: 13 mar. 2017.

PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Iluminação**. Rio de Janeiro, 2011.

ROSSI, Henrique Persico. **Arquitetura de Software em Sistemas Embarcados**. Publicado em 26 jan. 2015. Disponível em: < <https://www.embarcados.com.br/arquitetura-de-software-em-sistemas-embarcados/> >. Acesso em: 3 jul. 2017.

STOLL, George R. **O QUE É ESTE TAL DO ZIGBEE**. Smart Utilities Networks. Disponível em: < http://www.mecomp.com.br/rumo/o_que_e_este_tal_do_zigbee_3_.pdf >. Acesso em: 20 mai. 2017.

TELECO. **Zigbee: O que é.** Disponível em: < http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/pagina_3.asp >. Acesso em: 8 jun. 2017.

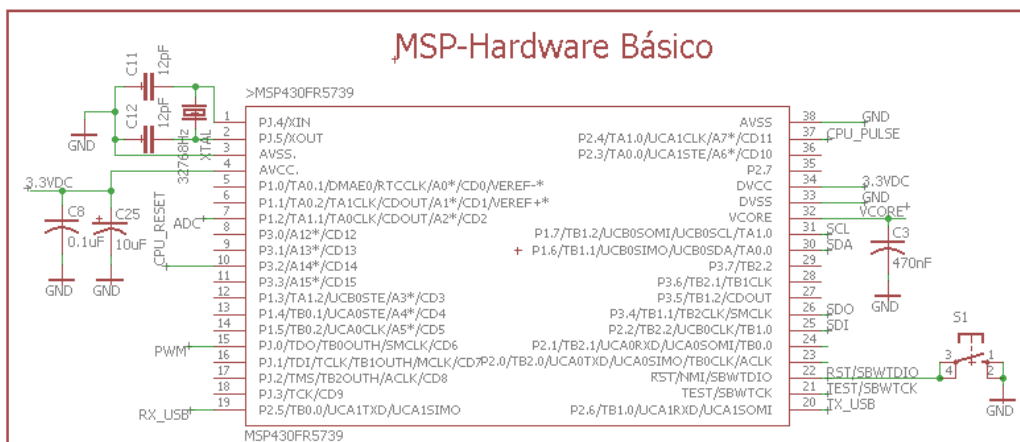
TELIKO. **Iluminação pública inteligente.** Disponível em: < <http://teliko.com.br/visao-geral/7/iluminacao-publica-inteligente> >. Acesso em: 30 out. 2016.

TOMAS, Gustavo Henrique Rodrigues Pinto. **Uma arquitetura para cidades inteligentes baseada na internet das coisas.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

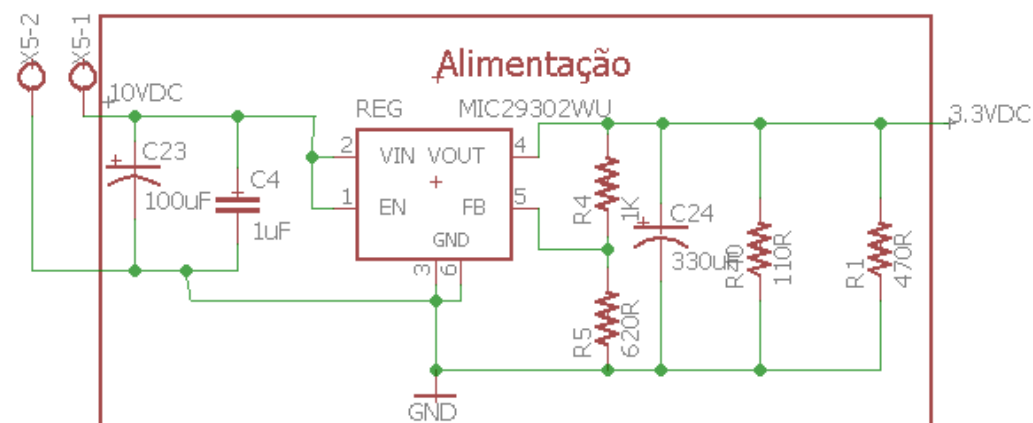
TSL2561. **Light-to-Digital Converter.** Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc. Disponível em: < <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf> >. Acesso em: 20 jun. 2017.

APÊNDICE A

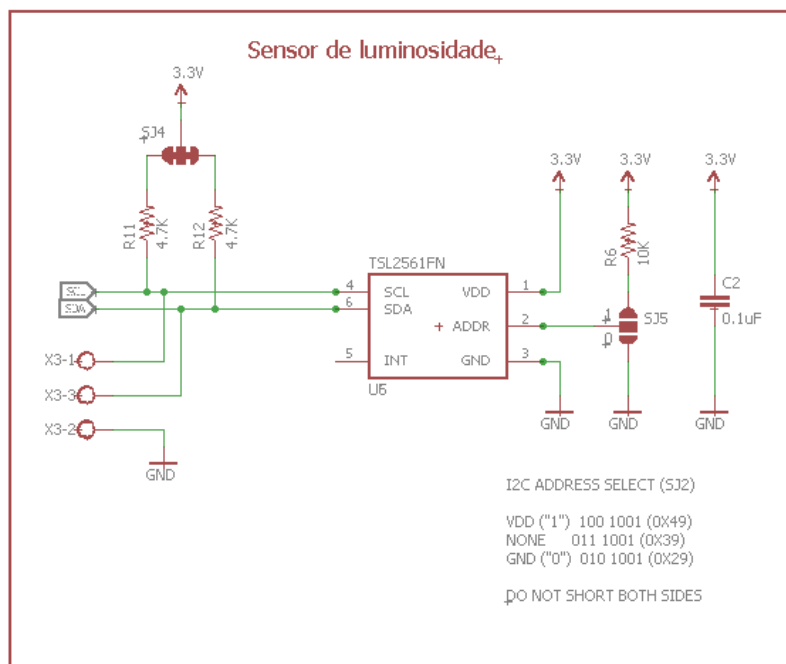
MSP-Hardware Básico

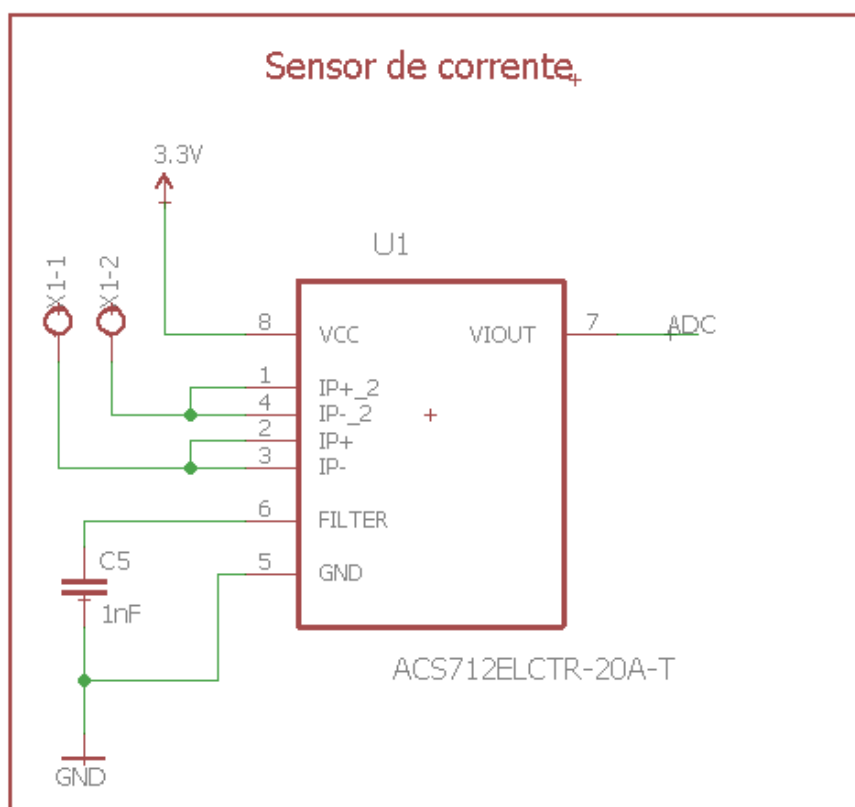
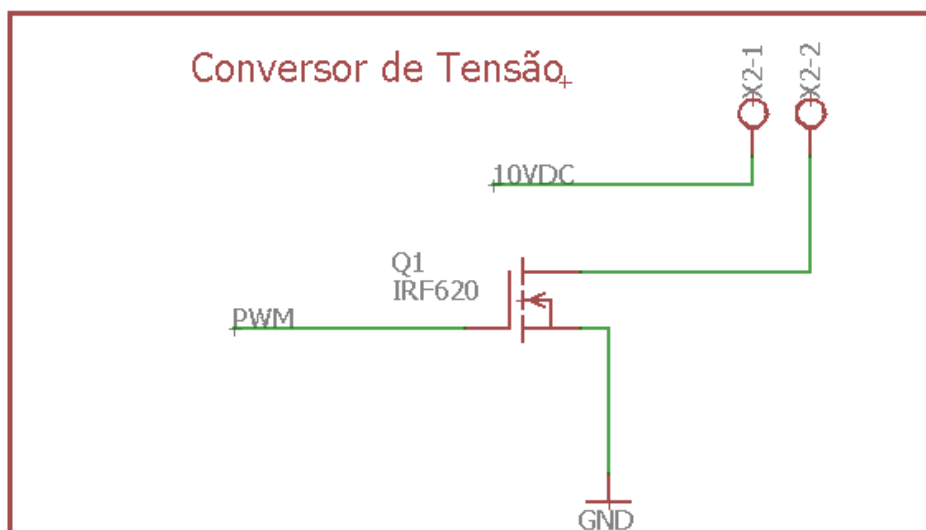


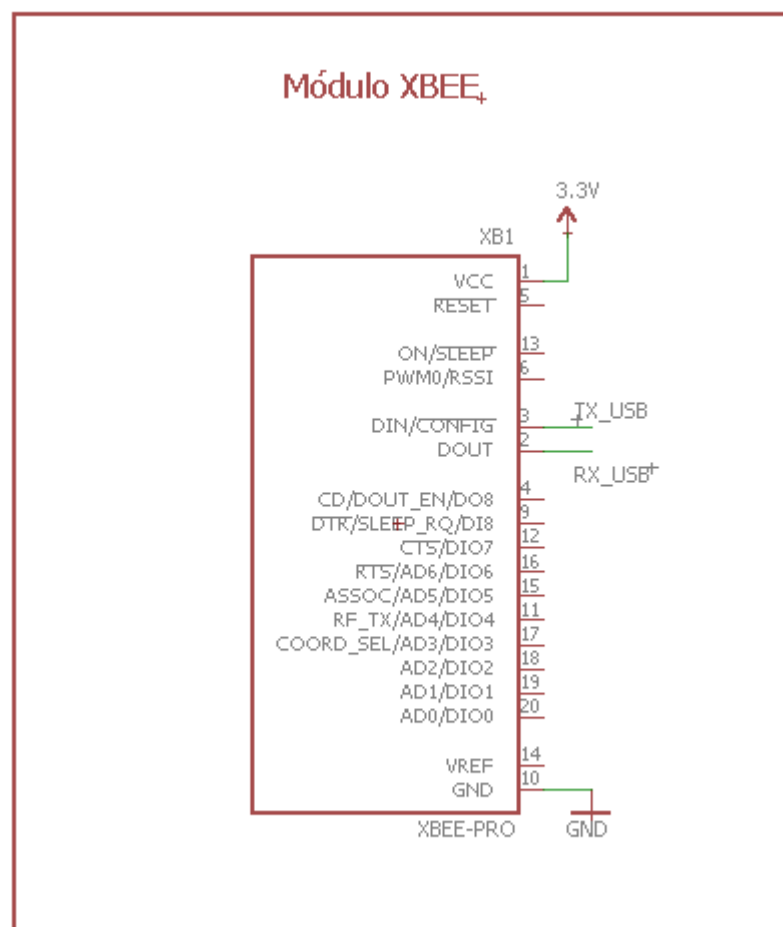
Alimentação



Sensor de luminosidade







APÊNDICE B

DIMMER	Aplicação	void init_pwm(void)	Contém a configuração dos parâmetros necessários ao funcionamento do
		void atualizar_duty_cycle(int porcentagem)	Atualiza o valor do duty cycle (período de funcionamento) do PWM
	Serviço	void init_pwm_registers(void)	Contém os registradores e configurações do PWM
		void update_duty_register(int n)	Contém o registrador responsável por controlar o período de funcionamento do PWM
COMUNICAÇÃO	Aplicação	void send_command_XBEE(int command_number)	Envia comando para o módulo baseado na lista de comandos disponíveis
		void init_UART(void)	Configuração de parâmetros para comunicação UART
		void send_frame(unsigned char *ptr)	Envia um frame de dados pela UART
	Serviço	int putchar(int c)	Envia um byte pela UART
		int puts(char *ptr)	Envia um conjunto de dados pela UART
		int serial_available(void)	Retorna o número de bytes que podem ser lidos do buffer
SENSOR DE LUZ	Aplicação	char serial_read(void)	Usado para ler um byte do buffer de entrada
		void init_sensores_lux(unsigned char addr_sensor_lux_1, unsigned char addr_sensor_lux_2)	Chamada para configurar os sensores de luminosidade
		void power_on_ts12561(unsigned char addr_sensor_lux)	Configura e inicia o sensor de luminosidade
		int read_sensor_lux(unsigned char addr_sensor_lux, unsigned char channel)	Le o valor de leitura do sensor
	Serviço	int calculate_lux(unsigned char addr_sensor_lux, unsigned int iGain, unsigned int tint, int iType)	Calcula o valor de luminosidade com base nas leituras do sensor
		void i2c_init(void)	Configura os registradores de comunicação I2C
		unsigned char i2c_read(unsigned char n)	Le o buffer de entrada do barramento I2C
		void i2c_write(unsigned char data)	Escreve no buffer de saída do barramento I2C
		void i2c_start(unsigned char rw)	Envia o sinal de START de comunicação
		void i2c_stop(void)	Envia o sinal de STOP de comunicação
SENSOR DE CORRENTE	Aplicação	void init_sensor_corrente(void)	Configuração do sensor de leitura de corrente
		unsigned int get_corrente(void)	
	Serviço	void init_adc(void)	Configuração do conversor analógico digital
		void stop_adc(void)	Pára o processo de conversão
		unsigned int get_adc(void)	Inicia o processo de amostragem e retorna valor lido