



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA**

**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST**

**RUBENS DE ANDRADE FERNANDES**

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMAS EMBARCADAS APLICADAS A  
IMPLEMENTAÇÃO DE *SMART BUILDINGS* COM BASE NO *FRAMEWORK*  
*SMARTLVGRID***

**Manaus**

**2019**

**RUBENS DE ANDRADE FERNANDES**

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMAS EMBARCADAS APLICADAS A  
IMPLEMENTAÇÃO DE *SMART BUILDINGS* COM BASE NO *FRAMEWORK*  
SMARTLVGRID**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Dsc. Raimundo Cláudio Souza Gomes

Manaus

2019

**Universidade do Estado do Amazonas – UEA**  
**Escola Superior de Tecnologia - EST**

*Reitor:*

**Cleinaldo de Almeida Costa**

*Vice-Reitor:*

**Cleto Cavalcante de Souza Leal**

*Diretor da Escola Superior de Tecnologia:*

**Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo**

*Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:*

**Walfredo Da Costa Lucena Filho**

*Banca Avaliadora composta por:*

**Prof. Raimundo Cláudio Souza Gomes (Orientador)**

**Prof. Israel Gondres Torné**

**Prof. Jozias Parente de Oliveira**

*Data da defesa: 17/12/2019.*

## **CIP – Catalogação na Publicação**

Fernandes, Rubens de Andrade

Desenvolvimento de plataformas embarcadas aplicadas a implementação de *smart buildings* com base no *framework* SmartLVGrid / Rubens de Andrade Fernandes; [orientado por] Raimundo Cláudio Souza Gomes. – Manaus: 2019.

112 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).  
Universidade do Estado do Amazonas, 2019.

1. Sistemas Embarcados 2. *Smart Grids* 3. *Smart Buildings* 4. *Smart Circuits*  
I. Cláudio Souza Gomes, Raimundo.

RUBENS DE ANDRADE FERNANDES

DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMAS EMBARCADAS APLICADAS A  
IMPLEMENTAÇÃO DE *SMART BUILDINGS* COM BASE NO *FRAMEWORK*  
SMARTLVGRID

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nota obtida: \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Área de concentração: Sistemas Embarcados

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_  
Orientador: Raimundo Cláudio Souza Gomes, Mr.

\_\_\_\_\_  
Avaliador: Israel Gondres Torné, Dr.

\_\_\_\_\_  
Avaliador: Jozias Parente de Oliveira, Dr.

Manaus 2019

*Este trabalho é dedicado a todos que se empenham a pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico, em busca de um futuro melhor e do bem da humanidade.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço Deus, primeiramente, pelo dom da vida e por me guiar até o presente momento.

Agradeço a minha mãe, por ser um exemplo de mulher e por seu amor infinito que me fez ser o homem que sou hoje.

Agradeço a meu pai, por todo o incentivo e conselhos, pelos momentos de reflexão e por ser meu melhor amigo.

Agradeço aos meus tios, Erllon de Andrade Fernandes e Evandro Márcio de Andrade Fernandes, por todos os conselhos e momentos de apoio durante toda esta jornada. Considero-lhes umas de minhas maiores inspirações.

Agradeço a minha família, por todo o apoio, amor e incentivo.

Agradeço ao professor Raimundo Cláudio Souza Gomes, por toda a sua ajuda durante o desenvolvimento deste projeto, pela amizade e pelas oportunidades dadas ao longo dos anos. Serei eternamente grato.

Agradeço aos professores André Luiz Printes e Israel Gondres Torné, pelos bons momentos vividos e por todos os ensinamentos dados ao longo dessa jornada.

Agradeço aos amigos Fabrício Ribeiro Seppe, Igor Lins Santiago, Ítalo Tony da Costa Alves, Lennon Brandão Freitas do Nascimento, Mateus de Sousa Pantoja, Matheus de Oliveira Assunção, Roberto Conhago Tavares de Sousa, Ruan Carlos Mota Teixeira e Samuel Bruno Torres Rego, por todos os ensinamentos, pelos momentos de apoio e de alegria. Que venham muitos mais.

Agradeço a todos os amigos, professores e colegas do centro de pesquisa e desenvolvimento HUB - Tecnologia e Inovação, por todo o aprendizado adquirido e pela amizade.

Agradeço a todos os amigos, professores e colegas da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas por todo o carinho, pela amizade, e pelo apoio dados a mim ao longo dos anos. Nunca serão esquecidos.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

## RESUMO

No presente trabalho, foram desenvolvidos algoritmos para *software* embarcado e dispositivos de *hardware*, associados a plataformas microcontroladas e microprocessadas, com o objetivo de realizar a convergência *smart building* em sistemas de iluminação e medição de energia elétrica sem recursos de automação, comunicação e controle. Para tanto, é utilizada a abordagem descrita no *framework* SmartLVGrid, um modelo que utiliza a estratégia de *retrofit* para convergência em redes elétricas inteligentes de distribuição de energia elétrica em baixa tensão. Este *framework* será adaptado para realizar automação predial no Laboratório de Sistemas Embarcados do centro de pesquisa e desenvolvimento HUB, associado a Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas. Os resultados obtidos indicam a possibilidade da convergência *smart building* sem remoção ou descarte total dos sistemas de iluminação e medição de energia no local através da técnica de *retrofit*, implicando em baixos custos de implementação e em rápido processo de transição tecnológica. Os dispositivos de controle de iluminação foram baseados no conversor DC-DC *Buck Low Side* associado a um microcontrolador com periféricos de comunicação *wireless* embutido, permitindo que o dispositivo possa ser controlado de forma remota. O dispositivo de medição de energia conta com circuitos para medição, condicionamento e proteção do sistema. Além de possuir uma plataforma microprocessada com sistema operacional Linux e com periféricos de comunicação integrados. Com os resultados, discussões e conclusões deste trabalho, espera-se contribuir para um método robusto e de fácil implementação, capaz de realizar a convergência *smart building*, com o incremento da eficiência energética.

**Palavras-chave:** Sistemas Embarcados. *Smart Grids*. *Smart Buildings*. *Smart Circuits*.

## ABSTRACT

In the present work, it has developed algorithms for embedded software and hardware devices, associated with microcontrolled and microprocessor platforms, with the purpose of achieving smart building convergence in lighting and energy metering systems without automation, communication and control features. To do so, the approach described in the SmartLVGrid framework is used, a model that uses the retrofit strategy for convergence in intelligent low voltage electric power distribution networks. This framework will be adapted to perform building automation at the Embedded Systems Laboratory of the HUB research and development center, associated with the Escola Superior de Tecnologia of the Universidade do Estado do Amazonas. The obtained results indicate the possibility of the smart building convergence without total removal or disposal of the lighting and energy metering systems on site through the retrofit technique, resulting in low implementation costs and fast process of technological transition. The lighting control devices were based on the DC-DC converter Buck Low Side associated with a microcontroller with built-in wireless communication peripherals, allowing the device to be remotely controlled. The energy measuring device has circuits for measuring, conditioning and protecting the system. It also has a microprocessor platform with Linux operational system and integrated communication peripherals. With the results, discussions and conclusions of this work, it is expected to contribute to a robust and easy implementation method, capable of achieving smart building convergence, with the increase of energy efficiency.

**Keywords:** Embedded Systems. Smart Grids. Smart Buildings. Smart Circuits.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Escopo estrutural do paradigma <i>Smart Building</i> . . . . .	25
2	A pilha SmartLVGrid no contexto do sistema de distribuição em baixa tensão. . . . .	26
3	A pilha SmartLVGrid e a camada legada do sistema de distribuição de energia elétrica. . . . .	28
4	Descrição detalhada da composição de um ACU . . . . .	29
5	Descrição da arquitetura hierárquica de uma rede de ACUs interconectadas em um sistema de distribuição em baixa tensão . . . . .	31
6	Modelo de um esquemático (a) e de um <i>chip on board</i> de LEDs (b) . . . . .	32
7	Características de entrada de uma fonte chaveada e (a) seu conteúdo harmônico (b). . . . .	34
8	Características de entrada de uma fonte chaveada com PFC (a) e seus harmônicos (b). . . . .	34
9	Estrutura de um conversor com filtro EMI e PFC. . . . .	35
10	Retificador Buck <i>low side</i> PFC. . . . .	36
11	Topologias baseadas em difusão . . . . .	37
12	Topologias de barramento . . . . .	38
13	Escala de transmissão de dados baseada na distância entre comunicadores. . . . .	38
14	Diagrama de blocos do SoC ESP32. . . . .	41
15	Triângulo de potências para cargas indutivas. . . . .	44
16	Triângulo de potências para cargas capacitivas. . . . .	44
17	Medidor I-210 Meter Family Residential. . . . .	45
18	Diagrama de blocos genérico de um <i>smart meter</i> . . . . .	46
19	Diagrama esquemático ideal de um transformador de potencial indutivo. . . . .	48
20	O potenciômetro no controle de níveis de potencial. . . . .	48
21	Resistência <i>shunt</i> em uma aplicação típica para fins de medição. . . . .	49
22	Modelo de uma bobina de <i>Rogowski</i> com um circuito RC integrador. . . . .	50
23	Sensor de efeito <i>hall</i> efetuando medição de corrente. . . . .	50
24	Esquema de um transformador de corrente. . . . .	51
25	Esquema de uma chave estática convencional. . . . .	52
26	Variação nas componentes de sequência zero no chaveamento entre duas fases. . . . .	55
27	Variação nas componentes de sequência negativa no chaveamento entre duas fases. . . . .	55
28	Distúrbios dos parâmetros elétricos de desempenho elétrico. . . . .	55
29	Curva de aceitabilidade de energia fornecida pela organização CEBEMA. . . . .	57
30	Curva de aceitabilidade de energia fornecida pela organização ITIC. . . . .	57
31	Modelo de chave de transferência estática aplicado a uma carga monofásica. . . . .	58
32	Parâmetros elétricos instantâneos na carga nos momentos de transição das fases. . . . .	59
33	Parâmetros elétricos eficazes na carga nos momentos de transição das fases. . . . .	59
34	Modelo de implementação dos dispositivos de <i>retrofit</i> na instalação predial. . . . .	60
35	Rede de ACUs interconectadas em um sistema de iluminação <i>smart building</i> . . . . .	61

36	Arquitetura de funcionalidades do ACU-LUM. . . . .	62
37	Arquitetura de funcionalidades do ACU-SB. . . . .	63
38	Processo de comunicação de dados através do protocolo MQTT. . . . .	65
39	Visão geral da arquitetura do <i>driver</i> de LED. . . . .	66
40	Diagrama de controle do CI FL7701. . . . .	67
41	Luminária Elgin quadrada de embutir. . . . .	69
42	Módulo ESP32-WROOM-32. . . . .	70
43	Arquitetura do módulo de seleção de fases. . . . .	72
44	Sinais senoidais com defasagem 120° entre si. . . . .	73
45	Sistema de conversão AC-DC utilizado. . . . .	74
46	Conversor AC-DC de 3,5 W. . . . .	74
47	Processo de cadastro dos dados de rede no ACU-LUM. . . . .	76
48	Formato JSON de configuração do ACU-LUM. . . . .	77
49	Representação do protocolo de comunicação utilizado pelo ACU-LUM. . . . .	78
50	Visão geral da arquitetura do sistema de medição de energia. . . . .	79
51	Circuito integrado ADE9000ACZP. . . . .	81
52	Condicionamento de corrente diferencial para o ADE9000. . . . .	82
53	Mecanismos de proteção e condicionamento dos canais de tensão para o ADE9000. . . . .	84
54	Colibri iMX6ULL. . . . .	85
55	Formato JSON de configuração do ACU-SB. . . . .	88
56	<i>Layout</i> 3D do ACU-LUM. . . . .	89
57	Protótipo do ACU-LUM. . . . .	89
58	<i>Layout</i> 3D do ACU-SB. . . . .	90
59	Protótipo do ACU-SB. . . . .	90
60	<i>Retrofit</i> com ACU-LUM. . . . .	91
61	<i>Retrofit</i> com ACU-SB. . . . .	92
62	Implementação do <i>broker</i> MQTT. . . . .	92
63	Ambiente para coleta de resultados e implementação do sistema. . . . .	93
64	Abertura do ponto de acesso Wi-Fi do ACU-LUM. . . . .	94
65	Respostas aos dados cadastrais de comunicação no ACU-LUM. . . . .	95
66	Inicialização do sistema operacional do ACU-SB. . . . .	95
67	Arquivo de configuração <i>wpa_supplicant.conf</i> . . . . .	95
68	CSFs em execução no ACU-LUM. . . . .	96
69	Tentativa de reconexão do ACU-LUM com <i>broker</i> MQTT. . . . .	96
70	Resultados obtidos para requisições do tipo ON/OFF. . . . .	97
71	Resultados obtidos para comandos do tipo ON/OFF. . . . .	98
72	Funcionalidade de <i>soft-starter</i> implementada na corrente da luminária. . . . .	99
73	Comando e requisição para controle de fluxo luminoso com DAC em nível 50. . . . .	100
74	Comando e requisição para controle de fluxo luminoso com DAC em nível 100. . . . .	100
75	Comando e requisição para controle de fluxo luminoso com DAC em nível 250. . . . .	101

76	Forma de onda da corrente na luminária para 20% de luminosidade. . . . .	101
77	Forma de onda da corrente na luminária para 75% de luminosidade. . . . .	102
78	Capturas de tensão no momento da comutação entre fases. . . . .	103
79	Validação da DRF de transferência de fases. . . . .	104
80	Consumo de luminárias com ACU-LUM e uma regressão linear aproximada. . . .	104
81	Validação da medição de potência através do método implementado. . . . .	105
82	Validação do método " <i>get_ilum</i> ". . . . .	105
83	Validação do DRF do ACU-SB " <i>get_energy_parameters</i> ". . . . .	106

## LISTA DE TABELAS

1	Os microprocessos, primitivas operacionais, executadas na pilha SmartLVGrid. . . . .	27
2	Componentes utilizados para implementação do Buck <i>Low Side</i> PFC. . . . .	68
3	Dados técnicos da luminária utilizada. . . . .	69
4	Especificações técnicas do ESP32-WROOM. . . . .	71
5	Componentes utilizados para implementação do módulo de seleção de fases. . . . .	73
6	Bibliotecas utilizadas para implementação do <i>firmware</i> do ACU-LUM. . . . .	75
7	Bibliotecas implementadas para elaboração do <i>firmware</i> do ACU-LUM. . . . .	78
8	Especificações técnicas do Colibri iMX6ULL. . . . .	85
9	Pacotes utilizados para implementação do <i>firmware</i> do ACU-SB. . . . .	87
10	<i>Scripts</i> em Python implementados para elaboração do <i>firmware</i> do ACU-SB. . . . .	88
11	Potência, fator de potência e THD obtidos do ACU-LUM alimentando a luminária. . . . .	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternate Current</i>
ACU	<i>Automation and Control Unit</i>
A/D	<i>Analog-to-Digital</i>
ARM	<i>Acorn RISC Machine</i>
BI	<i>Business Inteligence</i>
CEBEMA	<i>Computer Business Equipment Manufacturers Association</i>
CI	<i>Circuito integrado</i>
CIN	<i>Coupling and Interaction Nodes</i>
CL	<i>Central Level</i>
CSFs	<i>Computational Support Functions</i>
D/A	<i>Digital-to-Analog</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DRFs	<i>Domain Retrofitting Functions</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
GPIO	<i>General Purpose Input-Output</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation, Air Conditioning</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISFs	<i>Inter-Domain Support Functions</i>
ITIC	<i>Technology Industry Council</i>

JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LL	<i>Local Level</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LANI	<i>Local Area Network Interface</i>
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
LSE	Laboratório de Sistemas Embarcados
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MANI	<i>Metropolitan Area Network Interface</i>
MQTT	<i>Message Queue Telemetry Transport</i>
OPs	<i>Operational Primitives</i>
PFC	<i>Power Factor Controller</i>
PoI	<i>Points of Interface</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SCC	<i>Supervisor and Control Center</i>
SN	<i>Service Nodes</i>
SoC	<i>System-on-a-Chip</i>
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
STS	<i>Static Transfer Switch</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>

USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Omega$	Letra grega Omega
$\phi$	Letra grega Phi
$C$	Capacitância
$E$	Energia útil
$I$	Corrente elétrica eficaz
$i$	Corrente elétrica instantânea
$I_P$	Corrente no primário de transformador
$I_S$	Corrente no secundário de transformador
$L$	Indutância
$N_P$	Número de enrolamentos no primário de transformador
$N_S$	Número de enrolamentos no secundário de transformador
$P$	Potência útil
$Q$	Potência reativa
$Q_C$	Potência reativa capacitiva
$Q_L$	Potência reativa indutiva
$R$	Resistência elétrica
$S$	Potência aparente
$t$	Tempo
$U$	Tensão elétrica eficaz
$v$	Tensão elétrica instantânea
$V_P$	Tensão no primário de transformador
$V_S$	Tensão no secundário de transformador

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>20</b>
Tema . . . . .	21
Problema de pesquisa . . . . .	21
Hipótese . . . . .	22
Justificativa . . . . .	22
Objetivos . . . . .	23
<b>Objetivo geral</b> . . . . .	<b>23</b>
<b>Objetivos específicos</b> . . . . .	<b>23</b>
Descrição dos capítulos . . . . .	23
<b>1 REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	<b>24</b>
1.1 <i>Smart buildings</i> . . . . .	24
1.2 SmartLVGrid . . . . .	26
<b>1.2.1 A camada de <i>middleware</i> da plataforma SmartLVGrid</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>1.2.2 A camada de interoperabilidade da plataforma SmartLVGrid</b> . . . . .	<b>30</b>
1.3 Tecnologia de controle de iluminação LED . . . . .	32
<b>1.3.1 Características gerais</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>1.3.2 Controle de luminosidade em LEDs</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>1.3.3 Melhorando a eficiência dos <i>drivers</i> de LED</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>1.3.4 Retificador Buck</b> . . . . .	<b>35</b>
1.4 Redes de comunicação de dados . . . . .	36
<b>1.4.1 Tecnologias de transmissão de dados</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>1.4.2 Escalas de transmissão de dados</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>1.4.3 Tipos de comunicação</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>1.4.4 Arquiteturas de redes</b> . . . . .	<b>39</b>
1.5 Sistemas embarcados . . . . .	39
<b>1.5.1 Microprocessadores na eletrônica embarcada</b> . . . . .	<b>40</b>
<b>1.5.2 Microcontroladores</b> . . . . .	<b>40</b>
1.6 Sistemas para medição eletrônica de parâmetros de energia elétrica . . . . .	41
<b>1.6.1 Parâmetros elétricos</b> . . . . .	<b>42</b>
1.6.1.1 Potência e energia elétrica . . . . .	42
1.6.1.2 Fator de Potência . . . . .	43
<b>1.6.2 Medidores eletrônicos de energia elétrica</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>1.6.3 Elementos sensores para medição de parâmetro de energia elétrica</b> . . . . .	<b>45</b>
1.6.3.1 Sensores de tensão . . . . .	47
1.6.3.2 Sensores de corrente . . . . .	48
1.7 Chaves estáticas de transferência de energia . . . . .	51
<b>1.7.1 Princípio de funcionamento de uma chave estática</b> . . . . .	<b>52</b>

1.7.2	<b>Análise vetorial para transferência de cargas monofásicas entre duas fases</b>	<b>53</b>
1.7.3	<b>Problemas de transição dinâmica das cargas</b>	<b>54</b>
1.7.3.1	Curvas de aceitabilidade de energia: Tolerância de Tensão	56
1.7.3.2	Efeitos do chaveamento entre fases sobre as cargas monofásicas	56
<b>2</b>	<b>ARQUITETURA DO SISTEMA</b>	<b>60</b>
2.1	Arquitetura do ACU-LUM	61
2.2	Arquitetura do ACU-SB	62
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS DE IMPLEMENTAÇÃO</b>	<b>64</b>
3.1	Método para utilização dos dispositivos em rede de comunicação de dados	64
3.2	Implementação do ACU-LUM	65
<b>3.2.1</b>	<b>Especificações de <i>hardware</i> do ACU-LUM</b>	<b>66</b>
3.2.1.1	O conversor Buck <i>Low Side</i> PFC	67
3.2.1.2	<i>String</i> de LEDs	68
3.2.1.3	SoC com MCU e Wi-Fi integrados	70
3.2.1.4	Módulo de seleção de fases	71
3.2.1.5	Conversor AC-DC	74
<b>3.2.2</b>	<b>Especificações de <i>firmware</i> do ACU-LUM</b>	<b>75</b>
3.3	Implementação do ACU-SB	78
<b>3.3.1</b>	<b>Especificações de <i>hardware</i> do ACU-SB</b>	<b>80</b>
3.3.1.1	Sistema para aquisição de parâmetros elétricos	80
3.3.1.2	Circuitos de condicionamento de tensão e corrente	81
3.3.1.3	Mecanismos de proteção do sistema de condicionamento de tensão	83
3.3.1.4	Sistemas de alimentação, isolamento e <i>backup</i> de bateria	83
3.3.1.5	Unidade de processamento de dados e periféricos auxiliares	84
<b>3.3.2</b>	<b>Especificações de <i>firmware</i> do ACU-SB</b>	<b>86</b>
3.4	Elaboração dos <i>layouts</i> e placas de circuito impresso	89
3.5	Metodologia para implementação da estratégia do <i>retrofit</i>	91
3.6	Ambiente para coleta de resultados	93
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>94</b>
4.1	Cadastro dos ACUs em rede de comunicação	94
4.2	Validação das CSFs implementadas nos ACUs	96
4.3	Validação das ISFs implementadas nos ACUs	96
4.4	Execução das DRFs implementadas para cada ACU	98
<b>4.4.1</b>	<b>As DRFs do ACU-LUM</b>	<b>98</b>
<b>4.4.2</b>	<b>A DRF implementada para o ACU-SB</b>	<b>106</b>
	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>107</b>

**REFERÊNCIAS . . . . . 108**

## INTRODUÇÃO

O mundo passa uma revolução tecnológica onde a evolução ocorre de forma constante. Neste contexto, a tecnologia e a informação tem se tornado indispensáveis na vida das sociedades. A ideia de que o mundo físico e o mundo digital troquem informações através de dispositivos interconectados, vem transformando, cada vez mais, o modo de vida da sociedade nos últimos tempos.

Através de processos de convergência, é possível realizar transformações nos mais diversos sistemas a fim de que ocorram avanços tecnológicos, de forma intencional ou não intencional. A convergência digital é uma das mais destacadas por representar um dos avanços tecnológicos mais importantes do século XXI, sendo base para o surgimento do paradigma "Smart": IoT; indústria 4.0; *smart buildings*; *smart grids* e *smart cities* (R.MICELI; FAVUZZA; GENDUSO, 2013).

Do mesmo modo, o sistema de energia elétrica, um dos maiores complexos industriais implantados na história da humanidade, possuía seu funcionamento praticamente inalterado desde a sua concepção. No entanto, encaminhando-se para a revolução tecnológica deste século, o chamado paradigma *smart grid* apresenta-se como a evolução do sistema elétrico existente. Através dele, é possível agregar recursos de comunicação, controle eletrônico, automação e processamento computacional distribuído a fim de que o sistema atual e futuro possuam máxima excelência em suas operações (FARHANGI, 2010).

Ainda nesse contexto, a internet das coisas, do inglês *internet of things*, também conhecido como IoT, é um paradigma de comunicação que adquiriu relevância na indústria e na comunidade acadêmica por ser um dos pilares para quarta revolução industrial. Esse paradigma consiste na interconexão de objetos comuns à internet, através de transceptores e pilhas de protocolos adequados que possibilitam troca de informações e o controle eletrônico, por meio de dispositivos de *hardwares* específicos através dos usuários (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). A partir deste conceito, é possível realizar a interconexão destes equipamentos em certos ambientes e até mesmo em grandes construções, dando origem ao paradigma *smart building* (HU et al., 2018).

Para a implementação de tecnologias oriundas de conceitos provenientes desses paradigmas, é necessário estabelecer processos de convergência que permitam uma transição tecnológica com menor custo relativo e menores impactos em estruturas pré-existentes, conhecidas como legado (R.MICELI; FAVUZZA; GENDUSO, 2013). Então, é necessário que ocorram mudanças graduais durante o processo, pois mudanças radicais acarretam em custos elevados de implementação, assim como substituir toda a estrutura legada por soluções superiores tecnologicamente. Assim sendo, é possível acelerar o processo de convergência "Smart".

A estratégia de *retrofit*, aplicada na transformação de dispositivos antigos e tecnologicamente ultrapassados, mas ainda necessários, é usada em processos de convergência para tecnologias de sistemas inteligentes. No entanto, mesmo em face à aparente relevância deste

assunto, existem poucos estudos sobre esta abordagem aplicada a implementação do paradigma "Smart"(GOMES et al., 2017). Esta técnica, por exemplo, poderia ser utilizada para possibilitar operações de controle e monitoramento de equipamentos eletroeletrônicos em uma instalação predial, inserindo-se ao contexto de *smart buildings*.

O *framework* SmartLVGrid é um modelo de referência aplicado à convergência *smart grid* de sistemas legados de distribuição de energia elétrica em baixa tensão. Combinando o conceito de *retrofit* à estratégias de engenharia de sistemas, ou sistemas de sistemas, esse *framework* possibilita uma transição de baixo custo de uma planta passiva ao paradigma de *smart grids*, visto que adiciona ao sistema legado recursos de processamento, controle e comunicação sem requerer, para isso, a substituição radical de toda ou parte da infraestrutura existente (GOMES et al., 2017).

Nesse trabalho, a implementação do conceito de *smart buildings* estará restrita ao desenvolvimento de módulos de *hardware* embarcado aplicados ao *retrofit* de luminárias LED e de sistemas de monitoramento de energia do Laboratório de Sistemas Embarcados do centro de pesquisa HUB - Tecnologia e Inovação, localizado na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado de Amazonas, de forma a viabilizar a construção de sistemas inteligentes de iluminação conforme preconizado pelo referido conceito.

## TEMA

Desenvolvimento de plataformas embarcadas aplicadas a implementação de *smart buildings* com base no *framework* SmartLVGrid.

## PROBLEMA DE PESQUISA

O mercado apresenta, ainda, poucas soluções práticas para realizar funcionalidades de automação e controle em estruturas legadas. Além disso, adquirir equipamentos eletroeletrônicos com tais características pode implicar em soluções de alto custo para quem deseja implementar dispositivos do gênero.

Estes equipamentos, normalmente, utilizam arquiteturas de difícil implementação onde, na maioria dos casos, passam a ser dependentes da internet ou de protocolos de comunicação de alta complexidade para que possam se comunicar entre si e com o usuário. Em adição, os equipamentos retirados do sistema legado são descartados ou entram em desuso pelo usuário ao serem substituídos por dispositivos modernos que possuem funcionalidades similares e custos elevados.

Nesse contexto, os sistemas de iluminação e de distribuição de energia elétrica prediais existentes ainda não dispõem de recursos que melhorem a eficiência energética e qualidade de energia em instalações prediais e permitam a interoperabilidade desses equipamentos com

o usuário, com as características já mencionadas, possibilitando recursos necessários para convergência *smart building*.

## HIPÓTESE

Utilizando o *framework* SmartLVGrid, adaptado para convergência *smart building*, é possível fazer a conversão de uma instalação predial passiva em um sistema dotado de recursos de monitoramento e controle sem alterar significativamente as características do sistema existente, através do desenvolvimento de plataformas embarcadas compostas por *hardware* e *firmware* dedicados a realizar serviços que possibilitem o aumento da eficiência energética.

## JUSTIFICATIVA

Foi perceptível que o *framework* SmartLVGrid poderia ser utilizado para apresentar uma alternativa para convergência *smart building* através do desenvolvimento de dispositivos de uso comum para o usuário, com processo de implementação flexível e com possibilidade de aumento da eficiência energética na instalação. Tendo isso em vista, esta monografia visa a possibilidade de explorar negócios em soluções para convergência *smart building* atingindo principalmente os mercados relacionados a automação predial e eficiência energética.

A elaboração dos sistemas desenvolvidos colabora com a inserção de estruturas legadas ao contexto da internet das coisas em processos de automatização de ambientes, a fim de que estes operem de forma eficiente e inteligente nos mais diversos ambientes, garantindo a preservação da estrutura pré-existente sem alteração total de seus elementos.

De forma indireta, esta proposta possibilita que regiões ou localidades com baixo índice de desenvolvimento alcancem a excelência em seus sistemas tecnológicos através das implementações aqui propostas, equiparando-se ou até mesmo superando as tecnologias utilizadas em países desenvolvidos em situações semelhantes para as mesmas aplicações.

O estudo envolve conceitos estudados durante todo o curso de graduação, possibilitando o envolvimento de quatro subáreas do bacharelado em engenharia elétrica: Sistemas Elétricos de Energia; Sistemas e Controle Eletrônico; Eletrônica Industrial e Telecomunicações. As principais disciplinas relacionadas a esta monografia incluem : Linguagem de Programação I e II, Eletrônica de Potência I e II, Eletrônica Analógica I, II e III, Eletrônica Digital I e II, Sistemas Microprocessados, Microcontroladores, Sistemas de Telecomunicações, Distribuição de Energia Elétrica, Eficiência Energética e Redes de Comunicações de Dados I.

## OBJETIVOS

### Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver plataformas de *hardware* e *firmware*, a camada de *middleware* do *framework* SmartLVGrid, aplicadas ao *retrofit* de luminárias LED e de circuitos de medição de energia elétrica, de forma a viabilizar a convergência *smart building* de iluminação em ambientes e circuitos elétricos, além de melhorar parâmetros de eficiência energética.

### Objetivos específicos

- a) definir contornos conceituais do *framework* SmartLVGrid e do paradigma *smart building*;
- b) estudar soluções para controle de sistemas de iluminação LED;
- c) estudar sistemas de telemedição de parâmetros elétricos;
- d) projetar e implementar módulos embarcados de *retrofit* de acordo com o *framework* SmartLVGrid;
- e) realizar análises dos resultados obtidos no processo de convergência *smart building* com o uso do SmartLVGrid.

## DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Capítulo 1 - Referencial teórico: Neste capítulo, são descritos e revisados os conteúdos associados ao paradigma "*Smart*", bem como a própria plataforma SmartLVGrid. Além disso, são abordados temas de relevância para implementação deste trabalho.

Capítulo 2 -Arquitetura do sistema: O escopo estrutural para adaptação da plataforma SmartLVGrid na convergência *Smart Building* é abordado neste capítulo, que também serviu de base para implementação da pesquisa.

Capítulo 3 - Materiais e métodos de implementação: Conforme as descrições realizadas nos capítulos anteriores, este capítulo tem por objetivo apresentar toda metodologia e recursos necessários para implementação do sistema proposto.

Capítulo 4 - Resultados e discussões: Os resultados da pesquisa, em conformidade com os objetivos do trabalho, são expostos neste capítulo.

Capítulo 5 - Conclusões: Neste capítulo constarão as conclusões referente aos resultados obtidos e a pesquisa realizada.

## 1 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão abordados os aspectos teóricos necessários para o melhor entendimento das definições a serem utilizadas ao longo do projeto. Inicialmente, serão abordados os conceitos introdutórios de *smart buildings* e do *framework* SmartLVGrid. Em seguida, serão apresentadas os aspectos característicos e as estratégias para controle de iluminação LED, que serão utilizadas no desenvolvimento das plataformas a serem implementadas no projeto. Conceitos sobre redes de comunicações de dados serão cruciais para realização do estudo e terão relevância neste capítulo, assim como os sistemas de medição eletrônica de energia elétrica utilizados na implementação de redes elétricas inteligentes.

### 1.1 SMART BUILDINGS

Edifícios Inteligentes, do inglês "*smart buildings*", é um termo genérico utilizado para descrever um conjunto de dispositivos interconectados e integrados às construções prediais (HOY, 2016). Apesar deste conceito apresentar-se de forma clara, não existiam definições sólidas que pudessem caracterizar este paradigma em toda sua essência a pouco mais de uma década atrás. Ainda assim, alguns cientistas realizaram estudos sobre este paradigma ao longo dos anos, onde propuseram citações importantes a cerca deste paradigma:

Um edifício inteligente é aquele que proporciona uma economia produtiva e econômica em ambientes através da otimização dos seus quatro elementos básicos: estrutura, sistemas, serviços e gestão, e as inter-relações entre eles. Edifícios Inteligentes auxiliam os proprietários, gerentes de propriedade e ocupantes a realizarem suas metas nas áreas de custo, gestão de energia, conforto, conveniência, segurança, flexibilidade e comercialização a prazo. (CAFFREY, 1988)

Edifícios inteligentes são instalações em que, através de seu projeto físico e instalações de TI, são responsivos, flexíveis e adaptáveis às necessidades de mudança de seus usuários e das organizações que habitam o prédio durante sua vida útil. O prédio pode fornecer serviços para seus habitantes, sua administração e operação. Além disso, deve ter um comportamento 'inteligente', transparente, memória de estado, suporte a sistemas humanos e de instalação e estará equipado com sensores e atuadores. (CHRISTIANSSON, 2000)

Um edifício inteligente é aquele em que a instalação, o espaço, os serviços e os sistemas de informação predial podem responder de maneira eficiente às exigências iniciais e variáveis do proprietário, do ocupante e do meio ambiente. (HEISELBERG; CHRISTIANSSON; REINHOLD, 2007)

Mediante isso, pode-se concluir que este é um conceito que está propenso a mudanças ao longo dos anos, por visar a proposição de melhorias inteligentes às estruturas prediais que dependem de aprendizados contínuos.

Em *smart buildings*, todos os sistemas que compõem as instalações de um prédio podem ser controlados automaticamente através da coleta de dados em tempo real. Esses sistemas

buscam adequar o ambiente e o uso dos equipamentos dentro de um edifício de acordo com as preferências do usuário . Contudo, a rede de elementos sensores e atuadores permitem que o edifício se ajuste às necessidades humanas também em tempo real. É primordial que os indivíduos presentes na instalação tenham prioridade do controle dos dispositivos em funcionamento. Além disso, edifícios inteligentes podem possuir infraestrutura que possibilita conforto e melhor aproveitamento energético e de recursos naturais, a fim de reduzir custos e de valorizar o construto.

A internet das coisas é uma grande aliada do paradigma *smart building*, no que diz respeito a interconexão dos dispositivos. Por meio de sensores e atuadores, é possível realizar operações de controle e monitoramento em um edifício por meio da internet ou de protocolos de comunicação específicos que possibilitem segurança em suas operações, sempre que possível (TOTONCHI, ).

A eficiência energética, por outro lado, é almejada em edifícios inteligentes a partir de duas categorias (EUROPEANCOMISSION, 2017):

1. iluminação inteligente que ajusta o controle do fluxo luminoso por meio de sensores e sistemas inteligentes;
2. sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, do inglês "*Heating, Ventilation, Air Conditioning*", também conhecido como HVAC, através de ajustes automáticos e até mesmo previsões meteorológicas.

A figura 1 apresenta o escopo da estrutura de uma *smart building*.

Figura 1 – Escopo estrutural do paradigma *Smart Building*.

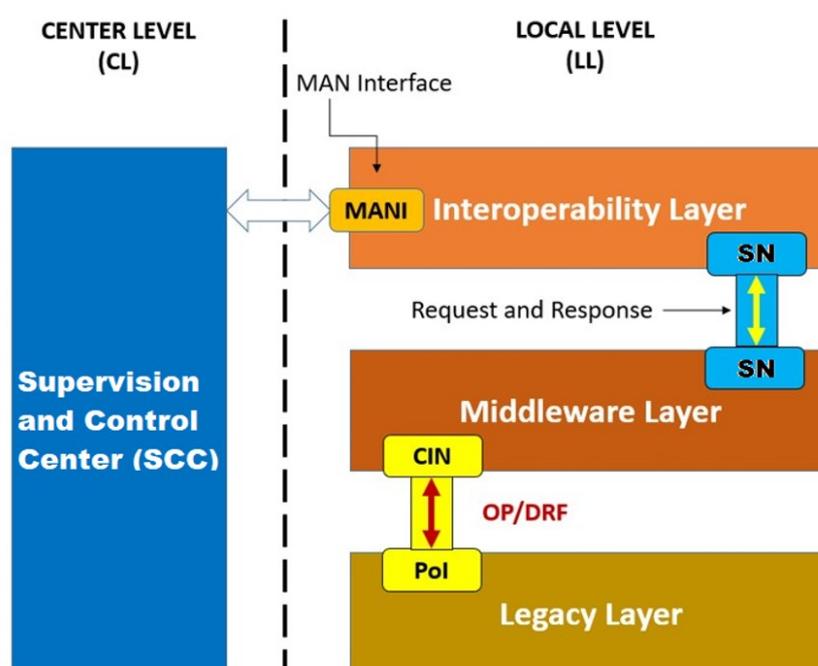


Fonte: Adaptado (EUROPEANCOMISSION, 2017)

## 1.2 SMARTLVGRID

O *framework* SmartLVGrid, abreviação do inglês *Smart Low Voltage Grids*, redes inteligentes de baixa tensão, é um modelo que descreve uma estratégia, uma estrutura e um conjunto de protocolos aplicados à convergência de redes inteligentes do sistema de distribuição em baixa tensão a partir da adaptação dos circuitos legados que a compõem. Assim, o método de *retrofit* é parte integrante desta plataforma e corresponde à estratégia proposta por ela. Com base em uma representação em camadas, a figura 2 ilustra a pilha SmartLVGrid dentro do sistema de distribuição de baixa tensão (GOMES et al., 2017; GOMES et al., 2019).

Figura 2 – A pilha SmartLVGrid no contexto do sistema de distribuição em baixa tensão.



Fonte: (GOMES et al., 2017)

Ao analisar a figura 2, é possível observar que a plataforma está estruturada em nível local, do inglês *local level* (LL), próximo ao consumidor final, e em nível central, do inglês *central level* (CL), próximo a concessionária de energia elétrica. Dada a separação geográfica entre o nível local e o nível central, o modelo prevê o uso de links e Interfaces de Rede de Área Metropolitana, do inglês *metropolitan area network interface* (MANI), para garantir a conexão e comunicação entre esses dois níveis.

Em nível local, os módulos de *retrofit* são instalados em pontos de interface, do inglês *points of interface* (PoI), cuidadosamente escolhidos sob a estrutura legada onde será possível realizar a conexão entre as camadas da pilha SmartLVGrid em nível local, possibilitando a troca de mensagens e outras interações. Na camada de *middleware*, o Nó de Acoplamento e Interação, do inglês *coupling and interaction node* (CIN), é conectado ao ponto de interface da camada legada com o objetivo de realizar microprocessos classificados como funções de *retrofitting*

de domínio, do inglês *domain retrofitting functions* (DRFs), que compõe uma das classes de primitivas operacionais, do inglês *operational primitives* (OPs). Além das DRFs, existem OPs relacionadas a funções de suporte computacional (CSFs) e funções de suporte entre domínios (ISFs), que permitem a implementação de processos de comunicação e em suporte nos serviços implementados nos módulos. A tabela 1 apresenta as OPs descritas no *framework* SmartLVGrid.

Tabela 1 – Os microprocessos, primitivas operacionais, executadas na pilha SmartLVGrid.

<b>Classes de Primitivas Operacionais</b>	<b>Descrição</b>
1. Funções de <i>Retrofitting</i> de Domínio (DRFs)	
1.1. Sensoriamento (Detecção);	Detecção de faltas, distúrbios, ameaças, etc.
1.2. Medição;	Capacidade de ler e quantificar quantidades físicas, por exemplo, temperatura e variáveis elétricas.
1.3. ON/OFF;	Capacidade de conectar ou desconectar um circuito do seu alimentador.
1.4. Comutação de fase.	Capacidade de alterar a fonte (ou fase) de uma carga.
2. Funções de Suporte Computacional (CSFs)	
2.1. Gravação (registro);	Dados de detecção, medição e configuração de registro. Alguns também podem armazenar programas.
2.2. Processamento de dados.	O processamento necessário para executar as outras OPs, serviços de <i>back-end</i> e aplicações.
3. Funções de suporte entre domínios (ISFs)	
3.1. Envio / Recebimento de Dados;	A interface de rede usada pela função é LAN se a comunicação for local (LL) e MAN para comunicação entre LL e CL.
3.2. Sincronização.	Permite o controle do horário de início e fim das tarefas dos participantes na execução de um processo.

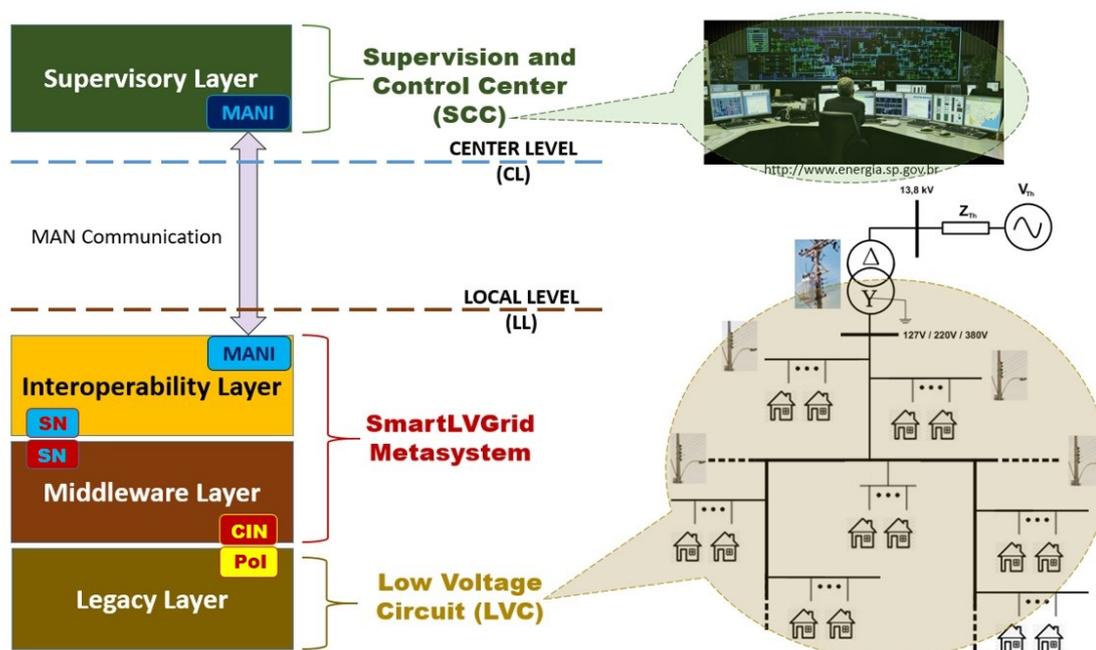
Fonte: Adaptado (GOMES et al., 2017)

As primitivas operacionais são processos que no modo de operação do sistema elétrico pré-existente, são tipicamente executados manualmente por um operador de campo, mas com a adaptação implementada através do CIN, passam a ser executados por controle automático. Ao

contrário do CIN, os Nós de Serviço (SN) são unidades lógicas que fazem a interação entre as camadas Interoperabilidade e *Middleware*.

Portanto, a finalidade principal da plataforma SmartLVGrid é estabelecer um modelo para a conversão de um sistema passivo em um sistema dotado de recursos de comunicação e automação que permitam o controle remoto e a supervisão da planta de distribuição pelo "Centro de Operações da Distribuição" e, em alguns casos, a operação local e autônoma do mesmo. A figura 3, usando a representação em camadas, ilustra a arquitetura do sistema que o modelo SmartLVGrid faz na composição com o sistema de distribuição em baixa tensão.

Figura 3 – A pilha SmartLVGrid e a camada legada do sistema de distribuição de energia elétrica.



Fonte: (GOMES et al., 2019)

No sistema tradicional, a central de operação e distribuição de energia elétrica concentra todo o *Business Intelligence* (BI) da distribuição, repassando aos operadores de campo o status de funcionamento do sistema elétrico. Segundo o modelo SmartLVGrid, é possível descentralizar o BI, compartilhando-o com os circuitos de baixa tensão modernizados, dada a capacidade de processamento e automação desses sistemas. Isto permite a implementação de um escopo amplo e aberto de funcionalidades controladas localmente. Por outro lado, o sistema pode estar sujeito a atuação do "Centro de Controle e Supervisão" (SCC) em alguns processos ou agir cooperativamente com os outros circuitos inteligentes em outros casos, compatível com a configuração de um sistema multiagente.

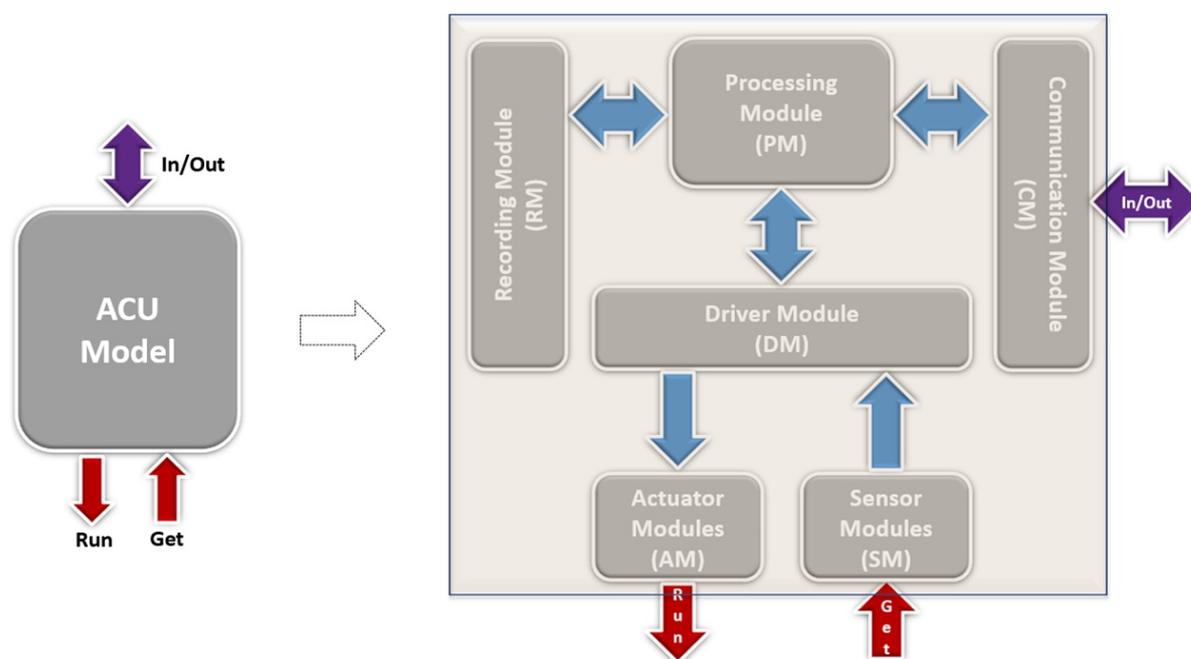
### 1.2.1 A camada de *middleware* da plataforma SmartLVGrid

A camada legada na pilha SmartLVGrid refere-se a infraestrutura existente em nível local. Acima desta camada, como pode ser observado na figura 2, encontra-se a camada de *middleware*. Esta camada opera no nível mais baixo da plataforma, fazendo interface direta com a infraestrutura legada, por meio de pontos de interface ou pontos de acoplamento que implementam as DRFs por meio de automação, ou controle externo, e podem ser executadas por meios supervisórios ou autônomos (GOMES et al., 2017).

É válido ressaltar que os nós de acoplamento e interação e a camada de *middleware* são abstrações da referida plataforma. Assim sendo, o *hardware* utilizado para implementar as funções de *retrofitting* de domínio, carregados com o *firmware*, sensores e atuadores compatíveis, implementam fisicamente o modelo.

A camada de *middleware* também é descrita em outros trabalhos do autor como *Automation and Communication Unit*, ACU devido à sua composição e características funcionais. A funcionalidade de cada ACU dependerá das DRFs a serem executadas e do tipo de estrutura legada que receberá o ACU como módulo de *retrofit*.

Figura 4 – Descrição detalhada da composição de um ACU



Fonte: (GOMES et al., 2017)

A figura 4 fornece uma representação do diagrama de blocos do modelo genérico de ACU, caracterizando-o em três portas: "In / Out", "Get" e "Run". Vale ressaltar que a capacidade de processamento e armazenamento de um ACU depende não apenas do domínio de associação e do nível desejável de controle e monitoramento, mas também da função atribuída a ele na camada de interoperabilidade.

A porta "Get" tem a função de coletar dados de variáveis pré estabelecidas para medições e detecção de possíveis violações dos limites de operação do dispositivo de *retrofit*. Por outro lado, a porta "Run" possui funcionalidades de acionamento e controle sobre o ponto de interface com a camada legada. Os métodos e processos de comunicação realizados pelo ACU são realizados através da porta "In / Out" do modelo.

As portas do ACU se relacionam com as classes de primitivas operacionais da plataforma SmartLVGrid, apresentadas na tabela 1 da seguinte forma: As DRFs são executadas pelas portas Get e Run; As CSFs são executadas dentro da estrutura do ACU; As ISFs são executadas pelas portas "In / Out".

### 1.2.2 A camada de interoperabilidade da plataforma SmartLVGrid

A camada de interoperabilidade define as regras, critérios e infraestrutura necessárias para realizar as conexões necessárias e organizar os ACUs em uma rede hierárquica, que promove o acesso os serviços executados pela plataforma e as interações entre os objetos (GOMES et al., 2017).

Além disso, esta camada especifica um sistema de computação distribuída, usando esses dispositivos, para fornecer suporte as camadas superiores desse sistema, onde são fornecidas as devidas interfaces de supervisão, controle e o *business intelligence* do sistema.

A plataforma SmartLVGrid determina que o sistema deve possuir um elemento coordenador no sistema, *master*, que monitora e supervisiona todos os outros elementos que atuarão no sistema executando as primitivas operacionais, *slaves*. Estes elementos são descritos pela plataforma, respectivamente, como elementos *coordinators* e *operators*.

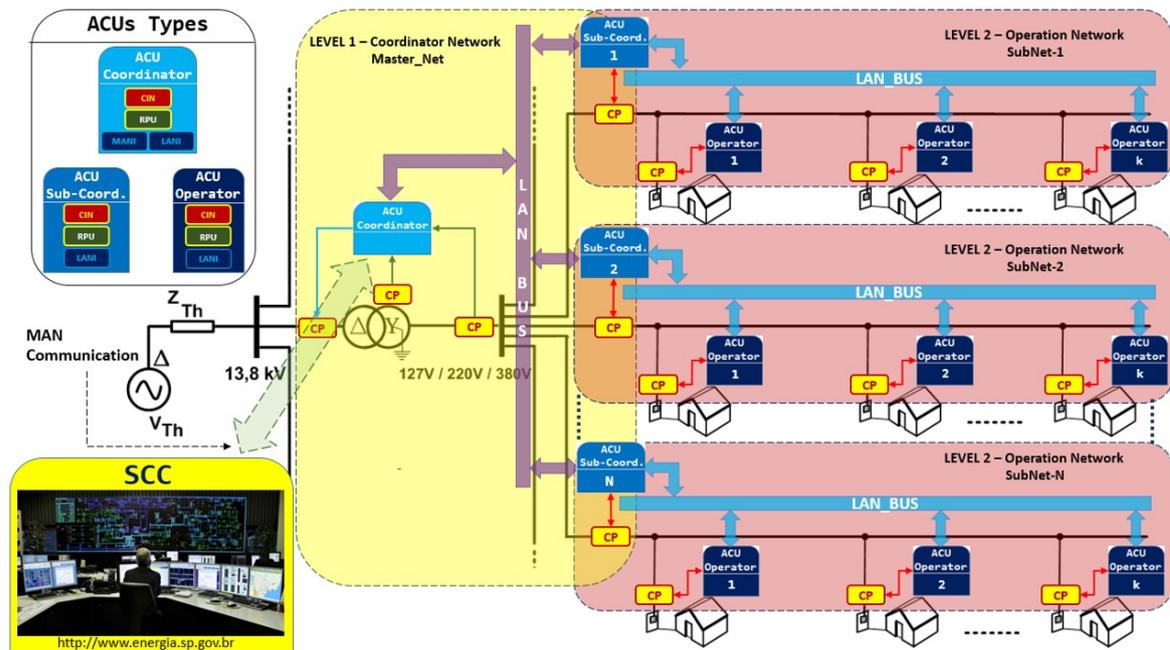
No caso de sistemas de maior extensão e complexidade, a plataforma prevê *coordinators* que estabelecem links com unidades de monitoramento e controle auxiliares, também conhecidas como *sub-coordinators*. Com isso, estes elementos estarão associados diretamente com grupos de *operators*. Vale ressaltar que apesar de existir uma rede hierárquica no sistema, os *operators* podem atuar com seus serviços de forma independente. Porém, podem executar operações de controle de acordo com a necessidade de hierarquias maiores.

Após definidas as hierarquias do sistema, a camada de interoperabilidade define classificações e nomenclaturas para cada tipo de ACU utilizado no sistema, tanto para os *coordinators* quanto para os *operators*, que estarão mais próximos da camada legada.

A interconexão das ACUs é dada conforme o geoposicionamento desses dispositivos. Se situados em regiões de área local, recomenda-se adotar redes de comunicação em área local, também conhecidas por *Local Area Network* ou LANs. Quando a separação geográfica entre esses dispositivos se situar em maiores distâncias, recomenda-se adotar protocolos de comunicação que utilizem redes de comunicação de área metropolitana, também conhecidas como *Metropolitan Area Network* ou MANs. A figura 5 apresenta uma descrição detalhada da

arquitetura hierárquica do posicionamento das ACUs em um sistema de distribuição de energia em baixa tensão, onde há a interconexão destes elementos.

Figura 5 – Descrição da arquitetura hierárquica de uma rede de ACUs interconectadas em um sistema de distribuição em baixa tensão



Fonte: (GOMES et al., 2019)

Pode-se observar na figura 5 que os pontos de acoplamento para medição e atuação no sistema elétrico, sejam dos postos transformadores ou dos medidores externos das unidades consumidoras, estão associados a seus respectivos ACUs para realizar as primitivas operacionais sobre estas estruturas legadas. O "Level 1" indica a interconexão do ACU *coordinator*, associado ao posto transformador, por meio de um barramento LAN com os ACUs *sub-coordinators*, responsáveis por coordenar cada barramento interconectado a saída do posto transformador. A interconexão dos ACUs *operators* com os ACUs *sub-coordinators* ocorre por meio de um barramento LAN independente, representando o "Level 2" da camada de interoperabilidade. Vale ressaltar que apenas o ACU *coordinator* fará interfaceamento com o sistema de controle e supervisão apesar de que cada unidade ACU pode executar seus serviços de forma independente.

Também é possível notar a composição dos ACUs utilizados para implementação desse sistema. Além dos nós de acoplamento e interação (CINs), os ACUs são compostos com uma interface LAN (LANI) utilizada para comunicação a nível local entre as estruturas apresentadas. Os ACUs podem apresentar interface MAN (MANI), caso haja necessidade.

## 1.3 TECNOLOGIA DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO LED

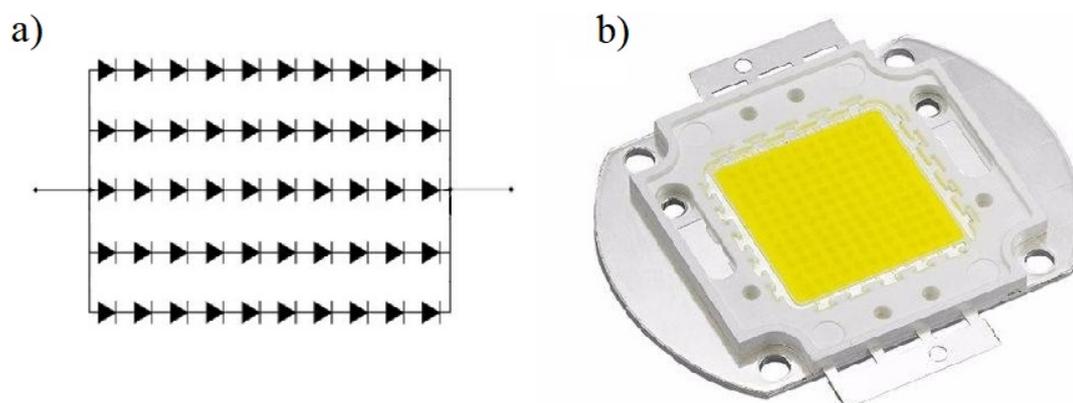
### 1.3.1 Características gerais

Os semicondutores vem revolucionando o mercado de dispositivos eletrônicos ao longo dos anos, possibilitando avanços tecnológicos nas mais diversas áreas. Os elementos semicondutores eletroluminescentes estão ganhando espaço no mercado, tanto pela sua alta eficiência luminosa e tamanho reduzido quanto pela redução dos custos de fabricação deste elemento ao longo dos anos. A esta família de dispositivos, estão associados uma série de elementos: diodos infravermelhos, diodos a laser e, em especial, os LEDs (*Light Emitting Diode*).

Além de não emitir em seu espectro luminoso os raios ultra-violeta, que são nocivos a pele e a visão humana, a luz proveniente deste elemento não emite calor. Os LEDs também possuem maior vida útil que outros elementos luminosos e possibilitam uma emissão de luz constante e uniforme que melhora o conforto visual, devido a bons índices de reprodução de cor emitidos pelo elemento (FENG; LUO; HAN, 2010; ZHANG et al., 2012).

A associação de LEDs pode gerar mais fluxo luminoso aos elementos iluminadores. Normalmente, encontram-se esses arranjos em diversos modelos de luminárias associadas a esta tecnologia, desde as menores lâmpadas de bulbo até as grandes luminárias públicas LED. Com o avanço tecnológico dos semicondutores, os LEDs SMD são os mais utilizados para implementação de dispositivos de iluminação. O conjunto de LEDs associados em um único *chip* é chamado de *Chip on Board* de LEDs e têm ganhado espaço no mercado por ser compacto e por possuir alta eficiência luminosa, tudo em um único dispositivo (FERNANDES; GUIMARÃES, 2018). Contudo, os LEDs SMD apresentam baixo custo relativo se comparado a essa tecnologia e por isso ainda são empregados em larga escala por estruturas legadas de sistemas de iluminação. A figura 6 apresenta um modelo de *Chip on Board* de LEDs e seu respectivo esquemático.

Figura 6 – Modelo de um esquemático (a) e de um *chip on board* de LEDs (b)



Fonte: Adaptado (FERNANDES; GUIMARÃES, 2018)

Mesmo com todos os benefícios relacionados com o uso de sistemas de iluminação LED,

a implementação do controle para estes dispositivos ainda apresentam baixa eficiência e baixos índices de parâmetros de qualidade de energia, o que torna esses sistemas de iluminação de estado sólido nocivos ao sistema elétrico de energia.

### 1.3.2 Controle de luminosidade em LEDs

Uma vez que LEDs são utilizados em sistemas de iluminação, é necessário o emprego de conversores eletrônicos DC-DC, também conhecidos como *drivers* de LED, para efetuar o controle de fluxo de energia a ser fornecido ao dispositivo. Os dispositivos de conversão devem ser projetados para atender as especificações dos parâmetros elétricos de um ou vários LEDs presentes em um dado dispositivo. A vida útil do conversor implica no tempo de duração da luminária ou elemento iluminador a qual o LED está inserido (LIU; LEE, 2013).

Os dispositivos de conversão de energia, na maioria dos casos, utilizam elementos capacitivos e indutivos em processos de filtragem de sinais chaveados. Contudo, estes filtros são altamente sensíveis às altas temperaturas, principalmente, quando são compostos por capacitores eletrolíticos. Conversores que utilizam capacitores eletrolíticos em processos de filtragem, tanto na entrada como na saída do circuito estão sujeitos a terem vida útil reduzida e menor eficiência.

Para obtenção de um fluxo luminoso constante no LED é necessário manter a sua corrente média constante. Isso se deve ao coeficiente de temperatura negativo, que compõem os aspectos estruturais dos materiais semicondutores. Contudo, o arranjo de LEDs em determinado circuito pode influenciar na estratégia de controle utilizada para o controle do fluxo de energia sob esses elementos. Em associações de LEDs em série, um controle de corrente se mostra mais eficiente pelo fato de se conseguir regular o fluxo luminoso de um conjunto de LEDs com uma única corrente em uma *string* com esses elementos.

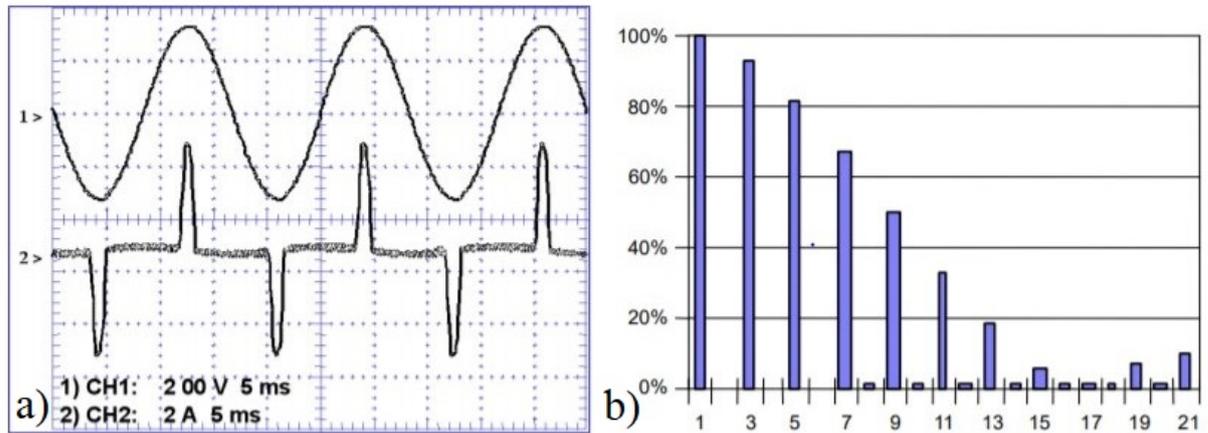
O fato de que a alimentação de LEDs baseia-se em fontes DC resulta em perdas significativas na conversão de energia de corrente alternada para corrente contínua, quando alimentado em AC. Além disso, indicadores de qualidade de energia, como fator de potência e distorção harmônica total, tendem a apresentar valores insatisfatórios quando obtidos em dispositivos de conversão AC-DC, passando a afetar o sistema elétrico de energia. Utilizando *drivers* de LED projetados para aplicações em AC é possível garantir uma maior eficiência de conversão de energia e assegurar melhores índices de qualidade de energia.

### 1.3.3 Melhorando a eficiência dos *drivers* de LED

Os circuitos eletrônicos de conversão de energia, utilizados para alimentar ou controlar cargas elétricas e eletrônicas, utilizam sistemas de retificação e técnicas de chaveamento em altas frequências que afetam os parâmetros do sistema elétrico. A corrente elétrica de entrada destes dispositivos são as mais afetadas, o que leva a um baixo índice de fator de potência e a elevadas taxas de distorção harmônica. E quando somados, esses efeitos reduzem índices de

qualidade de energia e podem afetar diretamente as unidades consumidoras. A figura 7 apresenta as respectivas formas de onda de tensão e corrente na entrada de um conversor chaveado com seu respectivo conteúdo harmônico.

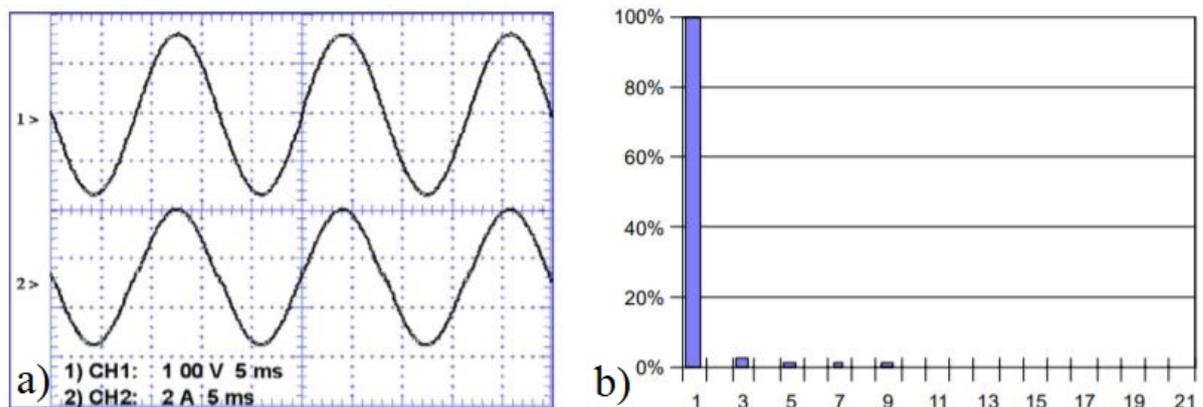
Figura 7 – Características de entrada de uma fonte chaveada e (a) seu conteúdo harmônico (b).



Fonte: (SEMICONDUCTOR, 2007)

Contudo, existem técnicas para melhoria do fator de potência e das taxas de distorção harmônica que podem ser utilizadas para amenizar os efeitos destrutivos causadas por estes elementos. Se trata de um sistema para controle do fator de potência, também conhecido como PFC ou *Power Factor Controller* (PEREIRA et al., 2017). Esses sistemas podem ser implementados de duas formas: O circuito PFC passivo ou o circuito PFC Ativo (AZAZI et al., 2010). A figura 8 apresenta as respectivas formas de onda de tensão e corrente na entrada de um conversor chaveado com seu respectivo conteúdo harmônico.

Figura 8 – Características de entrada de uma fonte chaveada com PFC (a) e seus harmônicos (b).



Fonte: (SEMICONDUCTOR, 2007)

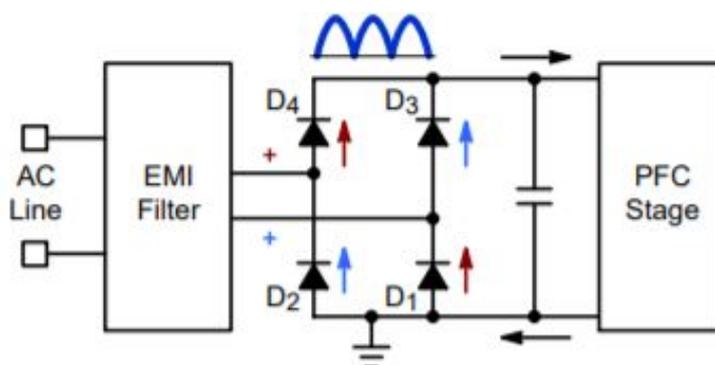
Comparando as duas imagens, é perceptível a redução do conteúdo harmônico da corrente. O circuito PFC passivo utiliza filtros adaptados na entrada desses conversores, com o auxílio de elementos semicondutores em alguns casos. Este sistema tem o objetivo de filtrar componentes

harmônicas que aumentam a distorção harmônica da corrente de entrada dos conversores sem utilizar elementos de chaveamento, também conhecidos como elementos ativos. Apesar do baixo custo de implementação, a grande desvantagem desta metodologia é que este método é projetado para atender parâmetros elétricos fixos de tensão e corrente. Caso a carga a ser controlada necessite de controle do fluxo de energia, este método não será eficaz.

Por outro lado, o circuito PFC ativo utiliza filtros e elementos ativos de chaveamento, com o uso aplicado de técnicas de controle específicas para o ajuste do fator de potência, para melhorar o desempenho dos circuitos de conversão de energia. Apesar de possuir níveis de implementação mais complexos, esses sistemas prometem maior eficácia em seu propósito.

Os sistemas PFC devem, sempre que possível, estar associados a filtros contra interferências eletromagnéticas, também conhecidos como filtros de EMI, para aumentar ainda mais a eficiência dos elementos de conversão. Isso evitará o trânsito de harmônicos entre a fonte alimentadora e o sistema utilizado (YU-ZHEN et al., 2011). A figura 9 apresenta a estrutura de um sistema com filtro EMI e PFC em uma aplicação típica. Essa estrutura normalmente antecede a entrada de um conversor chaveado.

Figura 9 – Estrutura de um conversor com filtro EMI e PFC.



Fonte: (SEMICONDUCTOR, 2007)

A interferência eletromagnética é propagada através do ar ou pelos cabos utilizados na instalação elétrica, tendo como característica principal ser um sinal irradiado de alta frequência e com forte conteúdo harmônico. Este fenômeno pode interferir na operação adequada de equipamentos conectados à mesma rede elétrica, podendo danificá-los em algumas situações.

Neste trabalho, será adotado um sistema de conversão de energia para iluminação a LED com PFC ativo, visando maximizar os resultados a serem oferecidos pelo elemento de *retrofit*.

### 1.3.4 Retificador Buck

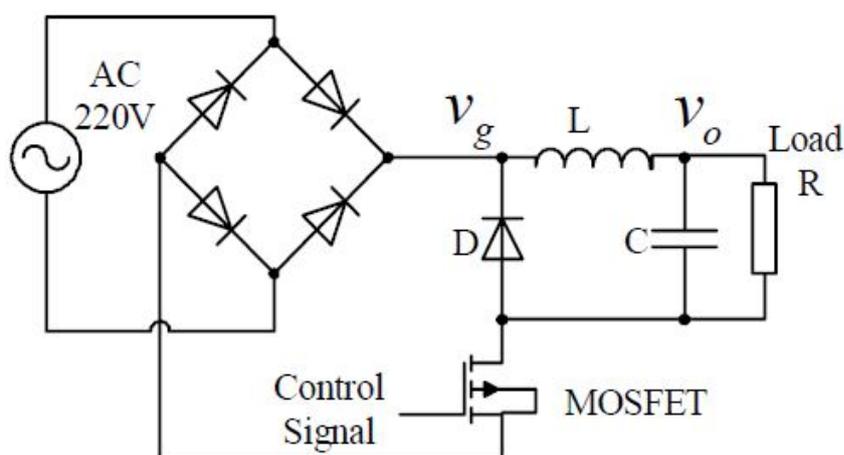
A tipologia de retificadores Buck, ou comumente chamados de conversores PFC Buck, é usualmente empregada em *drivers* para lâmpada LED, possuindo melhores resultados quando

comparado com outras topologias de conversores. O circuito de um conversor DC-DC Buck consiste em uma retificação tipo-ponte, um *chopper* Buck que atenua o sinal DC por meio de um dispositivo de chaveamento, provido também de um capacitor na saída do controlador, visando reduzir o *ripple* de alta frequência. Já o indutor é utilizado devido ao seu princípio de inércia de corrente, fornecendo um nível contínuo de corrente na carga, sem variações violentas (MORI et al., 2009; YU-ZHEN et al., 2011).

Para conversores Buck que utilizam o controle PFC, usualmente é feita uma variação da configuração convencional, chamada de conversor Buck *low side* PFC, ilustrado na figura 10.

Nessa tipologia a carga situa-se flutuando e o dispositivo de chaveamento encontra-se em uma referência comum ao retificador. Dessa forma, existe facilidade na malha de controle para chaveamento do MOSFET, visto que o dispositivo de controle e chaveamento estão compartilhando a mesma referência.

Figura 10 – Retificador Buck *low side* PFC.



Fonte: (XIANGRONG; DIANGUO; XIANGJUN, 2006)

#### 1.4 REDES DE COMUNICAÇÃO DE DADOS

Desde o início do século XX, os principais avanços tecnológicos foram obtidos através de processos de distribuição e aquisição de informações. A partir disso, os sistemas passaram a possuir estruturas organizacionais formadas por um número considerável de computadores interconectados através de meios de transmissão e recepção, as chamadas redes de computadores. Viu-se então que esta estrutura poderia não só atender grandes sistemas industriais, mas também pequenos sistemas comerciais e domésticos.

Com o tempo, essas redes de comunicação passaram a ser interconectadas por meios não cabeados, como o Wi-Fi e o Bluetooth, por exemplo, e até mesmo possuir tecnologia móvel, como é o caso das redes móveis celulares. Não existem taxonomias específicas que classificam

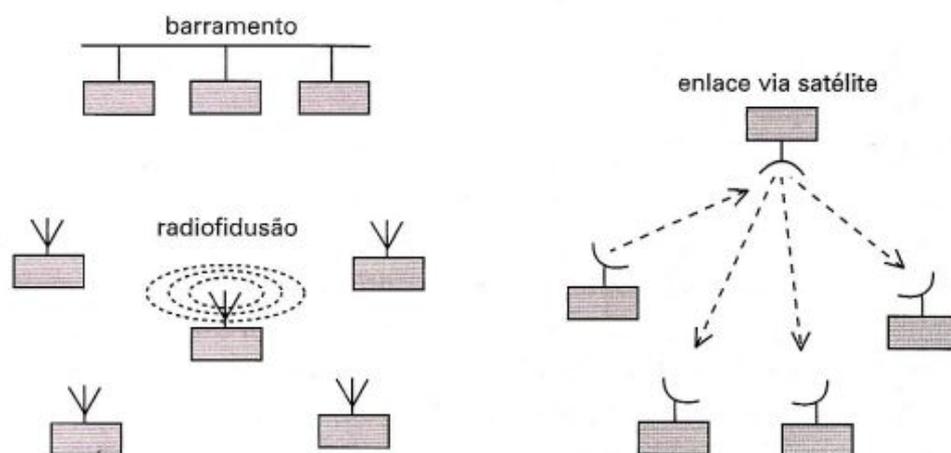
cada modelo de redes de dados. Contudo, duas se destacam: Tecnologias de transmissão de dados e a escala.

#### 1.4.1 Tecnologias de transmissão de dados

Atualmente, existem dois tipos de tecnologias que podem ser empregadas para transmissão de dados em redes de dados: links por difusão e links ponto a ponto (ALBINI, 2015).

Os sistemas de links de transmissão por difusão possuem apenas um canal de comunicação, que é compartilhado com todos os outros elementos computacionais da rede. Mensagens curtas, que sob determinadas situações são chamados pacotes, podem ser enviadas por qualquer máquina e são recebidas por todas as outras. Um campo de endereço dentro de cada pacote especifica o destinatário pretendido. A figura 11 apresenta algumas topologias de rede baseadas em links por difusão.

Figura 11 – Topologias baseadas em difusão

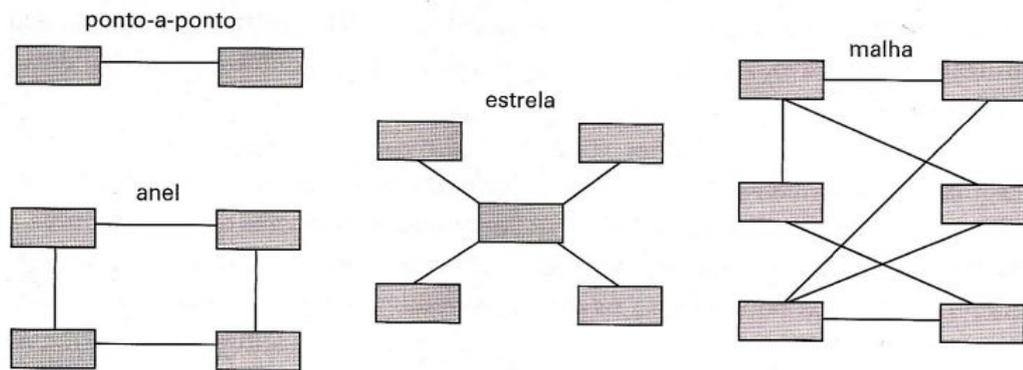


Fonte: (ALBINI, 2015)

Em contraste, temos os links de barramento, que é constituído a partir de conexões entre pares de máquinas individuais. Para chegar ao destino, um pacote deve adotar o melhor caminho possível entre dispositivos. Normalmente, para os links por barramento, utilizam-se algoritmos de roteamento que identificam as melhores rotas possíveis para os pacotes. É importante ressaltar que links por barramento realizam conexões entre pares de máquinas individuais. A figura 12 apresenta algumas topologias de rede baseadas em barramento.

Um pacote pode ser transmitido a todas as máquinas interconectadas na rede utilizando um endereço lógico único, conhecido como *broadcast*, ou para um subconjunto pré determinado de endereços de máquina, conhecido como *multicast*.

Figura 12 – Topologias de barramento



Fonte: (ALBINI, 2015)

### 1.4.2 Escalas de transmissão de dados

Para este taxionoma de classificação das redes de comunicação, a distância é o principal requisito a ser considerado, pois podem ser empregadas as mais diversas tecnologias de transmissão em cada caso. Baseado nisso, as redes de transmissão de dados podem ser classificadas em: Rede de área pessoal, do inglês *Personal Area Network* (PAN); Rede de área local, do inglês *Local Area Network* (LAN); Rede de área metropolitana, do inglês *Metropolitan Area Network* (MAN); Rede de longas distâncias, do inglês *Wide Area Network* (WAN) (TANENBAUM et al., 2003). Assim como ilustrado na figura 13, a escala de transmissão de dados pode ser baseada na distância entre elementos comunicadores.

Figura 13 – Escala de transmissão de dados baseada na distância entre comunicadores.

1 m	Square meter	Personal area network
10 m	Room	
100 m	Building	Local area network
1 km	Campus	
10 km	City	Metropolitan area network
100 km	Country	Wide area network
1000 km	Continent	
10,000 km	Planet	The Internet

Fonte: (TANENBAUM et al., 2003)

### 1.4.3 Tipos de comunicação

Na grande maioria dos sistemas de comunicação, a conexão é obtida através de meios físicos, cabeados ou não. Contudo, é necessário estabelecer caminhos para transmissão de informações entre elementos transmissores e receptores por meio de canais de comunicação. Esses canais podem assumir três possibilidades distintas: *Simplex*, *half-duplex* e *full-duplex* (TANENBAUM et al., 2003).

Em canais de comunicação que operam no modo *simplex*, o enlace é estabelecido em apenas um dos sentidos possíveis de transmissão, como é o caso de televisores e rádios. Em modo *half-duplex*, a comunicação pode se estabelecer de forma bidirecional, porém não de forma simultânea, como é o caso dos *walkie-talks*. Apenas no modo *full-duplex* a comunicação se estabelece de forma bidirecional e simultânea, como ocorrem em sistemas de telefonia celular, por exemplo.

### 1.4.4 Arquiteturas de redes

No começo do processo de implementação de redes de computadores, cada fabricante projetava seu próprio conjunto de regras de comunicação, conhecidos popularmente como protocolos de comunicação. Contudo, apenas os próprios fabricantes poderiam oferecer suporte a suas estruturas de rede, o que inviabilizava o processo de implantação desses sistemas.

Com o passar dos anos, os fabricantes passaram a formalizar e publicar os seus protocolos de rede, o que permitiu a outros fabricantes produzir dispositivos que pudessem se comunicar com os primeiros computadores. As duas arquiteturas de redes mais populares da atualidade são os modelos de referência OSI e TCP/IP (ALBINI, 2015; TANENBAUM et al., 2003).

Apesar de ser mais antigo, o modelo OSI em si ainda é válido e as especificidades de cada camada são bases para outros modelos de referência. Suas camadas estão projetadas de maneira que cada uma possua sua própria lista de protocolos e serviços. Além disso, o modelo descreve os modos de interação entre cada camada.

O modelo TCP/IP não é tão utilizado quanto o modelo OSI, contudo seus protocolos são os mais implementados e estudados para estruturação de redes de dados nos mais variados ambientes. Este modelo se popularizou por ser estabelecido como um padrão na comunidade da Internet, um dos meios de comunicação mais utilizados da atualidade.

## 1.5 SISTEMAS EMBARCADOS

Muitos definem um sistema embarcado como sendo apenas inserir capacidade computacional em circuitos integrados (CUNHA, 2007). Já outros definem sistemas embarcados pela combinação de unidades microcontroladas ou microprocessadas com seus respectivos *softwares*,

*firmware*, formando um dispositivo único com capacidade de processamento limitada e em constante interação com o meio em que se encontra, por meio de sensores e atuadores (CHASE; ALMEIDA, 2007). São muitas as definições para o que é um sistema embarcado, pois de fato é um conceito complexo.

Contudo, os dispositivos que englobam este conceito podem apresentar controles e diretivas provenientes de dispositivos pequenos, com capacidade de processamento adequada para a função a qual executa ou venha a executar: os microcontroladores e microprocessadores. Estes elementos compõem a base computacional deste projeto e para os circuitos inteligentes implementados na plataforma SmartLVGrid, especificamente na camada de *middleware* da plataforma. A partir disso, os elementos de *retrofit* podem se comunicar com as camadas superiores, formando assim uma rede de dispositivos interconectados que podem controlar e monitorar diversos sistemas, visando torná-los mais eficientes e eficazes.

### **1.5.1 Microprocessadores na eletrônica embarcada**

São chamados de processadores os dispositivos que empregam funcionalidades definidas por meio de linguagem de programação. Além disso, esses dispositivos podem ser utilizados para movimentar ou transformar dados e também para tomar decisões sob ações a serem executadas (BARROS; CAVALCANTE, 2010).

Os processadores utilizados em unidades centrais de processamento domésticas ou industriais devem estar preparados para diversas situações. Contudo, na eletrônica embarcada, os dispositivos a serem empregados para a implementação dos sistemas devem possuir baixo custo de implementação e tamanho reduzido, para executar a tarefa aos quais estes estão destinados a realizar através de periféricos específicos. Assim são os microprocessadores para eletrônica embarcada.

Muitos desses sistemas funcionam em arquiteturas de 32 bits e 64 bits, atualmente. Utilizam também sistemas operacionais (Linux, na maioria dos casos), que permitem gerenciar serviços dentro de determinado sistema e processar dados com maior robustez.

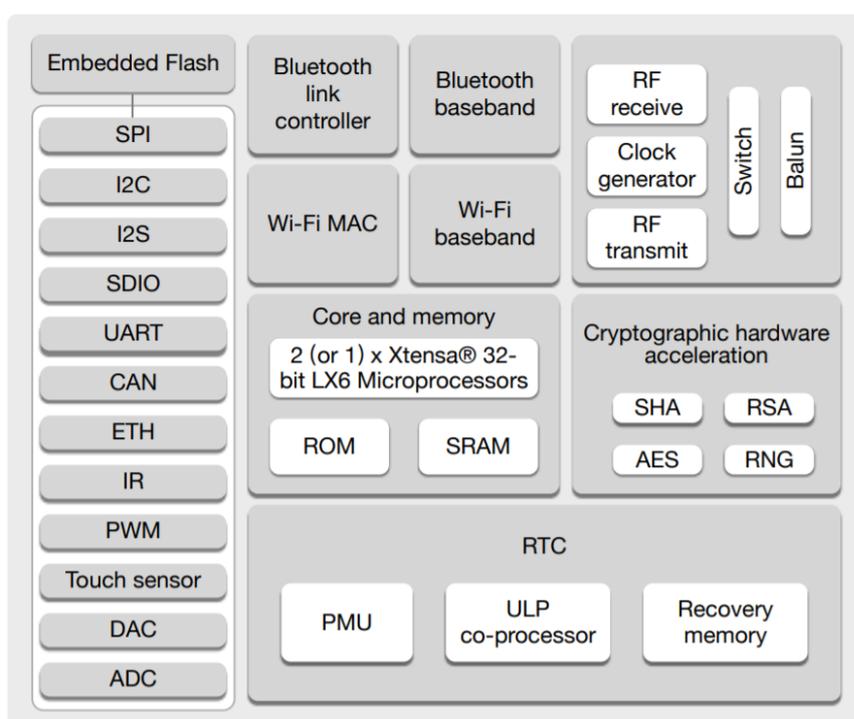
### **1.5.2 Microcontroladores**

Os microcontroladores surgiram ao longo do desenvolvimento dos microprocessadores, em meados de 1970. O mercado sentiu a necessidade de incorporar, em um único dispositivo, componentes externos que eram utilizados na produção de eletrodomésticos: memória do tipo RAM (*Random Access Memory*) e EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), portas lógicas, temporizadores, conversores A/D (Analogico/Digital). Os microprocessadores não contavam com estes periféricos na época. Com isso, nasceram os microcontroladores (MIRITZ, 2016).

A Intel produziu o chip 8748, sendo a pioneira no desenvolvimento de microcontroladores. Em 1980, foi desenvolvido o chip 8051, o primeiro da família de 8 bits denominada MCS-51. Com características de um sistema computacional completo em um único *chip*, os microcontroladores são subsistemas digitais com média e alta integração (MIRITZ, 2016).

Atualmente, existem diversos modelos de microcontroladores de 8 bits e até mesmo de 32 bits. A família PIC e AVR, da empresa Microchip Technology, são os mais populares do gênero (NAYYAR, 2016). Contudo, com a integração de outros periféricos a estes sistemas, os microcontroladores passaram a ser parte integrante de muitos sistemas em *chips*, do inglês *System-on-a-Chip* (SoC), que também comportam periféricos de comunicação *wireless* e ainda mais funcionalidades. Esta abordagem é utilizada para reduzir custos de fabricação em série, por englobar muitos elementos integrados em um único dispositivo. Os *chips* da empresa Espressif, como o ESP32 e o ESP8266, são modelos populares de SoCs que contam com periféricos de comunicação em rede Wi-Fi e microcontroladores em sua arquitetura (MAIER; SHARP; VAGAPOV, 2017). A figura 14 representa um diagrama em blocos da estrutura interna do ESP32.

Figura 14 – Diagrama de blocos do SoC ESP32.



Fonte: (ESPRESSIF, 2017)

## 1.6 SISTEMAS PARA MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE PARÂMETROS DE ENERGIA ELÉTRICA

O paradigma *Smart Grid* utiliza-se de recursos de comunicação, controle e automação sobre ativos do setor elétrico visando maximizar a eficiência e eficácia da operação deste sistema.

Um de seus recursos mais valiosos é o sistema de medição eletrônica.

Diferente dos medidores eletromecânicos, que funcionam a base do princípio da indução eletromagnética, os medidores digitais utilizam uma combinação de elementos eletroeletrônicos para garantir máxima eficiência em operações de medição.

### 1.6.1 Parâmetros elétricos

O principal papel dos dispositivos de medição de energia é o monitoramento dos parâmetros elétricos nas unidades consumidoras, ou em cargas específicas. Neste subtópico, serão informados e detalhados os principais conceitos dos parâmetros elétricos monitorados por estes dispositivos.

#### 1.6.1.1 Potência e energia elétrica

A potência elétrica é o parâmetro de medição que determina a rapidez com que a energia elétrica é utilizada. Em outras palavras, a potência elétrica é definida como a variação da energia elétrica utilizada pelo tempo, de acordo com a equação 1:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

Sua unidade de medida é obtida em Watt (W) ou joule por segundo (J/s). Este parâmetro também pode ser calculado pelo produto da tensão elétrica e corrente elétrica. Quando este parâmetro é obtido em um dado instante de tempo, passa a ser conhecido como potência elétrica instantânea e pode ser calculado nos termos da equação 2:

$$P(t) = U(t) \times i(t) \quad (2)$$

De forma análoga, em um dado intervalo de tempo, a energia elétrica é obtida a partir da integração temporal da potência elétrica instantânea, de acordo com a equação 3:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt \quad (3)$$

Onde o intervalo de tempo da integração ocorre entre  $t_2$  e  $t_1$ . Contudo, a potência e energia elétrica encontram-se em três formas: ativa ( $P$ ), reativa ( $Q$ ) e aparente ( $S$ ).

Na forma ativa, a energia elétrica pode ser aproveitada na forma de calor e, por isso, produz trabalho e pode ser transformada em outras fontes de energia, como energia mecânica, por exemplo. A potência ativa, ou potência útil, pode ser obtida então pela potência média correspondente à energia efetivamente dissipada pelo circuito. A potência ativa possui como unidade de medida o Watt (W) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

De forma oposta, a energia elétrica reativa não produz trabalho e está associada à presença do campo magnético ou campo elétrico. A potência reativa indutiva ( $Q_L$ ) é crucial para

o funcionamento de bobinas, máquinas síncronas e assíncronas, entre outros equipamentos. Por outro lado, a potência reativa capacitiva ( $Q_C$ ) é crucial para elementos capacitivos, como banco de capacitores na rede de distribuição em baixa tensão, por exemplo. Ambas são expressas em Volt-Ampére reativo (VAr).

Por fim, a potência aparente é definida como a soma total entre potências ativas e reativas de forma vetorial, conforme apresentado na equação 4:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

Onde  $Q$  representa a diferença entre potências reativas indutivas e capacitivas, apresentada na equação 5:

$$Q = Q_L - Q_C \quad (5)$$

Para aferir o consumo de energia elétrica, os medidores instalados nas unidades consumidoras medem a energia ativa em quilowatt-hora (kWh).

#### 1.6.1.2 Fator de Potência

A razão entre a potência elétrica ativa e reativa resulta no fator de potência. Esta grandeza elétrica indica a eficiência com que a energia está sendo utilizada variando de zero a um, já que a potência ativa não pode ser maior do que a potência aparente. Quanto mais próximo de um, mais eficiente o aproveitamento de energia, o que indica que toda a energia entregue está sendo devidamente aproveitada (BOYLESTAD, 2013). A equação 6 expressa o cálculo do fator de potência:

$$FP = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (6)$$

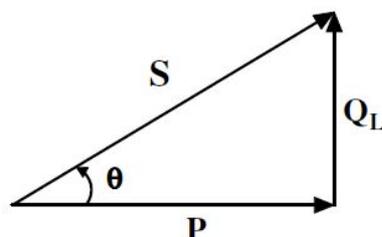
Onde  $FP$  é o fator de potência e  $\phi$  é o ângulo de defasagem entre a potência útil e a potência aparente.

Um fator de potência resistivo é unitário, pois toda energia entregue a elementos resistivos é aproveitada na forma de calor, o que gera trabalho e pode ser transformada em outras formas de energia.

Quando o fator de potência apresenta-se de forma indutiva, tem-se um indicador de que a energia reativa absorvida pelas cargas indutivas se faz mais presente para produção do fluxo magnético e, conseqüentemente, para o funcionamento de máquinas estáticas e rotativas indutivas. Ao apresentar características capacitivas, o fator de potência passa a indicar que a carga está fornecendo energia reativa, devido a presença do campo elétrico formado pelos capacitores.

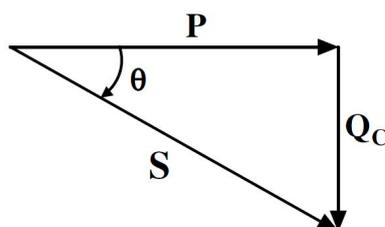
A partir do fator de potência de um circuito, é possível estabelecer um triângulo de potências que classifica a carga como indutiva ou capacitiva a pelo ângulo encontrado. As figuras 15 e 16 apresentam os triângulos de potências resultantes referentes a cargas indutivas e capacitivas, respectivamente.

Figura 15 – Triângulo de potências para cargas indutivas.



Fonte: (BOYLESTAD, 2013)

Figura 16 – Triângulo de potências para cargas capacitivas.



Fonte: (BOYLESTAD, 2013)

## 1.6.2 Medidores eletrônicos de energia elétrica

O primeiro medidor eletrônico de energia elétrica foi concebido em meados da década de 90. Seu conceito baseia-se na ação dos parâmetros elétricos de energia elétrica, tensão e corrente, sob componentes eletrônicos de forma que seja gerada uma saída proporcional a grandeza elétrica supervisionada (SILVA et al., 2012).

Se comparado com os medidores eletromecânicos, os medidores eletrônicos conseguem supervisionar diferentes variáveis. Além disso, esses medidores conseguem identificar eventos e faltas na rede elétrica, possibilitando a geração de diagnósticos mais completos para supervisão do sistema elétrico e são providos de sistemas para armazenamento de dados para posterior análise, se necessário (JÚNIOR et al., 2014).

Os medidores eletrônicos inteligentes, ou *smart meters*, podem comunicar-se entre si por meio de redes de comunicação com ou sem fio. Estas redes, no contexto *Smart Grid*, permitem analisar o desempenho de consumo de unidades consumidoras e ativos do sistema elétrico de energia elétrica em tempo real. Além disso, o sistema de comunicação destes dispositivos podem disponibilizar acesso remoto as informações dos parâmetros elétricos, ajustes de calibração e

programação. A figura 17 mostra um *smart meter* residencial da empresa Aclara Technologies LLC.

Figura 17 – Medidor I-210 Meter Family Residential.



Fonte: (ACLARA, 2019)

### 1.6.3 Elementos sensores para medição de parâmetro de energia elétrica

Os dispositivos de sensoriamento são utilizados na conversão de grandezas físicas em um sinal elétrico. Normalmente esses dispositivos são compostos por transdutores, dispositivos de conversão utilizados responsáveis por este processo (JÚNIOR et al., 2014). As principais características dos elementos sensores são:

- Excitação: Este parâmetro indica a grandeza necessária, cuja aplicação leva ao funcionamento do sensor;
- Saturação: Corresponde ao limite de funcionamento dos elementos sensores a partir dos quais os mesmos tem sua linearidade reduzida;
- Função de transferência: É caracterizada como a relação entre o parâmetro a ser monitorado e o sinal de saída do sensor.

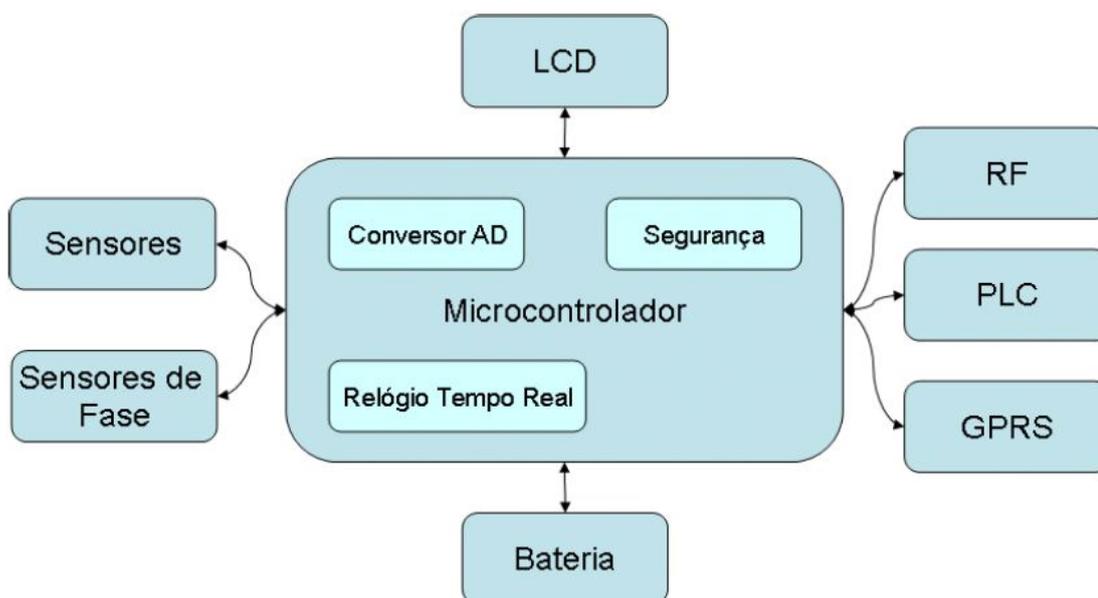
Dependendo da aplicação, a escolha do sensor pode depender de outras características, como preço e dimensões, por exemplo. Para medição de parâmetros elétricos de energia, os elementos sensores mais utilizados são os sensores de corrente e de tensão.

Normalmente, esses sensores podem atuar com certa imprecisão devido as alterações de temperatura no ambiente e possíveis variações nos seus processos de fabricação. Portanto, quando utilizados junto a unidades microcontroladas e microprocessadas, os serviços de medição devem passar por processos de calibração, para garantir a máxima precisão na atuação destes elementos em campo ao passar por constantes variações no ambiente aos quais estarão inseridos.

A escolha e o dimensionamento dos transdutores são cruciais para se obter um fundo de escala adequado para se trabalhar com a unidade eletrônica. Quando não é possível ajustar os transdutores de forma física, a calibração pode ser realizada por meio de *softwares* específicos que possibilitem a atuação deste recurso em sistemas embarcados de medição eletrônica.

Comumente, os conversores analógicos-digitais utilizados em sistemas embarcados para leitura de sinais de tensão não são adaptados para leitura de sinais de tensão abaixo de 0 V. Neste caso, é necessário condicionar os sinais, também, com amplificadores operacionais para que possam ser inseridos juntos a esses componentes. Felizmente, alguns circuitos integrados já conseguem ler esses parâmetros e interpretá-los de forma digital, o que facilita o processo de implementação de sistemas de medição de energia elétrica. A figura 18 apresenta as possíveis características e periféricos de um *smart meter* genérico, incluindo sensores e microcontroladores.

Figura 18 – Diagrama de blocos genérico de um *smart meter*.



Fonte: (JÚNIOR et al., 2014)

### 1.6.3.1 Sensores de tensão

Ao monitorar a tensão da rede elétrica de distribuição em baixa tensão, é necessário condicionar este sinal para um sinal resultante com amplitudes menores, visto que este será inserido junto a elementos eletrônicos de baixa potência. Normalmente, unidades microcontroladas trabalham com faixas de tensões de 0 V a 3,3 V. As soluções mais utilizadas, por sua praticidade e baixo custo, são os transformadores de potencial indutivos e os circuitos divisores de tensão.

Os transformadores de potencial indutivo tem seus enrolamentos primários associados a rede elétrica de distribuição, enquanto seu enrolamento secundário está associado aos circuitos de controle e monitoramento eletrônico (CHAPMAN, 2013). As tensões instantâneas de primário e secundário,  $v_P(t)$  e  $v_S(t)$ , são apresentadas nas equações 7 e 8, respectivamente:

$$v_P(t) = V_P \times \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

$$v_S(t) = V_S \times \text{sen}(\omega t) \quad (8)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular do sinal senoidal injetado, dada em rad/s.

A relação de transformação, ou função de transferência, relacionando os enrolamentos e amplitudes das tensões de primário e secundário, é dada pela equação 9:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (9)$$

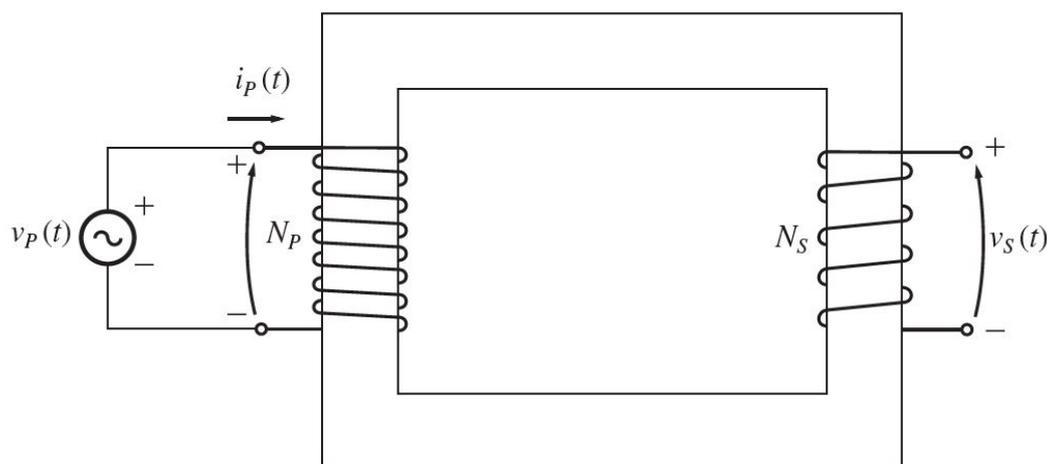
Onde  $V_P$  e  $V_S$  são as tensões e  $N_P$  e  $N_S$  os enrolamentos de primário e secundário, respectivamente. Qualquer ajuste em um dos possíveis enrolamentos possibilitará a calibração nos sensores. A figura 19 apresenta o diagrama esquemático ideal de um transformador de potencial indutivo.

Outra maneira de monitorar tensão elétrica é por meios de simples divisores de tensão. Por possuírem linearidade e por não defasar os sinais de tensão elétrica, elementos resistivos são comumente utilizados neste processo. Além disso, os resistores podem possuir precisões relativamente maiores que outros transdutores, o que melhora a eficiência do sistema de medição, em geral (ALEXANDER; SADIKU, 2013). A figura 20 apresenta um potenciômetro utilizado para controle de níveis de tensão, representando um divisor resistivo.

De forma geral, a função de transferência referente a tensão de saída do condicionamento de tensão por divisor resistivo é apresentado pela equação 10:

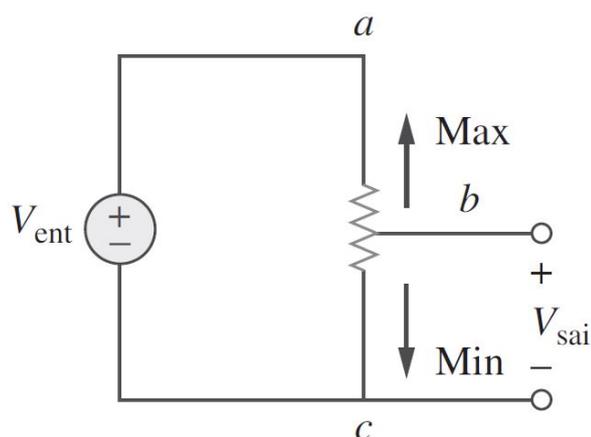
$$V_{sai} = V_{bc} = V_{ent} \times \frac{R_{bc}}{R_{ac}} \quad (10)$$

Figura 19 – Diagrama esquemático ideal de um transformador de potencial indutivo.



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Figura 20 – O potenciômetro no controle de níveis de potencial.



Fonte: (ALEXANDER; SADIKU, 2013)

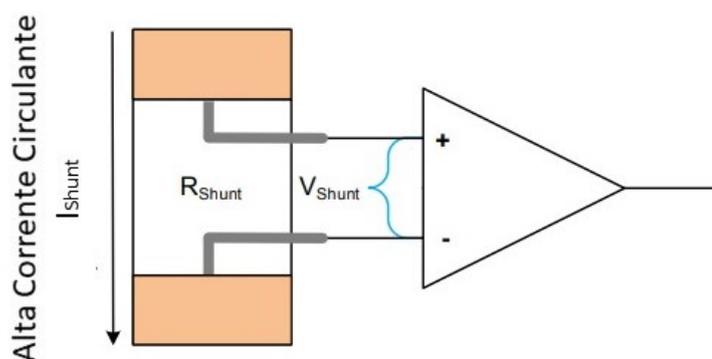
Onde  $V_{ent}$  é tida como a tensão da rede elétrica e  $V_{sai}$  é tida como a saída do divisor de tensão. É válido ressaltar que os limites de precisão e potência de resistores para medição de tensão variam de acordo com a aplicação a qual serão submetidos.

### 1.6.3.2 Sensores de corrente

De forma análoga aos sensores de tensão resistivos, também existem sensores de corrente resistivos conhecidos como *shunts* (ALEXANDER; SADIKU, 2013). A figura 21 ilustra uma aplicação típica de uma resistência *shunt*, onde a diferença de potencial neste elemento é inserida diretamente nos terminais de um circuito integrado, muitas das vezes contendo um amplificador de instrumentação, para efetuar a medição de corrente.

De acordo com a lei de Ohm, tomando como base um sinal de tensão de saída,  $V_{Shunt}$ , e

Figura 21 – Resistência *shunt* em uma aplicação típica para fins de medição.



Fonte: Adaptado (SEMICONDUCTOR, 2019)

a resistência aplicada,  $R_{Shunt}$ , a função de transferência de um resistor *shunt* é obtida de acordo com a equação 11:

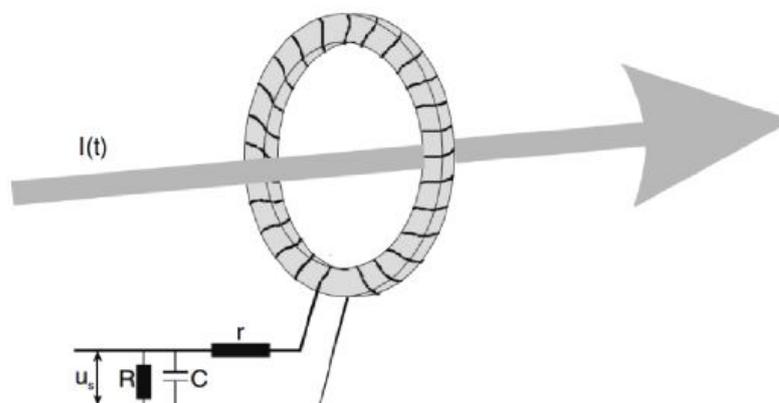
$$V_{Shunt} = R_{Shunt} \times I_{Shunt} \quad (11)$$

Apesar de ser muito utilizado, principalmente em circuitos eletrônicos com funcionalidades relacionadas com controle de corrente, elementos resistivos dissipam calor de forma proporcional ao aumento de corrente. Além disso, o sistema de medição por *shunts* não possibilita a isolamento elétrica, o que pode danificar os sistemas de controle dos dispositivos de medição.

Outro método para medição de corrente elétrica é o uso da bobina de *Rogowski*. Este é um elemento indutivo que consiste em um núcleo toroidal inserido em torno do condutor. Com a passagem da corrente elétrica pelo condutor principal, se forma um campo magnético que induz uma diferença de potencial nos terminais da bobina. As principais vantagens no uso da bobina de *Rogowski* estão relacionadas com a ampla faixa de correntes que estas podem medir e por ser adaptável a seção transversal de um único ou vários condutores conjuntos. Em adição, possui baixa variação do sinal de saída com o aumento da temperatura. Para alguns modelos destes dispositivos, necessita-se de circuitos integradores para correção de fase no sinal medido (SAMIMI et al., 2013). Isto também pode ser implementado de forma digital por meio de programação em *firmware* embarcado. A figura 22 ilustra um modelo de uma simples bobina de *Rogowski* com um circuito analógico, RC, integrador.

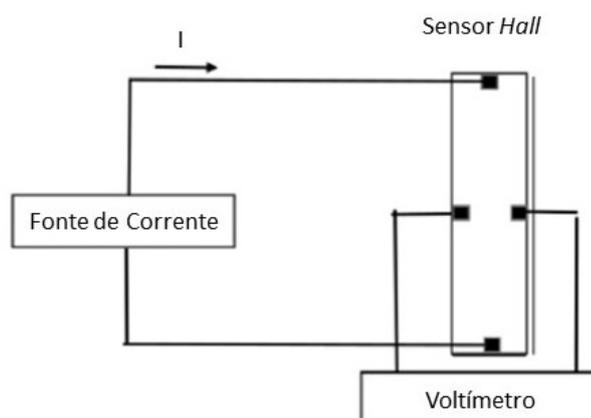
Os sensores de efeito *hall* também são amplamente utilizados para medição de corrente. Estes elementos são dispositivos sensores que, sob a aplicação de um campo magnético, geram um sinal elétrico proporcional em sua saída. Geralmente este é um sinal de tensão, conhecido como tensão *hall* (SHARON; KHACHATRYAN; CHESKIS, 2018). Sendo fortemente afetados pela intensidade de campo magnético local, estes elementos sensores devem ser instalados em localidades cuidadosamente escolhidas nas plataformas a serem inseridas. A figura 23 apresenta um modelo esquemático de um sensor de efeito *hall* efetuando a leitura de corrente.

Figura 22 – Modelo de uma bobina de *Rogowski* com um circuito RC integrador.



Fonte: (SAMIMI et al., 2013)

Figura 23 – Sensor de efeito *hall* efetuando medição de corrente.



Fonte: Adaptado (SHARON; KHACHATRYAN; CHESKIS, 2018)

Com o princípio de funcionamento muito próximo a bobina de *Rogowski*, utiliza-se também os transformadores de corrente. Este é o elemento sensor mais empregado para medições de corrente no sistema elétrico de distribuição e transmissão. Através de um acoplamento magnético, a corrente medida, presente no enrolamento primário deste dispositivo, é transformada em uma corrente menor no secundário de forma proporcional (CHAPMAN, 2013). Essa proporcionalidade é descrita na equação 12:

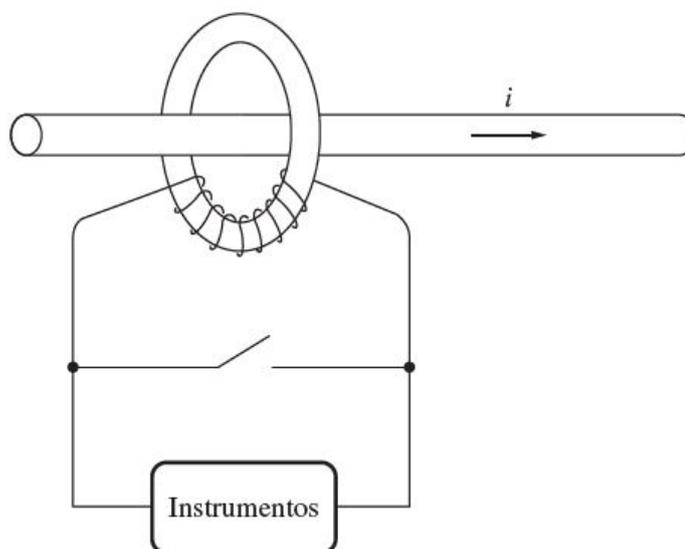
$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} \quad (12)$$

Onde  $I_P$  e  $I_S$  são as correntes e  $N_P$  e  $N_S$  os enrolamentos de primário e secundário, respectivamente.

Na figura 24 é possível observar o esquema de um transformador de corrente. Em paralelo

com o secundário do transformador de corrente, podem existir circuitos de condicionamento para ajustar o sinal aos instrumentos de medição.

Figura 24 – Esquema de um transformador de corrente.



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Uma vantagem no uso dos transformadores de corrente é a isolação galvânica, garantida por seu acoplamento magnético. Isso permite mensurar correntes elevadas com maior proteção para operadores de campo e sistemas de medição eletrônicos.

## 1.7 CHAVES ESTÁTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

As chaves estáticas, ou de estado sólido, de transferência de energia são utilizadas para realizar a comutação entre fontes de energia elétrica, afim de manter determinado barramento alimentado em caso de possíveis faltas ou distúrbios no sistema. Essa transferência também pode ser realizada por meio de chaves eletromecânicas.

O tempo de acionamento das chaves eletromecânicas é demasiadamente maior do que o das chaves estáticas, o que torna a comutação dependente de sistemas de sincronismo com maior precisão e robustez. Além disso, o número de comutações que uma chave eletromecânica pode realizar é significativamente menor, devido ao desgaste de seus contatos ao realizar o acionamento (KADAH, 1997).

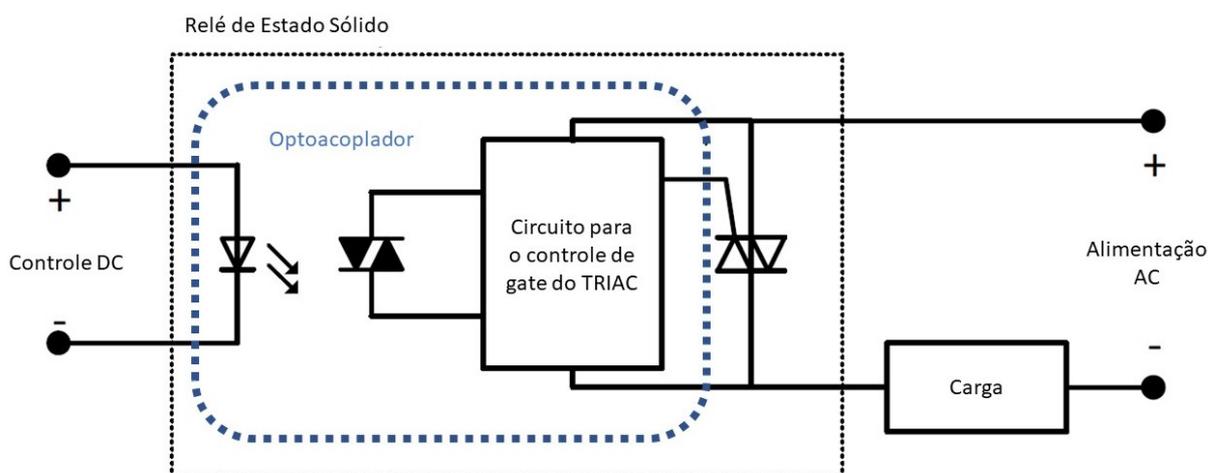
As chaves estáticas também possuem desvantagens em relação as chaves eletromecânicas. Por se tratarem de elementos semicondutores, as chaves de estado sólido possuem comportamentos diferentes para cargas com características indutivas ou capacitivas e dissipam quantidades maiores de energia, que dependem da queda de tensão no elemento semiconductor e da corrente consumida pela carga a ser alimentada (KADAH, 1997).

Além de poder serem utilizadas para realizar a comutação entre alimentadores de energia, as chaves estáticas podem implementar circuitos para transferência de fases em cargas monofásicas. Esta tipologia de circuito permite realizar o balanceamento automático das fases em sistemas elétricos, seguindo como base algoritmos de inteligência artificial específicos. Isto pode promover eficiência energética e melhorar a qualidade do serviço, do inglês *Quality of Service*, QoS, em todo um sistema elétrico. Como por exemplo, em instalações elétricas residenciais, prediais e industriais e sistemas de distribuição e transmissão de energia (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014).

### 1.7.1 Princípio de funcionamento de uma chave estática

Uma chave estática, em sua forma mais simples também conhecida como relé de estado sólido, é composta por elementos semicondutores. O fato de serem estáticas quer dizer que não possuem contatos mecânicos em sua estrutura. Transistores, IGBTs, GTOs e outros semicondutores podem compor a estrutura desse dispositivo. Todavia, os métodos de acionamento para os componentes citados são complexos e, além de encarecer o processo de implementação, são pouco eficientes (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014). Por outro lado, TRIACs e SCRs são constantemente utilizados para implementação de chaves estáticas e relés de estado sólido, por possuírem maior eficiência ao acionar cargas elétricas do que os demais e possuir métodos de acionamento mais baratos e simplificados. A figura 25 apresenta um modelo de uma chave estática convencional, utilizando um TRIAC como semicondutor para acionamento e um circuito optoacoplador para garantir um acionamento isolado através de um sinal de controle DC, permitindo que a alimentação AC possa então energizar a carga.

Figura 25 – Esquema de uma chave estática convencional.



Fonte: Adaptado (LEGER et al., 2017)

No contexto das transferências de cargas entre fases, existem problemas a serem estudados e mitigados na implementação destes sistemas. Em um ambiente automatizado, por exemplo,

uma falha nas redes de comunicações podem impossibilitar a chave de ser acionada. Além disso, caso o elemento semiconductor venha a ser danificado, entrando em curto-circuito ou estando em aberto, o dispositivo perde seu propósito e todo um sistema pode estar comprometido (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014).

### 1.7.2 Análise vetorial para transferência de cargas monofásicas entre duas fases

Para descrever matematicamente o comportamento de cargas monofásicas, ao serem transferidas de uma fase para outra, é necessário considerar o sistema elétrico existente. Considerando o padrão de distribuição de energia elétrica em baixa tensão na cidade de Manaus, assume-se que a tipologia do sistema será do tipo estrela com quatro fios, três fases e um neutro. Quando conectada a uma das três fases disponíveis, assume-se que a carga consumirá um valor eficaz de corrente,  $I$ , com um fator de potência,  $\cos(\phi)$ , tipicamente atrasado. Ou seja, uma carga com características indutivas (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014).

Quando a carga estiver conectada a fase A, assume-se que a corrente nesta fase será representada pela equação 13:

$$i_A = I \angle -\phi \quad (13)$$

Considerando que as três fases estejam balanceadas, as componentes de sequência da corrente serão descritas conforme apresentado em 14:

$$I_+ = I_- = I_0 = \frac{I}{3} \angle -\phi \quad (14)$$

Quando conectada a fase B, a corrente referente a esta fase será representada por 15 e suas componentes simétricas por 16, respectivamente.

$$i_B = I \angle -\phi - 120^\circ \quad (15)$$

$$I_+ = \frac{I}{3} \angle -\phi \quad I_- = \frac{I}{3} \angle 120^\circ - \phi \quad I_0 = \frac{I}{3} \angle -120^\circ - \phi \quad (16)$$

Similarmente, o mesmo é feito para a fase C, sendo apresentados em 17 e 18, respectivamente.

$$i_C = I \angle -\phi + 120^\circ \quad (17)$$

$$I_+ = \frac{I}{3} \angle -\phi \quad I_- = \frac{I}{3} \angle -120^\circ - \phi \quad I_0 = \frac{I}{3} \angle 120^\circ - \phi \quad (18)$$

Para efeitos do referente estudo, considera-se que houve a transferência de uma carga da fase A para uma fase B. Neste caso, as componentes de sequência são apresentadas em 19:

$$\begin{aligned}
 I_{+}^{A \rightarrow B} &= -\frac{I}{3} \angle -\phi + \frac{I}{3} \angle -\phi = 0 \\
 I_{-}^{A \rightarrow B} &= -\frac{I}{3} \angle -\phi + \frac{I}{3} \angle 120 - \phi = \frac{I}{\sqrt{3}} \angle 150^{\circ} - \phi \\
 I_{0}^{A \rightarrow B} &= -\frac{I}{3} \angle -\phi + \frac{I}{3} \angle -120 - \phi = \frac{I}{\sqrt{3}} \angle -150^{\circ} - \phi
 \end{aligned} \tag{19}$$

De forma análoga, as representações matemáticas formuladas nas equações 20 e 21 apresentam as equações que descrevem o mesmo fenômeno ao transferir a carga de B para C e de C para A.

$$\begin{aligned}
 I_{+}^{B \rightarrow C} &= 0 \\
 I_{-}^{B \rightarrow C} &= \frac{I}{\sqrt{3}} \angle -90^{\circ} - \phi \\
 I_{0}^{B \rightarrow C} &= \frac{I}{\sqrt{3}} \angle 90^{\circ} - \phi
 \end{aligned} \tag{20}$$

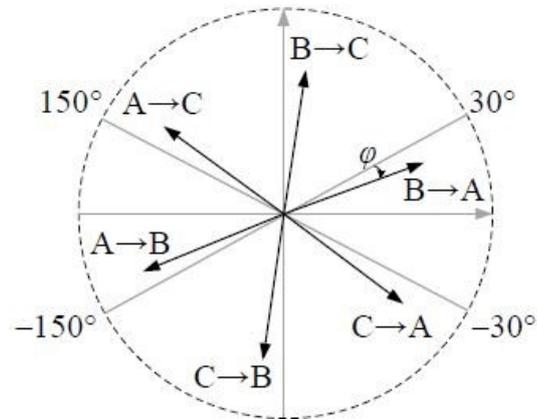
$$\begin{aligned}
 I_{+}^{C \rightarrow A} &= 0 \\
 I_{-}^{C \rightarrow A} &= \frac{I}{\sqrt{3}} \angle 30^{\circ} - \phi \\
 I_{0}^{C \rightarrow A} &= \frac{I}{\sqrt{3}} \angle -30^{\circ} - \phi
 \end{aligned} \tag{21}$$

Conforme apresentado nas equações anteriores, é possível observar que quando uma carga é transferida de uma fase para outra as componentes de sequência positiva se mantêm nulas, enquanto que as componentes de sequência negativa e zero sofrem mudanças. Cargas não lineares, eletrônicas, normalmente possuem dispositivos de proteção contra surtos e podem suportar variações de tensão consideráveis em sua entrada. As figuras 26 e 27 apresentam um diagrama fasorial que descreve a variação das componentes de sequência zero e negativa, respectivamente, ao transferir uma carga entre duas fases

### 1.7.3 Problemas de transição dinâmica das cargas

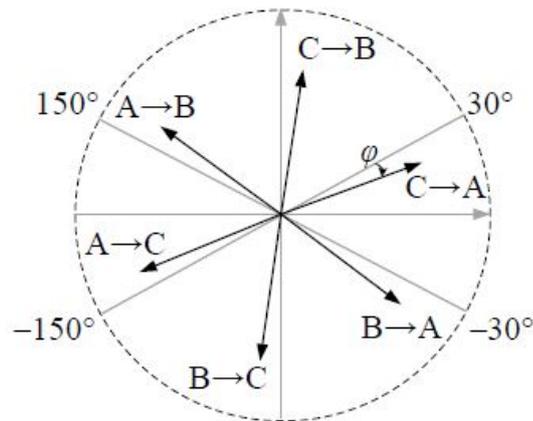
Transferir uma carga monofásica de forma dinâmica entre fases pode resultar em uma variação de tensão na entrada desta carga. Alguns fenômenos podem ocorrer no barramento de tensão ao qual as cargas estão conectadas, podendo prejudicar todo um sistema: os *sags*, também conhecidos como afundamentos de tensão; os *swells*; fenômenos de sobretensão na rede; injeção de harmônicos na rede elétrica; *flickers*, variações rápidas de tensão que provocam distúrbios

Figura 26 – Variação nas componentes de sequência zero no chaveamento entre duas fases.



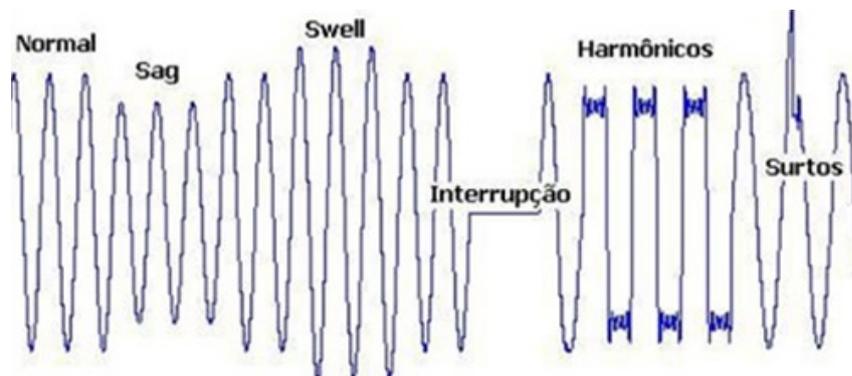
Fonte: (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014)

Figura 27 – Variação nas componentes de sequência negativa no chaveamento entre duas fases.



Fonte: (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014)

Figura 28 – Distúrbios dos parâmetros elétricos de desempenho elétrico.



Fonte: (FRANCO, 2005)

elétricos (principalmente em eletroeletrônicos; transientes; etc (BINGHAM, 1998; WILLIAM; EUGENE, 1968). A figura 28 apresenta alguns destes distúrbios no sistema de energia elétrica.

Contudo, existem estudos que definem regiões aceitáveis para variação de tensão em certas cargas, o que justifica a possibilidade do chaveamento neste trabalho.

#### 1.7.3.1 Curvas de aceitabilidade de energia: Tolerância de Tensão

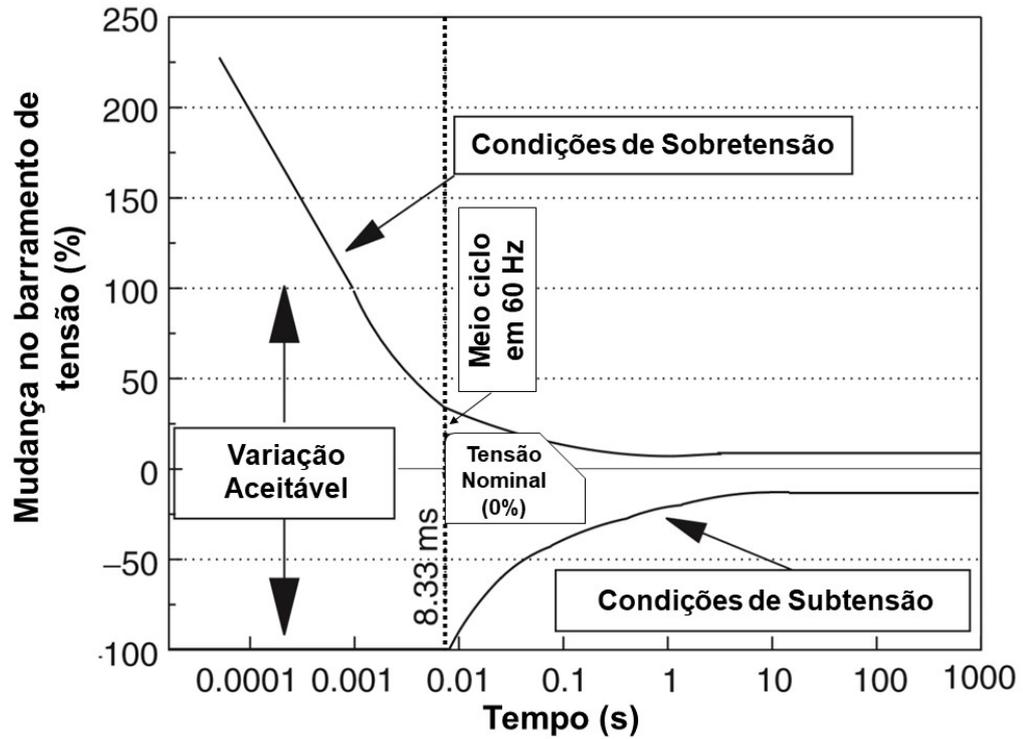
Essas curvas indicam as variações de tensão aceitáveis em momentos de *sags* e *swells* no barramento de tensão ao qual a carga está conectada. A Comissão Internacional de Eletrotécnica, também conhecida como *International Electrotechnical Commission* (IEC), atribui a estas o termo de curva de imunidade do equipamento, do inglês *equipment immunity curve* (HEYDT; AYYANAR; THALLAM, 2001). A figura 29 apresenta a curva de aceitabilidade de alimentação fornecida pela *Computer Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA). De acordo com essa curva, existem duas situações principais a serem exploradas: eventos de sobretensão e subtensão. Muitos estudos em cargas eletrônicas foram realizados com esta curva para testar a variação de tensão suportada pelos equipamentos (SEAN; VIC, 2010).

A tensão nominal do barramento é indicada na figura sem variações, sobreposta a marca de 0 %. As mudanças no barramento, apresentadas em porcentagem, indicam a variação percentual da tensão no barramento em relação a tensão nominal. O tempo indicado no eixo das abscissas apresenta o tempo de duração do evento. Percebe-se que quanto maior ou menor a variação de tensão no sistema, menor duração este evento deve possuir para garantir a qualidade dos parâmetros de desempenho elétrico no barramento de tensão. O CBEMA foi substituído, posteriormente, pelo Conselho da Indústria de Tecnologia da Informação, do inglês *Technology Industry Council* (ITIC). A curva de aceitabilidade de energia do CBEMA fora então substituída pela curva de aceitabilidade do ITIC. Contudo, este gráfico passou a ter menos visibilidade para o uso das indústrias (HEYDT; AYYANAR; THALLAM, 2001). A figura 30 apresenta a curva de aceitabilidade de alimentação fornecida pelo ITIC.

#### 1.7.3.2 Efeitos do chaveamento entre fases sobre as cargas monofásicas

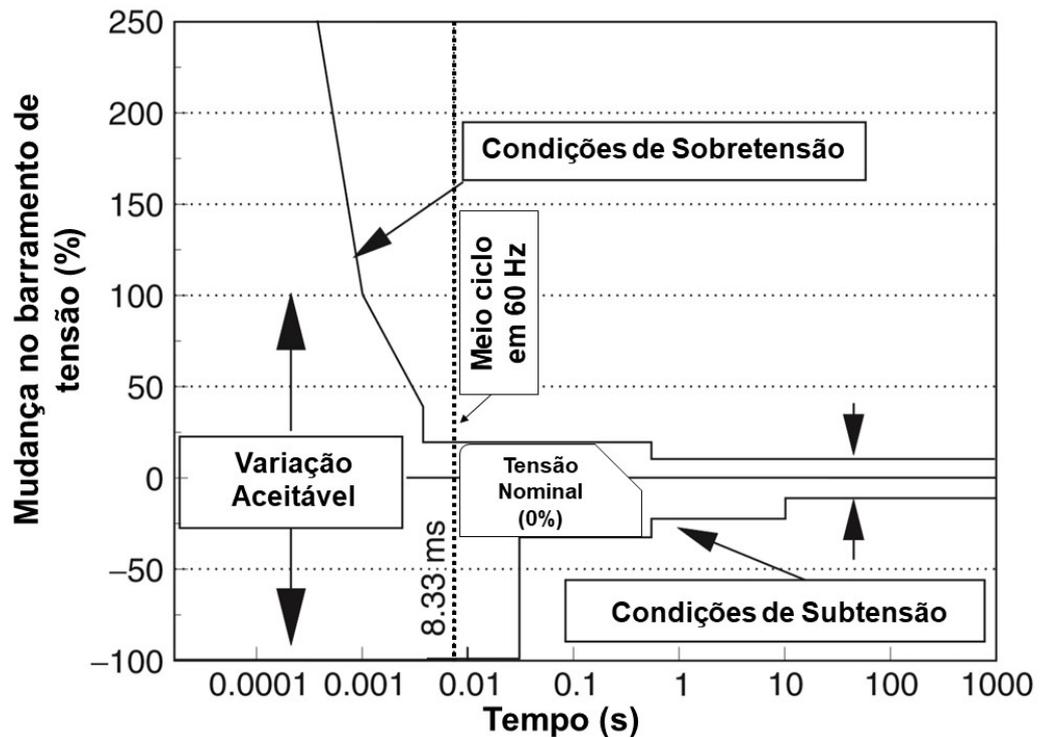
O chaveamento de uma carga entre fases pode ser realizado por meio de uma chave estática de transferência, também conhecida do inglês *Static Transfer Switch* (STS). Esta chave é constituída, na maior parte das aplicações, por TRIACs. Assim sendo, a chave de transferência estática é constituída por três TRIAC, onde cada um possui um de seus terminais conectado a uma das fases (quando aplicada a um sistema trifásico). O outro terminal de cada um é conectado a entrada de alimentação de uma carga monofásica, o que permitirá que qualquer uma das três fases seja remanejada para carga. A figura 31 apresenta um modelo de uma chave de transferência estática aplicada a uma carga monofásica.

Figura 29 – Curva de aceitabilidade de energia fornecida pela organização CEBEMA.



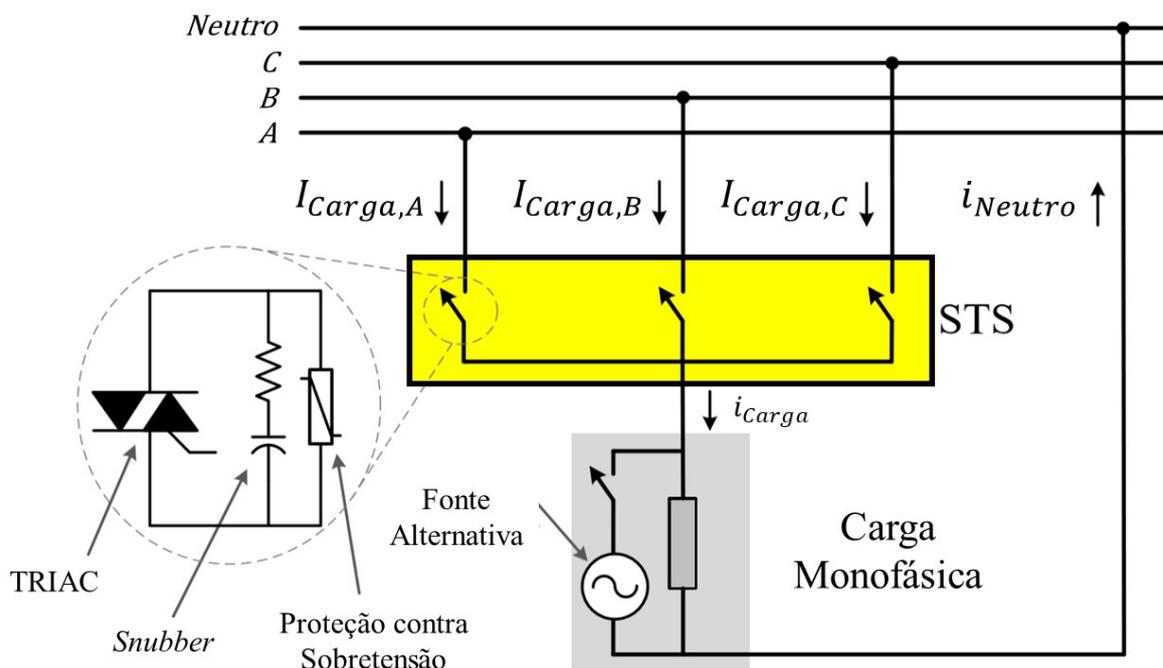
Fonte: Adaptado (HEYDT; AYYANAR; THALLAM, 2001)

Figura 30 – Curva de aceitabilidade de energia fornecida pela organização ITIC.



Fonte: Adaptado (HEYDT; AYYANAR; THALLAM, 2001)

Figura 31 – Modelo de chave de transferência estática aplicado a uma carga monofásica.



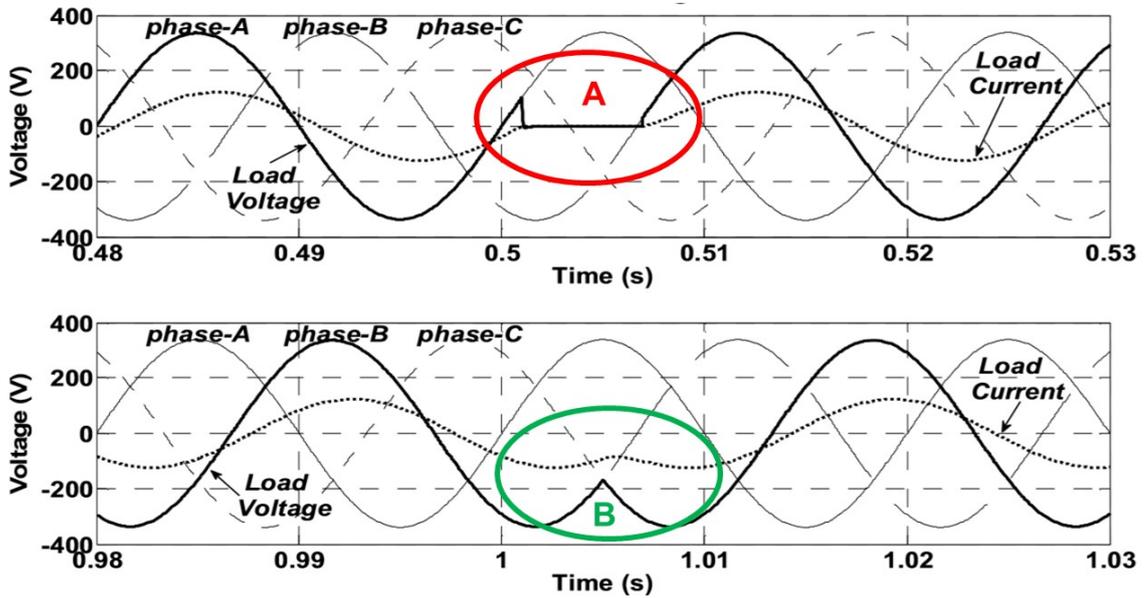
Fonte: Adaptado (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014)

Nesta tipologia, apenas um dos semicondutores deve ser acionado por vez. Caso dois destes momentaneamente venham a ser acionados ao mesmo tempo, um curto circuito no barramento de alimentação seria provocado. A robustez do sistema garante a preservação da carga e a funcionalidade do dispositivo em um maior período de tempo.

Na figura 32 é possível observar a tensão e a corrente instantânea em uma carga indutiva. Dois momentos de transição chamam atenção na ilustração: o momento A e o momento B. Eles situam o exato momento onde é a transição de uma carga sendo transferida de uma fase para outra, apresentando o comportamento dos parâmetros elétricos neste período de tempo.

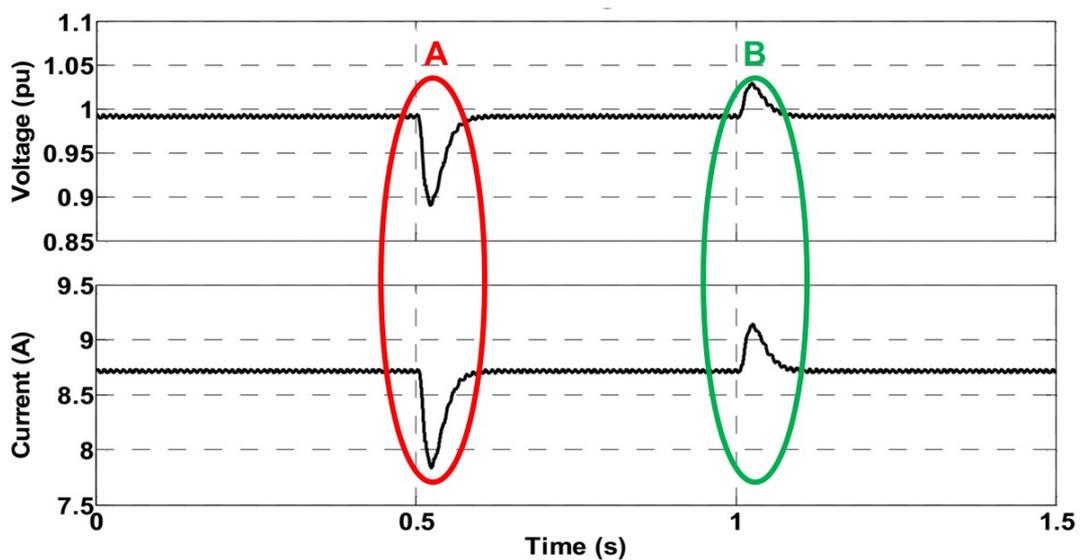
Na figura 33, é possível analisar tensão e corrente eficazes nos momentos de chaveamento. Observa-se um comportamento linear da tensão e da corrente nos momentos de chaveamento. Caso os valores de variação da tensão eficaz na carga estejam condizentes com as curvas apresentadas nas figuras 29 e 30 nas durações especificadas, a transição de fases para alimentação da carga não deve ser um problema pois não será prejudicial ao funcionamento da mesma.

Figura 32 – Parâmetros elétricos instantâneos na carga nos momentos de transição das fases.



Fonte: Adaptado (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014)

Figura 33 – Parâmetros elétricos eficazes na carga nos momentos de transição das fases.

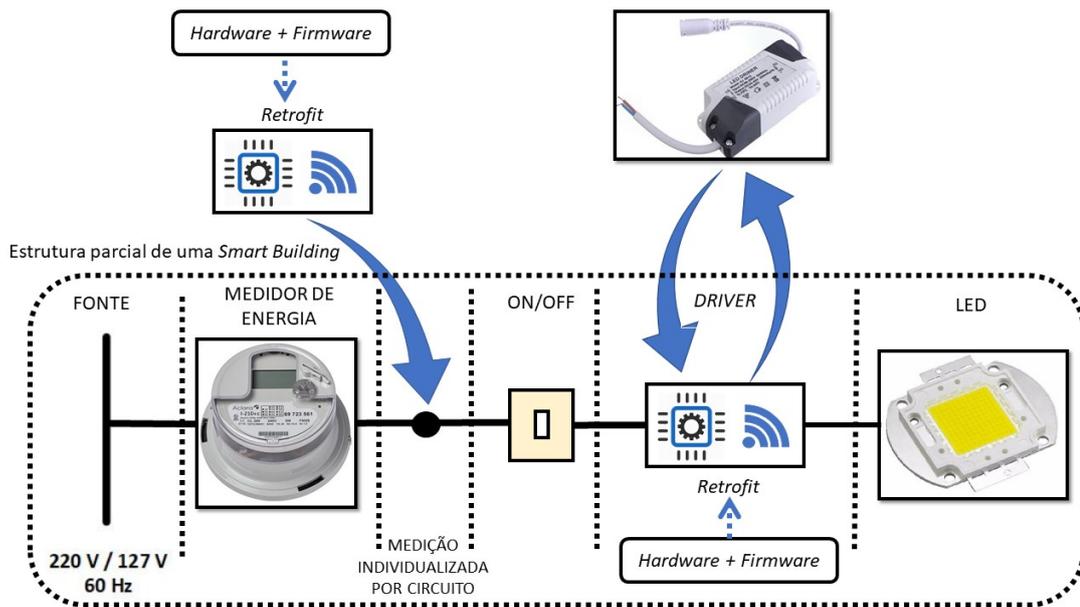


Fonte: Adaptado (SHAHNIA; WOLFS; GHOSH, 2014)

## 2 ARQUITETURA DO SISTEMA

Para realizar a convergência *smart building*, será implementada a camada de *middleware* do *framework* SmartLVGrid com o propósito de inserir plataformas de *retrofit* para automação e controle no sistema legado de iluminação em um ambiente predial. A figura 34 apresenta um modelo prévio do método de implementação das plataformas de *retrofit* para este projeto, que representa a estrutura parcial de uma *Smart Building*.

Figura 34 – Modelo de implementação dos dispositivos de *retrofit* na instalação predial.



Fonte: Autoria própria

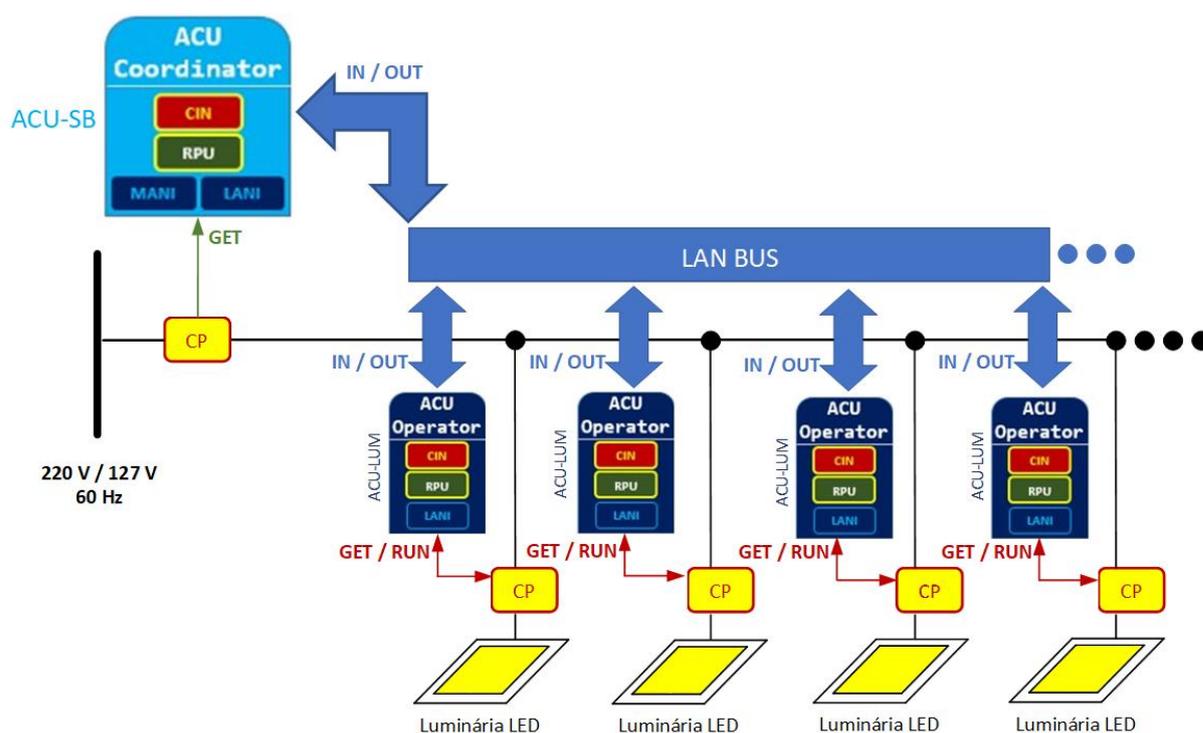
O *retrofit* será realizado por meio da substituição dos *drivers* das luminárias LEDs por *drivers* inteligentes baseados em retificadores Buck, compostos por unidades embarcadas com recursos de controle, comunicação e sistemas eletrônicos que possam garantir maior eficiência, fator de potência, vida útil e proteção eletrônica para as luminárias, justificando a troca do antigo dispositivo de controle. Este dispositivo, correspondente a um *operator* do *framework*, prevê a execução das funções de *retrofitting* de domínio, descritas pela camada de *middleware* da plataforma, porém adaptadas para convergência *smart building* de sistemas de iluminação. Serão executadas as seguintes DRFs dentro da metodologia deste:

1. medição da energia elétrica consumida pela luminária;
2. detecção de funcionamento do arranjo de LEDs presente na luminária;
3. função ON / OFF;
4. transferência de conexão entre fases;
5. controle do fluxo luminoso.

Além disso, o sistema contará com CSFs que forneçam suporte nos processos implementados e, também, com recursos de comunicação em rede de área local. Com isso, as ISFs podem ser executadas em conjunto com a camada de interoperabilidade em trabalhos futuros. O *firmware* utilizado possibilitará processamento distribuído, o que indica que cada luminária poderá atuar de forma local e independente. Esta unidade *operator* terá o nome de ACU-LUM.

Nesse sistema possui uma unidade *coordinator* para o gerenciamento dos dispositivos de controle desenvolvidos, como prevê a plataforma. Para isso, é implementada uma unidade de monitoramento de energia para as fases da fonte de energia onde as luminárias estarão conectadas. Ela será capaz de identificar todas as unidades presentes, gerenciando o sistema de iluminação e seus aspectos energéticos, a fim de possibilitar um sistema mais eficiente. Esse dispositivo, correspondente ao *coordinator* da plataforma, receberá o nome ACU-SB. A abreviação SB correlaciona-se a *Smart Building*. A figura 35 apresenta um diagrama que prevê o modelo de implementação a ser desenvolvido e aplicado para *Smart Buildings*.

Figura 35 – Rede de ACUs interconectadas em um sistema de iluminação *smart building*.



Fonte: Autoria própria

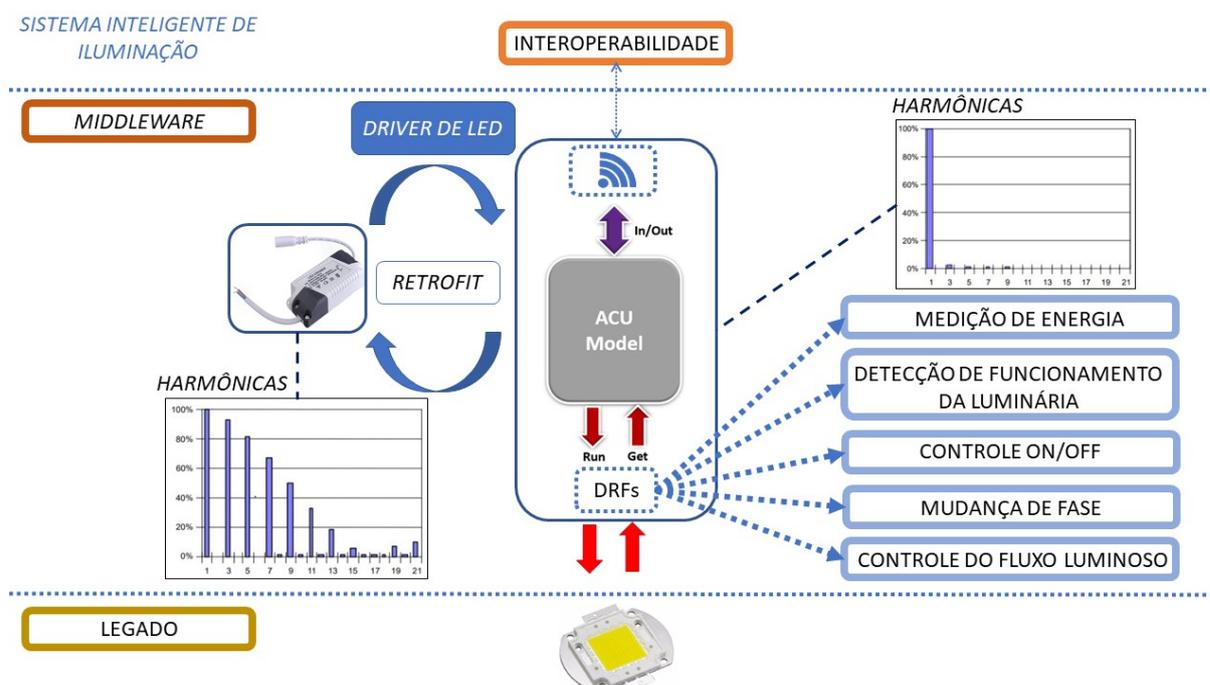
## 2.1 ARQUITETURA DO ACU-LUM

O ACU-LUM é o elemento principal de controle e monitoramento das luminárias LED. As primitivas operacionais atribuídas a este ACU contribuem para tornar o sistema de iluminação predial mais robusto, eficiente e inteligente. A figura 36 apresenta o modelo de arquitetura com as principais funcionalidades deste dispositivo.

De acordo com a figura 36, a estrutura legada pré existente é constituída por um arranjo de LEDs, que neste projeto será representado por uma luminária LED. Este elemento necessita de um dispositivo capaz de regular sua corrente, objetivando o controle do fluxo luminoso. Na camada de *middleware*, é possível observar que o dispositivo irá atuar executando as DRFs já mencionadas, o que representa as portas "GET" e "RUN" preconizadas no *framework*. Além disso, ele substituirá o *driver* de LED já existente. Vale ressaltar que o *driver* já existente não conta com elementos de comunicação e controle e apresenta altos índices de harmônicos, o que impede a interoperabilidade da luminária com outros elementos e reduz a eficiência do sistema.

Em contrapartida, o dispositivo possuirá baixos índices de harmônicos e será dotado de elementos de comunicação que venham a integrar a camada de *middleware* com a camada de interoperabilidade da plataforma SmartLVGrid. Na figura 36 essa intercomunicação é representada pela porta "IN/OUT" do ACU-LUM.

Figura 36 – Arquitetura de funcionalidades do ACU-LUM.

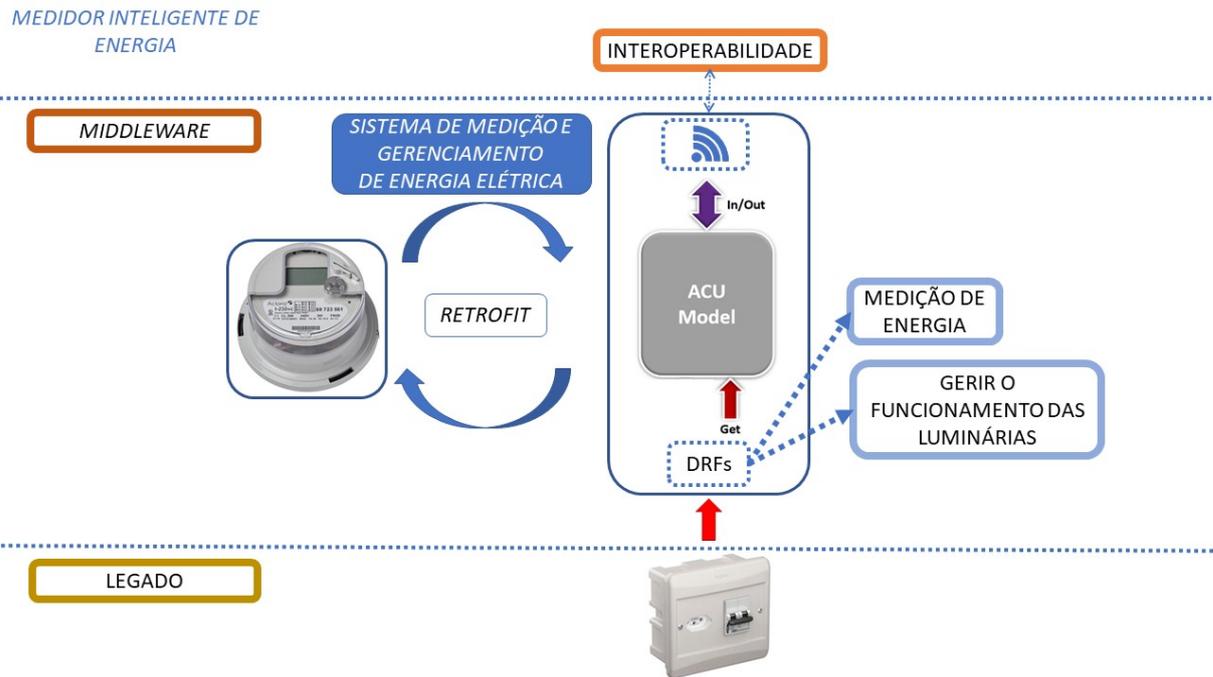


Fonte: Autoria própria

## 2.2 ARQUITETURA DO ACU-SB

O ACU-SB atuará no sistema como um concentrador dos dados monitorados a partir de cada ACU-LUM utilizado. Será possível coletar os dados dos parâmetros elétricos do circuito de iluminação, o que representa a porta "GET" deste ACU, bem como se comunicar em rede através da porta "IN/OUT". A figura 37 apresenta o modelo de arquitetura do ACU-SB com suas principais funcionalidades.

Figura 37 – Arquitetura de funcionalidades do ACU-SB.



Fonte: Autoria própria

A estrutura legada, desta vez, está associada aos circuitos de alimentação das luminárias que permitem apenas o acionamento de cada circuito através da comutação de um disjuntor termomagnético em um quadro elétrico predial. Ele também dispõe de recursos para comunicação, permitindo que haja conexão com outros dispositivos que compartilham do mesmo *framework*.

O processador que compõe o ACU-SB deve prover maior capacidade de processamento do que os outros dispositivos, pois ele será responsável por redirecionar comandos aos *operators* do sistema e receber informações e requisições de todas as camadas superiores.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo, serão mencionadas as informações de *hardware* e *firmware* necessárias para implementação do ACU-LUM e para o ACU-SB. Os arquivos de *software* embarcado estarão disponíveis para consulta em um repositório *online* (FERNANDES, 2019).

#### 3.1 MÉTODO PARA UTILIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS EM REDE DE COMUNICAÇÃO DE DADOS

Para que possam ser gerados resultados significativos em relação a convergência *smart building*, é necessário utilizar os ACUs em uma rede de comunicação *wireless*. Além disso, uma rede de ACUs interconectados é exigência da plataforma SmartLVGrid. Contudo, este *framework* não prevê protocolos específicos a serem utilizados, pois a plataforma pode ser adaptada para o protocolo que for mais viável ao usuário. Optou-se, então, por utilizar o protocolo de comunicação MQTT com transmissão de dados via Wi-Fi, o padrão IEEE 802.11, em 2,4 GHz de frequência (CROW et al., 1997).

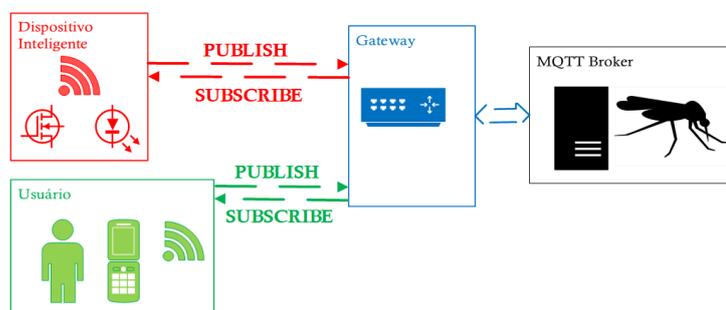
O protocolo MQTT, *Message Queue Telemetry Transport*, é um protocolo de comunicação caracterizado por sua leveza e pela maneira simples de distribuir a informação em rede. Este protocolo utiliza as camadas TCP/IP e possui o cabeçalho do pacote de dados com o tamanho mínimo de 2 *bytes*. Isso implica em um consumo menor de energia pelo dispositivo. Este protocolo conta com um servidor, conhecido como *broker*, onde os clientes podem publicar e acessar determinados tópicos (SINGH et al., 2015). Para implementação deste trabalho, foi adotado o *broker* MQTT conhecido como Mosquitto.

O Mosquitto é uma plataforma *open source* que funciona como um *broker* de mensagens para implementação do protocolo MQTT nas versões 3.1 ou 3.1.1. Por meio desta plataforma é possível cadastrar clientes MQTT, utilizando-se a linguagem C, podendo estes serem publicadores (*Publishers*) ou assinantes (*Subscribers*). O Mosquitto suporta múltiplas portas para o protocolo MQTT, sendo a mais comum a porta 1883, que será utilizada para acessar o *broker* deste projeto (SINHA et al., 2017). O Mosquitto será implementado de forma local em um *notebook*, ou seja, os dados não necessitarão trafegar através da internet.

Para que os dispositivos se conectem ao *broker*, um roteador Wi-Fi será utilizado como *gateway* da aplicação. Desta forma todos os dispositivos estarão conectados a um único concentrador e poderão se comunicar em rede local através de seus endereços de IP. Com isso, o *firmware* respectivo ao ACU-LUM e ao ACU-SB deverá possibilitar conexão com o *broker* através do endereço de IP da máquina onde este servidor estará funcionando e, também, da porta 1883. Para esclarecer este método utilizado, a figura 38 ilustra o modelo de comunicação utilizando o protocolo MQTT, enfatizando o tráfego de dados entre o usuário, o dispositivo com recursos de comunicação e o *broker*. Vale ressaltar que os tipos e os formatos de dados a serem enviados pelos ACUs são estabelecidos pela camada de interoperabilidade do *framework*

SmartLVGrid.

Figura 38 – Processo de comunicação de dados através do protocolo MQTT.



Fonte: Autoria própria

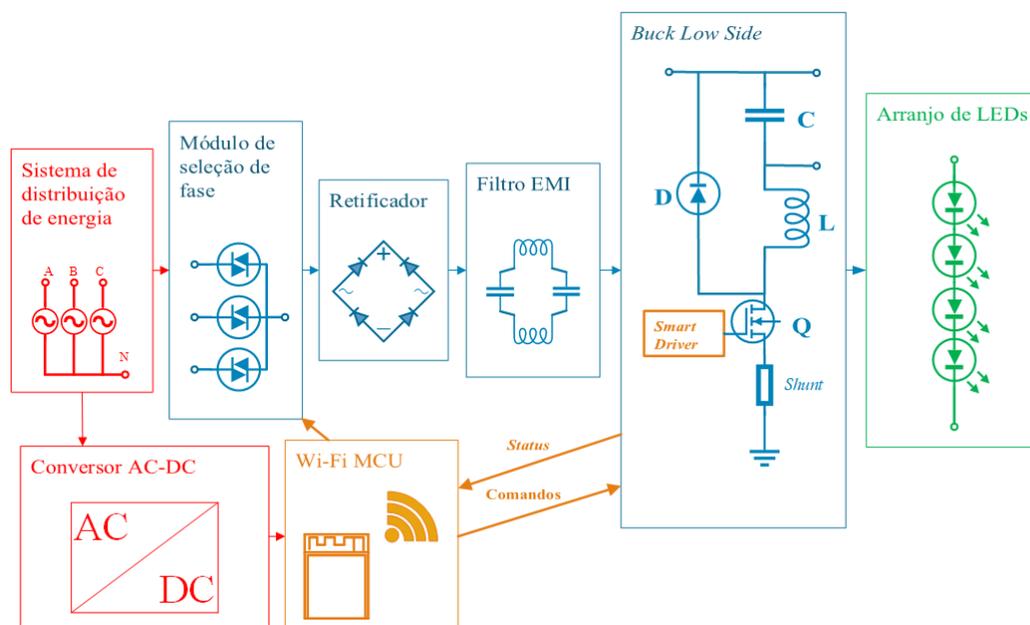
### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO ACU-LUM

O processo de implementação deste dispositivo no projeto ocorre através da junção de um SoC, contendo um microcontrolador e periféricos de comunicação, com um conversor DC-DC Buck PFC. Como já mencionado antes, este conversor foi escolhido pelo baixo custo, facilidade de implementação e por possuir funcionalidades que possibilitem a melhoria do fator de potência da carga quando conectada a rede de distribuição de energia elétrica. Contudo, por mais eficiente que um conversor possa vir a ser, o uso de conversores eletrônicos de energia aplicados ao contexto de *smart buildings* requerem elementos que possibilitem a interoperabilidade desse dispositivo com o sistema. A figura 39 apresenta um diagrama em blocos que representa a arquitetura de *hardware* do *driver* de LED implementado, baseado nesta tipologia de conversor.

O modelo previsto na figura 39 apresenta as seguintes características:

- A alimentação do dispositivo é proveniente do sistema de distribuição de energia elétrica baixa tensão, distribuição secundária. Em Manaus, a distribuição secundária é fornecida a quatro fios, três fases e um neutro (220V/127 V), em 60 Hz de frequência;
- Devido às características descontínuas da corrente de entrada em conversores Buck, os filtros de EMI são necessários no dispositivo para atenuar elementos harmônicos de alta frequência;
- O controle de iluminação é realizado através de comandos repassados ao circuito de controle do conversor Buck por meio de um microcontrolador com Wi-Fi embutido. Este componente também capta informações de funcionamento do conversor, através de um resistor *shunt*, e as disponibiliza em rede de comunicação sem fio. Assim sendo, será possível executar as DRFs associadas ao controle de fluxo luminoso, detecção de funcionamento da luminária e medição do consumo de energia;

Figura 39 – Visão geral da arquitetura do *driver* de LED.



Fonte: Autoria própria

- O microcontrolador recebe sua alimentação de um conversor AC-DC, que por sua vez, é alimentado pelo sistema elétrico e é independente do conversor. O dispositivo será alimentado por três fases. Para evitar que um possível distúrbio em uma das fases venha a causar impactos na alimentação do microcontrolador, será realizada uma retificação trifásica de ponto médio para alimentar o conversor AC-DC, otimizando o sistema;
- O dispositivo conta com um módulo de seleção de uma das fases para entrada do retificador de ponte completa. Para tanto, um comando deve vir do microcontrolador e, através de um isolador óptico, deve-se acionar um dos TRIACs, permitindo o acionamento do circuito ou a comutação entre fases. Dessa forma, é possível executar as respectivas DRFs correspondentes à transferência de fases do ACU-LUM na rede elétrica e também ao controle ON/OFF.

Através deste modelo, o usuário poderá substituir o *driver* ao qual sua luminária LED está submetida pelo ACU-LUM, através da técnica do *retrofit*, agregando novas funcionalidades ao sistema legado.

### 3.2.1 Especificações de *hardware* do ACU-LUM

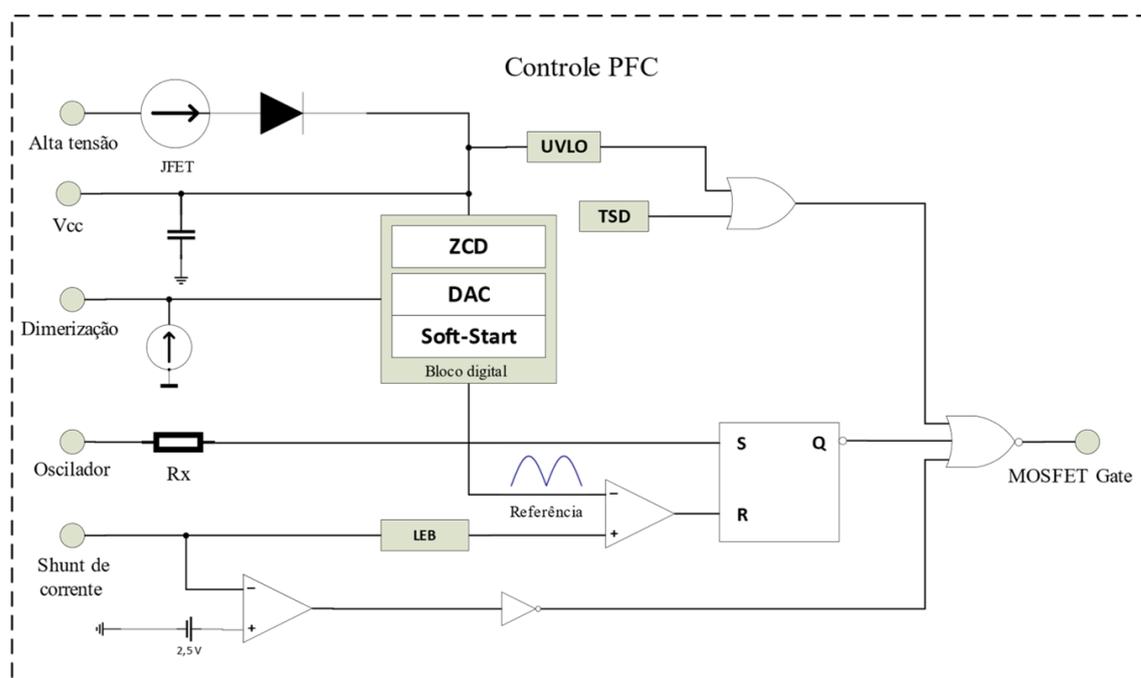
A seguir, serão expostos os métodos utilizados para especificar os componentes utilizados na implementação do ACU-LUM, bem como suas limitações e modos de operação baseados nas DRFs propostas.

### 3.2.1.1 O conversor Buck *Low Side* PFC

O sistema de controle do PFC Buck *Low Side* foi realizado através do CI FL7701, um "*smart driver*" que utiliza um algoritmo de controle digital para alcançar um máximo fator de potência em um conversor Buck, operando em modo de condução contínua. Este componente foi escolhido para maximizar os resultados esperados do dispositivo e para facilitar o processo de implementação do *driver* de LED.

Além disso, este dispositivo conta com funções de proteções contra curto-circuito e saída em circuito aberto, garantindo maior confiabilidade ao *driver* de LED. O diagrama de controle do CI FL7701 foi adaptado e ilustrado na figura 40 (SEMICONDUCTOR, 2013).

Figura 40 – Diagrama de controle do CI FL7701.



Fonte: Adaptado (SEMICONDUCTOR, 2013)

Para detalhar melhor a figura 40, é possível observar uma chave semicondutora JFET utilizada como fonte de corrente para um capacitor que assegura a alimentação do dispositivo de controle. Além disso, um conversor digital analógico gera um sinal de referência, sincronizado com a tensão de entrada, baseado em um circuito de detecção de passagem por zero (*Zero Crossing Detection*). O sinal de referência então é comparado com a tensão do resistor shunt e o estado da saída do comparador é armazenado em um latch SR. Conforme a resistência inserida no pino "oscilador", que permite controlar a frequência de chaveamento, o estado de saída do flip-flop é alterado para controlar o MOSFET. O dispositivo ainda conta com proteções de temperatura por meio do termostato eletrônico (TSD) e proteção contra bloqueio de subtensão de entrada: *Undervoltage-Lockout* (UVLO) (SEMICONDUCTOR, 2014).

O CI FL7701 conta também com a função *soft-starter* para reduzir a corrente *inrush* ao iniciar o sistema e não necessita de altas capacitâncias na saída do conversor, que podem levar a reduzir a eficiência e tempo de vida útil do dispositivo (SEMICONDUCTOR, 2014). Contudo, valores baixos de capacitância de saída podem ser utilizados como filtro para possíveis ruídos.

Ele possibilita o controle do fluxo luminoso através da variação do sinal analógico de tensão em um de seus terminais. Internamente, essa variação altera a amplitude do sinal de referência e, conseqüentemente, reduz a corrente na *string* de LEDs. Desta forma implementa-se a quinta DRF apresentada no capítulo referente a arquitetura do sistema.

O dimensionamento do indutor de saída do conversor Buck "L" e do capacitor de saída "C", do filtro de EMI, da frequência de chaveamento e do resistor *shunt* encontram-se disponível nas notas de aplicação do fabricante do CI FL7701 (SEMICONDUCTOR, 2014). Para implementação deste sistema, foi adotada uma frequência de chaveamento de 75 kHz, um *ripple* máximo de corrente de 51,5 mA e uma corrente de pico de 430 mA. Os componentes selecionados para implementação do conversor Buck *Low Side* são apresentados na tabela 2 (FAIRCHILD, 2000; VISHAY, 2018; FAIRCHILD, 2003).

Tabela 2 – Componentes utilizados para implementação do Buck *Low Side* PFC.

<b>Componentes</b>	<b>Referências</b>
Indutor (L)	6,5 mH
Capacitor (C)	10 nF
Resistor <i>Shunt</i>	1,2 $\Omega$
MOSFET (Q)	FQP12N60
Diodo de roda livre (D)	UF4007
Diodos retificadores	1N4007

Fonte: Autoria própria

### 3.2.1.2 *String* de LEDs

Para atender os requisitos básicos de funcionamento de uma luminária de 6 W, o ACULUM foi elaborado baseando-se na tensão de operação e na corrente média da *string* de LEDs que compõem a luminária. A luminária utilizada foi o modelo quadrado de embutir da marca Elgin, com demanda nominal de 6 W. Internamente, a luminária é constituída de LEDs de alto brilho em série. A tensão média de saída do conversor é de 20 V, com uma corrente eficaz de 300 mA.

Foi medido um fator de potência de aproximadamente 0,5 na entrada do *driver* original da

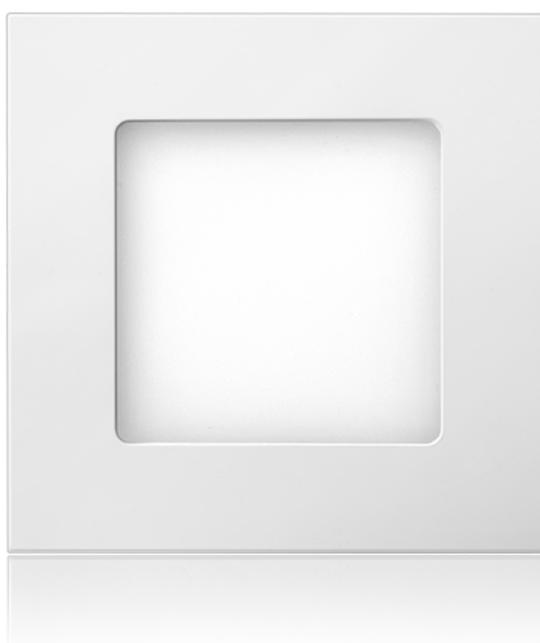
luminária, com uma eficiência de aproximadamente 85% e distorção harmônica total de 121,4%. Esses indicadores representam um dispositivo com eficiência razoável, porém com baixos indicadores de qualidade de energia elétrica. A tabela 3 apresenta alguns dos dados técnicos obtidos pelo fabricante da luminária e a figura 41 ilustra o modelo da luminária utilizada.

Tabela 3 – Dados técnicos da luminária utilizada.

<b>Parâmetros</b>	<b>Referências</b>
Tensão de entrada	100~240 V
Dimensões	12 x 12 x 2 cm
Frequência	50 / 60 Hz
Corrente (127/220V)	94 mA / 55 mA
Temperatura de operação	-20 °C~40 °C
Temperatura de operação	6500 K
IRC	>70
Fluxo luminoso	320 lm

Fonte: Adaptado (ELGIN, 2019)

Figura 41 – Luminária Elgin quadrada de embutir.



Fonte: Adaptado (ELGIN, 2019)

### 3.2.1.3 SoC com MCU e Wi-Fi integrados

Como já mencionado, a implementação deste dispositivo conta com um SoC que contenha em sua arquitetura um microcontrolador e Wi-Fi integrado, para que possa ser possível realizar o controle do conversor por meio de comunicação em rede sem fio, de forma que possa agregar mais funcionalidades em um único elemento. Visto isso, o módulo escolhido foi o ESP32-WROOM-32, que conta com grande integração wireless. Projetado para plataformas móveis com restrição de espaço e potência, ele oferece capacidade de incorporar recursos de Wi-Fi dentro de outros sistemas, ou para funcionar como uma aplicação *standalone*. Isso pode ser realizado com custos mais acessíveis. As funções de suporte computacional (CSFs) e as funções de suporte entre domínios (ISFs) serão operacionalizadas no ACU-LUM através deste SoC, fornecendo suporte as outras camadas da pilha SmartLVGrid.

O ESP32-WROOM-32 já conta com antena integrada, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia, suporta recursos de segurança como WPA/WPA2, WFA e WAPI, e pode suportar variações de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C}$ , o que o torna aplicável para diversos ambientes. Ele conta com GPIOs que são utilizados para o acionamento do módulo de seleção de fases e também com um conversor DAC interno de 8 bits, com variação de 0 a 3,3 V, que é utilizado para variar o nível de tensão responsável por regular o nível de luminosidade através do CI FL7701. A figura 42 ilustra os aspectos físicos do módulo e a tabela 4 apresenta algumas das especificações técnicas do ESP32-WROOM-32 (ESPRESSIF, 2017).

Figura 42 – Módulo ESP32-WROOM-32.



Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Especificações técnicas do ESP32-WROOM.

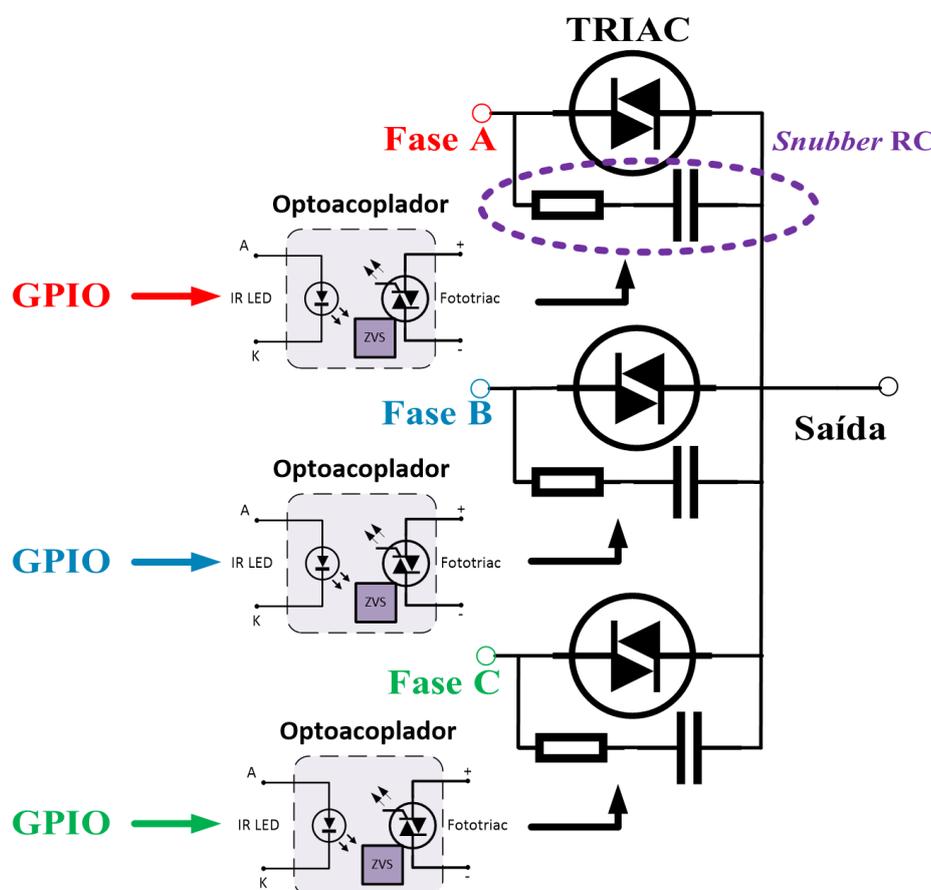
<b>Parâmetros</b>	<b>Referências</b>
CPU	Xtensa Dual-core 32-bit LX6 600 DMIPS
Wi-Fi	802.11 b/g n
Bluetooth	v4.2 BR/EDR e BLE
Frequência	2,4 GHz
Protocolos de Rede	IPv6, IPv4, TCP/UDP,HTTP/FTP, 802.11 b/g/n/e/i, protocolo WLAN MAC
ROM	448 KB
SRAM	520 KB
Nº de GPIOs	34 pinos
Nº de ADC (12 Bits)	18 canais
Nº de DAC (8 Bits)	2 canais
Tensão de operação	3,3 V
Corrente de operação	80 mA

Fonte: Adaptado (ESPRESSIF, 2017)

#### 3.2.1.4 Módulo de seleção de fases

O módulo de seleção de fases se baseia no conceito de chaves de transferências estáticas, apresentado no referencial teórico deste trabalho. A ideia é que o ACU-LUM possibilite ao usuário escolher uma fonte de energia alternativa ou uma das três fases do sistema de distribuição de energia elétrica para alimentar a luminária. Essa comutação também poderá ser realizada através de uma camada de aplicação em um sistema supervisor, através de um algoritmo pré-definido, permitindo que a demanda energética de um conjunto de luminárias encontre-se devidamente balanceado nas três fases disponibilizadas pelo sistema elétrico de distribuição. Isso possibilita um incremento de eficiência energética na instalação predial a qual as luminárias com esta funcionalidade encontram-se disponíveis. Contudo, este trabalho limita-se a apresentar apenas a implementação deste sistema no ACU-LUM dentro do contexto de um sistema trifásico predial. A figura 43 apresenta um esquema prévio da arquitetura do módulo de seleção de fases no sistema, contendo os principais elementos utilizados para implementação deste submódulo no sistema.

Figura 43 – Arquitetura do módulo de seleção de fases.



Fonte: Autoria própria

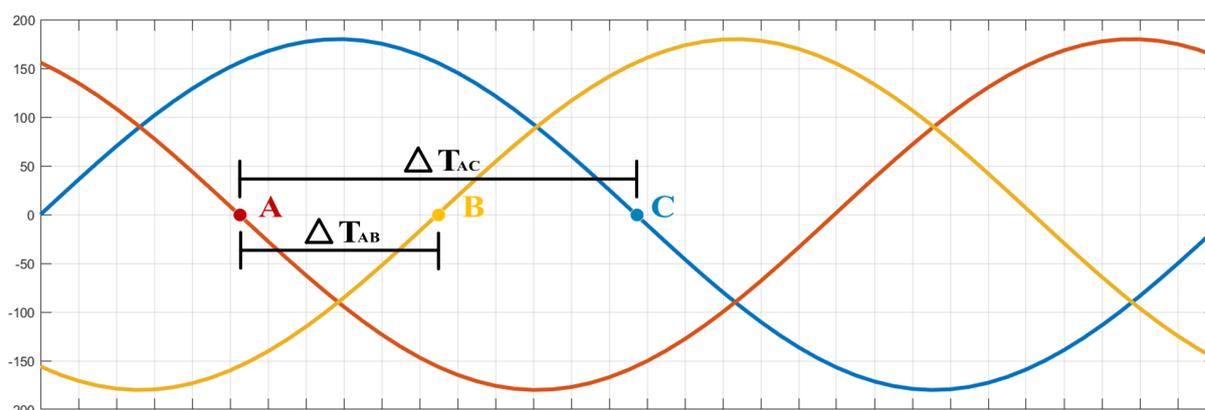
Conforme ilustrado na figura 43, o circuito é composto por três TRIACs onde cada um pode ser acionado por meio de um comando, proveniente de um GPIO do microcontrolador, através de seu respectivo optoacoplador. Ao ser acionado, o TRIAC permitirá a passagem de tensão de uma das fases para a saída, que alimentará o resto do circuito do *driver* de LED. Dois semicondutores nunca poderão ser acionados de forma simultânea, pois isso ocasionaria um curto-circuito. O algoritmo para transferência de fases deve evitar tal evento, para preservar a integridade do circuito.

Os optoacopladores possuem tecnologia de chaveamento no cruzamento do zero da tensão, do inglês *zero voltage switching* (ZVS). Ou seja, independente de onde o pulso seja disparado, através do GPIO, o TRIAC começará a conduzir apenas no cruzamento do zero da tensão (LEGER et al., 2017). Isso reduz a incidência de ruídos, componentes harmônicas e *inrush* de corrente em cargas com caráter resistivo e cargas levemente indutivas no momento do chaveamento. Isso se torna importante para a realização de comutação entre fases de forma rápida e segura (FAIRCHILD, 2002). Considerando que o *driver* de LED projetado apresentará um bom fator de potência, essa solução se mostra a melhor para executar esta DRF. Os TRIACS contam com *snubbers* RC, que impedem a variação abrupta de tensão nos terminais desses

semicondutores (ST, 2007). Caso muitas transições venham a ocorrer em um curto período de tempo, esse método aumenta a vida útil do módulo de seleção de fases.

O algoritmo para transferência de fases se baseia nas funcionalidades oferecidas pelo *hardware* implementado. Considerando que a carga possui características quase que resistivas, pela implementação Buck PFC, a corrente acompanhará a tensão e estas seguirão em fase. Após a comutação do GPIO para um nível lógico baixo, o TRIAC cessará sua condução no momento em que a corrente do circuito cruzar a referência zero. As outras fases seguirão com uma defasagem de  $120^\circ$  em relação a outra utilizada anteriormente. A figura 44 ilustra este cenário.

Figura 44 – Sinais senoidais com defasagem  $120^\circ$  entre si.



Fonte: Autoria própria

A variação  $\Delta T_{AB}$  corresponde a um período de aproximadamente 2,78 ms, enquanto que a variação  $\Delta T_{AC}$  é de 5,56 ms. Como o chaveamento ocorrerá apenas no zero da tensão, o acionamento da chave correspondente a outra fase poderá ser realizado antes destas variações de tempo, dependendo de qual fase será escolhida para alimentar o sistema. Contudo, estudos empíricos apontam que alternar uma carga entre fases dentro de um único ciclo garante seu funcionamento contínuo. Por esta razão, escolheu-se adotar um período de 9 ms para realizar a comutação, pouco mais que meio ciclo em 60 Hz. A tabela 5 apresenta os componentes utilizados para implementação desse módulo (STMICROELECTRONICS, 2007; FAIRCHILD, 2005).

Tabela 5 – Componentes utilizados para implementação do módulo de seleção de fases.

Componentes	Referências
TRIAC	BTA24
Optoacoplador	MOC3063
Resistor do circuito <i>snubber</i>	22 $\Omega$
Capacitor do circuito <i>snubber</i>	1 nF

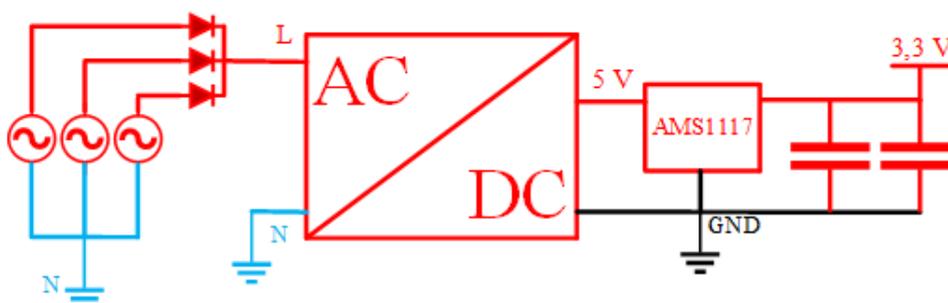
Fonte: Autoria Própria

### 3.2.1.5 Conversor AC-DC

O SoC ESP32-WROOM opera como a unidade central de processamento de um *operator* dentro da arquitetura utilizada. E para garantir a confiabilidade entre a comunicação e o ACU-LUM e o ACU-SB no envio e recebimento de dados, foi inserido um pequeno conversor isolado AC-DC de alta eficiência e baixa potência para fornecer alimentação de forma contínua ao SoC. Este conversor de 3,5 W entrega 5 V de saída e cerca de até 700 mA de corrente elétrica. Ele pode operar entre tensões eficazes de 100 V à 240 V em sua entrada.

Para alimentar o ESP32-WROOM, foi utilizado um regulador de tensão para 3,3 V, o AMS1117, com o uso dos capacitores necessários para manter a tensão de saída estável ao SoC, evitando possíveis reinicializações por *brownout*. Além disso, para impedir o desligamento da fonte nos processos de comutações entre fases, foi utilizado um circuito retificador trifásico com ponto médio para alimentação deste conversor, garantido que no caso da falha de uma das fases, o sistema mantenha sua capacidade de processamento em pleno funcionamento. A figura 45 apresenta o modelo do sistema de conversão AC-DC utilizado para alimentação do ESP32-WROOM-32 e a figura 46 ilustra o modelo de conversor utilizado.

Figura 45 – Sistema de conversão AC-DC utilizado.



Fonte: Autoria própria

Figura 46 – Conversor AC-DC de 3,5 W.



Fonte: Autoria própria

### 3.2.2 Especificações de *firmware* do ACU-LUM

Toda aplicação desenvolvida é baseada no conceito de programação estruturada, pois permite uma construção mais simples, clara do *software* e mais leve ao sistema embarcado (PEREIRA, 2007). O ACU-LUM recebe diretrizes e solicitações das camadas superiores da plataforma SmartLVGrid e , então, irá executar as funções previamente definidas em *software* embarcado. Nisso consiste algumas CSFs a serem executadas, como processamento e registro de dados referente aos serviços de rede Wi-Fi, protocolo MQTT e parâmetros de *hardware*.

O *firmware* do ESP32 foi desenvolvido por meio do ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) Arduino. Este *software* possui plataforma *open source* e é disponibilizado para sistemas operacionais Windows e Linux, além de ser um ambiente de programação amigável e flexível para elaboração de *firmware* embarcado. Apesar de não ser o *framework* oficial de programação do ESP32, é possível configurar esta IDE para que se possa programar este SoC. A tabela 6 apresenta as bibliotecas utilizadas para implementação do *firmware* do ACU-LUM (HUMFREY, 2019).

Tabela 6 – Bibliotecas utilizadas para implementação do *firmware* do ACU-LUM.

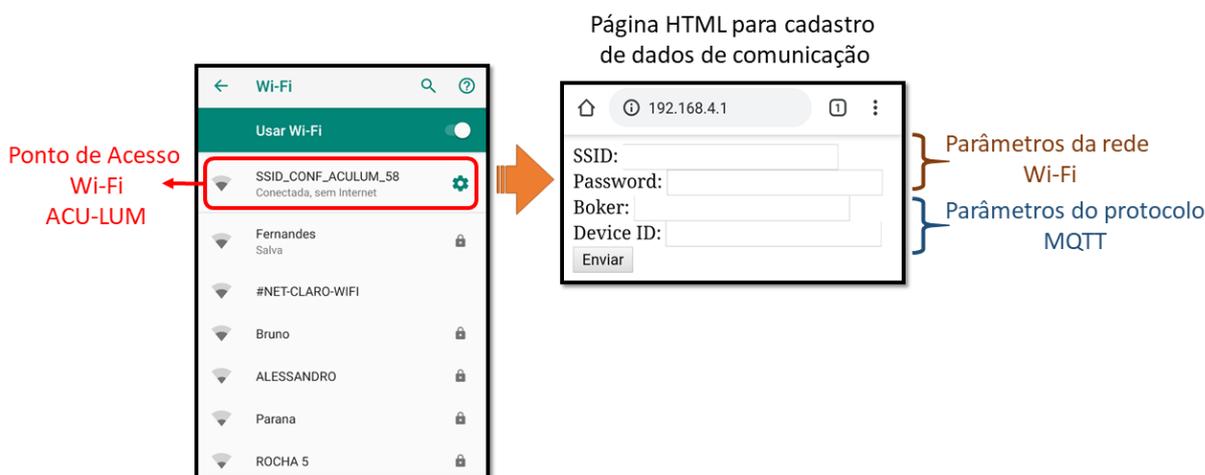
<b>Bibliotecas</b>	<b>Descrição</b>
Arduino	Utilizada para adaptar o uso de funcionalidades do ESP32 ao <i>framework</i> do Arduino
EEPROM	É usada para acessar e escrever dados na memória do ESP32
ArduinoJson	Utilizada para serializar e organizar os dados no formato JSON
WiFi	Biblioteca para o ESP32 que possibilita o uso e manuseio do periférico de comunicação Wi-Fi
WebServer	Permite gerar uma página html configurável
PubSubClient	Permite utilizar o ESP32 como cliente no protocolo MQTT
task	Biblioteca implementada para gerenciar serviços e rotinas em sistemas embarcados

Fonte: Autoria Própria

Inicialmente, quando utilizado pela primeira vez, o ESP32 pode ser encontrado em rede Wi-Fi como ponto de acesso. Dessa forma, o ACU-LUM estará apto a receber do usuário os parâmetros da rede Wi-Fi utilizada no prédio, do protocolo MQTT e de identificação do dispositivo. Ao conectar um dispositivo computacional a este ponto de acesso e acessar o

endereço de IP "192.168.4.1" em um navegador web, através da biblioteca WebServer, uma página html será carregada com o intuito de receber esses parâmetros e armazená-los internamente na memória *flash* do ESP32. A figura 47 ilustra este processo.

Figura 47 – Processo de cadastro dos dados de rede no ACU-LUM.



Fonte: Autoria própria

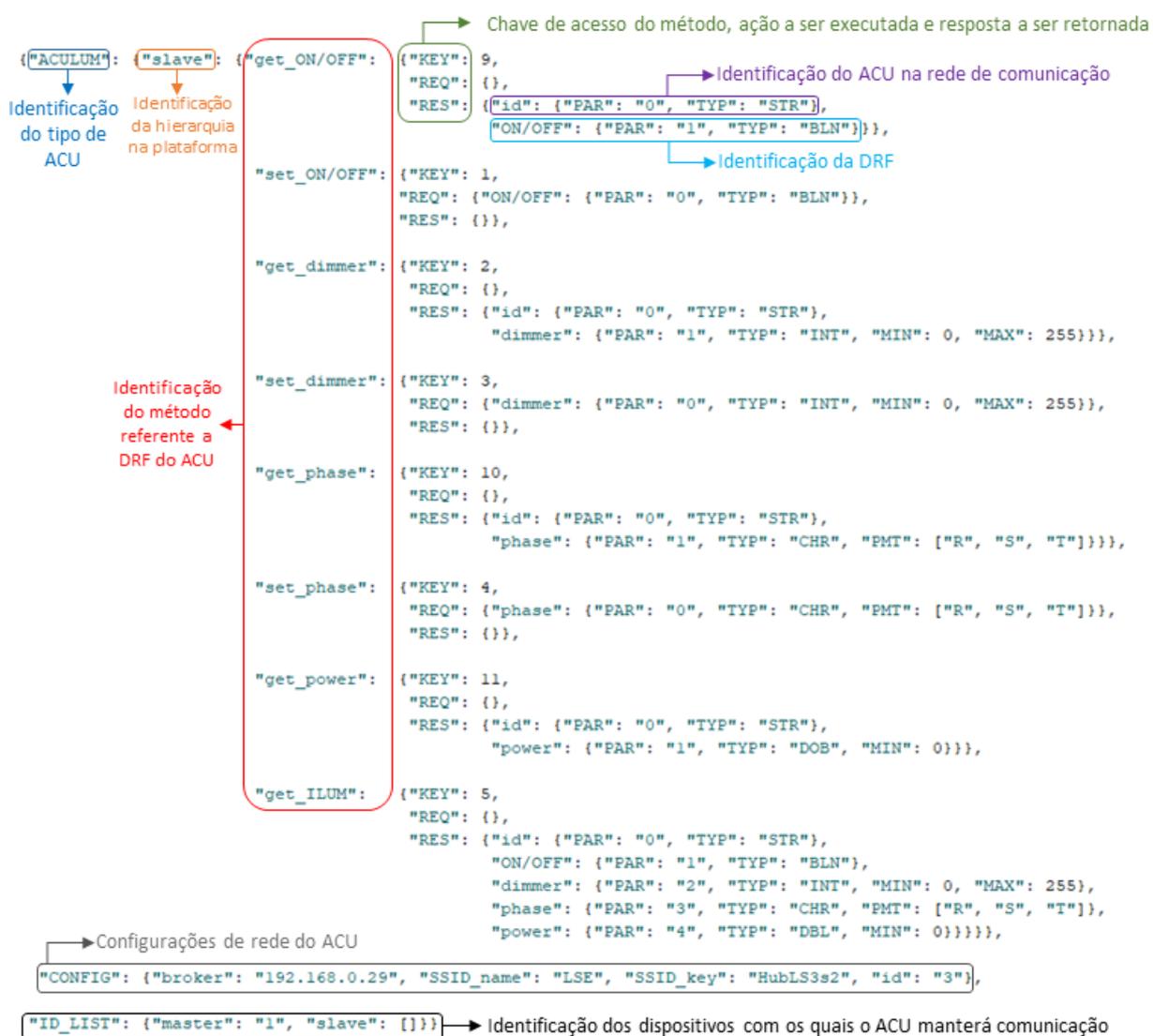
Dentro das especificações do protocolo MQTT, o ACU-LUM será classificado como cliente, bem como quem publica ou assina tópicos em um *broker*. Conforme apresentado na tabela 6, utilizando as bibliotecas WiFi e PubSubClient referentes ao ESP32, é possível implementar o ACU-LUM como cliente MQTT. São estabelecidas funções no *firmware* que possibilitam a reconexão com a rede Wi-Fi e com o *broker* sempre que necessário, através da biblioteca *task*.

O controle do módulo de seleção de fases é realizado através de três GPIOs, fornecendo apenas o nível lógico que caracterizará o acionamento de um dos TRIACs do módulo por vez. Uma das portas disponíveis no SoC é programada para funcionar como um conversor digital-analógico (DAC) de 8 bits para o controle de nível de tensão que é aplicado ao CI FL7701, provendo assim o controle de luminosidade da luminária LED. Além disso, este mesmo valor de saída do conversor poderá ser utilizado para estimar a potência útil consumida pela luminária, o que já foi realizado antes em artigos disponibilizados pelo fabricante (SEMICONDUCTOR, 2014). Um modelo de regressão matemática que irá correlacionar o valor do conversor DAC e a potência útil da luminária será realizado previamente e estabelecido no *firmware* a fim de disponibilizar este valor a camada de interoperabilidade.

Para que estes dispositivos possam se comunicar em rede é necessário serializar os dados respectivos as DRFs, as informações de rede, de identificação e demais funcionalidades. Para isso, foi escolhido o formato JSON (BRAY, 2014). Esta forma de compactar os dados permite que haja troca de informações independente da linguagem de programação, permitindo que o dispositivo possa interagir com aplicações de *back-end* e *front-end*. O registro desses dados é processado internamente no dispositivo e atualizado na memória *flash* do ESP32, sempre que

um parâmetro do ACU-LUM necessita ser alterado. Essas implementações podem ser realizadas através das bibliotecas ArduinoJson e EEPROM, apresentadas na tabela 6. A figura 48 ilustra o modelo do formato JSON que será armazenado internamente no ESP32 que conterà todo o conteúdo necessário para executar as DRFs, os parâmetros de rede MQTT e outros dispositivos cadastrados na plataforma. Este modelo exemplifica o suporte dado as ISFs da plataforma.

Figura 48 – Formato JSON de configuração do ACU-LUM.

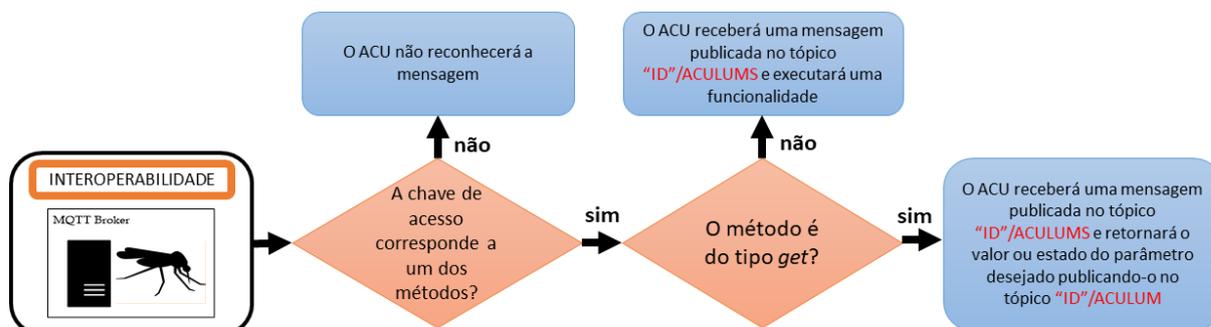


Fonte: Autoria própria

Através do modelo JSON apresentado na figura 48, é possível identificar as funcionalidades e configurações compatíveis com o *hardware* projetado. Para acessar um dos métodos do ACU-LUM e executar uma de suas funcionalidades, a camada de interoperabilidade deverá publicar no *broker* MQTT uma mensagem contendo a chave de acesso do método (*KEY*), os parâmetros a serem retornados caso o método seja do tipo *get* (*RES*) e a funcionalidade a ser executada pelo ACU (*REQ*) caso o método seja do tipo *set*. A figura 49 apresenta um fluxograma que sintetiza esta explicação, apontando, inclusive, os tópicos onde os dados serão publicados e

acessados no *broker* MQTT, onde "ID" significa a identificação do ACU-LUM neste protocolo de comunicação.

Figura 49 – Representação do protocolo de comunicação utilizado pelo ACU-LUM.



Fonte: Autoria própria

Foram implementadas bibliotecas em linguagem de programação C++ a partir das bibliotecas já existentes. Foi necessário elaborar arquivos de cabeçalho no formato ".h" e arquivos fontes no formato ".cpp". Os métodos e atributos estabelecidos em cada biblioteca visaram tornar o sistema mais robusto e eficiente para o seu propósito. A tabela 7 apresenta as bibliotecas implementadas e suas respectivas descrições.

Tabela 7 – Bibliotecas implementadas para elaboração do *firmware* do ACU-LUM.

Bibliotecas	Descrição
DriverAcuLum	Utilizada implementar os métodos referentes as DRFs a serem executadas
DriverMQTT	Utilizada para garantir confiabilidade e segura no uso do protocolo MQTT
DriverWiFi	Utilizada para garantir uma conexão mais estável, robusta e segura na rede Wi-Fi
SaveData	Utilizada para armazenar os parâmetros do ACU-LUM na EEPROM do ESP32

Fonte: Autoria Própria

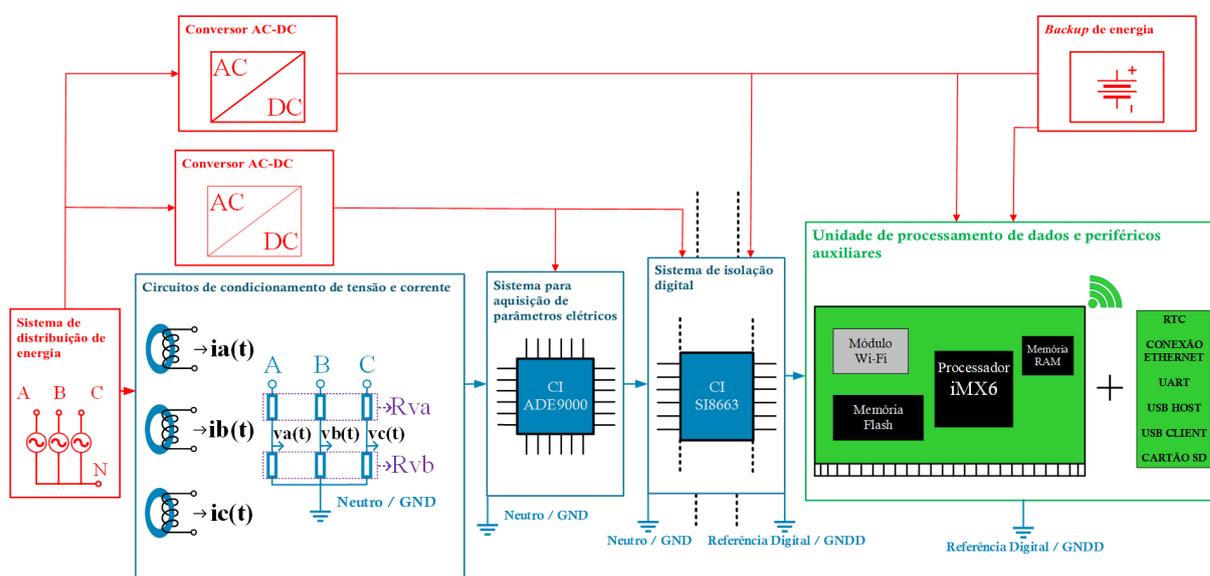
### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ACU-SB

A concepção do ACU-SB foi baseada em um dispositivo de *hardware* capaz de realizar todo processamento computacional necessário para gerenciar o funcionamento das luminárias e medir os parâmetros elétricos referentes as fases onde cada ACU-LUM está conectado. O poder computacional do ACU-SB é superior em relação ao ACU-LUM, bem como sua robustez.

Isto se deve ao fato de que ele é classificado como o *coordinator* do sistema pela camada de interoperabilidade, segundo os requisitos do *framework* SmartLVGrid.

Para garantir os requisitos estabelecidos acima, este ACU conta com um computador em módulo industrial, com recursos de comunicação *wireless*, que irá operar com um sistema operacional Linux embarcado se comunicando com um circuito integrado dedicado a medição de parâmetros elétricos através de um barramento de dados seriais no próprio *hardware*. A figura 50 ilustra um diagrama em blocos que representa a arquitetura de *hardware* a ser implementada neste módulo de *retrofit* para sistemas de medição de energia.

Figura 50 – Visão geral da arquitetura do sistema de medição de energia.



Fonte: Autoria própria

O diagrama ilustrado na figura 50 possui as seguintes características:

- O circuito de condicionamento de tensão tem por finalidade atenuar os sinais de tensão elétrica para que possam ser digitalizados e processados, posteriormente. Este sistema está adaptado a medir em rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, contando com três fases e um neutro. Existem sistemas de proteção que garantem a integridade deste circuito, em casos de surtos tensão e eventos de sobrecorrente;
- O sistema de aquisição de dados se baseia em um circuito integrado capaz de receber sinais elétricos previamente condicionados para que possa digitalizar e processar com alta precisão. Mediante as configurações feitas a este CI, é possível obter os parâmetros elétricos de consumo feitos por uma unidade de processamento. Espera-se, com isso, executar a DRF relacionada a medição dos parâmetros elétricos;
- Em casos de falha na proteção do sistema, o sistema de aquisição de parâmetros elétricos poderá ser avariado juntamente com a unidade de processamento, que possui alto custo

agregado. Para evitar a queima da unidade de processamento, é estipulado um circuito integrado de isolamento digital para garantir que a troca de dados entre o sistema de aquisição e a unidade de processamento ocorra com maior segurança. Faz-se necessário o uso de dois sistemas de conversão AC-DC: um para o sistema de aquisição de dados e outro para a unidade de processamento;

- Quando houver interrupções no fornecimento de energia elétrica, o ACU-SB, operando como *coordinator* no sistema, deverá manter a unidade de processamento em funcionamento a fim de manter o gerenciamento do sistema a todo momento. Assim sendo, será previsto um sistema de *backup* de energia neste ACU;
- A unidade de processamento utilizada é baseada em um computador em módulo que possui bom desempenho e conta com boa capacidade de memórias e um sistema operacional Linux. Além disso, ele possui periférico de comunicação Wi-Fi embutido, que será utilizado para se comunicar com outros ACUs. Para auxiliar em processos de configurações na unidade de processamento, serão previstos periféricos auxiliares no *hardware* do dispositivo.

Este dispositivo permite ao usuário realizar o retrofit em seu quadro de distribuição de energia elétrica, permitindo o gerenciamento de uma cadeia de dispositivos que compartilham da mesma plataforma *smart building*.

### 3.3.1 Especificações de *hardware* do ACU-SB

Nesta seção são apresentados os métodos usados para especificação dos componentes para implementação do ACU-SB, baseados em sua arquitetura e metodologia de implementação.

#### 3.3.1.1 Sistema para aquisição de parâmetros elétricos

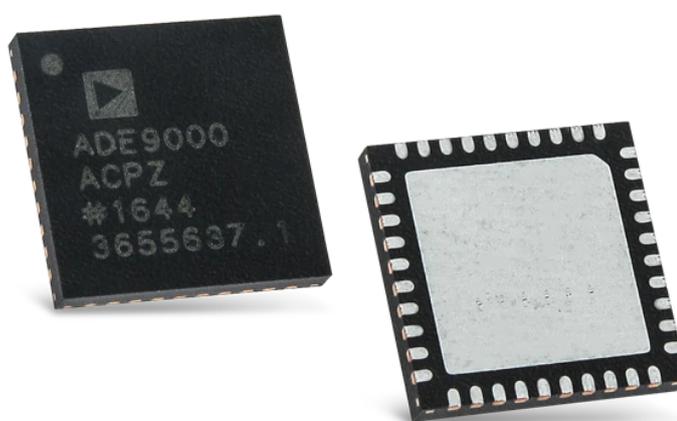
Este sistema baseia-se em um circuito integrado medidor de energia: o CI ADE9000. Este componente, fabricado pela Analog Devices, tem por função receber parâmetros elétricos de tensão e corrente previamente condicionados, para que possa digitalizá-los e processá-los de forma precisa. Através dele, é possível realizar medições de energia, potência, parâmetros elétricos de tensão, corrente e frequência, parâmetros de qualidade de energia elétrica, além de outros métodos e parâmetros de medição (DEVICES, 2017b; DEVICES, 2017a). Ele vem sendo amplamente utilizado em aplicações que envolvam internet das coisas, ou mesmo aplicações industriais (PRUDENZI et al., 2019; PRUDENZI; FIORAVANTI; CIANCETTA, 2019).

Ele se comunica com uma unidade microprocessada que opera como *master* na hierarquia de comunicação SPI. Em um barramento SPI, o ADE9000 é considerado um *slave* e está sempre a espera de dados seriais que apontem para um determinado registrador, que por sua vez

desempenhará alguma funcionalidade. Ele deve contar com um oscilador a cristal para realizar a comunicação SPI. Para implementação do ACU-SB, foi utilizado um cristal de 24,576 MHz, conforme orienta o manual técnico de referências (DEVICES, 2017a).

Ao utilizá-lo, o projetista deve incluir ao *firmware* embarcado os procedimentos de calibração de tensão e corrente, encontrados também no manual técnico de referências. As medições podem atingir um erro de até 1%, se devidamente calibrado. Isso torna o sistema de aquisição de parâmetros elétricos muito mais confiável. A figura 51 ilustra o circuito integrado ADE9000ACPZ (MOUSER, 2019).

Figura 51 – Circuito integrado ADE9000ACPZ.



Fonte: (MOUSER, 2019)

### 3.3.1.2 Circuitos de condicionamento de tensão e corrente

Os sistemas digitais de aquisição de parâmetros elétricos normalmente operam com baixos valores de tensão. Isto é válido tanto para conversores analógico-digitais, situados em sistemas microcontroladores, quanto para circuitos integrados dedicados a medição de energia.

Para mensurar os parâmetros elétricos de tensão e corrente deste sistema de distribuição de energia são utilizados três canais para medição de tensão e três canais para medição de corrente, contando com o neutro como referência para o sistema de aquisição. O condicionamento de tensão em cada canal foi baseado em divisores resistivos e o de corrente em transformadores de corrente.

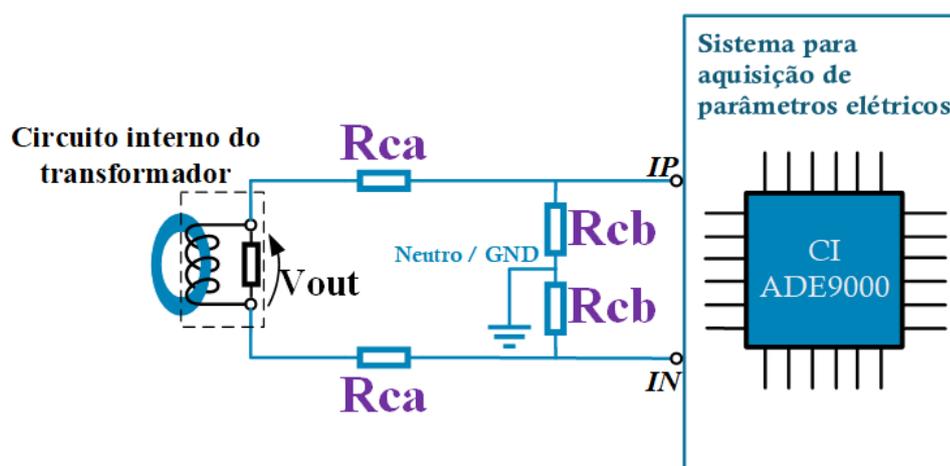
O tratamento dos sinais de tensão para o CI ADE9000 é baseado em tensões alternadas com fundo de escala de até  $707\text{ mV}_{rms}$  (DEVICES, 2017b). Os sinais são obtidos diretamente da rede, sem isolamento, por meio dos divisores resistivos apresentados na figura 50. Para o projeto do medidor do ACU-SB, decidiu-se adotar uma tensão máxima de medição de até  $350\text{ V}_{rms}$ . Desta forma, ajustando este valor ao fundo de escala do ADE9000, pôde-se utilizar uma relação de

transformação de aproximadamente 500:1. Ou seja,  $350 V_{rms}$  correspondem a cerca de  $700 mV_{rms}$  na entrada do circuito integrado. Utilizando a equação 10, escolheu-se utilizar para cada fase  $R_{va}$  como sendo  $1 M\Omega$  e  $R_{vb}$  como sendo  $2 k\Omega$ , baseando-se em recomendações do fabricante. Ressaltando-se que estes devem ser resistores com precisão de 1%, para maximizar a eficácia do sistema, e com potência de até 0,25 W, para evitar sobreaquecimento devido os altos potenciais elétricos aos quais podem ser submetidos.

Os transformadores de corrente garantem isolamento em sua medição, o que remete segurança para aplicações com este transdutor. Contudo, ao utilizar transformadores de corrente, é necessário utilizar circuitos amplificadores ou atenuadores, dependendo do sinal de saída deste sensor. O Laboratório de Sistemas Embarcados, da Universidade do Estado do Amazonas, disponibilizou transformadores de corrente com alta precisão e leitura máxima de  $100 A_{rms}$  para  $10 V_{rms}$ . Assim sendo, um atenuador se mostrou a melhor opção a ser implementada no projeto. Devido as características do transdutor de corrente, após testes previamente realizados, não verificou-se a necessidade de circuitos para correção de fase. Até mesmo porque o ADE9000 possui registradores capazes de corrigir poucos graus de defasagem, tanto para tensão quanto para corrente.

O ADE9000 possui um canal diferencial para leitura de corrente, permitindo realizar as leituras de corrente sem associar o referencial do sistema de aquisição (Neutro) com um os terminais do transdutor utilizado. A figura 52 ilustra o condicionamento do transformador de corrente para o canal diferencial do ADE9000.

Figura 52 – Condicionamento de corrente diferencial para o ADE9000.



Fonte: Autoria Própria

Conforme apresentado na figura acima, o próprio transformador de corrente já possui um circuito interno que proporciona um sinal de tensão mensurável em sua saída. Os pinos  $I_P$  e  $I_N$ , situados no ADE9000 em cada canal de corrente, são pinos diferenciais de para medição de tensão. Cada pino suporta até  $0,5 V_P$ , onde a diferença de potencial entre eles permite até  $1 V_P$

(cerca de  $707 \text{ mV}_{rms}$ ). Para calcular os valores de  $R_{ca}$  e  $R_{cb}$ , será utilizado a equação 22.

$$\frac{0,707V_{rms}}{2} = \frac{R_{cb}}{R_{ca} + R_{cb}} \times V_{out(rms)} \quad (22)$$

Para os resistores  $R_{ca}$  foram utilizados resistores de  $10 \text{ k}\Omega$  e, para os resistores  $R_{cb}$ , foram utilizados resistores de  $2 \text{ k}\Omega$ . Tanto para os pinos  $I_P$  quanto para os pinos  $I_C$ , de cada fase, os valores de  $R_{ca}$  e  $R_{cb}$  são mantidos iguais devido as características similares de cada semiciclo senoidal.

### 3.3.1.3 Mecanismos de proteção do sistema de condicionamento de tensão

O mecanismo de proteção na entrada do condicionamento do ACU-SB é composto pelo PTC, ou varistor, e pelo *spark*, também conhecido como centelhador. Em condições nominais de medição de tensão, o PTC possui resistência desprezível e portanto não chega a aquecer de forma considerável. O *spark*, por possuir impedância elevada, se comporta como um circuito aberto. Na ocorrência de sobretensão momentânea ocorrida na rede ou impulso por descarga eletrostática, o *spark* atuará provocando um curto circuito na entrada, isolando o restante do circuito de condicionamento de baixa tensão. Na ação do *spark*, o PTC é aquecido devido à alta corrente de curto. Portanto, tem sua impedância elevada de forma a diminuir a corrente de entrada. Após as intempéries, o circuito volta à operação nominal e sem a necessidade de substituição de componentes, como seria o caso do uso de fusível na entrada do condicionamento de tensão. Contudo, se a falha na rede se mantiver por muito tempo, os dispositivos de proteção virão a atuar porém podem ser danificados.

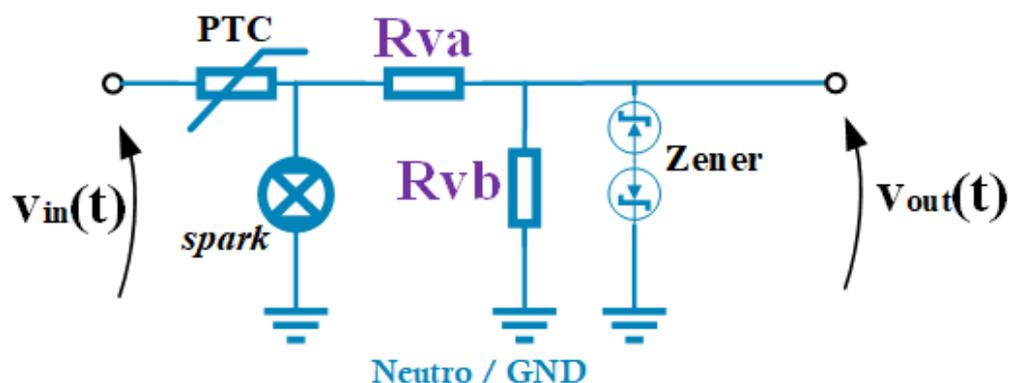
Eventos de sobretensões que provoquem leituras acima do fundo de escala do ADE9000 também não serão problema, visto que serão previstos diodos do tipo zener para assegurar a tensão máxima dos canais de tensão nos dois semiciclos. A figura 53 apresenta o modelo de mecanismo de proteção a ser utilizado em cada canal de tensão, no esquemático do ACU-SB, onde  $v_{in(t)}$  é a tensão da rede,  $v_{out(t)}$  é a tensão condicionada na entrada do ADE9000 e os resistores  $R_{va}$  e  $R_{vb}$  são os divisores resistivos do sistema de condicionamento de tensão.

### 3.3.1.4 Sistemas de alimentação, isolamento e *backup* de bateria

De forma similar ao ACU-LUM, o ACU-SB possui um sistema de retificação trifásica de entrada para alimentação de duas fontes de tensão. Como não há isolamento na medição de tensão, os riscos de se perder o computador módulo por distúrbios elétricos são grandes pelo fato do neutro ser referência para o sistema de medição. O custo deste dispositivo é elevado, o que remete o uso de um isolador digital.

O SI8663, da Silicon Labs, é um circuito integrado que desempenha a função de um isolador digital (LABS, 2019). Seu papel, no ACU-LUM, é garantir que a comunicação SPI e dos

Figura 53 – Mecanismos de proteção e condicionamento dos canais de tensão para o ADE9000.



Fonte: Autoria Própria

pinos de interrupção do ADE9000 ocorra de forma isolada com o computador em módulo. Sendo assim, duas fontes são necessárias: uma para o sistema de aquisição dos parâmetros elétricos e outra para a unidade de processamento de dados e periféricos auxiliares, ambas com saídas reguladas em 3,3 V. Vale salientar que as referências de terra também permanecem isoladas uma da outra.

Parte da energia que é utilizada para alimentação da unidade de processamento de dados e periféricos auxiliares também é utilizada para alimentar um circuito de *backup* de bateria. Isto é extremamente útil em caso de falta de energia pois o ACU-SB continuará em funcionamento, mantendo seus serviços em execução e, inclusive, identificando interrupções no fornecimento de energia elétrica. A bateria utilizada foi de 3,7 V e seu sistema de gerenciamento de carga foi baseado no circuito integrado MAX1555 (MAXIM, 2003).

### 3.3.1.5 Unidade de processamento de dados e periféricos auxiliares

O ACU-SB deve gerenciar uma rede de ACUs interconectados e será o *coordinator* na implementação da plataforma. Ele deve contar com poder de processamento maior e um sistema mais robusto. Para tanto, será utilizado o computador em módulo Colibri iMX6ULL, da empresa suíça Toradex. Esta empresa fornece variedades em sistemas computacionais visando customizar produtos e soluções em geral. Este módulo conta com o processador i.MX 6ULL da fabricante NXP e conta com uma arquitetura ARM Cortex-A7 e recebe, no módulo, uma frequência de cerca de 900 MHz. Este módulo é caracterizado por seu baixo consumo e por possuir módulos Wi-Fi 802.11ac e Bluetooth 5 integrados, o que viabiliza o uso desta plataforma para equipamentos embarcados voltados para internet das coisas (TORADEx, 2019b). O módulo Wi-Fi será utilizado para estabelecer a conexão MQTT do ACU-SB com outros dispositivos da plataforma. As características gerais deste computador em módulo serão exibidas na tabela 8 e sua ilustração é apresentada na figura 54.

Tabela 8 – Especificações técnicas do Colibri iMX6ULL.

<b>Parâmetros</b>	<b>Referências</b>
CPU	NXP i.MX 6ULL
Arquitetura da CPU	ARM Cortex-A7
Wi-Fi	802.11ac
Bluetooth	Bluetooth 5
Frequência da CPU	900 MHz
Frequência para periféricos <i>wireless</i>	2,4 GHz
Memória Flash	512 MB SLC NAND
Memória RAM	512 MB DDR3L (16 bits)
Nº de GPIOs	Acima de 88 pinos
Nº de ADC (12 Bits)	7 canais
Nº de barramentos SPI	2 barramentos
Nº de barramentos I2C	3 barramentos
Nº de barramentos de comunicação UART	8 barramentos
Tensão de operação	3,3 V
Conexão física	SODIMM 200 pinos

Fonte: Adaptado (TORADEX, 2019a)

Figura 54 – Colibri iMX6ULL.



Fonte: (TORADEX, 2019b)

O ACU-SB também conta com periféricos auxiliares que estão associados ao computador em módulo:

- Os barramentos de comunicação UART são externados através de conectores para *debug* ou acesso a plataforma, bem como a conexão Ethernet e conexões USB, caso necessário;
- O dispositivo conta com RTC externo para melhor precisão no uso de relógios de tempo real na plataforma. O periférico de RTC externo comunica-se com a unidade de processamento através de comunicação I2C e é baseado no circuito integrado M41T0M6 (ST, 2004);
- Um dos barramentos de comunicação SPI do módulo Colibri iMX6ULL é utilizado para comunicação com o circuito integrado ADE9000;
- Os procedimentos de acesso a plataforma dependem da instalação de um sistema operacional Linux para sistemas embarcados. Para isso, é necessário instalar os arquivos referentes ao sistema operacional ou na memória flash, ou em um dispositivo de memória externo. Prevendo isto, junto a necessidade de armazenar arquivos posteriormente, foi previsto um *slot* para cartão de memória no *hardware* do ACU-LUM.

Dessa forma, presume-se que o sistema de processamento do ACU-SB estará preparado para atuar, contando com todas as ferramentas necessárias para garantir robustez e confiabilidade a todo o sistema.

### 3.3.2 Especificações de *firmware* do ACU-SB

O módulo Colibri escolhido opera com base em um sistema operacional Linux para sistemas embarcados. Para implementação deste trabalho, foi utilizado sistema padrão disponibilizado pelo fabricante. Trata-se de uma distribuição Linux chamada "Angström", amplamente difundida e utilizada para embarcados (MERCADRI, 2010). O processo de instalação e configuração do sistema Angström foi obtido diretamente do fabricante (TORADIX, 2019b).

Com posse do sistema operacional, foi necessário habilitar o barramento de comunicação SPI do iMX 6ULL, visando a interface com o sistema de aquisição dos parâmetros elétricos. O módulo Wi-Fi também foi configurado através do *software* livre conhecido como "wpa\_supplicant", que utiliza os recursos disponíveis no sistema para efetuar a comunicação Wi-Fi (BERG, 2010). Existe um arquivo de configuração chamado "wpa\_supplicant.conf", onde são repassados os parâmetros de SSID e senha da rede local para que ocorra a conexão. Além disso, o *broker* mosquitto também foi instalado e utilizado como um serviço para que, ao conectar o módulo Colibri em uma rede Wi-Fi local, o endereço de IP adquirido na conexão fosse o mesmo endereço do *broker* MQTT que o outros ACUs utilizariam para estabelecer comunicação em rede local.

O *software* embarcado foi desenvolvido em linguagem Python. Para que fosse possível utilizar a programação Python para implementar os processos de comunicação nos periféricos de Wi-Fi e SPI e também os serviços MQTT, foram necessários instalar pacotes específicos. Os pacotes foram instalados no sistema operacional através de um gerenciador de pacotes conhecido como "Python PIP". Os pacotes instalados no sistema operacional do ACU-SB são apresentados na tabela 9 (PYPI, 2019).

Tabela 9 – Pacotes utilizados para implementação do *firmware* do ACU-SB.

<b>Pacotes</b>	<b>Descrição</b>
spidev	Utilizado para realizar interfaces SPI através do <i>driver</i> "spidev", instalado no Kernel do linux
paho	Pacote para linguagem Python que permite a implementação de um cliente MQTT
pyfase	Utilizado para implementar e gerenciar micro serviços desenvolvidos em linguagem Python

Fonte: Autoria Própria

O *firmware* do ACU-SB foi baseado em programação orientada a objeto. Por se tratar de um sistema mais robusto, as funcionalidades foram implementadas como micro serviços, onde cada *script* em Python opera como um serviço individual no sistema. Pode-se dizer que esta funcionalidade também é prova de conceito para implementação de CSFs no ACU-SB. Desta forma, se um serviço apresentar falhas, os outros continuarão em pleno funcionamento. Utilizando o pacote pyfase, os *scripts* elaborados em Python poderão se comunicar de forma assíncrona através de soquetes IPC.

A interface SPI realizada entre o ADE9000 e o módulo Colibri iMX6ULL será realizada através do pacote spidev, bem como o cliente MQTT no ACU-SB será implementado através dos métodos disponibilizados pelo pacote paho. Ambos serão utilizados em *scripts* separados porém com funcionalidades de micro serviços. Com exceção do *script* de calibração dos parâmetros elétricos medidos através do circuito integrado ADE9000, que será executado apenas na primeira vez de uso do dispositivo. Através deste programa, é possível gerar constantes que são registradas no ADE9000 para que possam ser efetuadas medições com erros de até 1%.

Visando tornar o sistema aquisição de parâmetros elétricos independente de outros serviços no ACU-SB, os parâmetros elétricos serão operacionalizados através de um cliente MQTT. Ainda que um servidor para este protocolo esteja ativo na máquina. Dessa forma, a camada de interoperabilidade poderá utilizar o *broker* do ACU-SB para adquirir todos dados fornecidos pelos dispositivos que compartilham a arquitetura e utilizam o ACU-SB como *coordinator*. Os *scripts* em linguagem Python desenvolvidos neste projeto estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – *Scripts* em Python implementados para elaboração do *firmware* do ACU-SB.

<i>Script</i>	<i>Descrição</i>
AcuSbMQTT.py	<i>Script</i> para gerenciamento do protocolo MQTT
AcuSbADE9000.py	<i>Script</i> para interfaceamento do computador em módulo e o circuito integrado ADE9000
AcuSbCALIB.py	Utilizado para calibrar os parâmetros de medição
AcuSbWiFi.py	Gerencia os serviços de conexão Wi-Fi
core.py	Núcleo do sistema de gerenciamento de micro serviços
translate.py	Interfaceamento entre ACUs distintos

Fonte: Autoria Própria

O modelo JSON estabelecido para o outro ACU foi mantido, visando padronizar este formato para futuras aplicações em desenvolvimento de *software* e futuras implementações de ISFs. O ACU-SB realizará funções de gerenciamento de outros ACUs *operators* e poderá executar DRFs. Como neste projeto o intuito é prover medição de energia ao circuito trifásico ao qual as luminárias estão conectadas, o arquivo JSON conterá informações acerca dos parâmetros elétricos monitorados neste sistema. O modelo JSON do ACU-SB é ilustrado na figura 55.

Figura 55 – Formato JSON de configuração do ACU-SB.



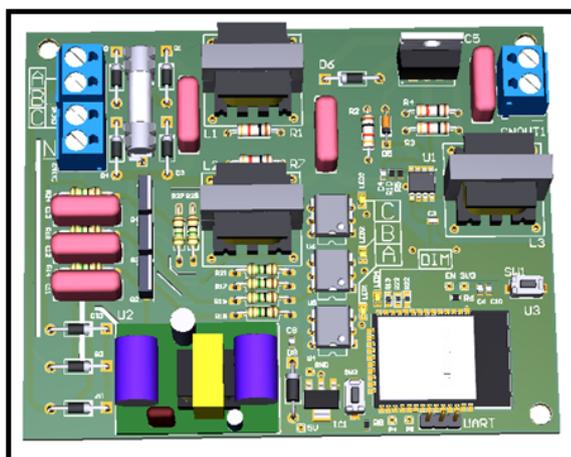
Fonte: Autoria Própria

### 3.4 ELABORAÇÃO DOS *LAYOUTS* E PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Os projetos de *hardware* do ACU-LUM e do ACU-SB foram desenvolvidos no *software* Altium 18 para geração de arquivos referentes a esquemas elétricos, *layouts* de placas de circuito impresso e arquivos de fabricação, também conhecidos como arquivos *gerbers*.

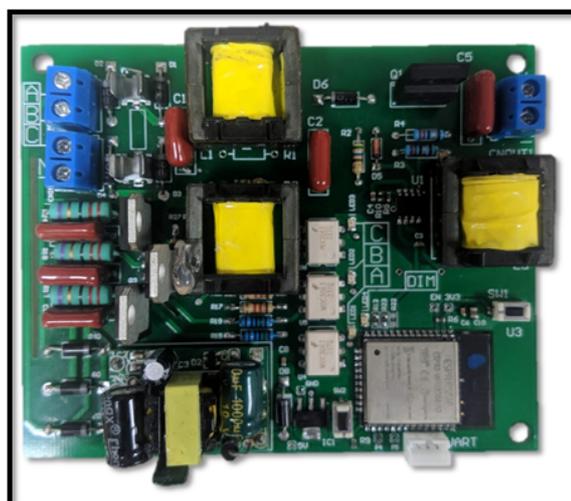
Para o ACU-LUM, utilizou-se as especificações dos fabricantes do ESP32 e do CI FL7701, para otimizar o projeto do dispositivo (ESPRESSIF, 2017; SEMICONDUCTOR, 2014). No ACU-SB adotou-se as especificações do IMX6ULL e do circuito integrado ADE9000 (TORADIX, 2019a; DEVICES, 2017a). As figuras 56 e 57, respectivamente, apresentam um modelo em 3D do layout realizado e o modelo do protótipo utilizado para testes e verificação dos resultados obtidos para o ACU-LUM. O mesmo é ilustrado para o ACU-SB nas figuras 58 e 59, respectivamente.

Figura 56 – *Layout* 3D do ACU-LUM.



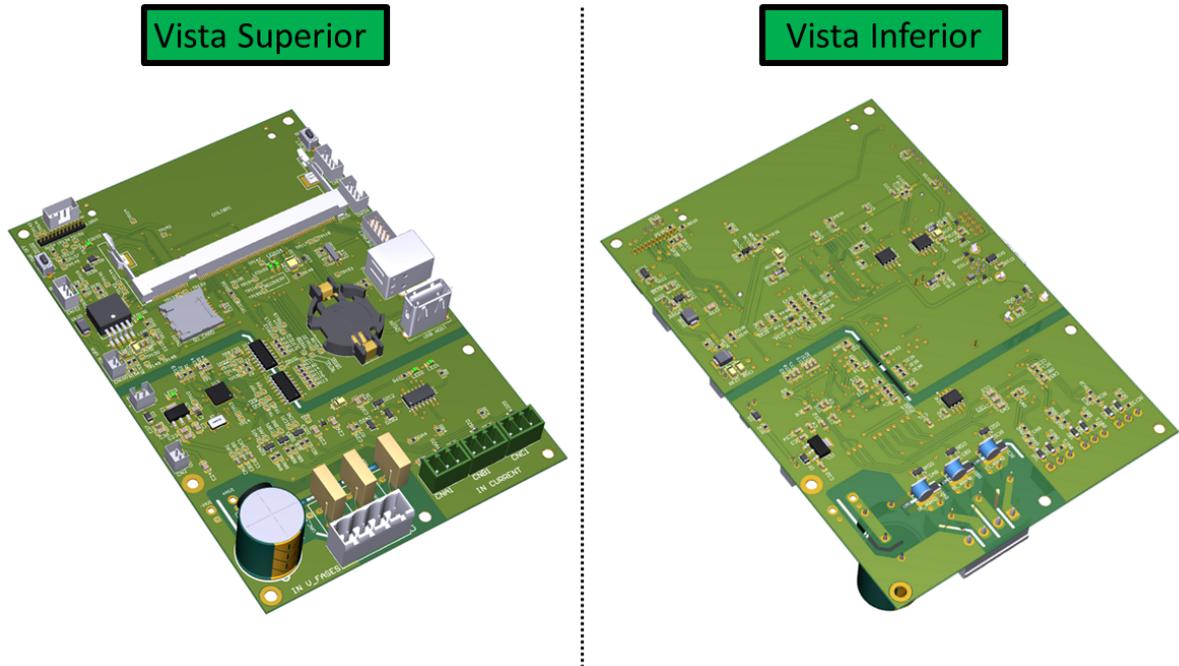
Fonte: Autoria Própria

Figura 57 – Protótipo do ACU-LUM.



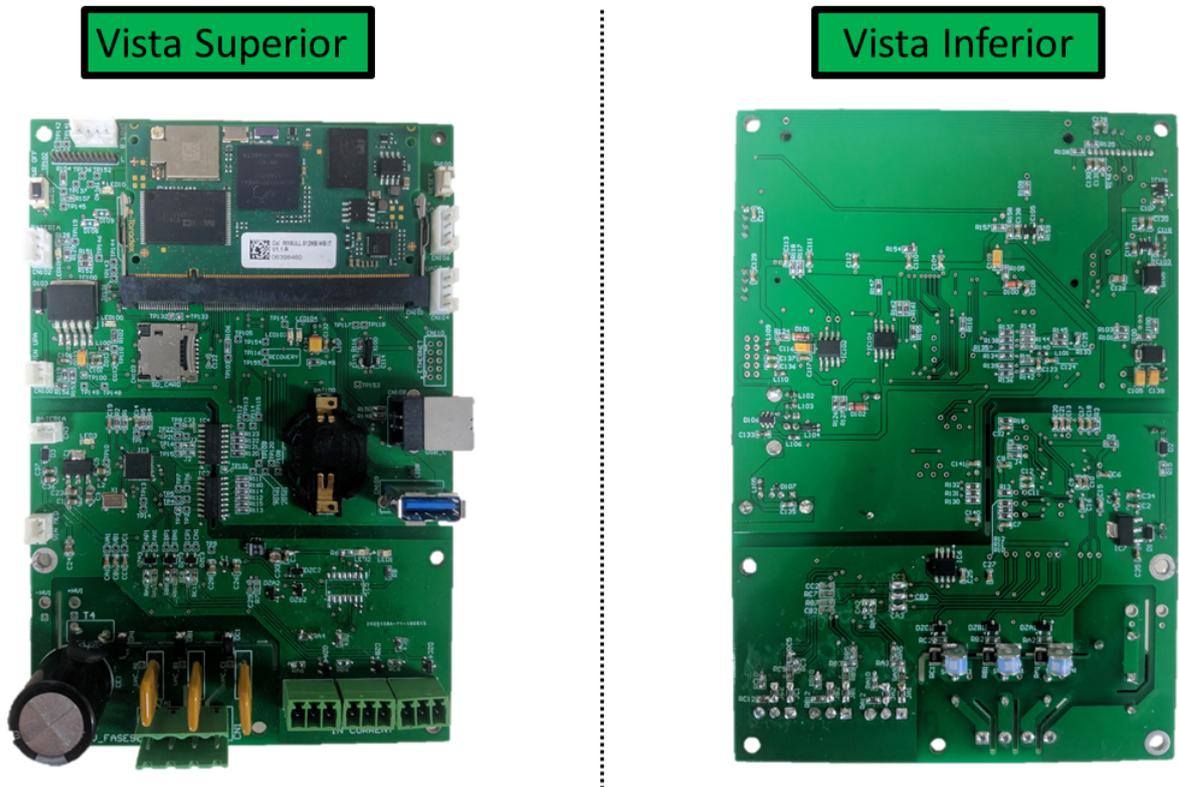
Fonte: Autoria Própria

Figura 58 – *Layout 3D do ACU-SB.*



Fonte: Autoria Própria

Figura 59 – Protótipo do ACU-SB.



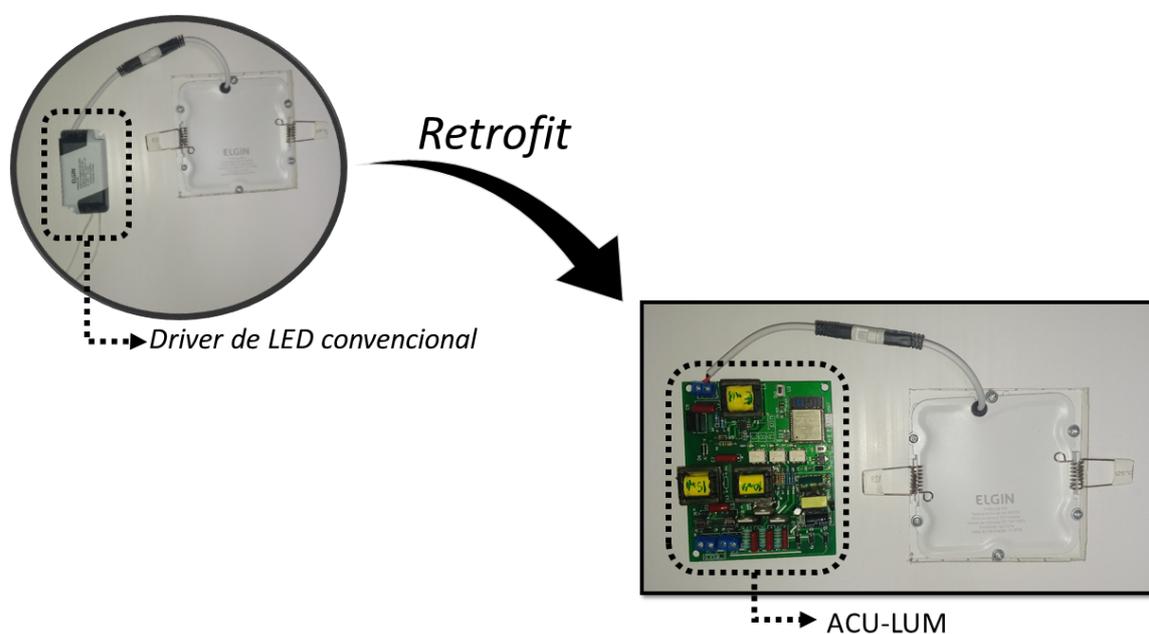
Fonte: Autoria Própria

### 3.5 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DO *RETROFIT*

Os dispositivos de *hardware* apresentados foram baseados nas especificações de funcionamento e operação do sistema legado de iluminação e distribuição de energia elétrica. Com isso, para utilização desses elementos na aplicação do *retrofit* segundo a plataforma SmartLVGrid, foi necessário identificar os pontos de acoplamento (PoIs) ao sistema legado e os sistemas de comunicação disponíveis por quais os seriam implementados os nós de serviço (SNs).

O ponto de acoplamento a luminária é sua alimentação em corrente contínua. No caso do ACU-LUM, ao substituir o *driver* de LED convencional, sua saída será conectada a entrada da luminária e em sua entrada ele receberá uma alimentação trifásica com um neutro, proveniente de um circuito no quadro elétrico. Vale ressaltar que para esta implementação, foi necessário criar um circuito trifásico para alimentação dos módulos ACU-LUM, que não existira antes devido o fato de o circuito legado utilizar apenas alimentação monofásica. A figura 60 apresenta os detalhes de implementação da estratégia de *retrofit* neste ACU.

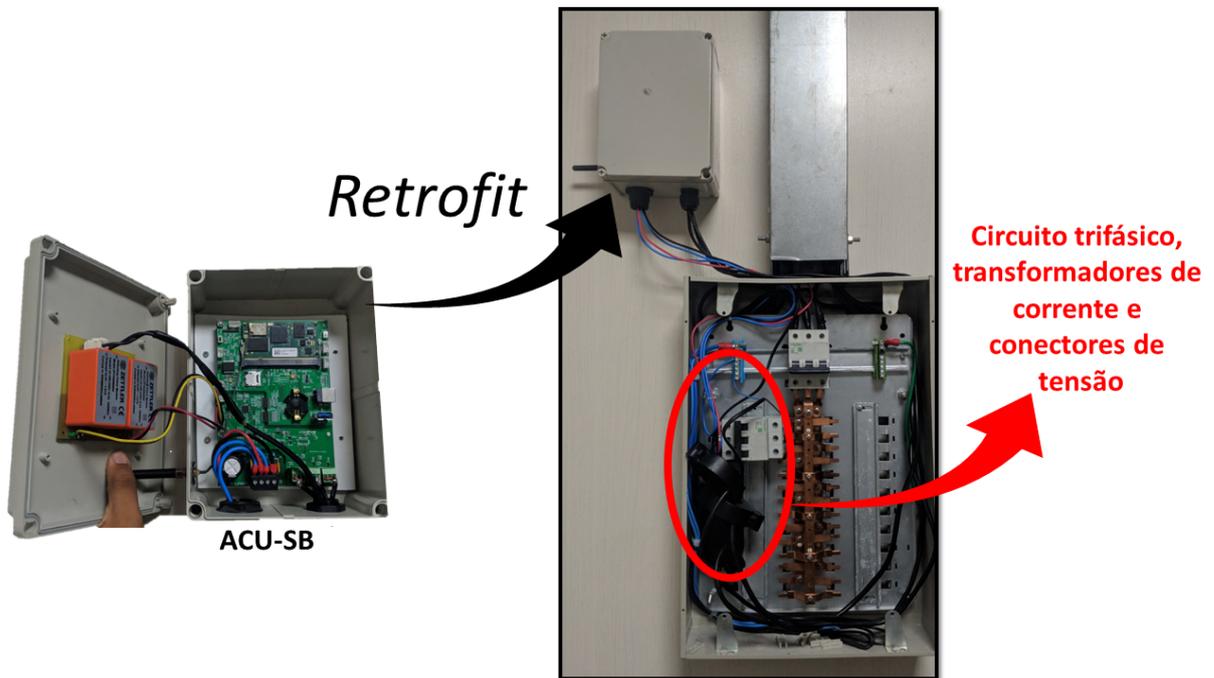
Figura 60 – *Retrofit* com ACU-LUM.



Fonte: Autoria Própria

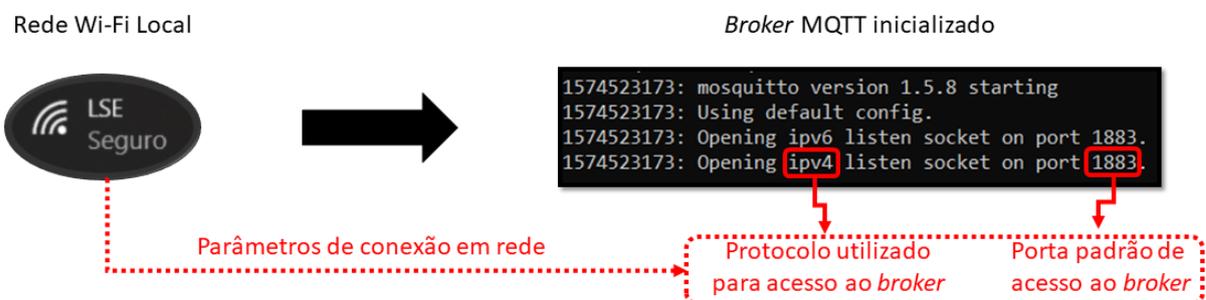
O ACU-SB foi posto na saída circuito trifásico de alimentação implementado, onde estariam localizados os pontos de interface com este sistema. Foi necessário adaptar cabos e conexões para que isto pudesse ser realizado dentro do quadro de distribuição. Os transformadores de corrente e os conectores de tensão utilizados foram postos diretamente na saída do circuito trifásico. Contudo, não se fez necessário a remoção ou substituição de componentes no quadro. Esse cenário encontra-se ilustrado na figura 61.

Figura 61 – Retrofit com ACU-SB.



Fonte: Autoria Própria

Os nós de serviços foram implementados através da rede Wi-Fi local no prédio para os dois ACUs projetados. Considerando-se uma curta distância entre os dispositivos, não se fizeram necessários usos de sistemas de repetição de sinal, o que facilitou o processo de implementação. Com o uso do protocolo MQTT, os módulos do tipo ACU-LUM foram postos em uma tipologia estrela, tendo como concentrador o próprio ACU-SB. A camada de interoperabilidade, então, pode estabelecer nós de serviço com estes dispositivos e com outros dispositivos que possam vir a fazer parte dessa arquitetura. A figura 62 ilustra a implementação do *broker* MQTT no sistema.

Figura 62 – Implementação do *broker* MQTT.

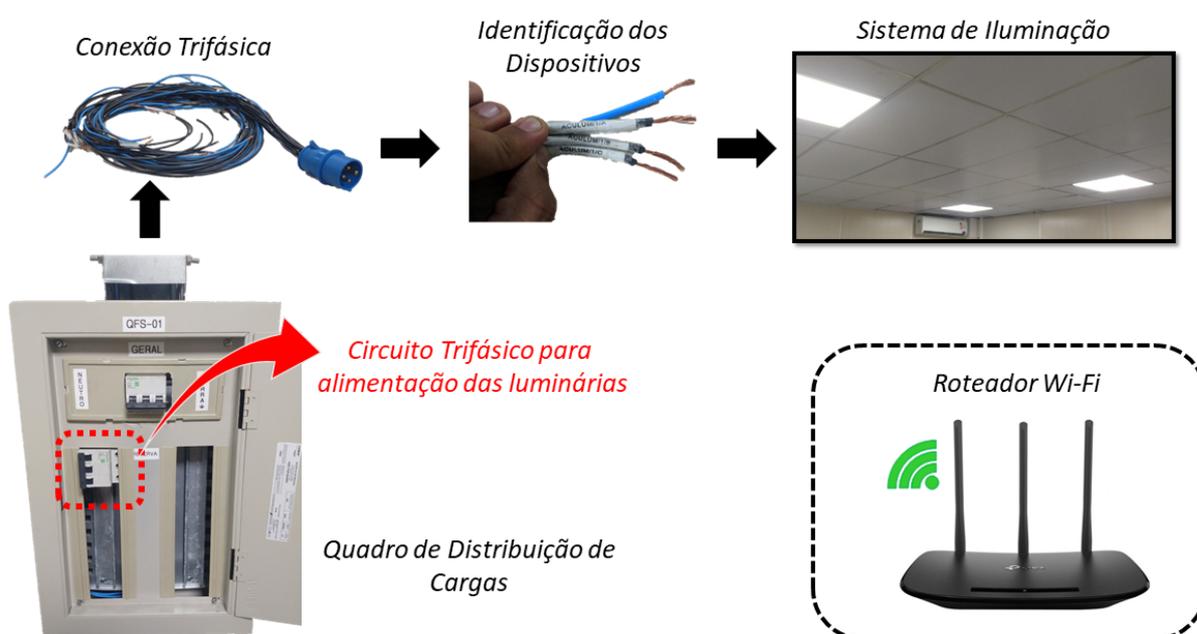
Fonte: Autoria Própria

### 3.6 AMBIENTE PARA COLETA DE RESULTADOS

Para coletar os resultados esperados, foi necessário preparar um ambiente de testes onde os ACUs apresentariam suas respectivas funcionalidades. O ambiente utilizado foi o Laboratório de Sistemas Embarcados do centro de pesquisa e desenvolvimento "HUB - Tecnologia e Inovação", situado na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas.

Basicamente, utilizou-se um roteador Wi-Fi para conexão dos ACUs e um dos quadros elétricos disponíveis. No quadro, foi possível utilizar um circuito trifásico para alimentação dos novos *drivers* de LED através de um conector trifásico e cabos com secção transversal de 1,5 mm<sup>2</sup>, identificando cada dispositivo. Este cenário é ilustrado na figura 63.

Figura 63 – Ambiente para coleta de resultados e implementação do sistema.



Fonte: Autoria Própria

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a implementação dos dispositivos de *hardware* e do *firmware* embarcado, conforme proposto na arquitetura do sistema, e a instalação dos módulos utilizando a técnica de *retrofit*, foi possível coletar resultados que comprovam a realização da convergência *smart building* através da adaptação da plataforma SmartLVGrid.

O conteúdo a ser apresentado neste capítulo baseia-se na apresentação das DRFs previstas para cada ACU, juntamente com a execução de suas respectivas ISFs e CSFs. Para isso, uma sequência de procedimentos foi proposto para coleta de resultados:

1. o cadastro dos ACUs em rede de comunicação *wireless*;
2. a validação das CSFs implementadas em *firmware* embarcado;
3. a verificação das ISFs, através do protocolo de comunicação implementado neste sistema;
4. a execução de cada DRF desempenhada por ACU em seu domínio.

Além disso, espera-se explicitar resultados referentes as novas funcionalidades dadas ao ambiente predial, correlacionando-os, principalmente, a eficiência energética.

### 4.1 CADASTRO DOS ACUS EM REDE DE COMUNICAÇÃO

Ao inicializar o ACU-LUM, foi possível visualizar o ponto de acesso Wi-Fi para cadastro, onde as informações de rede e conexão MQTT foram inseridas. Todas as informações inseridas e carregadas na página html foram devidamente armazenadas nas configurações de rede do arquivo JSON dos dispositivos, estando ali disponíveis para os serviços de reconexão quando necessário. A figura 64 ilustra os *logs* de inicialização do ESP32 do ACU-LUM como ponto de acesso Wi-Fi para cadastro dos dados de rede, enquanto a figura 65 apresenta os *logs* de resposta do ESP32 em respeito aos dados cadastrais da rede Wi-Fi e do *broker* MQTT.

Figura 64 – Abertura do ponto de acesso Wi-Fi do ACU-LUM.

```

SSID name and key are empty → Sem parâmetros de rede cadastrados
AP IP address: 192.168.4.1 → Ponto de acesso aberto
Server started

```

Fonte: Autoria Própria

A figura 66 ilustra a inicialização do sistema operacional do módulo Colibri iMX6ULL no ACU-SB, enquanto a figura 67 apresenta o arquivo de configuração "wpa\_supplicant.conf" utilizado para configurar os parâmetros de conexão Wi-Fi no módulo. Ressalta-se que todas as imagens aqui ilustradas foram obtidas através da comunicação serial com os dispositivos.



## 4.2 VALIDAÇÃO DAS CSFS IMPLEMENTADAS NOS ACUS

As funções de suporte computacional foram implementadas para gerenciar os serviços oferecidos por cada ACU. No caso do ACU-LUM, estas funções estão relacionadas com o gerenciamento das conexões Wi-Fi e MQTT. Também relacionam-se com o armazenamento de dados na memória *flash* do ESP32, onde será possível manipular e acessar os dados referente ao formato JSON que caracteriza o dispositivo. Na figura 68, é possível observar os *logs* referentes a essas funções sendo executadas através da comunicação serial com o ACU-LUM. Na figura 69 é possível visualizar *logs* de uma situação onde haverá reconexão com servidor, por meio de um dos serviços elaborados.

Para o ACU-SB, as CSFs foram implementadas a nível de usuário em seu sistema operacional. Os serviços foram inicializados e gerenciados através de arquivos dos arquivos de configurações disponibilizados pelo próprio sistema operacional Ångstron.

Figura 68 – CSFs em execução no ACU-LUM.

```
EEPROM STARTED! → Dados salvos na memória inicializados
{"ACULUM":{"slave":{"get_ON/OFF":..... → Arquivo json carregado
task_create -> StatusMQTT } Serviços de gerenciamento de conexão
task_create -> StatusWIFI } Wi-Fi e MQTT inicializados
```

Fonte: Autoria Própria

Figura 69 – Tentativa de reconexão do ACU-LUM com *broker* MQTT.

```
The broker failed down, reconnecting! → Aviso de desconexão com o broker
Number of Reconnections: 0
State of MQTT.connected == 0
Trying to connect to MQTT Broker: 192.168.10.124 → Tentativa de reconexão
Successfully connected to broker MQTT! → Conexão reestabelecida
```

Fonte: Autoria Própria

## 4.3 VALIDAÇÃO DAS ISFS IMPLEMENTADAS NOS ACUS

O processo de comunicação estabelecido permitiu que fosse possível requisitar ou enviar comandos e informações aos ACUs. Este processo foi estabelecido por meio de publicações e assinaturas em tópicos MQTT. Para que fosse possível estabelecer a comunicação com os ACUs, foi necessário publicar em tópicos pré estabelecidos em *firmware* embarcado. Mensagens do tipo *string* foram publicadas em formato JSON, de acordo com o protocolo estabelecido nos ACUs.

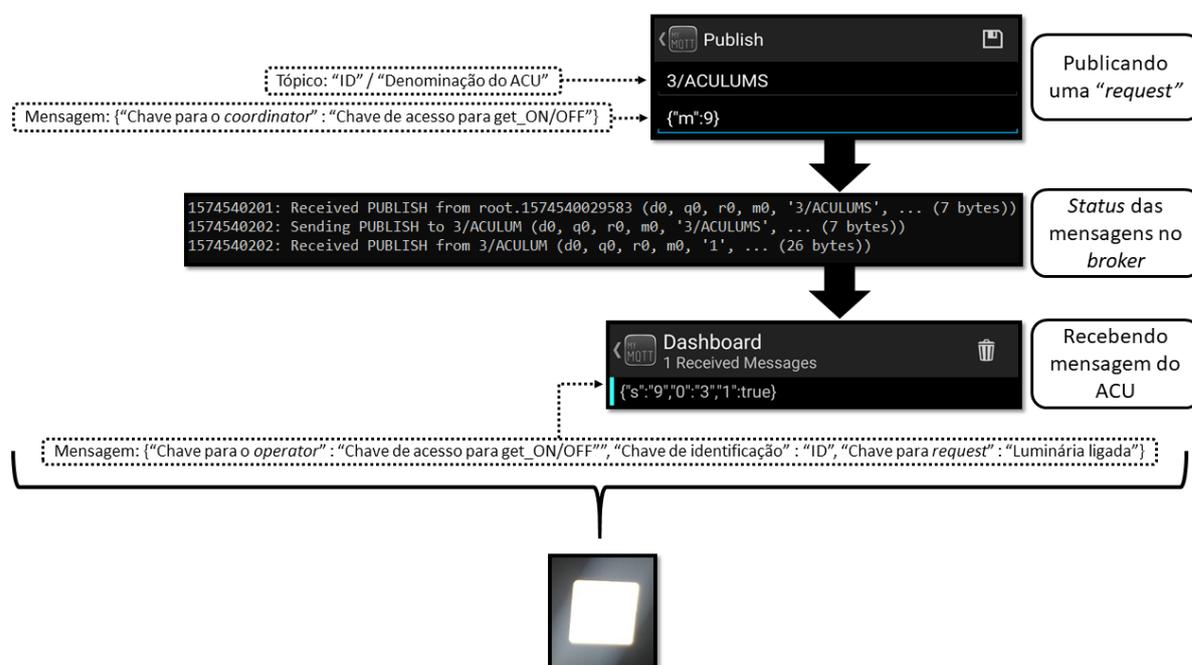
As mensagens continuam informações referentes a identificação do *coordinator*, que se comunicará com os outros dispositivos, e a chave de acesso do método desejado. Isso é

apresentado na representação JSON de cada dispositivo de acordo com as figuras 48 e 55. Vale ressaltar que métodos foram implementados para os casos de atualizações ou modificações nas chaves implementadas. No caso de o método escolhido se apresentar como requisição, o ACU deverá receber o pacote no formato *string*, convertê-lo para o formato JSON e responder a requisição publicando a resposta em um tópico acessado pelo *coordinator*. Se o método escolhido for um comando, o mesmo tratamento será dado a mensagem recebida. Contudo, um terceiro parâmetro deverá ser repassado referente ao valor que se deseja atribuir ao método.

O aplicativo MyMQTT foi utilizado para coletar os dados coletados por meio do ACU, bem como para o envio de mensagens para ACU. Na coleta dos resultados, foram analisados os *logs* gerados pelo *broker*, visto que eles validam o envio da mensagem utilizando o protocolo de comunicação MQTT. Nas figuras 70 e 71, são ilustrados os processos que validam as ISFs implementadas no ACU-LUM para mensagens do tipo *command* e do tipo *request* na execução da DRF referente aos controle ON/OFF da luminária.

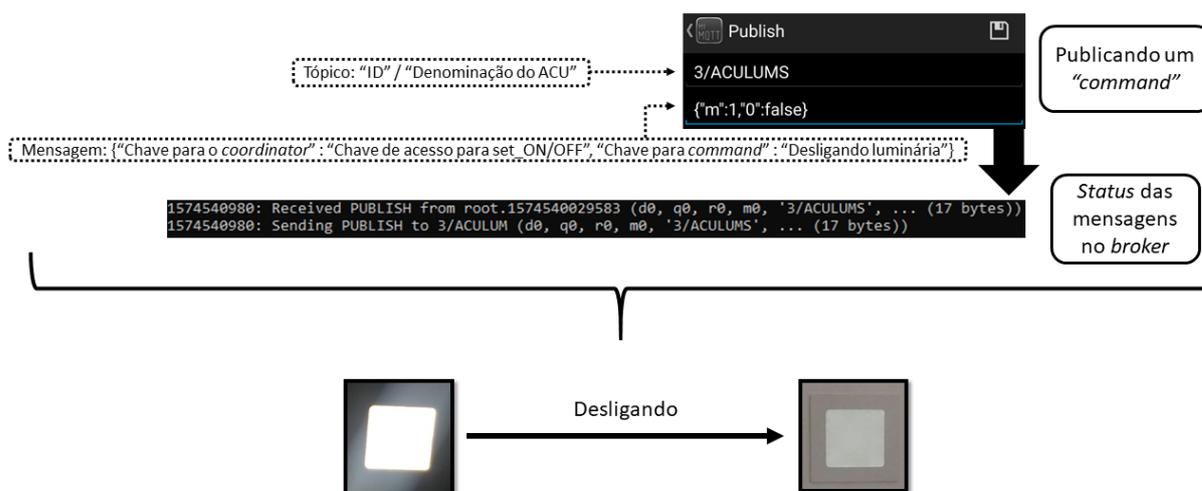
O mesmo processo foi validado para o ACU-SB. Ao publicar mensagens de acordo com o protocolo estabelecido, verificou-se que o dispositivo interpretou os dados de forma esperada. Visto que o ACU-SB apresenta apenas uma DRF do tipo *request*, a apresentação dos resultados coletados deste ACU será melhor ilustrada no próximo tópico deste trabalho, onde os processos de comunicação implementados através da ISFs também será apresentado.

Figura 70 – Resultados obtidos para requisições do tipo ON/OFF.



Fonte: Autoria Própria

Figura 71 – Resultados obtidos para comandos do tipo ON/OFF.



Fonte: Autoria Própria

#### 4.4 EXECUÇÃO DAS DRFS IMPLEMENTADAS PARA CADA ACU

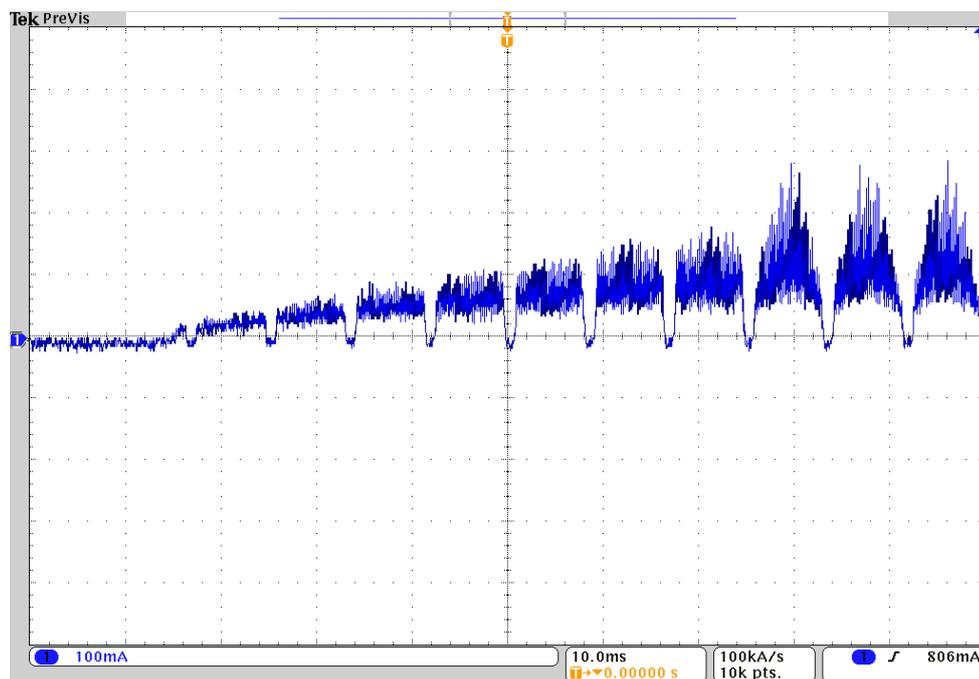
A apresentação das DRFs será feita através dos comandos e requisições realizados em rede MQTT, ilustrando os efeitos obtidos nos domínios de cada ACU. O padrão das mensagens seguirá o mesmo modelo ilustrado para as ISFs anteriormente. Para validação desses sistemas, o aplicativo MyMQTT foi utilizado e as mensagens foram enviadas como forma de simular a camada de interoperabilidade da plataforma SmartLVGrid atuando através do ACU *coordinator*, que no caso, é representado pelo ACU-SB.

##### 4.4.1 As DRFs do ACU-LUM

A implementação da DRF relacionada aos comandos ON/OFF das luminária foram ilustradas nas figuras 70 e 71. Contudo é importante ressaltar que, diferentemente do *driver* de LED utilizado anteriormente, o ACU-LUM implementa uma funcionalidade de *soft-starter* de corrente no acionamento da luminária. Isto contribui para a vida útil da luminária e para redução de picos de correntes no acionamento do sistema de iluminação predial. A apresentação desta funcionalidade é ilustrada na figura 72.

As requisições e os comandos associados a DRF de controle do fluxo luminoso da luminária apresentaram bons resultados. Através do aplicativo, foram possível requisitar os valores presentes na saída do conversor D/A do ESP32, que possui relação direta com o nível eficaz de corrente de saída da luminária através do CI FL7701. Houveram problemas relacionados a *flickers* para níveis menores que 50 na saída do conversor D/A, limitando, o controle do fluxo luminoso entre níveis de 50 a 255.

Figura 72 – Funcionalidade de *soft-starter* implementada na corrente da luminária.

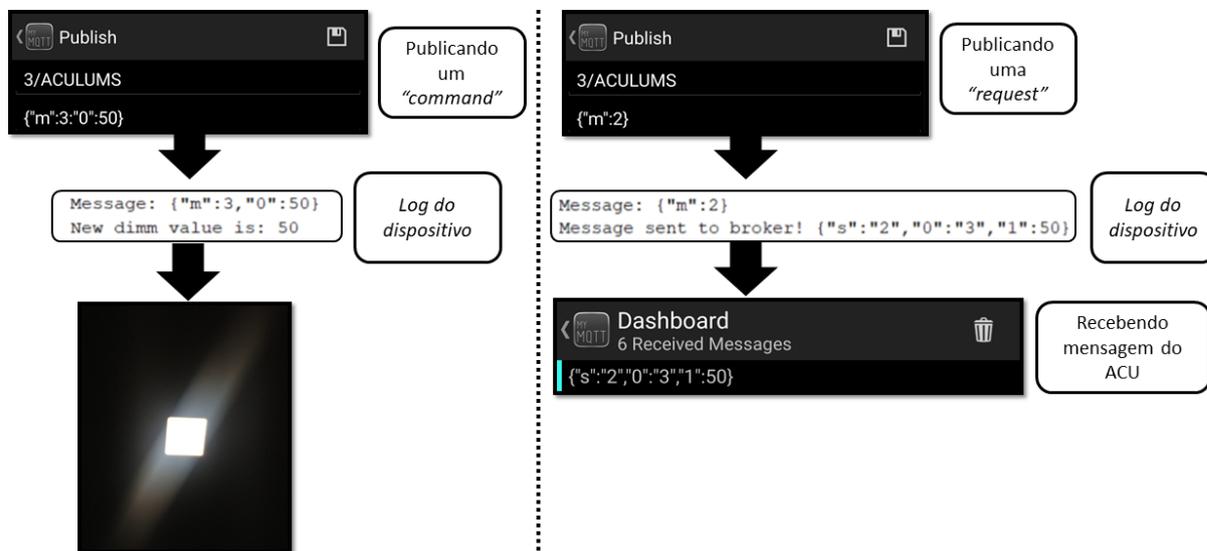


Fonte: Autoria Própria

Para controlar o fluxo luminoso, basta acessar o método através de sua chave específica e repassar como parâmetro o nível desejado na saída do conversor. Este mesmo valor permanece armazenado no ACU-LUM, para caso haja uma requisição, este mesmo valor seja repassado para camada de interoperabilidade até o usuário. Os resultados dessa implementação, tanto para requisições quanto para comandos, podem ser visualizados para diferentes valores de controle do fluxo luminoso nas figuras 73, 74 e 75.

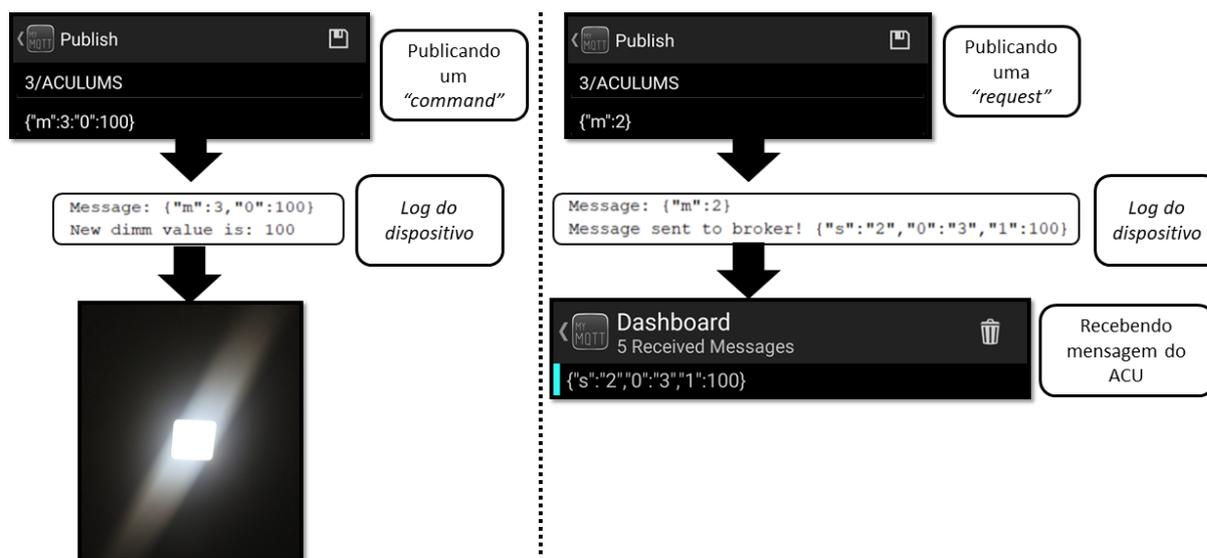
Além disso, foram capturadas as formas de onda da corrente no LED para os níveis de DAC em 50 e 200, representando cerca de 20% e 75% da corrente máxima eficaz nos LEDs. Isto é ilustrado nas figuras 76 e 77. Como é possível observar, a corrente na luminária apresenta um formato senoidal retificado, o que evidencia o tratamento para correção do fator de potência através do circuito integrado FL7701. O *driver* de LED utilizado anteriormente produzia uma distorção harmônica total de cerca de aproximadamente 121% e um fator de potência maior do que 0,5. Estes parâmetros, apresentados através do ACU-LUM no processo de controle do fluxo luminoso, foram significativamente superiores e podem ser melhor visualizados na tabela 11.

Figura 73 – Comando e requisição para controle de fluxo luminoso com DAC em nível 50.



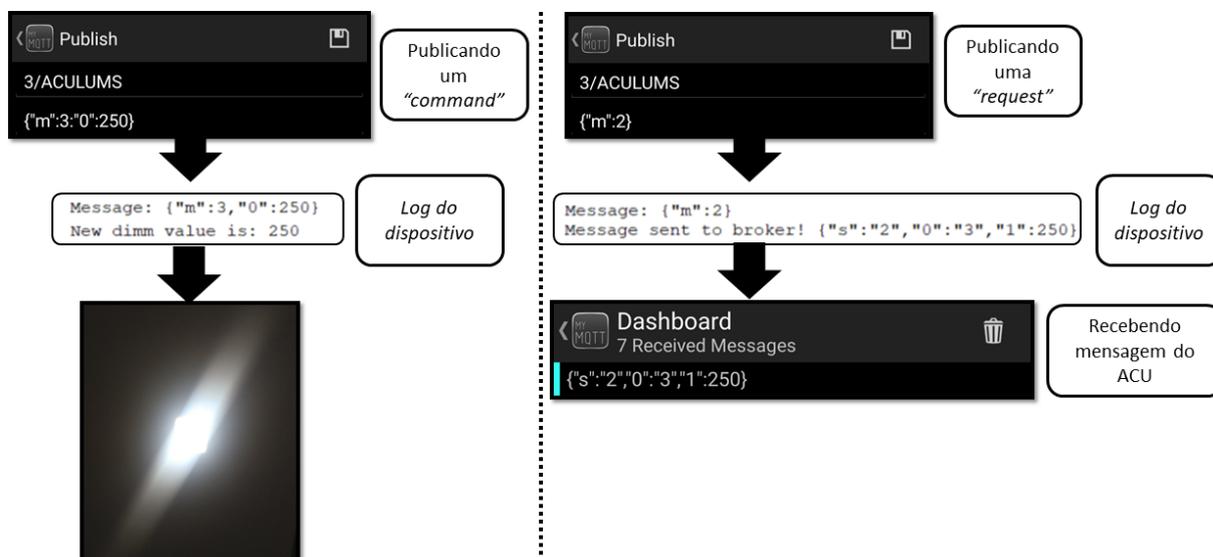
Fonte: Autoria Própria

Figura 74 – Comando e requisição para controle de fluxo luminoso com DAC em nível 100.



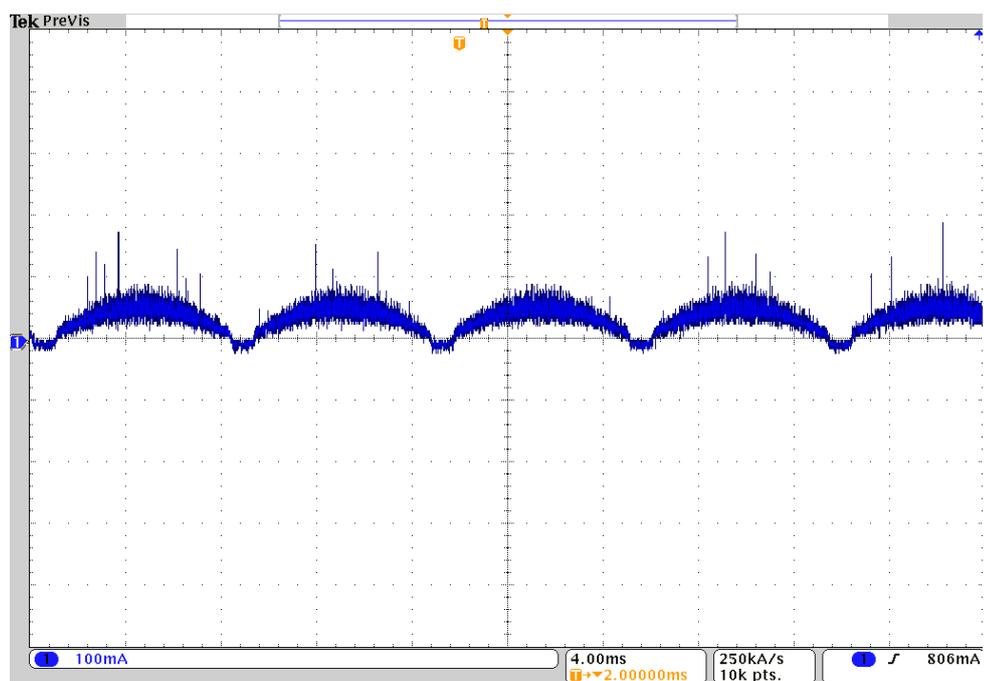
Fonte: Autoria Própria

Figura 75 – Comando e requisição para controle de fluxo luminoso com DAC em nível 250.



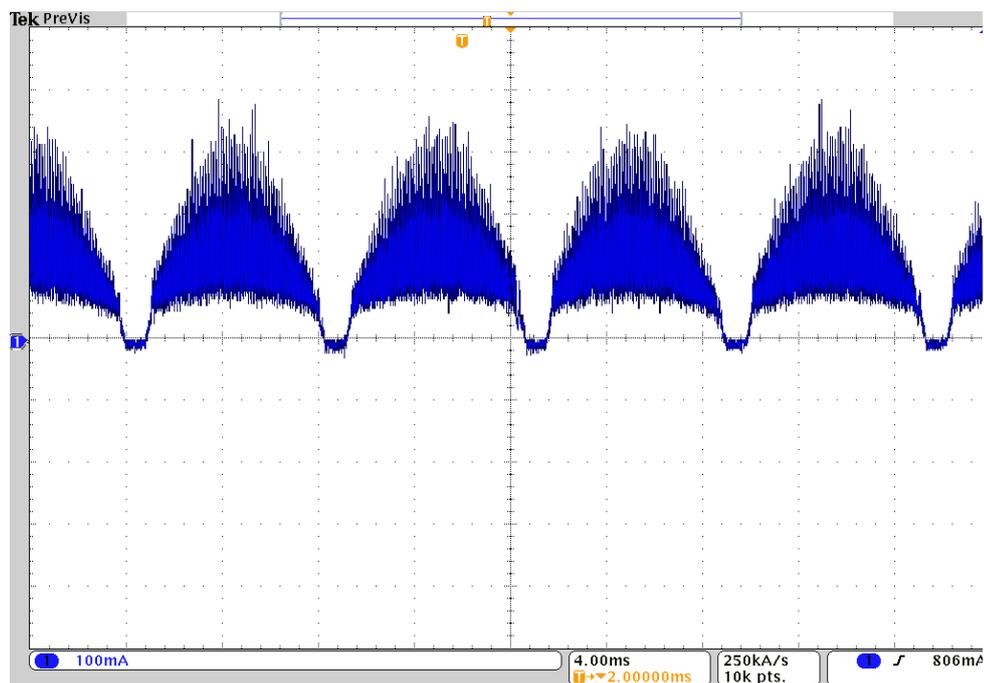
Fonte: Autoria Própria

Figura 76 – Forma de onda da corrente na luminária para 20% de luminosidade.



Fonte: Autoria Própria

Figura 77 – Forma de onda da corrente na luminária para 75% de luminosidade.



Fonte: Autoria Própria

Tabela 11 – Potência, fator de potência e THD obtidos do ACU-LUM alimentando a luminária.

Potência (W)	Fator de Potência	THD
5,5	0,96	27,1%
4,6	0,93	29,4%
4,3	0,89	32,1%
3,8	0,85	34,7%
3,2	0,83	38,6%
2,8	0,77	47,6%

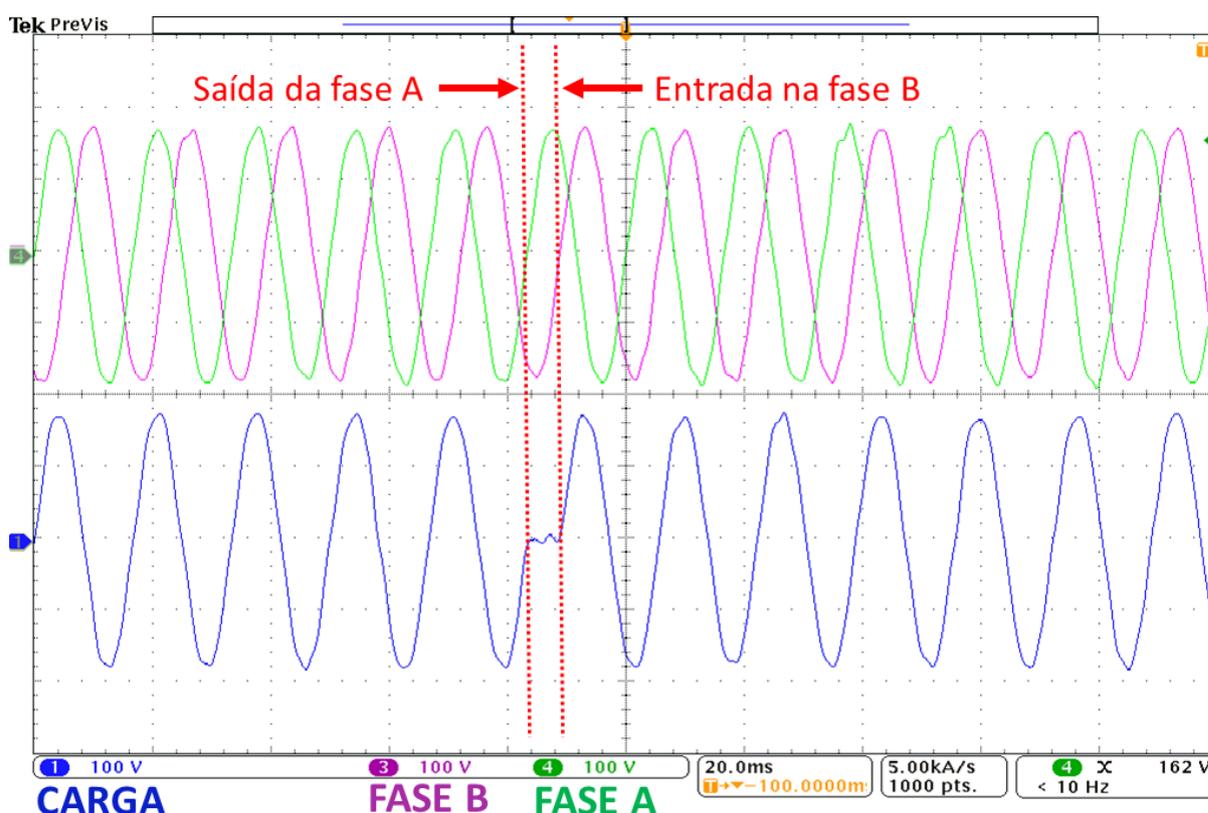
Fonte: Autoria Própria

A DRF relacionada a transferência do ACU-LUM entre as fases disponibilizadas no sistema também foi realizada. Graças ao uso da metodologia proposta, aliada ao projeto de *hardware* e *firmware* embarcado, ao enviar um comando a este ACU a comutação é realizada quase que instantaneamente de uma fase para outra. Para o usuário essa transição é levemente perceptível, similar a um *flicker*. Com o alto fator de potência do dispositivo, a carga possui comportamento similar a um elemento resistivo, não provocando atrasos significativos na comutação dos tiristores. A tecnologia de detecção de passagem por zero, encontrada nos optoacopladores,

permitiu a entrada do circuito no zero da tensão.

Para testar essa funcionalidade, uma requisição foi feita ao ACU para conhecer a fase a qual o dispositivo encontrava-se conectado. Ao descobrir a fase, um comando foi emitido a fim de que a comutação fosse realizada. Utilizando um osciloscópio, foi possível visualizar a tensão das duas fases e a tensão na carga sendo comutada. Esta imagem é apresentada na figura 78. Uma nova requisição foi feita a fim de averiguar, de fato, se a transferência tinha ocorrido. A imagem 79 ilustra o teste realizado para validar esta DRF.

Figura 78 – Capturas de tensão no momento da comutação entre fases.

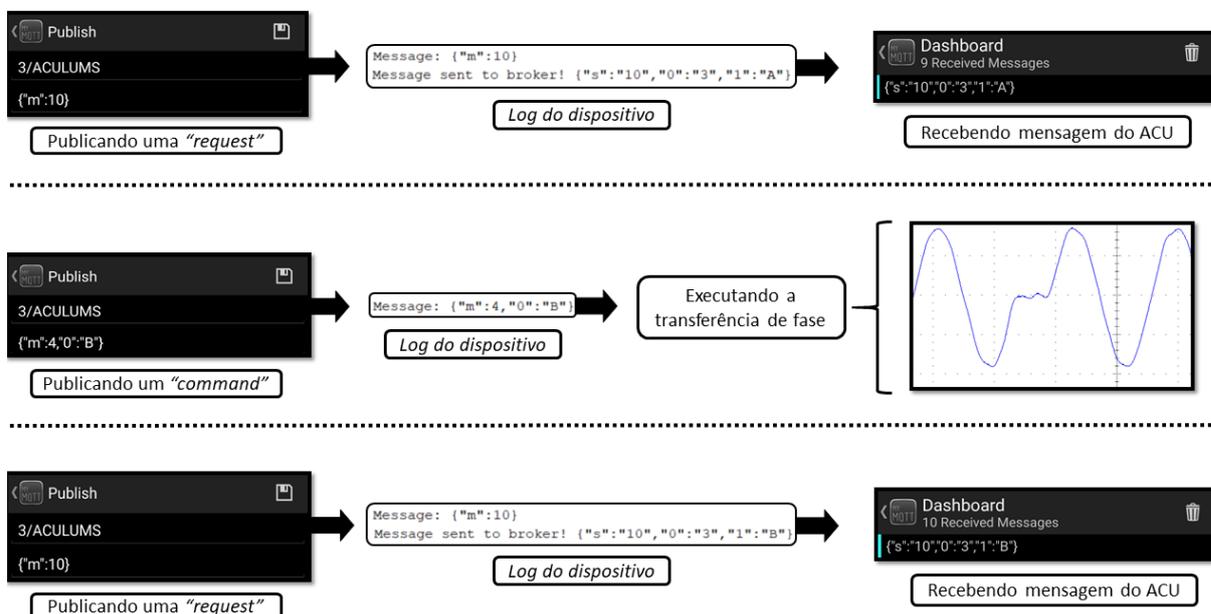


Fonte: Autoria Própria

O sistema de aquisição de potência ativa do ACU-LUM foi baseado no nível de controle do fluxo luminoso empregado. Com base na medição de potência ativa de três amostras desse dispositivo, foi levantado o consumo da luminária por nível do conversor D/A. Devido à proximidade e à linearidade similar das curvas obtidas, uma regressão linear foi realizada a fim de se obter uma reta que seria incluída no *firmware* embarcado e utilizada para retornar o valor de potência útil consumida. A figura 80 ilustra esses gráficos.

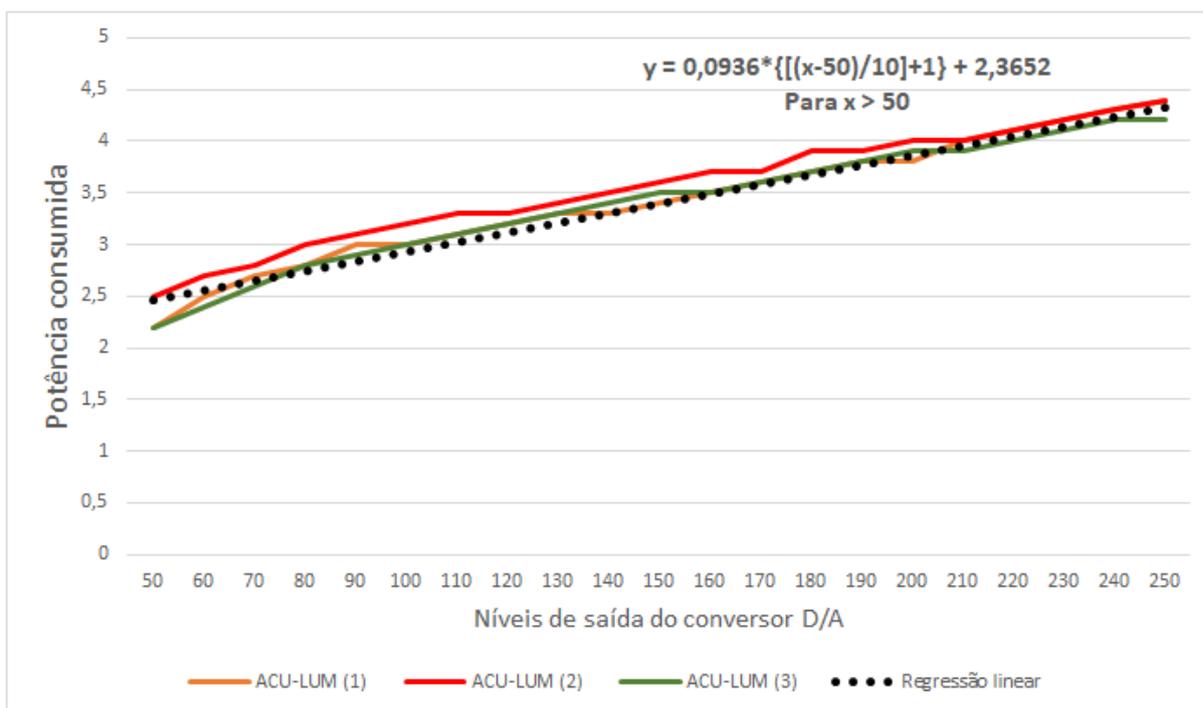
A equação obtida, apresentada na figura 80, foi inserida em *firmware* embarcado a fim de que fosse possível retornar a potência útil consumida. Através do envio da *request* "get\_power" foi possível validar este método. A figura 81 ilustra este resultado, permitindo comparar a potência calculada com a potência obtida pelo wattímetro calibrado. Com os resultados ilustrados, concluiu-se que os valores apresentaram-se de forma semelhante, o que valida o método utilizado.

Figura 79 – Validação da DRF de transferência de fases.



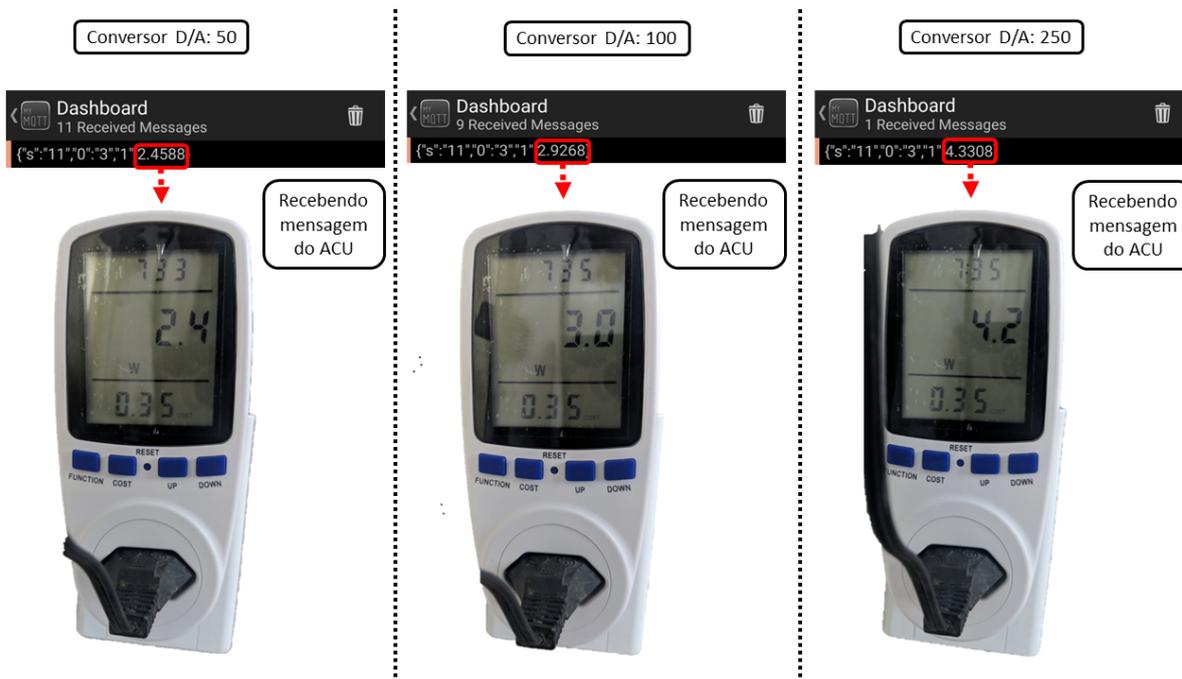
Fonte: Autoria Própria

Figura 80 – Consumo de luminárias com ACU-LUM e uma regressão linear aproximada.



Fonte: Autoria Própria

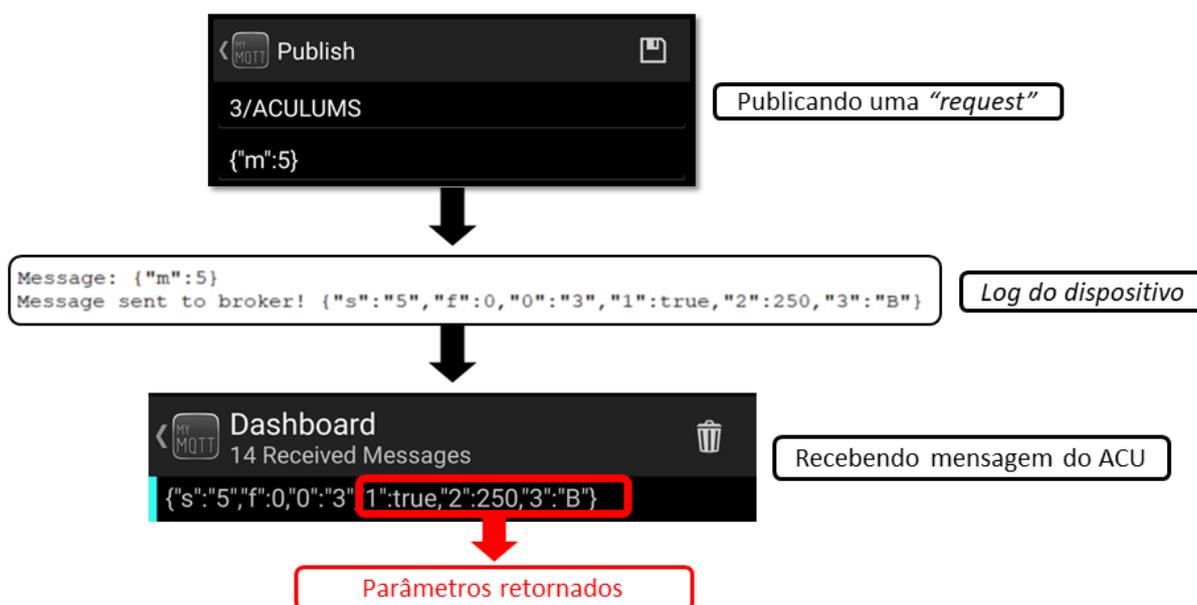
Figura 81 – Validação da medição de potência através do método implementado.



Fonte: Autoria Própria

Por fim, o método "*get\_ilum*" foi implementado para retornar uma requisição contendo todos os parâmetros relacionados as DRFs implementadas para o ACU-LUM. Isto é melhor ilustrado na figura 82.

Figura 82 – Validação do método "*get\_ilum*".



Fonte: Autoria Própria

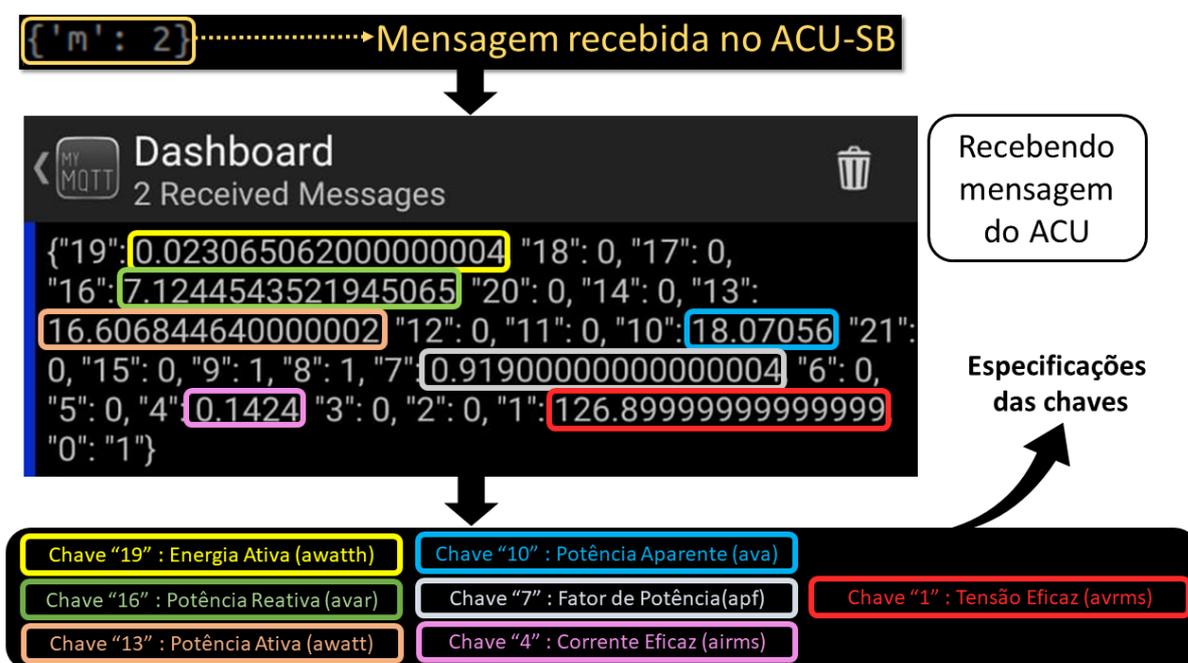
#### 4.4.2 A DRF implementada para o ACU-SB

O ACU-SB possuía como DRF e principal funcionalidade a medição dos parâmetros elétricos de energia, sendo classificada como uma *request*. Esta DRF foi implementada e testada com sucesso, pois ao publicar uma requisição no *broker* MQTT, o ACU-SB retornou os parâmetros elétricos momentâneos da forma esperada. Foi estabelecido um tempo de 5 segundos para coleta dos parâmetros de energia ativa das luminárias, apenas para provar a funcionalidade.

Através deste dispositivo, com a coleta dos parâmetros elétricos no sistema predial, os dados levantados podem ser utilizados para analisar continuamente o consumo elétrico do circuito trifásico implementado. Isto, aplicado em outros circuitos do prédio, permite o gerenciamento das cargas elétricas no local e, com isso, o aumento da eficiência energética.

Para que os resultados possam ser apresentados de forma objetiva, pendurou-se as quatro cargas de iluminação conectadas a fase "A". Quando publicado o comando `{"m":2}`, onde o número 2 é a chave de acesso a *request* de medição `"get_energy_parameters"`, o ACU-SB retornará os parâmetros elétricos monitorados. Cada parâmetro elétrico, segundo a figura 55, tem sua própria chave de identificação e isso será ilustrado na figura 83 ao enviar a *request* para este ACU.

Figura 83 – Validação do DRF do ACU-SB `"get_energy_parameters"`.



Fonte: Autoria Própria

## CONCLUSÕES

Com base nas provas de conceito concebidas neste trabalho, desenvolvidas sobre o conceito de *retrofit*, conclui-se que a convergência *smart building* ocorreu de forma bem sucedida. Através do uso do metamodelo SmartLVGrid, principalmente a camada de *middleware* deste *framework*, verificou-se que a adaptação do sistema legado para um sistema dotado de recursos ocorreu de forma flexível, aproveitando boa parte da estrutura pré-existente. Além disso, utilizando as implementações de *hardware* e *firmware* aqui desenvolvidas, é notório que existe possibilidade de escalabilidade para novos dispositivos ACU se integrarem ao ambiente predial. Isso permitirá atingir outros elementos que propiciem eficiência energética e até mesmo outros recursos.

As plataformas embarcadas foram implementadas utilizando conceitos e estratégias apresentadas pela plataforma SmartLVGrid e por toda a pesquisa realizada para fundamentar todo o processo. Isso possibilitou o desenvolvimento de forma sistêmica, cuidando para que cada requisito fosse atingido e que os domínios dos ACUs, sejam eles sistemas de iluminação ou distribuição de energia elétrica, pudessem obter o máximo de funcionalidades possíveis. Com os ACUs em correto funcionamento, constatou-se que as DRFs, ISFs e CSFs propostas foram implementadas e validadas com sucesso.

O ACU-LUM proporcionou recursos de controle e comunicação para o sistema de iluminação. Alguns destes, ainda pouco encontrados na literatura. Em relação ao *driver* de LED anteriormente utilizado, o ACU-LUM apresentou funcionalidades que contribuem para o aumento da eficiência energética e também para melhoria de parâmetros de qualidade de energia, devido ao projeto de seu sistema de *hardware*, elaborado com estas finalidades.

Apesar de apresentar grande robustez para as aplicações apresentadas neste trabalho, o ACU-SB desempenhou bem seu papel como *coordinator*. Além de gerenciar os outros ACUs, através do *broker* MQTT, o ACU-SB fornece suporte para as camadas superiores da plataforma. Caso toda a estrutura da implementação venha a ganhar mais recursos através de mais dispositivos, este ACU poderá desempenhar o papel de *sub-coordinator*, em um sub-grupo de ACUs. Neste caso, através do processamento distribuído, os processos e serviços podem ser divididos em várias unidades do ACU-SB a fim de gerenciar sistemas cada vez maiores e mais complexos.

Esta foi a primeira implementação física da plataforma SmartLVGrid, o que torna toda documentação apresentada neste trabalho como um marco para o desenvolvimento de novos dispositivos e aplicações da plataforma, seja no âmbito de *smart buildings* ou mesmo de *smart grids*. Como trabalhos futuros, sugere-se utilizar implementações de ACUs para máquinas condicionadoras de ar dentro de ambientes prediais, visando melhorias ainda mais significativas no contexto da eficiência energética. Além disso, trabalhos que apresentem soluções com outras infraestruturas de redes de comunicação, *hardware* e *software*, até mesmo para outros tipos de convergência tecnológica, estará contribuindo com soluções que possibilitem recursos para alcançar o paradigma *smart*.

## REFERÊNCIAS

- ACLARA. *I-210+ and I-210+c*. 2019. Disponível em: <<https://www.aclara.com/products-and-services/smart-meters/ansi-residential/i-210-and-i-210c/>>.
- ALBINI, L. C. P. Redes de computadores. 2015.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- AZAZI, H. et al. Review of passive and active circuits for power factor correction in single phase, low power ac-dc converters. In: *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 217.
- BARROS, E.; CAVALCANTE, S. Introdução aos sistemas embarcados. *Artigo apresentado na Universidade Federal de Pernambuco-UFPE*, p. 36, 2010.
- BERG, J. Wi-fi peer-to-peer on linux. In: *Linux Plumbers Conference 2010*. [S.l.: s.n.], 2010.
- BINGHAM, R. P. Sags and swells. *Manager of Technology and Products Dranetz-BMI 1994, Original Draft September 1994 Revised February 16, 1998, New Durham Road Edison, NJ 08818-4019 USA*, 1998.
- BOYLESTAD, R. L. *Introductory circuit analysis*. [S.l.]: Pearson Education, 2013.
- BRAY, T. The javascript object notation (json) data interchange format. 2014.
- CAFFREY, R. J. *The intelligent building: an ASHRAE opportunity*. [S.l.]: ASHRAE, 1988.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- CHASE, O.; ALMEIDA, F. Sistemas embarcados. *Mídia Eletrônica. Página na internet: < www.sabajovem.org/chase >, capturado em*, v. 10, n. 11, p. 13, 2007.
- CHRISTIANSSON, P. Knowledge representations and information flow in the intelligent building. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. ICCCBE-VIII 2000 (eds: Fruchter R, Pena-Mora F, Roddis K)*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 14–17.
- CROW, B. P. et al. Ieee 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 35, n. 9, p. 116–126, 1997.
- CUNHA, A. F. O que são sistemas embarcados. *Saber Eletrônica*, v. 43, n. 414, p. 1–6, 2007.
- DEVICES, A. *ADE9000 Technical Reference Manual*. 2017.
- DEVICES, A. *Datasheet ADE9000*. 2017.
- ELGIN. *Catálogo: Iluminação*. 2019.
- ESPRESSIF. *Datasheet ESP32 V1.0*. 2017.

EUROPEANCOMISSION. *Smart Building: Energy efficiency application*. 2017. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM\\_Smart%20building%20-%20energy%20efficiency%20v1.pdf](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Smart%20building%20-%20energy%20efficiency%20v1.pdf)>.

FAIRCHILD. *Datasheet FQP12N60*. 2000.

FAIRCHILD. Applications of zero voltage crossing optically isolated triac drivers. *AN-3004, FAIRCHILD Inc*, 2002.

FAIRCHILD. *Datasheet 1N4007*. 2003.

FAIRCHILD. *Datasheet MOC63*. 2005.

FARHANGI, H. The path of the smart grid. In: *IEEE power and energy magazine*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 8, p. 18–28.

FENG, Z.; LUO, Y.; HAN, Y. Design of led freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio. *Optics express*, Optical Society of America, v. 18, n. 21, p. 22020–22031, 2010.

FERNANDES, R.; GUIMARÃES, W. Implementation of a buck converter with hysteresis voltage control applied to led chip array package for street lighting. In: IEEE. *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.

FERNANDES, R. de A. *GitHub*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/rdafr>>.

FRANCO, E. Qualidade de energia—causas, efeitos e soluções. *Engcomp tecnologia em automação e controle LTDA*, 2005.

GOMES, R. C. S. et al. Smartlyvgrid platform—convergence of legacy low-voltage circuits toward the smart grid paradigm. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 13, p. 2590, 2019.

GOMES, R. C. S. et al. Automation meta-system applied to smart grid convergence of low voltage distribution legacy grids. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. [S.l.], 2017. p. 400–413.

HEISELBERG, P.; CHRISTIANSSON, P.; REINHOLD, C. Intelligent buildings/smart homes. *Smart Wireless Living*, 2007.

HEYDT, G. T.; AYYANAR, R.; THALLAM, R. Power acceptability. *IEEE Power Engineering Review*, v. 21, n. 9, p. 12–15, 2001.

HOY, M. B. Smart buildings: an introduction to the library of the future. *Medical reference services quarterly*, Taylor & Francis, v. 35, n. 3, p. 326–331, 2016.

HU, C. et al. stube+: an iot communication sharing architecture for smart after-sales maintenance in buildings. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 14, n. 3-4, p. 29, 2018.

HUMFREY, N. *Arduino Library List*. 2019. Disponível em: <<https://www.arduinolibraries.info/>>.

JÚNIOR, C. et al. Um medidor de energia elétrica integrado em redes de comunicações. [sn], 2014.

- KADAH, A. S. *Solid state/electromechanical hybrid relay*. [S.l.]: Google Patents, 1997. US Patent 5,699,218.
- LABS, S. *Datasheet Si8660/61/62/63*. 2019.
- LEGER, A. S. et al. Load management system for tactical microgrids using solid state relays. In: IEEE. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- LIU, Z.; LEE, H. A synchronous led driver with dynamic level-shifting and simultaneous peak & valley current sensing for high-brightness lighting applications. In: IEEE. *2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. [S.l.], 2013. p. 125–128.
- MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative analysis and practical implementation of the esp32 microcontroller module for the internet of things. In: IEEE. *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. [S.l.], 2017. p. 143–148.
- MAXIM. *Datasheet MAX1555*. 2003.
- MERCIADRI, L. *The angström manual*. 2010.
- MIRITZ, L. A. D. *Programação de sistemas embarcados usando microcontroladores: um estudo de caso*. 2016.
- MORI, Y. et al. A novel pfc buck chopper for single-phase with single switching device. In: IEEE. *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- MOUSER. *Analog Devices Inc. ADE9000 AFEs*. 2019. Disponível em: <<https://br.mouser.com/new/Analog-Devices/adi-ade9000-afe/>>.
- NAYYAR, A. An encyclopedia coverage of compiler's, programmer's & simulator's for 8051, pic, avr, arm, arduino embedded technologies. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*, IAES Institute of Advanced Engineering and Science, v. 5, n. 1, 2016.
- PEREIRA, D. d. C. et al. Comparative analysis of basic single-stage non-isolated ac-dc topologies employed as high-current cob led drivers. In: IEEE. *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- PEREIRA, F. *Microcontroladores PIC: programação em C*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2007.
- PRUDENZI, A.; FIORAVANTI, A.; CIANCETTA, F. Smart distributed energy monitoring for industrial applications. In: IEEE. *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)*. [S.l.], 2019. p. 274–278.
- PRUDENZI, A. et al. Distributed power quality monitoring in customer's electrical distribution system. In: IEEE. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.
- PYPI. *The Python Package Index*. 2019. Disponível em: <<https://pypi.org/>>.
- R.MICELI; FAVUZZA, S.; GENDUSO, F. A perspective on the future of distribution: Smart grids, state of the art, benefits and research plans. *Energy and Power Engineering*, p. 36–42, 2013.

- SAMIMI, M. H. et al. A review on the rogowski coil principles and applications. *measurements*, v. 4, p. 5, 2013.
- SEAN, E.; VIC, S. The 230v cbema curve—preliminary studies [c]. In: *Proceedings of Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. Christchurch: IEEE. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.
- SEMICONDUCTOR, O. Power factor correction handbook. *HBD853/D, Rev*, v. 3, 2007.
- SEMICONDUCTOR, O. *Datasheet FL7701*. 2013.
- SEMICONDUCTOR, O. *Aplication Notes*, “AN-9744- Smart LED Lamp Driver IC with PFC Function”. 2014.
- SEMICONDUCTOR, O. Accurate shunt resistor connections for optimum performance with the on semiconductor ncs21xr current sense amplifiers (csa’s). *DN05117/D, Rev*, v. 2, 2019.
- SHAHNIA, F.; WOLFS, P. J.; GHOSH, A. Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1318–1327, 2014.
- SHARON, Y.; KHACHATRYAN, B.; CHESKIS, D. Towards a low current hall effect sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 279, p. 278–283, 2018.
- SILVA, P. T. P. d. R. et al. *Utilização de medidores eletrônicos de energia na supervisão e controle do fator de potência*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- SINGH, M. et al. Secure mqtt for internet of things (iot). In: IEEE. *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. [S.l.], 2015. p. 746–751.
- SINHA, A. et al. Design of an energy efficient iot enabled smart system based on dali network over mqtt protocol. In: IEEE. *2017 3rd International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICCT)*. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- ST. *Datasheet M41T0M6*. 2004.
- ST. Rc snubber circuit design for triacs. *AN437, ST Microelectronics Inc*, 2007.
- STMICROELECTRONICS. *Datasheet BTA24*. 2007.
- TANENBAUM, A. S. et al. Computer networks, 4-th edition. *ed: Prentice Hall*, 2003.
- TORADEX. *Datasheet Colibri iMX6ULL*. 2019.
- TORADEX. *NXP i.MX 6ULL Computador em módulos - Colibri iMX6ULL*. 2019. Disponível em: <<https://www.toradex.com/pt-br/computer-on-modules/colibri-arm-family/nxp-imx6ull>>.
- TOTONCHI, A. T. Smart buildings based on internet of things: A systematic review.
- VISHAY. *Datasheet UF4007*. 2018.
- WILLIAM, M. A.; EUGENE, G. E. *Electric illumination devices*. [S.l.]: Google Patents, 1968. US Patent 3,395,476.

XIANGRONG, L.; DIANGUO, X.; XIANGJUN, Z. Low cost electronic ballast with buck converter as pfc stage. In: IEEE. *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*. [S.l.], 2006. v. 1, p. 1–5.

YU-ZHEN, X. et al. Inductor optimize design for bcm buck-pfc in led driver. In: IEEE. *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*. [S.l.], 2011. p. 2264–2267.

ZHANG, J. et al. Reliability analysis of high-power led streetlight. In: IEEE. *2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. [S.l.], 2012. p. 2755–2758.