

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS**

Maurílio Almeida Zen e Valentim

Telegestão da Iluminação Pública - Estudo Experimental

Juiz de Fora

2024

Maurílio Almeida Zen e Valentim

Telegestão da Iluminação Pública - Estudo Experimental

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Circuitos Elétricos da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Antônio Carvalho Braga

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Zen e Valentim, Maurílio.

Telegestão da Iluminação Pública - Estudo Experimental / Maurílio
Almeida Zen e Valentim. – 2024.

86 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Antônio Carvalho Braga
Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia . Departamento de Circuitos Elétricos, 2024.

1. Internet das Coisas. 2. Iluminação pública. 3. Cidade Inteligente. I.
Braga, Henrique Antônio Carvalho, orient. II. Título.

Maurílio Almeida Zen e Valentim

Telegestão da Iluminação Pública - Estudo Experimental

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Circuitos Elétricos da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Aprovada em 27 de 09 de 2024

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Pedro Santos Almeida
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Álvaro Augusto Machado de Medeiros
Universidade Federal de Juiz de Fora

Wilson Carlos Ferrarezi Campos
Diretor de Energia e Eletrificação PJF / EMPAV

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, que sempre me incentivaram, aconselharam e ofereceram suporte incondicional. A educação de qualidade que me proporcionaram e todo o amor e dedicação ao longo dessa jornada foram fundamentais para minha formação.

Agradeço ao meu irmão, por estar sempre presente, me motivando e compartilhando cada momento dessa caminhada, tanto nos desafios quanto nas conquistas.

Ao meu orientador, Professor Henrique, meu sincero agradecimento pela oportunidade de trabalhar ao seu lado. Sua confiança, orientação e vasto conhecimento foram essenciais para meu desenvolvimento durante a graduação.

Agradeço também ao pessoal do NIMO, por toda a colaboração e pelo conhecimento compartilhado, que enriqueceram ainda mais minha experiência acadêmica.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, expresso minha sincera gratidão pelo apoio fundamental, que teve um impacto profundo na minha formação acadêmica.

Agradeço, ainda, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão 001; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob o edital 404068/2020-0; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por meio da concessão APQ-03609-17; e ao Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) pelo suporte inestimável que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Prefeitura de Juiz de Fora por todo o apoio ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Por fim, sou grato aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins, tornando essa jornada mais leve e significativa.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.” - Theodore Roosevelt

RESUMO

O avanço tecnológico nos Sistemas de Iluminação atingiu um marco significativo com a introdução dos LEDs, resultando em uma considerável melhoria na eficiência global desses sistemas. Paralelamente a esse desenvolvimento, observamos um crescimento notável da IoT, que viabiliza a interconexão entre dispositivos e a internet, potencializando de maneira substancial o monitoramento, a manutenção e até mesmo a realização de previsões em sistemas inteligentes. O presente estudo utiliza a IoT como base para propor um Sistema de Telegestão destinado à Iluminação Pública, empregando um módulo GPRS para a comunicação. Este sistema consiste em um dispositivo integrado à luminária, estabelecendo comunicação sem fio e suportado por um software de gestão. Adicionalmente, é desenvolvido um site para a visualização dos dados obtidos por meio do dispositivo, proporcionando uma abordagem abrangente e eficaz para a gestão e controle do sistema de iluminação pública.

Palavras-chave: Internet das Coisas, Iluminação pública, Cidade Inteligente

ABSTRACT

The technological advancement in Lighting Systems reached a significant milestone with the introduction of LEDs, resulting in a considerable improvement in the overall efficiency of these systems. In parallel with this development, there is a notable growth in the Internet of Things (IoT), enabling the interconnection between devices and the internet, substantially enhancing monitoring, maintenance, and even predictions in intelligent systems. This study utilizes the IoT as a foundation to propose a Telematics System for Public Lighting, employing a GPRS module for communication. This system comprises a device integrated into the luminaire, establishing wireless communication and supported by management software. Additionally, a website is developed for the visualization of data obtained through the device, providing a comprehensive and effective approach to the management and control of the public lighting system.

Keywords: Internet of Things, public lighting, Smart City

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comunicação no Sistema de Iluminação Pública	14
Figura 2 – Lâmpada a Vapor de Mercúrio	16
Figura 3 – Lâmpada a Vapor de Sódio	16
Figura 4 – Lâmpada Multivapor Metálico	17
Figura 5 – Luminária LED	18
Figura 6 – Reator Magnético Externo	19
Figura 7 – Reator Magnético Interno	19
Figura 8 – Drivers	20
Figura 9 – Relé fotoelétrico	21
Figura 10 – Luminária Pública LED	21
Figura 11 – Aplicações envolvidas em Smart Cities	22
Figura 12 – Arquitetura PLC (Brasov - Romênia)	25
Figura 13 – Belo Horizonte SMART	26
Figura 14 – ILUMINAÇÃO LED	26
Figura 15 – IoT BHLab	27
Figura 16 – Estacionamento Inteligente	28
Figura 17 – Shotspotter	29
Figura 18 – Triac	31
Figura 19 – Forma de Onda do Triac	32
Figura 20 – Dimmer 0-10V e 1-10V	33
Figura 21 – Forma de Onda do PWM	34
Figura 22 – Pacote de informações DALI	35
Figura 23 – Sistema de PLC	36
Figura 24 – Redes de Comunicação	37
Figura 25 – Padrão IEEE 802.15.4 nas Tecnologias Zigbee e Thread	38
Figura 26 – Evolução do Bluetooth	38
Figura 27 – Cobertura da Sigfox no Brasil	39
Figura 28 – Arquitetura da SigFox	40
Figura 29 – Up/Down Chirp na Modulação LoRa	42
Figura 30 – Relação de alcance, taxa de transmissão e SF	43
Figura 31 – Arquitetura LoRaWAN	43
Figura 32 – Camadas LoRaWAN	44
Figura 33 – Evolução das Redes de Celulares	45
Figura 34 – Estrutura FDMA	46
Figura 35 – Estrutura AMPS	47
Figura 36 – Estrutura GSM	49
Figura 37 – Estrutura GPRS	51

Figura 38 – Arquitetura UMTS	52
Figura 39 – Arquitetura da rede UMTS	53
Figura 40 – Arquitetura CORE 5G	55
Figura 41 – Luminária SL VITTA V9.3	57
Figura 42 – Etiqueta Inmetro Luminária	58
Figura 43 – Módulo SIM800L	60
Figura 44 – Antena GSM	61
Figura 45 – Diagrama do Circuito	62
Figura 46 – ZMPT101B	62
Figura 47 – ACS712	64
Figura 48 – Especificações do sensor ACS712 5A	64
Figura 49 – Relé JQC3F-05VDC-C	65
Figura 50 – LDR	66
Figura 51 – Divisor de Tensão para LDR	66
Figura 52 – ESP32	67
Figura 53 – Condicionamento de Sinal do Sensor de Tensão	69
Figura 54 – Condicionamento de Sinal do Dimmer	70
Figura 55 – Amplificador LM358P	70
Figura 56 – Conversor CA/CC HLK-PM01	72
Figura 57 – Conversor LM2596	73
Figura 58 – Esquemático do Circuito	75
Figura 59 – Fluxograma da Thread Secundária	76
Figura 60 – Fluxograma da Thread Principal	77
Figura 61 – Site	79
Figura 62 – Circuito na Protoboard	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações Técnicas da Luminária SL VITTA – 200	59
Tabela 2 – Especificações do Módulo GSM	60
Tabela 3 – Especificações do Sensor de Tensão ZMPT101B	63
Tabela 4 – Especificações do Módulo Relé	65
Tabela 5 – Especificações do ESP32 Dev Kit V1	68
Tabela 6 – Especificações Técnicas do Amplificador LM358P	71
Tabela 7 – Especificações do conversor CA/CC HLK-PM01	72
Tabela 8 – Especificações do conversor LM2596	73
Tabela 9 – Valores Enviados para o Site	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPS	Advanced Mobile Phone System
AuC	Authentication Center
BTS	Base Station Transceiver
CN	Core Network
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
EIR	Equipment Identity Register
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GGSN	Gateway do nó de suporte GPRS
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HLR	Home Location Register
IP	Iluminação Pública
IoT	Internet das Coisas
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
MS	Mobile Stations
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PLC	Linha de Energia
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RTPC	Rede Pública de Telefonia Comutada
SGSN	Servidor do nó de suporte GPRS
SIM	Subscriber Identity Module
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

SUMÁRIO

	LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
	LISTA DE TABELAS	9
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E TELEGESTÃO	15
2.1	COMPONENTES DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA	15
2.1.1	LÂMPADAS	15
2.1.2	REATORES	18
2.1.3	DRIVER	19
2.1.4	RELÉ FOTOELÉTRICO	20
2.1.5	LUMINÁRIAS	21
2.1.6	FIXAÇÃO NA REDE ELÉTRICA	21
2.2	SMART CITIES E SMART GRIDS	22
2.3	SISTEMA DE TELEGESTÃO	23
2.4	CIDADES INTELIGENTES	24
2.4.1	SAN DIEGO - ESTADOS UNIDOS	24
2.4.2	BRAŞOV - ROMÊNIA	24
2.4.3	BELO HORIZONTE - MG	25
2.4.4	UBERLÂNDIA - MG	27
2.4.5	CURITIBA	27
2.5	NOVAS TECNOLOGIAS	27
2.5.1	BAD HERSFELD - ALEMANHA	28
2.5.2	LAS VEGAS - ESTADOS UNIDOS	28
3	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO EM TELEGESTÃO	30
3.1	TÉCNICAS DE CONTROLE DE LUMINOSIDADE	30
3.1.1	TRIAC	30
3.1.2	DIMANIZAÇÃO DE 0-10V	32
3.1.3	DIMINIZAÇÃO POR PWM	33
3.1.4	DIMINIZAÇÃO DALI	34
3.2	COMUNICAÇÃO PARA TELEGESTÃO COM FIO	35
3.2.1	DALI	35
3.2.2	PLC	35
3.3	COMUNICAÇÃO PARA TELEGESTÃO SEM FIO	36
3.3.1	COMUNICAÇÃO DE CURTO ALCANCE	37
<i>3.3.1.1</i>	<i>IEEE 802.15.4</i>	<i>37</i>
<i>3.3.1.2</i>	<i>BLUETOOTH</i>	<i>38</i>

3.3.2	COMUNICAÇÃO DE LONGO ALCANCE	39
<i>3.3.2.1</i>	SIGFOX	39
<i>3.3.2.2</i>	WEIGHTLESS	40
<i>3.3.2.3</i>	LORA	41
<i>3.3.2.3.1</i>	LoRaWAN	42
<i>3.3.2.4</i>	REDES CELULARES	45
<i>3.3.2.4.1</i>	Primeira Geração (1G)	45
<i>3.3.2.4.2</i>	Segunda Geração (2G)	47
<i>3.3.2.4.3</i>	Terceira Geração (3G)	51
<i>3.3.2.4.4</i>	Quarta Geração (4G)	53
<i>3.3.2.4.5</i>	Quinta Geração (5G)	54
4	DISPOSITIVO DE TELEGESTÃO	57
<i>4.1</i>	LUMINÁRIA	57
<i>4.2</i>	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	59
<i>4.3</i>	DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE	61
4.3.1	SENSOR DE TENSÃO	62
4.3.2	SENSOR DE CORRENTE	63
4.3.3	RELÉ	64
4.3.4	LDR	65
4.3.5	MICROCONTROLADOR	67
4.3.6	CONDICIONAMENTO DE SINAIS	68
4.3.7	ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO	71
4.3.8	ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO	73
<i>4.4</i>	DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE	76
<i>4.5</i>	DESENVOLVIMENTO DO SITE	78
<i>4.6</i>	CIRCUITO NA PROTOBOARD	80
5	CONCLUSÃO	81
<i>5.1</i>	TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública (IP) é de extrema importância para a sociedade moderna, por possibilitar uma maior segurança para as pessoas, além de proporcionar a vida noturna nas cidades. No Brasil a IP corresponde a aproximadamente 4,5% da demanda nacional, e a 3% do consumo total de energia elétrica do país. Com o equivalente a uma demanda de 2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano (CREA-PR, 2016). Segundo o estudo do Banco Mundial, o parque de IP no Brasil compreende aproximadamente 18 milhões de pontos de luz representando cerca de 4,3% do consumo total de energia elétrica do país, e representa uma parcela dos orçamentos municipais em que compromete entre 3% e 5%. A partir disso, cria uma ampla oportunidade para o desenvolvimento de dispositivos voltados à eficiência energética e à coleta de dados na rede de distribuição de energia.

De acordo com a norma NBR 5101/2012, estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a IP configura-se como um serviço fundamental com o propósito primordial de assegurar a segurança no tráfego de veículos e pedestres de maneira ágil, precisa e confortável. Seu alcance abrange uma gama de benefícios econômicos e sociais para os cidadãos, englobando a redução de acidentes durante a noite, o aprimoramento das condições de vida, o suporte às operações policiais com foco na proteção de indivíduos e propriedades, a otimização do fluxo do tráfego, a evidenciação de edifícios e obras públicas durante a noite, além da promoção da eficiência energética (ABNT, 2012).

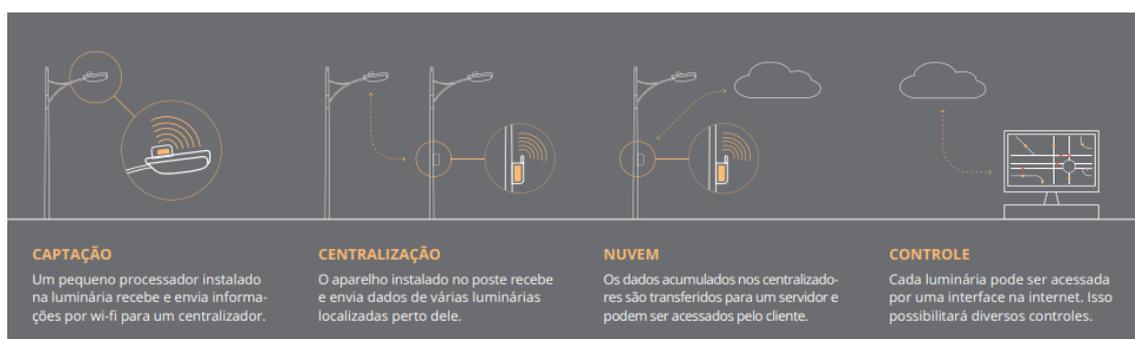
Sistemas de Iluminação Inteligente, também conhecidos como sistemas de telegestão, visam efetuar a administração de um conjunto de luminárias empregadas em vias públicas ou em ambientes que demandam iluminação artificial especializada (CARTER *et al.*, 2011). A administração pode ser conduzida de maneiras diversas, contemplando a análise de diversos aspectos. De modo geral, os sistemas de telegestão apresentam a capacidade de analisar o desempenho da luminária, examinar os dados mensurados e executar um controle predeterminado.

O uso da tecnologia LED na IP representa uma contribuição substancial para aprimorar a qualidade do serviço e aumentar a eficiência energética, refletindo diretamente na redução dos custos de energia do município. Com a adoção de luminárias mais avançadas, como as LEDs, a integração com sistemas eletrônicos para realizar funções de controle, gestão e monitoramento é facilitada. Essa abordagem não apenas moderniza a infraestrutura de iluminação, mas também proporciona um ambiente urbano mais sustentável e inteligente (ENERGIA, 2018).

Na Figura 1, é exemplificado um cenário de comunicação no sistema de IP, destacando a coleta inicial de dados, seguida pela transmissão através de um dispositivo dedicado que recebe informações de diversas luminárias, encaminhando esses dados para a nuvem. Posteriormente, é evidenciado o controle das luminárias e o acesso aos dados

adquiridos por essas fontes luminosas. Um exemplo de controle é a gestão da luminosidade ajustável, permitindo a configuração de perfis adaptáveis conforme as variações sazonais e dias específicos da semana. Juntamente com otimizações na manutenção do sistema, que agilizam a detecção de eventuais falhas nas luminárias, possibilitando alertar o gestor antes que a comunidade perceba qualquer irregularidade.

Figura 1 – Comunicação no Sistema de Iluminação Pública



Fonte: (ENERGIA, 2018)

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo de telegestão da IP. O sistema conta com monitoramento de parâmetros e grandezas elétricas, como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência da rede, entre outros. Além de possuir a capacidade de realizar a dimerização da luminária para aprimorar a eficiência energética do sistema.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 - Sistema de Iluminação e Telegestão será realizado uma revisão sobre Sistemas de Iluminação e Telegestão, acompanhada por uma análise de Smart Grids e Smart Cities.

O Capítulo 3 - Sistemas de Comunicação em Telegestão traz informações sobre diferentes meios de comunicação para a telegestão.

O Capítulo 4 - Dispositivo de Telegestão proposto será apresentado o desenvolvimento do projeto, como o Hardware, o sistema de comunicação e o Software.

No Capítulo 5 - Resultados e Discussão, são apresentados os resultados obtidos e realizada uma análise de cada um, além de serem discutidos possíveis trabalhos futuros.

2 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E TELEGESTÃO

Neste capítulo, serão explorados os sistemas de iluminação e telegestão, com o objetivo de estabelecer uma base de conhecimento abrangente sobre os sistemas de telegestão e IP. Serão discutidas suas aplicações, a arquitetura mínima necessária e as diversas funcionalidades que podem ser incorporadas para aprimorar a eficiência da IP, tornando-a mais inteligente e eficaz.

2.1 COMPONENTES DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Serão apresentados os elementos fundamentais que compõem o sistema de IP, que incluem as lâmpadas, os reatores, o relé fotoelétrico e sistema de fixação na rede de distribuição de energia elétrica (ABNT, 2012).

2.1.1 LÂMPADAS

As lâmpadas predominantes na IP são a lâmpada a Vapor de Mercúrio, a de Vapor de Sódio, multivapores metálicos de alta potência e a LED (CARLI *et al.*, 2016), sendo a primeira a mais antiquada e a última a mais moderna.

A lâmpada a vapor de mercúrio, ilustrada na Figura 2, gera luz por meio da excitação de gases causada pela corrente elétrica. Em sua ignição, ocorre a ionização de um gás inerte, geralmente o argônio, gerando aquecimento no bulbo, levando à evaporação do mercúrio e resultando em uma luz amarelada pela migração de elétrons. Em seguida, ocorre a ionização do mercúrio, colidindo com o argônio e produzindo uma luz azulada. A combinação destes processos resulta na luz emitida por essa lâmpada. Apesar de apresentar boa eficiência luminosa, destaca-se pela ausência de acendimento instantâneo. Seu índice de reprodução de cores é moderado, proporcionando uma impressão de cor fria e um consumo de energia elétrica relativamente mais elevado quando comparado a outras com igual fluxo luminoso.

A lâmpada a vapor de sódio, representada na Figura 3, um tipo de lâmpada de descarga de gás, utiliza o sódio em estado vapor para gerar luz. Seu funcionamento básico envolve um tubo de descarga que contém vapor de sódio e outros gases inertes. Ao ser ligada, uma corrente elétrica percorre o tubo de descarga, ionizando o gás e desencadeando a emissão de luz. No caso específico da lâmpada a vapor de sódio, a cor característica emitida é o amarelo, atribuído às propriedades espectrais do sódio. Esta lâmpada apresenta uma eficiência luminosa considerada moderada, um índice de reprodução de cores também moderado e um consumo de energia elétrica comparativamente mais alto em relação à lâmpada a vapor de mercúrio, porém inferior quando contrastado com as lâmpadas LED de igual fluxo luminoso.

Figura 2 – Lâmpada a Vapor de Mercúrio



Fonte: (ELETRICASUZUKI, 2024)

Figura 3 – Lâmpada a Vapor de Sódio



Fonte: (EMPALUX, 2024)

A lâmpada multivapor metálico, presente na Figura 4 , é uma notável evolução em relação à tecnologia de vapor de mercúrio e apresentando semelhança com as lâmpadas de vapor de sódio. Embora o princípio subjacente seja o mesmo, a introdução de iodetos

metálicos confere à fonte luminosa uma significativa melhoria em termos de eficiência luminosa e Índice de Reprodução de Cor. Comparativamente, a lâmpada multivapor metálico exibe um aumento substancial na eficiência luminosa em relação à lâmpada a vapor de mercúrio e mantém uma superioridade frente às lâmpadas de vapor de sódio, proporcionando uma iluminação mais intensa e eficaz. Em comparação com lâmpadas LED de igual fluxo luminoso, a lâmpada multivapor metálico destaca-se pela notável eficiência luminosa e qualidade na reprodução de cores, oferecendo uma alternativa competitiva que, além de proporcionar uma iluminação brilhante, também apresenta um Índice de Reprodução de Cor notavelmente elevado, contribuindo para uma representação mais fiel das cores nos ambientes iluminados.

Figura 4 – Lâmpada Multivapor Metálico



Fonte: (EMPALUX, 2024)

A tecnologia LED, ilustrada na Figura 5, emerge como uma escolha superior para a iluminação de vias públicas, apresentando uma série de vantagens em relação a outras fontes luminosas. A tecnologia LED opera com base no princípio da eletroluminescência, onde a luz é gerada quando os terminais do dispositivo são submetidos a uma corrente elétrica. Essa forma de iluminação utiliza um Diodo Emissor de Luz como agente responsável por transformar a energia elétrica em luz visível. Algumas das vantagens do LED são o índice de reprodução de cores aprimorado, uma vida útil prolongada, a capacidade de miniaturização do conjunto, a redução significativa nos custos de manutenção, o religamento instantâneo e a inclusão de diversas funções adicionais, como a dimerização. Além disso, a tecnologia LED demonstra maior eficiência luminosa, contribuindo para uma iluminação mais eficaz nas vias públicas. Outros benefícios incluem a redução das

emissões de carbono e a ausência de mercúrio, promovendo assim uma alternativa mais sustentável e ecologicamente consciente para a iluminação urbana (BERNADES, 2020).

Figura 5 – Luminária LED



Fonte: (EMPALUX, 2024)

2.1.2 REATORES

Os reatores magnéticos desempenham um papel crucial no funcionamento de lâmpadas, induzindo um aumento de tensão durante a ignição e promovendo uma subsequente redução na intensidade da corrente durante o período de operação. Esses dispositivos são essenciais para o adequado funcionamento das lâmpadas, desencadeando um aumento de tensão na ignição e controlando a intensidade da corrente ao longo do seu funcionamento. Vale destacar que existem duas tecnologias predominantes para reatores: os magnéticos e os eletrônicos. Além disso são subdivididos em reatores externos, presente na Figura 6, e internos, representado na Figura 7. Cada uma dessas tecnologias apresenta características distintas, impactando diretamente no desempenho e eficiência energética do sistema de iluminação.

Figura 6 – Reator Magnético Externo



Fonte: (Demape, 2024)

Figura 7 – Reator Magnético Interno



Fonte: (Inbrax, 2024)

2.1.3 DRIVER

Os drivers, ilustrados na Figura 8, são circuitos dotados da capacidade de acionar os LEDs, desempenhando um papel fundamental no controle da emissão de luz. Seu propósito é ajustar e otimizar diversos aspectos, tais como a vida útil dos LEDs, aprimorar características como o fator de potência e minimizar a distorção harmônica. Esses componentes desempenham um papel crucial na eficácia e eficiência do sistema de iluminação, garantindo não apenas o acionamento adequado dos LEDs, mas também contribuindo para a maximização de seu desempenho e longevidade.

Figura 8 – Drivers



Fonte: (Inbrax, 2024)

2.1.4 RELÉ FOTOELÉTRICO

O relé fotoelétrico, exemplificado na Figura 9, opera com base na luminosidade, controlando o fluxo de corrente elétrica em resposta à presença ou ausência de luz. Seu funcionamento abrange princípios térmicos, magnéticos e eletrônicos. O acionamento térmico ocorre pela deformação de lâminas bimetálicas, desencadeada pela passagem de corrente elétrica quando o nível de iluminância atinge um limiar adequado para sensibilizar o sensor fotoelétrico. O relé magnético utiliza uma chave eletromecânica que alterna a posição dos polos, impulsionada pela força de um campo magnético induzido pela corrente elétrica na bobina, cuja origem também está na sensibilização da célula fotoelétrica. Além disso, o princípio eletrônico envolve o controle eletrônico direto da passagem de corrente, proporcionando uma resposta mais rápida e precisa às variações de luminosidade. Assim, a interação desses princípios proporciona um controle preciso da iluminação em diferentes condições luminosas.

Figura 9 – Relé fotoelétrico



Fonte: (Ceigon, 2024)

2.1.5 LUMINÁRIAS

As luminárias, representada na Figura 10, desempenham um papel crucial na preservação das lâmpadas, prevenção contra vandalismo e insetos, enquanto simultaneamente otimizam a eficácia da iluminação. Nesse contexto, uma variedade de luminárias está disponível, cada uma com conjuntos ópticos distintos projetados para direcionar de maneira eficiente o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. O objetivo principal é iluminar seletivamente as áreas de interesse, garantindo um uso mais eficiente e direcionado da iluminação.

Figura 10 – Luminária Pública LED



Fonte: (Loja JL, 2024)

2.1.6 FIXAÇÃO NA REDE ELÉTRICA

O método predominante de fixação para a IP é, em sua maioria, realizado nos postes da rede de distribuição de energia elétrica das concessionárias. Essa fixação é

implementada utilizando parafusos ou cintas, variando conforme o tipo de poste, que pode ser do modelo duplo T ou circular (COPEL, 2012). Essa integração com a infraestrutura existente dos postes desempenha um papel fundamental na sustentação e estabilidade do sistema de IP, assegurando uma conexão eficiente e segura à rede elétrica.

2.2 SMART CITIES E SMART GRIDS

O termo “Smart Cities” tem sido amplamente empregado nas últimas décadas para destacar que o ambiente urbano representa um ponto crucial na revolução digital. A ideia subjacente é que a tecnologia tem o potencial de resolver questões complexas que permeiam a vida das pessoas na sociedade contemporânea (ULLAH, 2017). As Smart Cities podem ser conceptualizadas como ambientes nos quais diversas fontes de informação interagem de maneira sinérgica para resolver problemas de forma otimizada. Essa interação engloba desde sensores instalados em vias públicas até sistemas inteligentes de previsão de eventos, utilizando tecnologias como inteligência artificial e algoritmos avançados de deep learning e machine learning (SERBAN, 2020).

As aplicações no contexto das Smart Cities possuem uma amplitude significativa, abrangendo diversos setores da sociedade. Essa abrangência envolve áreas como saneamento básico, gestão de tráfego, IP, distribuição de energia elétrica, abastecimento de água, otimização de processos industriais, suporte jurídico, infraestrutura viária, monitoramento climático, práticas agrícolas, construção civil, gestão do varejo, entre outras frentes (PRIBYL *et al.*, 2019). A Figura 11 apresenta algumas áreas que são possíveis a implementação do conceito de Smart Cities.

Figura 11 – Aplicações envolvidas em Smart Cities



Fonte: (UNICAMP, 2024)

O conceito de Smart Cities fundamenta-se na convergência de conectividade, informação e inteligência em ambientes urbanos. No entanto, ao considerar a esfera da energia elétrica, é imperativo adotar uma perspectiva mais abrangente, indo além das fronteiras locais para incorporar uma escala nacional. Paralelamente ao conceito inovador desenvolvido para cidades inteligentes, emerge, no setor energético, a concepção de Smart Grid. Segundo a CPFL (2017), as Smart Grids representam sistemas avançados de transmissão e distribuição de energia elétrica, enriquecidos com recursos de Tecnologia da Informação. Tais sistemas são assim capacitados a atender de maneira eficiente e inovadora às demandas da sociedade contemporânea, contribuindo diretamente para o avanço do desenvolvimento sustentável.

2.3 SISTEMA DE TELEGESTÃO

O sistema de telegestão de IP emerge como uma solução inovadora para o gerenciamento remoto eficiente dos pontos de IP, proporcionando benefícios significativos à população. Essa abordagem visa otimizar a administração, reduzir custos e minimizar o consumo de energia. Suas principais funcionalidades incluem a capacidade remota de ligar, desligar e dimerizar lâmpadas, permitindo a medição precisa do consumo de energia elétrica e a detecção de falhas em tempo real. Além disso, destaca-se pela automação inteligente do controle da iluminação em espaços públicos como praças, parques, vias, pontes e viadutos, contribuindo para a segurança e bem-estar da comunidade. Segundo informações da (ABINEE, 2018), este sistema representa uma solução abrangente, transcendendo o simples controle remoto e consolidando-se como uma ferramenta valiosa para a modernização e aprimoramento dos serviços urbanos relacionados à IP.

A telegestão não apenas viabiliza o controle, medição e gerenciamento eficientes do parque de IP, mas também representa uma oportunidade para o desenvolvimento de uma infraestrutura de rede acessível pela internet. Essa perspectiva não só facilita a gestão remota dos pontos de iluminação, mas também se configura como um passo significativo rumo à construção de uma cidade inteligente. Ao permitir a distribuição estratégica da iluminação em todo o território urbano, conforme indicado pela (CONSTRUCT, 2018), a telegestão contribui para a criação de um ambiente urbano mais eficiente, sustentável e conectado, promovendo uma melhoria substancial na qualidade de vida dos cidadãos.

O sistema de telegestão é composto por uma sinergia de hardwares e softwares que possuem a capacidade de dimerizar os pontos luminosos, coletar coordenadas de GPS, desempenhar o papel de fotocélula convencional, identificar falhas, monitorar, controlar e medir não apenas a temperatura ambiente, mas também as grandezas elétricas da Rede de Iluminação e seus componentes. Além dessas funcionalidades, o sistema permite uma integração eficiente com um sistema de gerenciamento de IP, conforme destacado pela (ABINEE, 2018). Essa abordagem abrangente do sistema de telegestão reflete não

apenas sua complexidade técnica, mas também sua capacidade de fornecer um conjunto diversificado de informações e controle preciso, contribuindo assim para a eficiência e modernização do gerenciamento de iluminação urbana.

O Gateway/Concentrador desempenha um papel crucial no gerenciamento eficiente de dispositivos conectados em rede, além de facilitar a comunicação com o sistema de processamento e administração de informações provenientes da rede. Este equipamento desempenha um papel vital na integração e coordenação de dispositivos diversos, permitindo a comunicação eficaz entre eles e o sistema central de processamento, que por sua vez está localizado em servidores remotos.

Os softwares de gestão desempenham um papel fundamental ao viabilizar a operação e administração do sistema de telegestão, permitindo o controle abrangente de todos os dispositivos interconectados através do Centro de Controle de Operações via conexão Web. Além disso, oferecem a flexibilidade de controle por meio de dispositivos móveis, como smartphones, tablets e assistentes pessoais digitais, ampliando a acessibilidade e a eficácia na supervisão e gestão do sistema.

O dispositivo móvel de operação é um equipamento portátil dotado de capacidade para operar diretamente nos dispositivos conectados em rede. Ele também representa uma alternativa de contingência valiosa em caso de uma eventual falha do gerenciador de rede, garantindo assim a continuidade operacional e a manutenção da conectividade.

2.4 CIDADES INTELIGENTES

Serão abordadas diversas localidades que implementaram sistemas de telegestão na IP, seja como uma atividade central ou complementar. Essa análise destaca a relevância do estudo dessa inovadora tecnologia em escala global.

2.4.1 SAN DIEGO - ESTADOS UNIDOS

Este estudo de caso destaca a implementação bem-sucedida de luminárias LEDs com telegestão na cidade de San Diego, nos Estados Unidos. O projeto envolveu a substituição de aproximadamente três mil luminárias no centro da cidade, todas equipadas com sistemas de telegestão integrados. Essa transição resultou em uma significativa economia anual de cerca de 254 mil dólares para os cofres públicos e os cidadãos. Esses ganhos financeiros foram alcançados através da substituição eficiente das luminárias de vapor de sódio por LEDs, juntamente com a implementação de um perfil de dimerização específico (GE, 2015).

2.4.2 BRAȘOV - ROMÊNIA

A Flashnet, empresa vinculada ao grupo Engie, apresenta um estudo de caso realizado na cidade de Brasov, Romênia. Nesse projeto, o sistema de telegestão foi

integrado em cerca de 12 mil luminárias, englobando tanto luminárias HID (High-intensity Discharge lamp) quanto luminárias de decoração. A principal meta dessa iniciativa foi aprimorar a eficiência do sistema de IP, mantendo a integridade da infraestrutura existente. Para alcançar esse objetivo, optou-se por manter as luminárias originais, implementando apenas um sistema de dimerização. A comunicação adotada foi o PLC (Power Line Communication), um método que utiliza a estrutura de cabeamento do sistema de distribuição de energia elétrica (InteliLight, 2014), cuja arquitetura pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 – Arquitetura PLC (Brasov - Romênia)



Fonte: (InteliLight, 2014)

2.4.3 BELO HORIZONTE - MG

Belo Horizonte está consolidando sua posição no rol das cidades mais inteligentes do Brasil, ocupando a quarta posição no ranking de Connected Smart Cities no país (Urban Systems, 2023), graças à modernização do seu sistema de IP. Neste contexto, aproximadamente 180 mil luminárias já foram substituídas por LEDs, colocando a cidade entre as pioneiras a alcançar quase 100% de cobertura com essa tecnologia no seu parque de IP.

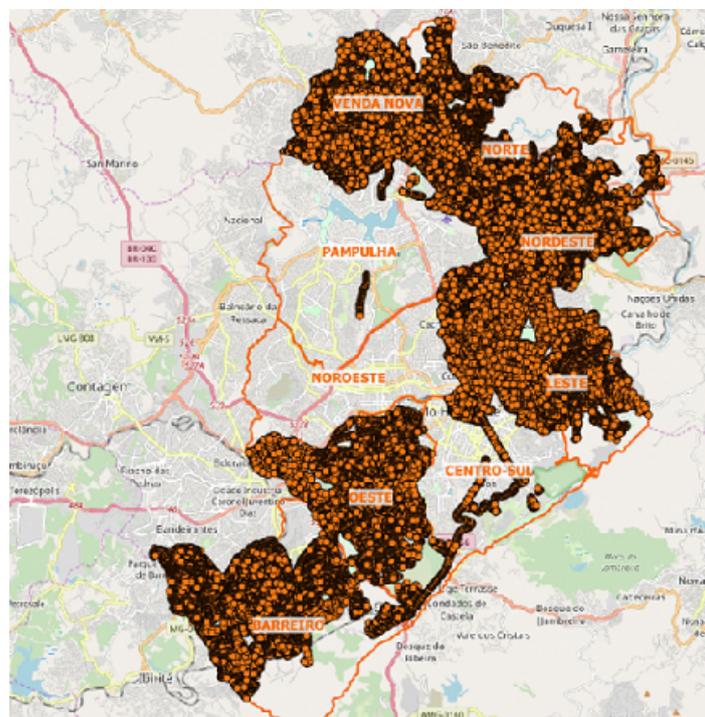
Na Figura 13, são destacadas as iniciativas voltadas para a busca da modernização urbana. A Figura 14 apresenta o mapeamento da substituição de 182 mil pontos de IP por LEDs, dos quais 26 mil são monitorados por sistemas de telegestão. Já a Figura 15 destaca a BH LAB, um laboratório que impulsiona a inovação, o desenvolvimento do ambiente urbano e a experimentação de novas tecnologias, com foco especial na IoT.

Figura 13 – Belo Horizonte SMART



Fonte: (Portal Belo Horizonte, 2019)

Figura 14 – ILUMINAÇÃO LED



Fonte: (Portal Belo Horizonte, 2019)

Figura 15 – IoT BHLab



Fonte: (Portal Belo Horizonte, 2019)

2.4.4 UBERLÂNDIA - MG

Em Uberlândia, a implementação do sistema de telegestão abrange atualmente 25% das luminárias, proporcionando uma interface integrada e online com o Centro de Controle Operacional. Isso viabiliza a monitorização eficaz do comportamento das luminárias, oferecendo um controle mais dinâmico e preciso sobre o sistema de iluminação urbana.

2.4.5 CURITIBA

Curitiba ocupa a segunda posição no ranking de Connected Smart Cities no Brasil (Urban Systems, 2023). O sistema de telegestão foi implementado nas principais vias de IP da cidade, visto que esses locais demandam um nível mais elevado de serviço. Atualmente, 46.114 luminárias, representando aproximadamente 29,35% do Parque de IP, estão equipadas com o Sistema de Telegestão (Prefeitura Municipal de Curitiba, 2021).

2.5 NOVAS TECNOLOGIAS

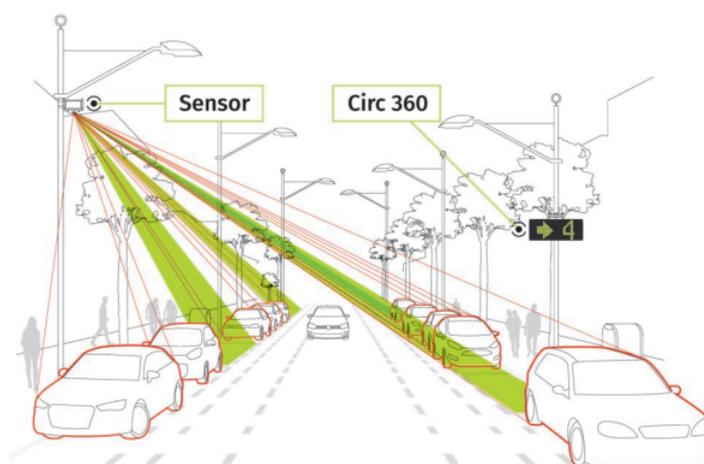
A iluminação não é apenas um serviço essencial na vida das pessoas, mas os sistemas de telegestão estão desbravando novas fronteiras. Com dispositivos de processamento incorporados às luminárias e conectados a outros dispositivos e a um sistema principal de gestão, surgem oportunidades inexploradas para o desenvolvimento de produtos e serviços

inovadores. Essa evolução transcende setores variados, como a implementação de câmeras de vigilância para aprimorar a segurança pública, contribuindo para a mobilidade urbana ao disponibilizar estações de recarga para veículos elétricos e, no âmbito social, oferecendo acesso gratuito à Wi-Fi, entre outras possibilidades.

2.5.1 BAD HERSFELD - ALEMANHA

A cidade de Bad Hersfeld, na Alemanha, implementou um sistema inovador para aprimorar a mobilidade urbana por meio da tecnologia. Este sistema, integrado aos postes de IP, possui a capacidade de identificar a disponibilidade de vagas para estacionamento de veículos, fornecendo informações precisas aos condutores. Essa abordagem não apenas simplifica as manobras de estacionamento, mas também contribui para a redução do tráfego nas vias, promovendo uma eficiente gestão do estacionamento na cidade.

Figura 16 – Estacionamento Inteligente

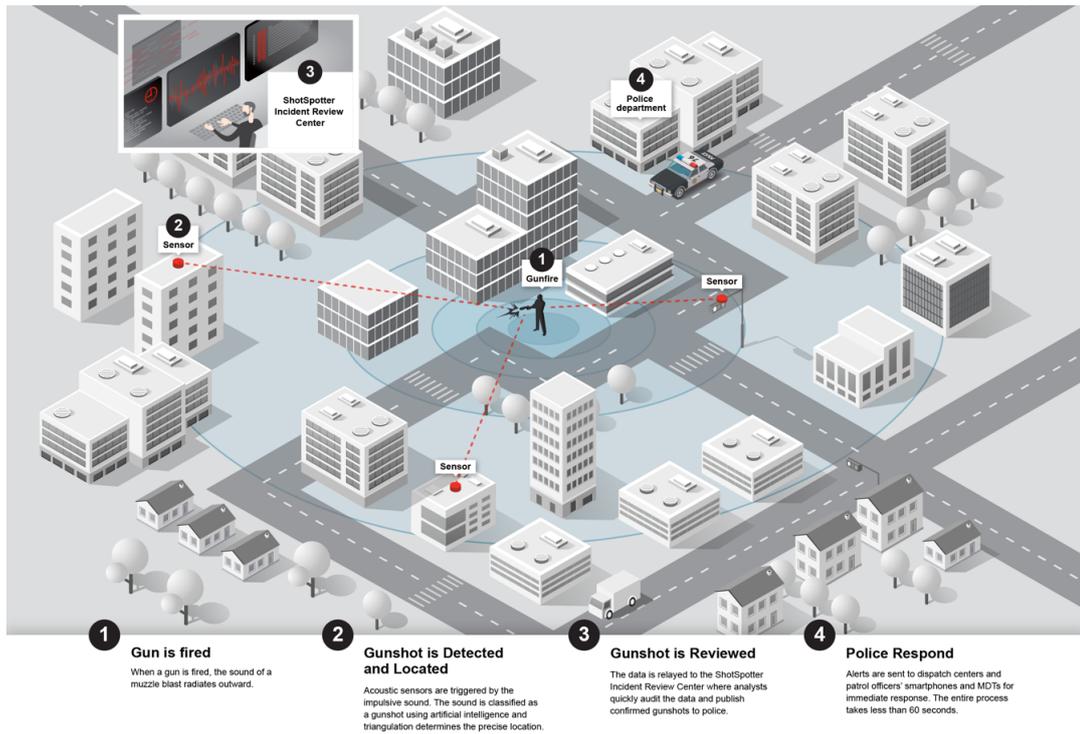


Fonte: (Clevertiti, 2020)

2.5.2 LAS VEGAS - ESTADOS UNIDOS

Um projeto piloto realizado em Las Vegas, nos Estados Unidos, obteve sucesso ao reduzir aproximadamente 26% dos crimes violentos em uma área específica. Essa conquista foi viabilizada por meio da implementação de um sistema avançado de detecção e localização de disparos de armas de fogo, que otimizou e agilizou as operações da polícia local (Signal Cleveland, 2022). A instalação dos sensores, que podem ser posicionados tanto junto às luminárias quanto em outros pontos estratégicos, revelou-se uma estratégia eficaz para fortalecer a segurança na região.

Figura 17 – Shotspotter



Fonte: (Signal Cleveland, 2022)

3 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO EM TELEGESTÃO

Neste capítulo, será apresentada uma abordagem abrangente sobre as tecnologias e conceitos fundamentais empregados na criação de um sistema de telegestão, desde a comunicação individual com cada luminária até a intercomunicação entre elas. Serão exploradas as diversas modalidades de comunicação sem fio, investigando suas arquiteturas, modulações e características distintivas. Adicionalmente, é realizada uma análise comparativa entre diferentes sistemas de comunicação sem fio de longo alcance, com o objetivo de avaliar a tecnologia mais apropriada para a implementação em sistemas de iluminação inteligente.

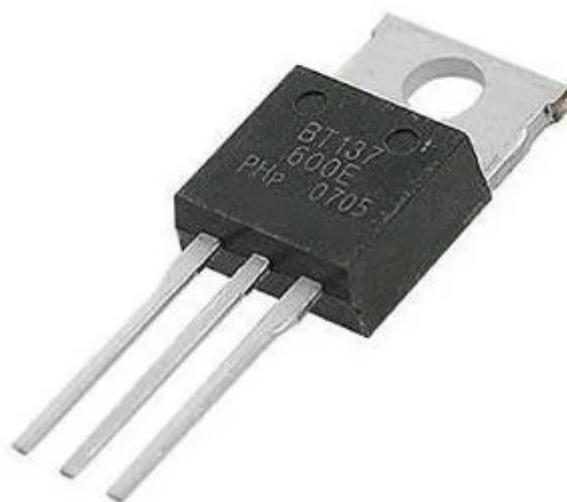
3.1 TÉCNICAS DE CONTROLE DE LUMINOSIDADE

A comunicação destinada à luminária tem como propósito efetuar o controle da mesma, possibilitando a realização de operações como dimerização, que consiste na modificação da intensidade luminosa fornecida pela luminária ao ambiente. Em grande parte das situações, as luminárias de iluminação são capazes de operar sem a necessidade de um sistema de controle inteligente, funcionando apenas com uma fotocélula convencional. No entanto, tais luminárias permitem a integração de um dispositivo externo mediante determinadas padronizações.

3.1.1 TRIAC

O dispositivo conhecido como triac, ilustrado na Figura 18, desempenha um papel crucial ao controlar o corte da tensão na linha de corrente alternada (CA) para regular a tensão RMS, viabilizando assim a dimerização das luminárias. Esses dispositivos podem ser classificados em duas categorias principais: fase de avanço e fase reversa.

Figura 18 – Triac

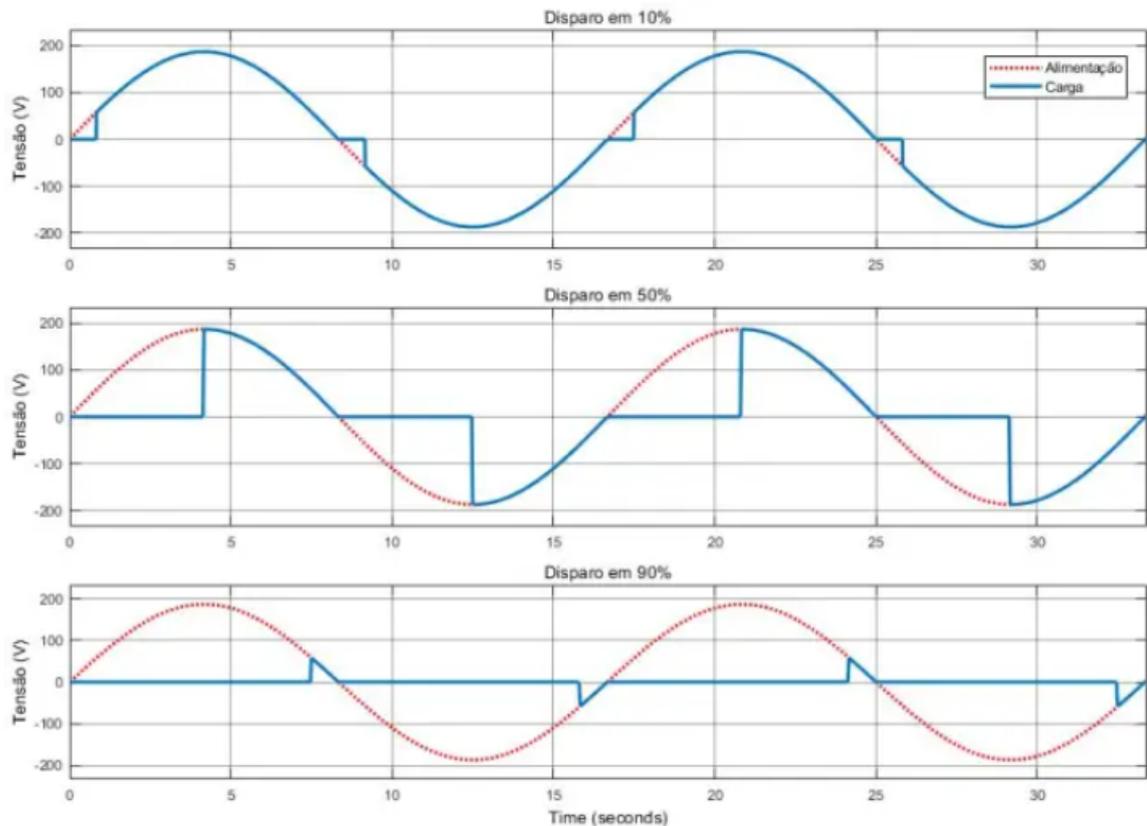


Fonte: (Eletrogate, 2024)

Na configuração de avanço, o triac é acionado no início da metade positiva do ciclo de alimentação de CA, possibilitando que uma parte ajustável da onda seja conduzida para alimentar a carga. Por outro lado, na configuração de atraso, o triac é acionado na metade negativa do ciclo de CA, o que também permite a condução de uma porção variável da onda.

O funcionamento do triac é semelhante a um interruptor, onde a velocidade de reação influencia diretamente no fluxo de energia. Quanto maior for o tempo de resposta, menor será o fluxo de energia e, conseqüentemente, o brilho da lâmpada será reduzido. A eficiência do sistema pode ser avaliada pela rapidez com que o interruptor responde. Nota-se que uma resposta rápida do interruptor resulta em uma maior quantidade de energia perdida. Na figura a seguir é demonstrado o funcionamento do TRIAC.

Figura 19 – Forma de Onda do Triac



Fonte: (Eletrogate, 2024)

Além disso, é importante ressaltar que este sistema apresenta uma desvantagem significativa, que é a geração de interferências eletromagnéticas. Essas interferências podem deteriorar equipamentos eletrônicos e seus componentes próximos ao dimmer ao longo do tempo, impactando negativamente no desempenho e na vida útil desses dispositivos.

3.1.2 DIMANIZAÇÃO DE 0-10V

A padronização 0-10V empregada em sistemas de iluminação segue as diretrizes estabelecidas pela norma ANSI C137.1-2019. Este padrão, reconhecido por sua simplicidade, é amplamente utilizado para a dimerização de luminárias de diversos tipos. Para controlar a intensidade luminosa de uma luminária, é necessário aplicar um sinal analógico na faixa de 0 a 10V externamente, o que resulta em uma emissão de luz proporcional à magnitude do sinal fornecido. Esse método oferece uma maneira eficaz e direta de gerenciar a luminosidade, tornando-o uma escolha comum em diversos contextos de iluminação.

Alguns sistemas de controle ainda empregam uma faixa de 1 a 10V, ampliando assim a referência inferior. Esses sistemas são comumente denominados de "current sink",

pois o driver da luminária estabelece uma fonte de tensão de 10V, enquanto o controlador drena a corrente necessária para reduzir a tensão ao nível desejado. Esta abordagem difere do padrão 0-10V, onde o controlador atua como fonte de tensão e a corrente segue no sentido oposto, caracterizando-o como "current source".

A representação do funcionamento dos dimmers 0-10V e 1-10V pode ser observada na Figura 20. Em ambos os casos, a tensão de 10V corresponde à luminária ligada, enquanto a tensão de 0V indica que o dimmer 0-10 está desligado. No caso do dimmer 1-10V, a tensão mínima representa a menor intensidade de iluminação.

Figura 20 – Dimmer 0-10V e 1-10V



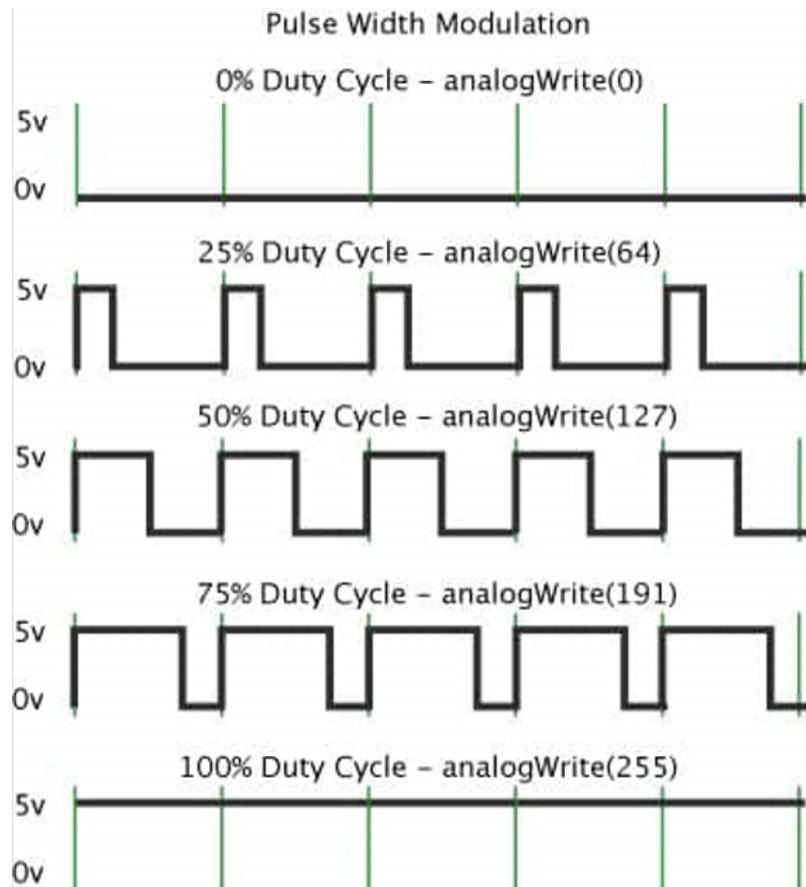
Fonte: (Lumos Controls, 2021)

3.1.3 DIMINIZAÇÃO POR PWM

A técnica de dimerização por PWM (Modulação por Largura de Pulso) é empregada quando se deseja ajustar o brilho de um LED. Isso é alcançado ao controlar o nível de corrente que flui para o LED, alternando rapidamente entre ligado e desligado em uma frequência tão alta que o olho humano não consegue detectar. Essa variação é realizada ajustando a quantidade de tempo que o pulso permanece "ligado" durante cada ciclo. Portanto, o brilho do LED é diretamente proporcional à fração de tempo em que ele permanece ligado durante o período total de cada ciclo.

A forma de onda de um sinal PWM é apresentada na Figura 21. Nela, é possível observar que, conforme a porcentagem do ciclo de trabalho, uma tensão de 5V é aplicada durante o período correspondente a essa porcentagem. Assim, o ciclo de trabalho representa o tempo durante o qual a tensão permanece em nível alto, 5V, dentro de um período completo.

Figura 21 – Forma de Onda do PWM



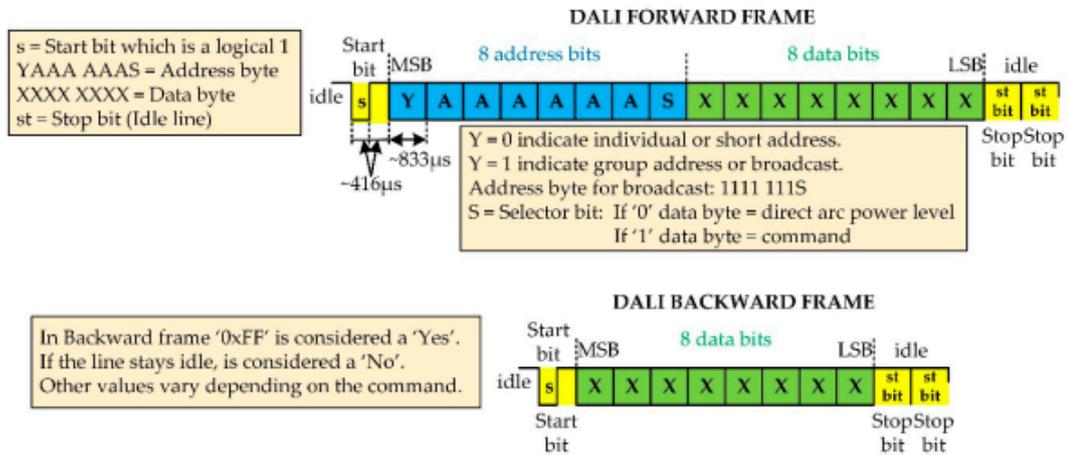
Fonte: (Lumos Controls, 2021)

3.1.4 DIMINUIÇÃO DALI

A técnica de dimerização DALI da luminária é realizada através da comunicação entre o controlador e a própria luminária, operando a uma taxa de transmissão de 1200 bits por segundo (bit/s), e empregando a codificação Manchester. Nessa codificação, o bit 1 é caracterizado por um nível lógico baixo na primeira metade do intervalo de tempo e um nível lógico alto na segunda metade, enquanto o bit 0 segue o padrão oposto (ADAM, 2019).

A Figura 22 ilustra o processo de troca de informações bit a bit, apresentando o padrão de pacote de dados utilizado. Notavelmente, apenas um par diferencial de cabos é necessário para transmitir todas as informações necessárias para configurar um grupo de luminárias. Cada luminária possui um endereço único, permitindo a inclusão de até 64 luminárias em um único canal de comunicação (CMD Ltd, 2019).

Figura 22 – Pacote de informações DALI



Fonte: (ADAM, 2019)

3.2 COMUNICAÇÃO PARA TELEGESTÃO COM FIO

3.2.1 DALI

Como discutido na seção anterior, o padrão DALI representa um protocolo de comunicação essencial para interagir com as luminárias. No entanto, seu uso não se limita apenas ao controle individual das luminárias, ele também possui a capacidade de gerenciar grupos de luminárias e receber dados de sensores integrados a elas. Isso se deve à sua natureza bidirecional como canal de comunicação (DiiA, 2020).

3.2.2 PLC

A comunicação por Linha de Energia (PLC), ou Power Line Communication, é uma tecnologia que aproveita a infraestrutura já existente da rede elétrica para a transmissão e recebimento de dados. Essa abordagem oferece uma vantagem significativa em termos de custo em comparação com outras redes, devido ao uso compartilhado dos cabos de energia. A principal vantagem reside no fato de que os sinais de comunicação podem ser transmitidos pelos mesmos cabos que são utilizados para a distribuição de energia elétrica. Essa sinergia resulta em uma implementação mais econômica e eficiente da comunicação de dados.

De forma a representar um sistema que usa PLC para comunicação, a Figura 23 é apresentada a seguir, nessa figura é evidenciada a interconexão dos componentes do sistema PLC.

Figura 23 – Sistema de PLC

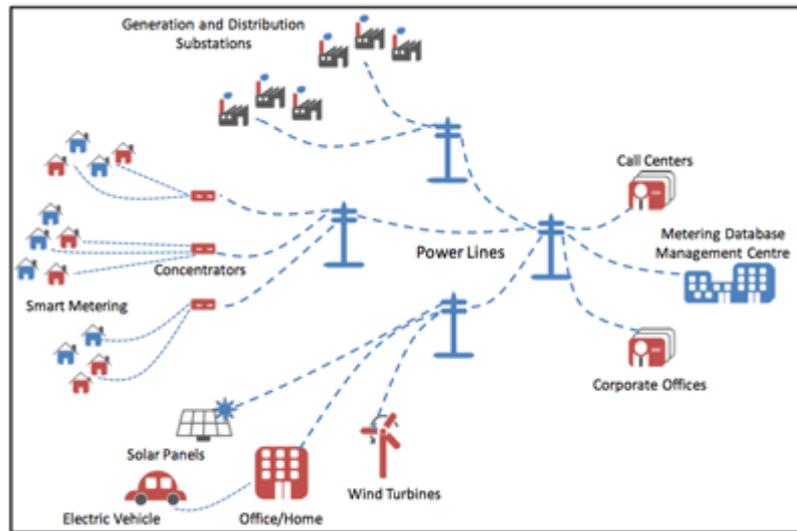


Figure 3: The Smart Grid

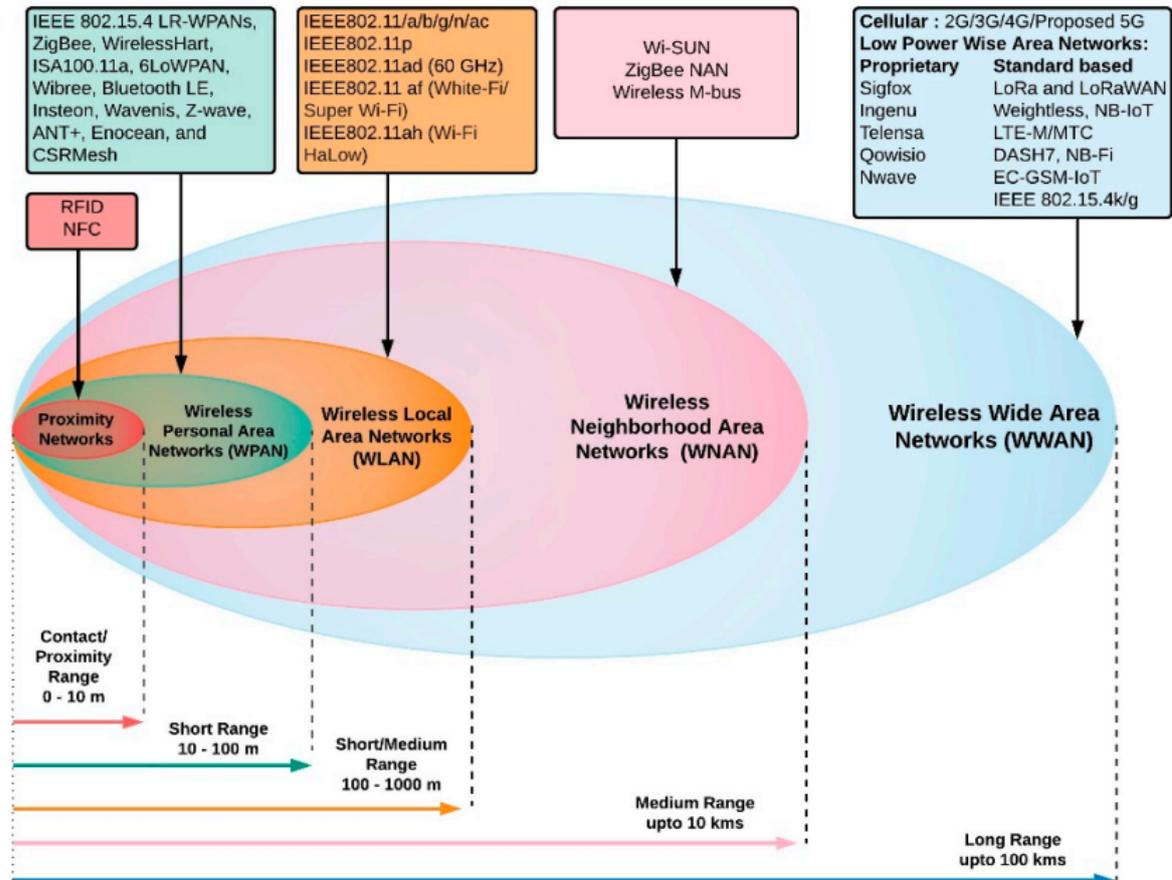
Fonte: (EE Times, 2024)

3.3 COMUNICAÇÃO PARA TELEGESTÃO SEM FIO

Sistemas de comunicação sem fio desempenham um papel fundamental em âmbito global, abrangendo uma diversidade de tipos, protocolos, aplicações, especificações e topologias. Nesta seção, serão apresentadas algumas dessas redes, juntamente com suas respectivas aplicações e alcance.

A Figura 24 apresenta os diversos tipos de comunicação mais comumente utilizados. Para classificar as redes de comunicação sem fio, este trabalho as divide em três categorias as redes de curto alcance, médio alcance e de longo alcance.

Figura 24 – Redes de Comunicação



Fonte: (CHAUHARI, 2020)

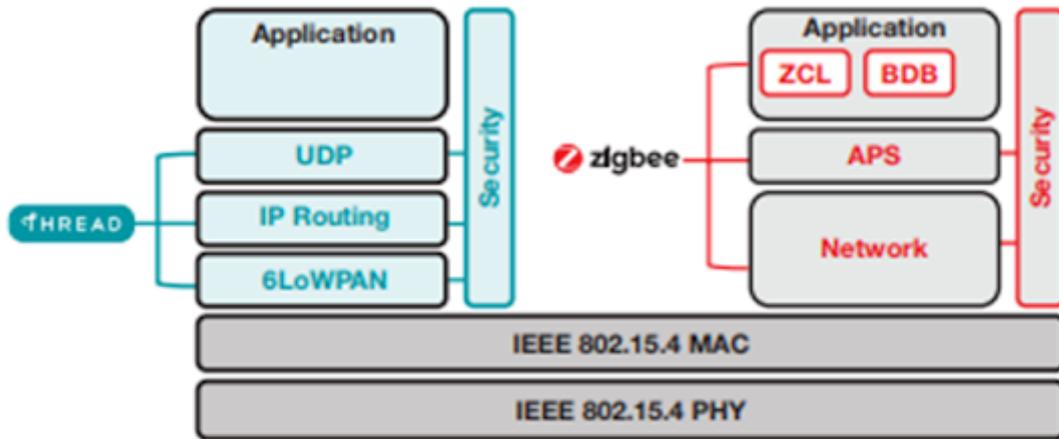
3.3.1 COMUNICAÇÃO DE CURTO ALCANCE

3.3.1.1 IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 é uma tecnologia de comunicação de curto alcance e baixo tráfego de dados, utilizada em redes Personal Area Network (IEEE, 2020). Este padrão define as camadas física e de Controle de Acesso ao Meio como elementos básicos de padronização para essas redes, sendo mantido pelo grupo de trabalho IEEE 802.15.4.

O padrão IEEE 802.15.4 serve como base para diversas tecnologias de comunicação, incluindo Wi-SUN, Zigbee, WirelessHART, ISA100.11a, 6LoWPAN, MiWi, Thread e SPAP. Cada uma dessas tecnologias é responsável pela padronização das camadas superiores às estabelecidas pelo IEEE 802.15.4, conforme citado por (PASOLINI *et al.*, 2019) e apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Padrão IEEE 802.15.4 nas Tecnologias Zigbee e Thread



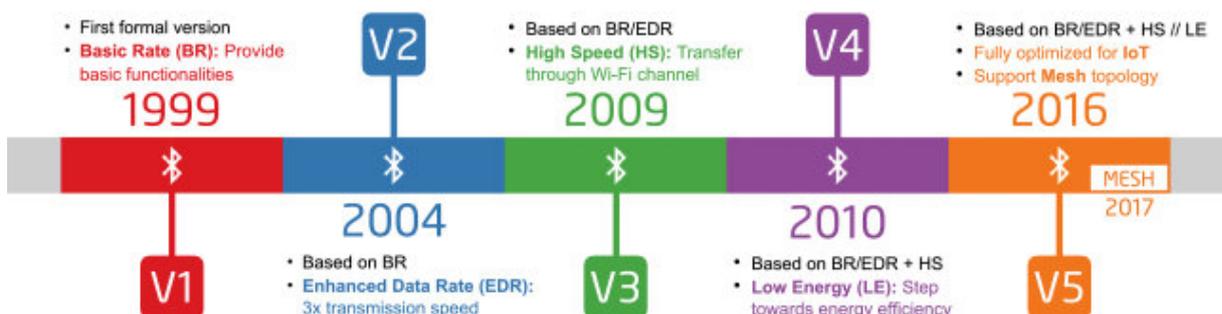
Fonte: (FERNANDO, 2024)

3.3.1.2 BLUETOOTH

O Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio que tem sido utilizada desde o lançamento da versão 1.0, nos anos 2000, e continua em constante evolução. É considerado um dos meios de comunicação mais difundidos globalmente, devido à sua popularização em smartphones e dispositivos de áudio, como fones de ouvido e caixas de som portáteis (PASOLINI *et al.*, 2019).

A partir da Figura 26, é possível observar a evolução do Bluetooth, que, em 2014, lançou a versão 4.2 com suporte para a IoT. A versão 5 do Bluetooth, lançada posteriormente, foi otimizada especificamente para melhorar a funcionalidade e a eficiência na utilização em aplicações de IoT.

Figura 26 – Evolução do Bluetooth



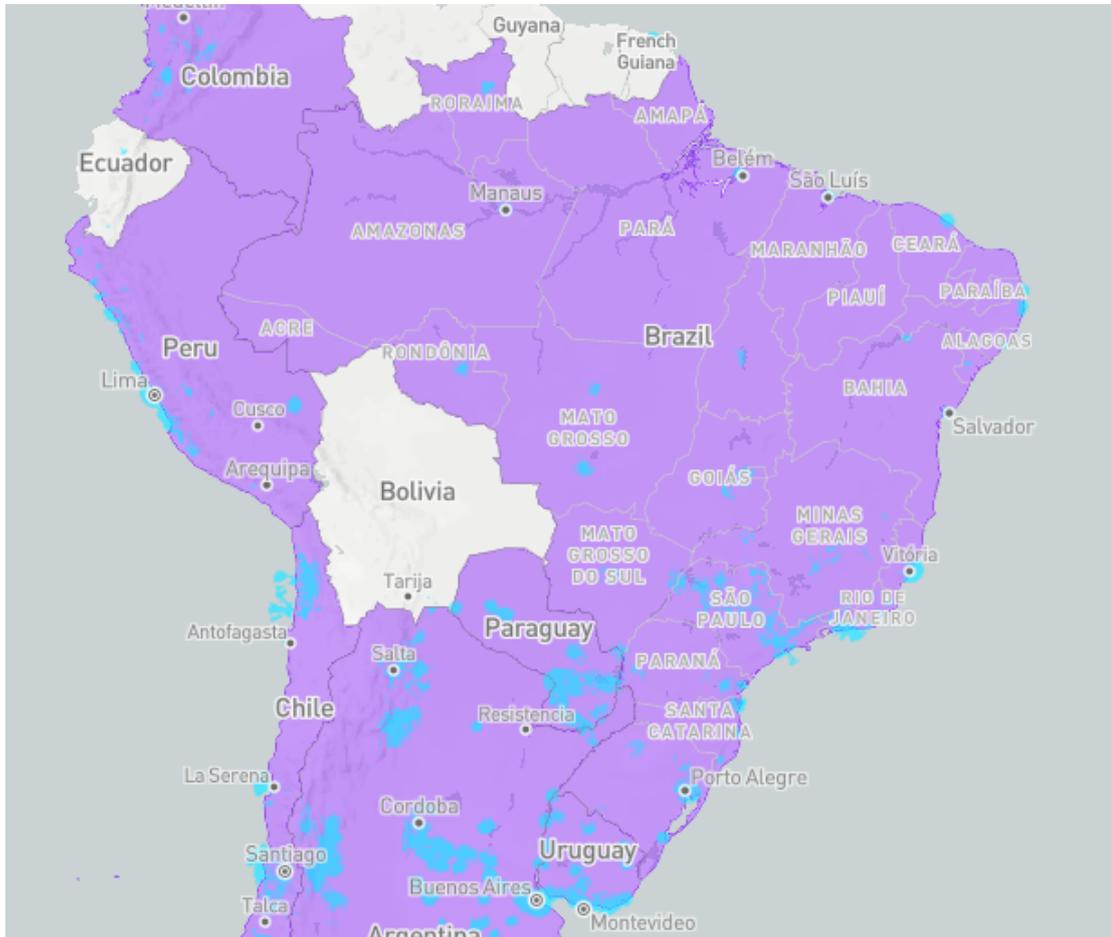
Fonte: (SREENIVAS, 2020)

3.3.2 COMUNICAÇÃO DE LONGO ALCANCE

3.3.2.1 SIGFOX

Sigfox é uma rede de comunicação sem fio de longo alcance, gerenciada por operadoras de rede de forma semelhante às redes celulares. No Brasil, a operação é realizada pela WND Brasil, que atualmente oferece cobertura em algumas regiões, conforme indicado pelas áreas em azul na Figura 27. Além disso, as áreas em roxo representam as regiões do país onde a implementação está em fase de desenvolvimento.

Figura 27 – Cobertura da Sigfox no Brasil



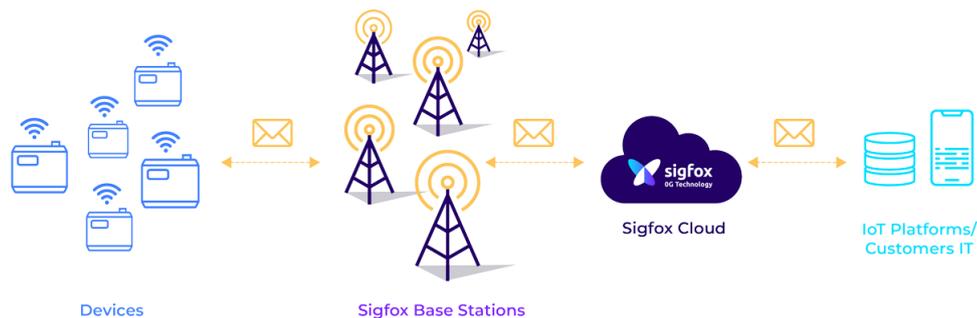
Fonte: (SIGFOX, 2024)

O modelo de negócio da Sigfox é semelhante ao das operadoras de telefonia celular, cobrando uma taxa mensal por uso, com diferentes planos disponíveis conforme o número de mensagens diárias. A modulação utilizada pela Sigfox é a UNB (Ultra-Narrow Band), que opera com uma largura de banda estreita de 100 Hz e uma baixa taxa de transmissão, variando entre 100 e 600 bps. Devido a essas características, a rede é particularmente indicada para a transmissão de pequenos pacotes de dados, como os gerados por sensores.

Isso faz com que a Sigfox seja uma escolha ideal para aplicações de IoT que necessitam de comunicação eficiente e de baixo custo (LAVRIC; PETRARIU; POPA, 2019).

A arquitetura da rede Sigfox é em estrela, onde os dados são transmitidos dos nós até as estações rádio base, que por sua vez os enviam aos servidores privados da Sigfox via internet. Após essa transmissão, é possível capturar esses dados conectando-se ao servidor Sigfox, permitindo sua utilização em plataformas IoT. Esse processo está representado na Figura 28.

Figura 28 – Arquitetura da SigFox



Fonte: (SIGFOX, 2024)

3.3.2.2 WEIGHTLESS

O padrão de comunicação Weightless, desenvolvido pelo Weightless-SIG (Special Interest Group), apresenta três variantes distintas de LPWAN (Low Power Wide Area Network). Cada variante possui suas próprias especificações e características, permitindo a operação tanto em espectros licenciados quanto não licenciados (STANIEC, 2020).

Uma das principais vantagens do padrão Weightless é seu caráter aberto, eliminando a necessidade de pagamento de royalties ou a utilização de chips proprietários. Essa abertura facilita a adoção e implementação da tecnologia, proporcionando uma solução econômica e acessível para diversas aplicações em redes IoT. A seguir, serão apresentadas as três variantes do padrão Weightless:

- **Weightless-W:** Este padrão opera no espectro de comunicação para TV e utiliza uma topologia em estrela. É capaz de suportar diferentes tipos de modulação e taxas de transmissão, que podem variar entre 1 kbps e 10 Mbps. O alcance pode chegar a 5 km entre emissor e receptor, dependendo das condições climáticas e geográficas. Além disso, existem opções para operar nas bandas ISM; contudo, devido ao compartilhamento de banda com a TV, a disponibilidade pode ser limitada em algumas regiões.

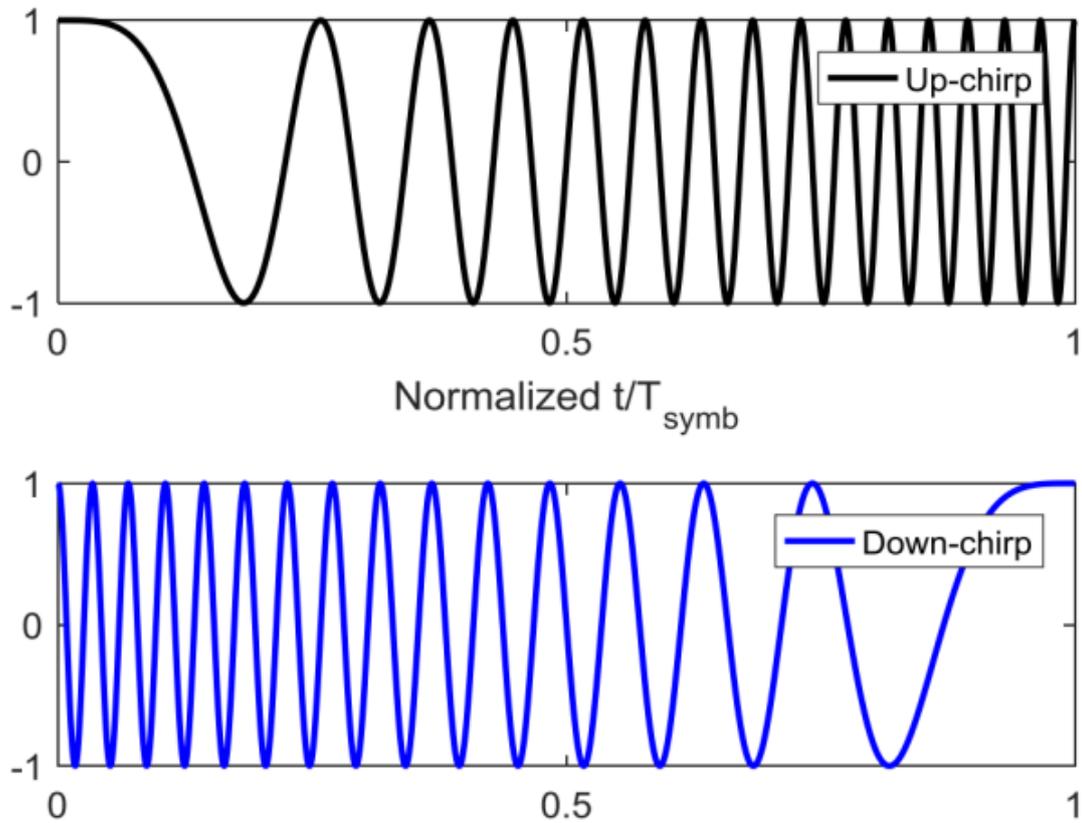
- **Weightless-N:** Este padrão é muito semelhante ao Sigfox, com modulação baseada em UNB (Ultra Narrowband). No entanto, oferece apenas comunicação unidirecional, dos dispositivos para a estação base, sem possibilidade de downlink. A taxa de transmissão é de 100 bps.
- **Weightless-P:** Este é o padrão mais utilizado de Weightless, devido à sua operação em bandas não licenciadas, comunicação bidirecional e baixo consumo de energia (STANIEC, 2020). Ele utiliza dois principais tipos de modulação: GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) e QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). A taxa de transmissão varia entre 200 bps e 100 kbps, e opera com canais de banda estreita de 12,5 kHz, resultando em um uso relativamente menor do espectro de frequência em comparação com outros padrões.

3.3.2.3 LORA

LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio que se destaca pela otimização no consumo de energia, alcance e eficiência no tráfego de dados. Desenvolvida e detida pela empresa Semtech, essa tecnologia exige que todos os chips que processam o sinal transmitido sejam licenciados pela Semtech, devido aos direitos de propriedade intelectual sobre a tecnologia (SEMTECH, 2015).

A modulação utilizada para transmitir o sinal em LoRa é uma derivação do Chirp Spread Spectrum. Esse padrão implementa fatores de espalhamento ortogonais, permitindo a alteração da taxa de transmissão em troca de potência ou alcance da rede, otimizando seu desempenho. Para ilustrar a modulação empregada, a Figura 29 é apresentada. Nota-se que, para cada símbolo transmitido, há um incremento ou decremento na frequência de transmissão, mantendo a banda de variação fixa. Quando ocorre um incremento, é denominado Up Chirp, e quando há um decremento, é chamado de Down Chirp.

Figura 29 – Up/Down Chirp na Modulação LoRa



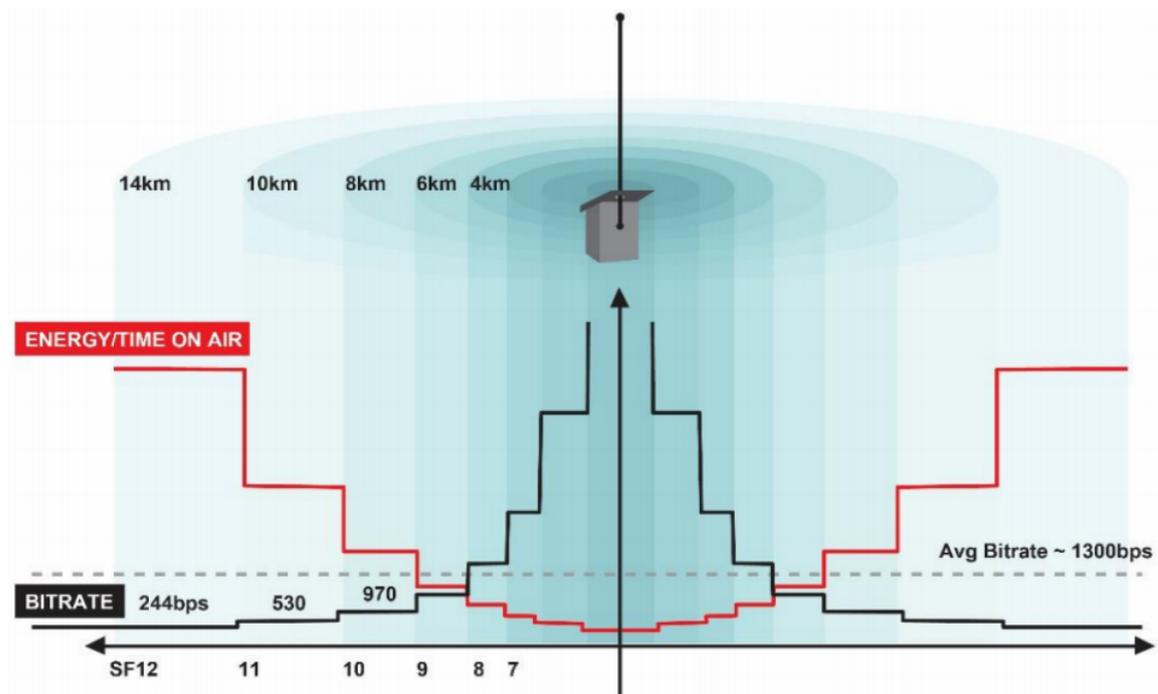
Fonte: (FIALHO; AZEVEDO, 2018)

3.3.2.3.1 LoRaWAN

LoRaWAN é um protocolo de comunicação que utiliza a modulação LoRa como base. Definido pela LoRa Alliance, uma associação de empresas, o protocolo tem como objetivo padronizar a rede, tornando-a interoperável independentemente do provedor e fabricante (ALLIANCE, 2015).

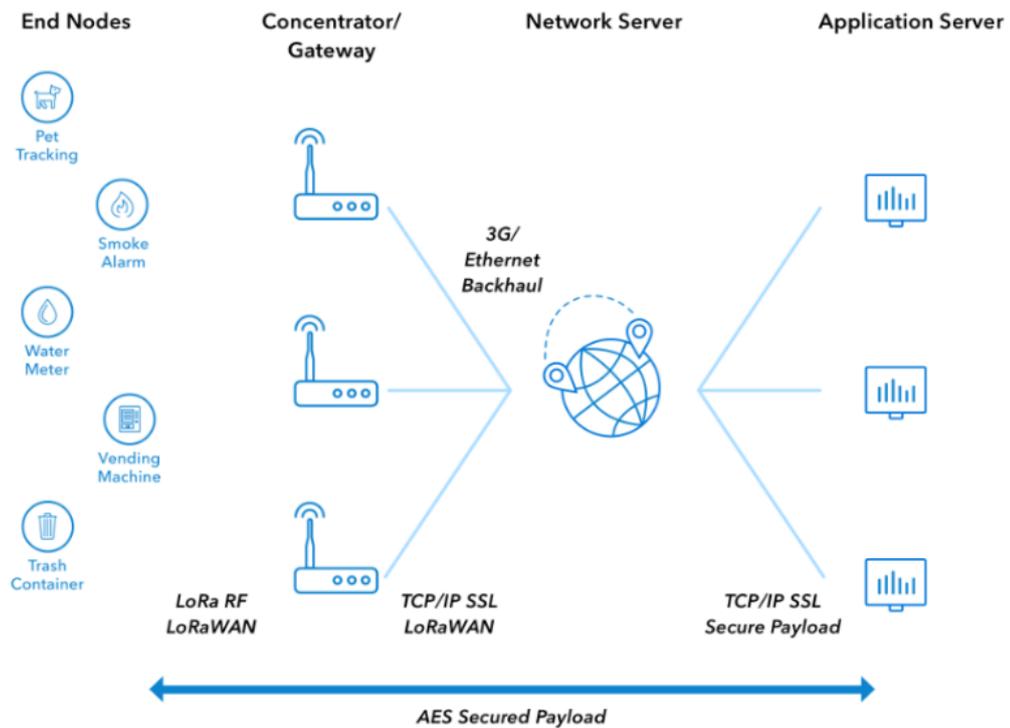
A arquitetura de rede utilizada no LoRaWAN é do tipo estrela. Nessa arquitetura, os dispositivos enviam mensagens para os Gateways (concentradores) via Rádio Frequência. Esses Gateways, por sua vez, necessitam de um link de acesso (backhaul) ao servidor de rede, que disponibiliza as informações ao servidor de aplicação, onde os dados são processados e utilizados conforme necessário. A arquitetura desta solução é ilustrada na Figura 31, que apresenta os quatro elementos principais descritos a seguir e suas conexões.

Figura 30 – Relação de alcance, taxa de transmissão e SF



Fonte: (SEMTECH, 2015)

Figura 31 – Arquitetura LoRaWAN

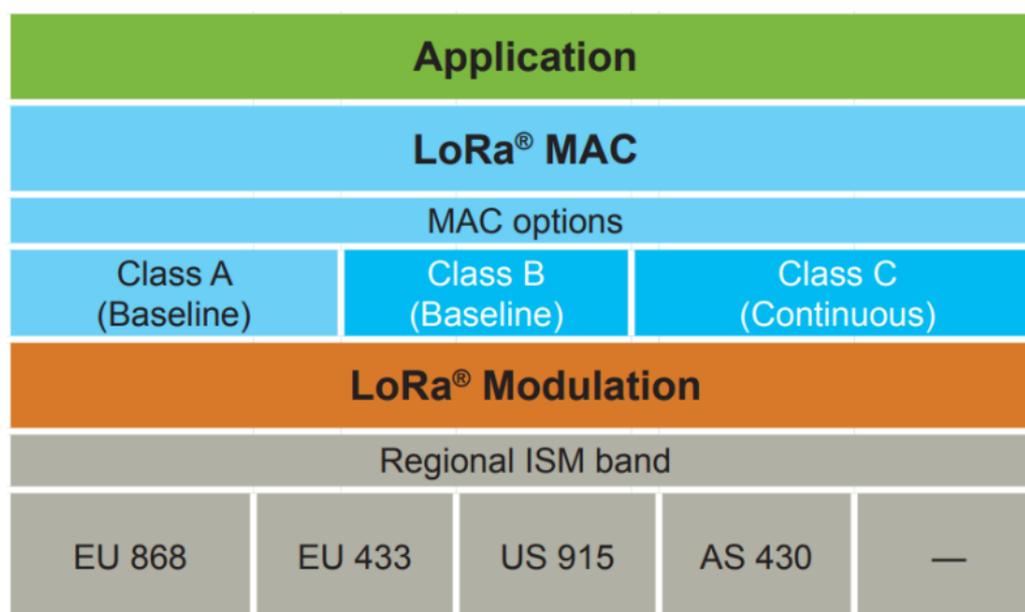


Fonte: (TTN, 2020)

- **End Nodes:** Dispositivos eletrônicos capazes de realizar ações específicas, como a leitura de dados e outras funcionalidades.
- **Gateway:** Rádio concentradores que recebem as mensagens dos dispositivos e as encaminham ao servidor de rede, ou enviam mensagens do servidor de rede aos dispositivos.
- **Network Server:** Servidor de rede que recebe as mensagens dos dispositivos encaminhadas pelos Gateways e envia cada dado para a aplicação correspondente, realizando a comunicação bidirecional.
- **Application Server:** Servidor de aplicação responsável por utilizar os dados recebidos de forma significativa, processando e aplicando as informações conforme necessário.

A rede LoRa é um sistema de comunicação de longo alcance e baixo tráfego de dados, caracterizado por seu baixo custo de implantação e utilização. Operando no espectro de frequência ISM, ou seja, em espectro não licenciado, não requer pagamento de taxas para seu uso. Embora a camada física seja definida pela tecnologia LoRa, o protocolo LoRaWAN exerce grande influência em aspectos como arquitetura, capacidade da rede, consumo de energia, segurança, qualidade de serviço, entre outros (ALLIANCE, 2015). A Figura 32 apresenta as camadas do LoRaWAN, desde a aplicação até a camada de acesso físico, incluindo tipo de modulação e transmissão.

Figura 32 – Camadas LoRaWAN



Fonte: (ALLIANCE, 2015)

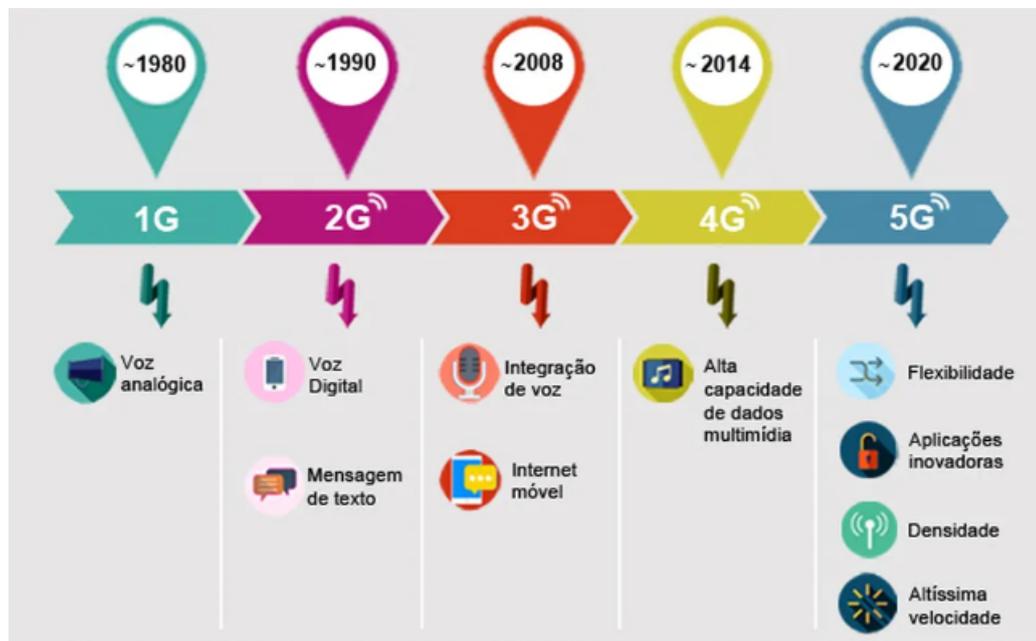
3.3.2.4 REDES CELULARES

As redes celulares são redes de comunicação sem fio com presença em cerca de 93,44% do território brasileiro (ANATEL, 2024). Estas redes são operadas por companhias que detêm a infraestrutura de rede e utilizam frequências em bandas licenciadas, exclusivas para este tipo de comunicação. Devido à vasta cobertura em áreas habitadas, as redes celulares podem ser uma das opções mais atrativas para a conexão da IP.

No entanto, o elevado número de conexões necessárias pode tornar o custo proibitivo para os operadores do sistema de IP, exigindo uma análise cuidadosa no projeto de implantação. Sendo essencial considerar esses custos no planejamento para garantir a viabilidade econômica do projeto.

As tecnologias atuais disponíveis nas operadoras incluem 2G, 3G, 4G e 5G, sendo possível a utilização de cada uma delas para a conexão e controle da IP. Cada tecnologia oferece diferentes capacidades e características que podem ser aproveitadas conforme as necessidades específicas do projeto de iluminação. Na Figura 33, são apresentadas algumas das características das redes de celulares.

Figura 33 – Evolução das Redes de Celulares



Fonte: (G1, 2024)

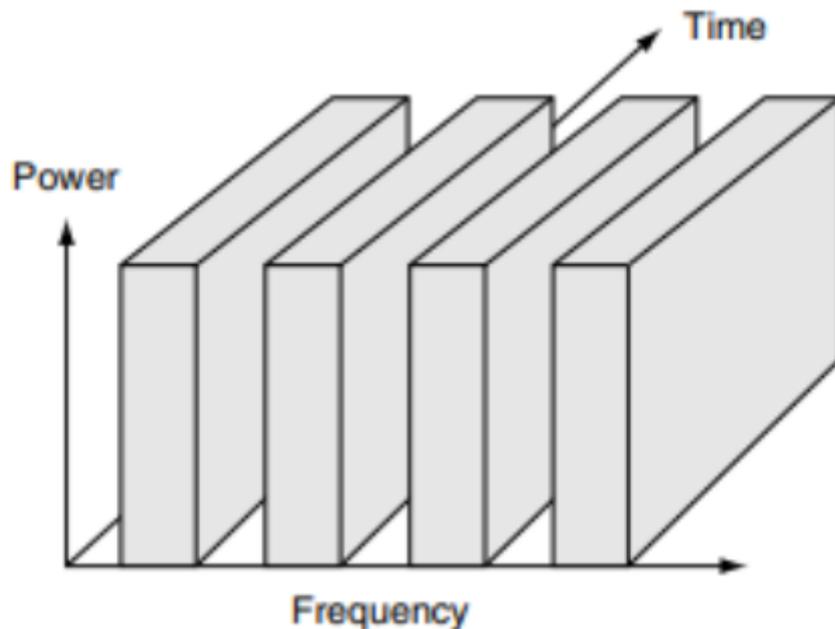
3.3.2.4.1 Primeira Geração (1G)

A primeira geração de tecnologia sem fio começou a ser introduzida no início da década de 1980 e permaneceu em uso até o surgimento da 2G, que a substituiu. Essa geração deu início à rede móvel de telecomunicações, fornecendo serviços de voz através

de transmissão analógica. A tecnologia utilizada era a Frequency Division Multiple Access (FDMA), uma técnica que atribui canais individuais aos usuários, permitindo o acesso múltiplo por divisão de frequência (CHEN, 2004).

Na Figura 34, observa-se que a cada usuário é alocado um único canal de frequência, sendo que cada canal é atribuído sob demanda aos assinantes que solicitam o serviço. Durante uma chamada, nenhum outro usuário pode compartilhar a mesma banda de frequência, garantindo assim a exclusividade do canal para o usuário em comunicação.

Figura 34 – Estrutura FDMA

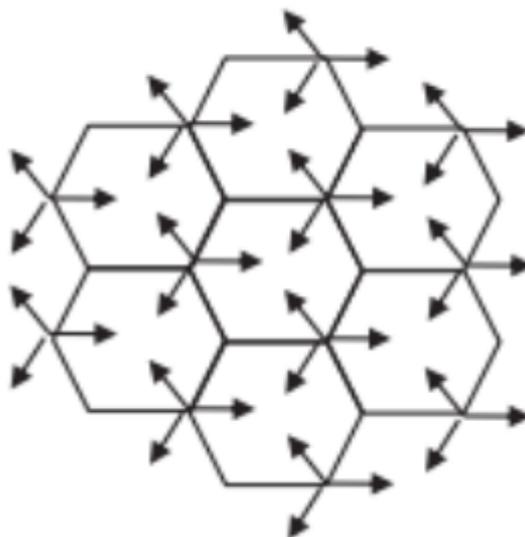


Fonte: (CHEN, 2004)

Além disso, havia a tecnologia conhecida como Advanced Mobile Phone System (AMPS), que utilizava sinal analógico e modulação FDMA. A estrutura celular do AMPS permitia a reutilização múltipla de frequências em células distintas. Com a separação entre células utilizando o mesmo conjunto de portadoras, era possível melhorar a qualidade dos sinais a um nível em que não interferissem entre si (WILSON; K.; BIGLIERI, 2016).

A Figura 35 apresenta a representação deste sistema, ilustrando como a separação das células possibilita a reutilização eficiente das frequências e a redução da interferência.

Figura 35 – Estrutura AMPS



Fonte: (WILSON; K.; BIGLIERI, 2016)

3.3.2.4.2 Segunda Geração (2G)

A tecnologia 2G surgiu devido ao grande crescimento do mercado de telefones celulares e às limitações do 1G, que utilizava sinal analógico. Introduzida em 1990, a 2G permitiu o uso de serviços de dados em baixa velocidade de transmissão em comparação ao 1G. Um grupo de estudos denominado Groupe Spécial Mobile, posteriormente renomeado para Global System for Mobile Communication (GSM), desenvolveu um dos padrões digitais da segunda geração, conhecido mundialmente por utilizar o espectro disponível de forma mais eficiente (CAVALCANTI, 2018).

Com a digitalização do sinal, a 2G proporcionou uma melhoria significativa na qualidade das ligações de voz e introduziu a possibilidade de envio de mensagens curtas de texto (SMS). Diversas tecnologias foram utilizadas nessa geração, incluindo a Time Division Multiple Access (TDMA), que permitiu uma utilização mais eficiente do espectro de frequência, permitindo que múltiplos usuários compartilhassem o mesmo canal sem interferência significativa.

O CDMA IS-95 é uma tecnologia que utiliza uma técnica baseada na "propagação" do espectro, permitindo que a capacidade do espectro aumente e possibilitando que todos os canais de frequências sejam utilizados pelos usuários simultaneamente (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2013).

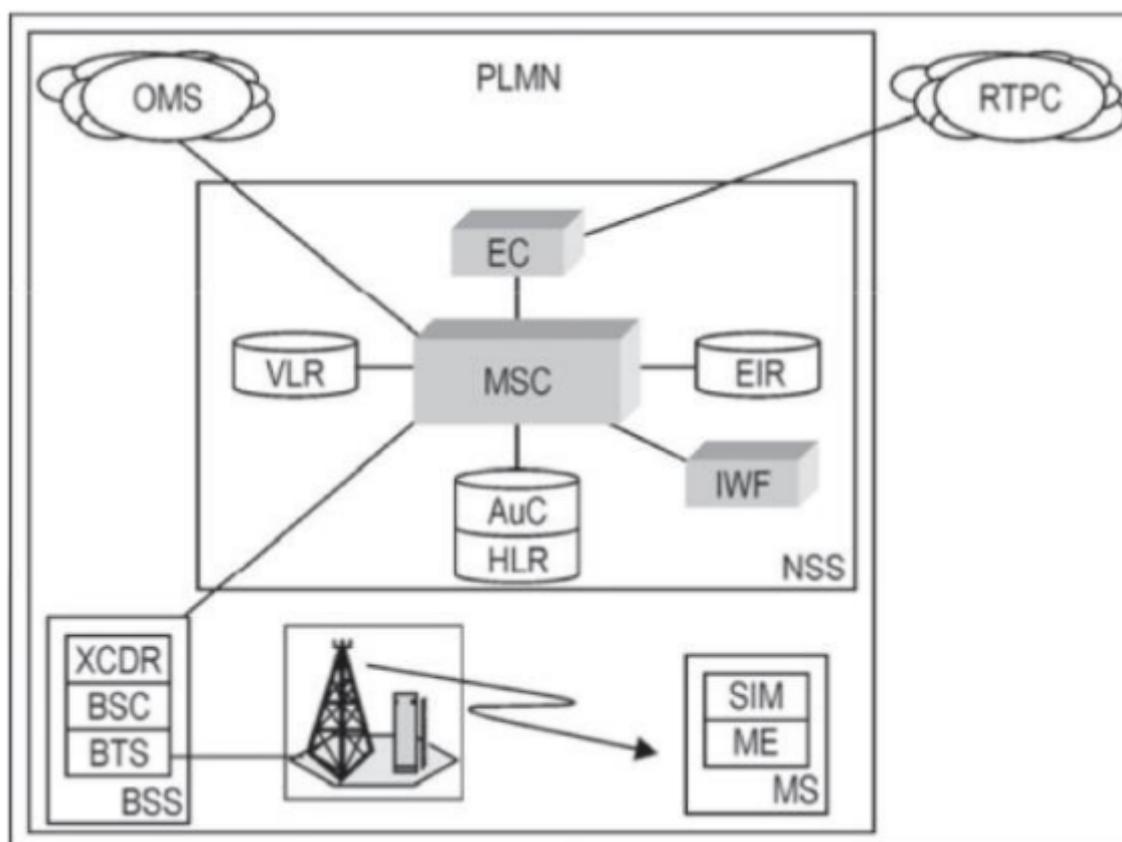
Além disso, o GSM introduziu melhorias significativas na segurança, utilizando criptografia e os cartões Subscriber Identity Module (SIM) como identificadores de assinantes, permitindo acesso seguro aos serviços. O GSM digitaliza e comprime dados de

voz, que são então enviados para um canal compartilhado com mais dois outros fluxos de dados de usuários, cada um em seu intervalo de tempo específico. O sistema opera nas bandas de frequências de 900 MHz, 1800 MHz ou 1900 MHz (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2013). A Figura 36 apresenta a arquitetura do GSM, destacando seus principais elementos e a estrutura de rede que serão citados a seguir:

- **Mobile Station (MS):** São os próprios aparelhos de telefonia celular, equipados com uma antena capaz de modular e demodular o sinal.
- **SIM:** Consiste em um cartão inteligente que carrega informações essenciais para a identificação do assinante.
- **Base Station Controller (BSC):** Responsável por controlar um grupo de estações transceptoras base (BTSs), comandando todas as operações de uma BTS.
- **Network Switching System (NSS):** Parte responsável pela interconexão da rede GSM com a Rede Pública de Telefonia Comutada (RTPC), gerenciamento da base de dados e processamento das informações através das interfaces.
- **Mobile Services Switching Center (MSC):** Elemento central do sistema de comutação de rede.
- **Home Location Register (HLR):** Administra e controla a base de dados dos assinantes locais, gerenciando todos os assinantes habilitados em uma rede GSM.
- **Visitor Location Register (VLR):** Mantém informações sobre os assinantes visitantes que estiverem conectados à rede durante determinado tempo.
- **Authentication Center (AuC):** Responsável pelas funções de autenticação e criptografia.
- **Equipment Identity Register (EIR):** Base de dados onde fica localizado o IMEI, podendo ser de três tipos:
 - "Lista branca": Contém todos os IMEIs e MSs que podem usar o sistema.
 - "Lista negra": Usuários que não podem usar o sistema, por exemplo, devido a roubo de MS.
 - "Lista cinza": Usuários com pendências.
- **Base Station Transceiver (BTS):** A estação transceptora base provê as conexões na interface de Radio Frequency com a MS.
- **Operations and Maintenance System (OMS):** Responsável pela administração, operação e manutenção dos componentes.

- **Public Switched Telephone Network (PSTN):** A RTPC identifica a rede telefônica designada ao serviço telefônico.

Figura 36 – Estrutura GSM



Fonte: (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2009)

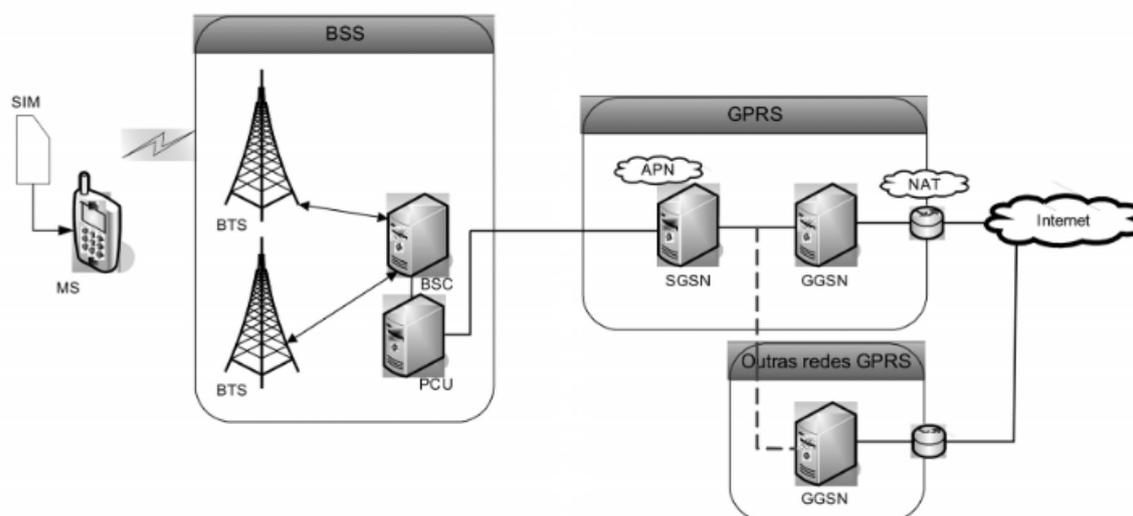
Algumas melhorias ao padrão GSM facilitaram a transmissão de dados e o acesso à internet por celulares. Uma dessas melhorias é a tecnologia General Packet Radio Service (GPRS), que trouxe maior velocidade na transmissão de dados e permitiu o uso de internet por celulares, ainda operando na tecnologia 2G, sendo assim denominada 2,5G (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2013). As principais modificações realizadas na rede GSM para a implementação do GPRS foram:

- **MS:** Adaptou-se para acessar a rede GPRS.
- **BTS, VLR, HLR, AuC e EIR:** Atualização de software.
- **BSC:** Atualização de software e instalação de hardware PCU para controle de tráfego de dados.
- **SGSN e GGSN:** Dois novos elementos de rede.

A Figura 37 apresenta a arquitetura do GPRS, destacando seus principais elementos e a estrutura de rede que serão citados a seguir:

- **Unidade de controle de pacote (PCU –Packet Control Unit):** Esta unidade fornece as interfaces lógicas e físicas para o tráfego de dados na rede GPRS. Quando a rede GPRS está em uso, o tráfego de dados é transferido através da PCU, que encaminha as informações para o SGSN.
- **Servidor do nó de suporte GPRS (SGSN– Serving GPRS Support Node):** O SGSN é responsável por gerenciar o acesso das MS à rede GPRS. Ele realiza a autenticação dos usuários, controla o acesso à rede e gerencia a mobilidade dos dispositivos dentro da área de cobertura da GPRS.
- **Gateway do nó de suporte GPRS(GGSN – Gateway GPRS Support Node):** O GGSN fornece a conexão entre a rede GPRS e redes externas, como a internet. Ele desempenha um papel crucial na interconexão, roteando dados entre a rede GPRS e outras redes de dados, e garantindo que os dados sejam entregues corretamente aos destinos finais.
- **Nome do ponto de acesso (APN – AccessPoint Name):** O APN é um serviço essencial da rede GPRS que define quais aplicações, protocolos e serviços estão disponíveis para os usuários. Ele configura o caminho de acesso para diferentes tipos de serviços e aplicações na rede externa, determinando como os dados são roteados para os serviços específicos solicitados pelos usuários.
- **Network address translator (NAT):** O NAT é um serviço frequentemente utilizado entre o GGSN e a rede de comunicação externa. Ele realiza a tradução dos endereços IP internos da rede GPRS para endereços IP públicos, permitindo a comunicação eficaz entre a rede interna e a internet, e ajudando a gerenciar a conectividade e segurança da rede.

Figura 37 – Estrutura GPRS



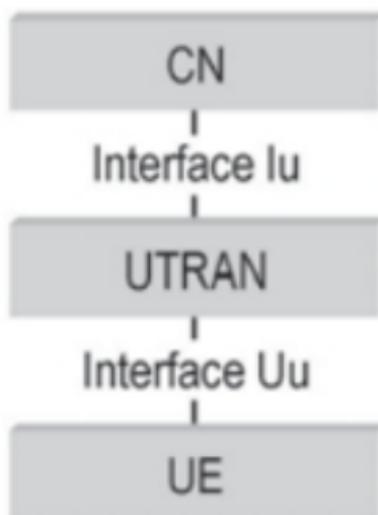
Fonte: (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2013)

3.3.2.4.3 Terceira Geração (3G)

A terceira geração de tecnologia móvel (3G) trouxe uma série de benefícios significativos, incluindo a capacidade de envio de imagens, realização de videoconferências e a viabilização de lojas de aplicativos. Os padrões mais importantes desta geração são o Wideband Code Division Multiple Access, também conhecido como UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), e o CDMA2000 (GODINHO, 2018).

O UMTS é um padrão de interface de rádio padronizado pela ITU (International Telecommunication Union). Utiliza como método de múltiplo acesso o Direct Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA). O DS-CDMA é a técnica utilizada pelo UMTS que permite a exploração das regiões com baixa relação sinal/ruído (S/R). A arquitetura da rede UMTS é composta pelos seguintes elementos: UE (User Equipment), CN (Core Network) e UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) (SVERZUT, 2016). A Figura 38 ilustra a constituição da arquitetura UMTS, destacando as interfaces Iu e Uu, que são responsáveis pelo transporte de protocolos divididos em duas estruturas.

Figura 38 – Arquitetura UMTS



Fonte: (SVERZUT, 2016)

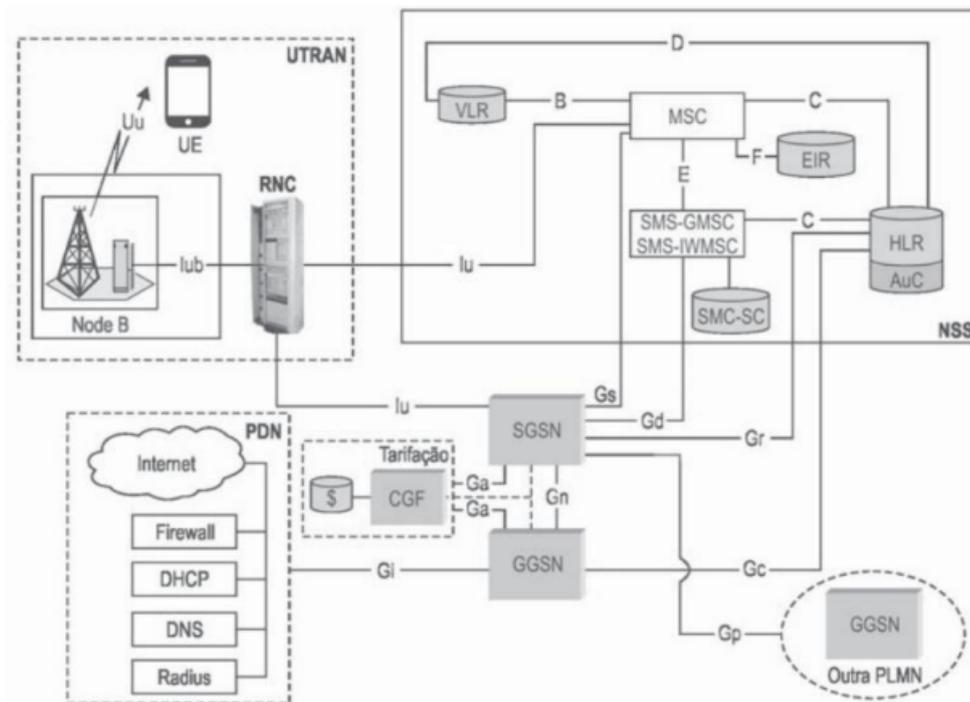
O UE é composto por dois elementos principais: o Mobile Equipment, responsável pela conexão do assinante à rede, e o User Services Identity Module, que é responsável pela identificação do serviço do usuário.

O UTRAN possibilita a conexão ao Base Station System da rede GERAN, GSM EDGE Radio Access Network, que suporta o modo Iu, permitindo a compatibilidade entre as redes 3G (UMTS), 2.75G (EDGE), 2.5G (GPRS) e 2G (GSM) (SVERZUT, 2016).

A interface Iu tem como objetivo a interconexão do subsistema RNS com os pontos de acesso à rede CN dentro de uma única PLMN (Public Land Mobile Network), independentemente dos fabricantes dos elementos de rede. Esta interface suporta todos os serviços UMTS, permite a integração com a rede GSM e facilita a evolução tecnológica entre as redes CN, RNS e de transporte (SVERZUT, 2016).

O UMTS utiliza o mesmo CN implementado nas redes GPRS e EDGE. Na Figura 39, é possível observar a arquitetura de rede UMTS, onde são ilustrados seus elementos, que fazem parte da rede UTRAN.

Figura 39 – Arquitetura da rede UMTS



Fonte: (SVERZUT, 2016)

3.3.2.4.4 Quarta Geração (4G)

O 4G foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar uma maior taxa de transmissão tanto no downlink quanto no uplink, além de reduzir a latência e o custo por bit transmitido. Além dessas vantagens, a quarta geração traz outras características importantes, como a utilização do protocolo de internet, que possibilita a implementação de técnicas de segurança que não eram viáveis em gerações anteriores (GODINHO, 2018).

A ITU definiu dois principais padrões para a tecnologia 4G, desenvolvidos por dois grupos distintos: o 3GPP e o IEEE. Esses padrões são o LTE (Long Term Evolution) e o WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), sendo o LTE o mais amplamente adotado. Além disso, existem versões aprimoradas desses padrões, conhecidas como LTE-Advanced e WiMAX-Advanced (GODINHO, 2018).

O padrão LTE utiliza o acesso múltiplo OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), que oferece uma plataforma de banda larga móvel suportada por um novo núcleo de rede, desenvolvido pela 3GPP na release 8. Esse padrão garante a continuidade dos serviços com redes legadas, proporcionando alta eficiência espectral e elevadas taxas de transferência de dados. Além disso, o LTE incorpora a técnica de múltiplas antenas MIMO (Multiple Input Multiple Output), permitindo que a interface de RF opere em diversas larguras de banda, como 1,25 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz (SVERZUT, 2016).

O padrão WiMAX, desenvolvido pelo grupo IEEE, utiliza o acesso múltiplo OFDMA para oferecer serviços de banda larga sem fio. Esse padrão é capaz de operar em várias larguras de banda, como 1,25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, e até 20 MHz, garantindo alta eficiência espectral e taxas de transferência elevadas. O WiMAX é projetado para fornecer cobertura em áreas metropolitanas e rurais, suportando mobilidade e conectividade robusta, sendo uma alternativa ao LTE em certos contextos de implantação de redes de quarta geração (CAMPOS *et al.*, 2012).

3.3.2.4.5 Quinta Geração (5G)

A tecnologia 5G representa um avanço significativo em relação ao 4G, oferecendo conexões mais rápidas e o potencial de se tornar a plataforma universal de acesso móvel à banda larga. Seu principal diferencial reside na capacidade de proporcionar interconectividade de alta qualidade entre dispositivos e serviços, além de apresentar uma latência significativamente menor na transmissão de dados, o que é crucial para o crescimento da IoT.

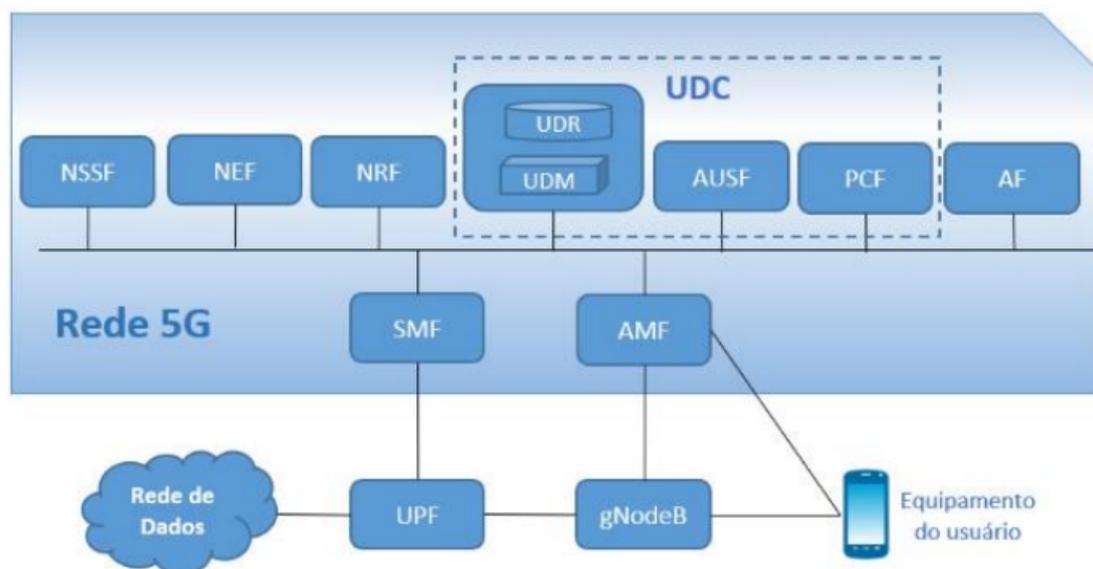
O 5G se destaca por três características principais: baixa latência, que reduz o tempo necessário para que dados e informações alcancem seu destino; banda larga aprimorada, que oferece velocidades de dados significativamente superiores; e a capacidade de suportar um grande número de conexões simultâneas (HAN BIN, 2024). Essas características permitem superar as barreiras de conectividade atuais, atendendo às crescentes demandas de um mundo cada vez mais interconectado e dependente de comunicações sem fio mais eficientes.

As tecnologias centrais do 5G incluem diversas inovações que aprimoram a eficiência e a capacidade das redes de comunicação. A Self-Interference Cancellation permite a operação em full duplex, cancelando a interferência de sinais em um único rádio. A Downlink and Uplink Decoupling (DUD) é uma arquitetura centrada no usuário que melhora os canais de uplink (UL). A Network Function Virtualization (NFV) reduz a carga sobre os operadores de rede ao virtualizar funções de rede, enquanto as Software Defined Networks (SDN) separam as funções de controle de rede e o encaminhamento de dados, tornando-as programáveis e permitindo que a infraestrutura de rede suporte aplicações e serviços de forma flexível.

O 5G também se destaca pelo uso de Millimeter Waves (mmWave), que operam em bandas de frequências acima de 30 GHz e oferecem altas taxas de transferência de dados. A Visible Light Communication (VLC) utiliza a modulação de amplitude de LEDs para realizar comunicação de alta velocidade entre dispositivos ópticos. Além disso, o 5G introduz o conceito de cache rápido, que armazena dados temporários para reduzir o acesso a memórias mais lentas ou à rede, otimizando a eficiência e a velocidade da transmissão de informações.

A arquitetura do 5G é composta por diversos elementos essenciais, conforme representado na Figura 40. Os principais componentes da rede core do 5G incluem:

Figura 40 – Arquitetura CORE 5G



Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2018)

- **AMF (Access and Mobility Management Function):** Responsável pelo controle de acesso, gerenciamento de mobilidade e conexão do usuário.
- **NSSF (Network Slice Selection Function):** Seleciona o conjunto de fatias de rede que serão alocadas para o equipamento do usuário (UE).
- **NEF (Network Exposure Function):** Exibe os recursos e eventos disponíveis na rede.
- **NRF (Network Function Repository Function):** Mantém o serviço de pesquisa, manutenção e abertura do perfil de fatia de rede e instâncias disponíveis.
- **UDR (Unified Data Repository):** Banco de dados que armazena informações dos usuários.
- **UDM (Unified Data Management):** Gera a chave de autenticação, autorização de acesso e gerencia os usuários (parte do HSS no EPC).
- **AUSF (Authentication Server Function):** Executa a função de servidor de autenticação (também parte do HSS no EPC).
- **PCF (Policy Control Function):** Fornece políticas para controle de regras e tarifação (substitui parte da função do PCRF no EPC).

- **UDC (User Data Convergence):** Integra as funções UDR, UDM, AUSF e PCF.
- **AF (Application Function):** Gerencia os serviços e aplicações considerados confiáveis pela operadora.
- **SMF (Session Management Function):** Gerencia sessões, incluindo a alocação e gerenciamento de IPs para usuários.
- **UPF (User Plane Function):** Suporta o roteamento e encaminhamento de pacotes, inspeção de pacotes, tratamento de qualidade de serviço e atua como ponto de interconexão para sessões de PDU (Protocol Data Unit).
- **gNodeB:** Estação rádio base do 5G.

4 DISPOSITIVO DE TELEGESTÃO

Este capítulo detalha o projeto completo do sistema desenvolvido, abrangendo desde a escolha da luminária utilizada até o desenvolvimento do hardware, software embarcado e a implementação da aplicação em um site.

4.1 LUMINÁRIA

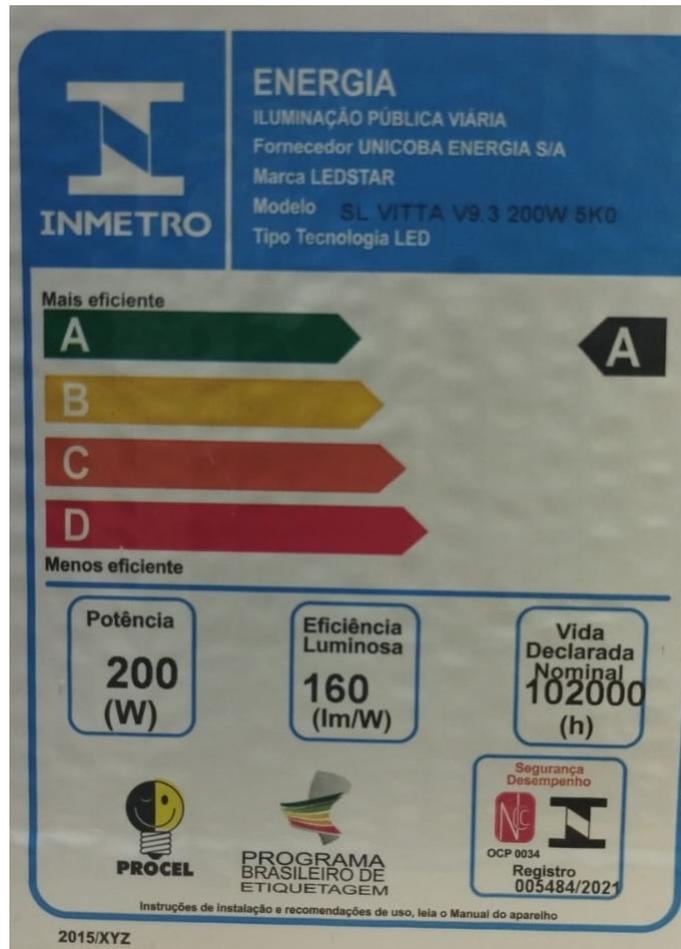
A luminária empregada no estudo é da fabricante LEDSTAR, modelo SL VITTA V9.3 representada na Figura 41, com uma potência nominal de 200W. Este modelo é projetado para oferecer uma longa vida útil, com uma duração nominal declarada de 102 mil horas. Além disso, destaca-se pela alta eficiência luminosa, alcançando 160 lm/W, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 41 – Luminária SL VITTA V9.3



Fonte: (LEDSTAR, 2024)

Figura 42 – Etiqueta Inmetro Luminária



Fonte: Autor

A Tabela 1 apresenta as principais especificações técnicas da luminária utilizada no estudo, destacando suas características de desempenho e durabilidade, essenciais para a aplicação do projeto de iluminação pública.

Tabela 1 – Especificações Técnicas da Luminária SL VITTA – 200

Modelo	SL VITTA – 200
Potência Nominal	200 W
Proteção Contra Surto	10 kV / 12 kA (IEEE C62.41.2; IEC 61643-11 Classe II) Ligação em série com a carga
Tomada	7 Pinos ANSI C136.41 (Próprio para relé ou telegestão); Shorting cap (Opcional)
Pronta para Telegestão	Sim
Fluxo Luminoso Total	28.546 lm
Eficácia Luminosa	Até 162 lm/W
Classificação Fotométrica	TIPO II MÉDIA
Equivalência	Lâmpada HID 300 W
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	>70
Temperatura de Cor (TCC)	4.000 K / 5.000 K
Expectativa de Vida Útil da Lâmpada (L70)	>100.000 h
Expectativa de Vida Útil da Luminária	>100.000 h
Grau de Proteção	IP66
Impacto Mecânico	IK09
Proteção Contra Choque Elétrico	Classe I
Material da Luminária	Alumínio Injetado
Material da Lente	Policarbonato
Fixação	Braço Horizontal de 30 mm até 63 mm de Diâmetro (Ajuste de ângulo nativo no produto de -5°, 0 ou 5°)
Torque de Fixação	8 N.m (Para braços abaixo de 30mm é necessário um adaptador)
Cor da Luminária	Cinza Munsell N6,5 (Outras cores opcionais)
Dimerização	0 – 10 V
Garantia	5 anos
Versão	9.3

Fonte: (LEDSTAR, 2024)

4.2 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

O sistema de comunicação empregado neste estudo utiliza a tecnologia GPRS, detalhada no Capítulo 3. Para sua implementação, foi utilizado o módulo SIM800L, conforme ilustrado na Figura 43. As especificações técnicas do módulo estão listadas na Tabela 2. Para otimizar a comunicação, foi utilizada a antena GSM, conforme ilustrado na Figura 2. Esta antena é essencial para garantir a conectividade e a qualidade do sinal no módulo, facilitando a comunicação eficiente dentro das redes GSM.

Figura 43 – Módulo SIM800L



Fonte: (Nettigo, 2024)

Tabela 2 – Especificações do Módulo GSM

Característica	Especificação
Quad-band	850/900/1800/1900 MHz
Compatibilidade de Rede	Conexão com qualquer rede GSM global com SIM 2G
Chamadas de Voz	Fazer e receber chamadas usando fone de ouvido ou alto-falante externo 8Ω e microfone eletreto
Mensagens	Enviar e receber mensagens SMS
Dados	Enviar e receber dados GPRS (TCP/IP, HTTP, etc.)
Rádio FM	Digitalizar e receber transmissões de rádio FM
Campainha e Controle	Levar a campainha e a porta de controle do motor de vibração
Rede	Suporte para rede 2G
Interface de Comando	AT interface com detecção de "auto de transmissão"
Antena	Antena da mola soldável na placa; Tomada a bordo IPEX para antena externa
Tensão de Operação	3,7V a 4,2V
Corrente	até 2 A
Frequência	850/900/1800/1900 MHz
Dimensões	2.5 cm x 2.3 cm x 0.7 cm
Peso	5.3 g

Figura 44 – Antena GSM



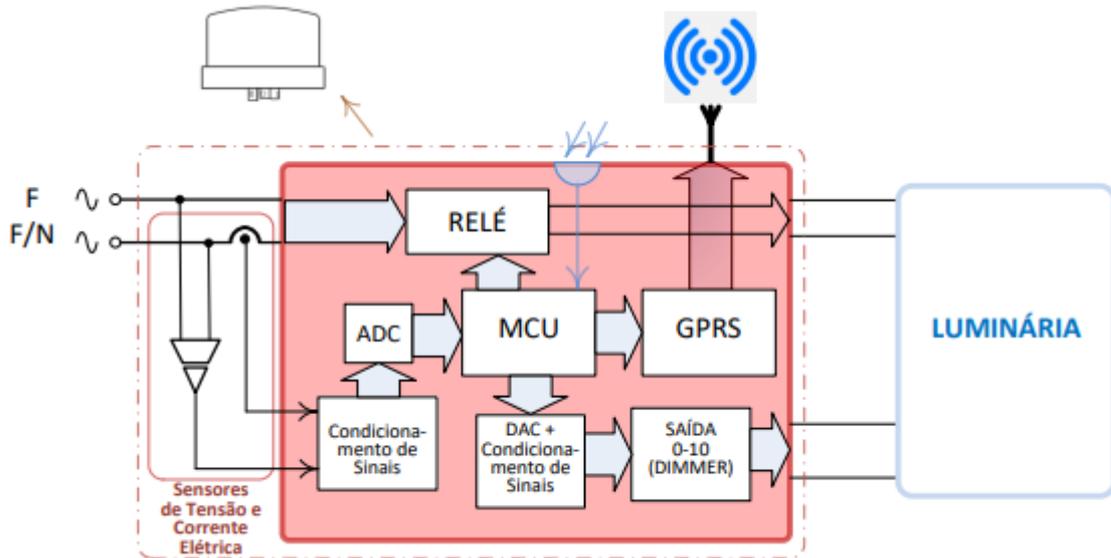
Fonte: (RS Robótica, 2024)

O módulo opera por meio de comandos AT, os quais são utilizados para estabelecer a comunicação com a rede de telecomunicações. Através de uma sequência específica de comandos AT, o módulo realiza a conexão com a rede, possibilitando o envio de dados ao servidor, onde estão armazenados no banco de dados.

4.3 DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE

A Figura 45 ilustra o desenvolvimento do hardware, destacando o diagrama do circuito utilizado no sistema. Este circuito integra dois sensores principais, um para medição de tensão e outro para corrente, além de um sensor LDR (Light Dependent Resistor) responsável por detectar a luminosidade ambiente, determinando se é dia ou noite. Adicionalmente, o sistema inclui um relé para controlar o acionamento da luminária, bem como um módulo de comunicação. O circuito também conta com um sistema de condicionamento de sinal, tanto para as saídas dos sensores quanto para a entrada do dimmer, assegurando a precisão nas medições e no controle de intensidade luminosa. Por fim, o diagrama destaca a presença do microcontrolador (MCU), que é o componente central responsável pelo processamento e controle das operações descritas.

Figura 45 – Diagrama do Circuito

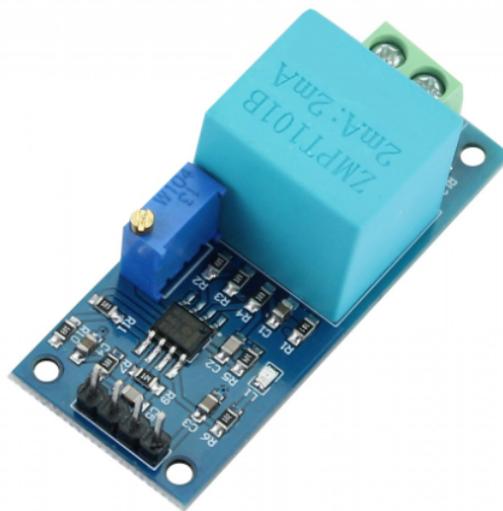


Fonte: (VALENTIM *et al.*, 2023)

4.3.1 SENSOR DE TENSÃO

O sensor de tensão utilizado neste estudo foi o ZMPT101B, conforme ilustrado na Figura 46. As especificações técnicas detalhadas do sensor estão listadas na Tabela 3. Este sensor é projetado para operar em CA dentro da faixa de 0 a 250V.

Figura 46 – ZMPT101B



Fonte: (UsinaInfo, 2024)

Tabela 3 – Especificações do Sensor de Tensão ZMPT101B

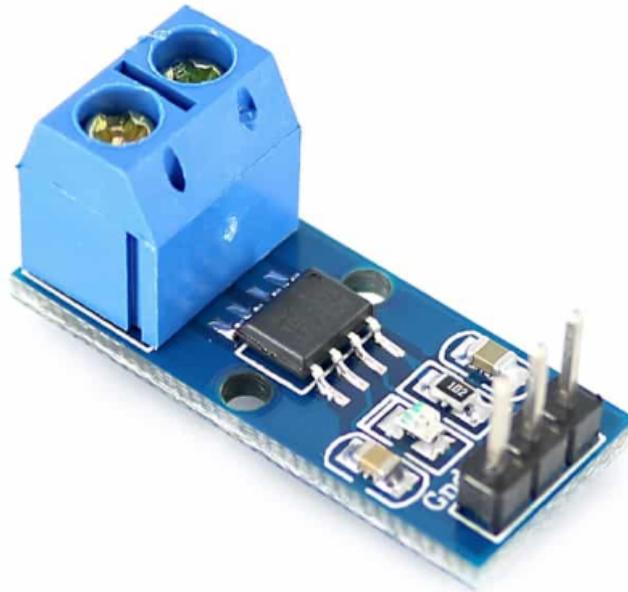
Especificação	Detalhes
Transformador	ZMPT101B
Tensão de alimentação do módulo (CC)	5 a 30V
Tensão de entrada (CA)	0 a 250V
Corrente de entrada nominal	2mA
Corrente de saída nominal	2mA
Proporção	1000:1000
Faixa linear	0-1000V
Linearidade	0,2%
Isolamento de tensão	4000V
Precisão de leitura	$\pm 0,5\%$
Temperatura de operação	-40° a 70° Celsius
Dimensões	22mm x 20mm x 51mm
Peso	20g

Fonte: (ZMPT101B... , 2024)

4.3.2 SENSOR DE CORRENTE

O sensor de corrente empregado no estudo é o ACS 712, conforme ilustrado na Figura 47. Este sensor é capaz de medir tanto corrente contínua (CC) quanto CA, e está disponível em três variantes com capacidades de medição de 5A, 20A e 30A. As especificações detalhadas do sensor estão apresentadas na Figura 48.

Figura 47 – ACS712



Fonte: (Byteflop Tecnologia, 2024)

Figura 48 – Especificações do sensor ACS712 5A

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-5	-	5	A
Sensitivity ²	$Sens_{TA}$	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	185	-	mV/A
	$Sens_{TOP}$	Over full range of I_P	178	-	193	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 4.7\text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 20 kHz bandwidth	-	45	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	20	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 1\text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 50 kHz bandwidth	-	75	-	mV
Electrical Offset Voltage	V_{OE}	$I_P = 0\text{ A}$	-40	-	40	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 5\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

Fonte: (Allegro Microsystems, 2024)

4.3.3 RELÉ

O relé empregado no sistema é o JQC3F-05VDC-C, como ilustrado na Figura 49. Este relé foi selecionado para o controle e acionamento da luminária. As especificações técnicas detalhadas do relé estão apresentadas na Tabela 4.

Figura 49 – Relé JQC3F-05VDC-C



Fonte: (Fermarc, 2024)

Tabela 4 – Especificações do Módulo Relé

Característica	Descrição
Tensão de operação (CC)	5 V
Permite controlar cargas (CA)	250 V
Corrente típica de operação	15~20 mA
LED indicador de status	Sim
Pinagem	Normal Aberto, Normal Fechado e Comum
Tensão de saída	30 V (CC) a 10 A ou 250 V (CA) a 10 A
Tempo de resposta	5 ~ 10 ms

4.3.4 LDR

O sensor de luminosidade utilizado é o LDR , mostrado na Figura 50. Este componente foi empregado para medir os níveis de luminosidade e, com base nas leituras, determinar se é dia ou noite.

Figura 50 – LDR

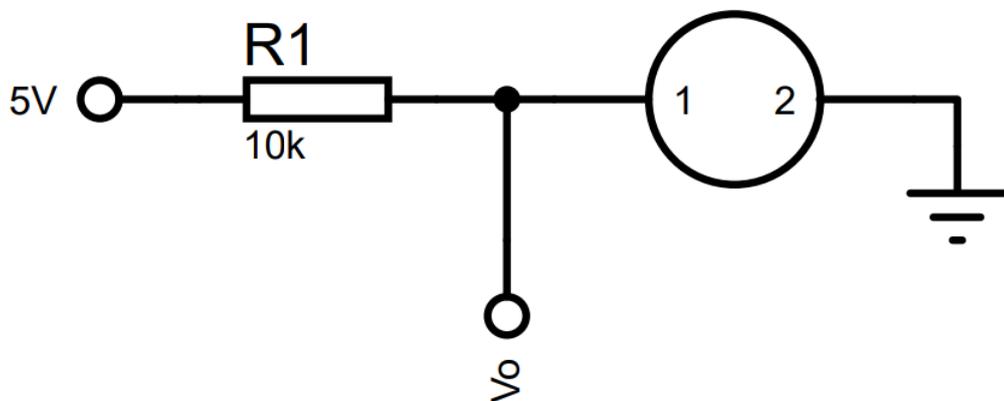


Fonte: (Coletor Digital, 2024)

Para utilizar o LDR na medição do nível de luminosidade, é necessário implementar um circuito adequado. No presente estudo, foi empregado um divisor de tensão para essa finalidade, conforme ilustrado na Figura 51. Esse circuito permite que a tensão de saída varie em função das mudanças na resistência do LDR, possibilitando a detecção precisa das variações na intensidade luminosa. Assim, a tensão de saída V_o é descrita pela equação 4.1.

$$V_o = 5 \cdot \frac{R_{LDR}}{10K + R_{LDR}} \quad (4.1)$$

Figura 51 – Divisor de Tensão para LDR



Fonte: (Coletor Digital, 2024)

4.3.5 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador utilizado foi o DEV KIT V1 ESP32, apresentado na Figura 52. Este foi responsável por realizar os cálculos, controlar o dimmer, acionar o relé e enviar as informações ao módulo GPRS.

Figura 52 – ESP32



Fonte: (Vida de Silício, 2024)

Tabela 5 – Especificações do ESP32 Dev Kit V1

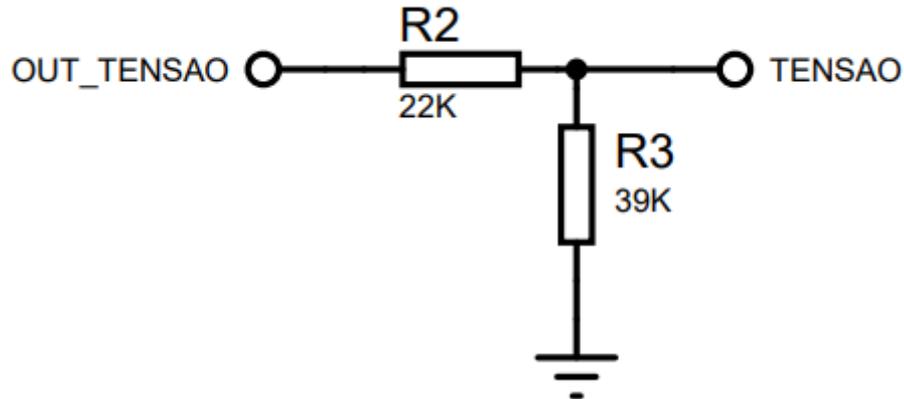
Característica	Especificação
SoC (System on Chip)	ESP32-D0WDQ6
Microprocessador	Tensilica Xtensa 32-bit LX6 Dual Core
Clock	Ajustável de 80MHz a 240MHz
Desempenho	Até 600 DMIPS
Memória ROM	448KB
Memória SRAM	520KB
RTC Slow SRAM	8KB
RTC Fast SRAM	8KB
Memória Flash	32Mb (4 megabytes)
Tensão de operação	2,7V - 3,6V
Nível lógico	3,3V
Corrente de operação típica	80mA
Corrente de operação máxima	500mA
Interfaces	GPIO, UART, SPI, SDIO, I2C, I2S, IR, PWM, CAN
GPIO	30 pinos, com suporte a PWM, I2C e SPI
ADC	Até 18 canais, resolução de 12 bits
DAC	2 canais, resolução de 8 bits
WiFi	802.11 b/g/n, faixa de 2,4 a 2,5GHz
Segurança WiFi	WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS
Bluetooth	v4.2 BR/EDR e BLE (Bluetooth Low Energy)
Antena	Embutida
Criptografia	AES/RSA/ECC/SHA
Modo de operação WiFi	Station, SoftAP, SoftAP + Station, P2P
Temperatura de operação	-40°C a 85°C

4.3.6 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

O circuito de condicionamento utilizado no sensor de tensão é apresentado na Figura 53. Trata-se de um divisor de tensão, cuja equação está representada pela Equação 4.2. Esse circuito é responsável por reduzir a tensão máxima de saída, de 5V para 3,3V, adequando-a para ser compatível com a entrada do microcontrolador.

$$TENSÃO = OUT_TENSÃO \cdot \frac{39K}{22K + 39K} \quad (4.2)$$

Figura 53 – Condicionamento de Sinal do Sensor de Tensão



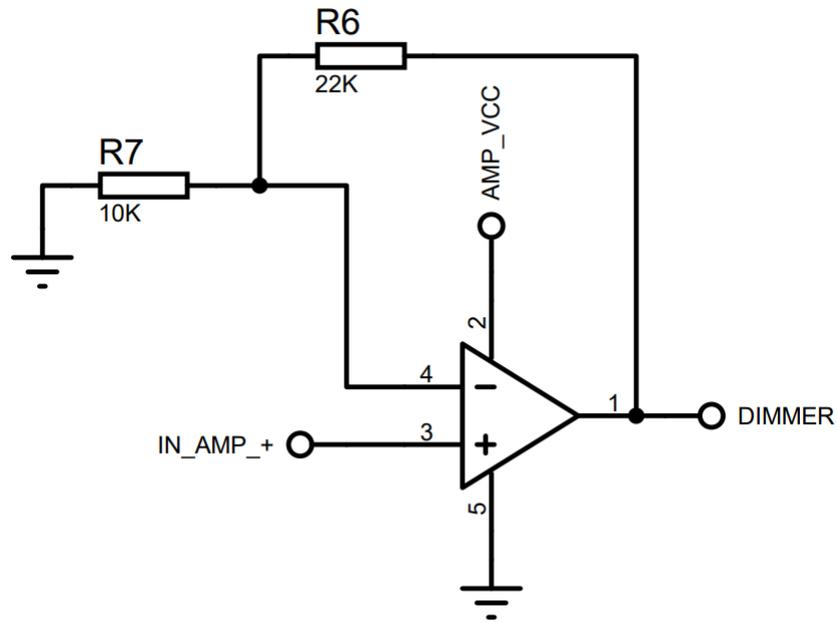
Fonte: Autor

O condicionamento do sinal para o dimmer é realizado utilizando o amplificador operacional LM358P. Este amplificador eleva a tensão de saída do microcontrolador de 3,3V para 10V, permitindo o controle adequado do dimmer. A Figura 54 ilustra o circuito completo utilizado para esse fim, enquanto a Figura 55 apresenta o amplificador LM358P em detalhe. As especificações técnicas do amplificador estão listadas na Tabela 6. Adicionalmente, a equação que descreve o comportamento do circuito é apresentada na Equação 4.4.

$$\frac{(IN_AMP_+)}{10K} + \frac{(IN_AMP_+) - DIMMER}{22K} = 0 \quad (4.3)$$

$$DIMMER = 3,2 \cdot (IN_AMP_+) \quad (4.4)$$

Figura 54 – Condicionamento de Sinal do Dimmer



Fonte: Autor

Figura 55 – Amplificador LM358P



Fonte: (INSTRUMENTS, 2024)

Tabela 6 – Especificações Técnicas do Amplificador LM358P

Parâmetro	Valor
Número de Canais	2 Canais
Produto Ganho-Banda (GBP)	700 kHz
Taxa de Variação (SR)	300 mV/ μ s
Tensão de Offset de Entrada (Vos)	7 mV
Corrente de Polarização de Entrada (Ib)	250 nA
Tensão de Alimentação - Máx.	32 V
Tensão de Alimentação - Mín.	3 V
Corrente de Alimentação em Operação	350 μ A
Corrente de Saída por Canal	20 mA
Taxa de Rejeição de Modo Comum (CMRR)	80 dB
Densidade de Ruído de Tensão de Entrada (en)	40 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Pacote / Encapsulamento	PDIP-8
Temperatura de Operação Mínima	0 °C
Temperatura de Operação Máxima	+70 °C
Tensão de Alimentação Dupla	+/- 3 V, +/- 5 V, +/- 9 V
Tensão de Alimentação Dupla Máx.	+/- 16 V
Tensão de Alimentação Dupla Mín.	+/- 1,5 V
Tensão de Alimentação em Operação	3 V a 32 V, +/- 1,5 V a +/- 16 V
Tensão de Modo Comum (Vcm)	Rail Negativo a Rail Positivo - 1,5 V
Ganho de Tensão	100 dB
Largura	6,35 mm
Altura	4,57 mm
Comprimento	9,81 mm

4.3.7 ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO

Para a alimentação do circuito, foi utilizado o conversor CA/CC HLK-PM01, como ilustrado na Figura 56. Este conversor fornece uma saída de 5V e 0,6A, cujas características são detalhadas na Tabela 7. O HLK-PM01 é responsável por alimentar a maioria dos componentes do circuito. No entanto, dois componentes são alimentados de maneira distinta: o amplificador recebe 15V a partir de três conversores HLK-PM01 conectados em série, enquanto o módulo GPRS é alimentado pelo conversor LM2596 que é alimentado por uma fonte de bancada.

Figura 56 – Conversor CA/CC HLK-PM01



Fonte: (Smart Kits, 2024)

Tabela 7 – Especificações do conversor CA/CC HLK-PM01

Característica	Valor
Tensão de entrada (AC)	100 ~ 240V
Frequência de entrada	50/60 Hz
Corrente máxima de entrada	< 0,2 A
Tensão de saída (DC)	5V
Potencia de saída	3 W
Corrente máxima de pico na saída	1000 mA
Corrente máxima na saída	600 mA
Consumo de energia sem carga	< 0,1 W
Temperatura de trabalho	-20°C a +60°C
Dimensões	34 x 20 x 15,5 mm
Peso	21 g

O conversor CC-CC LM2596, ilustrado na Figura 57, é um conversor Step Down projetado para reduzir a tensão de entrada para um nível mais baixo. Este componente é empregado para fornecer a alimentação necessária ao módulo GPRS. As especificações detalhadas do conversor estão apresentadas na Tabela 8.

Figura 57 – Conversor LM2596



Fonte: (Baú da Eletrônica, 2024)

Tabela 8 – Especificações do conversor LM2596

Especificação	Valor
Tensão de entrada	3,2~40V
Tensão de saída	1,5~35V
Corrente de saída	2A nominal
Eficiência de conversão	Até 92%
Tensão suspensa mínima	1,5V
Velocidade de comutação	Até 150kHz
Velocidade de resposta dinâmica	5% 200µs
Circuito de proteção	SS36
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C
Regulação de carga	±0,5%
Dimensões	50x23mm

4.3.8 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO

A Figura 58 apresenta o esquemático completo do circuito, detalhando todas as conexões dos componentes apresentados.

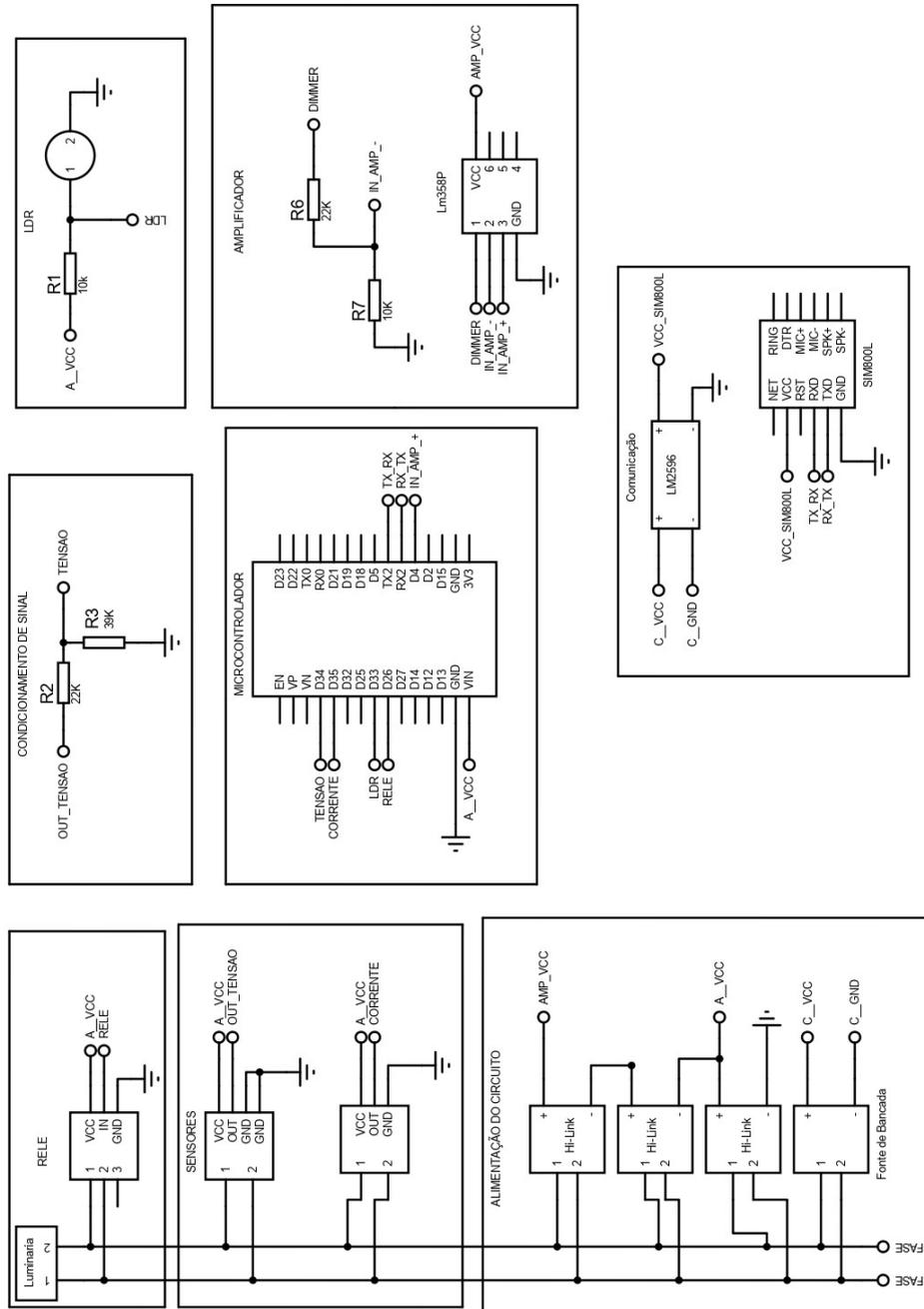
O sistema de alimentação do dispositivo é localizado na parte inferior esquerda do circuito, utilizando três conversores CA/CC para fornecer as tensões de 15V e 5V, além de uma fonte de bancada. No lado esquerdo, estão posicionados os sensores de tensão e

corrente, que são alimentados pelo conversor de 5V. Acima desses sensores, encontra-se o relé responsável pelo controle de acionamento e desligamento da luminária.

Na parte superior do circuito, está o sistema de condicionamento de sinal para o sensor de tensão, implementado por meio de um divisor de tensão, garantindo que o sinal esteja dentro da faixa de operação do microcontrolador, localizado no centro, além disso é apresentado as conexões que foram utilizadas no microcontrolador. No canto superior direito, há um circuito para o sensor LDR, também configurado como divisor de tensão. À direita, encontra-se o amplificador utilizado para controlar o dimmer 0-10V, que funciona como um amplificador elevador, exigindo uma alimentação de 15V para elevar a tensão proveniente do microcontrolador.

Por fim, na parte inferior direita, está o módulo de comunicação GPRS, alimentado por um conversor de tensão ligado à fonte de bancada, além disso é feita a comunicação com o microcontrolador através do RX e TX.

Figura 58 – Esquemático do Circuito

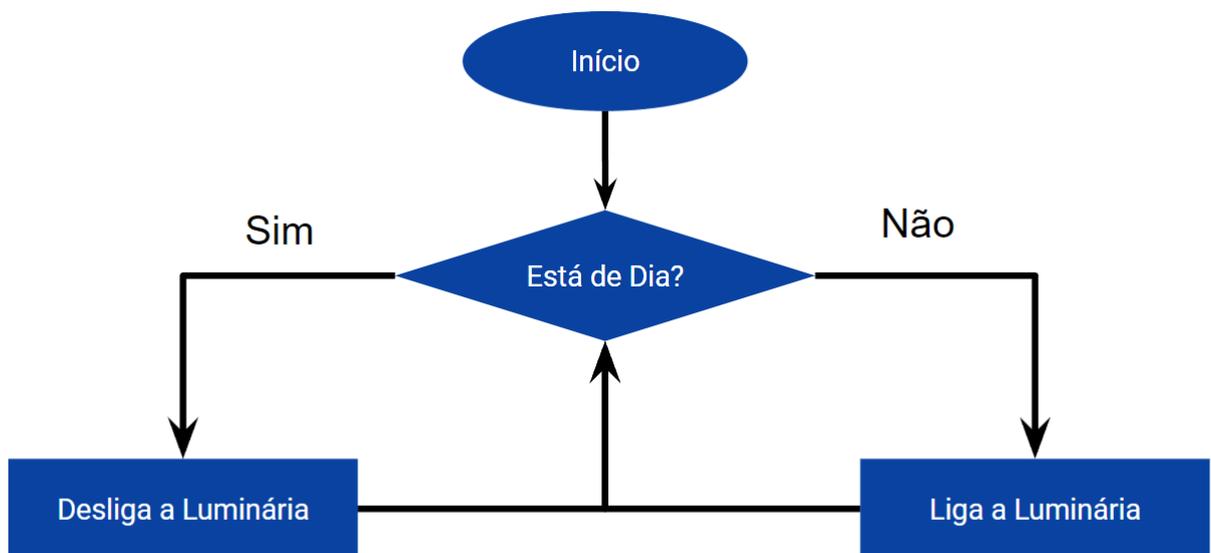


Fonte: Autor

4.4 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

A linguagem de programação utilizada é C. Como mencionado anteriormente, o microcontrolador possui dois núcleos de processamento. Assim, um núcleo é dedicado a uma thread secundária responsável pelo controle do relé e do LDR, enquanto o outro núcleo gerencia a thread principal, que lida com os demais componentes e cálculos. A Figura 59 apresenta o fluxograma da thread secundária.

Figura 59 – Fluxograma da Thread Secundária

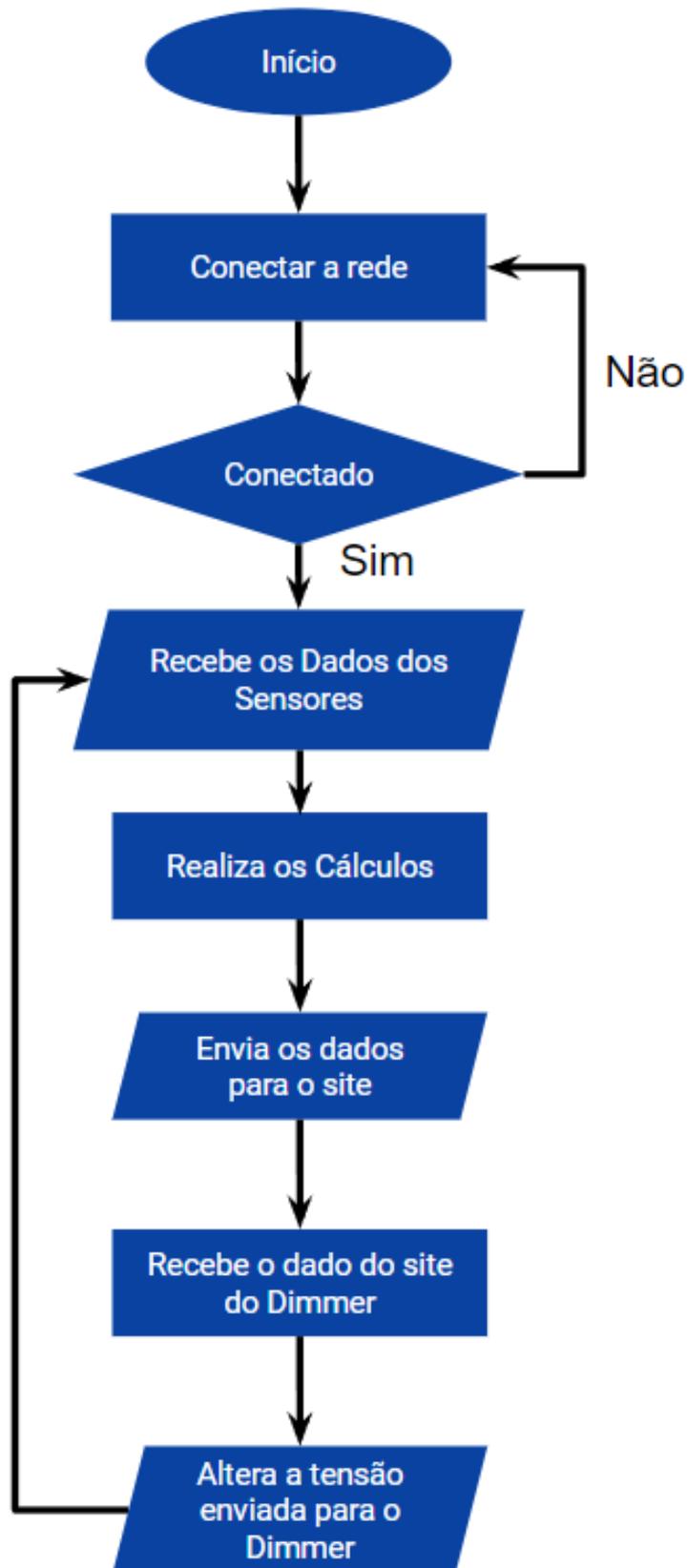


Fonte: Autor

Na thread secundária, o código executa um loop para determinar se é dia ou noite com base no valor recebido do LDR. Após confirmar o estado do dia, a luminária é ligada ou desligada conforme necessário. Dessa forma, a thread secundária opera de forma independente da thread principal, garantindo que, mesmo em caso de falha na thread principal, a luminária continuará funcionando normalmente.

O fluxograma da thread principal é apresentado na Figura 60. Na primeira execução, o código estabelece a conexão com a rede GPRS. Caso a conexão seja bem-sucedida, os dados dos sensores são coletados. Em seguida, os cálculos necessários são realizados, e os resultados são enviados para o site. Após essa etapa, o valor do dimmer é recebido e ajustado conforme necessário. O processo então retorna ao loop, repetindo essas operações.

Figura 60 – Fluxograma da Thread Principal



Fonte: Autor

Os valores calculados e enviados estão apresentados na Tabela 9, juntamente com as respectivas equações utilizadas para obtê-los.

Tabela 9 – Valores Enviados para o Site

Valores Calculados	Equação
Tensão RMS (V_{rms})	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt}$
Corrente RMS (I_{rms})	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$
Potencia Media (P_o)	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i dt}$
Fator de Potencia	$\frac{P_o}{V_{rms} I_{rms}}$
Frequência	Tempo que se leva para completar um ciclo completo da senoide
Estado do Dia	Valor do LDR para determinar se é dia ou noite
Estado da Luminária	Relé Ligado ou Desligado

Além do software descrito, o código implementado realiza a detecção de falhas na operação da luminária. Isso é feito comparando os valores esperados de tensão, corrente e potência com os valores medidos em tempo real. Caso seja detectada uma discrepância, como quando a luminária está desligada, mas deveria estar ligada, o sistema envia que a luminária está desligada. Esse mecanismo garante que o sistema seja capaz de identificar e sinalizar problemas operacionais.

4.5 DESENVOLVIMENTO DO SITE

Para o controle do dispositivo, foi desenvolvido um site em Python e utilizado uma API para a conexão do GPRS com o servidor que hospeda o site, que nesse caso foi utilizado um computador sem estar conexão direta com o dispositivo, conforme ilustrado na Figura 61. Por meio dessa interface, é possível ajustar a intensidade da luminária, alterando o valor do dimmer. Além disso, o site exibe as leituras dos sensores em tempo real, calculados pelo dispositivo.

Monitor de Sensores

Leitura dos Sensores

Sensores	Valor
Tensão RMS (V)	129.8
Corrente RMS (A)	1.51
Potência Média (W)	196.1
Fator de Potência	0.97
Frequência (Hz)	63.1
Estado do Dia	Noite
Estado da Luminária	Ligado
Intensidade da Luminária	100

Intensidade da Luminária

Confirmar

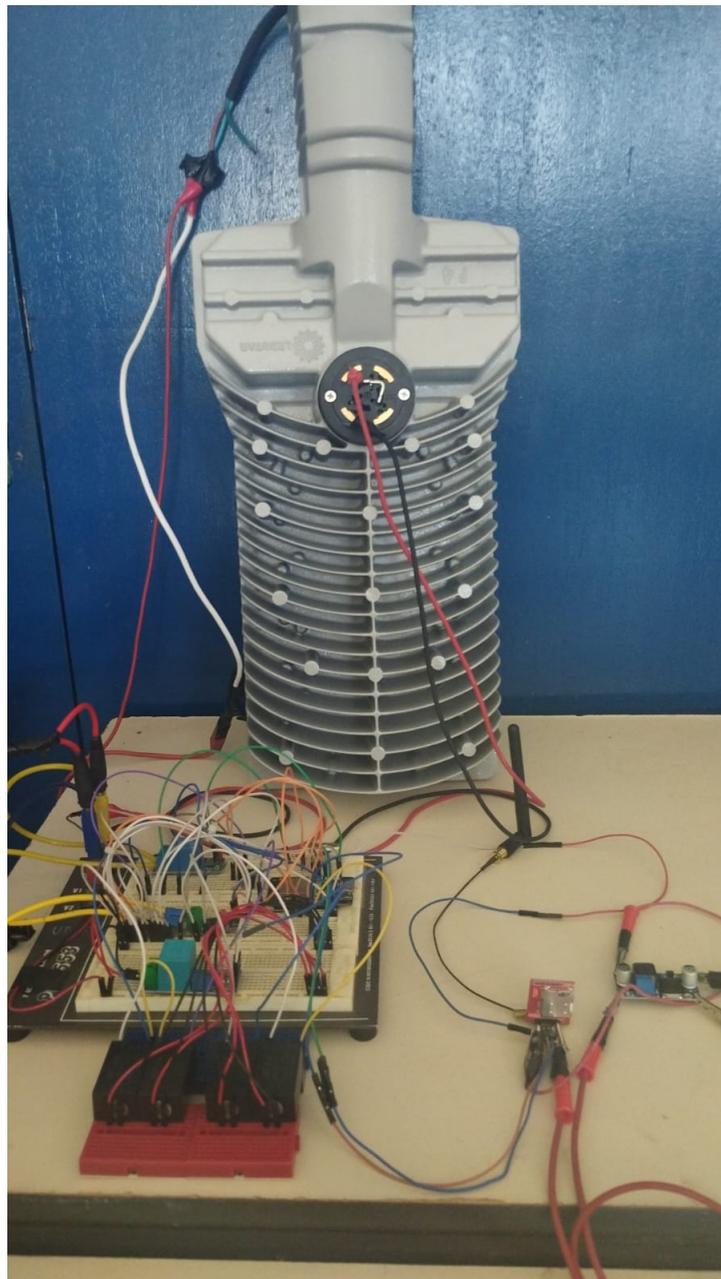
Figura 61 – Site

Fonte: Autor

4.6 CIRCUITO NA PROTOBOARD

A Figura 62 apresenta o circuito montado na protoboard. Na parte inferior direita do circuito, é possível observar o módulo de comunicação GPRS, cuja alimentação é fornecida por um conversor CC/CC. Na parte superior, encontra-se a luminária, conectada para a montagem do protótipo. No canto inferior esquerdo, estão localizados os conversores CA/CC, responsáveis por fornecer as tensões necessárias. Acima desses conversores, está a protoboard, onde foram realizadas as conexões descritas, conforme ilustrado na Figura 58.

Figura 62 – Circuito na Protoboard



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

A telegestão da IP emerge como uma peça fundamental para a concretização das cidades inteligentes nos próximos anos. Os pontos de IP, situados em postes com luminárias, desempenham um papel estratégico na rede de energia elétrica CA, possibilitando a coleta, registro e monitoramento de informações cruciais para os gestores urbanos.

Este trabalho aborda os Sistemas de Telegestão, destacando sua importância para a sociedade moderna. O projeto desenvolvido inclui a criação de hardware e software para um dispositivo de telegestão que permite o monitoramento de grandezas elétricas, como tensão, corrente, fator de potência e potência, e também a dimerização das luminárias. Esse dispositivo capacita os operadores a monitorar o consumo de energia, identificar problemas de tensão e detectar falhas em luminárias que não seguem os padrões convencionais. Além disso, proporciona maior autonomia na gestão da luminosidade das luminárias por meio da dimerização.

Além disso, o objetivo deste trabalho é promover a inovação tecnológica no setor de IP, visando a redução de custos diretos, como o consumo de energia, e a melhoria dos aspectos operacionais, como a detecção de mau funcionamento. Dessa forma, busca-se otimizar os recursos utilizados na IP e contribuir para uma gestão mais eficiente e econômica.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Implementação do dispositivo em pelo menos 10 postes.
- Análise de custos do dispositivo.
- Utilização de uma tecnologia de comunicação mais recente.
- Implementação de um código mais otimizado para detecção de falhas
- Adição de novos componentes, como a determinação do ruído sonoro do ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABINEE. **Ambiente de Demonstração de Tecnologias para Cidades Inteligentes**. São Paulo: [s.n.], 2018.
- ABNT. **NBR 5101: Iluminação Pública**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ADAM, G. Dali led driver control system for lighting operations based on raspberry pi and kernel modules. **Electronics**, v. 8, p. 1021, setembro 2019.
- Allegro Microsystems. **Datasheet do Sensor de Corrente ACS712**. 2024. Acesso em: 25 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/168326/ALLEGRO/ACS712.html>>.
- ALLIANCE, L. **Whitepaper: LoRaWAN**. [S.l.]: LoRa Alliance, 2015. Sem local de publicação.
- ANATEL. **Cobertura móvel**. 2024. Acesso em: 1 ago. 2024. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura/cobertura-movel>>.
- Baú da Eletrônica. **Módulo Regulador de Tensão LM2596**. 2024. Acesso em: 26 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/produto/modulo-regulador-de-tensao-lm2596.html>>.
- BERNADES, D. M. e. a. Eficiência energética na iluminação pública urbana: revisão bibliográfica dos equipamentos e tecnologias. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e606973957–e606973957, 2020.
- Byteflop Tecnologia. **Sensor de Corrente ACS712**. 2024. Acesso em: 29 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.byteflop.com.br/sensor-de-corrente-ac712>>.
- CAMPOS *et al.* Estudo comparativo entre sistemas propostos para 4g: Lte e wimax móvel. In: **Anais do Congresso INATEL – INCITEL**. [S.l.: s.n.], 2012.
- CARLI, R. *et al.* Bi-level programming for the strategic energy management of a smart city. In: **IEEE Workshops on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems**. [s.n.], 2016. p. 1–6. Retrieved Nov 10, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7504820>>.
- CARTER, D. *et al.* **LED Street Light Research Project**. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, 2011.
- CAVALCANTI, F. **Comunicação Móvel Celular**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018.
- Ceigon. **Relé Fotoelétrico p/ Comando Dist. 220V - RTF-82**. 2024. <<https://www.ceigon.com.br/iluminacao/rele-fotoeletrico/rele-fotoeletrico-pcomando-dist-220v-rtf-82>>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- CHAUHARI, B. S. e. a. Lpwan technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. **Future Internet**, v. 12, n. 3, p. 46, 2020.
- CHEN, W.-K. **The Electrical Engineering Handbook**. único. [S.l.]: Elsevier Academic Press, 2004.

Cleverciti. **Smart parking sensor technology**. 2020. Acesso em: 22 fev. 2024. Disponível em: <<https://www.cleverciti.com/>>.

CMD Ltd. **0-10V, DALI, and Other Lighting Control System Protocols Compared**. 2019. Acesso em: 17 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.cmd-ltd.com/lighting-control-systems/0-10v-dali-and-other-lighting-control-system-protocols-compare/>>.

Coletor Digital. **Foto Célula LDR**. 2024. Acesso em: 25 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.coletordigital.com.br/foto-celula-ldr-34412>>.

CONSTRUCT. **Smart City: As 7 Cidades Mais Inteligentes do Mundo**. 2018. Acesso em: 27 out. 2018. Disponível em: <<https://constructapp.io/pt/smart-city-cidades-mais-inteligentes/>>.

COPEL . **Manual de Iluminação Pública**. [S.l.], 2012. Acesso em: 14/02/2024. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual_iluminacao_publica/\\$FILE/manual%20iluminacao%20publica.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual_iluminacao_publica/$FILE/manual%20iluminacao%20publica.pdf)>.

CREA-PR. **Iluminação Pública**. 2016. Acesso em: 08 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/iluminacao-publica.pdf>>.

Demape. **Reator Vapor de Sódio 1000W - Externo Galvanizado**. 2024. <<https://demape.com.br/produto/reator-vapor-de-sodio-1000w-externo-galvanizado/>>. Acesso em: 12 fev. 2024.

DiiA. **Introducing DALI**. 2020. Acesso em: 17 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.digitalilluminationinterface.org/dali/>>.

EE Times. **What Is Power Line Communication?** 2024. Acesso em: 17 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.eetimes.com/what-is-power-line-communication/>>.

ELETRICASUZUKI. 2024. <<https://www.eletricasuzuki.com.br/lampada-vapor-mercuro-250w-220230v-ideal>>. Acesso em: 11 fev. 2024.

Eletrogate. **Triac BT137-600E**. 2024. Acesso em: 17 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/triac-bt137-600e>>.

EMPALUX. 2024. <<https://empalux.com.br>>. Acesso em: 11 fev. 2024.

ENERGIA, M. de Minas e. **Iluminação Pública Municipal Programas e Políticas Públicas: Orientações para Gestores Municipais**. MME, 2018. Acesso em 08 jun. 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/72140/229750/Livreto+Ilumina%C3%A7%C3%A3o+P%C3%BAblica_2018_02_19.pdf>.

Fermarc. **Módulo Relé 5V 1 Canal**. 2024. Acesso em: 25 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.fermarc.com/modulo-rele-5v-1-canal>>.

FERNANDO. **ESP32-C6: WiFi 6 e novas tecnologias**. 2024. Acesso em: 17 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.fernandok.com/2024/03/esp32-c6-wifi-6-e-novas-tecnologias.html>>.

FIALHO, V.; AZEVEDO, F. Wireless communication based on chirp signals for lora iot devices. **v. 4**, p. 5, dezembro 2018.

G1. **San Marino será primeiro país da Europa a implementar internet 5G.** 2024. Acesso em: 1 ago. 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/tecnologia/noticia/san-marino-sera-primeiro-pais-da-europa-a-implementar-internet-5g.ghtml>>.

GE. **Smart Streets Are Made of These: San Diego Deploys America's First Intelligent Lighting System.** 2015. Acesso em: 30 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.ge.com/news/reports/smart-streets-are-made-of-these-san-diego-deploys-americas-first-intelligent-lighting-system>>.

GODINHO, H. F. a. Uma abordagem sobre a tecnologia 4g lte e sua aplicação no brasil. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 1, n. 120, p. 1–14, 2018.

HAN BIN, J. W. **Cellular Communication Networks and Standards.** 1. ed.. ed. [S.l.]: Springer, 2024.

IEEE. Ieee standard for low-rate wireless networks. **IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)**, p. 1–800, 2020.

Inbrax. **Reator Eletromagnético - Uso Interno.** 2024. <<https://inbrax.net.br>>. Acesso em: 12 fev. 2024.

INSTRUMENTS, T. **LM358P Dual Operational Amplifier Datasheet.** 2024. Acesso em: 26 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/LM358P?qs=X1HXWTtiZ0QtOTT8%252BVnsyw%3D%3D>>.

InteliLight. **Smart city integrations in Brasov, ROMANIA: InteliLight PLC Streetlight.** 2014. Acesso em: 04 jul. 2020. Disponível em: <<https://intelight.eu/intelilight-plc-streetlight-control-solution-and-smart-city-integrations-in-brasov-romania/>>.

LAVRIC, A.; PETRARIU, A. I.; POPA, V. Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions. **IEEE Access**, v. 7, p. 35816–35825, 2019.

LEDSTAR. **Luminária Pública LED 200W LEDSTAR Vitta V9.3.** 2024. <<https://ledstar.com.br/produto/luminaria-publica-led-200w-ledstar-vitta-v93/>>. Acesso em: 19 ago. 2024.

Loja JL. **Luminária Pública LED Cree Modular 350W 33.591lm Alto Desempenho e Eficiência Equivalente a 1000W HID.** 2024. <<https://www.lojajl.com.br/luminaria-publica-led-cree-modular-350w-33591lm-alto-desempenho-e-eficiencia-equivalente-1000w-hid>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

Lumos Controls. **Lighting Control Protocols: DALI, 0-10V, DMX, PWM—What Is Your Choice?** 2021. Acesso em: 17 mar. 2024. Disponível em: <<https://lumoscontrols.com/resources/lighting-control-protocols-dali-0-10v-dmx-pwm-what-is-your-choice/>>.

Nettigo. **SIM800L GSM/GPRS Module.** 2024. <<https://nettigo.eu/products/sim800l-gsm-gprs-module>>. Acesso em: 19 ago. 2024.

OLIVEIRA *et al.* Evolução da arquitetura de redes móveis rumo ao 5g. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, [s.l.], v. 8, 2018.

- PASOLINI, G. *et al.* Design, deployment and evolution of heterogeneous smart public lighting systems. **Applied Sciences**, v. 9, n. 16, p. 3281, 2019. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3281>>.
- PIROTTI, R.; ZUCCOLOTTO, M. Transmissão de dados através de telefonia celular: arquitetura das redes gsm e gprs. **Revista Liberato**, v. 10, n. 13, p. 81–90, jan. 2013. Disponível em: <<https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/136>>.
- PIROTTI, R. P.; ZUCCOLOTTO, M. Transmissão de dados através de telefonia celular: avaliação de desempenho de uma conexão de dados utilizando gprs. **Revista Liberato**, v. 10, p. 81–90, 2009.
- Portal Belo Horizonte. **Cidade Inteligente**. 2019. Acesso em: 22 fev. 2024. Disponível em: <<https://portalbelohorizonte.com.br/negocios/cidade-inteligente>>.
- Prefeitura Municipal de Curitiba. **Relatório de Projetos de Iluminação Pública**. [S.l.], 2021. Acesso em: 22 fev. 2024. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2021/00324009.pdf>>.
- PRIBYL, O. *et al.* Modeling of smart cities based on its architecture. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 11, n. 4, p. 28–36, 2019.
- RS Robótica. **Antena para módulo ESP8266 GSM GPRS - Cabo Pigtail UFL com Conector SMA**. 2024. Acesso em: 26 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.rsrobotica.com.br/produto/antena-para-modulo-esp8266-gsm-gprs-cabo-pigtail-ufl-com-conector-sma.html>>.
- SEMTECH. **LoRa Modulation Basics**. 2015. Acesso em: 04 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.semtech.com/>>.
- SERBAN, A. C. e. a. Artificial intelligence for smart renewable energy sector in europe: Smart energy infrastructures for next generation smart cities. **IEEE Access**, v. 8, p. 77364–77377, 2020.
- SIGFOX. **Coverage**. 2024. Acesso em: 1 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/coverage/>>.
- Signal Cleveland. **ShotSpotter: A Primer**. 2022. Acesso em: 22 fev. 2024. Disponível em: <<https://signalcleveland.org/shotspotter-a-primer/>>.
- Smart Kits. **Mini Fonte 5V HLK-PM01 100-240V**. 2024. Acesso em: 26 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.smartkits.com.br/mini-fonte-5v-hlk-pm01-100-240v>>.
- SREENIVAS, J. **A Survey on Bluetooth 5.0 for Internet of Things**. 2020.
- STANIEC, K. The internet of things narrow-band lpwan/unb systems. In: _____. **Radio Interfaces in the Internet of Things Systems: Performance studies**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 93–117. ISBN 978-3-030-44846-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44846-2_5>.
- SVERZUT, J. U. **Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS – Evolução a caminho da quarta geração (4G)**. [S.l.]: Editora Saraiva, 2016.
- TTN. **The Things Network**. [S.l.]: TTN, 2020. Sem local de publicação.

ULLAH, R. e. a. Energy and congestion-aware routing metric for smart grid ami networks in smart city. **IEEE Access**, v. 5, p. 13799–13810, 2017.

UNICAMP. **Smart Cities Course**. 2024. <<https://lcv.fee.unicamp.br/index.php/courses/smart-cities-course>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

Urban Systems. **CSC Urban - Atual**. 2023. Acesso em: 22 fev. 2024. Disponível em: <https://conteudo.urbandsystems.com.br/csc_urban_atual>.

UsinaInfo. **Sensor de Tensão AC ZMPT101B Voltímetro Arduino**. 2024. Acesso em: 19 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-tensao-arduino/sensor-de-tensao-ac-zmpt101b-voltmetro-arduino-5658.html>>.

VALENTIM, M. A. Zen e *et al.* Dispositivo de telegestão da iluminação pública. In: **2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 615–616.

Vida de Silício. **ESP32 ESP-WROOM-32 NodeMCU**. 2024. Acesso em: 26 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.vidadesilicio.com.br/produto/esp32-esp-wroom-32-nodemcu/>>.

WILSON; K., S. S.; BIGLIERI, E. e. a. **Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications: Transmission Techniques for Digital Communications**. único. [S.l.]: Elsevier, 2016.

ZMPT101B Datasheet. 2024. <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1821973/MICRO-TRANSFORMER/ZMPT101B.html>>. Acesso em: 20 ago. 2024.