

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

CHRISTIAN ALESSI

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO KNX REGULADOR DE
LUMINOSIDADE**

CAXIAS DO SUL

2016

CHRISTIAN ALESSI

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO KNX REGULADOR DE
LUMINOSIDADE**

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia de Controle e Automação na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Ms. Ricardo Leal Costi.

CAXIAS DO SUL

2016

CHRISTIAN ALESSI

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO KNX REGULADOR DE
LUMINOSIDADE**

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia de Controle e Automação na Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 07/12/2016

Banca Examinadora

Prof. Ms. Ricardo Leal Costi
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Fernando Augusto Bender
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Stanislav Tairov
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da sabedoria e por me possibilitar alcançar esta fase importante da graduação em Engenharia de Controle e Automação; pela força e energia em persistir diante das dificuldades; por encontrar as pessoas certas que me auxiliaram durante o projeto e por garantir que eu tomasse todos os cuidados para não dar margem ao azar durante a implementação do protótipo.

Agradeço imensamente aos meus pais, Nestor e Neiva, pelo dom da vida, pela educação, pelo espírito empreendedor, vencedor e de superação que souberam transmitir como exemplo. Agradeço por me apoiarem na escolha do curso, por me darem as melhores condições de estudo, por oferecem tudo e muito mais do que uma pessoa precisa para ser bem sucedida. Sou grato pela compreensão nos momentos de dedicação exclusiva ao projeto de TCC 1 e 2, e por todo o suporte moral que tive para conduzir bem ambos os trabalhos. Eles foram e são as pessoas mais importantes da minha vida.

À minha irmã, Janine, agradeço imensamente por abraçar a causa da educação comigo e me apoiar em tudo que faço, seja no âmbito acadêmico ou profissional. Suas correções e ponderações sobre o meu trabalho escrito foram essenciais para o meu crescimento e o sucesso deste projeto. Espero retribuir cada segundo que ela dedicou à troca de ideias comigo, seja na infância, na adolescência ou na fase adulta, quando nossas discussões críticas nem sempre convergiram, mas todas levaram ao amadurecimento de ambos.

Agradeço à minha namorada Larissa pela compreensão, pelo carinho, pela maneira como sempre buscou o melhor para mim. Por todas as vezes que abriu mão de outros afazeres para me dar suporte, acompanhar minha evolução, ouvir minhas reclamações, corrigir os textos e me acompanhar, de maneira geral, nessa jornada de conclusão de curso. A ela, o meu amor e agradecimento.

Ao meu Professor Orientador Ricardo Leal Costi, agradeço pelo acompanhamento e suporte indispensável durante o TCC. As suas observações, ponderações, sugestões de melhoria, abordagem de conteúdo e organização do trabalho foram fundamentais para que o relatório pudesse ser bem redigido. Seus conhecimentos de campo e experiência foram de fundamental importância para se chegar às soluções de produto encontradas, as quais sempre tiveram embasamento técnico, tecnológico e comercial, buscando o profissionalismo e a melhor qualidade.

Por ceder componentes eletrônicos, ferramentas de trabalho, materiais diversos e até realizar compras no exterior, também fica a minha gratidão.

Agradeço à empresa alemã Opternus GmbH por ceder uma amostra da placa PCB TP-UART contendo o transreceptor KNX-UART. Essa placa desempenha papel crucial na implementação do protocolo KNX e, por isso, a menção honrosa. Junto à Opternus, devo estender os agradecimentos ao Centro de Treinamento KNX DOMONETIO, da Espanha, por receber a PCB enviada gratuitamente da Alemanha. Ao colega Leandro Oliveira, sou grato pelo enorme favor em trazer a placa com o *transceiver* para o Brasil, chegando, por meio de caixa postal, em minhas mãos.

Ao amigo Altamiro Mattana, agradeço pelo suporte durante a fase de montagem do protótipo. Ele foi o responsável pela operação das máquinas CNC que usinaram o interior da caixa plástica utilizada e também o orientador nos processos de furação, acabamento e fixação das peças.

A todos que de alguma forma colaboraram com ideias, material científico, peças, componentes ou simplesmente com palavras de incentivo, estendo o meu cordial agradecimento.

RESUMO

As soluções energeticamente eficientes ganharam força nos últimos anos e se tornaram prioridade dentro do contexto de desenvolvimento tecnológico. No âmbito da automação predial e residencial não é diferente, e o protocolo KNX é protagonista em termos de soluções baseadas em economia de energia, como na gestão inteligente da iluminação. O KNX, originário da Europa, possui abrangência internacional e hoje é o maior protocolo aberto do mundo para automação de casas e edifícios, trazendo como benefícios conforto, acessibilidade, integração de sistemas e, mais importante, aproveitamento de recursos naturais, como a luz. Por esse motivo, o presente trabalho objetiva a implementação de um protótipo de dispositivo KNX regulador de luminosidade por saída analógica de 0 a 10V, para trocar dados com outros dispositivos e controlar a luminosidade ambiente automaticamente, aproveitando a luz natural e economizando energia. O desenvolvimento do dispositivo passou por etapas de projeto de *hardware*, que incluem: o esquemático eletrônico, o *layout* das placas de circuito impresso, o desenho assistido por computador do protótipo e a construção das placas eletrônicas; bem como por etapas de implementação de *firmware*, como a pilha do protocolo KNX e as funções de comutação, regulação, valor e controle automático de luminosidade (por meio de lógica *Fuzzy*). Ao final, foi realizada a montagem do produto em caixa padrão trilho DIN, incluindo a fixação das placas, o posicionamento dos bornes/conectores e a identificação visual. Para a interoperabilização do dispositivo implementado, foi realizada a programação de *software* de um sistema KNX. Com o produto concluído e um sistema KNX disponível, foi possível testar as funcionalidades do protótipo, o qual foi capaz de comutar e regular a intensidade luminosa de um sistema de *driver* + lâmpada de diodo emissor de luz via sinal analógico de 0 e 10V a partir de um comando KNX. Em termos de eficiência energética com o protótipo desenvolvido, um experimento com regulação de iluminação constante evidenciou uma redução de 69,9% no consumo de energia durante um período de 5 horas e 30 minutos com aproveitamento de luz natural. Isso mostra um resultado satisfatório com relação ao projeto implementado, que apresenta apelo à economia de energia e à integração numa das principais redes inteligentes de instalações prediais no mundo, o KNX. O trabalho, como um todo, proporcionou conhecimentos em áreas diversas e, hoje, possibilita a futura certificação do produto junto a Associação KNX e o desenvolvimento de projetos inovadores na área de automação predial e residencial.

Palavras-chave: Norma KNX. Protocolo. Telegrama. Regulação de iluminação. Comunicação.

ABSTRACT

Energy-efficient solutions gained ground in past years and they have become priority into the technological development context. In the field of home and building automation, it is not different, and KNX protocol is leading energy save based solutions, like in lighting management. Original from Europe, the KNX has international reach and it is the worldwide standard for home and building control, bringing benefits like comfort, accessibility, system integration and, most important, using natural resources like the sun light. For this reason, the target of this coursework conclusion is to implement a lighting regulator KNX device using analog output channel from 0 to 10V, changing data among other certified devices, controlling environment lighting automatically, using sun light and saving energy. The device's development had some hardware steps like the electronic diagram, the design of printed circuit boards, the computer assisted design of entire product and the assembly of manufactured circuit boards. This project had also firmware steps like the development of KNX stack as well as the switching, dimming, value and automatic control functions (using Fuzzy logic). At the end, the components were packed into a plastic standard box for DIN rail, the boards were fixed, connectors were established and a visual identification was provided. A KNX system was programed to evaluate interoperability of the implemented device. Having both, device manufactured and KNX system available, it was possible to check the prototype's functionalities, evidencing the ability of switching and dimming light intensity of a driver plus light diode emitter lamp through analog signal. In terms of energy efficiency regarding to the developed device, a test of constant light control pointed 69,9% of saving energy consumption during five and a half hours of using natural light. The test have shown positive results regarding to the implemented project, which has an appeal for energy saving and also to the integration in one of the most important intelligent worldwide systems for home and building control, the KNX. The entire project has provided knowledge in lots of areas and now it makes possible to achieve new challenges like product certification in KNX Association and also development of innovative projects in the field of home and building automation.

Key-words: KNX Standard. Protocol. Telegram. Light control. Prototype development. Communication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2014.....	17
Figura 2 – Desperdício de energia por classe de consumidor, em bilhões de reais..	18
Figura 3 – Estrutura do sistema KNX	25
Figura 4 – Topologia em Conjunto de Áreas KNX.....	28
Figura 5 – Períodos envolvidos no envio de telegrama KNX	29
Figura 6 – Estrutura de telegrama KNX.....	30
Figura 7 – Decodificação de telegrama KNX.....	32
Figura 8 – Constituição de um dispositivo de BUS.....	33
Figura 9 – Diagrama de blocos da TP-UART	34
Figura 10 – Diagrama de ligação do <i>hardware</i> a ser implementado	36
Figura 11 – Placa BTM com <i>transceiver</i> KNX TP-UART	37
Figura 12 – Circuito de energização do protótipo	39
Figura 13 – Circuito de ligação do microcontrolador	41
Figura 14 – Circuito RC para filtro passa-baixas	43
Figura 15 – Diagrama de Bode do filtro passa-baixas RC.....	44
Figura 16 – Circuito de saída analógica 0 a 10V.....	45
Figura 17 – Circuito de saída a relé SSR	47
Figura 18 – Circuito de acionamento manual.....	49
Figura 19 – Projeto de <i>Hardware</i> : Atuador KNX.....	50
Figura 20 – Fluxograma lógico de implementação de dispositivo atuador KNX.....	53
Figura 21 – Recebimento de telegrama pelo MCU via UART	56
Figura 22 – Dados úteis em um telegrama KNX com DPT <i>Dim Step</i>	57
Figura 23 – Funções de pertinência da intensidade luminosa.....	59
Figura 24 – Sistema KNX utilizado para comunicação de dispositivos	61
Figura 25 – Diagrama físico e lógico do sistema KNX.....	61
Figura 26 – Tela desenvolvida na interface gráfica KNX Z41 ZENNIO	62
Figura 27 – Caixa PATOLA modelo DIN 62x72x52 T.I.	64
Figura 28 – <i>Layout</i> projetado das PCBs.....	65
Figura 29 – Projeto tridimensional das PCBs	66
Figura 30 – Vista explodida do projeto de montagem	67
Figura 31 – Projeto de montagem em CAD.....	68
Figura 32 – PCBs confeccionadas	68

Figura 33 – PCBs montadas	69
Figura 34 – Componentes de <i>hardware</i> implementados e protótipo montado	69
Figura 35 – Arte de adesivo informativo	70
Figura 36 – Dispositivo KNX implementado	70
Figura 37 – Formas de onda da saída analógica para comutação e regulação	73
Figura 38 – Formas de onda do sinal PWM e da saída analógica	75
Figura 39 – Principais equipamentos utilizados no experimento	75
Figura 40 – Montagem do experimento de regulação de iluminação constante.....	76
Figura 41 – Resultados de experimento com regulação de iluminação constante	77
Figura 42 – Saída analógica do atuador <i>dimmer</i> e potência consumida pela carga .	78
Figura 43 – Energia ativa acumulada no sistema experimentado	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Meios de Transmissão KNX	24
Tabela 2 – Endereços de Grupo da interface sensível ao toque	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
AC	Corrente Alternada
ACK	Recepção Correta (<i>Acknowledge</i>)
AM	Módulo de Aplicação
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padronização
AP	Automação Predial
APCI	Informação de Controle do Protocolo da Camada de Aplicação
A-PDU	PDU da Camada de Aplicação
APR	Automação Predial e Residencial
AR	Automação Residencial
BC	Acoplador de Área (<i>Backbone Coupler</i>)
BCU	Unidade de Acoplamento ao Barramento (<i>Bus Coupling Unit</i>)
BTM	Módulo <i>Transceiver</i> de Barramento (<i>Bus Transceiver Module</i>)
BUS	Barramento
BUSY	BUS Ocupado
CAD	Desenho Assistido por Computador
CD	Condição Desejada
CEN	Comitê Europeu de Normas
CENELEC	Comitê Europeu para Padronização Eletrotécnica
CI	Circuito Integrado
CN	Condição Negativa
CP	Condição Positiva
DC	Corrente Contínua
DPT	Tipo de Pontos de Dados
DVC	Dispositivos de BUS
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETS	<i>Engineering Tool Software</i>
GA	Endereço de Grupo (<i>Group Address</i>)
GND	Nível Lógico de Referência
GO	Objeto de Comunicação / Objeto de Grupo (<i>Group Object</i>)
I _C	Corrente de Coletor

ICSP	Programação Serial em Circuito
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IP	Protocolo de Internet
ISO	Organização Internacional para Padronização
LC	Acoplador de Linha (<i>Line Coupler</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz
MCU	Microcontrolador
NACK	Recepção Incorreta (<i>Negative Acknowledge</i>)
N-PDU	PDU da Camada de Rede
Op Amp	Amplificador Operacional
PA	Programa de Aplicação
PCB	Placa de Circuito Impresso
PDU	Unidade do Protocolo de Dados
PEI	Interface Externa Física
PR2	<i>Preset do Timer 2</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RC	Resistivo-Capacitivo
Req	Resistência equivalente
RF	Rádio Frequência
Rx	Recepção de Dados
SAC	Padronização Administrativa da República Popular da China
SAPR	Sistemas de Automação Predial e Residencial
SSR	Relé de Estado Sólido (<i>Solid State Relay</i>)
T-PDU	PDU da Camada de Transporte
TRIAC	Triodo de Corrente Alternada
Tx	Transmissão de Dados
UART	Transmissor e Receptor Assíncrono Universal
UDP	Pacote de Dados Não Numerado
USB	Barramento Serial Universal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
1.1.1	Eficiência energética	16
1.1.2	Padrão mundial para controle de casas e edifícios – o KNX	19
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	ÁREA DE TRABALHO	22
1.4	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	23
1.5	SÍNTESE	23
2	NORMA KNX	24
2.1	COMUNICAÇÃO	25
2.1.1	Objetos de comunicação	27
2.1.2	Tipo de ponto de dados	27
2.2	TOPOLOGIA	28
2.3	TELEGRAMA	29
2.4	DISPOSITIVOS DE BUS	33
2.5	ETS	34
2.6	CERTIFICAÇÕES	35
2.7	SÍNTESE	35
3	PROJETO DE HARDWARE	36
3.1	TRANSRECEPTOR E MICROCONTROLADOR	37
3.2	MÓDULO DE APLICAÇÃO	41
3.2.1	Saída analógica	42
3.2.2	Saída a relé	46
3.3	OUTROS COMPONENTES DE HARDWARE	48
3.4	SÍNTESE	49
4	PROJETO DE <i>FIRMWARE</i> E DE <i>SOFTWARE</i>	51
4.1	INTERFACE DE PROGRAMAÇÃO, COMPILADOR C E GRAVAÇÃO	51

4.2	VISÃO GERAL: FUNCIONALIDADE E FLUXOGRAMA	52
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO <i>FIRMWARE</i>	54
4.3.1	Configurações gerais	54
4.3.2	Recepção de telegramas	55
4.3.3	Comando comutar e valor	56
4.3.4	Comando regular	56
4.3.5	Comando automático	57
4.3.6	Envio de telegramas	59
4.4	PROGRAMAÇÃO DE <i>SOFTWARE</i> – SISTEMA KNX.....	60
4.5	SÍNTESE	63
5	PROJETO CONSTRUTIVO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO	64
5.1	PROJETO DA PCB.....	65
5.2	MODELAGEM DO PROTÓTIPO EM CAD	66
5.3	CONFECÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	68
5.4	ADESIVO DE IDENTIFICAÇÃO	70
5.5	SÍNTESE	71
6	ANÁLISE CRÍTICA DO PROTÓTIPO	72
6.1	FUNCIONALIDADES.....	72
6.2	CONFIABILIDADE DO <i>HARDWARE</i>	74
6.2.1	Repetibilidade na recepção e transmissão de telegramas	74
6.2.2	Fidelidade do <i>hardware</i> da saída analógica	74
6.3	EXPERIMENTO COM REGULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO CONSTANTE.....	75
6.4	SÍNTESE	79
7	LIMITAÇÕES DO PROJETO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
8	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES ELETRÔNICOS	88
	APÊNDICE B – AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO DO COMPILADOR CCS	89

APÊNDICE C – PARAMETRIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS KNX VIA ETS.....	90
APÊNDICE D – MEMORIAL FOTOGRÁFICO: MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	94
APÊNDICE E – ESQUEMÁTICO DE LIGAÇÃO DO DISPOSITIVO	98

1 INTRODUÇÃO

Com o emergente mundo da tecnologia eletrônica, houve uma importante evolução nos sistemas de telecomunicações e redes de dados desde a década de 1990. Muitas barreiras geográficas puderam ser vencidas com esse avanço e, hoje, é possível promover o desenvolvimento social e econômico de forma sustentável com competitividade (BOLZANI, 2004).

Trata-se da revolução do mundo das Engenharias da Computação, da Tecnologia da Informação, da Elétrica/Eletrônica e da Automação, que anda numa velocidade exponencial rumo ao desenvolvimento de novos produtos para atender as necessidades das pessoas (BOLZANI, 2004). É nesse cenário que está inserida a sociedade atual, onde o fluxo de informação é constante, a possibilidade de pesquisa é infinita e os processos são cada vez mais automatizados.

Dentro dessa perspectiva, surgem os conceitos de automação residencial (AR) e automação predial (AP), responsáveis por inserir nas instalações prediais e residenciais toda a tecnologia embarcada já desenvolvida. Essas aplicações de automação, da mesma forma que a evolução no mundo industrial e corporativo, vêm para trazer conforto, otimizar recursos e proporcionar controle supervisionado, oferecendo segurança, praticidade e acessibilidade para os seus usuários, principalmente no caso de deficientes e idosos.

Desde o surgimento dos primeiros sistemas de automação predial e residencial (SAPR), foram criados alguns protocolos¹ de comunicação como forma de regulamentação e padronização. Assim, o gerenciamento de casas e condomínios passou a ganhar alguns modelos de controle, entre os quais o KNX – o maior padrão aberto no mundo para gestão desse tipo de empreendimento (KNX ASSOCIATION, 2015).

A tecnologia KNX oferece soluções para as mais variadas aplicações e uma delas será objeto de estudo deste trabalho: a regulação de iluminação. O escopo inclui uma revisão dos conceitos do protocolo KNX, uma proposta de desenvolvimento de um produto compatível com a tecnologia e voltado para regulação de lâmpadas de

¹ As regras e convenções utilizadas em uma conversa é o que se chama de protocolo, o qual também pode ser definido como um acordo entre as duas partes da comunicação sobre como este processo irá proceder (TANENBAUM, 1996).

diodo emissor de luz (LED) e uma descrição de todas as etapas de implementação deste protótipo, incluindo os resultados.

Todas as atividades previstas para este trabalho serão concebidas por meio de consulta de material técnico e científico, simulação eletrônica e orientação de especialistas da área, e passarão por etapas de programação de microcontrolador (MCU), projeto de *layout* de placa de circuito impresso (PCB), montagem física dos componentes em PCB e fixação das placas em caixa padrão. Testes de interoperabilidade e verificações com osciloscópios serão realizados a fim de garantir o funcionamento do protótipo e a compatibilidade com a tecnologia KNX. Com esse processo, espera-se incentivar o uso dessa tecnologia nos projetos modernos, quantificar os benefícios trazidos com economia de energia e possibilitar o início da fabricação de produtos certificados² no Brasil.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Este trabalho visa abordar a implementação de um dispositivo KNX regulador de luminosidade para cargas de LED. Assim, para melhor explicar a motivação de realização do projeto, a seção foi dividida em duas partes: a primeira trata da eficiência energética como benefício trazido com a regulação de iluminação; a segunda, da justificativa para a escolha do protocolo KNX como tecnologia.

1.1.1 Eficiência energética

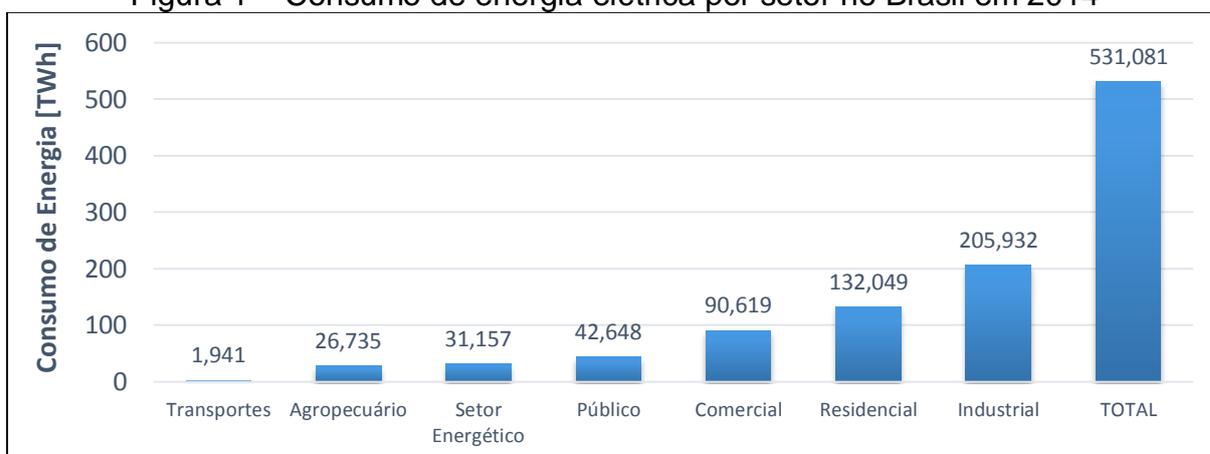
A expansão da utilização de energia elétrica representa uma economia em crescimento. Entretanto, há muitos fatores que ainda representam aspectos negativos dentro desse contexto, como a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais utilizados na geração de energia, o investimento elevado em pesquisa de novas fontes energéticas e a criação de novas usinas. Além disso, os impactos ambientais são muito grandes, uma vez que abrangem desde as usinas de produção até toda a cadeia de distribuição de energia (ANEEL, 2008).

² Produto certificado KNX é aquele cujo processo de fabricação acontece conforme as diretrizes do protocolo KNX, onde o produto é testado em laboratório e aprovado pela Associação KNX; ele também deve conter o selo KNX estampado, garantindo originalidade e compatibilidade com a tecnologia.

Segundo Santiago et al. (2003, p. 20), “Usar energia de forma inteligente e eficiente é conseguir produzir mais com menor quantidade desse insumo, mantendo a qualidade dos produtos e serviços e garantindo o conforto e a segurança.” O autor ainda cita aspectos positivos da eficiência energética do ponto de vista do cidadão, os quais compreendem a eliminação de desperdícios e redução de custos, a otimização de desempenho com o mínimo de consumo e a demonstração de atitude lógica e consciente na utilização de energia. No que tange ao país, essa postura representa otimização em investimentos no sistema elétrico, redução de custos para os consumidores e empresas, diminuição de impactos ambientais e indução a modernização e desenvolvimento do país. (SANTIAGO JR, *et al.*, 2003).

Hoje, no Brasil, cerca de 49,9% da energia elétrica produzida é consumida em edificações residenciais, públicas e comerciais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015). Considerando apenas o consumo residencial, segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2014, esse número fica acima de 24,8%. Além disso, o crescimento da taxa média de consumo de energia elétrica é de 6% ao ano, enquanto o aumento médio do consumo residencial corresponde a 7% ao ano (SILVA, 2013). A Figura 1 evidencia a grande representatividade que o consumo de energia elétrica residencial possui perante o cenário de energia atual e, se inserido juntamente com as edificações públicas e comerciais, sua expressão é ainda mais significativa (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015).

Figura 1 – Consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2014



Fonte: Elaborado pelo Autor, baseado em EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2015)

Outro fator que estimula a busca pela otimização na utilização de energia é o aumento nas tarifas. Segundo Maurício Tolmasquim, presidente da Empresa de

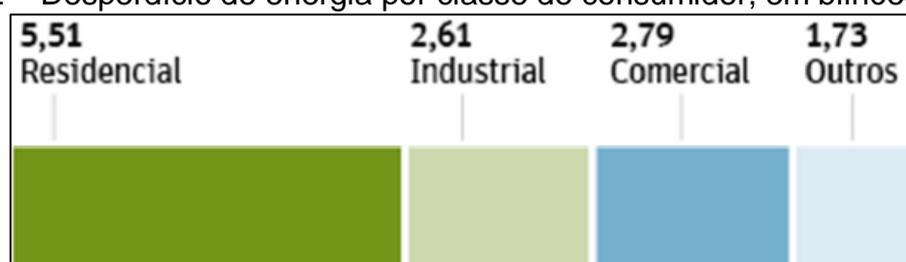
Pesquisa Energética (EPE), o ano de 2015 fechou com um aumento nas contas de energia elétrica que superou 50%. O especialista ainda garante que, para o ano de 2016, não há perspectiva de redução nas taxas cobradas, mas se espera que novos reajustes sejam feitos de acordo com a inflação prevista (OLIVEIRA, 2016).

Somado ao alto custo que a energia vem apresentando, o desperdício – considerado como a energia consumida atrelada a não geração de trabalho – é outro ponto importante a ser considerado. Linhares (2015) descreve a situação de desperdício vivenciada pelo Brasil no ano de 2014.

Levantamentos efetuados pela Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO) apontam que de toda a energia consumida no Brasil no ano de 2014, aproximadamente R\$ 12,64 bilhões foi desperdiçada, o que equivale a 10 % da energia consumida [...] (LINHARES, 2015, p. 13-14).

A representação da Figura 2 mostra a distribuição de desperdício por classe de consumidor. Deve-se notar a grande representatividade do setor residencial nesse cenário, que corresponde a aproximadamente 43,6% do total de desperdícios de energia no ano de 2014 (LINHARES, 2015). Dessa forma, esse setor deve ser um dos primeiros a receber programas de eficiência energética aplicada visando resolver tal condição.

Figura 2 – Desperdício de energia por classe de consumidor, em bilhões de reais



Fonte: LINHARES (2015)

A relação de eficiência energética com a regulação de iluminação é direta: uma lâmpada limitada a 90% de sua potência permitirá uma economia de 10% de energia elétrica, enquanto o fluxo luminoso quase não é alterado perceptivelmente. Esse processo, chamado de dimerização, além de variar a potência dos circuitos de iluminação, aumenta significativamente a vida útil das lâmpadas (MURATORI e DAL BÓ, 2013).

Além da limitação de brilho que pode ser definida para a iluminação, a tecnologia permite que a regulação dos circuitos seja gerenciada pela integração de sensores de luminosidade e de ocupação. A automação aciona proporcionalmente o sistema de iluminação quando houver presença de pessoas e insuficiência de luz natural, enquanto o desligamento ocorre automaticamente com o surgimento de outra fonte de iluminação ou quando não há detecção de pessoas no ambiente. Com isso, é possível alcançar uma redução em torno de 30% a 50% no gasto de energia (BOLZANI, 2004).

Todos esses fatores relacionados à eficiência energética costumam ser ignorados quando o assunto é automação residencial e predial. Em tempos de busca contínua por soluções sustentáveis, essa problemática encontra na automação e especificamente na regulação de iluminação uma grande aliada, que ainda necessita ser mais explorada.

1.1.2 Padrão mundial para controle de casas e edifícios – o KNX

O KNX é o padrão para automação de casas e edifícios. Entre as várias normas que regulamentam o mercado de instalações elétricas e sistemas embarcados nas edificações, o KNX faz parte das principais. São elas: Comitê Europeu para Padronização Eletrotécnica (CENELEC), Comitê Europeu de Normas (CEN), Organização Internacional para Padronização (ISO), Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), Padronização Administrativa da República Popular da China (SAC) e Instituto Nacional Americano de Padronização (ANSI) (KNX ASSOCIATION, 2015).

- CENELEC – Norma Europeia EN 50090;
- CEN – Norma Europeia EN13321-1;
- ISO/IEC – Norma Internacional ISO/IEC 14543-3;
- SAC – Norma Chinesa GB/T 20965;
- ANSI – Norma Norte Americana ANSI 135.

O sistema KNX possui protocolo aberto, isto é, não é de propriedade de um único fabricante. São mais de 402 Membros³ em 38 países, os quais disponibilizam mais de 7000 produtos certificados. Existem 356 Centros de Treinamento em 57

³ Membro KNX é o termo designado aos fabricantes de produtos KNX (KNX ASSOCIATION, 2015b).

países e mais de 48 mil *Partners* em 138 países, como são conhecidos os profissionais habilitados para executar projetos com a tecnologia. Continuando com os números, há 121 parceiros científicos em 32 países, representados por universidades com foco em desenvolvimento e pesquisa, 44 Grupos Nacionais KNX e 14 Laboratórios de teste em 5 países, para certificação de produto (KNX ASSOCIATION, 2015).

Todo esse contexto dominante do protocolo, que já completou 25 anos desde sua criação, e muitas outras características como interoperabilidade entre dispositivos (diferentes marcas como Schneider, ABB, Siemens, Hager, etc.), robustez (instalações em aeroportos, estádios, hotéis, hospitais, etc.) e flexibilidade (sistema cabeado ou sem fio, comunicação com outros protocolos, como BACnet, DALI e TCP/IP), fazem da tecnologia KNX uma escolha adequada para esse trabalho (KNX ASSOCIATION, 2015).

Outras vantagens proporcionadas pelo protocolo KNX são:

- Os produtos KNX possuem processo de controle de qualidade exigido pela Associação KNX (KNX ASSOCIATION, 2015);
- Todos os fabricantes KNX devem estar em conformidade com a certificação ISO 9001⁴ (KNX ASSOCIATION, 2015);
- Todos os produtos KNX são programados com apenas uma ferramenta computacional – *Engineering Tool Software* (ETS) (KNX ASSOCIATION, 2015).

O Brasil possui *Partners*, Centros de Treinamento, Grupo Nacional e empresas especializadas em projetos KNX. Entretanto, o país não figura entre os 38 países com Membros KNX (KNX ASSOCIATION, 2015). Isso dificulta a expansão do protocolo no território brasileiro, uma vez que os projetos dependem de distribuidores ou de processos de importação, ambos com altas taxas tributárias e negociações lentas. Conseqüentemente, há perda de competitividade para a concorrência internacional.

Por fim, a proposta deste trabalho com a implementação de um protótipo de dispositivo KNX é trazer para a realidade brasileira a possibilidade de investir na automação predial e residencial em todas as esferas, principalmente na de desenvolvimento de novos produtos. Isso possibilitará inúmeros avanços ao país,

⁴ Norma ISO responsável por regulamentar a padronização de um serviço ou produto.

entre eles: (1) o desenvolvimento/utilização de produtos capazes de se comunicarem na linguagem mais falada na esfera da domótica; (2) o fortalecimento desse mercado ainda pouco difundido no país; (3) o surgimento de Membros KNX brasileiros ou nacionalizados, abrindo portas à engenharia de automação local.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os principais objetivos deste trabalho, os quais serão detalhados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Implementar um protótipo de dispositivo regulador de luminosidade, compatível com a tecnologia KNX para troca de dados.

1.2.2 Objetivos específicos

- Detalhar o protocolo KNX, seu funcionamento e sua implementação;
- Desenvolver em linguagem de programação para microcontrolador a pilha do protocolo KNX;
- Projetar e implementar uma saída analógica de 0 a 10V para a regulação de iluminação de uma carga de LED (*driver* dimerizável de 0 a 10V + lâmpada de LED), dado um sinal de Modulação por Largura de Pulso (PWM);
- Projetar uma saída a relé para acionamento de cargas de corrente alternada (AC);
- Implementar as funções exigidas pela Associação KNX para atuadores *dimmer*, que incluem: liga/desliga (1 *bit*), regula (4 *bits*) e valor (1 *byte*);
- Implementar função extra, de regulação automática de luminosidade (malha fechada) com realimentação por sensor de luminosidade KNX via barramento (BUS) KNX;
- Projetar uma placa de circuito impresso para compor o *hardware* do protótipo;

- Instalar placas eletrônicas de *hardware* em suporte polimérico com fixação em trilho DIN;
- Interoperabilizar o produto com uma interface *touch screen*, um *keypad*, um pulsador e um sensor de luminosidade, todos certificados pela Associação KNX.

1.3 ÁREA DE TRABALHO

Este trabalho inclui a implementação de um dispositivo regulador de luminosidade com saída analógica de 0 a 10V e compatível com a tecnologia KNX. O protótipo contará com um invólucro polimérico com sistema de fixação em trilho DIN e as seguintes conexões: entrada de tensão 12V corrente contínua (DC), barramento padrão KNX, contato normal aberto de relé e saída analógica de 0 a 10V. Entre as suas funcionalidades estão: ligar e desligar o circuito de iluminação com regulação progressiva da intensidade luminosa (*fade in* e *fade out*), dimerizar a carga, também com sistema progressivo e controlar a luminosidade constantemente. Os acionamentos serão realizados por meio de dispositivos de interface KNX, como teclados e tela tátil, além de um botão no próprio atuador para acionamento manual. Os sinais de luminosidade serão capturados por um sensor KNX responsável por enviar tais informações via BUS. A carga luminosa que será utilizada para os testes e a aprovação do protótipo será um conjunto de *driver* dimerizável (0...10V) com lâmpada LED compatível.

Para a execução desta implementação serão utilizadas técnicas de programação em linguagem C, a fim de construir a pilha do protocolo KNX e criar as lógicas que nortearão o funcionamento do produto. Além disso, um projeto eletrônico será elaborado para garantir as exigências de hardware do microcontrolador e da interface com as entradas e saídas (alimentação, relé, saída analógica e LEDs de status). Uma PCB será projetada e desenvolvida para comportar todo o circuito de controle e acionamento. A conexão com o barramento KNX, por sua vez, será realizada com o dispositivo PCBA BTM da marca Siemens. Essa placa possui um *transceiver* KNX capaz de interpretar os dados que trafegam no BUS e retransmiti-los através de pinos digitais em um canal com Transmissor e Receptor Assíncrono Universal (UART) padrão TTL 5V.

1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Em complemento às considerações realizadas na seção anterior, o presente subcapítulo visa descrever os tópicos que não fazem parte do escopo deste trabalho.

São eles:

- Desenvolvimento de *driver* dimerizável;
- Certificação do protótipo junto a Associação KNX;
- Conexão direta do protótipo com outras entradas ou saídas;
- Identificação do modelo que descreve o sistema de iluminação;
- Utilização de alimentação pelo barramento KNX.
- Programação do dispositivo via *Engineering Tool Software* (ETS)

1.5 SÍNTESE

O capítulo 1 descreveu a introdução do trabalho, a motivação, os objetivos, a área de trabalho e as limitações relacionadas à implementação de um protótipo de atuador KNX regulador de luminosidade. Na seção principal, justificativa, pode-se perceber o apelo do trabalho voltado à eficiência energética, quando a atual situação de consumo e desperdício de energia do país é revelada e uma solução é apresentada: regulação de iluminação com KNX, o maior padrão aberto do mundo para gestão inteligente de casas e edifícios. As demais seções do capítulo definiram as condições gerais e descreveram a condução do projeto.

2 NORMA KNX

Originado das três Associações Europeias (BCI, EIB e EHSA), o KNX é um sistema com aproximadamente 80% do EIB, ou seja, há compatibilidade da maioria dos componentes certificados EIB com o KNX, sendo comum que um dispositivo possua ambos logotipos. A associação KNX, hoje, ainda presta suporte para as instalações com os antigos sistemas, atuando na especificação, promoção e certificação. Outros objetivos da Associação KNX incluem: aplicar normas de ensaio e de qualidade, prestar assistência técnica aos fabricantes de produtos KNX, conceder a marca KNX por intermédio da certificação, estabelecer atividades de padronização em nível internacional, desenvolver atividades de formação por meio dos Centros de Treinamento, realizar atividades promocionais como feiras, páginas web, etc. e efetivar parcerias em colaboração científica com escolas técnicas e universidades (KNX ASSOCIATION, 2014).

O sistema aberto KNX, padronizado nas mais importantes normas técnicas internacionais (ver subseção 1.1.2), pode utilizar diversos meios de transmissão: par trançado (*twisted pair*), linha de força (*powerline*), rádio frequência (RF), e protocolo de internet (IP) (KNX ASSOCIATION, 2014). A Tabela 1 mostra os detalhes de cada tipo de instalação.

Tabela 1 – Meios de Transmissão KNX

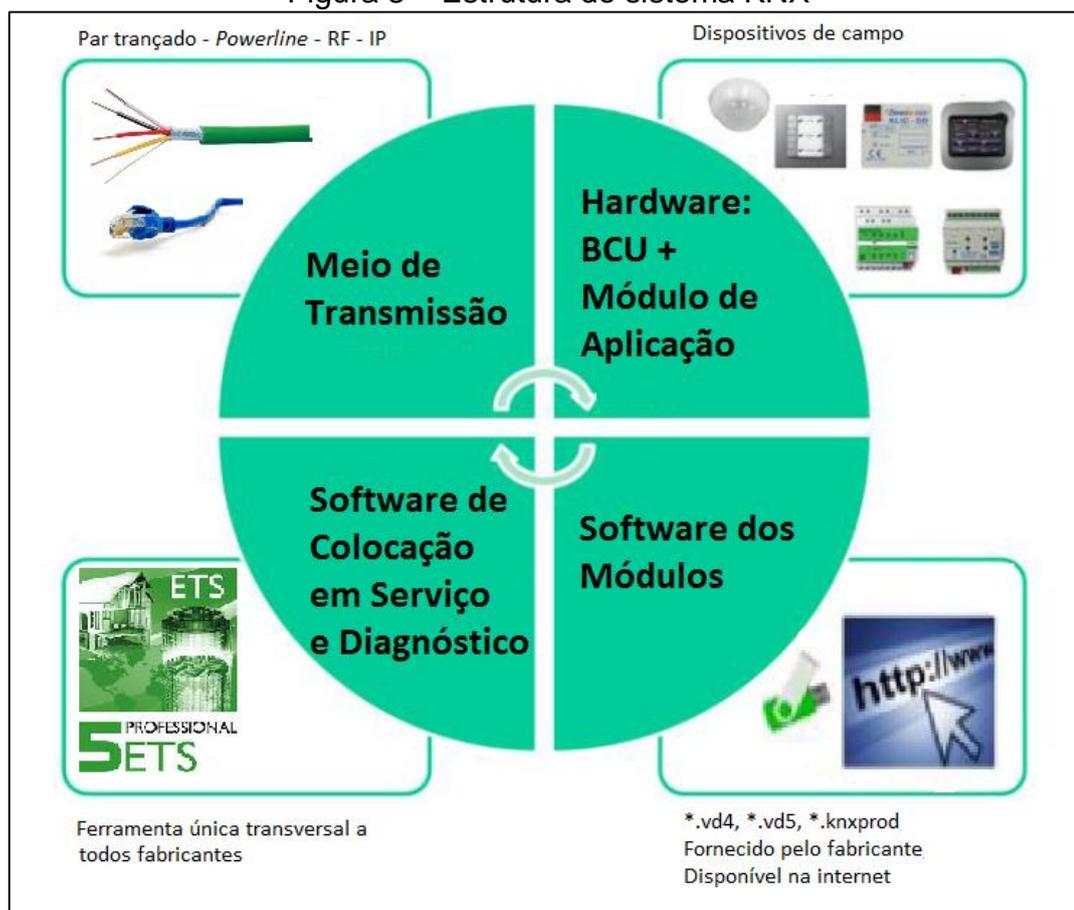
Meio	Transmissão	Velocidade	Áreas de aplicação
Par Trançado (<i>twisted pair</i>)	Barramento de controle independente	9600 bits/s	Novas instalações e grandes renovações: nível máximo de confiabilidade da transmissão
Rede de Força (<i>powerline</i>)	Rede elétrica existente (necessário condutor neutro)	1200 bits/s	Em locais os quais não necessitam de um cabo de controle adicional e exista uma rede de 220V AC
Rádio Frequência	RF	16,384 kbits/s	Em locais que não se deseja ou não pode instalar cabos; alternativa para locais restritos
IP	Ethernet	6150 bits/s	Em grandes instalações onde se necessita de um <i>backbone</i> (linha principal) rápido

Fonte: KNX ASSOCIATION (2014, p. 7/12)

Os dispositivos KNX são compostos essencialmente por unidades de acoplamento ao barramento (BCU) e Módulos de Aplicação (AM) no que diz respeito ao *hardware*. Muitas vezes esses componentes são separados, em outras, formam

um único produto. Em uma instalação KNX, eles recebem o *software* de aplicação, que é parametrizado e transferido com o auxílio do ETS; após, são interconectados a um meio físico e trocam dados com outros dispositivos de campo. Resumidamente, esse é o funcionamento do sistema KNX, o qual pode ser conferido na Figura 3 (KNX ASSOCIATION, 2014).

Figura 3 – Estrutura do sistema KNX



Fonte: Adaptado de KNX ASSOCIATION (2014)

2.1 COMUNICAÇÃO

Uma instalação mínima KNX deve conter: uma fonte de alimentação 29V DC com bobina, um sensor, um atuador e um cabo de BUS (composto por um par trançado). Após instalados, o sensor e o atuador devem ter seus programas de aplicação importados no *software* ETS para conclusão da configuração, que é feita em 3 etapas:

- Atribuição de endereços físicos para os dispositivos;
- Parametrização do programa de aplicação (PA);

- Alocação de endereços de grupo (GA) (KNX ASSOCIATION, 2014).

O primeiro atributo, o endereço físico, é um conjunto de 3 números separados por ponto. Cada um dos três números representa a Área (4 bits), a Linha (4 bits) e o Componente (8 bits), respectivamente, de onde o dispositivo está instalado. Cada componente de BUS instalado deve possuir um endereço físico exclusivo, o qual é usado para *download* de programas de aplicação, diagnósticos, modificação da planta, detecção de erros, etc. Esse endereço também é enviado pelo telegrama KNX contendo a informação do dispositivo emissor da mensagem (KNX ASSOCIATION, 2014).

O segundo atributo, o de parametrização do programa de aplicação, é um conjunto de opções disponibilizadas pelo fabricante, as quais devem ser configuradas para funcionar conforme o desejado. Alguns exemplos de funções que são oferecidas e devem ser parametrizadas são: a utilização do dispositivo em cenários, o tempo de subida de persiana (em atuadores de persianas), o período de atualização (em sensores de luminosidade), a ativação de blocos lógicos, a habilitação de LEDs indicadores, entre uma série de outras funções que dependem do fabricante e do dispositivo (KNX ASSOCIATION, 2014).

O terceiro, alocação de endereços de grupo, é um dos atributos mais importantes dentro da programação do KNX. Também chamados de *group adress*, os GAs são responsáveis pela comunicação entre os dispositivos. Cada GA está atrelado a uma função do sistema, como ligar/desligar luz principal. Um telegrama com esse GA é enviado ao BUS, e todos os dispositivos com esse endereço podem ouvir a mensagem (*multicasting*⁵). Aqueles que devem interpretar o endereço de grupo que foi transmitido executam a função solicitada e transmitem o comando de recepção correta (ACK). Os endereços de grupo ocupam um espaço de 16 bits no telegrama KNX e geralmente são separados em três níveis, na qual os 5 bits mais significativos formam o grupo principal, os 3 bits seguintes, o grupo intermediário e os últimos 8 bits, o subgrupo (KNX ASSOCIATION, 2014).

Os três processos citados garantem o comissionamento de dispositivos no BUS e a pronta funcionalidade dos mesmos de acordo com a programação realizada. Entretanto, a conexão entre a parametrização e o endereçamento de grupo é

⁵ Rede com canal de comunicação o qual é compartilhado por um grupo de máquinas da rede. Mensagens curtas são enviadas por qualquer dispositivo e são recebidas por um grupo de dispositivos.

realizada pelos objetos de comunicação (GO), que, por sua vez, possuem um tipo de ponto de dados (DPT) atrelado. Isso será detalhado nos parágrafos seguintes.

2.1.1 Objetos de comunicação

Os GOs, também chamados de objetos de grupo, são disponibilizados pelo fabricante juntamente com as funções de parametrização. Cada configuração diferente de um dispositivo pode gerar objetos de comunicação diversos, os quais são definidos como endereços de memória dos dispositivos. Eles possuem o tamanho (em bits) de acordo com a sua função, que pode variar de 1 bit (função de comutação) até 14 bytes (função de texto). Esses objetos de comunicação são endereçados nos GAs do projeto, estabelecendo as relações de comunicação com outros dispositivos (KNX ASSOCIATION, 2014).

Cada GO possui *flags* que são utilizadas para definir propriedades. São elas: comunicação, leitura, escrita, transmissão e atualização. Cada uma vem pré-selecionada pelo fabricante de acordo com a função do GO. De maneira geral, para sensores, as *flags* mínimas para o funcionamento são as de comunicação e transmissão, enquanto para os atuadores, a de comunicação e escrita (KNX ASSOCIATION, 2014).

2.1.2 Tipo de ponto de dados

Os DPTs foram definidos para gerar compatibilidade de funções entre dispositivos de fabricantes diferentes, possuindo um tamanho definido (em bits) que está relacionado com a função do objeto de comunicação. Um DPT comum é o tipo 1.001, função comutação. Os dados são de 1 bit e carregam informação para ligar ou desligar algum equipamento (KNX ASSOCIATION, 2014).

Para cada conjunto de DPTs estabelecidos pela Associação KNX para pertencer a um dispositivo dá-se o nome de bloco funcional. No caso do atuador *dimmer*, o bloco funcional deve conter um DPT de 4 bits para regulação (*Dim Step* – 3.007), pelo menos um DPT de 1 bit para comutação (*Switch*) e outro DPT para o objeto do tipo palavra de 1 byte (*Scaling* – 5.001). Cada objeto de comunicação possui o seu DPT, o qual já define a extensão útil do telegrama (KNX ASSOCIATION, 2014).

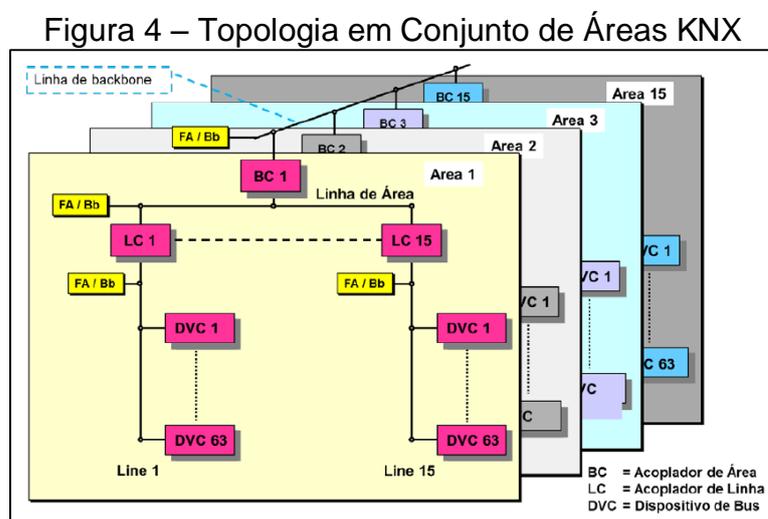
2.2 TOPOLOGIA

A topologia KNX é do tipo árvore livre quando o meio físico é o TP. Entretanto, uma organização com limites de dispositivos por linha e área é definida de modo a garantir a qualidade das transmissões das mensagens de BUS. Esta separação por linha e área dentro de uma topologia também define o endereço físico dos dispositivos instalados (KNX ASSOCIATION, 2014).

Uma linha é um barramento que pode conectar até 4 segmentos de 64 dispositivos cada. Cada segmento deve possuir um repetidor de linha e uma fonte KNX (29 V DC com bobina). Todos os dispositivos instalados na mesma linha devem possuir seus primeiros dois números do endereço físico iguais (exemplo: 1.1.5 e 1.1.6). O endereço 1.1.0 fica reservado para o acoplador de linha (LC), caso haja mais linhas no sistema (KNX ASSOCIATION, 2014).

Quando uma instalação possui mais de 64 dispositivos, uma nova linha deve ser criada (os segmentos também seriam uma opção). Cada uma deve ser conectada à linha principal (*main line*) através dos acopladores de linha. O conjunto de até 15 linhas é denominado de área, onde todos os dispositivos de BUS (DVC) possuem em comum o primeiro termo do endereço físico (KNX ASSOCIATION, 2014).

Para instalações maiores quando uma área não é suficiente para acomodar todos os dispositivos, a topologia de conjunto de áreas é utilizada (máximo de 15 áreas). Através dos acopladores de área (BC), do inglês *backbone couplers*, as áreas da instalação são conectadas no *backbone* (linha mestre), formando a topologia máxima do KNX, exemplificada na Figura 4.

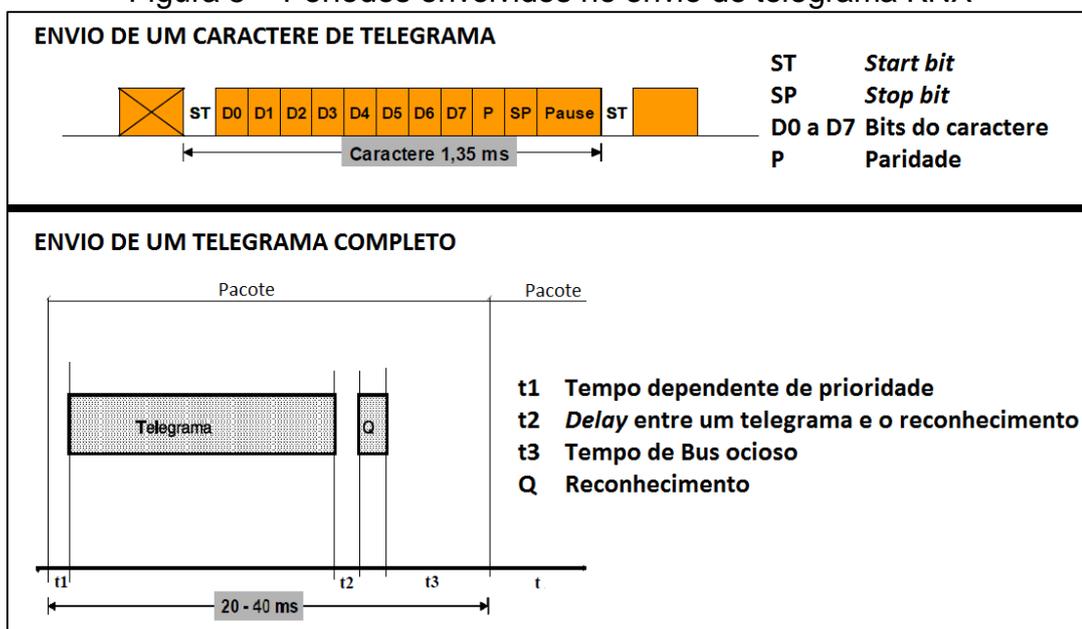


Fonte: KNX ASSOCIATION (2014)

2.3 TELEGRAMA

O telegrama KNX possui um formato geral que pode conter de 8 a 23 bytes, dependendo da informação que está sendo enviada. O telegrama é enviado ao BUS em partes chamadas caracteres. Um caractere é definido como um conjunto de dados de 8 bits do telegrama, precedido de *Start Bit* e seguido por um bit de paridade, um de *Stop Bit* e outros dois de pausa (largura de pulso de 2 bits). Assim, o telegrama é enviado ao BUS de maneira assíncrona, de caractere em caractere, cada um contendo 11 bits de informações e 2 bits de pausa, totalizando uma largura de pulso de 13 bits (período de 1,352ms para uma taxa de transferência de 9600 bits/s). O período total de um telegrama varia de 20ms a 40ms, considerando: t1 como um tempo com largura de pulso de 3 bits antes de cada caractere; t2 como um tempo com largura de pulso de pelo menos 13 bits até aguardar o reconhecimento do telegrama; t3 como um tempo com largura de pulso de 50 bits, definido para ociosidade do BUS. (KNX ASSOCIATION, 2014; 2015b). A Figura 5 ilustra a composição dos caracteres e os períodos envolvidos no envio de telegramas KNX.

Figura 5 – Períodos envolvidos no envio de telegrama KNX

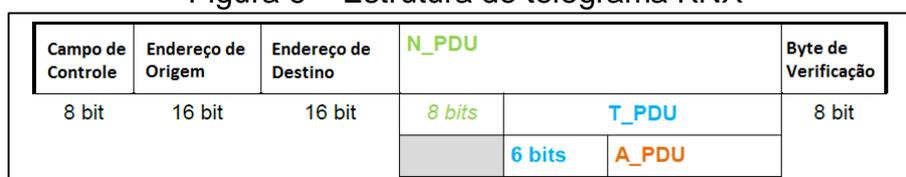


Fonte: Adaptado de KNX ASSOCIATION (2014) e KNX ASSOCIATION (2015b)

A estrutura geral do telegrama KNX possui obrigatoriamente os seguintes blocos: campo de controle (8 bits), endereço de origem (16 bits), endereço de destino (16 bits), Unidade do Protocolo de Dados (PDU) da Camada de Rede (N-PDU)

(número de bits variável) e campo de verificação (8 bits). Inseridos no campo N-PDU, estão os bits relativos ao PDU da Camada de Transporte (T-PDU) e ao PDU da Camada de Aplicação (A-PDU) (KNX ASSOCIATION, 2015b). A Figura 6 ilustra a estrutura do telegrama KNX com os campos que a compõem.

Figura 6 – Estrutura de telegrama KNX



Fonte: KNX ASSOCIATION (2015b)

O campo de controle é utilizado para indicar a validade do telegrama e a sua prioridade; é usado, ainda, para identificar quando o telegrama está sendo repetido. Os 8 bits (do mais significativo ao menos significativo) são: **1 0 R 1 P P 0 0**, onde os valores destacados são sempre definidos desta maneira de modo a identificar um telegrama válido. O bit R indica a repetição do telegrama (valor 0) ou não (valor 1). Os bits P P determinam a prioridade: 0 0 – funções do sistema, 1 0 – funções de alarme, 0 1 – prioridade alta, 1 1 – prioridade baixa. A prioridade padrão definida para funções de operações normais (ligar/desligar circuitos de iluminação, por exemplo) é baixa (1 1) (KNX ASSOCIATION, 2015b).

O campo com endereço de origem é utilizado para identificar o dispositivo que está enviando o telegrama. Ele é necessário para que, em casos de colisão de mensagens, se diferencie umas das outras (cada dispositivo de BUS possui um endereço físico diferente), evitando a transferência de dois telegramas simultaneamente. O endereço físico é composto por 16 bits, sendo 4 relacionados à Área, 4 à Linha e 8 aos Dispositivos, do mais significativo ao menos, respectivamente (KNX ASSOCIATION, 2015b).

No que tange ao endereço de destino, existem duas formas de efetuar uma comunicação: uma delas utiliza endereços físicos, quando se deseja realizar uma conexão ponto-a-ponto; a outra, mais comum, utiliza os GAs, quando se deseja um endereçamento *multicast*. O bit D7 do caractere seguinte, já no campo N-PDU, define se o endereçamento de destino é por endereço individual (valor 0) ou GA (valor 1) (KNX ASSOCIATION, 2015b).

O campo N-PDU inicia com o bit D7 representando o tipo de endereço de destino, seguido por 3 bits (D6, D5 e D4) para indicar o valor do contador de rota (*routing counter*). O contador de rota desempenha um papel fundamental no sistema KNX roteando o telegrama através de acopladores de linha e de área. Iniciado com o valor 6 (exceção dos telegramas do sistema), o *routing counter* decrementa (por meio dos acopladores) a cada linha e área diferente em que circula, fazendo com que o telegrama cesse após percorrer toda a extensão de uma instalação KNX. Os 4 bits restantes do caractere (D3, D2, D1 e D0) indicam o comprimento dos dados úteis no telegrama, ou seja, o número de caracteres seguintes que serão transferidos. O restante do campo N-PDU é, na verdade, o campo T-PDU (KNX ASSOCIATION, 2015b).

O byte seguinte, pertencente a T-PDU, possui os primeiros dois bits para indicar o modo de comunicação. Quando a comunicação for do tipo numerada (0 1 ou 1 1), os 4 bits seguintes indicam o número sequencial. Quando não for numerada (0 0 ou 1 0) eles não possuem nenhum significado (normalmente configurados para 0). O Pacote de Dados Não Numerado (UDP) com código 0 0 é o mais utilizado, e, neste caso, indica que, depois dos 4 bits não utilizados, haverá outros 4 bits para representar o código Informação de Controle do Protocolo da Camada de Aplicação (APCI), já na A-PDU (KNX ASSOCIATION, 2015b).

O código APCI define o tipo de solicitação que está sendo realizada no telegrama, por exemplo uma solicitação de escrita ou leitura. Esse código de 4 bits possui 2 bits em um caractere (bits D1 e D0) e outros 2 bits no caractere seguinte (bits D7 e D6). Entre os 16 APCIs disponíveis, os que são tipicamente utilizados nas comunicações *multicasting* são:

- 0000 – *GroupValueRead* – Solicitar leituras de valores de GOs;
- 0001 – *GroupValueResponse* – Responder solicitações de leitura;
- 0010 – *GroupValueWrite* – Sobrescrever valores de GOs.

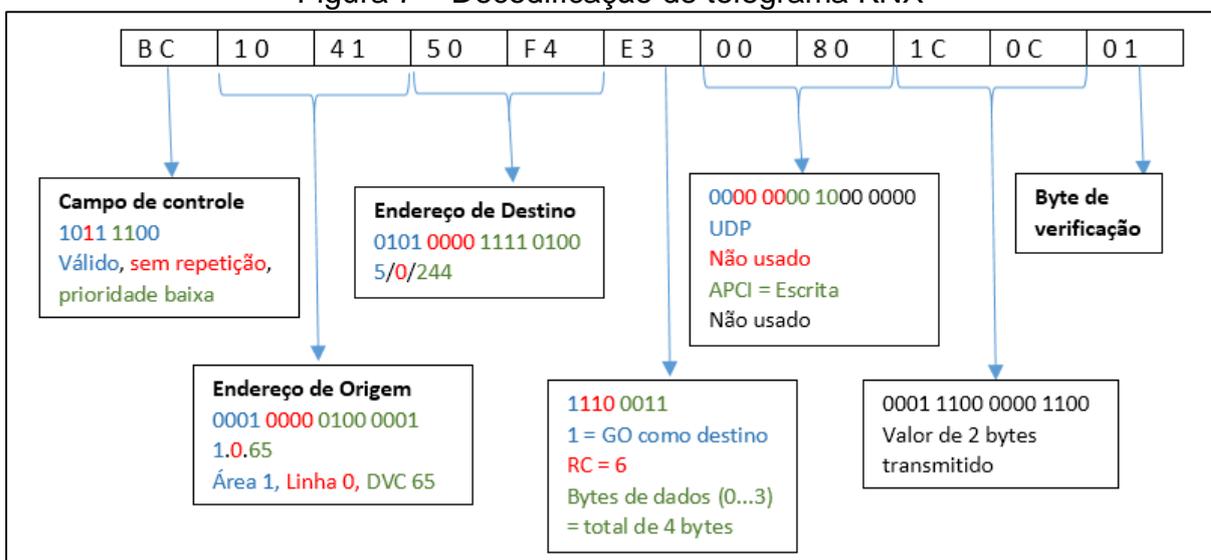
No caso do APCI 0000, os 6 bits restantes do caractere não possuem nenhum significado. Entretanto, no *GroupValueResponse* (APCI 0001) os 6 bits são usados para transmitir o dado que está sendo solicitado leitura (para dados de até 6 bits). Caso o dado seja maior, outros bytes são transmitidos com a informação (de acordo com a necessidade), e estes 6 bits passam a não ter significado. De maneira análoga, o APCI para escrita (0010) também compartilha a mesma estratégia na utilização dos bits seguintes (KNX ASSOCIATION, 2015b).

O último campo do telegrama KNX é o byte de verificação. Juntamente com o bit de paridade P enviado em cada caractere, este byte serve para detectar erros na transmissão do telegrama. A verificação do caractere é realizada pela paridade par, ou seja, a soma dos bits D7 até D0 com P deve ser 0. A verificação de cada posição de bit do telegrama é realizada com paridade ímpar, isto é, a soma de todos bits D7 mais S7 (bit de verificação) deve ser igual a 1. Da mesma forma deve acontecer com os demais bits (D6 até D0) gerando o byte de S7 até S0, o qual é enviado como último dado do telegrama. A esse processo de paridade nos caracteres e nos bits dá-se o nome de *cross check*⁶, ou verificação cruzada (KNX ASSOCIATION, 2015b).

O dispositivo que recebe um telegrama analisa o byte de verificação e responde ao BUS se a recepção foi correta (ACK), incorreta (NACK) ou se o BUS estava ocupado (BUSY), não havendo recepção neste caso. Em casos em que houve NACK ou BUSY como resposta ou em que não houve retorno algum, o telegrama é retransmitido até no máximo 3 vezes. Os códigos de cada mensagem são: ACK=CCh, NACK=0Ch, BUSY=C0h (KNX ASSOCIATION, 2015b).

Uma síntese foi elaborada na Figura 7 para decodificar um exemplo de telegrama KNX.

Figura 7 – Decodificação de telegrama KNX



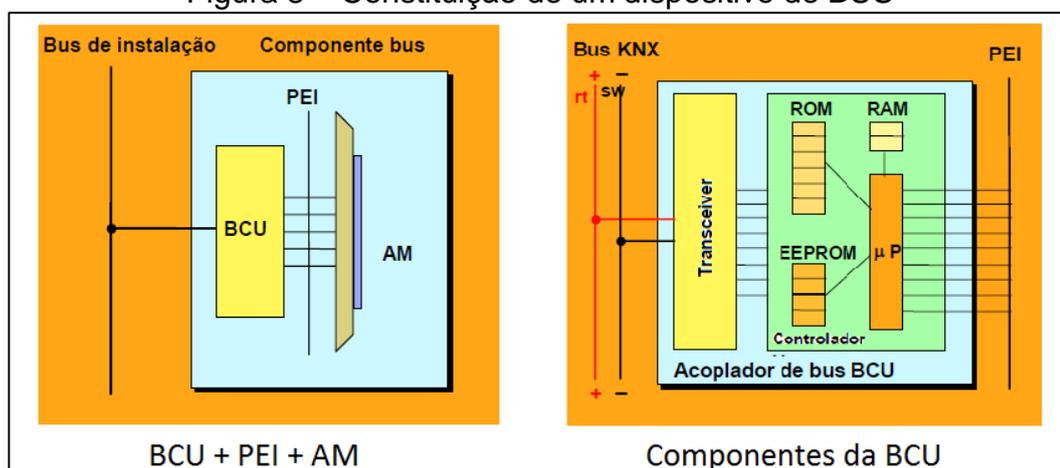
Fonte: Elaborado pelo Autor

⁶ “Combinação de verificação de paridade vertical com horizontal”. Traduzido de KNX ASSOCIATION (2015b, p. 9/41)

2.4 DISPOSITIVOS DE BUS

Um dispositivo de BUS pode ser um sensor, um atuador ou um controlador (módulo lógico, por exemplo). Todos eles são constituídos de três partes: unidade de acoplamento ao barramento (BCU), módulo de aplicação (AM) e programa de aplicação (PA). A BCU contempla a interface com o meio físico do protocolo e também o microcontrolador. O AM é a interface com o usuário, ou seja, no caso de teclados (*keypads*) ele é representado pelos pulsadores (*push buttons*). Algumas vezes, o AM pode ser separado da BCU e, neste caso, ele é acoplado através da interface externa física (PEI). O PA é o *firmware* transferido para o dispositivo (KNX ASSOCIATION, 2014). A Figura 8 esquematiza um componente de barramento.

Figura 8 – Constituição de um dispositivo de BUS



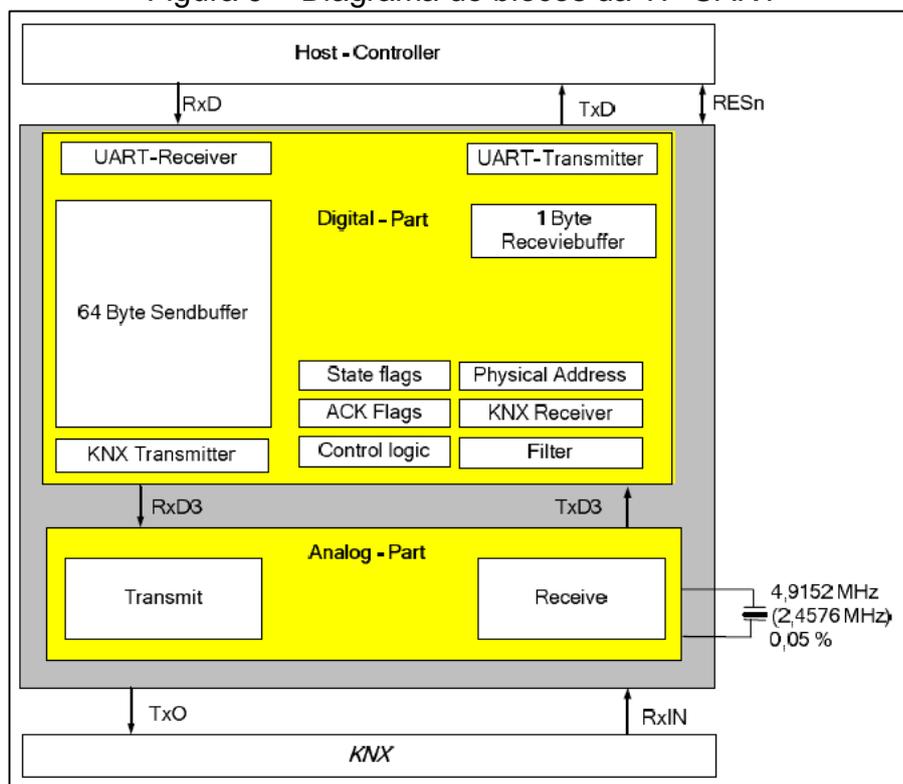
Fonte: KNX ASSOCIATION (2014)

A BCU é composta por duas partes principais: um controlador e um *transceiver*⁷ (ver Figura 8). O controlador possui o microprocessador e as memórias RAM, ROM e EEPROM embutidos em um mesmo componente chamado microcontrolador. O *transceiver* é responsável pela conexão com o meio físico TP do KNX (KNX ASSOCIATION, 2014). Normalmente encapsulado em um circuito integrado (CI), um transreceptor comum é capaz reconhecer sinais analógicos. Entretanto, um *transceiver* TP com Transmissor e Receptor Assíncrono Universal (UART) possui os componentes digitais completos da camada de enlace do protocolo KNX e deve ser utilizada para conectar o MCU ao BUS (KNX ASSOCIATION, 2015b).

⁷ Dispositivo com função de transmissor e receptor utilizando os mesmos componentes do circuito. Também chamado de transreceptor (PANTOJA ENGINEERING & CONSULTANT, 2010).

O diagrama em blocos da Figura 9 exemplifica a comunicação da TP-UART entre o BUS KNX (parte analógica) e o MCU (parte digital) fazendo menção também aos serviços de armazenamento provisório de conteúdo, controle lógico, entre outros.

Figura 9 – Diagrama de blocos da TP-UART



Fonte: SIEMENS (2013)

2.5 ETS

O *software* ETS, desenvolvido pela Associação KNX, é utilizado para a parametrização de todos sistemas KNX. Nele, o projetista de sistemas KNX importa as aplicações dos produtos por meio do site dos fabricantes, cria a estrutura da instalação, adiciona equipamentos, ajusta os parâmetros, direciona os endereços de grupo aos objetos de comunicação, descarrega as aplicações nos dispositivos, testa e monitora o funcionamento do sistema. As bases de dados de um produto podem ser importadas com extensão *.vd1, *.vd2, *.vd3, *.vd4 ou *.knxprod, enquanto os projetos devem possuir o formato *.knxproj (KNX ASSOCIATION, 2015b), (CONTENTE, 2013).

Todos os produtos KNX, de qualquer fabricante, utilizam a mesma plataforma (ETS) para parametrização (algumas interfaces gráficas exigem a instalação de *plugin* adicional). O software, na sua última versão – ETS5, pode ser descarregado direto do site da Associação (knx.org) e possui os seguintes planos de licença: ETS 5 free

(Sem custo e limitado a utilizar até 5 dispositivos de BUS), ETS 5 Lite (200,00€ e limitado a utilizar até 20 dispositivos de BUS) e ETS 5 Professional (1000,00€ e utilização ilimitada) (KNX ASSOCIATION, 2016).

2.6 CERTIFICAÇÕES

O KNX possui diversos tipos de certificações: de parceiros (*partners*), de fabricantes (*members*), de centros de treinamento, de laboratórios de teste, entre outros. Para se tornar KNX Partner, certificação concedida a pessoas físicas, o indivíduo deve realizar a formação em algum Centro de Treinamento Certificado⁸. A carga horária do curso Básico KNX, incluindo a aplicação do exame prático é de 30 horas. Para se tornar KNX Member, o fabricante precisa preencher um formulário de filiação disponível no site da Associação e escolher o perfil de filiação o qual estará inserido (dependendo do tipo e intensidade de atuação no mercado). Além disso, o Membro KNX deve adquirir uma versão do *software* Manufacturer Tool (2050,00€), utilizado para criar a base de dados dos produtos desenvolvidos (arquivos *.knxprod). Cada produto novo deve ser encaminhado para um dos 14 Laboratórios Certificados⁹ no mundo a fim de avaliar a interoperabilidade e conformidade com as especificações KNX. Após este processo, o produto é certificado, e o fabricante pode comercializá-lo utilizando o logotipo KNX estampado (KNX ASSOCIATION, 2015b).

2.7 SÍNTESE

O capítulo 2 apresentou a revisão bibliográfica da Norma KNX, incluindo informações sobre a Associação KNX, o protocolo, o telegrama, a estrutura de comunicação dos dispositivos, as funções básicas, as regras gerais, a regularização de pessoas, empresas e produtos, e o desenvolvimento da pilha KNX, tanto em software quanto em hardware.

⁸ São instituições reconhecidas pela Associação KNX, as quais devem possuir uma infraestrutura mínima de equipamentos e instalações gerais, um Tutor KNX, além de outras exigências.

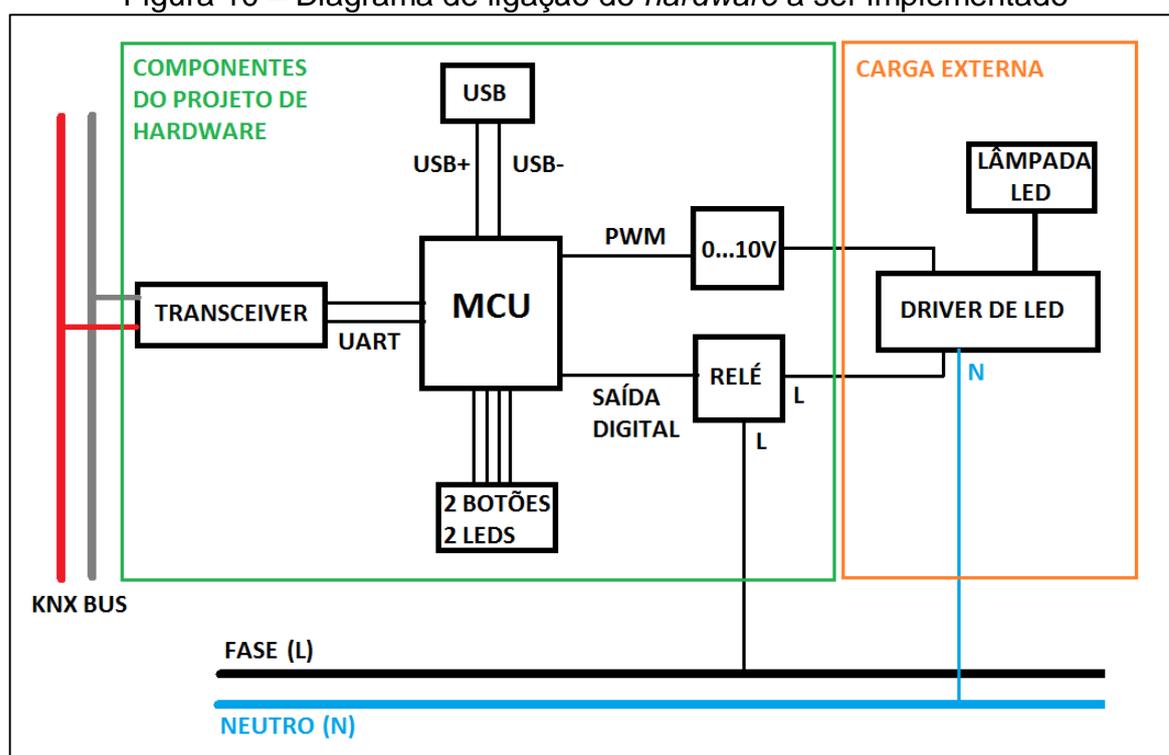
⁹ São laboratórios auditados pela Associação KNX, os quais devem cumprir com a Norma ISO 17025 (requisitos gerais para competência de laboratórios de teste e calibração) e com os testes das especificações KNX (KNX ASSOCIATION, 2015b).

3 PROJETO DE HARDWARE

Conforme as especificações da Norma KNX, um dispositivo de BUS é constituído de BCU, PEI (opcional) e AM. A BCU é composta pelo *transceiver* e pelo microcontrolador, enquanto o módulo de aplicação depende da funcionalidade de cada produto e é caracterizado pelo conjunto de componentes responsáveis por desempenhar as funções de interação com o meio externo. Assim, este capítulo tem por objetivo especificar e justificar o projeto de hardware de cada uma dessas partes do dispositivo KNX desenvolvido neste projeto.

O protótipo implementado tem a função de um regulador de luminosidade por saída analógica de 0 a 10V para cargas de LED com *driver* dimerizável (compatível com o mesmo padrão de tensão). Além da saída de regulação, o dispositivo possui uma saída a relé para atuar na interrupção da alimentação do *driver*, dois botões para desempenhar funções de *reset* e de manual e dois LEDs sinalizadores. Ademais, o dispositivo possui uma interface de conexão padrão com o barramento KNX que, por meio de um módulo *transceiver* de barramento (BTM), acessa o MCU para troca de dados. Todas as partes que compõe o *hardware* acima descrito podem ser conferidas no diagrama da Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de ligação do *hardware* a ser implementado



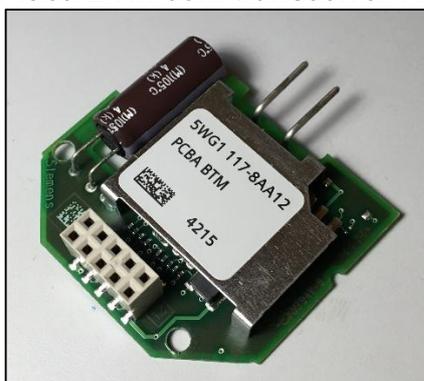
Fonte: Elaborado pelo Autor

3.1 TRANSRECEPTOR E MICROCONTROLADOR

O protocolo KNX é um sistema de comunicação de dados utilizado para automação predial e residencial. Entre os diversos tipos de meios de transmissão admitidos, o par trançado é o mais utilizado e recomendado pela Associação KNX por motivos de estabilidade e segurança. Instalações novas ou planejadas utilizam soluções cabeadas, uma vez que a infraestrutura permite o roteamento de cabos, e distâncias de até 700m podem ser percorridas com uma mesma linha KNX. Assim, a grande maioria dos dispositivos KNX são projetados para se comunicarem através do meio físico TP, o mesmo escolhido para a aplicação deste projeto.

Para que o microcontrolador seja capaz de interpretar o protocolo KNX e se comunicar através dele, é necessário utilizar interface TP com um *chipset* transreceptor, o qual será responsável por converter o método de transmissão do BUS (multiplexação por divisão de tempo, do tipo *baseband* e simétrica) para um padrão UART, por exemplo, compatível com a maioria dos microcontroladores. Esse *transceiver* é oferecido como solução por três grandes empresas: ELMOS, ON Semiconductors e SIEMENS. Essa última, por sua vez, oferece o *chipset* embutido em uma placa de circuito impresso, com todos os componentes eletrônicos necessários, além das conexões para o barramento analógico (KNX) e digital (MCU) (KNX ASSOCIATION, 2015a). Dessa forma, a placa BTM TP-UART da SIEMENS (Figura 11) foi escolhida como interface KNX-UART para integrar o *hardware* do protótipo, tendo em vista o foco do trabalho voltado para o desenvolvimento da pilha do protocolo, do programa e do módulo de aplicação, possibilitando a finalização do produto em um período de seis meses.

Figura 11 – Placa BTM com *transceiver* KNX TP-UART



Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme a documentação técnica fornecida pelo fabricante da PCB, algumas das conexões digitais de interface com o microcontrolador são: Tx, Rx, Vcc (5V) e GND. Os pinos de transmissão (Tx) e recepção de dados (Rx) funcionam com padrão UART TTL 5V e devem ser conectados nos terminais Rx e Tx do MCU, respectivamente, enquanto Vcc e GND estão disponíveis para suprir a alimentação do microcontrolador (SIEMENS, 2012). Entretanto, segundo o *datasheet* da placa BTM, a corrente máxima fornecida pela saída de tensão Vcc é de 50mA, sendo esse um fator limitante do projeto. Apesar de o *hardware* ter sido projetado para não ultrapassar esse limite de corrente, essa conexão será inutilizada, e uma alimentação externa de 12V DC atenderá as necessidades de tensão e corrente demandados pelo microcontrolador e seus periféricos pelos seguintes motivos:

- O dispositivo BTM TP-UART é uma placa eletrônica importada, única e de alto custo (35,80 € + frete internacional). Qualquer equívoco durante a fase de projeto e de testes poderia inviabilizar a finalização do protótipo;
- O módulo de aplicação do dispositivo em desenvolvimento prevê uma saída analógica de 0 a 10V. Assim, seria indispensável a utilização de uma fonte de tensão externa de, no mínimo, 10V;
- A Associação KNX recomenda a utilização de uma fonte de alimentação externa (além daquela fornecida pelo BUS KNX em dispositivos compatíveis com o meio físico TP), quando o consumo de corrente for superior a 10mA.

Para que haja compatibilidade com a placa BTM TP-UART, o microcontrolador deverá ser alimentado com 5V, visto que o padrão de comunicação é TTL 5V. Além disso, o MCU deverá possuir uma UART para troca de dados, uma saída PWM, duas entradas digitais e uma saída digital. Outro recurso desejável que o componente deve possuir é a compatibilidade com o Barramento Serial Universal (USB) e a disponibilidade de códigos *bootloader*¹⁰ como ferramenta de projeto. Com isso será possível realizar o *download* do *firmware* no microcontrolador por meio da porta de comunicação universal mais utilizada na computação e disponível em todos os dispositivos *desktop* e *laptop*. Além disso, o canal USB poderá ser utilizado como terminal para depuração do código implementado. O encapsulamento do

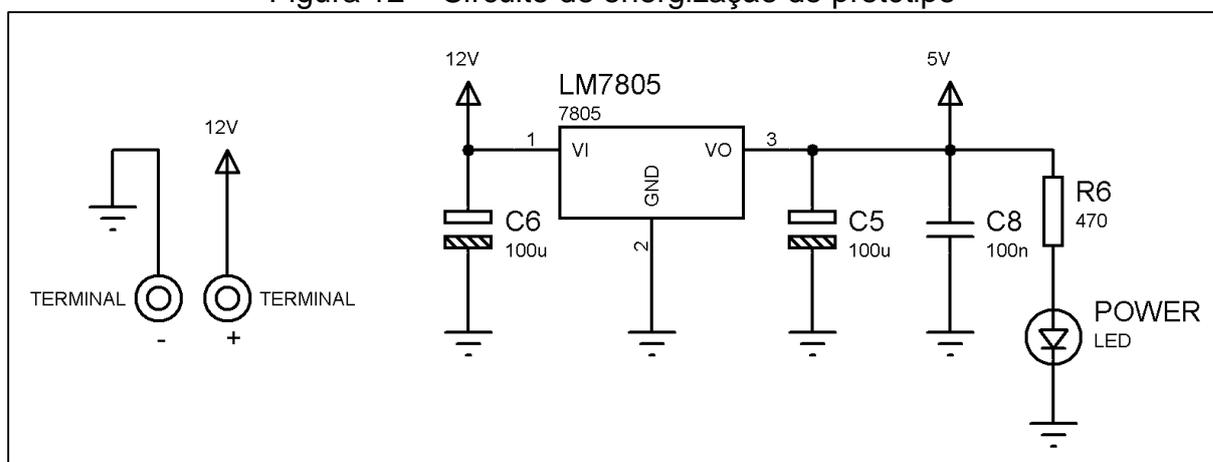
¹⁰ Trecho de *firmware* instalado na memória ROM de microcontroladores executado na inicialização do mesmo. Um *bootloader* USB para microcontroladores possui a finalidade de permitir a gravação do *firmware* principal a partir de uma porta universal USB.

microcontrolador deverá permitir a montagem superficial em PCB, caracterizando, portanto, um Dispositivo de Montagem Superficial (SMD). Componentes SMD podem ser manipulados e soldados automaticamente por máquinas robotizadas, garantindo uma produção mais eficiente e homogênea e reduzindo a necessidade de espaço em placas de circuito impresso. Por fim, o MCU deve possuir um compilador e um gravador de fácil acesso, material técnico disponível e, preferencialmente, fornecimento no Brasil. Dentro dessas condições, o microcontrolador PIC18F2550-I/SO da Microchip (MICROCHIP, 2009) cumpre todos os requisitos do projeto e, portanto, será escolhido para compor o *hardware* deste protótipo.

A Figura 12 mostra o esquema elétrico de ligação da alimentação do protótipo. Uma fonte de tensão de 12V DC será conectada através de dois terminais tipo borne em um regulador de tensão LM7805, cuja saída é de 1A@5V. Também fazem parte do circuito de alimentação: (1) dois capacitores eletrolíticos de 100µF (estabilização das tensões de entrada e saída do regulador); (2) um capacitor cerâmico (C8) de desacoplamento (conectado entre os terminais Vcc e GND do microcontrolador); e (3) um LED indicador de sistema energizado com um resistor R6. O resistor foi calculado considerando uma queda de tensão de 2V e uma corrente de 10mA, conforme a Equação 1.

$$R = \frac{5V - 2V}{10mA} = 300\Omega \rightarrow R6 = 470\Omega \mid I_{R6} = 6,4mA \quad (1)$$

Figura 12 – Circuito de energização do protótipo



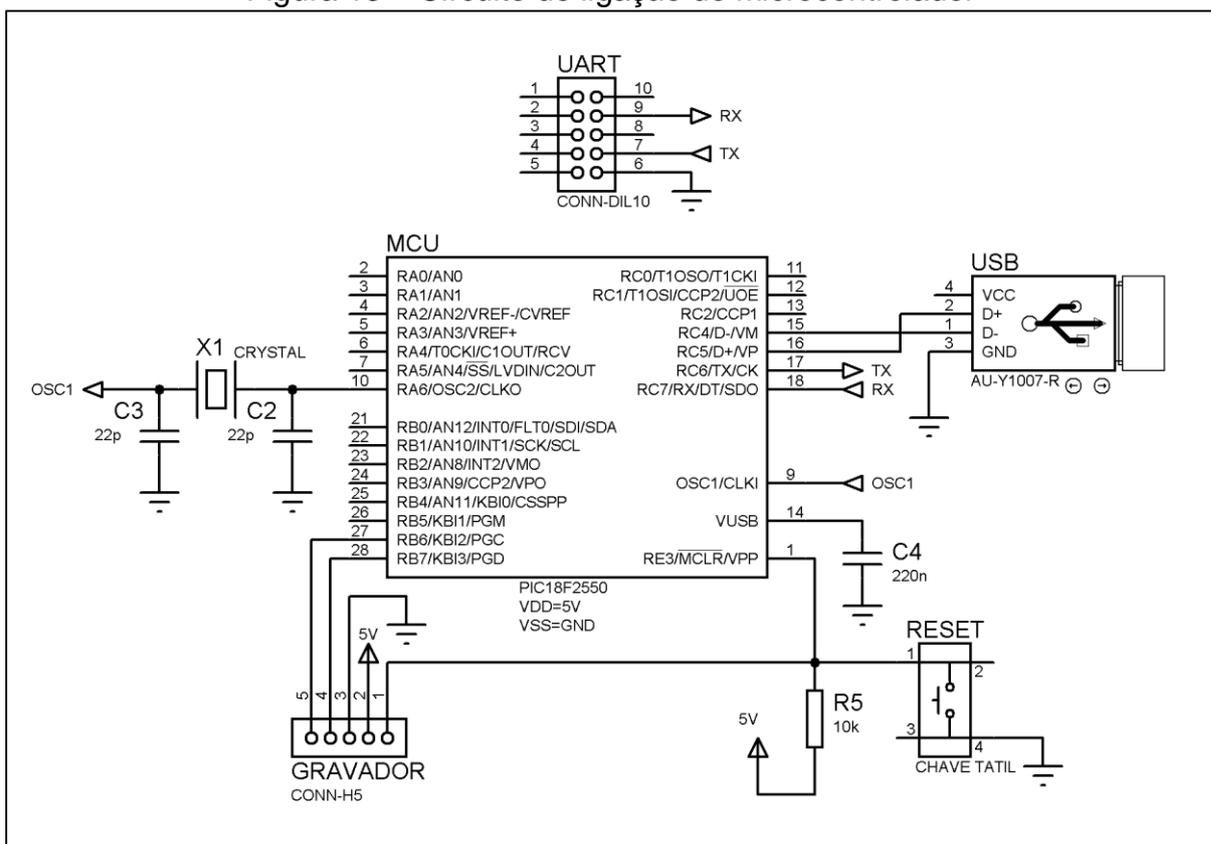
Fonte: Elaborado pelo Autor

O projeto de ligação do microcontrolador com os componentes eletrônicos necessários, como oscilador, resistores e capacitores, além dos conectores (USB,

barra de pinos), pode ser analisado na Figura 13. Conforme a documentação técnica do MCU, MICROCHIP (2009), um capacitor de 220nF (C4) é recomendado para o pino V_{USB} por razão de estabilidade; um resistor de *pull up* (R5) no terminal \overline{MCRL} e uma chave táctil (*RESET*) comutadora de nível lógico de referência (GND) são indicados para reinicializar o microcontrolador; um cristal oscilador de 20MHz (X1) é utilizado para a geração dos pulsos de *clock* do MCU. A frequência de oscilação será definida em 48MHz via *software*, por meio de multiplicador de frequência, tendo em vista a compatibilidade de códigos *bootloader* disponíveis para o PIC18F2550 e a funcionalidade dos recursos USB, os quais operam em frequências de 48MHz neste microcontrolador. Os pinos 15 e 16 do PIC devem ser utilizados, nesta aplicação, para ligação do conector USB (D- e D+, respectivamente). O terminal GND do conector é ligado na mesma malha de referência do MCU, enquanto o terminal Vcc pode ser utilizado para alimentação por meio da porta USB. Para o projeto em desenvolvimento, essa opção não foi considerada, uma vez que o sistema deverá possuir pelo menos uma alimentação de 10V para que haja saída analógica de controle, ao passo que a porta USB fornece apenas 5V.

A mesma Figura 13 ainda mostra as conexões com duas barras de pinos: uma dupla (UART) e outra simples (GRAVADOR). A barra de pinos dupla possui 10 pinos com distanciamento padrão de 2,54mm e será utilizada para conexão com a PCB TP-UART da Siemens. Conforme o *datasheet* da BTM, os pinos 6, 7 e 9 possuem os sinais digitais de GND, Rx e Tx da TP-UART, respectivamente, os quais deverão ser conectados com GND, Tx e Rx do microcontrolador. A barra de pinos simples é composta por 5 terminais que compõe a conexão de Programação Serial em Circuito (ICSP). O ICSP do PIC compreende os pinos PGC, PGD, GND, Vcc e \overline{MCRL} , os quais são conectados em um gravador externo para transferência do *firmware* no MCU. Antes de se utilizar a porta USB para gravação, um *bootloader* necessariamente deverá ser instalado no microcontrolador por intermédio da conexão ICSP.

Figura 13 – Circuito de ligação do microcontrolador



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 MÓDULO DE APLICAÇÃO

Parte do *hardware* responsável pela funcionalidade de um dispositivo KNX, o AM compreende, neste projeto, um circuito regulador de luminosidade para um sistema de iluminação LED (*driver* + lâmpada). Entre os métodos de dimerização para lâmpadas de LED pode-se citar: controle de potência por Triodo de Corrente Alternada (TRIAC) e controle de potência por saída analógica de 0 a 10V. Ambas as tecnologias de regulação de iluminação são universais e compatíveis com os *drivers* dimerizáveis comerciais. Entretanto, além de ser mais comum a utilização de sinal 0 a 10V para controle de potência de sistemas de iluminação LED, um *driver* com entrada analógica possui eficiência maior (entre 85 e 90%) do que aquele com controle por TRIAC (aproximadamente 80%). Outra vantagem do regulador por tensão contínua está no seu alto fator de potência (entre 0,95 e 0,99) que, comparado aos modelos de tensão alternada (aproximadamente 0,90), representa um dispositivo de qualidade superior. Dessa forma, o protótipo de dispositivo KNX proposto para este trabalho deverá possuir uma saída analógica de 0 a 10V para a regulação de *drivers* de LED.

Uma das saídas do microcontrolador deverá fornecer um sinal de tensão analógico para dimerização da iluminação, enquanto outra será projetada para atuar um relé auxiliar a ser utilizado na comutação da carga de iluminação (*driver* dimerizável + lâmpada LED). A saída analógica e a saída a relé serão detalhados nas subseções seguintes.

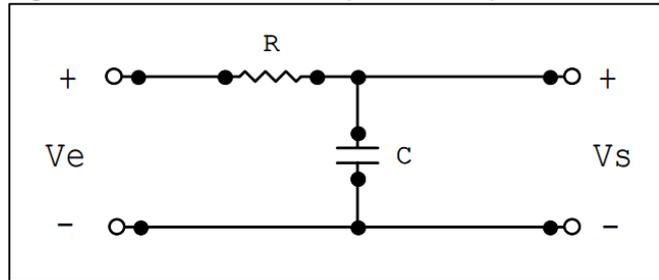
3.2.1 Saída analógica

O projeto da saída analógica de 0 a 10V parte da utilização de um sinal PWM do microcontrolador. O pino CCP1 do PIC será utilizado como saída modulada, o qual fará a excursão de um sinal de 0V (100% desligado) até 5V (100% ligado). Dessa forma, será necessário filtrar o sinal modulado a fim de manter um valor de saída constante. Após a filtragem, o sinal deve ser amplificado com um ganho 2 para que a variação de 0 a 5V seja convertida entre 0 a 10V.

A frequência escolhida para o PWM foi de 50kHz. Esse é um valor intermediário entre o mínimo (2929Hz) e o máximo (12MHz) disponibilizado pelo PIC18F2550 utilizando um *clock* de 48MHz. A aplicação exige um sinal analógico constante, sendo, portanto, passível de utilizar um filtro de primeira ordem resistivo-capacitivo (RC) passa-baixas. Um circuito RC possui baixo custo (menor do que utilizando componentes ativos) e eficiência adequada (atenuação de 20dB/dec) quando a frequência de operação é de pelo menos duas décadas acima da frequência de corte (ω_c).

O filtro passa-baixas RC é composto por um resistor e um capacitor, conforme Figura 14. Ele deve ser projetado para atenuar as altas frequências de modo a tornar o sinal modulado de entrada em uma saída constante de tensão. O valor estabelecido para a frequência de corte é de 10Hz ($\omega_c = 62,8 \text{ rad/s}$), o que admite uma variação relativamente rápida no tempo (100ms) considerando um sistema de iluminação, ao mesmo tempo em que bloqueia a frequência do PWM, configurada para 50kHz. Assim, foram calculados os componentes passivos do filtro, conforme a Equação 2.

Figura 14 – Circuito RC para filtro passa-baixas



Fonte: MUSSOI (2004, p. 32)

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (2)$$

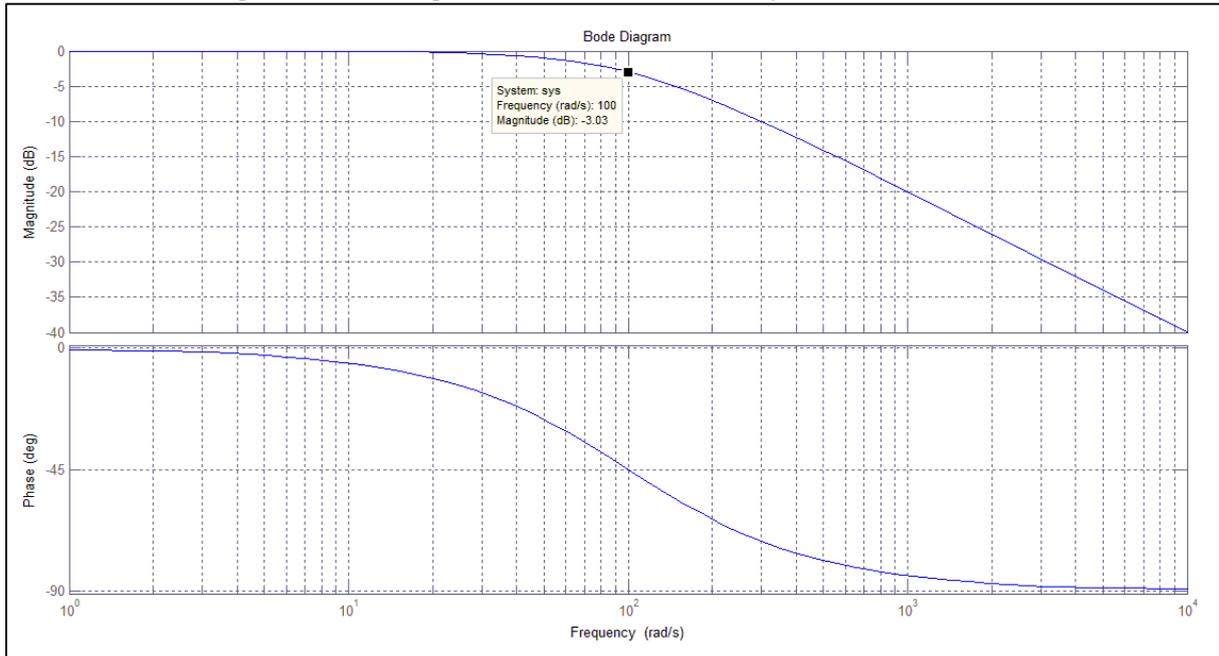
$$R = 10k\Omega \text{ (escolhido)} \rightarrow \omega_c = 10\text{Hz} = 62,8\text{rad/s}$$

$$62,8 = \frac{1}{10k \times C} \rightarrow C = \frac{1}{10k \times 62,8} \rightarrow C = 1,6\mu\text{F}$$

O valor de capacitância comercial disponível mais próximo do calculado é de $1\mu\text{F}$, sendo, portanto, definidos os dois componentes do filtro. Para $R=10k\Omega$ e $C=1\mu\text{F}$, a frequência de corte será de 100rad/s , que corresponde a aproximadamente 16Hz . A Equação 3 traz a função de transferência do filtro passa-baixas RC, cujo diagrama de Bode pode ser conferido na Figura 15. No gráfico da Magnitude percebe-se uma atenuação de $3,03\text{dB}$ em $\omega_c=100\text{rad/s}$ e, a partir desse ponto, um decréscimo de 20dB/dec , resultando em um ganho de $-69,94\text{dB}$ na frequência de operação do PWM (conforme calculado pela Equação 4).

$$F(s) = \frac{1}{1 + RC \cdot s} \quad (3)$$

Figura 15 – Diagrama de Bode do filtro passa-baixas RC



Fonte: Elaborado pelo Autor

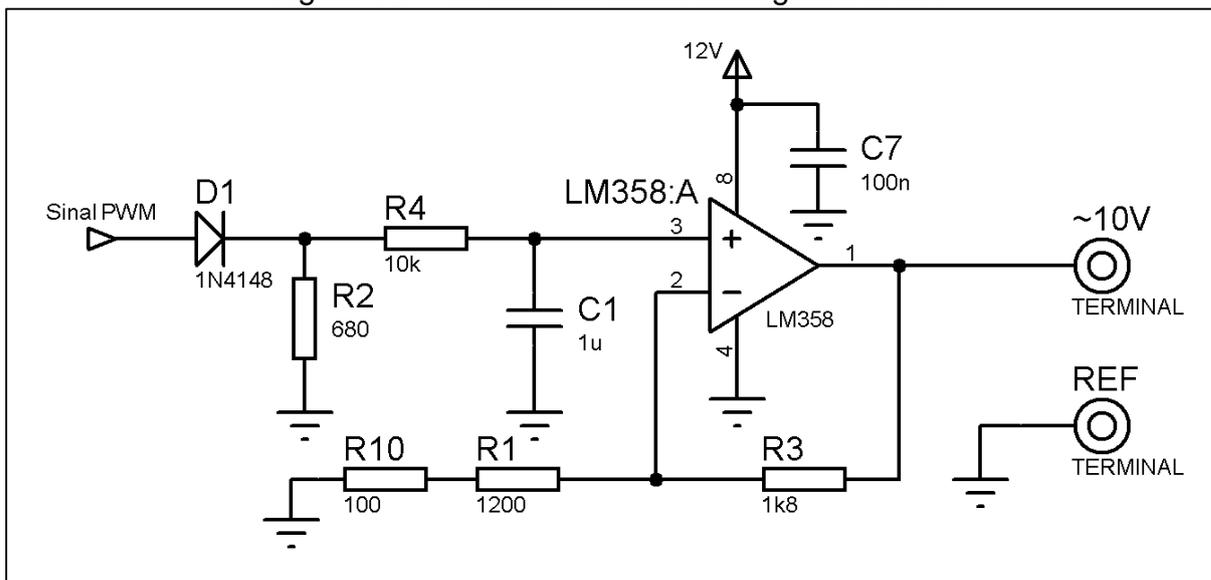
$$G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (4)$$

$$50\text{kHz} = 314159\text{rad/s} \rightarrow G(314159) = \frac{1}{\sqrt{1 + (314159RC)^2}} = 3,183 \cdot 10^{-4}$$

$$20 \times \log(3,183 \cdot 10^{-4}) = -69,94\text{dB}$$

Definidos os parâmetros RC do filtro passa baixas, foi projetado o circuito amplificador de sinal, que, ao mesmo tempo, atua como um *buffer*, permitindo a conexão com cargas de impedâncias diferentes. Esse circuito utiliza um amplificador operacional (Op Amp) que deve operar em modo de amplificador não-inversor. A Figura 16 exhibe o projeto completo da saída analógica, incluindo o filtro (R4 e C1) e o amplificador (LM358, R10, R1 e R3).

Figura 16 – Circuito de saída analógica 0 a 10V



Fonte: Elaborado pelo Autor

Antes de definir os parâmetros de amplificação do Op Amp e de escolher o mesmo, duas condições foram consideradas: primeiro, foi utilizado um diodo rápido (D1) em série com a saída digital do MCU, com o objetivo de proteger o microcontrolador contra correntes reversas. Logo, o sinal de PWM terá uma queda de tensão de aproximadamente 0,7V; segundo, foi utilizada uma alimentação assimétrica, de 12V e GND, dada a tensão de saída de 0 a 10V. Assim, foi escolhido o Op Amp LM358, uma vez que sua alimentação admite 12V assimétricos, sua máxima excursão é de 0 a 10,5V (quando $V_{cc}=12V$), seu custo no mercado local é baixo (R\$0,50) se comparado com amplificadores *rail-to-rail*, sua distribuição no Brasil é comum e há disponibilidade de encapsulamento SMD (ST, 2016). Os resistores R10, R1 e R3 tem a função de intensificar o ganho da saída analógica, que é calculado com base no máximo valor de entrada.

$$V_{+MAX} = 5 - 0,7 = 4,3V \quad \rightarrow \quad V_{-MAX} = 4,3V$$

$$V_O - V_{R3} - V_{-MAX} = 0 \quad \rightarrow \quad 10 - V_{R3} - 4,3 = 0 \quad \rightarrow \quad V_{R3} = 5,7V$$

$$V_{R3} = R3 \cdot I_{R3} \quad \rightarrow \quad I_{R3} = \frac{5,7}{R3}$$

$$V_{R10+R1} = 4,3V = (R10 + R1) \times I_{R3} = \frac{5,7}{R3} (R10 + R1)$$

$$R3 = 1,8k\Omega \text{ (escolhido)} \rightarrow R10 + R1 = \frac{4,3 \times 1,8k}{5,7} = 1358\Omega$$

O sistema foi simulado e experimentado em bancada e uma resistência de 1300Ω se comportou de maneira adequada, muito próxima do ideal (*duty cycle*¹¹ de 100% do PWM correspondendo a 9,9V na saída). Portanto, os resistores escolhidos para R10 e R1 foram de 100Ω e $1,2k\Omega$, respectivamente, os quais asseguram, juntamente com $R3=1,8k\Omega$, um ganho de aproximadamente 2,38.

O projeto da saída analógica, ainda conforme Figura 16, apresenta outros componentes. Um desses componentes é o resistor R2, que possui resistência equivalente a 6,8% de R4, componente R do filtro RC. Ele é usado para descarregar o capacitor C1 nos ciclos de descarga, uma vez que D1 impede a passagem de corrente reversa. Seu valor muito menor do que R4 garante que, do ponto de vista do capacitor, o valor da resistência equivalente (R_{eq}) seja muito semelhante para o ciclo de carga ($R_{eq}=R4$) e descarga ($R_{eq}=R2+R4$), não interferindo na eficácia do filtro projetado. Do ponto de vista do microcontrolador, R2 será um consumidor permanente de corrente, mantida em torno de 6mA para um *duty cycle* de 100%.

Os demais componentes são: o capacitor C7 e os terminais de saída. O C7 possui capacitância de $100nF$ e é utilizado como capacitor de desacoplamento junto à alimentação do Op Amp. Os conectores de saída são bornes parafusados que serão utilizados para ligação externa com os terminais de dimerização de 0 e 10V dos *drivers* de LED.

3.2.2 Saída a relé

Uma saída a relé deve ser projetada a fim de possibilitar a interrupção da alimentação do circuito de iluminação, visto que muitos *drivers* não desligam integralmente sua potência de saída para as lâmpadas apenas com 0V no sinal de controle (analógico). Considerando as opções disponíveis para tal função, pode-se

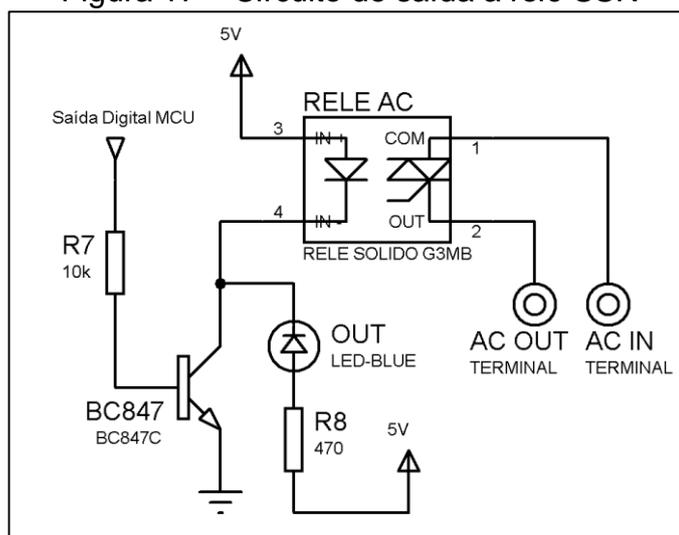
¹¹ Razão cíclica que descreve a fração de tempo em que um sistema está em estado ativo (WIKIPÉDIA, 2013).

utilizar um relé convencional ou um relé de estado sólido (SSR). A primeira opção é mais barata, entretanto não conta com uma série de vantagens que a segunda possui, como:

- Ausência de partes mecânicas, garantindo vida útil maior, comutação não audível e frequência de chaveamento maior;
- Inclusão de circuito detector de passagem por zero (*zero crossing*), responsável por chavear a saída quando a tensão da rede estiver próxima de 0V AC. Esse recurso reduz consideravelmente a geração de picos de alta frequência na comutação de cargas AC (WIKIPEDIA, 2016);
- Presença de Circuito *Snubber*, utilizado para amortecer os transientes de alta tensão que ocorrem na comutação das cargas AC além de absorverem a energia gerada no chaveamento de cargas indutivas (INSTITUTO NCB, 2014);
- Isolação óptica entre entrada e saída, sem a geração de campos magnéticos.

Dessa forma, será utilizado um SSR para compor a saída a relé, cujo diagrama pode ser visto na Figura 17. O modelo do componente é o G3MB-202P do fabricante OMRON, com tensão de entrada de 5V DC e corrente máxima de saída de 2A@100-240V AC (OMRON, 2009).

Figura 17 – Circuito de saída a relé SSR



Fonte: Elaborado pelo Autor

No projeto foi inserido uma interface a transistor entre o MCU e o relé, com a finalidade de proteger a saída digital, dado o consumo de corrente da entrada do SSR

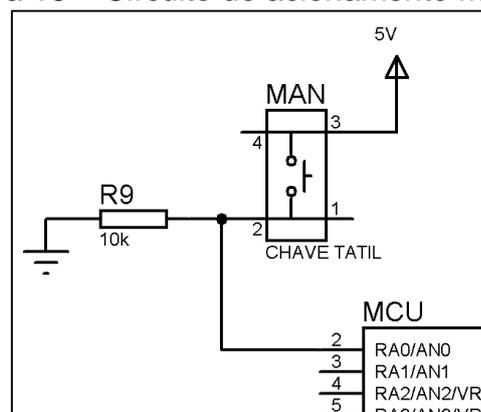
(20mA, máximo) e também do LED indicador de saída ligada. Um transistor NPN de aplicação comum (BC847-C) foi utilizado operando em modo de saturação. Assumindo $R7=10k\Omega$, a corrente de base será de $430\mu A$. Com h_{FE} típico de 520 (NXP, 2014), a corrente de coletor (I_C) seria matematicamente superior a 200mA. Considerando a resistência interna de entrada no SSR de 440Ω , conforme manual técnico do componente, I_C produziria uma queda de tensão de pelo menos 88V, remetendo a um caso típico de saturação (condição desejada), ou seja, chave fechada. Por outro lado, com a saída do MCU desligada a corrente de base será nula, e o transistor estará operando em corte, caracterizando o estado de chave aberta. A mesma analogia acontece com a saída do SSR, o qual terá seu contato fechado somente quando a entrada estiver polarizada.

3.3 OUTROS COMPONENTES DE HARDWARE

Um recurso importante nos atuadores KNX é a presença de um botão para acionamento manual das saídas. Ele não é um requisito obrigatório nesses dispositivos, entretanto, a maioria dos fabricantes oferece pelo menos um modelo do mesmo atuador com comando manual.

Nos sistemas KNX, um atuador interage com as cargas de acordo com as solicitações provenientes do BUS, ou seja, pulsadores, sensores e outras interfaces leem os estados dos seus contatos ou informações do ambiente e, de acordo com sua programação, enviam telegramas com o protocolo KNX. Os atuadores interpretam tais mensagens e atualizam suas saídas de acordo com os comandos recebidos. Assim deve funcionar uma instalação KNX. Contudo, se algum problema de comunicação estiver impedindo o tráfego de informações entre os dispositivos, um circuito de iluminação, por exemplo, não poderia mais ser acionado. Nessa situação, o recurso de acionamento manual é interessante e desejável, mantendo a funcionalidade do sistema. Logo, foi inserido um botão manual (MAN) no projeto de *hardware*, o qual será ligado na entrada digital RA0 do MCU, com resistor (R9) de *pull down*, conforme diagrama da Figura 18.

Figura 18 – Circuito de acionamento manual



Fonte: Elaborado pelo Autor

Outro componente utilizado no projeto de *hardware* é o conector *header*, de 10 pinos. Esse conector será utilizado para estabelecer a ligação física, por meio de cabo *flat*, entre alguns componentes que serão instalados em placas diferentes. São eles: os dois LEDs, os dois botões e o conector USB tipo B, os quais tiveram seus circuitos adaptados para a nova condição de conexão.

3.4 SÍNTESE

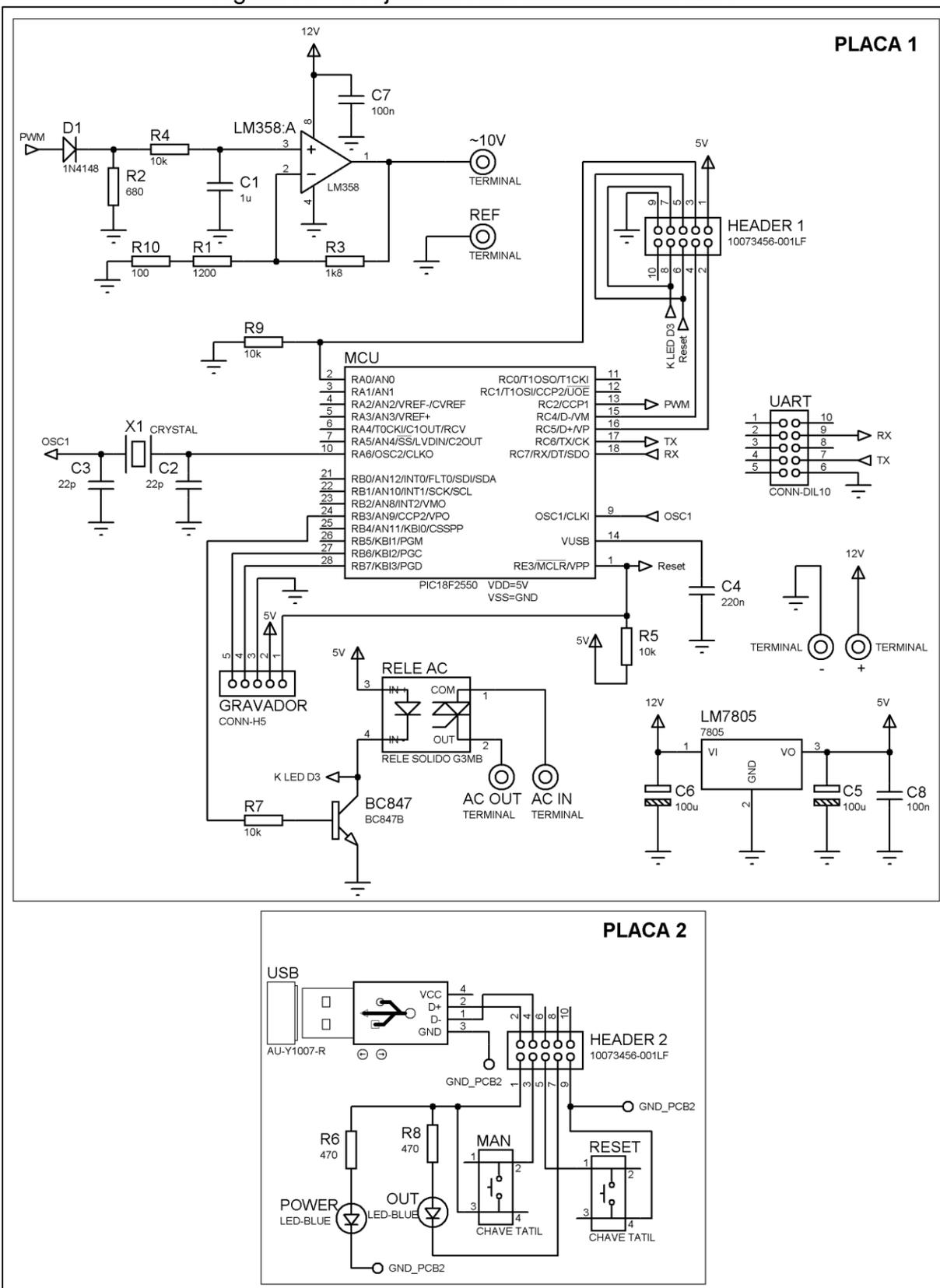
O Capítulo 3 traz o detalhamento do projeto de *hardware* do protótipo de atuador KNX para sistemas de iluminação LED compatíveis com regulação de 0 a 10V. Todos os componentes necessários para compor a BCU (microcontrolador e *transceiver*) e o AM (saída analógica e saída a relé) foram projetados e justificados de modo a cumprir com os requisitos de funcionalidade, compatibilidade e qualidade.

Entre os principais componentes definidos, estão:

- Interface KNX-UART: PCB BTM TP-UART;
- Microcontrolador: PIC18F2550-I/SO;
- Amplificador Operacional: LM358;
- Relé de Estado Sólido: G3MB-202P.

Ademais, a Figura 19 reúne o circuito completo de *hardware* do projeto de atuador KNX, incluindo os conectores *header* e as adaptações por eles originadas. A lista completa de componentes eletrônicos originada do projeto de *hardware* pode ser conferida no APÊNDICE A.

Figura 19 – Projeto de Hardware: Atuador KNX



Fonte: Elaborado pelo Autor

4 PROJETO DE *FIRMWARE* E DE *SOFTWARE*

Um projeto de *firmware* envolve muitos aspectos, os quais partem da escolha dos *softwares* de edição, compilação, gravação e depuração e passam pelas estruturas de lógica, funções e recursos do código. Este capítulo tem o objetivo de detalhar o processo de desenvolvimento do *firmware* do regulador de luminosidade KNX, incluindo cada uma das fases de projeto citadas. Além disso, será abordada a programação de *software* via ETS do sistema KNX que se comunicará com o dispositivo implementado.

4.1 INTERFACE DE PROGRAMAÇÃO, COMPILADOR C E GRAVAÇÃO

O compilador é um *software* de programação, geralmente com um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), cuja finalidade é converter um código de linguagem C em um arquivo *.hex, a ser gravado no microcontrolador. O que difere os compiladores uns dos outros é o IDE, a presença ou não de determinadas funções e a maneira de alterar parâmetros de fusíveis, entre outras configurações. Para o projeto deste trabalho foi escolhido o *software* PCWHD do desenvolvedor CCS, compatível com todas as famílias de microcontroladores PIC. Os motivos que levaram à definição do compilador foram: a disponibilidade do *software* (utilizado em outros projetos) e as funcionalidades/recursos oferecidos (funções de *delay*, aquisição de dados da UART, assistente de projeto, etc.). O ambiente de programação em linguagem C do *software* PCWHD pode ser conferido no APÊNDICE B.

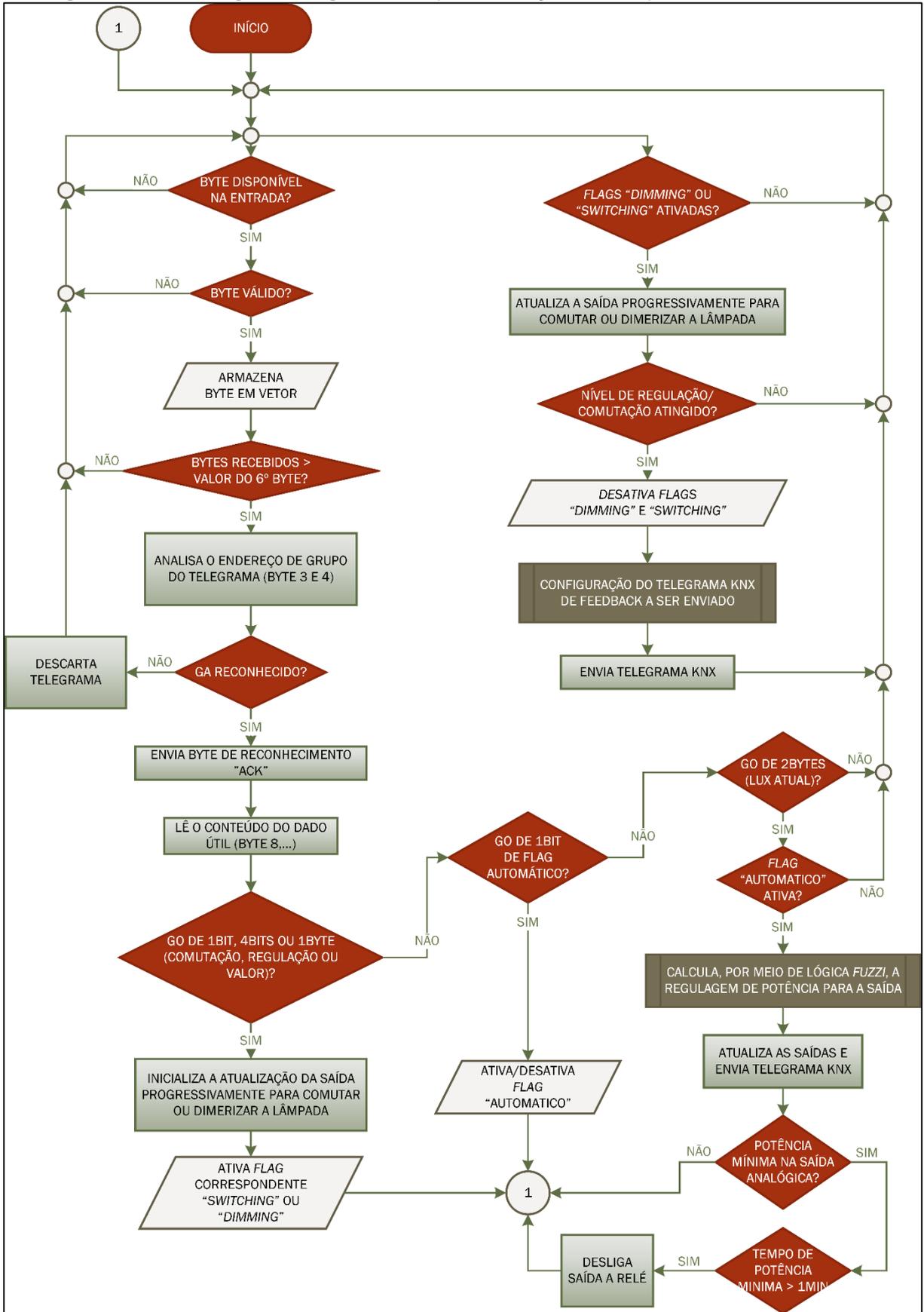
Para gravação do *firmware* no microcontrolador foi utilizado o *hardware* PICkit™3 com o respectivo aplicativo PICkit3 v3.10, ambos da Microchip, fabricante do MCU utilizado. O *download* do código é realizado via terminal ICSP, método pelo qual é transferido o código *bootloader* para posterior gravação via USB, que por sua vez passa a utilizar o *software* BootProgUsb. Por meio da mesma porta USB, o aplicativo USBSerialTerminal permite a troca de dados entre o MCU e o microcomputador, possibilitando a depuração do código.

4.2 VISÃO GERAL: FUNCIONALIDADE E FLUXOGRAMA

O projeto de *firmware* do atuador deste trabalho deve incluir, dentre outras funcionalidades, a pilha do protocolo KNX e a operação de uma saída analógica e outra a relé. O *stack* do KNX inclui cinco das sete camadas OSI, entre as quais estão distribuídas as funções de recepção de telegramas, verificação de endereçamentos, interpretação das informações de aplicação, composição dos telegramas de *feedback* e envio dos telegramas. As operações de dimerização e de chaveamento ocorrem após a interpretação dos comandos da pilha do KNX, quando uma sequência ordenada de ações atualiza as duas saídas, fazendo com que a intensidade luminosa da carga conectada nesses terminais varie progressivamente conforme o estabelecido no sistema KNX. O fluxograma da Figura 20 ilustra os passos necessários para implementação do *firmware* do dispositivo KNX regulador de luminosidade por saída analógica de 0 a 10V.

Conforme a mesma Figura 20, percebe-se que toda intervenção na saída analógica (dimerização de um sistema de iluminação) e na saída a relé (interrupção da energização do referido sistema) dependem dos telegramas provenientes do BUS, ou seja, as cargas serão acionadas por meio de outros dispositivos KNX, como pulsadores, telas de toque e sensores. Esses dispositivos deverão ser programados para enviar telegramas com determinados endereços de grupo, os quais serão utilizados junto aos objetos de comunicação (comutação (1 *bit*), regulação (4 *bit*), valor (1 *byte*), controle automático (1 *bit*) e intensidade luminosa (2 *bytes*)) do atuador implementado, para desempenhar uma função.

Figura 20 – Fluxograma lógico de implementação de dispositivo atuador KNX



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO *FIRMWARE*

Dada a sequência lógica de funcionamento do protótipo a ser implementado, o código deve ser desenvolvido, utilizando a ferramenta de edição e compilação definida. Para isso, a presente seção foi dividida em: configurações gerais, recepção de telegramas, comando comutar e valor, comando regular, comando automático e envio de telegramas.

4.3.1 Configurações gerais

Uma das configurações principais que devem ser realizadas é com relação à UART. Para utilizar a função UART é necessário definir os parâmetros de funcionamento da porta de comunicação, que são: taxa de transferência (*baud rate*) de 19200 *bits/s*, paridade par, pino transmissor (Tx) C6, pino receptor (Rx) C7 e quantidade de 8 *bits*. Ainda que o KNX opere a 9600 *bits/s* num meio físico do tipo TP, a interface BTM se comunica com o MCU por meio de uma comunicação UART a 19200 *bits/s*.

Outra configuração importante é a da saída analógica a partir de um sinal PWM. O CCS utiliza o *timer 2* para estabelecer a base de tempo da modulação do sinal PWM. Assim, ajustando o *preset* do *timer 2* (PR2) e o *prescaler*¹², qualquer frequência pode ser estabelecida (entre 2929Hz e 12MHz, utilizando *clock* de 48MHz) (CCS INC., 2016). Considerando a frequência desejada de 50kHz ($T = 2 \cdot 10^{-5}$ s), os parâmetros podem ser definidos conforme a Equação 5.

$$T = \frac{4}{clock} \times prescaler \times PR2 \quad (5)$$

$$PR2 = \frac{T \times clock}{4 \times prescaler} = \frac{2 \cdot 10^{-5} \times 48 \cdot 10^6}{4 \times 1} = 240$$

Logo, com PR2=240 e *prescaler*=1 a frequência do PWM ficará configurada para 50kHz. Entretanto, considerando o cálculo do *duty cycle* (Equação 6), o valor de PR2 foi ajustado para 255, o que aumenta a resolução da razão cíclica para o valor máximo. Com essa modificação, a frequência do PWM é alterada para 47MHz, a qual

¹² Fator de redução de frequência utilizado por um dispositivo eletrônico.

é configurada com as funções `setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,255,1)` e `setup_ccp1(CCP_PWM)` do CCS (CCS INC., 2016).

$$duty\ cycle = \frac{var}{4 \times (PR2 + 1)} \quad (6)$$

A variável `var` é o valor atribuído para alterar o *preset* do *duty cycle*. O valor dado pelo denominador da Equação 6, que neste caso é 1024, corresponde a 100%, ou seja, uma excursão de 0 a 1024 em “`var`” resultará em uma variação de 0 a 100% na razão cíclica do PWM. Logo, as alterações do ciclo de trabalho serão dadas pela função “`set_pwm1_duty((int16)var)`” do compilador.

Além das funções já detalhadas, ainda foram incluídas: as bibliotecas matemáticas, a definição de cristal (20MHz) e de *clock* (48MHz), a configuração de outro temporizador (*timer 1*) e a habilitação da interrupção do pino Rx da UART. Ainda, foram desabilitadas todas as funções extras dos fusíveis, uma vez que não há necessidade de utilização nesta aplicação.

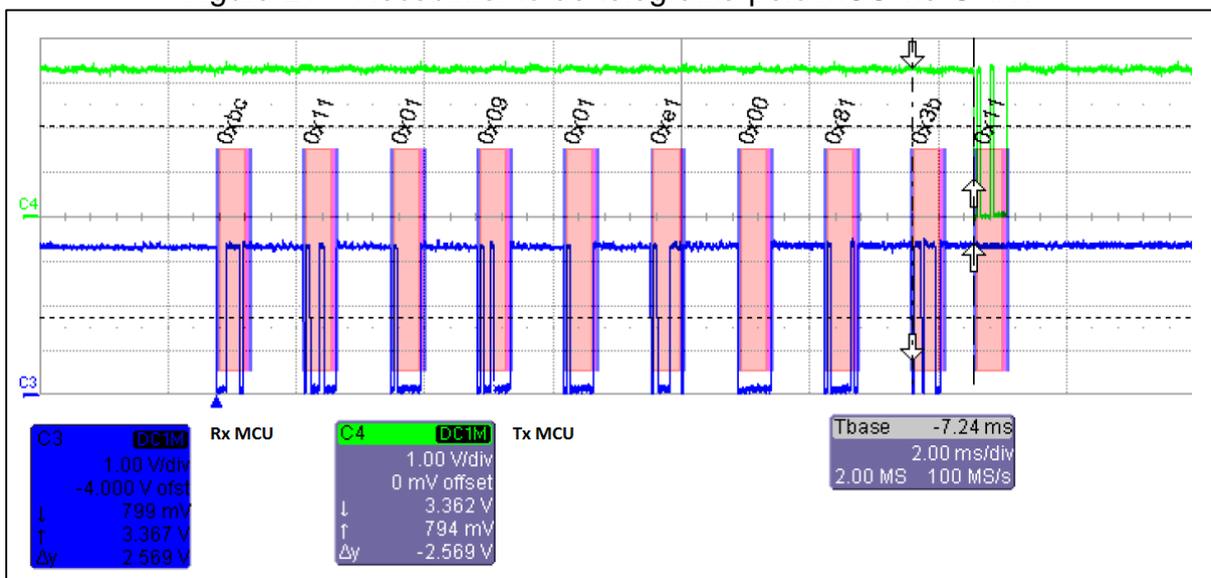
4.3.2 Recepção de telegramas

O recebimento dos telegramas por meio da UART foi implementado com o recurso de interrupção. Toda vez que algum *byte* estiver disponível no registrador de entrada de dados ocorre uma interrupção no programa de aplicação, para que haja tratamento prioritário. Enquanto o dado recebido não for um *byte* válido (0xBC, por exemplo), não há armazenamento do telegrama. Ao receber o primeiro caractere corretamente, um vetor começa a ser criado, *byte* por *byte*. Uma máscara 0x0F é aplicada no sexto dado armazenado, uma vez que o *nibble* menos significativo desse *byte* contém a informação de extensão do telegrama. Assim, é possível controlar o término do recebimento do telegrama.

Até no máximo 1,7ms após o início do recebimento do último *byte* do telegrama KNX, o MCU deve enviar uma mensagem de *feedback* à PCB TP-UART caso o telegrama seja a ele endereçado. Essa mensagem tem código hexadecimal 0x11 e, ao ser enviada ao *transceiver*, garante que o mesmo responda ACK ao BUS. Telegramas não endereçados não necessitam ser respondidos, e qualquer erro na recepção de telegramas é respondido automaticamente com NACK pelo *transceiver*. A Figura 21 mostra os sinais C3 (azul) e C4 (verde) de recebimento e transmissão de

dados, respectivamente, por parte do microcontrolador. Nesse exemplo de telegrama, o MCU recebeu 9 caracteres (0xBC, 0x11, 0x01, 0x09, 0x01, 0xE1, 0x00, 0x81 e 0x3B) e por estar endereçado ao GA 0/9/1, dado pelos *bytes* 4 e 5, respondeu com 0x11, sinalizando a TP-UART sobre o endereçamento positivo do telegrama recebido.

Figura 21 – Recebimento de telegrama pelo MCU via UART



Fonte: Adaptado de NEUGSCHWANDTNER e FERNBACH (2008, p. 9)

4.3.3 Comando comutar e valor

O comando comutar foi definido com GA = 1/0/3 e, toda vez que este endereço for recebido via BUS, a saída a relé atualizará o seu estado conforme a informação de ligar (nível lógico 1) ou de desligar (nível lógico 0) no *bit* menos significativo do oitavo *byte*. Além de comutar o relé, este comando faz com que a saída analógica varie a partir de seu valor atual até o mínimo ou o máximo, progressivamente.

De maneira análoga funciona o comando valor. O valor é um dado de 1 *byte* – neste dispositivo endereçado no GA = 1/4/0 – que carrega uma informação de porcentagem a ser aplicada na carga. O relé é ligado e a saída analógica é ajustada de modo a corresponder ao valor estabelecido pelo telegrama.

4.3.4 Comando regular

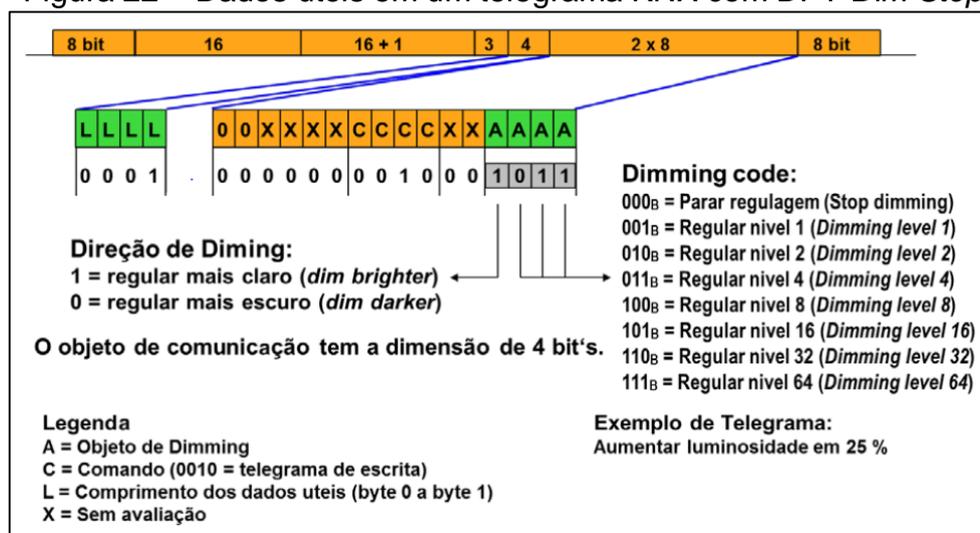
Um outro objeto de grupo (ou de comunicação) programado se chama comando regular. Esse GO possui informação útil de 4 *bits* (AAAA da Figura 22), que identifica a direção da regulação (regular mais claro ou regular mais escuro) no *bit*

mais significativo e o degrau da dimerização, conforme o nível dado pelos 3 *bits* restantes. Logo, o *step* de regulação é dado por

$$\frac{1}{\text{nível}} \cdot 100 [\%],$$

onde o nível pode ser descrito conforme a tabela *Dimming code* da mesma Figura 22.

Figura 22 – Dados úteis em um telegrama KNX com DPT *Dim Step*



Fonte: Adaptado de KNX ASSOCIATION (2014)

O GO de regulação foi endereçado no GA = 1/1/1 e, da mesma forma que o comando comutar, altera progressivamente o valor da saída analógica, até alcançar a porcentagem de dimerização definida pelo telegrama recebido. Segundo o fluxograma da Figura 20, a partir do condicional *FLAGS DIMMING OU SWITCHING ATIVADAS* se descreve a maneira como o *firmware* implementado atualiza o valor das saídas, no qual, em etapas de incremento, é alterada a tensão analógica e, por conseguinte, a intensidade luminosa da carga.

4.3.5 Comando automático

GO de 1 *bit atrelado* ao GA = 6/1/6, o comando automático é enviado via BUS para informar se a atuação da carga deve ser autônoma ou manual. Assim, ao receber o valor 1, uma *flag* interna no *firmware* identifica que a dimerização da iluminação deve ser constante, de acordo com o nível de luminosidade programado para o ambiente.

Outro GO de 2 *bytes* é responsável por armazenar o valor de intensidade luminosa (em lux) lido por um sensor KNX e transmitido via telegrama. Esse sensor

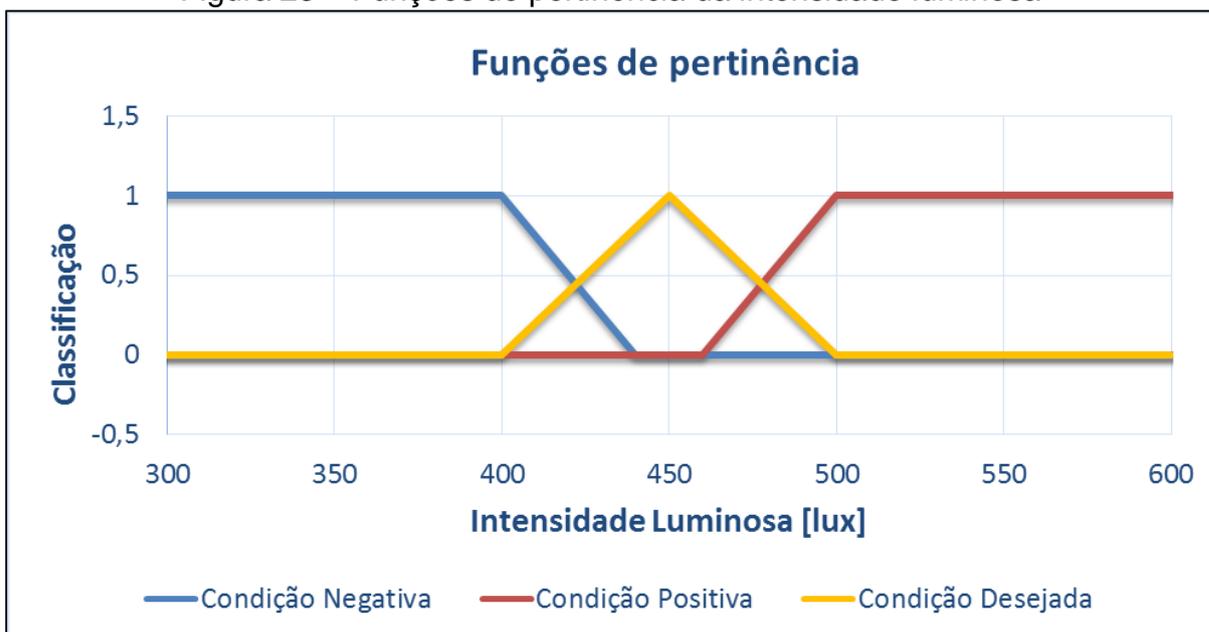
envia periodicamente (programação com $T=1s$) a informação da luminosidade atual em um padrão de codificação com ponto flutuante de 16 *bits* padrão do protocolo KNX. Este padrão é composto por: S E E E E M M M | M M M M M M M M, onde S (1 *bit*) compõe o sinal, E (4 *bits*) o expoente e M (11 *bits*) a mantissa, cujo valor, em lux, é decodificado conforme a Equação 7.

$$Valor = (0,01 \times M) \times 2^E \quad (7)$$

A partir da aquisição do valor de luminosidade ambiente, o *firmware* deve calcular a potência a ser aplicada na lâmpada, de modo a compensar a presença de luz natural. Este controle foi desenvolvido baseado em lógica *Fuzzy*, na qual uma função de pertinência classifica o estado da entrada (iluminação) e é determinada uma ação na saída. Esta lógica de controle foi escolhida com base no perfil dos programadores de sistemas KNX, geralmente profissionais de nível técnico. Uma parametrização de lógica *Fuzzy* para esta aplicação exigirá definir o limite máximo e mínimo de luminosidade (em lux), além do degrau máximo de regulação (em porcentagem). Esses parâmetros são facilmente compreendidos pelos utilizadores da solução, permitindo colocar o sistema em funcionamento sem o auxílio de especialistas. Além disso, um controle por *Fuzzy* garante uma regulação de modo gradual (conforto visual) e de maneira eficiente (manutenção da intensidade luminosa dentro do limite especificado), justificando a sua escolha.

O desenvolvimento da lógica *Fuzzy* para o controle de iluminação constante parte da informação de luminosidade atual lida através do BUS, de onde são extraídas as funções de pertinência que classificam a condição de luz em negativa (CN), positiva (CP) e desejada (CD), conforme a Figura 23.

Figura 23 – Funções de pertinência da intensidade luminosa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Como parâmetros, foram definidos: limite máximo de iluminação de 500lux, limite mínimo de iluminação de 400lux e degrau máximo de regulação de 3%. Assim, o degrau D aplicado na saída segue Equação 8

$$D = (CN - CP) \cdot 3\% \quad (8)$$

onde CN e CP são as funções de pertinência da condição negativa e positiva, respectivamente, e variam de 0 a 1. Desta forma, variações de 0 a 3%, para mais ou para menos, são aplicadas na saída de modo a corrigir a falta ou excesso de luz e, por conseguinte, otimizar o consumo de energia elétrica.

4.3.6 Envio de telegramas

Segundo as Especificações KNX, deve ser implementado um objeto de comunicação de *feedback* quando o dispositivo for do tipo atuador. Para cada atualização nas saídas analógica ou digital, um telegrama deve ser enviado ao barramento para informar a situação dos objetos de grupo do dispositivo. Assim, ao comutar a saída a relé, o telegrama com GA=1/2/3 sinaliza os dispositivos de BUS que estiverem endereçados no mesmo GA sobre o *status* da saída digital (ligada ou desligada). De maneira similar, outro telegrama com GA=1/3/1 é enviado a cada

atualização da saída analógica, informando, em 1 *byte* (definido pela Associação KNX), a porcentagem atual da saída regulável.

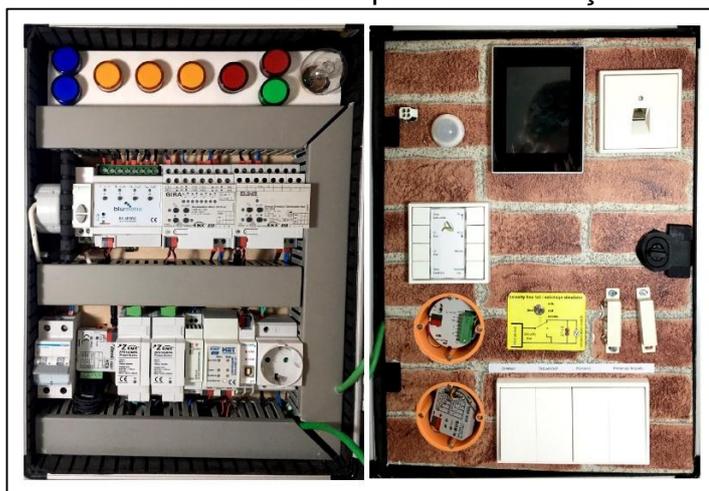
Para efetivar a transmissão do telegrama KNX, ele deve obedecer à norma KNX quanto à composição dos caracteres, e também ao protocolo do *transceiver* TP-UART. Segundo a Siemens (2013), os serviços disponíveis para recepção de caracteres do microcontrolador são: U_L_DataStart (0x80), U_L_DataContinue (0x81-0xBE) e U_L_DataEnd (0x47-0x7F). Ou seja, todo *byte* do telegrama KNX deve vir precedido por um dos três serviços da TP-UART para que o pacote possa ser recebido com sucesso e, após, retransmitido ao barramento.

O telegrama de *feedback* que sinaliza a saída a relé acionada possui os 9 *bytes* a seguir: 0xBC 0x11 0x09 0x0A 0x03 0xE1 0x00 0x81 0x32, onde destacam-se o endereço físico definido para o dispositivo (1.1.9, *byte* 2 e *byte* 3), o endereço de grupo (1/2/3, *byte* 4 e *byte* 5) e a operação de escrita do valor 1 (*byte* 8). Prevendo o protocolo do *transceiver*, o telegrama a ser transmitido será: 0x80 0xBC 0x81 0x11 0x82 0x09 0x83 0x0A 0x84 0x03 0x85 0xE1 0x86 0x00 0x87 0x81 0x48 0x32. Qualquer erro de recepção dos caracteres, como *bytes* inválidos, ou erro no *check byte*, são informados ao MCU pelos serviços do transreceptor. A retransmissão da mensagem KNX no barramento fica por conta da PCB TP-UART.

4.4 PROGRAMAÇÃO DE SOFTWARE – SISTEMA KNX

Alguns dispositivos KNX são indispensáveis para o desenvolvimento deste projeto, uma vez que apenas eles enviam e recebem telegramas KNX. Portanto, eles serão utilizados para interagir com o protótipo, permitindo testar a comunicabilidade e interoperabilidade com o protocolo KNX, um dos principais objetivos deste trabalho. Esses produtos são certificados pela Associação KNX e estão dispostos em um kit conforme a Figura 24. Dentre os dispositivos, foram utilizados: duas fontes KNX 160mA, uma fonte 12V, um teclado KNX, uma tela sensível ao toque de 4,1” a cores, um sensor de presença e luminosidade, quatro pulsadores/interruptores convencionais e uma interface de entradas universais de 4 canais.

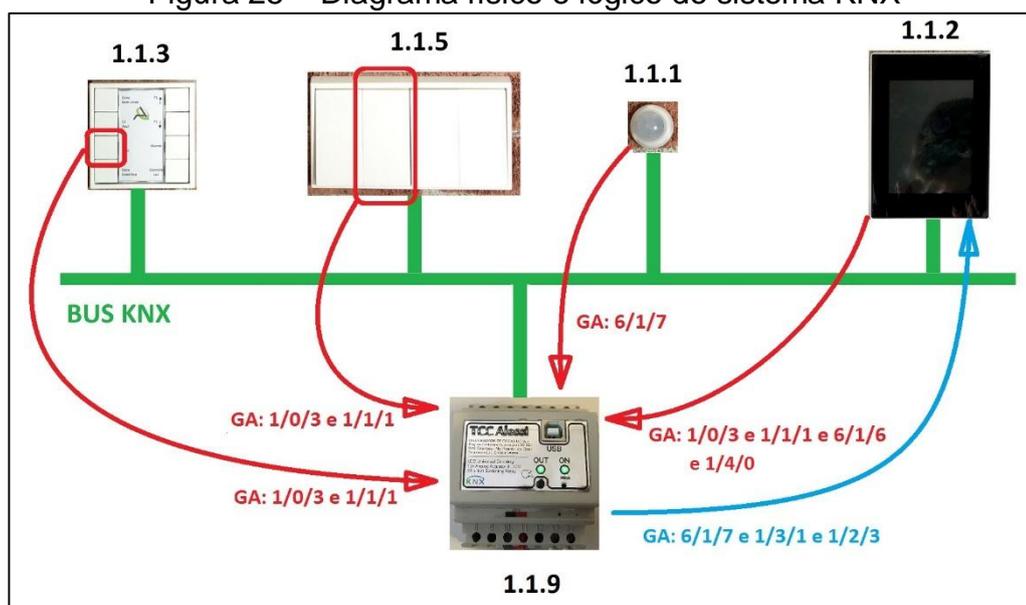
Figura 24 – Sistema KNX utilizado para comunicação de dispositivos



Fonte: Elaborado pelo Autor

A programação do teclado JUNG (1.1.3), das entradas binárias K-BUS (1.1.5), da interface gráfica sensível ao toque Z41 ZENNIO (1.1.2), e do sensor de luminosidade EASYLUX (1.1.1) foi realizada no *software* ETS de modo a enviar os dados de comutação, regulação e intensidade luminosa para o atuador implementado (1.1.9). O diagrama da Figura 25 mostra a ligação física dos equipamentos no barramento (linha verde) e as ligações lógicas (linhas vermelhas e azul) que endereçam a comunicação entre os dispositivos.

Figura 25 – Diagrama físico e lógico do sistema KNX



Fonte: Elaborado pelo Autor

No teclado 1.1.3 foi utilizado o botão 5 para a função *switching* e *dimming*. Com o mesmo botão, pulsos curtos enviam comandos de comutação enquanto pulsos

longos transmitem telegramas de regulação, ambos de maneira alternada (*toggle*). Após realizada a configuração, os objetos de grupo *switching* e *dimming* ficam disponíveis e eles são endereçados aos GAs 1/0/3 e 1/1/1, respectivamente. Estes são os endereços programados no protótipo para comutar e regular a saída.

As entradas binárias (1.1.5) conectam pulsadores convencionais para serem utilizados no sistema KNX. O canal B (tecla do dispositivo 1.1.5 identificada na Figura 25) foi utilizado para executar uma função idêntica àquela programada no botão 5 do teclado JUNG. Assim, o interruptor conectado no canal B terá a funcionalidade de comutar ou regular a saída do dispositivo implementado, através dos mesmos endereços de grupo, 1/0/3 e 1/1/1.

A interface gráfica sensível ao toque foi utilizada para visualizar o *status* das saídas analógica e à relé, comutar e regular as mesmas, acionar o modo de regulação automática, acionar um comando de valor igual a 40% e visualizar a informação de luminosidade atual. Assim, uma página foi desenvolvida (conforme a Figura 26) para exibir os ícones de atuação e de visualização que foram definidos com os GAs de acordo com a Tabela 2.

Figura 26 – Tela desenvolvida na interface gráfica KNX Z41 ZENNIO



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 2 – Endereços de Grupo da interface sensível ao toque

GA	Função	Bits
6/1/7	Indicador de luminosidade [lux]	16
1/3/1	Indicador de dimerização [0 a 100%]	8
1/0/3	Comutar saída a relé	1
1/1/1	Regular a saída analógica	4
1/2/3	Indicador de saída a relé	1
6/1/6	Acionar controle automático	1
1/4/0	Acionar valor de 40%	8

Fonte: Elaborado pelo Autor

O sensor de luminosidade foi configurado para transmitir telegramas da intensidade luminosa (em lux) a cada 1s. Endereçados no GA 6/1/7, esses telegramas são lidos pelo protótipo implementado para calcular a potência da saída analógica.

Todas as configurações realizadas no *software* ETS para a parametrização dos dispositivos KNX estão detalhadas no APÊNDICE C.

4.5 SÍNTESE

O Capítulo 4 trouxe o detalhamento da implementação de *firmware* do atuador KNX regulador de luminosidade. O código foi desenvolvido em linguagem C, por meio do compilador PCWHD, do desenvolvedor CCS, e prevê a manipulação de uma saída analógica e outra à relé de acordo com informações provenientes do protocolo KNX. A pilha KNX foi desenvolvida para interpretar mensagens, atuar corretamente e enviar telegramas de *feedback*, garantindo interoperabilidade com outros dispositivos KNX certificados.

5 PROJETO CONSTRUTIVO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Este capítulo tem o objetivo de descrever as etapas de desenvolvimento da montagem do protótipo, incluindo o projeto da PCB, o projeto em Desenho Assistido por Computador (CAD), a montagem da placa eletrônica, a fixação dos componentes e o acabamento em geral. Todas estas etapas dependem do perfil de caixa que será utilizada na montagem, uma vez que ela dita o dimensionamento máximo das placas e uma série de outras restrições.

Um dispositivo atuador KNX desenvolvido para instalações prediais e residenciais pode ser projetado ou para fixação em trilho DIN ou para acomodação em caixas 4x2 e 4x4. Foi escolhido, para a implementação deste protótipo, a base de fixação em trilho DIN, por ser um padrão internacional e também por ser o mais produzido e comercializado entre as duas opções. A definição sobre o modelo da caixa compatível com a norma DIN partiu da análise das caixas utilizadas por outras marcas, como Blumotix, GIRA e JUNG. Com um atuador a relé (quatro canais), um atuador de persianas (dois canais) e um atuador *dimmer* universal (um canal), respectivamente, ambos os fabricantes optaram por um modelo de caixa com dimensões próximas a 62x72x90mm (altura x largura x comprimento). Logo, foi definida uma caixa padrão semelhante, fabricada pela PATOLA, conforme a Figura 27.

Figura 27 – Caixa PATOLA modelo DIN 62x72x52 T.I.



Fonte: PATOLA (2016)

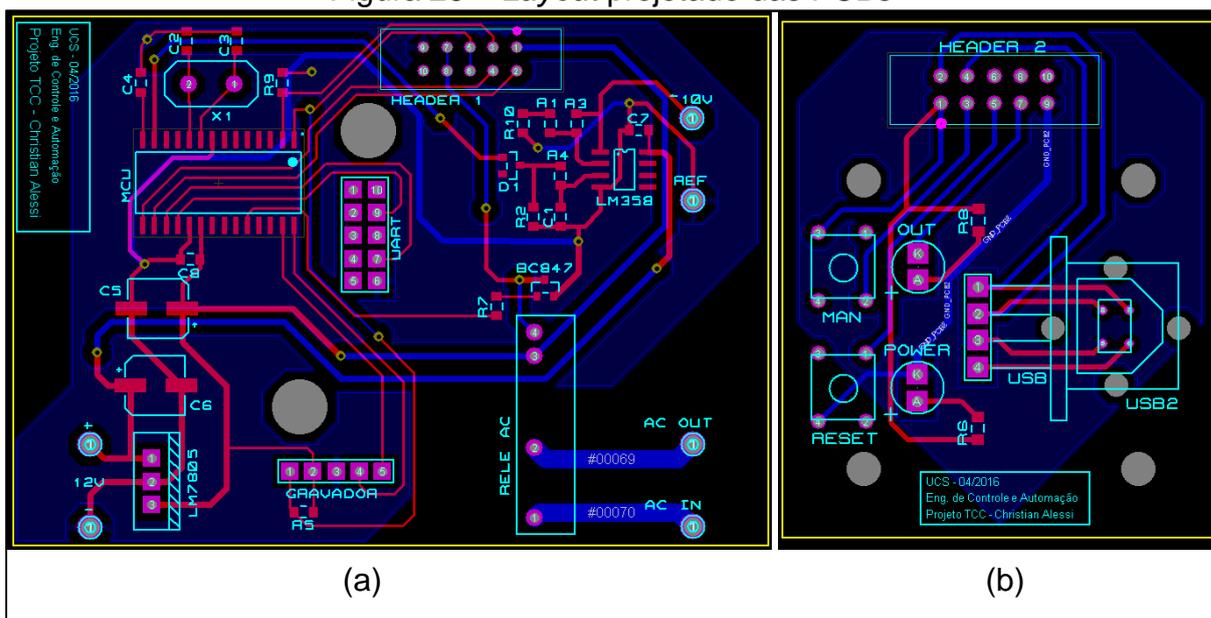
Definida a caixa de montagem, iniciou-se o projeto da PCB e a modelagem do produto final em CAD, a fim de garantir o posicionamento das placas dentro da caixa, mantendo a interface de LEDs e botões em contato com o usuário e as conexões de alimentação, saídas e barramento KNX disponíveis. Essas duas fases, seguidas pela montagem do protótipo, serão detalhadas em seção específica.

5.1 PROJETO DA PCB

Com dimensões de 82,7 x 58,2mm, a placa principal foi projetada para ser fixada na base da caixa padrão, onde os terminais de aço 1020 bicromatizados (acompanham a caixa) necessariamente devem ser posicionados. Esses terminais serão utilizados para receber a alimentação de 12V DC, e também para conectar as saídas analógica e à relé.

A maior parte do circuito eletrônico projetado no Capítulo 3 está contida nesta placa principal (conforme Placa 1 da Figura 19), restando apenas os componentes de gerenciamento (USB), de operação (botões) e de visualização (LEDs), para a placa secundária (Placa 2), a ser fixada no topo da caixa padrão. Assim, o *layout* das PCBs 1 e 2 foi projetado conforme a Figura 28a e Figura 28b, respectivamente, com o auxílio do software Ares Proteus.

Figura 28 – *Layout* projetado das PCBs

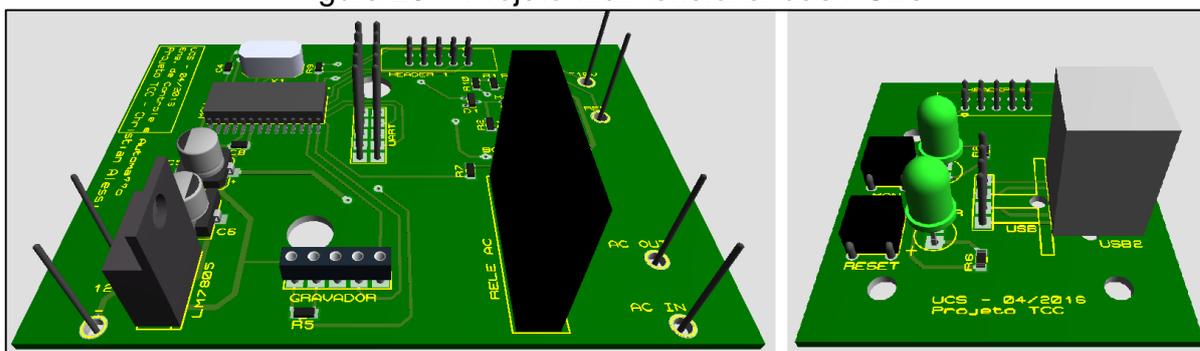


Fonte: Elaborado pelo Autor

Dada uma espessura de cobre de 0,5Oz (17 μ m) para a placa, uma trilha com largura de 10mils é capaz de conduzir 500mA, enquanto uma de 30mils suporta até 1A. Logo, as trilhas de sinais e de comunicação foram projetadas com largura de 15mils (já considerando uma margem de segurança) e as de alimentação com 30mils. Todo o *hardware* consome menos do que 100mA, fato que justifica os 30mils de largura de trilha adequado à alimentação. Além disso, foi utilizado 80mils nas trilhas dos contatos do relé (suporte para 2A) e 20mils no circuito de saída analógica.

Uma visão tridimensional da placas foi gerada para facilitar o projeto geral do protótipo, identificando dimensionamentos e manipulando o posicionamento dos componentes dentro da caixa. Assim, a Figura 29 exhibe uma imagem 3D da PCB principal e secundária, respectivamente.

Figura 29 – Projeto tridimensional das PCBs



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2 MODELAGEM DO PROTÓTIPO EM CAD

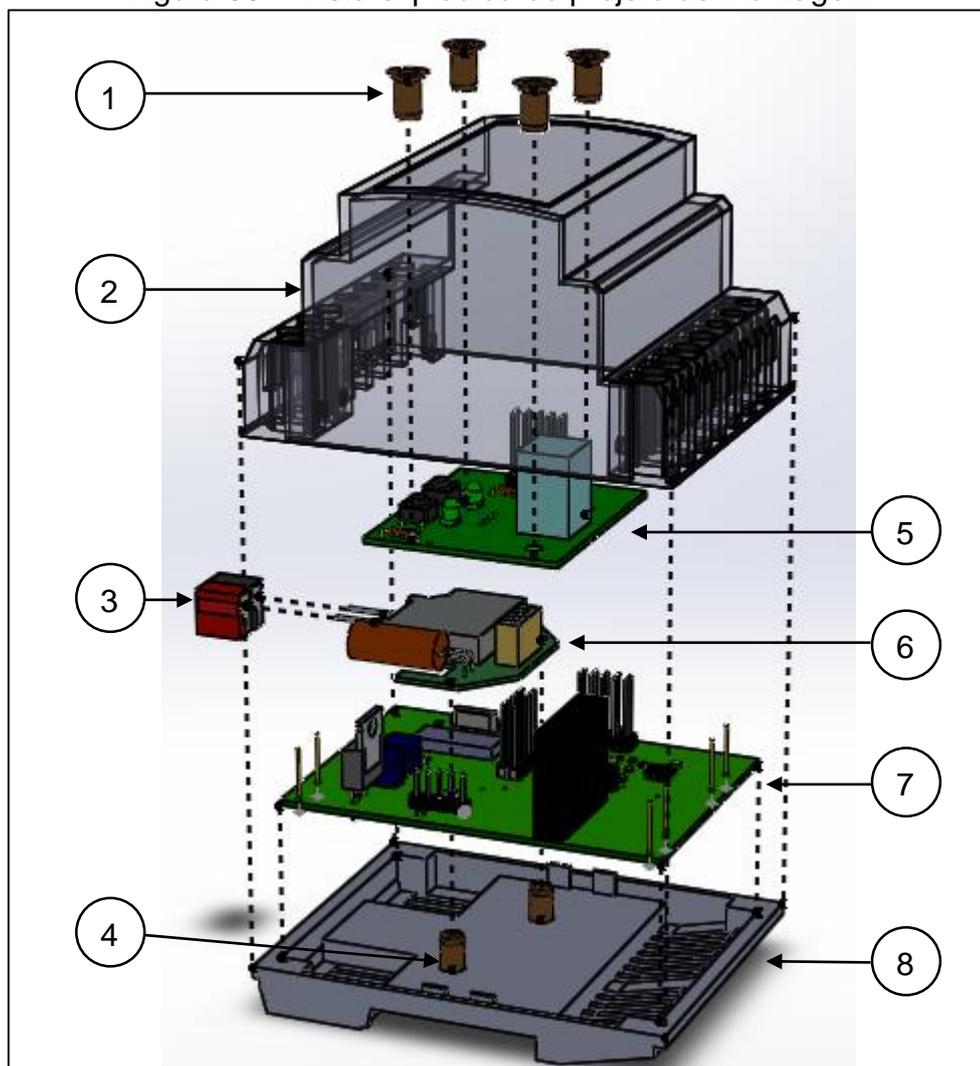
Com o auxílio do *software* SolidWorks® os componentes utilizados na implementação do protótipo foram modelados. São eles: as placas 1 e 2, a PCB TP-UART, o conector KNX, os rebites roscados e a caixa Patola.

A placa secundária deve ficar localizada no topo da caixa, a uma altura suficiente para que o conector USB, os LEDs e os botões atinjam a superfície, permitindo interação com o usuário. Sua ligação com o MCU e os componentes da placa principal se dará por meio de cabo *flat*, para flexibilizar a montagem do protótipo. A PCB TP-UART deve ficar localizada de tal forma que permita a inserção do conector KNX com a caixa fechada, que suporte o esforço mecânico durante a conexão desse terminal e que se conecte com a barra de pinos dupla prevista para comunicação com o microcontrolador. A placa 1 será ajustada na base da caixa padrão; sua fixação se dará pelo encaixe dos terminais na estrutura da caixa, os quais são ajustados e firmes o suficiente para manter a placa estática. Uma vista explodida do *layout* de montagem projetado pode ser conferido na Figura 30, onde:

- 1- 4x Rebite roscado M3 Ø5 x 10mm;
- 2- Estrutura da caixa Patola;
- 3- Conector KNX;
- 4- 2x Rebite roscado M3 Ø5 x 10mm;

- 5- PCB secundária;
- 6- PCB TP-UART;
- 7- PCB principal;
- 8- Base da caixa Patola

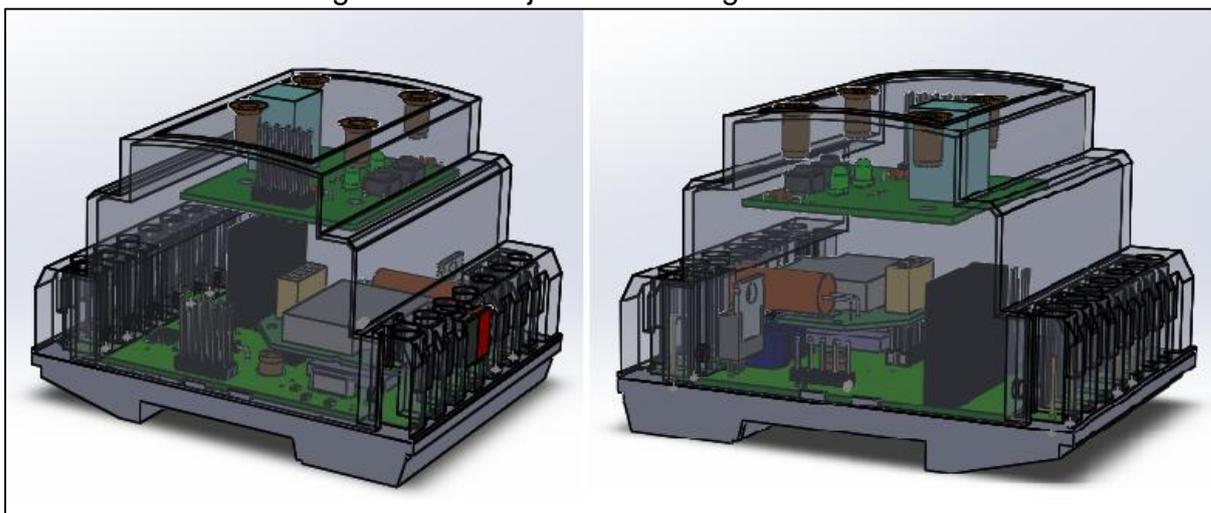
Figura 30 – Vista explodida do projeto de montagem



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em uma outra imagem, com duas vistas do protótipo montado em CAD (Figura 31), é possível conferir o posicionamento final das placas e demais componentes.

Figura 31 – Projeto de montagem em CAD

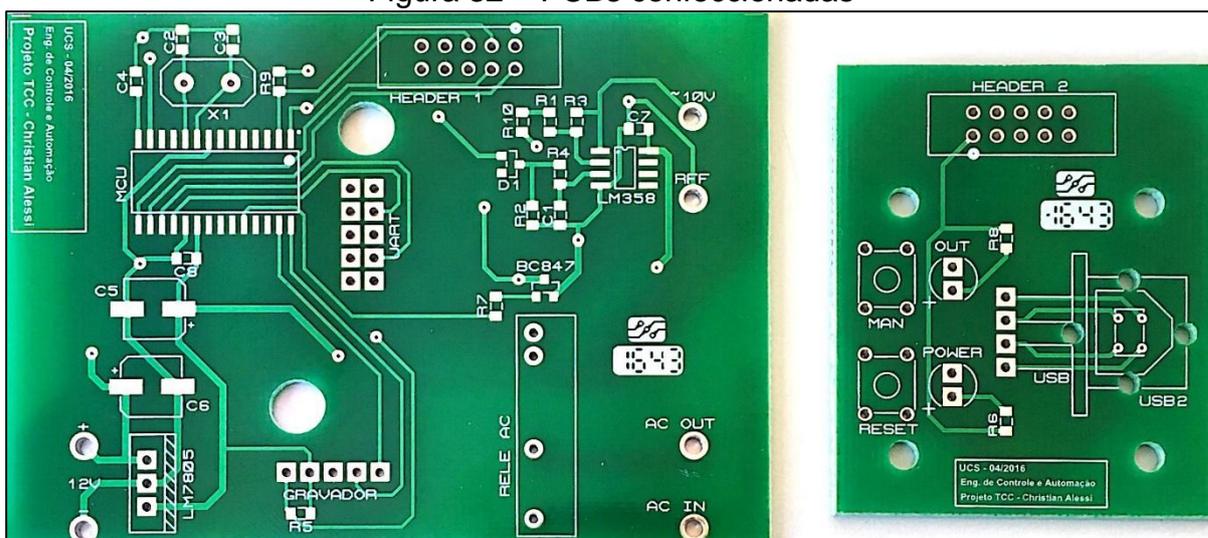


Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3 CONFEÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

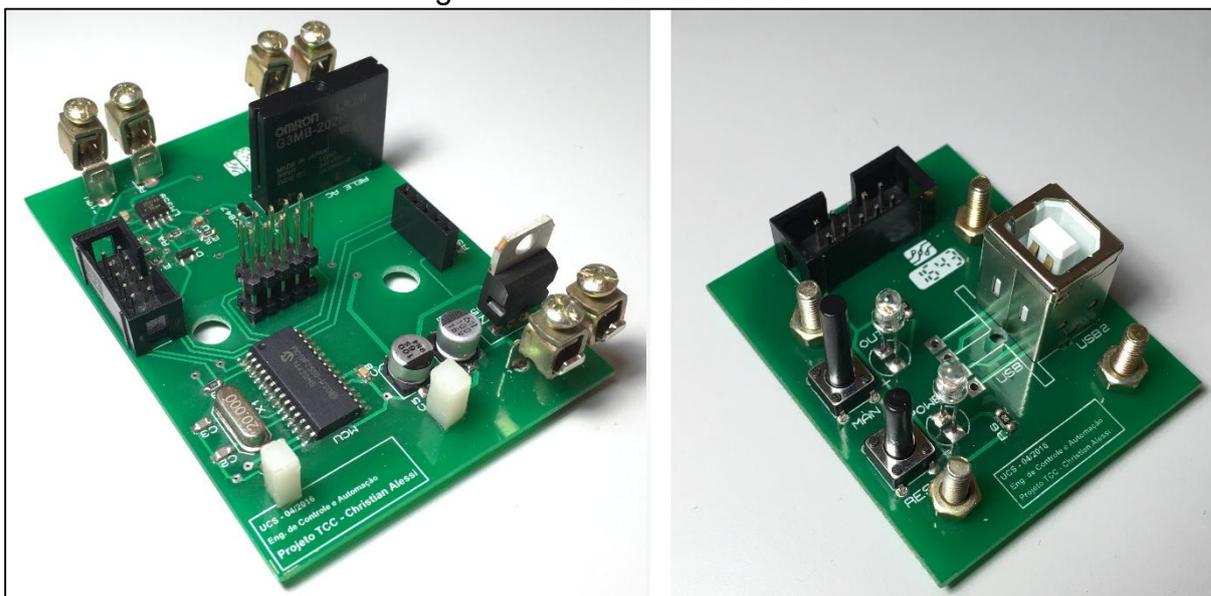
O processo de construção do protótipo parte da confecção das placas de circuito impresso. As placas fabricadas, conforme a Figura 32, receberam os componentes eletrônicos de acordo com projeto de *hardware* do Capítulo 3 e com o *layout* projetado na seção 5.1 do presente Capítulo. O resultado das placas montadas pode ser visto na Figura 33, o qual se equipara com o projeto 3D das PCBs da página 66.

Figura 32 – PCBs confeccionadas



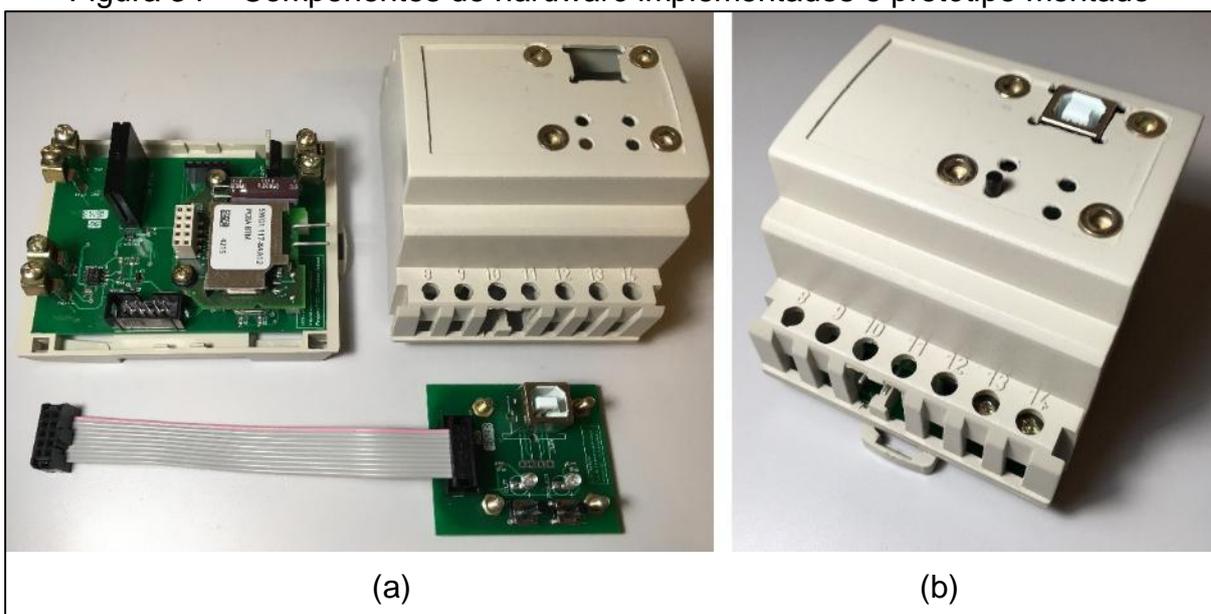
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 – PCBs montadas



Fonte: Elaborado pelo Autor

A conexão entre PCB 1 e a PCB 2 se dá por meio de um cabo flat de 10 vias e de dois conectores *header*, conforme a Figura 34a. Na mesma Figura é possível identificar a fixação da PCB TP-UART junto à base da caixa padrão, já conectada por intermédio da barra de pinos dupla na placa principal. Além disso, são notados os processos de furação e usinagem que foram realizados na estrutura da caixa plástica, de modo a acomodar os botões, LEDs, USB, rebites e a placa TP-UART. O protótipo montado com todos os componentes fixados pode ser visto na Figura 34b.

Figura 34 – Componentes de *hardware* implementados e protótipo montado

(a)

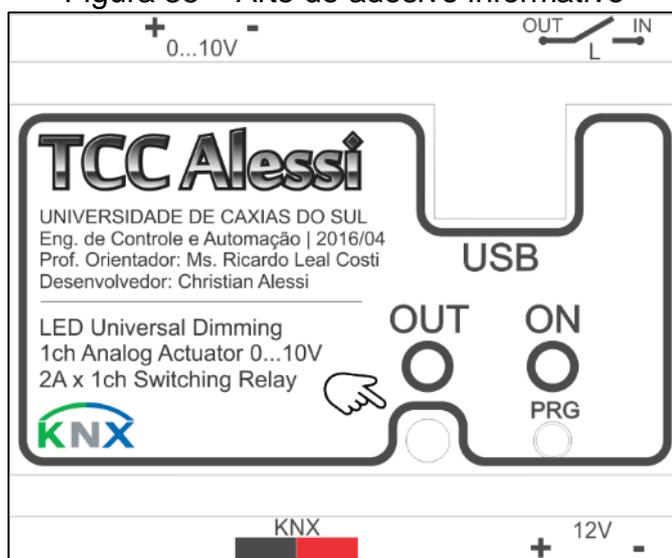
(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4 ADESIVO DE IDENTIFICAÇÃO

Com o objetivo de proporcionar acabamento profissional e identificar a funcionalidade do protótipo, foi desenvolvida uma arte (Figura 35) para posterior confecção de um adesivo. A peça principal deste adesivo será fixada na parte superior da estrutura da caixa Patola e terá dimensões de 62 x 34mm, enquanto outras duas faixas de 62 x 4,5mm serão coladas próximas aos bornes, identificando a ligação.

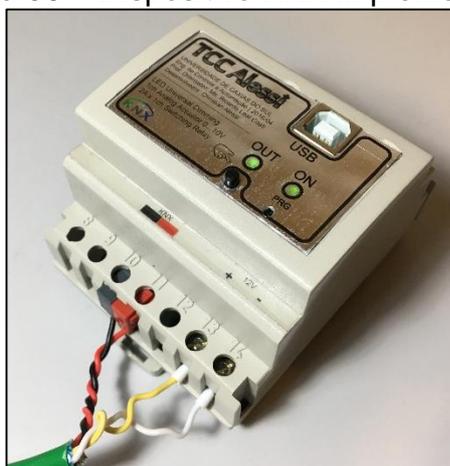
Figura 35 – Arte de adesivo informativo



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com a colocação do adesivo de identificação, a última fase da implementação do protótipo de dispositivo KNX regulador de luminosidade foi concluída. A Figura 36 ilustra o dispositivo desenvolvido.

Figura 36 – Dispositivo KNX implementado



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.5 SÍNTESE

O Capítulo 5 detalhou o projeto da PCB, o projeto do dispositivo em 3D, a montagem dos componentes eletrônicos, a fixação das placas e o desenho de um adesivo identificador. Foram utilizados os softwares: Ares Proteus® para o projeto das placas de circuito impresso, SolidWorks® para a modelagem do protótipo e CorelDraw® para a criação da arte do adesivo. Com os projetos concluídos, foi possível planejar a usinagem da caixa plástica, que, nos processos de furação e fresagem manuais, garantiram a acomodação de alguns componentes, como botões, LEDs, USB e a PCB TP-UART. A montagem final foi satisfatória, uma vez que se atingiu um encaixe adequado de todas as partes do dispositivo de acordo com a modelagem projetada via CAD.

O histórico fotográfico dos processos que envolveram a montagem do dispositivo pode ser conferido no APÊNDICE D, enquanto o diagrama de ligação padrão do protótipo está no APÊNDICE E.

6 ANÁLISE CRÍTICA DO PROTÓTIPO

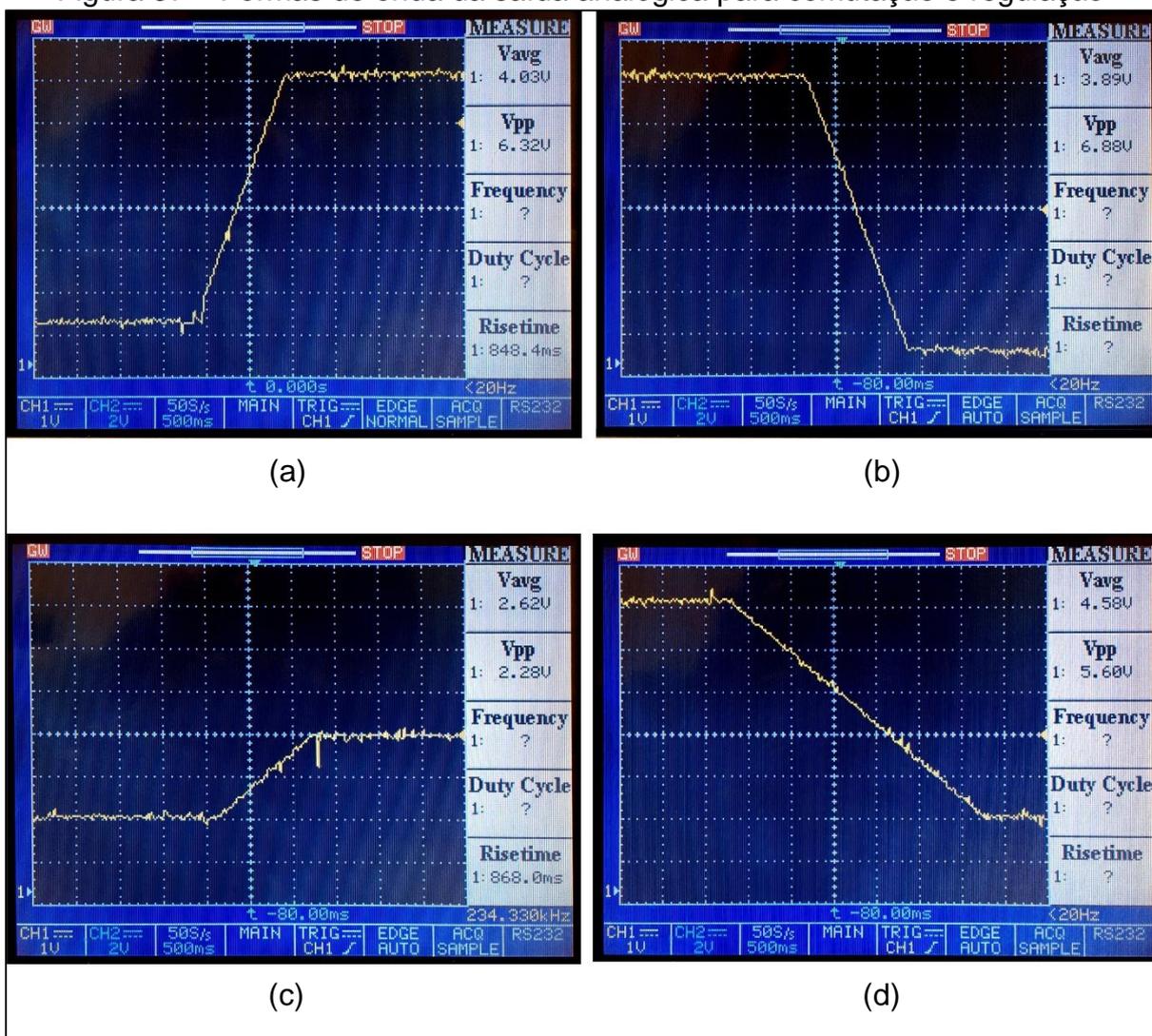
De posse do dispositivo KNX desenvolvido, faz-se necessária uma análise do mesmo sob os aspectos de funcionalidade, confiabilidade do *hardware* e consumo de energia. Assim, o presente Capítulo visa demonstrar os resultados obtidos com o dispositivo implementado neste Trabalho de Conclusão de Curso II.

6.1 FUNCIONALIDADES

O protótipo de atuador KNX desenvolvido atende aos requisitos da Associação KNX quanto à disponibilidade das funções, a qual exige GO de comutação (1 *bit*), de regulação (4 *bits*) e de valor (1 *byte*), além dos seus respectivos *feedbacks*. Comandos provenientes de dispositivos KNX de entradas (teclados, telas, sensores) são transmitidos via BUS KNX e o resultado é uma ação nas saídas analógica e a relé responsável por alterar o brilho de uma carga luminosa.

A Figura 37 exibe as formas de onda da saída analógica para alguns comandos de comutação e regulação. Na primeira delas (a), foi executada uma operação de *switching on*, levando a saída analógica que estava em 1V para 7V (valor máximo definido, dada a carga utilizada, um *driver* da marca Mean Well com fitas de LED de 8W). Na segunda delas (b), o comando foi de *switching off*, levando a saída de 7V para 0V. Em ambas, o comando foi de comutação, e pode-se perceber a mudança progressiva implementada na saída analógica, com taxa variação de aproximadamente 6V/s. Na forma de onda em c, é possível conferir o comportamento da saída analógica para uma regulação de 1,7V para 3,7V, enquanto que em d, a regulação é de 7V para 1,7V. Nesses dois comandos, também conhecidos por *dimming*, a taxa de variação programada é menor (aproximadamente 2V/s) permitindo um ajuste mais preciso por parte do usuário. A saída analógica é conectada nos terminais de um *driver* de LED compatível com o padrão de 0 a 10V, e o nível de luminosidade emitido pelo sistema é diretamente proporcional ao sinal de tensão. As rampas de aumento ou diminuição do valor analógico refletem mudanças progressivas na intensidade luminosa produzida, indo ao encontro dos conceitos de conforto visual, também proporcionado pelo protótipo implementado.

Figura 37 – Formas de onda da saída analógica para comutação e regulação



Fonte: Elaborado pelo Autor

A funcionalidade principal do dispositivo é a regulação automática de luminosidade, por meio da variação da saída analógica de 0 a 10V. Dada a presença/ausência de luz natural ou de outras fontes luminosas, o dispositivo atua na carga (*driver* + LED) de maneira proporcional de modo a manter a luminosidade do ambiente constante, entre 400 e 500 lux (valor parametrizado). A seção 6.3 experimenta uma situação de regulação automática, na qual os resultados de eficiência energética são tabulados.

6.2 CONFIABILIDADE DO *HARDWARE*

Foram analisados dois aspectos principais do *hardware* no sentido de identificar o grau de confiabilidade do produto. São eles: repetibilidade na recepção e transmissão de telegramas e fidelidade do *hardware* da saída analógica

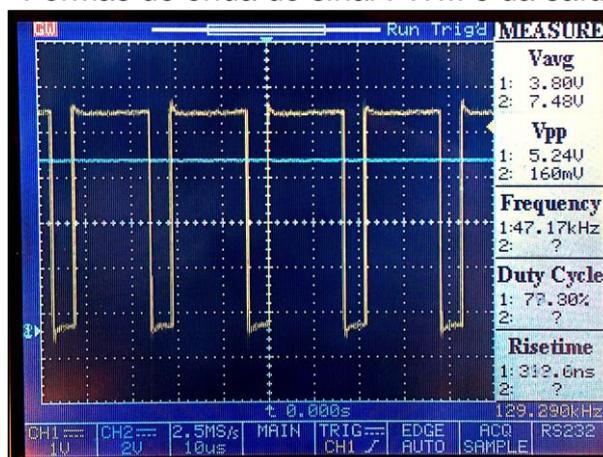
6.2.1 Repetibilidade na recepção e transmissão de telegramas

A partir da conclusão do desenvolvimento do *firmware*, vários ensaios foram realizados para garantir a eficácia da pilha do protocolo KNX. Um teste envolvendo cem comutações consecutivas e outras com regulações aleatórias (para mais brilho ou menos brilho) obtiveram 100% de acerto na identificação do telegrama KNX. Ainda, o protótipo foi experimentado em regulação de iluminação constante durante cinco horas e trinta minutos, recebendo telegramas de luminosidade a cada um segundo (total de 19800 telegramas), e houve 100% de eficácia na recepção de telegramas. O mesmo aproveitamento foi obtido com relação ao envio de *feedback*, onde, para cada telegrama recebido, outro foi enviado e interpretado corretamente.

6.2.2 Fidelidade do *hardware* da saída analógica

Com resolução de 10 *bits*, o registrador utilizado para o *duty cycle* do PWM – sinal de partida para a saída analógica – pode assumir valor máximo igual a 1023, que representa 100%. Ao configurar esse número em 800, a razão cíclica calculada é de 78,1% correspondendo a uma saída analógica de 7,81V. Os valores reais mensurados no dispositivo foram de 77,3% no *duty cycle* (Figura 38, curva 1 – amarela), com saída analógica de 7,48V (Figura 38, curva 2 – azul). Nesse caso, o erro entre o projeto e o sistema implementado foi de 1,0% para a razão cíclica e de 4,2% para a tensão de saída. Em outras configurações, como em 50% de potência, o erro para ambos, razão cíclica e saída analógica, se aproxima de 1,0%.

Figura 38 – Formas de onda do sinal PWM e da saída analógica



Fonte: Elaborado pelo Autor

6.3 EXPERIMENTO COM REGULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO CONSTANTE

Para comprovar a atuação do dispositivo implementado em modo de regulação de iluminação constante, foi realizado um experimento para mensurar as grandezas relacionadas: potência, energia e luminosidade. Os equipamentos utilizados nesse experimento foram:

- Analisador de energia: FLUKE 435 Series II;
- Luxímetro: MINIPA MLM-1020;
- Sensor de luminosidade KNX: EASYLUX PD-C 360i/8 mini KNX;
- Atuador *dimmer* implementado;
- Carga: driver dimerizável MEAN WELL LPF-16D-54 + fitas de LED (8W);
- Software: ETS[®] Lite.

A Figura 39 mostra os principais equipamentos utilizados neste experimento.

Figura 39 – Principais equipamentos utilizados no experimento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dispositivos KNX estão fixados no Kit KNX relacionado no item 4.4, enquanto o protótipo desenvolvido e a carga de iluminação estão fixados em uma torre. O ambiente de teste foi um escritório de 9m² com paredes brancas, teto branco e piso claro, que está localizado nas coordenadas geográficas 29°09'42.8"S 51°09'42.3"W (GOOGLE, 2016) e possui uma janela posição norte de aproximadamente 1m² (82x123cm). O experimento foi realizado no dia 05 de novembro de 2016 das 06h e 50min às 12h e 20min em um dia ensolarado. A Figura 40 mostra a estrutura física montada.

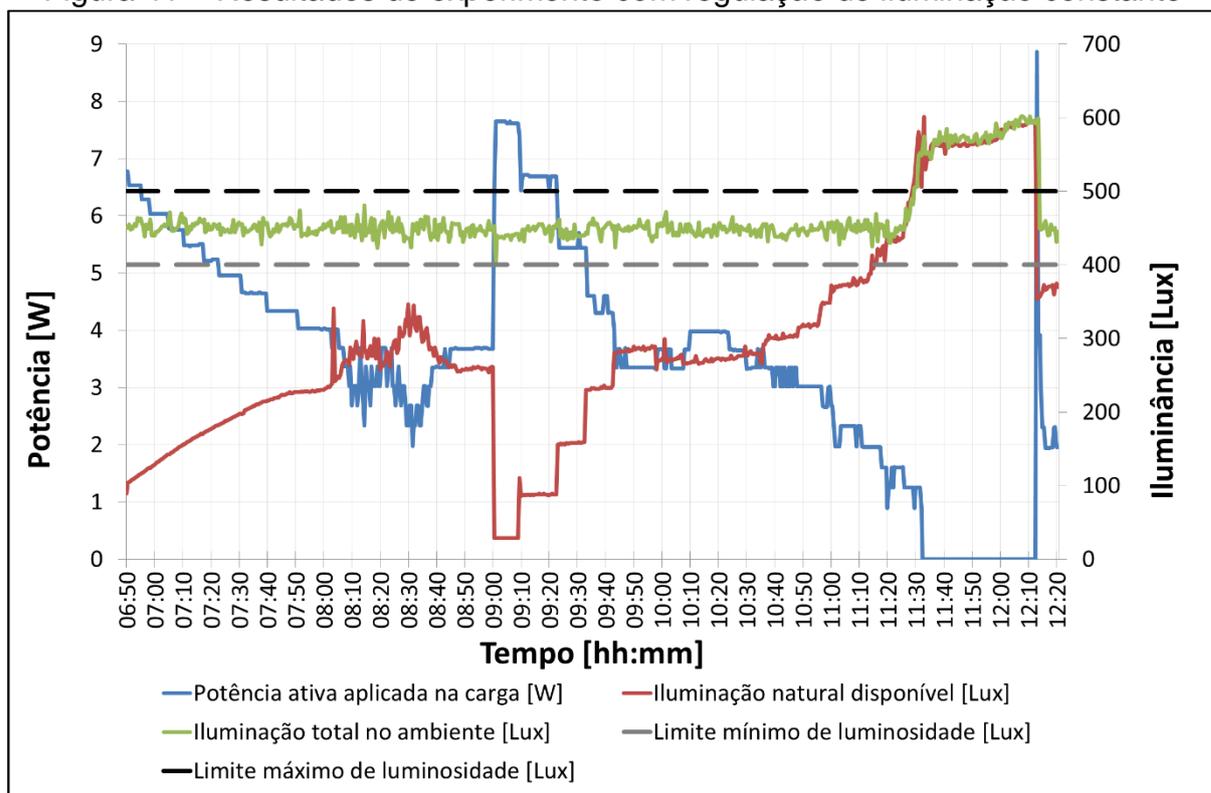
Figura 40 – Montagem do experimento de regulação de iluminação constante



Fonte: Elaborado pelo Autor

O luxímetro mensurou a iluminação natural disponível, enquanto o sensor de luminosidade KNX mediu a iluminação total, ou seja, a natural somada à artificial regulada. O atuador implementado recebe o valor de luminosidade ambiente do dispositivo da EASYLUX, em lux (2 *bytes*), e calcula se a saída analógica deve aumentar ou diminuir, resultando em variação de potência e luminosidade da carga luminosa. Os ajustes foram configurados para manter a intensidade luminosa entre 400 e 500lux. Esse funcionamento ocorreu de maneira automática, ou seja, em malha fechada, usando os produtos certificados KNX listados e o protótipo desenvolvido. A Figura 41 mostra os resultados do experimento.

Figura 41 – Resultados de experimento com regulação de iluminação constante



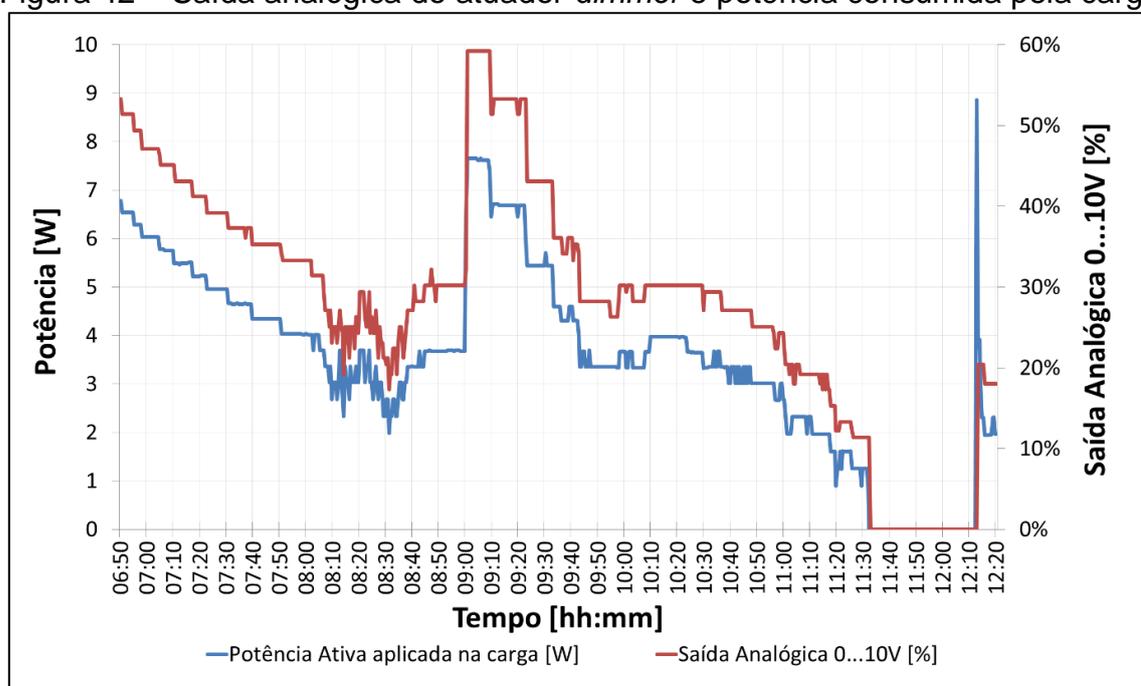
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na primeira hora do teste, o dia estava amanhecendo e, por conseguinte, a contribuição de luz natural foi aumentando progressivamente. A potência da carga luminosa, por outro lado, foi diminuindo, permitindo que a iluminação total ficasse dentro do limite estabelecido (400 e 500lux). Das 8 até às 9 horas houve uma oscilação na iluminação externa, resultando em um comportamento similar na potência aplicada, sempre de maneira a compensar a falta ou excesso de luz. Das 9 horas até às 9 horas e 43 minutos foram realizadas intervenções na persiana da janela, ajustando-a em aproximadamente 1%, 25%, 50%, 75% e 100% de abertura, com objetivo de analisar o comportamento do sistema para variações maiores de luminosidade; o atuador implementado se mostrou eficiente, controlando a potência da carga adequadamente e mantendo a luminosidade constante. No período seguinte, que se estende até às 12 horas e 10 minutos, houve um aumento da intensidade luminosa natural. Quando a potência aplicada a carga de LED alcançou o nível mínimo e a iluminância total se manteve acima de 10% do limite máximo por pelo menos um minuto, o sistema foi automaticamente desligado (saída a relé), passando a consumir 0W. Às 12 horas e 13 minutos houve um fechamento parcial da persiana para evidenciar a retomada de controle do atuador após o desligamento da saída a relé.

Em suma, durante todo o período de realização do experimento pôde-se notar a funcionalidade do atuador em modo de regulação automática de luminosidade, respeitando os níveis mínimo e máximo de iluminância programados.

O controle do atuador *dimmer* é por saída analógica de 0 a 10V. Considerando que a carga de LED utilizada no experimento satura sua potência máxima quando a tensão analógica é de aproximadamente 7V (aferido via analisador de energia e luxímetro), o dispositivo foi parametrizado via *firmware* para limitar em 7V sua saída máxima, valor correspondente à 100%. O mínimo admitido pelo *driver*, por outro lado, é de aproximadamente 0,8V no sinal analógico. Abaixo dessa tensão, a carga opera numa zona morta, onde a luminária não fornece brilho algum. Logo, 0,8V representa 11,4% da saída máxima admitida para a carga experimentada. A Figura 42 mostra a variação da tensão analógica, em porcentagem, durante o experimento, a qual corresponde à variável efetivamente manipulada pelo dispositivo implementado. Ela é comparada com o consumo da carga que, por sua vez, depende do modelo de *driver* e de lâmpada de LED utilizados. A função que relaciona ambas não faz parte do escopo deste trabalho.

Figura 42 – Saída analógica do atuador *dimmer* e potência consumida pela carga

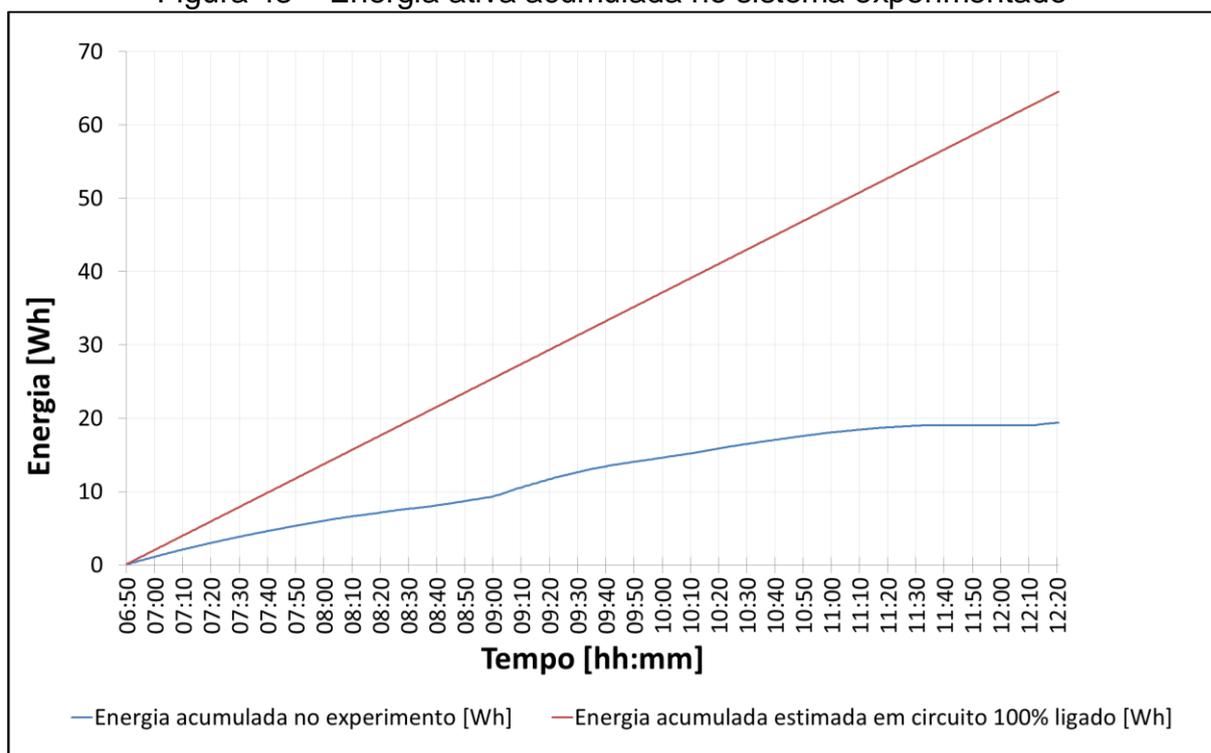


Fonte: Elaborado pelo Autor

Durante as 5,5 horas de experimento, o consumo de energia do sistema foi de 19,4Wh. Comparativamente a uma instalação típica, onde a mesma carga

permaneceria ligada 100% do tempo (potência de 11,7W), o consumo seria de aproximadamente 64,5Wh para o mesmo período. Em outras palavras, a redução do consumo de energia nas condições experimentadas foi de 69,9%. O gráfico da Figura 43 mostra o comportamento da energia acumulada no teste realizado e no modelo típico (lâmpada sempre ligada) ao longo do tempo.

Figura 43 – Energia ativa acumulada no sistema experimentado



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com essa simulação foi possível comprovar a eficiência do dispositivo implementado em modo de regulação constante de iluminação, tendo em vista a redução dos gastos com energia elétrica.

6.4 SÍNTESE

Neste Capítulo foram apresentados os resultados do atuador desenvolvido, as funcionalidades obrigatórias, o modo de regulação de iluminação constante – diferencial e principal apelo do protótipo, voltado para eficiência energética – e as características do *hardware*. Dentro das expectativas estabelecidas como objetivos do trabalho, os resultados foram satisfatórios e demonstraram robustez em termos de funcionalidade.

Ademais, o protótipo foi projetado com a finalidade de criar um produto. Por este motivo os componentes são, em sua maioria, SMDs, o relé é de uma tecnologia superior (estado sólido), o aspecto visual, o acabamento e o sistema de fixação são compatíveis com os padrões da indústria, a fixação interna das placas garante rigidez mecânica, os LEDs indicadores exibem o *status* do dispositivo, os botões oferecem opção de atuação manual em caso de falha na rede KNX e a porta USB possibilita atualização prática de *firmware*. Todos esses detalhes apontam para um protótipo funcional e diferenciado, passível de se tornar comercializável.

7 LIMITAÇÕES DO PROJETO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Considerando um dispositivo compatível com o protocolo KNX, seria de grande importância utilizar as ferramentas de desenvolvimento oferecidas pela Associação KNX para elaboração do projeto, como o *software* Manufacturer Tool. Ela é uma plataforma universal dentro da Norma KNX e é utilizada para criação do programa de aplicação, transferido via ETS para os dispositivos. Para este projeto não foi possível utilizar tal ferramenta, considerando o custo de 2050,00 € pela licença do *software* e a exigência da Associação KNX de fornecimento exclusivo para fabricantes associados. Apesar disso, a utilização desta plataforma poderia ser responsável por resultados ainda mais satisfatórios, sendo esse um ponto a ser explorado em trabalhos futuros e o primeiro passo para a certificação e posterior comercialização de produtos em nosso meio.

Outra opção para continuidade desse trabalho é em relação ao desenvolvimento de protótipos KNX com funcionalidades diferenciadas e inovadoras. Semestralmente a Associação KNX publica em sua revista bianual os novos fabricantes e os novos dispositivos KNX disponíveis, sempre trazendo tecnologia de ponta para o mercado de automação predial e residencial. Logo, desenvolvimentos inovadores serão bem vistos pela Associação e terão potencial de negócio.

Dadas as circunstâncias do projeto desenvolvido, foi necessário escolher um microcontrolador com alguns recursos específicos, porém com outros subutilizados. É o caso dos pinos de entradas e saídas, por exemplo, que poderiam incluir mais canais de saída do atuador ou possibilitar a ligação de entradas. Ainda, poderia ter sido prevista a conexão dos terminais não utilizados do MCU em barras de pinos ou em conectores. Dessa forma, o protótipo estaria apto a receber implementações de *hardware* futuras, assim como foi planejado para a atualização de *firmware*, com a conexão USB. Assim, esta seria outra uma oportunidade de melhoria para projetos futuros.

8 CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido foi planejado para atender a alguns critérios de *hardware*. Um deles era a implementação de uma saída analógica de 0 a 10V, a qual seria utilizada para comandar a dimerização de uma carga luminosa compatível com o padrão de tensão. O projeto dessa saída previu a utilização de um sinal PWM do microcontrolador de onde foram realizadas as etapas de filtragem passa-baixas e de amplificação. O resultado foi uma excursão total de 0 a 9,9V na saída analógica com tensão contínua. Isso comprova a implementação satisfatória do recurso de *hardware*, que se mostrou estável e invariante, mesmo quando conectado aos terminais da carga (*driver* de LED). O nível de luminosidade produzido pelo sistema de iluminação, por sua vez, depende da marca, modelo e potência do conjunto *driver* + lâmpada.

Outro critério de *hardware* estabelecido era a disponibilização de uma saída a relé para corrente alternada. Essa saída comuta a alimentação de energia da mesma carga de iluminação que utiliza o terminal de 0 a 10V, possibilitando o desligamento completo do sistema. Logo, foi projetada a utilização de um relé de estado sólido que, após implementado, correspondeu às expectativas, ligando e desligando um *driver* de LED com alimentação de 220V AC. O tempo de chaveamento do relé é inferior a 10ms e a corrente máxima suportada é de 2A, permitindo ligar sistemas de iluminação até 5 vezes mais potentes do que aquele utilizado no teste.

Os dois recursos citados foram implementados em placas de circuito impresso, desenvolvidas também para acomodar o microcontrolador e seus periféricos. As placas foram desenhadas no *software* ARES Proteus e passaram por treze revisões até chegar a versão final, sendo fabricadas por empresa terceirizada. O posicionamento dos componentes, dimensão dos *pads* de solda, diâmetro dos furos e o projeto das trilhas foram previstos corretamente e, como consequência, a soldagem e fixação dos componentes foi adequada, sem qualquer retrabalho e com funcionamento correto desde o primeiro teste. Isso evidenciou um trabalho cuidadoso nas fases de projeto, simulação, montagem em *protoboard*, inspeções do *layout* e análise do protótipo em CAD, fazendo com que tudo encaixasse e funcionasse perfeitamente.

Além dos requisitos de *hardware*, foram estabelecidas funcionalidades a serem implementadas em *firmware*. São funções típicas de atuadores KNX para iluminação estabelecidas pela Associação KNX como obrigatórias: comutação,

regulação e valor. Ambas foram implementadas no protótipo e o funcionamento ocorreu de forma satisfatória. Em todas elas, a manipulação da saída analógica e a relé funcionam de maneira ordenada e progressiva, resultando em alterações suaves na intensidade luminosa e, por consequência, em conforto visual.

Ainda em *firmware*, foi implementada a função de regulação de iluminação constante, principal diferencial do trabalho com apelo à eficiência energética. Nela, a saída analógica atua de maneira automática de acordo com a informação de luminosidade enviada por um sensor via BUS KNX. A solução para tal funcionalidade utilizou a lógica *Fuzzy* como princípio metodológico, obtendo-se, como resultado, a manutenção da intensidade luminosa dentro dos limites mínimo e máximo estabelecidos, proporcionando uma economia de energia de 69,9% nas condições experimentadas. Esse número indica um grande potencial de eficiência energética em sistemas de iluminação com aproveitamento de luz natural.

Para que cada uma dessas funções fosse executada, os comandos foram transmitidos via barramento KNX. Para isso, a pilha do protocolo KNX precisou ser implementada, prevendo endereçamentos, códigos de comandos e outras estratégias de comunicação definidas na Norma KNX. Os teste funcionais com dispositivos certificados comprovaram a eficácia da pilha implementada, na qual todos os telegramas recebidos foram identificados corretamente. Toda e qualquer operação no protótipo depende de solicitações enviadas através do BUS, fato que evidencia a correta implementação do KNX *stack*. No quesito envio de telegramas, o índice de reconhecimento dos mesmos também foi de 100%, comprovado a partir da informação gráfica trazida pela interface *touch screen* do fabricante Zennio.

A identificação visual trazida pelo protótipo implementado se assemelha com os produtos KNX de funções similares, tanto pelo formato da caixa plástica, quanto pelas informações técnicas trazidas pelas etiquetas e LEDs. Isso evidencia uma proximidade com os padrões da indústria exigidos em nível mundial, diminuindo os futuros esforços para certificação de produto e garantindo uma comunicação assertiva entre dispositivo e usuário.

O projeto de desenvolvimento do dispositivo KNX atuador *dimmer* foi multidisciplinar e abrangente. Conteúdos relacionados à pesquisa, eletrônica, CAD, mecânica, microcontroladores, programação em linguagem C, redes de comunicação, controle, eficiência energética, usinagem, *design*, entre outros, foram amplamente utilizados tanto para a fase de projeto quanto a de implementação. Muitos deles foram

desenvolvidos durante o período de realização do TCC2, por meio de atividades nunca antes experimentadas pelo autor, como: elaboração do projeto eletrônico atrelado a um *layout* de PBC, implementação de um protocolo de comunicação (KNX) e desenvolvimento de um controle por malha fechada via lógica *Fuzzy*. Essas e outras atividades chave, como o modelamento do protótipo em CAD, o projeto da saída analógica e a montagem das placas exigiram um envolvimento intenso ao longo do semestre, resultando em um protótipo 100% funcional (conforme os objetivos) e em um aprendizado valioso no âmbito de desenvolvimento de produto.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Consumo**. Brasília: ANEEL. 2008.

BOLZANI, C. A. M. **Residências Inteligentes: Domótica, Redes Domésticas, Automação Residencial**. 1ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004. 332 p. ISBN 858832525X.

CCS INC. **CCS C Compiler Manual**. Custom Computer Services, Inc. Brookfield, p. 434. 2016.

CONTENTE, C. A. D. **Interface IP-KNX para um Sistema de Controlo Domótico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal, p. 95. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro, p. 292. 2015.

GOOGLE. Place. **Google Maps**, 2016. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/29%C2%B009'42.8%22S+51%C2%B009'42.3%22W/@-29.1619698,-51.1619372,18.25z/data=!4m2!3m1!1s0x0:0x0>>. Acesso em: 21 Abril 2016.

INSTITUTO NCB. Snubbers. **Site Instituto Newton C. Braga**, 2014. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/duvidas-dos-internautas/6100>>. Acesso em: 08 Outubro 2016.

KNX ASSOCIATION. **KNX Basic Course Documentation**. Brussels: KNX Association, v. 1212b, 2014. Distribuído por Domonetio KNX Training Center.

KNX ASSOCIATION. **Advantages of KNX**. Brussels: KNX Association, 2015.

KNX ASSOCIATION. **KNX Development Getting Started - KNX System Components**. KNX Development Getting Started. Brussels: KNX Association. 2015a. p. 6.

KNX ASSOCIATION. **KNX Tutor Course Documentation: Tutor Certification**. Brussels: KNX Association, v. 0714b, 2015b. 109 p. Distribuído por: Domonetio KNX Training Center.

KNX ASSOCIATION. Shop - Software. **Site da Associação KNX**, 2016. Disponível em: <<https://my.knx.org/en/shop>>. Acesso em: 9 Abril 2016.

LINHARES, M. S. **Desenvolvimento de um multimedidor eletrônico de energia elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) - Univeridade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, p. 77. 2015.

MICROCHIP. **Datasheet: PIC18F2455/2550/4455/4550**. Microchip Technology Inc. Chandler, p. 436. 2009. DS39632E.

MURATORI, J. R.; DAL BÓ, P. H. **Automação Residencial: Conceitos e Aplicações**. 1ª. ed. Belo Horizonte: Educere, 2013. 200 p. ISBN 9788565641029.

MUSSOI, F. L. R. **Resposta em Frquência: Filtros Passivos**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET/SC). Florianópolis, p. 86. 2004. il. color.

NEUGSCHWANDTNER, G.; FERNBACH, A. **Design of an enhanced TP-UART based KNX PC interface**. Vienna University of Technology. Vienna, p. 74. 2008.

NXP. **Datasheet: BC847 series**. NXP Semiconductors. [S.I.], p. 17. 2014. BC847_SER.

OLIVEIRA, N. D. Tarifa de energia subirá menos em 2016, diz presidente da EPE. **Agência Brasil**, 2016. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-02/tarifa-de-energia-subira-menos-em-2016-diz-presidente-da-epe>>. Acesso em: 12 Março 2016.

OMRON. **Datasheet: Solid State Relay G3MB**. OMRON Corporation. Schaumburg, p. 6. 2009. Cat. No. X301-E-1.

PANTOJA ENGINEERING & CONSULTANT. O que é um TRANSCEIVER. **Site da Pantoja Engineering & Consultant**, 2010. Disponível em: <<http://www.pantojaiindustrial.com/exibir.php?id=91>>. Acesso em: 08 Abril 2016.

PATOLA. Produtos Patola. **Site da Patola**, 2016. Disponível em: <<http://www.patola.com.br/image/cache/data/Revis%C3%A3o%202015/din%2062x72x52%20ti-700x700.jpg>>. Acesso em: 15 Agosto 2016. il. color.

SANTIAGO JR, J. V. et al. **Uso inteligente de energia**: saiba como reduzir custos com energia elétrica e aumentar a competitividade da sua empresa. 1ª. ed. Cuiabá: Sebrae, v. I, 2003. + CD-ROM (Programa Sebrae de Eficiência Energética).

SHAFER, M. G.; SAPUTRA, E.; BAKAR, K. A. **Modeling of Fuzzy Logic Control System for Controlling Homogeneity of Light Intensity from Light Emitting Diode**. 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation. Kota Kinabalu: IEEE. 2012. p. 71-75.

SIEMENS. **Bus Transceiver Module 117/12 PCBA - TP-UART 2 Evaluation Board**. SIEMENS AG. Regensburg, p. 3. 2012. Technical Manual.

SIEMENS. **KNX EIB TP-UART 2 - IC**. SIEMENS AG. Regensburg, p. 43. 2013. il. color.

SILVA, N. R. D. **Demanda de Energia Elétrica Residencial no Brasil segundo os Quantis de Consumo**. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 70. 2013.

ST. **Datasheet: LM158, LM258, LM358 - Low-power dual operational amplifiers**. ST Microelectronics. [S.l.], p. 23. 2016. DocID2163.

TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 3ª. ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, v. I, 1996. 960 p. ISBN 0133499456.

WIKIPÉDIA. Duty Cycle. **Wikipédia**: A enciclopédia livre, 2013. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Duty_cycle>. Acesso em: 14 Maio 2016.

WIKIPEDIA. Zero cross circuit. **Wikipedia**: The Free Encyclopedia, 2016. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zero_cross_circuit>. Acesso em: 08 Outubro 2016.

APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Categoria	Referência	Valor	Encapsulamento - Descrição
Amplificadores Operacionais	LM358	LM358	SOIC8 - SMD
Barra de pinos	GRAVADOR	CONN-H5	Barra de (5) pinos simples, fêmea, 11mm, 180°
Barra de pinos	UART	CONN-DIL10	Barra de (10) pinos dupla, macho, 20mm, 180°
Capacitores	C1	2u2	0805
Capacitores	C2	22p	0805
Capacitores	C3	22p	0805
Capacitores	C4	220n	0805
Capacitores	C5	100u	SMD 6.3
Capacitores	C6	100u	SMD 6.3
Capacitores	C7	100n	0805
Capacitores	C8	100n	0805
Chaves tácteis	MAN	CHAVE TÁCTIL	Metaltex A06 6x6x19
Chaves tácteis	RESET	CHAVE TÁCTIL	Metaltex A06 6x6x15
Conectores	HEADER 1	10073456-001LF	Conector header 10 pinos, macho, 180°
Conectores	HEADER 2	10073456-001LF	Conector header 10 pinos, macho, 90°
Conectores	USB	AU-Y1007-R	Conector USB-B Vertical
Diodos	D1	1N4148	TO23 - SMD
LEDs	OUT	LED-green	LED 3mm(5mm) VERDE Alto brilho
LEDs	POWER	LED-green	LED 3mm(5mm) VERDE Alto brilho
Miicrocontroladores	MCU	PIC18F2550	SOIC28 - SMD
Osciladores	X1	CRYSTAL	Through hole - 4mm high
Reguladores de Tensão	LM7805	7805	TO257 - TH
Relés de estado sólido	RELÉ AC	RELÉ SÓLIDO G3MB	G3MB-202P
Resistores	R1	1k5	0805
Resistores	R2	680	0805
Resistores	R3	1k5	0805
Resistores	R4	10k	0805
Resistores	R5	10k	0805
Resistores	R7	10k	0805
Resistores	R9	10k	0805
Resistores	R6	470	Carbono 1/4W
Resistores	R8	470	Carbono - 1/4W
Resistores	R10	100	0805
Terminais	+	TERMINAL	through hole
Terminais	-	TERMINAL	through hole
Terminais	AC IN	TERMINAL	through hole
Terminais	AC OUT	TERMINAL	through hole
Terminais	REF	TERMINAL	through hole
Terminais	~10V	TERMINAL	through hole
Transistores	BC847	BC847B	TO23 - SMD

APÊNDICE B – AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO DO COMPILADOR CCS

The screenshot displays the CCS C Compiler IDE interface. The main window shows the source code for `KNX_PIC18F2550_USB_V5.c`. The code includes several preprocessor directives for includes and defines. The output window at the bottom shows the compilation results, including warnings and memory usage.

Source Code (KNX_PIC18F2550_USB_V5.c):

```

1  #include <KNX_PIC18F2550_bootloader.h>
2
3  #include <usb_cdc.h>
4
5  #include <float.h>
6  #include <math.h>
7  #include <stdlib.h>
8  #include <stdio.h>
9
10 #define RELE_PIN_B3
11 #define MANUAL_PIN_A0
12 #define SWITCHING_SPEED 3
13 #define SAIDA_MAX 800
14 #define SAIDA_MIN 120
15 #define MUITO ((unsigned int16)((SAIDA_MAX-SAIDA_MIN)*0.03) //15
16 #define POUCO ((unsigned int16)((SAIDA_MAX-SAIDA_MIN)*0.01) //5
17 #define LIMITE_MAX 500
18 #define LIMITE_MIN 400
19 #define LIMITE_MED ((unsigned int16)((LIMITE_MAX-LIMITE_MIN)/2+LIMITE_MIN)
20 #define LIMITE_Z 20
21 #define MP MUITO
22 #define MN -MUITO
23 #define PP POUCO
24 #define PN -POUCO
25 #define Z 20

```

Output Window:

```

--- Info 300 "C:\Users\Christian\Google Drive\UCS\Disciplinas_atuais\TCC 2\PIC\CCSProjects\KNX_PIC18F2550\Discipln.h" Line 13(1,1): More info: Timer
>>> Warning 203 "C:\Program Files (x86)\PICC4\Drivers\pic18_usb.c" Line 640(1,1): Condition always TRUE
>>> Warning 216 "KNX_PIC18F2550_USB_V5.c" Line 482(1,2): Interrupts disabled during call to prevent re-entrancy: (usb_token_reset)
>>> Warning 216 "KNX_PIC18F2550_USB_V5.c" Line 482(1,2): Interrupts disabled during call to prevent re-entrancy: (usb_cdc_flush_out_buffer)
>>> Warning 216 "KNX_PIC18F2550_USB_V5.c" Line 482(1,2): Interrupts disabled during call to prevent re-entrancy: (usb_cdc_init)
Memory usage: ROM=26% RAM=23% - 26%
0 Errors, 4 Warnings.
Build Successful.

```

APÊNDICE C – PARAMETRIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS KNX VIA ETS

- TECLADO JUNG

Device: 1.1.3 Universal push-button module, 4-gang

General	Function	Dimming
Configuration TSM	Command on pressing the button	Brighter / darker (TOGGLE)
TSM - Operation concept	Time between switching and dimming (100...50000 x 1 ms)	400
TSM - Room temperature me	Advanced parameters	activated
TSM - Button 1	Increase brightness by	100%
TSM - B1 - Status LED	Reduce brightness by	100%
TSM - Button 2	Transmit stop telegram?	Yes
TSM - B2 - Status LED	Telegram repetition?	No
TSM - Button 3		
TSM - B3 - Status LED		
TSM - Button 4		
TSM - B4 - Status LED		
TSM - Button 5		
TSM - B5 - Status LED		
TSM - Button 6		
TSM - B6 - Status LED		

- ENTRADAS BINÁRIAS K-BUS

Device: 1.1.5 Universal Interfaces, 4 fold

General Setting	Function of the channel	Switch/Dimming
Channel A	Connect contact type	normally open
Channel B	Dimming functionality	Dimming and switching
Channel C	Reaction on short operation	TOGGLE
Channel D	Reaction on long operation	Dim BRIGHTER/DARKER with start BRIGHTER
LED A	Long operation after	0.5s
LED B	Dimming mode	Steps dimming
LED C	Brightness change on every sent	12.5%
LED D	Interval of Tele.cyclic send	0.3s
	Debounce time	50ms

- INTERFACE GRÁFICA SENSÍVEL AO TOQUE Z41 ZENNIO

Device: 1.1.2 InZennio Z41

MAIN CONFIGURATION	Label	LUMINOSIDADE
MENU	Visualization	Indicator
PAGE 1	Function	2-byte (float)
PAGE 2	Float Unit	Lux
PAGE 3	Save Log?	No
PAGE 4		
PAGE 5		
▲ PAGE 6		
Configuration		
Box 1		

Device: 1.1.2 InZennio Z41

MAIN CONFIGURATION	Label	REGULAÇÃO 25%
MENU	Visualization	2-button Control
PAGE 1	Function	Light Dimming
PAGE 2	Action	Left Off, Right On
PAGE 3	Dimming Step	25%
PAGE 4	Left Button	Light Off 1
PAGE 5	Right Button	Light On 1
▲ PAGE 6		
Configuration		
Box 1		
Box 2		
Box 3		
Box 4		

Device: 1.1.2 InZennio Z41

MAIN CONFIGURATION	Label	FEEDBACK ON_OFF
MENU	Visualization	Indicator
PAGE 1	Function	Binary Indicator (icon)
PAGE 2	Off Icon	Off 1
PAGE 3	On Icon	On 1
PAGE 4		
PAGE 5		
▲ PAGE 6		
Configuration		
Box 1		
Box 2		
Box 3		

Device: 1.1.2 InZennio Z41

MAIN CONFIGURATION	Label	REGULAÇÃO 50%
MENU	Visualization	2-button Control
PAGE 1	Function	Light Dimming
PAGE 2	Action	Left Off, Right On
PAGE 3	Dimming Step	50%
PAGE 4	Left Button	Light Off 1
PAGE 5	Right Button	Light On 1
▲ PAGE 6		
Configuration		
Box 1		
Box 2		
Box 3		
Box 4		

Device: 1.1.2 InZennio Z41

<ul style="list-style-type: none"> ▷ MAIN CONFIGURATION ▷ MENU ▷ PAGE 1 ▷ PAGE 2 ▷ PAGE 3 ▷ PAGE 4 ▷ PAGE 5 ▲ PAGE 6 <ul style="list-style-type: none"> Configuration Box 1 Box 2 Box 3 Box 4 <li style="border: 1px solid #ccc;">Box 5 	<p>Label: VALOR 40%</p> <p>Visualization: 1-button Control</p> <p>Function: Constant Percentage Value</p> <p>Constant Value: 40 %</p> <p>Button (In the middle): Set</p>
--	--

Device: 1.1.2 InZennio Z41

<ul style="list-style-type: none"> ▷ PAGE 3 ▷ PAGE 4 ▷ PAGE 5 ▲ PAGE 6 <ul style="list-style-type: none"> Configuration Box 1 Box 2 Box 3 Box 4 Box 5 <li style="border: 1px solid #ccc;">Box 6 Box 7 Box 8 	<p>Label: REGULAÇÃO 100%</p> <p>Visualization: 2-button Control</p> <p>Function: Light Dimming</p> <p>Action: Left Off, Right On</p> <p>Dimming Step: 100%</p> <p>Left Button: Light Off 1</p> <p>Right Button: Light On 1</p>
---	--

Device: 1.1.2 InZennio Z41

<ul style="list-style-type: none"> ▷ MAIN CONFIGURATION ▷ MENU ▷ PAGE 1 ▷ PAGE 2 ▷ PAGE 3 ▷ PAGE 4 ▷ PAGE 5 ▲ PAGE 6 <ul style="list-style-type: none"> Configuration Box 1 Box 2 Box 3 Box 4 Box 6 <li style="border: 1px solid #ccc;">Box 7 	<p>Label: REGULA AUTOMÁTICO</p> <p>Visualization: 1-button Control</p> <p>Function: Binary Control</p> <p>Action: Toggle</p> <p>Button (In the middle): Light On/Off</p>
---	--

Device: 1.1.2 InZennio Z41

- ▷ PAGE 3
- ▷ PAGE 4
- ▷ PAGE 5
- ▲ PAGE 6
 - Configuration
 - Box 1
 - Box 2
 - Box 3
 - Box 4
 - Box 5
 - Box 6
 - Box 7
 - Box 8

Label	STATUS AUTOMÁTICO
Visualization	Indicator
Function	Binary Indicator (icon)
Off Icon	Text Off
On Icon	Text On

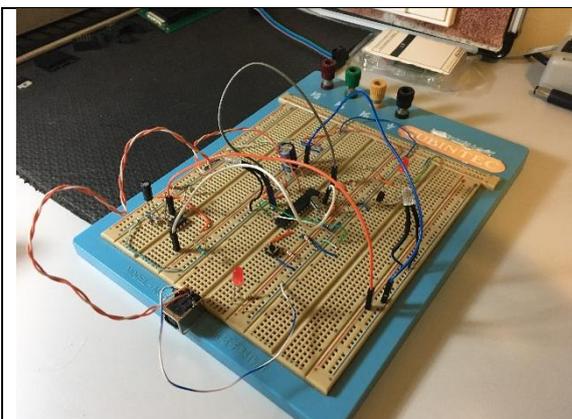
- **SENSOR DE LUMINOSIDADE EASYLUX**

Device: 1.1.1 ESYLUX PD-C 360i/8 mini KNX

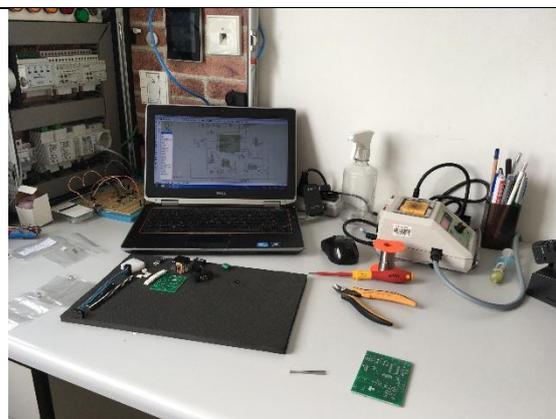
- Common
- LED
- Motion
- Light channel
- Constant light regulation
- HVAC channel
- Twilight switch
- Light value
- Alarm

Telegram interval light value (base)	Second
Light channel (multiplier)	1
Offset light value	0
Sending light value above a difference of (Lux, 0 = deactivated)	0
Modifier internal light value (0...100) (multiplier)	1
Processing external light value	No
At activating lock sending light value	Lock deactivated

APÊNDICE D – MEMORIAL FOTOGRÁFICO: MONTAGEM DO PROTÓTIPO



1 – Montagem inicial do *hardware* em *protoboard*



2 – Bancada de trabalho com estação de solda



3 – Soldagem dos primeiros componentes



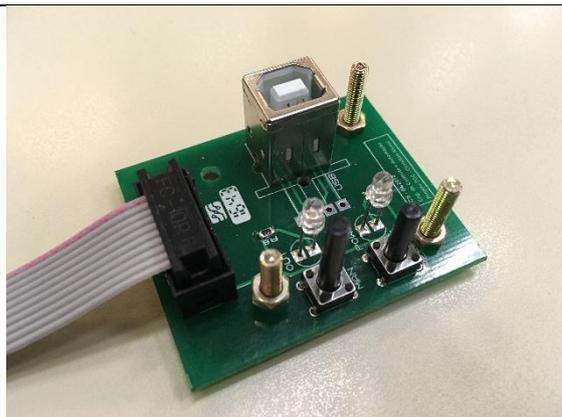
4 – Placa principal 90% concluída



5 – Placa principal 100% concluída



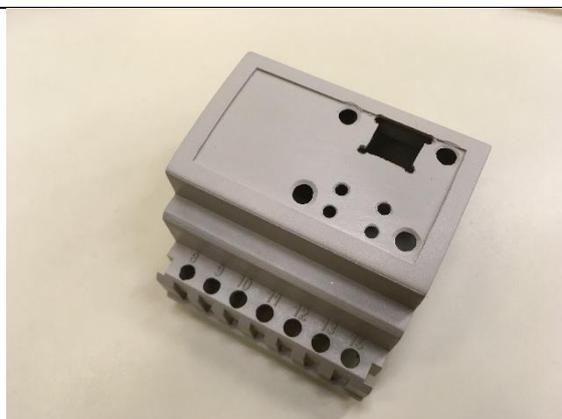
6 – Placa secundária 80% concluída



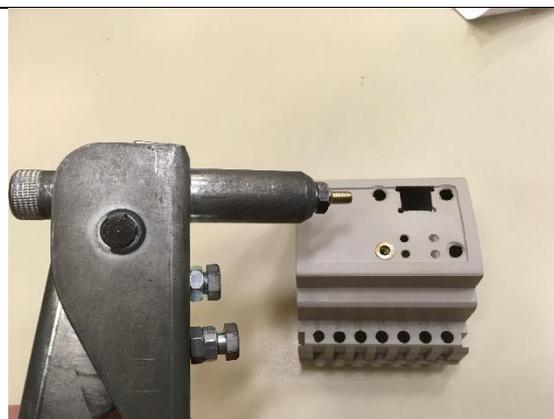
7 – Placa secundária 100% concluída. Início da etapa de posicionamento de parafusos



8 – Furação e usinagem da face superior da caixa plástica: utilização de adesivo para marcação



9 – Usinagem concluída



10 – Colocação de rebites com rosca interna



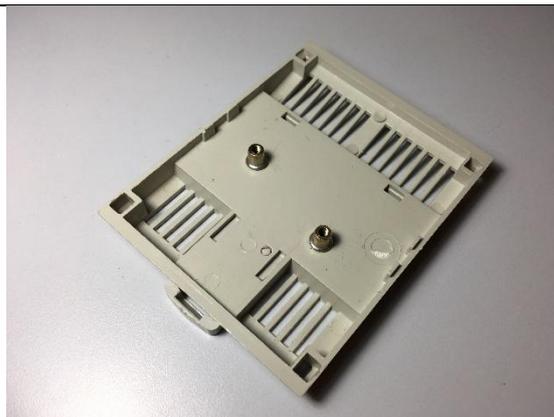
11 – Rebites fixados



12 – Placa secundária fixada com 4 parafusos nos rebites com rosca interna



13 – Furação da base da caixa plástica



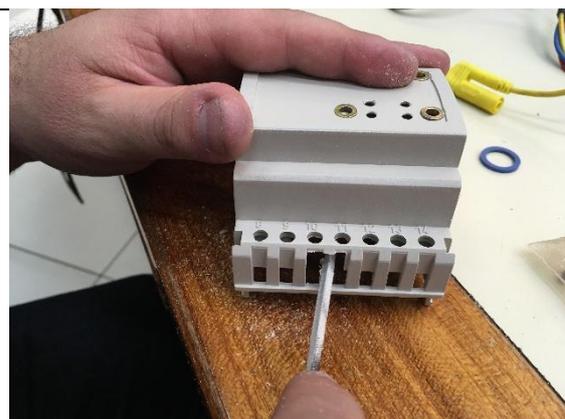
14 – Base da caixa plástica com rebites roscados



15 – Fixação da PCB TP-UART nos rebites da base da caixa plástica



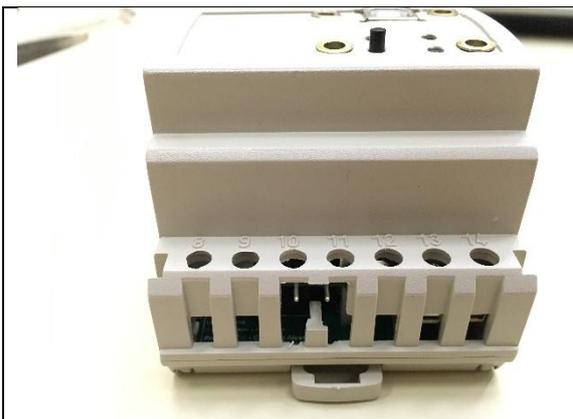
16 – Usinagem da estrutura da caixa Patola para encaixe da PCB TP-UART



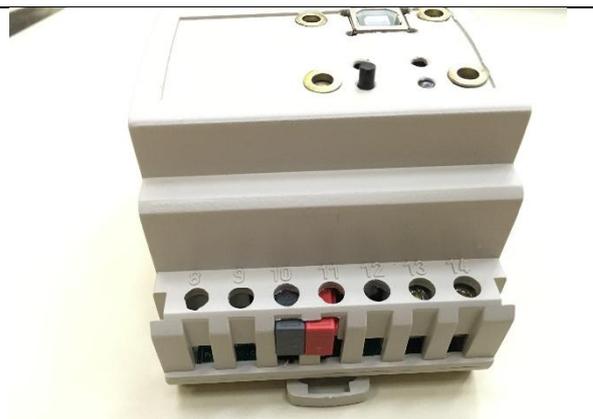
17 – Acabamento e remoção de rebarbas



18 – Montagem e posicionamento das placas dentro da caixa



19 – Protótipo montado (sem conector KNX)



20 – Protótipo montado (com conector KNX)



21 – Protótipo finalizado, incluindo identificação visual

