



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

MICKAELLY FREITAS NOBRE

**COMUNICAÇÃO POR LINHA DE ENERGIA EM AMBIENTES RESIDENCIAIS
INTELIGENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA FOCADA EM REDES DE BAIXA
TENSÃO**

QUIXADÁ

2026

MICKAELLY FREITAS NOBRE

COMUNICAÇÃO POR LINHA DE ENERGIA EM AMBIENTES RESIDENCIAIS
INTELIGENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA FOCADA EM REDES DE BAIXA
TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
ao Curso de Engenharia da Computação da
Universidade Federal do Ceará como
requisito parcial à obtenção do grau de bacharel
em Engenharia da Computação

Orientador: Prof. Luis Rodolfo Rebouças
Coutinho

QUIXADÁ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N672c Nobre, Mickaelly Freitas.
Comunicação por linha de energia em ambientes residencias inteligentes : uma revisão sistemática focada em redes de baixa tensão / Mickaelly Freitas Nobre. – 2026.
94 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Luis Rodolfo Rebouças Coutinho.
Coorientação: Prof. Dr. Jeandro de Mesquita Bezerra.
1. comunicação por linha de energia. 2. baixa tensão. 3. residências inteligentes. 4. revisão sistemática.
I. Título.

CDD 621.39

MICKAELLY FREITAS NOBRE

COMUNICAÇÃO POR LINHA DE ENERGIA EM AMBIENTES RESIDENCIAIS
INTELIGENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA FOCADA EM REDES DE BAIXA
TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
ao Curso de Engenharia da Computação da
Universidade Federal do Ceará como
requisito parcial à obtenção do grau de bacharel
em Engenharia da Computação

Aprovada em: 19 de Janeiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luis Rodolfo Rebouças Coutinho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Carlos Igor Ramos Bandeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Francisco Helder Candido dos Santos Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e, em seguida, à minha família, em especial à minha irmã, por todo o amor, companheirismo e lealdade, bem como por lutar batalhas que muitas vezes nem eram suas. Aos meus pais, expresso minha gratidão por abdicarem de seus próprios desejos para que eu pudesse realizar os meus. À minha querida prima Talita, sou grata pela amizade, pelo companheirismo e por compartilhar tantos momentos de alegria comigo. Aos meus tios, registro meu agradecimento por sempre me mostrarem que eu tinha um lugar para onde ir nos momentos mais difíceis.

De igual modo, agradeço ao meu primo, que foi meu colega de apartamento, cuja convivência ao longo desses últimos anos foi um alívio para a minha alma. Por fim, estendo meu agradecimento a todas as pessoas que tive a oportunidade de conhecer durante a graduação, pois cada uma delas foi importante para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação da tecnologia de comunicação por linha de energia em redes de baixa tensão para ambientes residenciais inteligentes. O estudo analisa 62 artigos publicados entre 2019 e 2025, seguindo o protocolo PRISMA, com foco no funcionamento da PLC, técnicas de modulação, desafios técnicos e desempenho comparativo com tecnologias sem fio. Os resultados indicam que a PLC é uma alternativa viável e complementar para automação residencial, especialmente devido ao aproveitamento da infraestrutura elétrica existente, oferecendo vantagens em alcance e robustez em ambientes internos. No entanto, sua adoção é limitada por desafios como interferências eletromagnéticas, ruídos impulsivos, variação de impedância e falta de padronização. A revisão identifica ainda lacunas na literatura, como a escassez de estudos em cenários residenciais reais e a necessidade de maior integração com tecnologias híbridas e sistemas de gestão energética. Conclui-se que a PLC possui potencial para suportar aplicações em *smart homes*, mas requer avanços técnicos e regulatórios para consolidar-se como solução de comunicação em larga.

Palavras-chave: plc; residências inteligentes; baixa tensão; revisão sistemática.

ABSTRACT

This work presents a systematic literature review on the application of power line communication technology in low-voltage networks for smart residential environments. The study analyzes 62 articles published between 2019 and 2025, following the PRISMA protocol, with a focus on PLC operation, modulation techniques, technical challenges, and performance comparison with wireless technologies. The results indicate that PLC is a viable and complementary alternative for home automation, particularly due to the use of existing electrical infrastructure, offering advantages in terms of coverage and robustness in indoor environments. However, its adoption is constrained by challenges such as electromagnetic interference, impulsive noise, impedance variability, and lack of standardization. The review also identifies gaps in the literature, including the scarcity of studies conducted in real residential scenarios and the need for greater integration with hybrid technologies and energy management systems. It is concluded that PLC has the potential to support smart home applications but requires technical and regulatory advances to be consolidated as a large-scale communication solution.

Keywords: plc; smart homes; low voltage; systematic review.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de rede PLC <i>Indoor</i>	17
Figura 2 – Funções do <i>modem</i> PLC	19
Figura 3 – Gráfico Modulação FSK	21
Figura 4 – Gráfico da Modulação PSK	22
Figura 5 – Gráfico da Técnica OFDM	23
Figura 6 – Gráfico da Modulação QAM	24
Figura 7 – Painel de Gerenciamento de Energia via PLC	28
Figura 8 – Processo Metodológico	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da busca e estudos selecionados por base de dados	51
Tabela 2 – Distribuição dos estudos selecionados por base de dados e tipo de publicação	52
Tabela 3 – Distribuição dos estudos excluídos por base de dados e critério de exclusão .	54
Tabela 4 – Distribuição dos estudos excluídos por duplicidade entre as bases de dados .	54
Tabela 5 – Distribuição das notas de avaliação dos estudos com pontuação superior a 5	55
Tabela 6 – Incidência de respostas “não” ou “não é possível dizer” por critério de avaliação da qualidade	56
Tabela 7 – Estudos desclassificados na avaliação da qualidade e critérios atendidos . .	56
Tabela 8 – Distribuição dos estudos por cenário de aplicação	57
Tabela 9 – Padrões, normas e tecnologias PLC empregadas nos estudos analisados . . .	58
Tabela 10 – Métricas de desempenho utilizadas nos estudos analisados	59
Tabela 11 – Tecnologias empregadas nos estudos analisados	60
Tabela 12 – Integração dos estudos com sistemas de energia	61
Tabela 13 – Integração dos sistemas PLC com outras tecnologias	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Abordagem de cada estudo	37
Quadro 2 – Estrutura PICOC da Pesquisa	39
Quadro 3 – Quadro das Questões de Pesquisa	39
Quadro 4 – Palavras-chave, sinônimos e sua classificação	41
Quadro 5 – Critérios de inclusão dos estudos	42
Quadro 6 – Critérios de exclusão dos estudos	43
Quadro 7 – Lista de Verificação QATSDD Adaptada para Revisão Sistemática de PLC em <i>Smart Homes</i>	45
Quadro 8 – Campos de Extração de Dados para Estudos sobre PLC em <i>Smart Homes</i> .	47
Quadro 9 – Categorias da análise categórica	48
Quadro 10 – Cronograma de execução das atividades	49
Quadro 11 – Categoria C1 – Modulação e Normas	62
Quadro 12 – Categoria C2 – Tecnologias PLC para casas inteligentes	64
Quadro 13 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 1	65
Quadro 14 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 2	66
Quadro 15 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 3	67
Quadro 16 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 4	68
Quadro 17 – Categoria C4 – Integração com Sistemas de Energia	69
Quadro 18 – Estudos classificados em duas categorias 1	71
Quadro 19 – Estudos classificados em duas categorias 2	72
Quadro 20 – Estudos classificados em mais de duas categorias 1	73
Quadro 21 – Estudos classificados em mais de duas categorias 2	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PLC	<i>Power line Communication</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
IoT	Internet das Coisas
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
EMC	Compatibilidade Eletromagnética
LC	indutor–capacitor
RLC	resistor–indutor–capacitor
MAC	<i>Medium Access Control</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
CP	prefixo cíclico
FFT	Transformada Rápida de <i>Fourier</i>
IFFT	Transformada Rápida de <i>Fourier</i> inversa
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
EMI	Interferência Eletromagnética
HEMS	<i>Home Energy Management Systems</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
DMT	<i>Discrete Multitone</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
NIEs	<i>Non-Intentional Emissions</i>
NB-PLC	<i>Narrowband</i>
BB-PLC	<i>Broadband</i>
CFR	<i>Channel Frequency Response</i>
BPL	<i>Broadband Power Line Communication</i>
PICOC	<i>Population, Intervention, Comparison, Context</i>

OOK	<i>On–Off Keying</i>
Chirp-BOK	<i>Chirp Binary Orthogonal Keying</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
mmPr	<i>mismatch probability</i>
CIR	<i>Channel Impulse Response</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
NDR	<i>Noise-to-Distortion Ratio</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
GSM	<i>Software-Defined Radio</i>
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
DR	<i>Demand Response</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
EV	<i>Electric Vehicle</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Electrotechnique</i>
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
ASC	<i>Average Secrecy Capacity</i>
SOP	<i>Secrecy Outage Probability</i>
SPSC	<i>Strictly Positive Secrecy Capacity</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
ABL	<i>Adaptive Bayesian Learning</i>
DF	<i>Decode-and-Forward</i>
AF	<i>Amplify-and-Forward</i>

HPGP	<i>HomePlug Green PHY</i>
HS-PLC	<i>High-Speed Power Line Communication</i>
MGF	<i>Moment Generating Function</i>
LSTM	<i>Long Short-Term Memory</i>
RLS	<i>Recursive Least Squares</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
EFRD	<i>Effective Frame Delivery Rate</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
DFE	<i>Decision Feedback Equalizer</i>
ECC	<i>Error Correction Coding</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
QP	<i>Quasi-Peak</i>
DHS	<i>Department of Homeland Security</i>
CISA	<i>Cybersecurity & Infrastructure Security Agency</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity Check</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Princípios da Comunicação por Linha Elétrica (PLC)	17
2.1.1	<i>Rede PLC</i>	18
2.1.2	<i>Tipos de Modulação em Canais PLC</i>	20
2.1.2.1	<i>Modulação FSK</i>	20
2.1.2.2	<i>Modulação PSK</i>	21
2.1.2.3	<i>Técnica OFDM</i>	22
2.1.2.4	<i>Modulação QAM</i>	23
2.1.3	<i>Características do Canal Elétrico Residencial</i>	25
2.1.3.1	<i>Impedância Variável</i>	25
2.1.3.2	<i>Quedas de tensão, Surtos e Flicker</i>	26
2.1.3.3	<i>Interferência Eletromagnética e Harmônicas</i>	26
2.2	PLC e Gerenciamento de Energia em residências inteligentes	26
2.3	Tecnologias Associados ao PLC em residências inteligentes	28
2.3.1	<i>HomePlug AV e AV2</i>	28
2.3.2	<i>Green PHY</i>	29
2.4	Panorama das Tecnologias Concorrentes ao PLC em residências inteligentes	29
2.4.1	<i>Wi-Fi</i>	29
2.4.2	<i>Zigbee</i>	30
2.4.3	<i>Bluetooth Low Energy</i>	31
2.4.4	<i>Comunicação ADSL</i>	32
3	TRABALHOS RELACIONADOS	33
3.1	<i>Exploring Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance Techniques for Resource Sharing in Broadband Power Line Communications</i>	33
3.2	<i>A review on the empirical characterization of the low voltage distribution grid as a communication channel for power line communications</i>	34

3.3	<i>Upgrading the Power Grid Functionalities with Broadband Power Line Communications: Basis, Applications, Current Trends and Challenges</i> . . .	36
3.4	Análise Comparativa	37
4	METODOLOGIA	38
4.1	Planejamento	40
4.1.1	<i>Procedimentos de Busca</i>	40
4.1.2	<i>Crítérios de Inclusão e Exclusão</i>	42
4.2	Avaliação e extração	43
4.2.1	<i>Avaliação da qualidade dos estudos</i>	43
4.2.2	<i>Extração dos Dados</i>	44
4.3	Análise categórica	46
4.4	Síntese crítica	47
4.5	Cronograma	49
5	RESULTADOS	50
5.1	Seleção dos Estudos	50
5.1.1	<i>String e Coleta</i>	50
5.1.2	<i>Inclusão e Exclusão</i>	52
5.1.2.1	<i>Inclusão</i>	52
5.1.2.2	<i>Exclusão</i>	53
5.2	Qualidade e Extração	54
5.2.1	<i>Qualidade</i>	54
5.2.2	<i>Extração</i>	56
5.3	Categoria	61
5.4	Síntese Crítica	72
5.5	Discussão	75
6	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX, a rede elétrica consolidou-se como a espinha dorsal da infraestrutura moderna, revolucionando a sociedade por meio da distribuição de energia. Originalmente concebida para a distribuição de energia, sua capilaridade e ubiquidade abriram caminho para novas aplicações além do fornecimento de corrente elétrica (Lorenzo, 1994).

Já na década de 1920, experimentos pioneiros demonstravam a viabilidade de utilizar a rede elétrica para comunicação, um conceito que posteriormente ficou conhecido como *Power line Communication* (PLC) (Pavlidou *et al.*, 2003). Contudo, foi com o advento da eletrônica digital e a popularização da Internet das Coisas (IoT) que a PLC emergiu como uma tecnologia transformadora, especialmente no contexto de automação residencial.(Ercan, 2024a).

As residências inteligentes representam ambientes interconectados nos quais dispositivos — como sensores, atuadores e eletrodomésticos — comunicam-se para otimizar conforto, segurança e eficiência energética (Costa *et al.*, 2021). Embora tecnologias sem fio, como WiFi¹, Zigbee² e *Bluetooth Low Energy* (BLE)³, predominem nesse cenário, elas enfrentam desafios significativos, incluindo interferência espectral, consumo elevado de energia e limitações de cobertura em ambientes internos complexos (Wang *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a PLC destaca-se como uma alternativa promissora, aproveitando a infraestrutura elétrica já existente para transmitir dados, o que elimina a necessidade de fiação adicional ou redes sem fio dedicadas. Essa característica confere à PLC vantagens em termos de escalabilidade, custo e robustez, especialmente em aplicações que demandam comunicação confiável e de longo alcance (Ercan, 2024b).

Entretanto, a adoção em larga escala ainda é limitada por desafios técnicos significativos. A rede elétrica não foi originalmente projetada para transmitir dados, o que torna a comunicação suscetível a interferências eletromagnéticas provenientes de aparelhos domésticos e fontes externas, além de ruídos impulsivos gerados por cargas conectadas à rede (Faccioni *et al.*, 2008). Esses fatores podem degradar a qualidade do sinal e afetar a confiabilidade da transmissão.

Além disso, a ausência de padronização uniforme entre fabricantes dificulta a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fornecedores, retardando a consolidação da tecnologia no mercado (ARXIV, 2011b).

¹ Wifi: <https://www.wi-fi.org/>

² Zigbee: <https://zigbeebrasil.com.br/>

³ *Bluetooth Low Energy*: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-le-primer/>

Mesmo diante dessas limitações, pesquisas recentes apontam para um crescimento expressivo no uso da PLC em ambientes residenciais inteligentes. Isso ocorre especialmente em aplicações que demandam comunicação estável e em tempo real, como o monitoramento do consumo energético e sistemas de segurança doméstica, onde a robustez e a confiabilidade da conexão são essenciais (Lin *et al.*, 2002). A capacidade da PLC de reutilizar a infraestrutura elétrica existente, combinada com avanços tecnológicos, tem impulsionado sua adoção em contextos onde outras soluções de comunicação apresentam limitações (Son *et al.*, 2010).

Diante da fragmentação da literatura e da variedade de enfoques metodológicos existentes, esta revisão sistemática visa consolidar o conhecimento atual sobre a aplicação da PLC em redes de baixa tensão voltadas para residências inteligentes. Para isso, são abordados o funcionamento da rede elétrica residencial, seus principais desafios técnicos, as tecnologias empregadas, as taxas de transmissão associadas e a comparação do desempenho da PLC com soluções sem fio. Além disso, investiga-se a viabilidade da integração da PLC em sistemas de gestão energética. Os achados desta revisão pretendem preencher lacunas acadêmicas e oferecer subsídios para pesquisas futuras e aplicações práticas no contexto da automação residencial.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Conduzir uma revisão sistemática da literatura acerca das aplicações da comunicação por linha de energia em redes de baixa tensão voltadas para residências inteligentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento e os principais desafios técnicos da rede elétrica de baixa tensão.
- Identificar as tecnologias, taxas de transmissão para PLC em sistemas residenciais inteligente.
- Observar o desempenho do PLC com tecnologias sem fio em residências inteligentes.
- Investigar a integração do PLC em sistemas de gestão energética residencial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

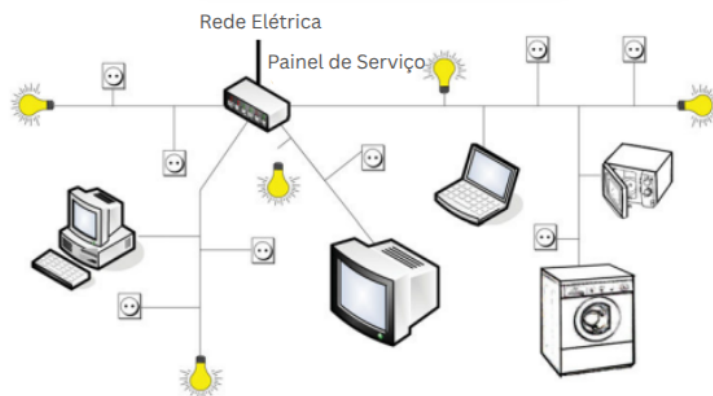
Nesta seção são apresentados os conceitos fundamentais que embasam este trabalho. Na Subseção 2.1 são abordados os fundamentos de PLC, com foco em seu funcionamento, técnicas de modulação e características do canal elétrico. A Subseção 2.2 discute sistemas de gerenciamento de energia para PLC em residências inteligentes. A Subseção 2.3 apresenta os principais padrões e tecnologias associados ao PLC. Por fim, a Subseção 2.4 apresenta um análise comparativa entre PLC e outras tecnologias de comunicação sem fio.

2.1 Princípios da Comunicação por Linha Elétrica (PLC)

A comunicação por linha de energia consiste na utilização da fiação elétrica existente para transmissão de dados, possibilitando que dispositivos conectados à rede sejam simultaneamente alimentados e operem em modo *half-duplex* (Giraneza; Khaled, 2022).

Embora a comunicação por linha de energia seja uma solução prática, sua aplicação em redes internas de edificações (*indoor*), como residências e escritórios, apresenta complexidades significativas, principalmente na modelagem dos canais de comunicação (Gheth *et al.*, 2018). Nesses ambientes, a topologia elétrica tende a ser mais ramificada e heterogênea, o que torna o canal de transmissão altamente imprevisível, especialmente em frequências médio-altas (Hassan *et al.*, 2023), conforme representadas na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de rede PLC *Indoor*



Fonte: (Lampe *et al.*, 2014).

Além das limitações estruturais, o desempenho dos sistemas PLC depende diretamente da largura de banda disponível, uma vez que aplicações avançadas — como múltiplas conexões de voz, transmissão de dados em alta velocidade e vídeo — requerem maior capacidade

de transmissão (Chung, 2020a).

Nessa perspectiva, os sistemas de banda larga (*broadband*) se destacam por oferecer taxas superiores a 2 Mbps, enquanto os de banda estreita (*narrowband*) operam com taxas reduzidas e são limitados a aplicações de menor demanda, como a transmissão de poucos canais de voz e dados simples (Slacik *et al.*, 2021; Hrasnica *et al.*, 2005).

Contudo, a utilização de banda larga em PLC impõe desafios técnicos relevantes, principalmente porque as redes elétricas não foram originalmente projetadas para a transmissão de dados (Akpari *et al.*, 2022). Um dos principais entraves é a necessidade de operar em faixas de frequência mais amplas — até 30MHz —, superiores às faixas estabelecidas pelas normas CENELEC para redes residenciais (Mlýnek *et al.*, 2021).

Isso impõe exigências rigorosas de Compatibilidade Eletromagnética (EMC), com o objetivo de limitar a emissão de interferências que possam comprometer outros sistemas de comunicação, como os serviços de rádio (Potisk *et al.*, 2018).

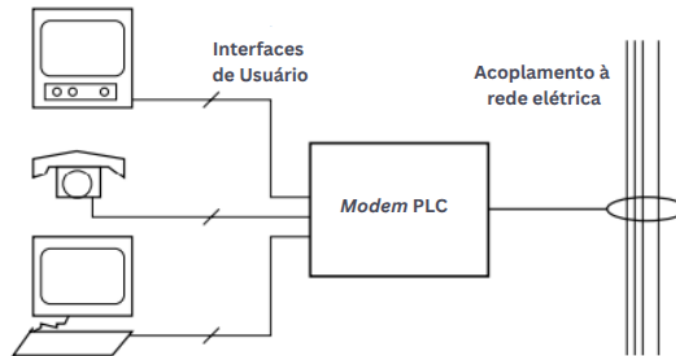
Além disso, como a rede elétrica atua como uma antena, os sistemas PLC precisam operar com potência de sinal reduzida, o que compromete seu desempenho em termos de alcance e taxa de dados (Zhao *et al.*, 2018). Essa limitação reforça a importância de uma análise criteriosa dos métodos de modulação empregados, das fontes e tipos de ruído presentes, bem como das características específicas dos sinais na rede elétrica. A compreensão desses fatores é fundamental para mitigar interferências e otimizar o desempenho dos sistemas PLC (ARXIV, 2015).

2.1.1 Rede PLC

Uma rede PLC é constituída por elementos essenciais que viabilizam a transmissão de dados sobre a infraestrutura elétrica preexistente. Entre esses, destaca-se o *modem PLC*, dispositivo responsável por interconectar os equipamentos de comunicação do assinante ao meio físico constituído pela rede elétrica (Sousa *et al.*, 2024). A Figura 2 exemplifica essa tecnologia e sua integração a rede.

Esse dispositivo executa as funções fundamentais de envio e recepção de dados pela linha de energia, utilizando blocos internos denominados transmissor e receptor, que são responsáveis pelo processamento e conversão dos sinais (Beshir *et al.*, 2023). Assim, para que essa comunicação seja possível, ele está conectado à rede elétrica por meio de um circuito de acoplamento especializado, que permite a injeção e extração dos sinais do meio físico (Gabhane;

Figura 2 – Funções do *modem* PLC



Fonte: Hrasnica *et al.* (2005).

Bijwe, 2014).

Nesse sentido, no transmissor, os dados digitais são modulados em sinais de alta frequência conforme as exigências de desempenho do sistema. Para garantir conformidade espectral e reduzir interferências, utilizam-se filtros conformadores, como redes indutor-capacitor (LC) ou resistor-indutor-capacitor (RLC), que eliminam componentes indesejadas e asseguram compatibilidade eletromagnética com a rede elétrica. Após a modulação e filtragem, o sinal é injetado na rede (Lu *et al.*, 2010).

No receptor, o sinal recebido pela rede elétrica é inicialmente processado por um filtro seletivo que rejeita componentes interferentes, incluindo a frequência fundamental da rede (50 ou 60 Hz) e ruídos de banda larga (Takemura *et al.*, 2013). O sinal filtrado é amplificado para compensar as perdas do canal e demodulado por meio de circuitos analógicos (detectores de envoltória, comparadores) ou processadores digitais, recuperando o fluxo de dados original com integridade (Santos *et al.*, 2022).

Para que ocorra a transmissão e recepção dos sinais, é fundamental um circuito de acoplamento, elemento crítico na interface *modem*-rede, assegura isolamento galvânico, proteção contra surtos e imunidade a interferências eletromagnéticas, além de promover adaptação de impedância para otimizar a transferência do sinal (Rensburg *et al.*, 2024). Este circuito permite a passagem seletiva de frequências acima de aproximadamente 9 kHz, bloqueando a componente de baixa frequência da rede elétrica, conforme especificado em (Chung, 2020b).

Os principais métodos de acoplamento são: resistivo, capacitivo e indutivo. O acoplamento resistivo, baseado em divisores de tensão, apresenta baixa eficiência e não garante isolamento galvânico (Giraneza; Khaled, 2022). O capacitivo utiliza capacitores em série para permitir passagem de alta frequência, porém oferece isolamento parcial (Wang *et al.*, 2011). O acoplamento indutivo, realizado via transformadores, é o método mais eficiente, proporcionando

isolamento galvânico completo e máxima transferência de energia do sinal (Costa *et al.*, 2017).

Vale ressaltar que, em topologias PLC avançadas, o *modem* PLC não apenas incorpora as funcionalidades da camada física do modelo OSI — incluindo modulação, codificação e sincronização do sinal —, como também implementa as subcamadas da camada de enlace de dados, *Medium Access Control* (MAC) e *Logical Link Control* (LLC), assegurando controle de acesso ao meio e integridade da comunicação (Hrasnica *et al.*, 2005). Além disso, dispositivos como *line traps* (*wave-traps*) são empregados para restringir o tráfego de sinais a determinados segmentos da rede elétrica, evitando interferências em equipamentos externos e permitindo a segmentação da rede em zonas isoladas (Cao *et al.*, 2013).

2.1.2 Tipos de Modulação em Canais PLC

As redes PLC de baixa tensão aplicadas em ambientes residenciais empregam técnicas de modulação como, 2.1.2.1 *Frequency Shift Keying* (FSK), 2.1.2.2 *Phase Shift Keying* (PSK), 2.1.2.3 *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), e 2.1.2.4 *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) escolhidas em função das características do canal de comunicação. A seleção adequada da modulação considera critérios como baixo custo, robustez a ambientes ruidosos, minimização da necessidade de equalização complexa e capacidade de suportar elevadas taxas de transmissão (Hrasnica *et al.*, 2005).

2.1.2.1 Modulação FSK

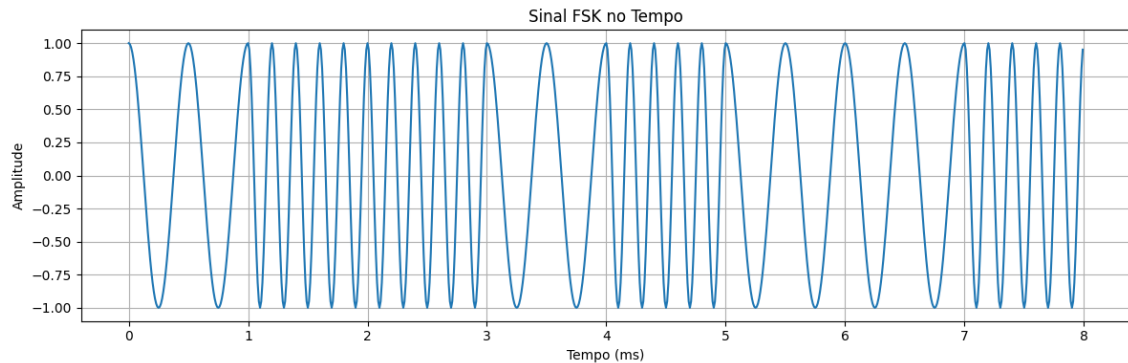
A modulação FSK, ou Modulação por Deslocamento de Frequência, é uma técnica de modulação digital em que a frequência da portadora varia em função do dado binário transmitido (Salehi, 2015). Trata-se de um esquema de modulação em frequência, no qual o bit 1 é representado por uma frequência mais alta (frequência de marca) e o bit 0 por uma frequência mais baixa (frequência de espaço) (Proakis, 2001). Nesse contexto, a representação matemática do sinal modulado é:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_i t) \quad (2.1)$$

em que $s(t)$ é o sinal no domínio do tempo, A é a amplitude constante da portadora e f_i representa a frequência associada ao bit transmitido. Especificamente, $f_i = f_1$ quando o bit é 1 e $f_i = f_2$ quando o bit é 0 (Qaragoz *et al.*, 2024). Essa variação entre frequências discretas

permite a codificação da informação digital, caracterizando a principal propriedade da modulação FSK: a alternância entre frequências fixas com amplitude constante (ARXIV, 2011a).

Figura 3 – Gráfico Modulação FSK



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, a Figura 3 exemplifica uma sequência de trechos senoidais com diferentes densidades de oscilação, correspondentes à variação da frequência da portadora de acordo com a sequência binária transmitida, ou seja, cada transição de frequência indica uma mudança de bit (Pratiwi *et al.*, 2018).

2.1.2.2 Modulação PSK

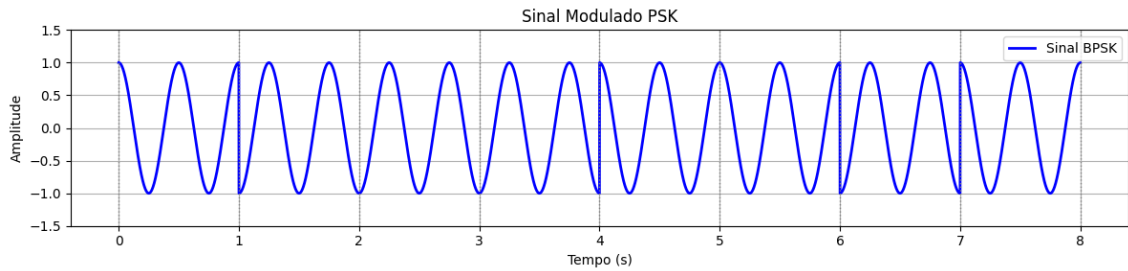
A modulação PSK, ou Modulação por Deslocamento de Fase, é uma técnica de modulação digital em que a fase da portadora senoidal é alterada de forma discreta conforme os bits da informação transmitida (Proakis, 2001). Nesse esquema, cada combinação de bits é associada a uma fase fixa da portadora. Nesse sentido, a representação matemática do sinal PSK é dada por:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \quad (2.2)$$

em que $s(t)$ é o sinal modulado no tempo, A representa a amplitude constante da portadora, f_c é a frequência da portadora e θ_i corresponde à fase associada ao símbolo transmitido (Faruque, 2021).

A Figura 4 detalhada como os segmentos senoidais com a mesma frequência e amplitude, mas com fases distintas, associadas à sequência de bits transmitida. Cada salto de fase indica uma transição de símbolo, evidenciando o princípio da PSK: a codificação digital por variação discreta na fase da portadora (Kartci *et al.*, 2016).

Figura 4 – Gráfico da Modulação PSK



Fonte: Elaborado pela autora.

2.1.2.3 Técnica OFDM

O OFDM, ou Multiplexação por Divisão de Frequência, é uma técnica que permite a transmissão simultânea de múltiplos sinais por um mesmo canal, atribuindo a cada subcanal uma faixa de frequência distinta (Dwivedi *et al.*, 2013). Esses subcanais são separados por pequenos espaçamentos, suficientes para evitar interferência entre eles. A chave para essa eficiência espectral é a ortogonalidade entre as subportadoras: ela permite que sinais com frequências próximas compartilhem o canal sem causar interferência mútua (Sure; Bhuma, 2017).

Nesse contexto, duas funções senoidais de frequências distintas, f_1 e f_2 , são consideradas ortogonais no intervalo $[0, T]$ quando a integral do produto entre elas nesse intervalo é nula (Xie *et al.*, 2014):

$$\int_0^T \cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) dt = 0, \quad \text{se } f_1 \neq f_2 \quad (2.3)$$

Essa propriedade é o que garante que os dados enviados por uma subportadora não interfiram nos dados enviados pelas demais. Para garantir a ortogonalidade entre as subportadoras no OFDM, é necessário que o espaçamento entre suas frequências obedeça à relação (Adebisi *et al.*, 2018):

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

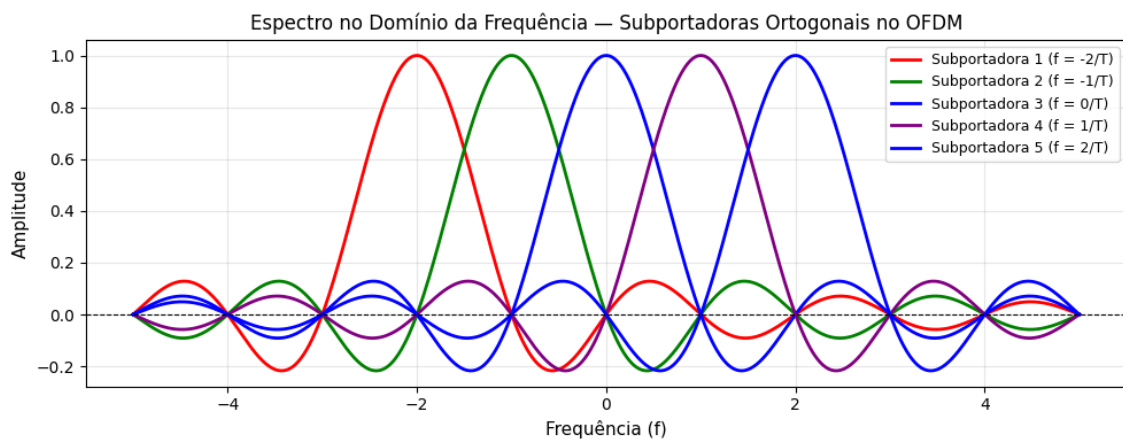
em que Δf representa a distância entre duas subportadoras consecutivas, e T corresponde à duração do símbolo OFDM (ou período de observação) (Huang *et al.*, 2016). Esse espaçamento específico assegura que, ao final de cada símbolo, as subportadoras permaneçam ortogonais entre si, mesmo havendo sobreposição espectral no domínio da frequência (Li, 2023).

Além disso, para mitigar a interferência entre símbolos (ISI) causada por atrasos de propagação (*multipath*), o OFDM insere um prefixo cíclico (CP) no início de cada símbolo. O

CP é uma cópia da parte final do símbolo, estendendo sua duração. Isso garante que, mesmo com atrasos, a ortogonalidade das subportadoras seja preservada após a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT) no receptor.

No processo de transmissão, o OFDM utiliza a Transformada Rápida de *Fourier* inversa (IFFT) no transmissor para converter os símbolos modulados $X[k]$ em um sinal no domínio do tempo $x(t)$. No receptor, a FFT é aplicada para recuperar os símbolos $X[k]$ a partir do sinal recebido $x(t)$ (Arrano; Azurdia-Meza, 2016). Essa técnica permite a multiplexação eficiente de múltiplas subportadoras ortogonais, reduzindo a complexidade computacional e viabilizando sua implementação prática em sistemas digitais (Paul; Vetrihangam, 2023).

Figura 5 – Gráfico da Técnica OFDM



A Figura 5 exemplifica a resposta espectral de subportadoras individuais, modeladas por funções seno centradas em diferentes frequências. Observa-se que, apesar da sobreposição espectral, a ortogonalidade entre as subportadoras é preservada: nos pontos centrais de cada uma, as demais possuem amplitude nula, o que elimina a interferência entre elas. Essa característica é essencial para viabilizar a multiplexação de sinais no mesmo canal, sem causar interferência intersubportadora (Miao *et al.*, 2014).

2.1.2.4 Modulação QAM

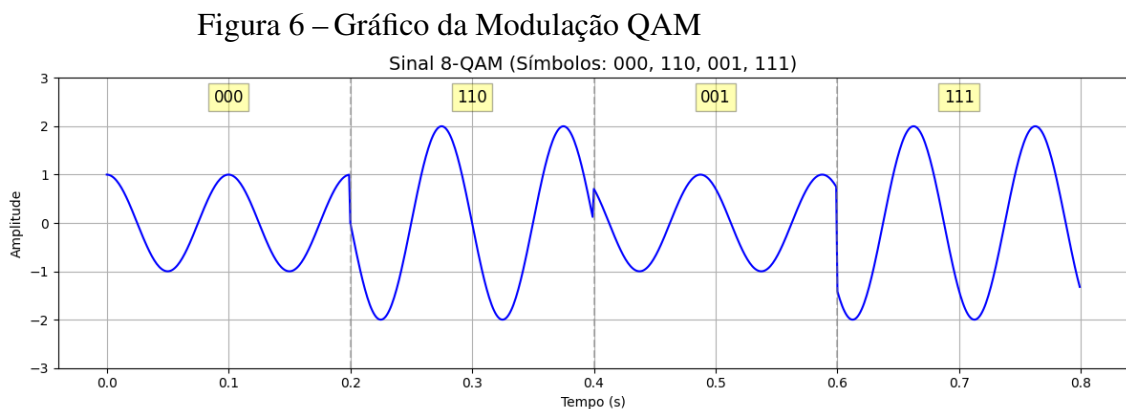
A modulação QAM, ou Modulação por Amplitude em Quadratura, transmite simultaneamente dois sinais ao combinar variações de amplitude em duas portadoras defasadas em 90° que compartilham a mesma frequência (Alencar, 2018). Esse processo é possível porque o sinal é composto por dois componentes fundamentais: o componente em fase, $I(t)$ (*In-Phase*),

e o componente em quadratura, $Q(t)$ (*Quadrature*) (Hanzo *et al.*, 2004). O primeiro modula uma portadora cossenoidal $\cos(2\pi f_c t)$, enquanto o segundo modula uma portadora senoidal $\sin(2\pi f_c t)$, ortogonal à primeira (Coleman, 2010).

Cada componente carrega uma parte distinta da informação, e sua combinação resulta no sinal QAM, expresso por:

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (2.5)$$

A subtração entre os termos é uma convenção usual, embora alguns padrões adotem a soma. Independentemente disso, a variação de $I(t)$ e $Q(t)$ define a amplitude e a fase do sinal, resultando em uma constelação de símbolos no plano complexo. A densidade dessa constelação está diretamente associada à ordem da modulação, influenciando a taxa de transmissão e a eficiência espectral (Igarashi, 2017). Nesse contexto, a Figura 6 exemplifica um sinal modulado em 8-QAM, técnica que transmite 3 bits por símbolo, representando quatro símbolos consecutivos: 000, 110, 001 e 111. Cada um desses símbolos possui uma forma de onda distinta, de modo que as mudanças entre os trechos destacam não apenas a transição entre os valores binários, mas também a conversão da informação digital em um sinal analógico contínuo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez transmitido, o sinal QAM precisa ser recuperado no receptor. Lá, a demodulação busca extrair os sinais originais $I(t)$ e $Q(t)$. Para isso, utiliza-se a demodulação síncrona, em que o sinal recebido é multiplicado separadamente por $\cos(2\pi f_c t)$ e $\sin(2\pi f_c t)$. Em seguida, aplicam-se filtros passa-baixa, que removem as componentes de alta frequência e isolam os sinais modulantes (Hanzo *et al.*, 2004).

Porém, para que esse processo funcione corretamente, é essencial uma sincronização precisa entre a portadora local do receptor e a portadora do transmissor, tanto em frequência

quanto em fase (Nölle *et al.*, 2010). Essa sincronização é geralmente realizada por circuitos como o *Costas Loop* (Malha de Costas) ou o *Phase-Locked Loop* (PLL) (Malha de Travamento de Fase). Caso haja imprecisões, a demodulação dos símbolos pode ser comprometida, resultando em erros na recuperação da informação (Mirabbasi; Martin, 2000).

Além disso, durante a transmissão, o sinal QAM está sujeito a degradações causadas por ruído, interferência, multipercurso e atenuações seletivas do canal. Para mitigar esses efeitos, receptores utilizam equalizadores adaptativos, que se ajustam dinamicamente às condições do meio (ARXIV, 2018). Essa correção é especialmente crítica em modulações QAM de alta ordem, onde os símbolos estão mais próximos na constelação, tornando o sistema mais sensível a distorções (Yamamoto, 1981).

2.1.3 Características do Canal Elétrico Residencial

O canal elétrico residencial é o meio pelo qual a energia elétrica é distribuída dentro das casas, conectando a rede externa aos aparelhos e dispositivos internos. Nesta subseção, serão abordados os seguintes tópicos: 2.1.3.1 Impedância Variável, 2.1.3.2 Quedas de Tensão, Surtos e *Flicker*, e 2.1.3.3 Interferência Eletromagnética e Harmônicas.

2.1.3.1 Impedância Variável

A variação de impedância em uma rede elétrica está relacionada à dificuldade que o circuito oferece à passagem da corrente alternada, a qual é formada pela resistência, reatância indutiva e reatância capacitiva (Hoseinzadeh *et al.*, 2017). Essa variação ocorre devido a fatores como a conexão e desconexão de cargas (eletrodomésticos, motores, lâmpadas), alterações na topologia da rede (chaveamento de transformadores, religadores) e condições operacionais (curtos-circuitos, harmônicos) (Langevin; Auriol, 1986).

Mudanças dinâmicas na impedância da rede elétrica afetam diretamente a comunicação por PLC, pois variações nessa impedância podem provocar a reflexão ou absorção do sinal por cargas de baixa impedância, resultando em atenuação e perda de eficiência na transmissão (Cavdar; Karadeniz, 2008). Além disso, transientes decorrentes de chaveamentos rápidos e harmônicos gerados por cargas não lineares, como inversores e lâmpadas LED, introduzem ruídos e distorções que interferem nas bandas de frequência utilizadas pela PLC (Gotz *et al.*, 2004).

2.1.3.2 *Quedas de tensão, Surtos e Flicker*

As quedas de tensão, ou *sags*, consistem em reduções temporárias no nível de tensão, geralmente causadas por partidas de motores, sobrecargas ou falhas na rede, podendo levar à perda momentânea de energia em dispositivos PLC e prejudicar a modulação do sinal (Mustafa *et al.*, 2024).

Já os surtos, ou *spikes*, são picos abruptos de tensão, frequentemente provocados por descargas atmosféricas ou chaveamento de cargas indutivas, que introduzem ruídos de alta frequência e podem distorcer ou até danificar os circuitos de comunicação (Chen *et al.*, 2002).

De modo adicional, o *flicker* — variações rápidas e repetitivas na tensão, normalmente associadas a cargas flutuantes como máquinas de solda ou compressores — causa flutuações na amplitude do sinal PLC, gerando instabilidade na comunicação e afetando a demodulação dos dados (Tadivaka *et al.*, 2014).

2.1.3.3 *Interferência Eletromagnética e Harmônicas*

A Interferência Eletromagnética (EMI) ocorre quando sinais indesejados, gerados por fontes como motores, inversores ou equipamentos industriais, interferem no sistema elétrico, seja por condução (através de cabos) ou por irradiação (pelo ar) (Keskin; Liu, 2016). Esses ruídos podem sobrepor-se aos sinais de comunicação da PLC, que operam em frequências que variam de kHz a MHz, causando distorções, erros na transmissão e redução da velocidade de comunicação (Sayed *et al.*, 2021).

Sob outro aspecto, destacam-se as harmônicas, que são distorções na forma de onda de tensão e corrente, originadas por cargas não lineares, como retificadores, inversores e lâmpadas LED. Elas correspondem a múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede (50 Hz ou 60 Hz) e podem causar efeitos adversos, como sobreaquecimento de transformadores, ressonância em bancos de capacitores e interferência em sistemas de comunicação por linha de energia (Khaledian *et al.*, 2018).

2.2 **PLC e Gerenciamento de Energia em residências inteligentes**

O gerenciamento de energia em ambientes residenciais inteligentes tem como principal objetivo promover um consumo energético mais eficiente, sustentável e alinhado ao perfil de uso dos consumidores (Beaudin; Zareipour, 2015). Para isso, são empregados os Sistemas

de Gerenciamento de Energia Domiciliar (*Home Energy Management Systems (HEMS)*), que desempenham um papel central no monitoramento, controle e otimização do uso da energia elétrica (Gomes *et al.*, 2022).

Nesse cenário, a interoperabilidade configura-se como um elemento essencial, uma vez que garante a comunicação e operação integrada entre dispositivos de diferentes fabricantes dentro de uma mesma infraestrutura (Saidala *et al.*, 2024). Para viabilizar essa integração, é fundamental a adoção de padrões técnicos bem definidos, que servem como base para uma arquitetura unificada, conectando dispositivos inteligentes, tecnologia PLC e plataformas em nuvem (Wang *et al.*, 2011).

Dentre os principais padrões, destaca-se o IEEE 1905.1, que, por exemplo, permite a interoperabilidade entre diferentes meios de comunicação, como PLC, Wi-Fi e Zigbee. Dessa forma, dispositivos que operam em redes distintas podem funcionar em conjunto de maneira transparente (IEEE Communications Society, 2013). Além disso, o padrão IEC 61334 padroniza o uso do PLC em redes elétricas de baixa tensão, sendo crucial para aplicações como medição inteligente e controle de carga (Andreadou *et al.*, 2016). Outro exemplo relevante é o KNX PLC, amplamente utilizado em automação predial. Esse padrão possibilita a integração de sistemas de iluminação, segurança, climatização e gerenciamento energético, demonstrando como a interoperabilidade pode ser aplicada de maneira prática e eficiente em ambientes complexos (Althaus *et al.*, 2022).

Além da interoperabilidade, a tecnologia PLC utiliza sensores e medidores inteligentes para transmitir dados de consumo pela rede elétrica, utilizando criptografia AES-128, conforme o padrão G.hn, para assegurar a confidencialidade das informações (Yaacoub *et al.*, 2021). Adicionalmente, *gateways* PLC empregam *firewalls* integrados para proteção contra acessos não autorizados, garantindo a segurança da comunicação (Marksteiner; Vallant, 2017).

O *gateway* PLC, por sua vez, desempenha uma função central na arquitetura do sistema, atuando como intermediário entre a rede elétrica e o HEMS. Sua principal tarefa é converter os dados analógicos da rede elétrica em formato digital, permitindo que o HEMS monitore o consumo em tempo real (Han *et al.*, 2014). No entanto, antes de chegarem ao *gateway*, os dados são inicialmente processados pelo *modem* PLC, que realiza a conversão dos sinais digitais em ondas analógicas moduladas (James *et al.*, 2013). Após toda essa etapa do sistema PLC, os dados convertidos são analisados pelo HEMS, que toma decisões automatizadas com base em fatores como a geração de energia renovável, as preferências do usuário, as tarifas

horárias e as previsões de consumo geradas por algoritmos de inteligência artificial (Patel; Khosla, 2015).

Por fim, a arquitetura completa do sistema inclui uma camada de computação em nuvem, que armazena dados históricos, realiza análises de longo prazo e permite o controle remoto via aplicativos móveis. Assim, a integração entre HEMS, PLC e tecnologias complementares possibilita uma gestão energética mais eficaz e alinhada com as tendências de *smart grids* e cidades inteligentes (Gungor *et al.*, 2011). A Figura 7 exemplifica a arquitetura completa de gerenciamento de energia integrada à PLC.



Fonte: Elaborado pela autora

2.3 Tecnologias Associados ao PLC em residências inteligentes

Esta seção apresenta as principais tecnologias de comunicação por linha de energia aplicadas a ambientes de residências inteligentes. A Seção 2.3.1 descreve a tecnologia *HomePlug AV/AV2*, enquanto a Seção 2.3.2 detalha a especificação *Green PHY*.

2.3.1 *HomePlug AV e AV2*

O padrão IEEE 1901 foi desenvolvido para padronizar a tecnologia PLC em redes domésticas, estabelecendo especificações globais que garantem interoperabilidade e desempenho confiável na transmissão de dados pela rede elétrica (Rahman *et al.*, 2011).

Baseado neste padrão, o *HomePlug AV* foi lançado em 2005 como uma das primeiras implementações amplamente adotadas de PLC para redes domésticas. Utilizando modulação OFDM na faixa de 2 a 28 MHz, oferecia taxas de até 200 Mbps, embora a taxa física pudesse alcançar cerca de 500 Mbps devido ao *overhead* (Hazen, 2008). Por fim, vale destacar que o *HomePlug AV* também empregava criptografia AES-128, assegurando assim a segurança das comunicações (Latchman *et al.*, 2013a).

Em 2012, o *HomePlug AV2* surgiu como uma evolução do padrão AV, oferecendo velocidades de até 1 Gbps e uma taxa física próxima a 2 Gbps, tornando-se ideal para redes domésticas de alta demanda (Yonge *et al.*, 2013). Sua principal inovação foi a adoção da

tecnologia *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), que utiliza múltiplos pares de fios para otimizar a transferência de dados (Mioynek *et al.*, 2021).

2.3.2 *Green PHY*

O *Green PHY* é um padrão de comunicação derivado do *HomePlug AV*, mas, diferentemente deste, foi especificamente otimizado para baixo consumo de energia. Criado sob o padrão IEEE 1901.2, ele estabelece normas para comunicação por rede elétrica, voltadas principalmente para redes inteligentes (Pinomaa *et al.*, 2015). Isso porque seu objetivo principal é viabilizar uma comunicação eficiente e energeticamente econômica, o que o torna ideal para aplicações como medidores inteligentes, veículos elétricos e automação residencial (Zyren, 2011).

Quanto às suas características técnicas, essa tecnologia oferece uma taxa de transmissão de aproximadamente 10 Mbps - valor que, embora não seja elevado, é plenamente suficiente para aplicações que não demandam alta largura de banda. Para alcançar essa comunicação, o padrão emprega modulação OFDM, com operação em frequências que variam entre 10 e 490 kHz (Latchman *et al.*, 2013b).

2.4 Panorama das Tecnologias Concorrentes ao PLC em residências inteligentes

As tecnologias Wi-Fi, Zigbee e BLE constituem as principais opções de comunicação em sistemas de automação residencial, cada uma apresentando atributos operacionais e limitações técnicas específicas (Stoljescu-Crisan *et al.*, 2021). Nesta seção, apresenta-se uma visão geral dessas tecnologias, detalhada nas subseções: Subseção 2.4.1, dedicada ao Wi-Fi; Subseção 2.4.2, ao Zigbee; e Subseção 2.4.3, ao BLE.

2.4.1 *Wi-Fi*

O Wi-Fi se estabeleceu como uma das principais tecnologias de comunicação sem fio, permitindo que dispositivos como *smartphones*, computadores e *smart TVs* se conectem à internet ou a redes locais sem a necessidade de cabos. Para isso, ele utiliza ondas de rádio, transmitidas nas frequências de 2,4 GHz ou 5 GHz (Tan *et al.*, 2018a). Além disso, seu funcionamento segue o padrão IEEE 802.11, definido pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE), o que assegura compatibilidade entre dispositivos e eficiência nas transmissões (Saloni;

Hegde, 2016).

Para que uma rede Wi-Fi funcione adequadamente, diversos componentes desempenham papéis específicos. O principal deles é o roteador, que atua como núcleo da rede, transmitindo o sinal sem fio e conectando os dispositivos à internet (Tan *et al.*, 2018b). Já o *modem* é responsável por converter o sinal da operadora — seja fibra óptica, linha digital de assinante (*Digital Subscriber Line* (DSL)) ou outra tecnologia — em um formato compatível com a rede local (Zheng *et al.*, 2024). Em situações onde a cobertura precisa ser ampliada, repetidores ou extensores podem ser utilizados para reforçar o sinal (Lee *et al.*, 2017). Por outro lado, em ambientes maiores, sistemas *Mesh* Wi-Fi se mostram mais eficientes, pois empregam múltiplos pontos de acesso para garantir cobertura uniforme sem perda de qualidade (Wu *et al.*, 2023).

Apesar de sua praticidade, o sinal Wi-Fi está sujeito a diversos fatores que podem comprometer seu desempenho. O primeiro deles é a distância em relação ao roteador, que reduz progressivamente a intensidade do sinal. Da mesma forma, obstáculos físicos — como paredes de concreto ou estruturas metálicas — absorvem ou refletem as ondas, prejudicando a conexão (ARXIV, 2013). Outro desafio é a interferência causada por dispositivos que operam em frequências semelhantes, como micro-ondas e redes Wi-Fi vizinhas. Por último, o congestionamento de canais — comum em locais com muitos usuários — pode sobrecarregar a rede, resultando em lentidão ou instabilidade (Vallejo-Baldeón *et al.*, 2017).

2.4.2 Zigbee

O Zigbee é um protocolo de comunicação sem fio projetado para redes de baixo consumo de energia (LPWAN), sendo amplamente utilizado em automação residencial e aplicações de IoT, como lâmpadas inteligentes, sensores e fechaduras eletrônicas (Misic; Misic, 2008). Ele opera principalmente na frequência de 2,4 GHz, padronizada globalmente, mas também pode utilizar 868 MHz na Europa e 915 MHz nos EUA, adaptando-se às regulamentações regionais (Wang *et al.*, 2008). No entanto, essa faixa de 2,4 GHz também é compartilhada com redes Wi-Fi, o que pode causar interferência em ambientes congestionados, reduzindo a eficiência da comunicação em locais com muitos dispositivos sem fio operando simultaneamente.

Além disso, uma das características mais importantes do Zigbee é sua arquitetura de rede em malha (*mesh*), que permite que os dispositivos se comuniquem entre si, aumentando não apenas o alcance, mas também a confiabilidade da rede (Wheeler, 2007). Essa estrutura é

composta por três elementos principais: o coordenador (*coordinator*), responsável por gerenciar a rede e essencial para sua inicialização; os roteadores (*routers*), que retransmitem os sinais para ampliar a cobertura; e os dispositivos finais (*end devices*), projetados para consumir menos energia, mas que não têm a função de rotear tráfego (Hersent *et al.*, 2012).

Contudo, essa estrutura depende de roteadores intermediários – como lâmpadas ou tomadas inteligentes – para retransmitir os sinais. Dessa forma, se houver poucos dispositivos atuando como roteadores, a rede pode ficar instável ou apresentar falhas de cobertura (Lee; Wang, 2013). Outro ponto relevante é que o Zigbee tem uma baixa taxa de transmissão de dados (até 250 kbps), o que o torna inviável para aplicações que demandam alta largura de banda, como streaming de vídeo ou áudio sem compressão (Haque *et al.*, 2022).

2.4.3 *Bluetooth Low Energy*

O *Bluetooth Low Energy*, ou *Bluetooth Smart*, foi desenvolvido para comunicações sem fio com baixo consumo de energia (Harris *et al.*, 2016). Diferentemente do *Bluetooth* clássico, voltado para transmissões contínuas, o BLE é ideal para aplicações intermitentes, como em dispositivos IoT e *wearables*, permitindo operação por meses ou anos com uma pequena bateria, consumindo até 100 vezes menos energia (Koulouras *et al.*, 2025).

Para entender melhor seu funcionamento, é preciso analisar sua arquitetura, organizada em duas camadas principais: o *Controller* e o *Host*. O *Controller*, composto pela PHY (camada física) e *Link Layer*, é responsável pela comunicação bruta no espectro de 2.4 GHz, utilizando 40 canais - sendo três dedicados exclusivamente ao processo de *advertising* (Tosi *et al.*, 2017). Já o *Host*, que inclui protocolos como L2CAP, ATT, GATT e GAP, gerencia a estrutura lógica da comunicação, organizando os dados em serviços e características, além de definir os papéis dos dispositivos na rede (Darroudi; Gomez, 2017).

No entanto, a operação na faixa de 2,4 GHz, embora amplamente disponível, apresenta desafios significativos. O sinal do BLE tem dificuldade para atravessar obstáculos físicos como paredes e estruturas metálicas, limitando seu alcance efetivo a 10-100 metros, dependendo do ambiente e da potência de transmissão. Essa limitação o torna inadequado para aplicações de longa distância (Pancham *et al.*, 2018). Além disso, sua largura de banda reduzida (até 1 Mbps nas versões 4.x e 2 Mbps na 5.0) inviabiliza a transmissão contínua de conteúdos robustos, enquanto a latência elevada em ambientes com interferência dificulta seu uso em aplicações que exigem resposta em tempo real (Dian *et al.*, 2018).

Para contornar essas restrições, o BLE opera com base em papéis bem definidos, estabelecidos pelo *Generic Access Profile* (GAP), que divide os dispositivos em três categorias principais. O *Peripheral* age como servidor, anunciando sua disponibilidade e fornecendo dados, enquanto o Central (como um *smartphone*) atua como cliente, iniciando conexões e solicitando informações (Gupta, 2016). Há ainda o modo *Broadcast*, onde um dispositivo transmite dados sem estabelecer conexão direta, modelo amplamente utilizado em *beacons* de proximidade (Schneiderman, 2015).

O processo de comunicação, por sua vez, inicia-se com o *advertising*, no qual dispositivos *Peripherals* transmitem pacotes periódicos em três canais dedicados. Esses pacotes podem conter desde o nome do dispositivo até informações sobre serviços oferecidos (Bronzi *et al.*, 2016). Quando um Central detecta esses anúncios e decide conectar-se, é estabelecido um *link* bidirecional para troca de dados via perfil genérico de atributos (GATT), com opção de pareamento para segurança quando necessário (ARXIV, 2024).

2.4.4 Comunicação ADSL

A comunicação *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) é uma tecnologia de transmissão de dados que possibilita o acesso à internet em alta velocidade por meio da infraestrutura convencional de linhas telefônicas de cobre (J.H.; Schalkwyk, 2002). Seu funcionamento baseia-se na divisão do espectro de frequência da linha telefônica em faixas distintas, separando o canal destinado à transmissão de voz daquele utilizado para dados, o que permite a utilização simultânea do serviço telefônico e da conexão à internet sem interferências mútuas (Wei *et al.*, 2007). A denominação assimétrica decorre do fato de que a taxa de transmissão no sentido de recepção de dados é superior à taxa de envio, característica compatível com o perfil de uso predominante em aplicações residenciais. Para a transmissão dos dados, são empregados modems ADSL e técnicas de modulação digital, como o *Discrete Multitone* (DMT), que subdivide o canal em múltiplas subportadoras, aumentando a eficiência e a robustez da comunicação (Fowdur *et al.*, 2015). A tecnologia ADSL é amplamente utilizada para prover acesso à internet banda larga de forma econômica, especialmente em ambientes residenciais e pequenos escritórios, sendo uma alternativa viável em regiões onde a infraestrutura de fibra óptica ainda não está disponível (Katiyar; Padmaja, 2016).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção aborda os trabalhos relacionados, com o objetivo de apresentar e analisar pesquisas anteriores que tratam de temas, métodos ou tecnologias semelhantes. Além disso, busca-se comparar o trabalho desenvolvido com estudos existentes, destacando semelhanças, diferenças e avanços.

3.1 *Exploring Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance Techniques for Resource Sharing in Broadband Power Line Communications*

Os autores desse estudo Luwemba *et al.* (2022) realizaram uma revisão sistemática da literatura que tinha um objetivo analisar e avaliar as técnicas de compartilhamento de recursos utilizando o protocolo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) aplicadas às comunicações via rede elétrica, especialmente em cenários de banda larga. A proposta é identificar métodos que melhorem a eficiência do sistema, reduzam colisões e permitam acesso simultâneo de múltiplos usuários, focando na comparação entre: (i) acesso por canal único (*Single Channel*), (ii) acesso multicanal utilizando OFDMA.

Na metodologia desta pesquisa foi realizada uma busca, que foram obtidos 253 artigos publicados. Na triagem, os critérios de inclusão exigiam que os artigos abordassem protocolo de camada MAC para PLC, comutação adaptativa de camadas, PLC de banda larga, desempenho do CSMA/CA para PLC ou métodos baseados em CSMA/CA e OFDMA, onde 192 foram excluídos na triagem inicial. Dos 61 restantes, 36 foram removidos após avaliação de elegibilidade, resultando em 25 artigos analisados quanto aos indicadores de desempenho e relevância dos resultados. Por fim, 18 foram selecionados para análise aprofundada dos métodos de acesso ao canal em comunicações por linha de energia. Esses trabalhos foram examinados considerando as metodologias adotadas, modelos matemáticos utilizados (como cadeias de *Markov* e teoria de renovação), esquemas de acesso ao canal (simples ou multicanal), métricas de desempenho (eficiência, *throughput*, atraso e colisões) e suas contribuições técnicas. Além da análise teórica, os autores realizaram simulações no MATLAB, baseadas nos modelos extraídos da literatura, para avaliar e comparar a eficiência do sistema em cenários de acesso por canal único e multicanal utilizando acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA)), destacando os impactos do aumento no número de estações na eficiência do sistema.

Os resultados desse estudo ilustra o impacto do número de dispositivos na eficiência do sistema. No acesso por canal único, a eficiência é alta, cerca de 39%, quando há até 20 dispositivos. Porém, ao ultrapassar esse limite, a eficiência sofre uma queda acentuada devido ao aumento das colisões, chegando a aproximadamente 1% com 100 dispositivos, o que evidencia sua limitação em cenários densos. Por outro lado, o acesso multicanal (CSMA/CA + OFDMA) reduz significativamente as colisões e melhora o *throughput*, mantendo uma eficiência estável em torno de 23%, independentemente da quantidade de dispositivos. No entanto, quando há poucos dispositivos, alguns subcanais permanecem ociosos, o que limita a eficiência nesse cenário. Nesse limite, a eficiência sofre uma queda acentuada devido ao aumento das colisões, chegando a aproximadamente 1% com 100 dispositivos, o que evidencia sua limitação em cenários densos.

O trabalho relacionado, utilizado como base de comparação, concentra-se exclusivamente na análise de técnicas de CSMA/CA em redes PLC. Seu escopo é restrito, limitando-se à avaliação técnica da eficiência de protocolos em cenários com múltiplos dispositivos, com foco principal em simulações matemáticas de desempenho. Embora seja relevante para otimizações em nível de camada MAC, esse estudo não estabelece conexões diretas com aplicações práticas nem considera as demandas atuais do mercado. Em contraste, o trabalho proposto neste TCC diferencia-se por apresentar uma abordagem mais ampla e aplicada. Além de analisar aspectos técnicos, ele incorpora discussões sobre gestão energética residencial, integração com sistemas inteligentes e comparações com tecnologias concorrentes. Dessa forma, enquanto o trabalho relacionado se mantém em um nível teórico e restrito, o trabalho proposto busca oferecer contribuições práticas e contextualizadas ao cenário real de utilização.

3.2 A review on the empirical characterization of the low voltage distribution grid as a communication channel for power line communications

Nesse artigo Gonzalez-Ramos *et al.* (2023) apresentaram uma análise abrangente do estado da arte, desafios e perspectivas futuras da caracterização empírica da rede de distribuição de média/baixa tensão como meio de comunicação para tecnologias de PLC. A partir de medições em campo, o estudo foca na avaliação de parâmetros críticos como impedância, atenuação e emissões não intencionais (*Non-Intentional Emissions* (NIEs)), que impactam diretamente a propagação e confiabilidade dos sinais PLC. Abordam-se também as tecnologias *Narrowband* (NB-PLC) e *Broadband* (BB-PLC), seus métodos de medição e caracterização, além da importância da padronização normativa para garantir desempenho e interoperabilidade

em aplicações como *Smart Grids*.

A metodologia adotada baseia-se em uma revisão narrativa e crítica da literatura, reunindo e organizando as principais contribuições científicas e técnicas sobre o tema. A revisão contempla estudos que analisam parâmetros fundamentais como NIEs, impedância de acesso à rede e resposta de canal (*Channel Frequency Response (CFR)*), bem como os principais sistemas e métodos de medição empregados. Incluem-se estudos experimentais realizados em diferentes contextos (rurais, urbanos, industriais e residenciais), e normas técnicas internacionais relevantes (IEC, CENELEC, CISPR). A análise é estruturada em eixos temáticos: tecnologias NB-PLC e BB-PLC, tipos de ruído presentes, métodos de medição e os desafios enfrentados na caracterização do canal. Também são apresentadas tabelas comparativas com mais de vinte sistemas de medição, destacando suas vantagens, limitações e aplicabilidades.

Os resultados revelam que os principais desafios envolvem a intensa presença de ruídos não intencionais, gerados por dispositivos como inversores fotovoltaicos e carregadores de veículos elétricos, que afetam especialmente a faixa NB-PLC (até 500 kHz), com emissões superiores a 90 dB μ V em ambientes urbanos e industriais. Verificou-se também alta variabilidade na impedância da rede, tanto em frequência quanto no tempo, com valores inferiores aos previstos por normas IEC. Em relação à atenuação e resposta de canal, observam-se perdas significativas, especialmente em redes ramificadas ou de longas distâncias, com atenuações entre 20 dB (zonas residenciais) e 40 dB (zonas rurais). Há ainda carência de padronização nas metodologias de medição em campo, limitações dos equipamentos laboratoriais para uso em redes reais e escassez de dados em frequências acima de 1 MHz, dificultando a evolução do BB-PLC. As campanhas revisadas foram realizadas em países como Espanha, Alemanha, China, Brasil, França e Turquia, demonstrando que as características da rede variam amplamente conforme a topologia, tipo de cabeamento e carga conectada. O artigo conclui com a necessidade urgente de desenvolver sistemas de medição específicos, normas atualizadas e estudos locais para viabilizar a comunicação eficiente sobre a infraestrutura elétrica existente.

O trabalho relacionado mencionado anteriormente caracteriza-se média/baixa tensão por uma revisão narrativa, com foco genérico em parâmetros técnicos de redes de baixa e média tensão, como impedância e ruídos, aplicados a contextos diversos. Seu escopo é limitado e descritivo, não avançando para soluções práticas em automação residencial. Em contraste, o trabalho proposto neste TCC adota uma revisão sistemática baseada no protocolo PRISMA, garantindo maior rigor metodológico. Ele concentra-se especificamente em aplicações de

residências inteligentes, explorando desafios técnicos da PLC, eficiência energética, tecnologias PLC aplicadas a residências inteligentes e realizando análises comparativas com tecnologias sem fio. Dessa forma, a abordagem deste trabalho não apenas identifica lacunas na literatura, como também fornece insights práticos para implementação, superando a natureza fragmentada e restrita do estudo relacionado.

3.3 Upgrading the Power Grid Functionalities with Broadband Power Line Communications: Basis, Applications, Current Trends and Challenges

O artigo González-Ramos *et al.* (2022) oferece uma visão abrangente sobre o papel das tecnologias de Comunicação por Linha de Energia em Banda Larga (*Broadband Power Line Communication* (BPL)) na modernização das redes elétricas (*Smart Grids*) e no desenvolvimento de cidades inteligentes. São abordados os fundamentos técnicos, evolução histórica, padronizações internacionais e aplicações práticas da BPL em contextos como medição inteligente, veículos elétricos, geração distribuída, automação de redes, Indústria 4.0 e IoT. O estudo também discute a atuação de entidades como ITU-T, IEEE, ISO/IEC, *HomeGrid Forum* e *HD-PLC Alliance* na promoção de padrões técnicos e regulatórios.

A metodologia adotada consiste em uma abordagem descritiva e analítica, fundamentada em revisão da literatura, comparação técnica e discussão de estudos de campo relacionados às tecnologias BPL. Inicialmente, são mapeadas as principais organizações e alianças envolvidas na padronização, como ITU-T, IEEE, *Broadband Forum*, *HomeGrid Forum* e *HD-PLC Alliance*, apresentando suas especificações técnicas — incluindo modulações (como OFDM), taxas de transmissão, codificações de correção de erro e faixas de frequência utilizadas. Em seguida, realiza-se a análise comparativa de padrões como G.hn, IEEE 1901, HD-PLC e *HomePlug*, por meio de tabelas e avaliações críticas que evidenciam vantagens, limitações e aplicações. Também são revisadas normas e diretrizes regulatórias internacionais (ITU, IEEE, ISO/IEC e EN), com foco em requisitos técnicos e limites de emissões eletromagnéticas. Casos de uso reais e potenciais aplicações — como medição inteligente, automação de redes, carregamento de veículos elétricos, geração distribuída, cidades inteligentes e automação industrial — são discutidos com base em implementações práticas e testes de campo. Por fim, são abordados desafios da tecnologia, como ruídos, perdas de propagação e questões de segurança, utilizando dados empíricos e modelos teóricos, além de recomendações para futuras pesquisas e avanços na padronização.

Os resultados evidenciam que padrões como G.hn e IEEE 1901 alcançam taxas de até 1,5 Gbps em frequências entre 1,8 e 100 MHz. No entanto, persistem desafios como variação de impedância, interferências eletromagnéticas oriundas de dispositivos eletrônicos, perdas em altas frequências e questões de cibersegurança. Testes de campo demonstram a viabilidade da BPL em subestações e *backbones* de média tensão, condicionada a adaptações topológicas e diretrizes regulatórias. O estudo aponta a BPL como uma solução promissora para a digitalização da rede elétrica, especialmente se integrada a tecnologias como 5G e IoT, desde que sejam superadas limitações relacionadas à robustez do canal e interoperabilidade.

O trabalho relacionado mencionado anteriormente apresenta uma abordagem descritiva e analítica, baseada em revisão de literatura e estudos de campo, com foco genérico em *Smart Grids* e cidades inteligentes. Seu escopo é mais amplo e menos direcionado, não aprofundando aspectos específicos de aplicações residenciais. Em contraste, o estudo proposto neste TCC diferencia-se por seu rigor metodológico e foco direcionado em redes residenciais de baixa tensão e residências inteligentes. Ele oferece uma análise aplicada ao contexto doméstico, incluindo comparações diretas com tecnologias sem fio e uma investigação detalhada sobre gestão energética residencial e tecnologias PLC. Dessa forma, o trabalho proposto se destaca por sua relevância prática e por fornecer contribuições concretas para o campo da automação residencial, superando a abordagem mais genérica e descritiva do estudo relacionado.

3.4 Análise Comparativa

No Quadro 1 constam este trabalho e os três estudos relacionados previamente discutidos, que são especificados com base na sua abordagem: (i) Revisão sistemática; (ii) Revisão narrativa; (iii) Revisão descritiva e analítica e Média/baixa tensão.

Quadro 1 – Abordagem de cada estudo

Trabalho	Revisão sistemática	Revisão narrativa	Revisão descritiva e analítica	Média/baixa tensão
(Luwemba <i>et al.</i> , 2022)	X			X (Baixa tensão)
(Gonzalez-Ramos <i>et al.</i> , 2023)		X		X (Média/baixa tensão)
(González-Ramos <i>et al.</i> , 2022)			X	X (<i>Smart Grid</i>)
Este Trabalho	X			X (Baixa tensão)

Fonte: Elaborado pela autora.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para a realização da revisão sistemática da literatura, conduzida conforme as diretrizes do protocolo PRISMA 2020¹ (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). A revisão sistemática consiste em um método científico estruturado que visa identificar, selecionar, avaliar e sintetizar, de forma rigorosa e transparente, os estudos mais relevantes sobre uma determinada questão de pesquisa, a partir de critérios previamente definidos e estratégias de busca sistematizadas em bases de dados. O protocolo PRISMA orienta esse processo ao estabelecer diretrizes claras para o relato metodológico, incluindo a descrição das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, assegurando transparência, reprodutibilidade e confiabilidade aos resultados obtidos.

Além disso, foi empregada a ferramenta PARSIFAL² (Protocolo para Análise de Revisões Sistemáticas da Literatura), que oferece suporte metodológico à organização e execução de revisões estruturadas. Essa ferramenta foi utilizada nas Subseções 4.1 e 4.2. Vale ressaltar que o PARSIFAL se destaca por sua simplicidade e foco específico em revisões sistemáticas, facilitando a definição clara de objetivos, critérios de inclusão e estratégias de busca. Isso garante maior rigor, padronização e reprodutibilidade ao processo.

Vale ressaltar que a ferramenta *DeepSeek*³ foi utilizada para a realização de testes com diferentes *strings* de busca, uma vez que diversas combinações foram avaliadas até a definição da *string* considerada ideal, sendo algumas delas sugeridas pela própria ferramenta. Além disso, o uso do *DeepSeek* justificou-se pelo fato de que determinados estudos não apresentavam de forma clara, no resumo ou *abstract*, se o conteúdo abordava a tecnologia PLC. Mesmo após uma leitura superficial, em alguns casos, ainda era difícil identificar essa abordagem, motivo pelo qual a ferramenta foi empregada para auxiliar na compreensão de como o artigo tratava a PLC. Ademais, o *DeepSeek* também foi utilizado como apoio na organização da metodologia e dos resultados dos artigos que atenderam aos critérios de inclusão e exclusão, descritos na Subseção 4.1.2.

Para estruturar de forma clara e objetiva a formulação da pergunta de pesquisa, adotou-se o modelo PICOC (*Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context*). Tal abordagem contribuiu significativamente para o delineamento do escopo do estudo e para a seleção criteriosa da literatura a ser analisada. O Quadro 2 apresenta a definição de cada um dos

¹ Disponível em: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020>. Acesso em: 1 jul. 2025.

² Disponível em: <https://parsif.al/Mickaelly/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

³ *Deepseek*: <https://www.deepseek.com/>

elementos do modelo conforme aplicado neste trabalho.

Quadro 2 – Estrutura PICOC da Pesquisa

Elemento	Definição na Pesquisa
População	Sistemas de automação residencial baseados em redes de baixa tensão.
Intervenção	Aplicação da tecnologia <i>Power Line Communication</i> .
Comparador	Tecnologias alternativas de comunicação como Wi-Fi, Zigbee e BLE, presentes em algumas perguntas para fins de comparação.
Desfechos	Desempenho, limitações técnicas, integração com sistemas de gerenciamento de energia e eficácia das tecnologias empregadas.
Contexto	Redes de baixa tensão utilizadas em ambientes residenciais automatizados.

Fonte: elaborado pela autora.

Com base nesse modelo, foram elaboradas seis questões de pesquisa (Quadro 3), que orientam o foco da revisão. As QP1 e QP2 abordam o funcionamento da PLC e suas tecnologias predominantes; a QP3 analisa as taxas de transmissão e seus fatores limitantes; a QP4 investiga a integração da PLC com sistemas de gerenciamento de energia; a QP5 trata dos desafios técnicos enfrentados e das soluções propostas; e a QP6 realiza uma comparação entre a PLC e outras tecnologias de comunicação em ambientes residenciais inteligentes.

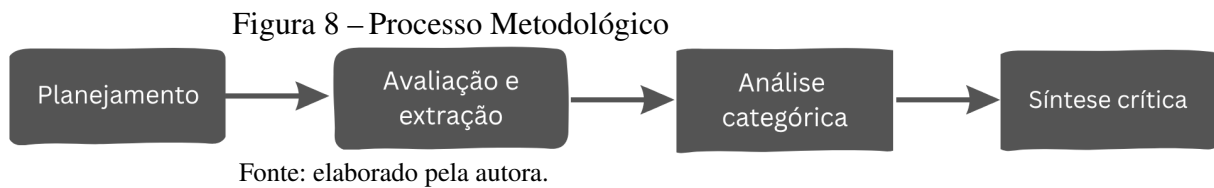
Quadro 3 – Quadro das Questões de Pesquisa

ID	Questões de Pesquisa	Objetivo
QP1	Como o PLC opera em redes de baixa tensão? Quais técnicas de modulação são predominantes?	Compreender o funcionamento da comunicação por linha de energia em redes residenciais e identificar as técnicas de modulação mais utilizadas.
QP2	Quais tecnologias (ex.: <i>HomePlug AV</i> , <i>AV2</i> , <i>Green PHY</i> , são mais eficazes para residências inteligentes?	Avaliar a eficácia das principais tecnologias de PLC no contexto de automação residencial.
QP3	Quais são as taxas de transmissão máximas e os fatores que as limitam?	Identificar as capacidades de transmissão das tecnologias PLC e os principais obstáculos técnicos.
QP4	Como o PLC se integra a sistemas de gerenciamento de energia?	Explorar o papel da PLC na gestão energética residencial e sua compatibilidade com soluções inteligentes.
QP5	Quais são os desafios técnicos e as soluções propostas?	Investigar os principais problemas enfrentados pelas redes PLC e as abordagens técnicas desenvolvidas para mitigá-los.
QP6	Como comparar PLC com outras tecnologias (Wi-Fi, Zigbee, <i>Bluetooth Low Energy</i>) em termos de desempenho?	Realizar uma análise comparativa entre PLC e outras tecnologias de comunicação para casas inteligentes.

Fonte: elaborado pela autora.

Para responder a essas questões de forma sistemática, o processo metodológico foi estruturado em cinco etapas sequenciais e interdependentes: 4.1 Planejamento; 4.2 Avaliação e extração; 4.3 Análise categórica; 4.4 Síntese crítica. A Figura 8 apresenta, de forma resumida e visual, as cinco etapas que compõem este processo metodológico, as quais serão explicadas

detalhadamente nas subseções a seguir.



4.1 Planejamento

Este tópico apresenta os procedimentos de busca e os critérios de inclusão e exclusão utilizados para selecionar os estudos relevantes para a revisão sistemática.

4.1.1 Procedimentos de Busca

As buscas bibliográficas foram realizadas nas bases Google Acadêmico⁴, IEEE *Xplore*⁵, *ScienceDirect*⁶, *ACM Digital Library*⁷ e MDPI⁸, selecionadas em função de sua ampla cobertura e relevância nas áreas de engenharia elétrica, telecomunicações e sistemas de energia, diretamente relacionadas à comunicação por linha de energia em baixa tensão.

A base IEEE *Xplore* concentra estudos fundamentais e aplicados em PLC, sistemas de potência e normas técnicas. A *ScienceDirect* reúne periódicos de alto impacto nas áreas de redes elétricas, sistemas energéticos e *smart grids*. A *ACM Digital Library* contribui com trabalhos voltados a protocolos de comunicação, modelagem e análise de redes. A MDPI inclui periódicos recentes com ênfase em aplicações experimentais e tecnologias emergentes. O Google Acadêmico foi utilizado como base complementar, com o objetivo de ampliar a abrangência da busca e identificar estudos relevantes não indexados nas demais bases.

Quanto aos tipos de documentos, na base IEEE *Xplore* foram considerados artigos de periódicos (*journals*), artigos de conferências (*conference papers*), revistas técnicas (*magazines*) e normas técnicas (*standards*). Na *ACM Digital Library*, foram selecionados artigos de conferências, publicações vinculadas ao grupo *SIGMOBILE* e artigos de periódicos. Na MDPI, foram considerados artigos publicados nos periódicos *Sensors*, *Energies*, *Applied Sciences* e *Electronics*. Já na base *ScienceDirect*, foram incluídos *research articles* e *review articles*; adicionalmente, foi

⁴ Google Acadêmico: <https://scholar.google.com/?hl=pt-BR>

⁵ IEEE *Xplore*: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/>

⁶ *ScienceDirect*: <https://www.sciencedirect.com/>

⁷ *ACM Digital Library*: <https://dl.acm.org/>

⁸ MDPI: <https://www.mdpi.com/>

aplicado o critério *Publication Title*, contemplando os periódicos *Internet of Things*, *Electric Power Systems Research*, *Applied Energy*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *Computers and Electrical Engineering* e *Computer Communications*.

A literatura cinzenta não foi incluída nesta revisão sistemática, sendo considerados exclusivamente artigos publicados em periódicos revisados por pares e indexados em bases reconhecidas. Essa decisão teve como objetivo assegurar o rigor metodológico, a reprodutibilidade do estudo e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para garantir uma recuperação ampla e consistente de estudos relevantes nas bases de dados, foram definidos termos-chave alinhados aos elementos do modelo *Population, Intervention, Comparison, Context* (PICOC), servindo de base para a formulação da estratégia de busca. A *string* final construída incorporou três grupos principais de descritores: (i) termos relacionados à tecnologia de comunicação por linha de energia, incluindo seus sinônimos — “*Power Line Communication*”, *PLC*, *Powerline*, e “*Power Line*”; (ii) termos associados ao contexto de aplicação em ambientes domésticos e sistemas inteligentes — “*Smart Home*”, “*Home Automation*”, “*Domotic*”, “*Internet of Things*”, *IoT**; e (iii) terminologias referentes ao ambiente elétrico residencial e ao nível de tensão — “*Low Voltage*”, *LV*, “*In-home*”, “*Indoor*”, “*Residential*”, “*House*”, “*Home*”* e Banda Estreita.

Esses termos foram organizados conforme o PICOC: os descritores vinculados ao ambiente residencial e doméstico (*Smart Home*, *Home Automation*, *Domotic*, *Internet of Things*, *IoT*, *In-home*, *Indoor*, *Residential*, *House**, *Home*, *Banda Estreita**) foram classificados como *Population*, enquanto os termos referentes à tecnologia de comunicação (*Power Line Communication*, *PLC*, *Powerline*, *Power Line*) foram associados à categoria *Intervention*. O Quadro 4 estão dispostos a organização detalhada dos descritores e seus respectivos sinônimos utilizados na definição da estratégia de busca.

Quadro 4 – Palavras-chave, sinônimos e sua classificação

Keyword	Sinônimos	Relacionado ao
<i>Power Line Communication</i>	<i>PLC</i> , <i>Powerline</i> , <i>Power Line</i>	<i>Intervention</i>
<i>Low Voltage</i>	<i>LV</i> , <i>In-home</i> , <i>Indoor</i> , <i>Residential</i> , <i>House</i> *, <i>Home</i> , <i>Banda Estreita</i>	<i>Population</i>
<i>Smart Home</i>	<i>Home Automation</i> , <i>Domotic</i> *, <i>Internet of Things</i> , <i>IoT</i>	<i>Population</i>

Fonte: elaborado pela autora.

Com base, nessa categorização estruturada de termos-chave e sinônimos, um exemplo de *string* aplicada nas bases foi:

("Power Line Communication"OR PLC OR Powerline OR "Power Line") AND ("Smart Home"OR "Home Automation"OR "Domotic*"OR "Internet of Things"OR IoT) AND ("Low Voltage"OR LV OR "In-home"OR "Indoor"OR "Residential"OR "House*"OR "Home"OR "Banda Estreita")

Para garantir resultados relevantes e adequados a cada repositório, as *strings* de busca foram ajustadas de acordo com os operadores e recursos específicos de cada base de dados, como filtros por título, resumo ou palavras-chave. Em todos os artigos retornados, os resumos (*abstracts*) foram analisados para verificar a aderência aos critérios de seleção. Nos casos em que o resumo não fornecia informações suficientes para a tomada de decisão quanto à elegibilidade, foi realizada uma leitura superficial do texto completo, com o objetivo de avaliar sua adequação aos objetivos da revisão sistemática. Todo o processo foi sistematicamente documentado, incluindo a data da busca, as *strings* utilizadas, os filtros aplicados, a base consultada e os estudos selecionados, assegurando rastreabilidade e transparência metodológica.

Ressalta-se que não foi aplicada a técnica de *snowballing*, que consiste na identificação de estudos adicionais a partir das referências dos trabalhos selecionados. Optou-se por um processo de busca sistemático e controlado, baseado exclusivamente em buscas automatizadas nas bases de dados definidas, visando assegurar a reprodutibilidade da metodologia adotada. As implicações dessa decisão são discutidas na seção de discussão.

4.1.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Com o objetivo de delimitar os critérios para análise dos estudos, foram considerados trabalhos publicados entre 2019 e 2025, incluindo investigações empíricas, revisões técnicas e documentos normativos. O foco recai sobre aplicações da comunicação por linha de energia em redes residenciais de baixa tensão voltadas à automação. Apenas artigos redigidos em português ou inglês foram incluídos. O Quadro 5 resume esses critérios.

Quadro 5 – Critérios de inclusão dos estudos

Critério	Descrição
Período de publicação	Estudos publicados entre 2019 e 2025.
Tipo de estudo	Inclusão de estudos empíricos, revisões técnicas e documentos normativos.
Foco temático	Trabalhos que abordem a aplicação da comunicação por linha de energia em redes residenciais de baixa tensão.
Idioma	Artigos disponíveis nos idiomas português ou inglês.

Fonte: elaborado pela autora.

Além disso, foram excluídos artigos que apenas mencionam a PLC de forma su-

perfunctória, sem apresentarem descrição técnica, modelagem, implementação, experimentos ou análise de desempenho relacionados à tecnologia; estudos exclusivamente teóricos, sem validação prática ou aplicação definida; trabalhos focados em PLC para redes de média ou alta tensão; publicações sem metodologia ou resultados claramente descritos; e artigos em idiomas diferentes do português ou inglês. O Quadro 6 estão representados esses critérios.

Quadro 6 – Critérios de exclusão dos estudos

Critério	Descrição
Abordagem superficial	Exclusão de artigos que apenas mencionam a PLC de forma superficial, sem descrição técnica, modelagem, implementação, experimentos ou análise de desempenho.
Abordagem teórica	Exclusão de estudos exclusivamente teóricos, sem validação prática ou aplicação clara.
Tensão da rede	Exclusão de trabalhos voltados à utilização da PLC em redes de média ou alta tensão.
Rigor metodológico	Desconsideração de publicações que não apresentavam metodologia ou resultados claramente descritos.
Idioma	Exclusão de estudos publicados em idiomas diferentes do português ou inglês.

Fonte: elaborado pela autora.

4.2 Avaliação e extração

Essa etapa metodológica contempla a avaliação da qualidade dos artigos e, posteriormente, a extração dos dados, com o objetivo de subsidiar a análise dos resultados. A Seção 4.2.1 aborda a avaliação da qualidade metodológica dos estudos. Já a Seção 4.2.2 trata da extração dos dados.

4.2.1 Avaliação da qualidade dos estudos

A avaliação da qualidade metodológica dos estudos selecionados foi realizada com base em uma versão adaptada da ferramenta QATSDD (*Quality Assessment Tool for Studies with Diverse Designs*). Essa adaptação foi necessária para adequar os critérios originais às especificidades da presente revisão sistemática. Nesse sentido, essa ferramenta foi escolhido por sua capacidade de avaliar, de forma clara e objetiva, a qualidade de estudos com diferentes abordagens — qualitativa, quantitativa ou mista — utilizando critérios padronizados. Tal característica é especialmente vantajosa em revisões sistemáticas que envolvem metodologias heterogêneas, pois assegura consistência na análise comparativa entre os estudos, possibilita a identificação de fragilidades metodológicas e evita que evidências de baixa qualidade comprometam a robustez das conclusões.

O processo avaliativo considerou dez critérios definidos previamente, conforme descrito no Quadro 7: (1) Alinhamento com as questões de pesquisa, que verifica se o estudo contribui diretamente para responder uma ou mais das perguntas centrais da revisão; (2) Base teórica/técnica, que analisa o uso de fundamentos teóricos, normas técnicas ou modelos consolidados que sustentam o estudo; (3) Evidência prática e amostra, que avalia a presença de simulações, testes experimentais ou estudos de caso, bem como a adequação prática das amostras utilizadas; (4) Metodologia e reprodutibilidade, considerando o nível de detalhamento dos procedimentos e protocolos empregados, de forma a permitir a replicação do estudo; (5) Métricas técnicas, que examina a apresentação de dados quantitativos relevantes (como BER, latência, *throughput*), acompanhados de validação estatística; (6) Relevância tecnológica, observando se o estudo discute aspectos técnicos importantes como ruído, interoperabilidade, escalabilidade ou outras limitações da tecnologia PLC; (7) Objetivos e adequação metodológica, que avalia a clareza na formulação dos objetivos e a coerência entre esses e a metodologia adotada; (8) Confiabilidade da análise, verificando se os resultados são validados por múltiplas métricas, replicações ou comparações com estudos similares; (9) Discussão crítica, que considera o reconhecimento de limitações, potenciais vieses e as implicações práticas dos achados; e (10) Tamanho da amostra, que examina se o estudo apresenta e justifica o número de elementos utilizados nas análises, indicando se este é suficiente para garantir validade estatística dos resultados.

Nesse contexto, cada critério foi analisado individualmente e recebeu uma pontuação conforme a resposta atribuída: “Sim”, quando o critério é claramente atendido, corresponde ao valor 1; “Não é possível identificar”, quando não há evidência suficiente para avaliação, corresponde ao valor 0,2; e “Não”, quando o critério não é atendido, corresponde ao valor 0.

Contudo, cada estudo foi classificado em duas categorias conforme o número de critérios atendidos: alta qualidade (5 a 10 critérios), baixa qualidade (0 a 5 critérios), sendo estes últimos excluídos da revisão para garantir a robustez dos resultados. Embora a avaliação tenha sido conduzida por um único revisor, o uso de critérios objetivos e bem definidos, complementado por um quadro detalhado de verificação, buscou minimizar possíveis vieses de interpretação.

4.2.2 Extração dos Dados

A extração sistemática dos dados foi realizada por meio de campos padronizados, abrangendo: autor, ano, título, objetivo, metodologia, principais resultados. Além dessas informações bibliográficas, foram incluídos campos específicos voltados ao domínio da PLC, como

Quadro 7 – Lista de Verificação QATSDD Adaptada para Revisão Sistemática de PLC em *Smart Homes*

Critério	Pergunta de Avaliação	Considerações
1. Alinhamento com as questões de pesquisa	O estudo aborda diretamente uma ou mais das questões de pesquisa? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Verificar se o estudo está relacionado a pelo menos uma das áreas principais da revisão e contribui diretamente para as questões de pesquisa formuladas.
2. Base teórica/técnica	O estudo referencia fundamentos teóricos ou padrões técnicos? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Observar se há embasamento técnico ou científico sólido, com uso de normas, modelos teóricos ou literatura consolidada.
3. Evidência prática e amostra	O estudo apresenta simulações, testes experimentais ou casos aplicados com amostra adequada para garantir validade dos resultados? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Priorizar estudos com aplicação prática validada, seja em laboratório, campo ou simulações com parâmetros realistas.
4. Metodologia e reprodutibilidade	A metodologia e os procedimentos estão descritos detalhadamente para possibilitar replicação do estudo? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Avaliar se o estudo fornece informações suficientes (ex.: protocolos, algoritmos, configurações) para ser reproduzido por outros pesquisadores.
5. Métricas técnicas	O estudo fornece dados quantitativos relevantes, como BER, latência ou <i>throughput</i> , com algum tipo de validação estatística? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Verificar a presença de métricas técnicas bem definidas e se há uso de métodos estatísticos que sustentem os resultados.
6. Relevância tecnológica	O estudo discute aspectos relevantes como ruído, interoperabilidade ou outras limitações técnicas da tecnologia PLC? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Observar se o trabalho se aprofunda em problemas técnicos relevantes e apresenta soluções ou abordagens alternativas.
7. Objetivos e adequação metodológica	O estudo apresenta objetivos claramente descritos e justifica a escolha do método de pesquisa, que é adequado para responder às questões propostas? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Avaliar se os objetivos estão bem definidos e se a metodologia adotada é coerente com o propósito do estudo.
8. Confiabilidade da análise	Os resultados são validados por múltiplas métricas, replicações ou comparações com outros estudos? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Verificar se o estudo apresenta validação cruzada ou comparação com outros trabalhos da área, aumentando a credibilidade dos resultados.
9. Discussão crítica	A análise reconhece limitações, possíveis vieses e implicações práticas dos resultados obtidos? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Avaliar se há reflexão crítica sobre os resultados e menção a limitações, bem como sugestões para estudos futuros.
10. Tamanho da amostra	O estudo apresenta e justifica o tamanho da amostra utilizada nos testes, simulações ou análises? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Não é possível dizer	Avaliar se o tamanho da amostra é explicitado, justificado e se é suficiente para garantir a validade estatística dos resultados apresentados.

Fonte: Adaptado do QATSDD pela autora.

Base Técnica (normas, padrão), Cenário de Aplicação (simulado, experimental ou residencial) e Desempenho Técnico, que contempla tanto as métricas quantitativas (como latência, BER, *throughput* e taxa de transmissão) quanto os fatores limitantes observados nos estudos (como ruído, impedância variável, perdas de sinal ou interferências eletromagnéticas).

Sendo assim, para possibilitar uma análise mais crítica e comparativa, foram extraf-

das informações referentes a três aspectos centrais: tecnologias PLC, incluindo a descrição e a avaliação de soluções como *HomePlug AV*, *AV2* e *Green PHY*; integração com sistemas de energia, considerando aplicações em gerenciamento de cargas, resposta à demanda e monitoramento energético; e comparações com outras tecnologias, como *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth Low Energy*, com foco no desempenho e na adequação ao contexto residencial.

Além disso, foi adicionado um critério de extração denominado observações, que contempla características adicionais apresentadas pelos artigos, bem como aspectos distintos ou detalhamentos não abrangidos nos campos anteriores. Vale ressaltar que, na ferramenta PARSIFAL, foi incluído um parâmetro denominado categoria, com o objetivo de identificar e facilitar a análise categórica detalhada na Seção 4.3.

A extração dos dados foi conduzida com o auxílio da ferramenta PARSIFAL, o que possibilitou a padronização das informações, garantiu a consistência metodológica e fundamentou a categorização posterior dos estudos analisados. O Quadro 8 apresenta uma representação esquemática desse processo.

4.3 Análise categórica

A análise categórica foi realizada com o objetivo de organizar e sintetizar os estudos selecionados em grupos temáticos, possibilitando a identificação de padrões, lacunas e tendências relacionadas às questões de pesquisa (QP1 a QP6). Para isso, utilizou-se a ferramenta *online* Planilhas do *Google* como apoio metodológico, dada sua capacidade de estruturar os dados em planilhas organizadas, aplicar filtros e agrupar os estudos conforme as seis questões de pesquisa. Além disso, a ferramenta Planilhas facilitou a visualização dos resultados, assegurando maior transparência, rastreabilidade e sistematização do processo de categorização. Com isso, foi possível apoiar a etapa de síntese crítica e fornecer uma base sólida para a interpretação dos resultados obtidos.

Nesse sentido, as categorias foram definidas com base nas seis questões de pesquisa apresentadas no Quadro 3. A C1: Modulação e Normas contempla estudos que abordam as técnicas de modulação utilizadas em PLC e os padrões normativos aplicáveis (QP1). A C2: Tecnologias PLC para residências inteligentes contempla trabalhos que avaliam a eficácia de tecnologias como *HomePlug AV*, *AV2*, *Green PHY* (QP2). A categoria C3: Desempenho Técnico e Soluções Técnicas abrange estudos que analisam taxas de transmissão, fatores limitantes como ruído e impedância variável, e métricas como BER e *throughput*, além das abordagens propostas

Quadro 8 – Campos de Extração de Dados para Estudos sobre PLC em *Smart Homes*

Campo	Descrição	Observações
Autor(es)	Nome do(s) autor(es) do estudo analisado	Referência para citação e identificação do trabalho
Ano	Ano de publicação do estudo	Importante para análise temporal e identificação de tendências
Título	Título completo do estudo	Auxilia na identificação e organização dos registros
Objetivo do Estudo	Informar claramente o objetivo da pesquisa	Avaliar a relevância e o foco da contribuição do estudo
Metodologia	Descrever a metodologia adotada no estudo	Indicar o tipo de abordagem (experimental, simulação, estudo de caso etc.)
Principais Resultados	Resultados mais relevantes apresentados no estudo	Considerar descobertas, conclusões e implicações práticas
Base Técnica (PLC)	Padrões, normas e tecnologias PLC utilizados	Identificar o embasamento técnico e a aderência a padrões normativos
Cenário de Aplicação	Ambiente em que o estudo foi desenvolvido (residencial, simulado, experimental)	Indicar o contexto de aplicação prática ou teórica da pesquisa
Desempenho Técnico	Métricas e limitações: latência, BER, <i>throughput</i> , ruído, perdas, interferência, etc.	Permite avaliar a eficiência e os desafios técnicos enfrentados
Tecnologias PLC Avaliadas	Soluções específicas analisadas, como <i>HomePlug AV/AV2</i> , <i>Green PHY</i> ,	Avaliar desempenho e adequação ao contexto de <i>Smart Homes</i>
Integração com Sistemas de Energia	Aplicações relacionadas a gerenciamento de cargas, resposta à demanda, monitoramento energético	Verificar o papel da PLC no suporte a redes inteligentes (<i>smart grid</i>)
Comparações com Outras Tecnologias	Comparações com Wi-Fi, ZigBee, BLE, entre outras, em termos de desempenho e aplicabilidade	Avaliar competitividade e complementaridade da PLC
Observações	Contempla características adicionais apresentadas pelos artigos, bem como aspectos distintos ou detalhamentos não abrangidos nos campos anteriores	-

Fonte: Elaborado pela autora.

para mitigar essas limitações e melhorar o desempenho da comunicação por linha de energia (QP3 e QP5). A C4: Integração com Sistemas de Energia considera a utilização da PLC em soluções como gerenciamento de cargas e demanda (QP4). Por fim, a C6: Comparação com Outras Tecnologias foca em comparações entre PLC e tecnologias concorrentes, como Wi-Fi, Zigbee e *Bluetooth Low Energy* (QP6).

4.4 Síntese crítica

A etapa de síntese crítica foi conduzida com o objetivo de interpretar, de forma qualitativa e fundamentada, os resultados obtidos a partir da análise categórica, visando responder às seis questões de pesquisa (QP1 a QP6). Essa etapa teve como propósito não apenas a identificação de padrões e lacunas na literatura, mas também a avaliação da profundidade

Quadro 9 – Categorias da análise categórica

Categoria	Descrição
C1: Modulação e Normas	Estudos que abordam as técnicas de modulação utilizadas na comunicação por linha de energia, bem como os padrões e regulamentações aplicáveis.
C2: Tecnologias PLC para residências inteligentes	Trabalhos que analisam a eficácia de tecnologias como <i>HomePlug AV</i> , <i>AV2</i> , <i>Green PHY</i> em ambientes residenciais inteligentes.
C3: Desempenho e Soluções Técnicas	Pesquisas que investigam as taxas de transmissão da PLC, bem como os principais obstáculos técnicos (ruído, perdas, impedância) e as soluções desenvolvidas para superá-los.
C4: Integração com Sistemas de Energia	Estudos que discutem a aplicação da PLC em gerenciamento de energia residencial.
C5: Comparação com Outras Tecnologias	Pesquisas que comparam o desempenho da PLC com outras soluções de comunicação sem fio em ambientes residenciais, como Wi-Fi, Zigbee e <i>Bluetooth Low Energy</i> .

Fonte: elaborado pela autora.

dos estudos analisados, de suas contribuições práticas, limitações metodológicas e do grau de maturidade das soluções propostas.

A interpretação crítica dos dados foi realizada com base nas cinco categorias temáticas previamente estabelecidas (C1 a C5), considerando as especificidades de cada grupo. No que se refere à categoria C1, a análise crítica examinou tanto a diversidade das técnicas de modulação abordadas quanto o alinhamento dos estudos com os principais padrões normativos internacionais. Adicionalmente, foram avaliados aspectos relacionados à clareza da apresentação técnica.

No contexto da categoria C2, a análise crítica foi orientada pela identificação das tecnologias mais recorrentes na literatura e por sua aplicabilidade prática em ambientes residenciais, bem como pela robustez das comparações realizadas entre diferentes soluções.

Sob a perspectiva da categoria C3, a avaliação priorizou a análise das métricas de desempenho adotadas, tais como taxa de transmissão, BER e *throughput*, buscando verificar a adequação desses parâmetros, a transparência dos procedimentos de medição e a coerência entre os problemas técnicos reportados e as estratégias de solução propostas. De forma complementar, a confiabilidade experimental foi investigada, considerando tanto a possibilidade de reprodução dos cenários avaliados quanto a relevância dos resultados para contextos práticos.

Em relação à categoria C4, a análise crítica considerou o potencial de integração da PLC com soluções de gerenciamento energético, incluindo medição inteligente, resposta à demanda e controle de cargas.

Por fim, na categoria C5, a análise crítica avaliou a objetividade e a fundamentação das comparações realizadas entre a PLC e outras tecnologias de comunicação residencial, como Wi-Fi e ZigBee. Foram observados os critérios de comparação adotados, a equivalência dos

contextos de aplicação e a clareza na apresentação das vantagens e limitações de cada solução.

De modo geral, a síntese crítica integrou os achados categorizados em uma visão mais ampla e reflexiva, destacando contribuições relevantes, evidenciando lacunas na literatura e apontando direções para futuras investigações e aplicações práticas da PLC em ambientes residenciais inteligentes.

4.5 Cronograma

O Quadro 10 , a seguir, apresenta o cronograma das atividades deste trabalho, com a estimativa de tempo para cada etapa da revisão sistemática. O planejamento abrange desde a procedimentos de busca e seleção até a revisão geral e preparação da defesa.

Quadro 10 – Cronograma de execução das atividades

Etapa	Set	Out	Nov	Dez	Jan
Procedimentos de busca e seleção	x	x	x		
Avaliação e extração				x	
Análise categórica				x	
Síntese crítica				x	
Escrita do TCC			x	x	
Revisão geral e Apresentação do TCC				x	x

Fonte: Elaborado pela autora.

5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da seleção dos estudos incluídos na revisão sistemática, bem como os procedimentos de avaliação da qualidade, extração de dados, análise categórica e análise crítica dos trabalhos analisados. Os resultados são organizados de modo a sintetizar as principais características, abordagens e contribuições dos estudos relacionados à comunicação por linha de energia em baixa tensão. Todos os arquivos BibTeX e artigos que passaram da avaliação da qualidade encontram-se disponíveis em um repositório público, de modo a assegurar a transparência e a reprodutibilidade do processo de busca¹.

5.1 Seleção dos Estudos

Esta seção abrange o conteúdo apresentado na Seção 4.1, correspondente ao planejamento descrito na metodologia. A Subseção 5.1.1 corresponde à Subseção 4.1.1, localizada na metodologia, enquanto a Subseção 5.1.2 corresponde à Subseção 4.1.2, também apresentada na metodologia.

5.1.1 String e Coleta

A estratégia de busca adotada nesta revisão sistemática, quando aplicada às bases IEEE Xplore, ACM Digital Library, MDPI, Google Acadêmico e ScienceDirect, resultou na recuperação dos estudos analisados nesta seção. Contudo, na base ScienceDirect foi necessária a adaptação da *string* devido à limitação da plataforma quanto ao número máximo de conectores booleanos permitidos (“Use fewer boolean connectors (max 8 per field)”). Assim, a *string* utilizada nessa base foi:

(“Power Line Communication” OR PLC OR Powerline) AND (“Smart Home” OR “Internet of Things” OR IoT) AND (“Low Voltage” OR “Indoor” OR “Banda Estreita”).

Para a validação da *string* de busca nas diferentes bases de dados, foram analisados estudos predefinidos considerados representativos do tema em cada base. Na IEEE Xplore, utilizou-se como referência um estudo que propõe um modem PLC (Santos *et al.*, 2022). No Google Acadêmico, foi considerado um estudo que aborda a tecnologia PLC em conjunto com comunicação por luz visível (Hao *et al.*, 2024a). Na ScienceDirect, o estudo adotado como parâmetro integra PLC com monitoramento da qualidade de energia (Bagdadee *et al.*, 2020). Na

¹ Repositório disponível em: <https://github.com/mickaelly01nobre/PLC>.

MDPI, foi utilizado como referência um estudo que compara o desempenho de três padrões de PLC (Chung, 2020b). Por fim, na *ACM Digital Library*, o estudo considerado como parâmetro também corresponde a uma comparação de desempenho entre três padrões de PLC.

A partir da aplicação da *string* de busca nas bases selecionadas, foram identificados 264 estudos na base *IEEE Xplore*, aproximadamente 18.000 estudos no Google Acadêmico, 65 estudos na base *ScienceDirect*, 26 estudos na MDPI e 858 estudos na *ACM Digital Library*. Ressalta-se que, na *ACM Digital Library*, não foi possível aplicar filtros relacionados ao recorte temporal nem ao tipo de estudo, diferentemente das demais bases analisadas. No Google Acadêmico, o único critério de refinamento aplicado foi o recorte temporal.

Considerando o elevado número de resultados obtidos no Google Acadêmico, procedeu-se à análise apenas dos primeiros 1.000 estudos. Observou-se que, a partir do 200º resultado, a maioria dos trabalhos não apresentava relação direta com a temática de PLC, abordando predominantemente assuntos como sistemas de Internet das Coisas (IoT), sistemas de energia, controladores lógicos programáveis (CLP) e painéis solares. Além disso, nos estudos que mencionavam PLC, o tema era tratado de forma superficial, limitando-se, em muitos casos, a uma única citação ao longo do texto ou apenas à sua inclusão nas referências, sem discussão efetiva no conteúdo do trabalho.

Como resultado das buscas iniciais, foram coletados 138 estudos no total, distribuídos entre as diferentes bases de dados. Desses, 53 estudos foram provenientes da *IEEE Xplore*, 36 do Google Acadêmico, 29 da *ScienceDirect*, 12 da MDPI e 8 da *ACM Digital Library*. A Tabela 1 estão dispostos os resultados da busca e estudos selecionados por base de dados.

Tabela 1 – Resultados da busca e estudos selecionados por base de dados

Base de dados	Estudos retornados	Estudos analisados	Estudos selecionados
<i>IEEE Xplore</i>	264	264	53
Google Acadêmico	Aproximadamente 18.000	Aproximadamente 1.000	36
<i>ScienceDirect</i>	65	65	29
MDPI	26	26	12
<i>ACM Digital Library</i>	858	858	8
Total	–	–	138

Fonte: Elaborado pela autora.

Os arquivos BibTex foram coletados em diferentes datas, conforme a base de dados: *IEEE Xplore*, em 30 de novembro; *ACM Digital Library* e MDPI, em 22 de dezembro; Google Acadêmico, em 23 de dezembro; e *ScienceDirect*, em 2 de dezembro.

5.1.2 Inclusão e Exclusão

5.1.2.1 Inclusão

Após a aplicação dos critérios de inclusão, constatou-se que todos os estudos selecionados, independentemente da base de dados de origem, atendem simultaneamente ao recorte temporal definido e ao foco em sistemas PLC aplicados a redes de baixa tensão.

Na base *IEEE Xplore*, foram incluídos 29 estudos, sendo 15 estudos empíricos, 4 documentos normativos e 10 trabalhos que abordam a aplicação da PLC em redes residenciais de baixa tensão, observando-se baixa incidência de revisões técnicas.

No Google Acadêmico, foram aceitos 17 estudos, dos quais 12 correspondem a estudos empíricos, 1 a revisão técnica, 1 a documento normativo e 3 a trabalhos voltados à aplicação da PLC em redes residenciais de baixa tensão.

Na base *ScienceDirect*, foram incluídos 6 artigos, distribuídos em 2 estudos empíricos, 2 revisões técnicas e 2 trabalhos sobre a aplicação da PLC em redes residenciais de baixa tensão, observou baixa adesão de documentos normativos.

A base MDPI resultou na inclusão de 10 artigos, sendo 5 estudos empíricos, 1 revisão técnica e 4 trabalhos que tratam da aplicação da PLC em redes residenciais de baixa tensão, analisou baixa ocorrência de documentos normativos.

Por fim, na *ACM Digital Library*, foram aceitos 4 artigos, sendo 3 estudos empíricos e 1 trabalho sobre a aplicação da PLC em redes residenciais ou prediais de baixa tensão, observou-se baixa adesão de documentos normativos e revisão técnicas.

Concluída a etapa de seleção, foram incluídos 66 artigos provenientes das diferentes bases de dados, atendendo integralmente aos critérios de inclusão definidos nesta revisão. A Tabela 2 fornece os estudos selecionados por base de dados e tipo de publicação.

Tabela 2 – Distribuição dos estudos selecionados por base de dados e tipo de publicação

Base de dados	Total de estudos	Estudos empíricos	Revisões técnicas	Documentos normativos	Aplicações PLC residenciais
<i>IEEE Xplore</i>	29	15	0	4	10
Google Acadêmico	17	12	1	1	3
<i>ScienceDirect</i>	6	2	2	0	2
MDPI	10	5	1	0	4
<i>ACM Digital Library</i>	4	3	0	0	1
Total geral	66	37	4	5	20

Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2.2 Exclusão

Após a aplicação dos critérios de exclusão, analisaram-se, por base de dados, os critérios predominantes no processo de seleção dos estudos. Na base IEEE *Xplore*, foram excluídos 7 artigos. Desses, 4 estudos enquadraram-se no critério de trabalhos exclusivamente teóricos, sem validação experimental ou aplicação prática claramente definida. Além disso, 2 estudos foram excluídos por estarem fora do recorte temporal estabelecido, e 1 artigo foi descartado por tratar de CLP, não estando relacionado à tecnologia de comunicação por linha de energia.

No Google Acadêmico, foram excluídos 9 estudos. Dentre esses, 4 enquadraram-se no critério de trabalhos exclusivamente teóricos, sem validação experimental ou aplicação prática. Outros 2 estudos foram descartados por estarem fora do recorte temporal adotado, e 1 estudo foi excluído por ter como foco controladores lógicos programáveis. Além disso, 2 trabalhos foram excluídos por mencionarem a tecnologia PLC de forma superficial, sem apresentar descrição técnica, modelagem, implementação, experimentos ou análise de desempenho. Nesses casos, os estudos concentravam-se no monitoramento de equipamentos elétricos por meio de soluções baseadas em IoT ou citavam a PLC apenas como tecnologia alternativa, sem constituir o foco principal da pesquisa.

Na base *ScienceDirect*, foram excluídos 18 estudos. Dentre esses, 12 enquadraram-se no critério de menção superficial à tecnologia PLC, sem apresentação de descrição técnica, modelagem, implementação, experimentos ou análise de desempenho. Nesses casos, a PLC era citada de forma pontual, geralmente uma única vez, em estudos comparativos envolvendo múltiplas tecnologias ou em aplicações voltadas a sistemas HEMS. Adicionalmente, 4 estudos foram excluídos por serem exclusivamente teóricos, 1 estudo por estar fora do recorte temporal definido e 1 artigo por tratar de controladores lógicos programáveis.

Na base MDPI, foram excluídos 2 estudos por estarem direcionados a aplicações em sistemas de média e alta tensão, não atendendo ao escopo desta revisão, que se restringe a sistemas PLC em redes de baixa tensão.

Por fim, na ACM *Digital Library*, foram excluídos 4 estudos. Desses, 2 foram classificados como exclusivamente teóricos, sem validação experimental ou aplicação prática claramente definida; 1 foi excluído por mencionar a tecnologia PLC de forma superficial, sem aprofundamento técnico; e 1 por estar fora do recorte temporal considerado.

Ao final do processo de seleção, o total de estudos excluídos em todas as bases de

dados foi de 40, conforme os critérios de exclusão previamente estabelecidos. A Tabela 3 fornece a distribuição dos estudos excluídos por base de dados e critério de exclusão.

Tabela 3 – Distribuição dos estudos excluídos por base de dados e critério de exclusão

Base de dados	Total excluídos	Exclusivamente teóricos	Fora do recorte temporal	PLC superficial	CLP	Média/alta tensão
IEEE Xplore	7	4	2	0	1	0
Google Acadêmico	9	4	2	2	1	0
ScienceDirect	18	4	1	12	1	0
MDPI	2	0	0	0	0	2
ACM Digital Library	4	2	1	1	0	0
Total geral	40	14	6	15	3	2

Fonte: Elaborado pela autora.

Do total de 32 estudos excluídos por duplicidade, 17 foram identificados na *IEEE Xplore*, 10 no Google Acadêmico e 5 na *ScienceDirect*, considerando o conjunto das bases de dados analisadas durante o processo de seleção. A Tabela 4 fornece a distribuição dos estudos excluídos por duplicidade entre as bases de dados.

Tabela 4 – Distribuição dos estudos excluídos por duplicidade entre as bases de dados

Base de dados	Estudos excluídos por duplicidade
IEEE Xplore	17
Google Acadêmico	10
ScienceDirect	5
Total geral	32

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Qualidade e Extração

Esta seção aborda o conteúdo apresentado na Seção 4.2, correspondente a avaliação da qualidade dos estudos e extração dos dados que são descritos na metodologia. A Subseção 5.2.1 corresponde à Subseção 4.2.1, localizada na metodologia, enquanto a Subseção 5.2.2 corresponde à Subseção 4.2.2, também apresentada na metodologia.

5.2.1 Qualidade

Em decorrência da avaliação da qualidade, as pontuações atribuídas aos estudos que atingiram pontuação superior a 5 indicaram a seguinte distribuição: 20 estudos obtiveram nota 10; 18 estudos situaram-se na faixa de nota 9; 14 estudos alcançaram nota 8; 7 estudos obtiveram nota 7; e 3 estudos atingiram nota 6. Não foram identificados estudos com nota igual a 5. A

Tabela 5 fornece a distribuição das notas de avaliação dos estudos com pontuação superior a 5.

Tabela 5 – Distribuição das notas de avaliação dos estudos com pontuação superior a 5

Nota atribuída	Número de estudos
10	20
9	18
8	14
7	7
6	3
5	0
Total	62

Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre todas as questões que compõem o critério de avaliação da qualidade dos artigos, algumas se destacaram por apresentarem maior incidência de respostas classificadas como “não” ou “não é possível dizer”, evidenciando fragilidades recorrentes nos estudos analisados. Nesse contexto, tendo como base o Quadro 7, referente a subseção 4.2.1 da metodologia, observou-se que 17 estudos não atenderam ao critério (viii), referente à validação dos resultados por múltiplas métricas, replicações ou comparações com outros estudos. O critério (x), relacionado à apresentação e justificativa do tamanho da amostra utilizada nos testes, simulações ou análises, apresentou o maior número de respostas negativas ou inconclusivas, totalizando 26 estudos.

Quanto ao critério (vi), que diz respeito à descrição detalhada da metodologia e dos procedimentos de modo a possibilitar a replicação do estudo, 6 estudos apresentaram respostas classificadas como “não” ou “não é possível dizer”. Em relação ao reconhecimento de limitações, possíveis vieses e implicações práticas dos resultados, correspondente ao critério (ix), verificou-se que 5 estudos não atenderam a esse requisito. Adicionalmente, o critério (v) também se sobressaiu, ainda que em menor magnitude, com 3 estudos cada classificados como “não” ou “não é possível dizer”, indicando limitações pontuais associadas a esses aspectos avaliativos.

Ademais, o critério (iv), relacionado à apresentação de dados quantitativos relevantes, como taxa de erro de bits (BER), latência ou *throughput*, acompanhados de algum tipo de validação estatística, apresentou 12 estudos classificados exclusivamente como “não é possível dizer”, uma vez que, em parte dos trabalhos analisados, tais métricas não foram avaliadas de forma direta. A Tabela 6 fornece a incidência de respostas “não” ou “não é possível dizer” por critério de avaliação da qualidade.

Ressalta-se, ainda, que 4 estudos foram desclassificados nesta etapa do processo de

Tabela 6 – Incidência de respostas “não” ou “não é possível dizer” por critério de avaliação da qualidade

Critério	Descrição resumida do critério	Estudos com resposta “não” ou “não é possível dizer”
(x)	Apresentação e justificativa do tamanho da amostra	26
(viii)	Validação dos resultados por múltiplas métricas, replicações ou comparações	17
(iv)	Apresentação de dados quantitativos relevantes com validação estatística	12
(vi)	Descrição detalhada da metodologia, permitindo replicação	6
(ix)	Reconhecimento de limitações, vieses e implicações práticas	5
(v)	Aspectos avaliativos específicos do critério (v)	3

Fonte: Elaborada pela autora.

avaliação da qualidade, sendo 3 estudos com nota na faixa 4 e 1 estudo com nota na faixa 3. Observou-se que, nesses trabalhos, houve um padrão de atendimento aos critérios (ii) e (vii), os quais se referem, respectivamente, à fundamentação teórica ou à adoção de padrões técnicos e à apresentação de objetivos claramente descritos, bem como à justificativa da escolha do método de pesquisa, considerado adequado para responder às questões propostas, ambos marcados como “sim”. A Tabela 7 fornece os estudos desclassificados na avaliação da qualidade e critérios atendidos.

Tabela 7 – Estudos desclassificados na avaliação da qualidade e critérios atendidos

Faixa de nota	Número de estudos	Critérios atendidos	Descrição dos critérios atendidos
4	3	(ii), (vii)	Fundamentação teórica adequada ou adoção de padrões técnicos; objetivos claramente descritos e justificativa da escolha do método de pesquisa.
3	1	(ii), (vii)	Fundamentação teórica adequada ou adoção de padrões técnicos; objetivos claramente descritos e justificativa da escolha do método de pesquisa.
Total	4	—	—

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2 *Extração*

No contexto da extração de dados, os cenários de aplicação abordados nos estudos analisados, observa-se a predominância do cenário simulado, mencionado em 23 artigos, seguido do cenário experimental, presente em 21 artigos, e do cenário residencial, citado em 20 artigos. Verifica-se ainda que a maioria das simulações foi implementada e testada no ambiente Matlab. O cenário industrial aparece de forma mais pontual, sendo identificado em apenas dois estudos, enquanto em outros cenários é mencionado em um único artigo. No contexto residencial, os estudos abrangem aplicações em casas, apartamentos e edifícios. Ressalta-se que muitos artigos mencionam mais de um cenário simultaneamente, como, por exemplo, experimental e simulado. Dessa forma, as quantidades apresentadas não são mutuamente exclusivas, uma vez que diversos estudos contemplam mais de um cenário. Na Tabela 8, encontra-se disposta a distribuição dos

estudos por cenário de aplicação.

Tabela 8 – Distribuição dos estudos por cenário de aplicação

Cenário	Quantidade
Residencial	20
Experimental	21
Simulado	23
Industrial	2
Outros	1

Fonte: Elaborado pela autora.

No que se refere aos padrões, normas e tecnologias de comunicação por linha de energia empregados nos estudos analisados, observa-se a adoção de um conjunto diversificado de normas técnicas, com destaque para a CENELEC EN 50065, IEC 61850, IEEE 1901 e IEEE 1901.2, bem como as recomendações ITU-T G.9903 (G3-PLC) e ITU-T G.9960 (G.hn), além de diretrizes regulatórias como FCC (agência reguladora dos Estados Unidos) e ARERA (autoridade reguladora italiana). Em relação aos padrões de comunicação, são frequentemente mencionadas tecnologias como *HomePlug AV* e *AV2*, *PRIME*, *G3-PLC* e *X-10*, assim como mecanismos e protocolos associados, a exemplo de *CSMA/CA* e *IEEE 802.15.7*. Quanto às tecnologias PLC propriamente ditas, destacam-se as soluções de faixa estreita e de banda larga, incluindo implementações como *G3-PLC*, *PRIME* e *G.hn*, bem como o uso de técnicas de modulação e multiplexação, tais como *OFDM*, *MIMO*, *FSK*, *BPSK*, *QPSK*, *On-Off Keying (OOK)*, *QAM* e *Chirp Binary Orthogonal Keying (Chirp-BOK)*. A Tabela 9 estão representadas os padrões, normas e tecnologias PLC empregadas nos estudos analisados.

Em relação às métricas de desempenho empregadas nos estudos analisados, observa-se que a taxa de erro de bits (*Bit Error Rate (BER)*) é uma das mais utilizadas, estando presente em aproximadamente 25 artigos, principalmente em análises relacionadas à modulação, ao ruído, à interferência e à segurança. A taxa de transmissão é abordada em cerca de 24 estudos, estando diretamente associada à capacidade do canal e ao desempenho da comunicação PLC, enquanto o *throughput* é considerado em aproximadamente 22 trabalhos, com foco na avaliação do desempenho de redes e protocolos de comunicação. A resistência à interferência destaca-se como a métrica mais recorrente, sendo avaliada em cerca de 30 estudos, especialmente em contextos de ruído e filtragem. A latência é analisada em 14 artigos, sobretudo em estudos de qualidade de serviço (*Quality of Service (QoS)*), protocolos e sistemas em tempo real. Vale ressaltar, que muitas métricas como, *BER*, taxa de transmissão, *throughput* não estavam explícitos

Tabela 9 – Padrões, normas e tecnologias PLC empregadas nos estudos analisados

Tipo	Quantidade	Exemplos citados
Normas	Aproximadamente 26	CENELEC EN 50065, IEC 61850, IEEE 1901, IEEE 1901.2, ITU-T G.9903 (G3-PLC), ITU-T G.9960 (G.hn), FCC, ARERA, PRIME G3.
Padrões	Aproximadamente 25	<i>HomePlug AV</i> , <i>HomePlug AV2</i> , PRIME, G3-PLC, X-10, IEEE 802.15.7 (VLC), CS-MA/CA, OFDM, ZigBee, Wi-Fi, LoRa, MQTT.
Tecnologia PLC	Aproximadamente 28	NB-PLC, BB-PLC, G3-PLC, PRIME, G.hn, <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , <i>Wavelet-OFDM</i> , MIMO, SM-PLC, KQ-330, ST7540, BPSK, QPSK, OOK, Chirp-BOK.

Fonte: Elaborado pela autora.

no texto mas dava para entender que essa métrica foi calculada pelos resultados e valores que davam nos estudos. No sentido de tecnologias empregadas e integração dos sistemas PLC com outras tecnologias, PLC estava presente no estudo mas não era o foco principal, em alguns artigos fazia uma breve comparação, citava como uma aplicação futura. E para o tempo de resposta aparece de forma mais pontual, em apenas dois estudos voltados a sistemas de controle e aplicações em IoT. Métricas relacionadas à qualidade do sinal, como relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* (SNR)) e relação sinal-interferência mais ruído (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR)), são mencionadas em conjunto em 10 artigos, enquanto a taxa de erro de pacotes (*Packet Error Rate* (PER)) é utilizada em 4 estudos, principalmente em testes práticos envolvendo interferência, LEDs e cargas reais. A probabilidade de interrupção (*outage*) é considerada em 3 trabalhos, especialmente em sistemas híbridos e cenários com desvanecimento do canal, e o consumo energético é avaliado em dois estudos com foco em eficiência energética. Além dessas, alguns trabalhos empregam métricas específicas, tais como a probabilidade de descasamento (*mismatch probability* (mmPr)), a resposta ao impulso do canal (*Channel Impulse Response* (CIR)), a magnitude do vetor de erro (*Error Vector Magnitude* (EVM)), a razão entre ruído e distorção (*Noise-to-Distortion Ratio* (NDR)) e o *goodput*. A Tabela 10 fornece as principais métricas de desempenho utilizadas nos estudos analisados.

Tabela 10 – Métricas de desempenho utilizadas nos estudos analisados

Métrica	Quantidade de artigos	Observações
BER	Aproximadamente 25	Amplamente utilizada em estudos de modulação, ruído, interferência e <i>Noise-to-Distortion Ratio</i> .
Taxa de Transmissão	Aproximadamente 24	Relacionada à capacidade do canal e ao desempenho da comunicação PLC.
<i>Throughput</i>	Aproximadamente 22	Utilizada na avaliação de desempenho de rede e de protocolos de comunicação.
Resistência a Interferência	Aproximadamente 30	Avaliada em grande parte dos estudos, especialmente em análises de ruído e filtragem.
Latência	14	Empregada em estudos de qualidade de serviço, protocolos e sistemas em tempo real.
Tempo de Resposta	2	Aplicada principalmente em sistemas de controle e aplicações IoT.
SNR / SINR	10	Indicador combinado da qualidade do sinal e dos efeitos de interferência.
PER	4	Usada em testes práticos com interferência, LEDs e cargas reais.
Probabilidade de Interrupção	3	Aplicada em sistemas híbridos e cenários com desvanecimento do canal.
Consumo Energético	2	Presente em estudos voltados à eficiência energética.
Outras métricas	–	Eficiência espectral, cobertura, confiabilidade, entre outras métricas específicas.

Fonte: Elaborado pela autora.

No contexto das tecnologias utilizadas nos estudos analisados, a comunicação por linha de energia está presente em todos os artigos considerados. Além disso, observa-se a utilização de tecnologias sem fio complementares, com destaque para o WiFi (IEEE 802.11), mencionado em 12 estudos, seguido do ZigBee, citado em sete artigos. As tecnologias LoRaWAN aparecem em três estudos, enquanto soluções baseadas em frequência de rádio (*Radio Frequency* (RF)) em arquiteturas híbridas são mencionadas em seis trabalhos, incluindo também duas menções específicas a redes *RF Mesh*. A comunicação por luz visível (*Visible Light*

Communication (VLC)) é abordada em quatro estudos, ao passo que tecnologias de comunicação celular, como sistema global para comunicações móveis (*Software-Defined Radio* (GSM)), 4G e 5G, são identificadas em três artigos. A tecnologia *Ethernet* é mencionada em quatro estudos, e plataformas de IoT, como o *ThingSpeak*, aparecem em três trabalhos. Por fim, outras tecnologias, tais como TVWS, MQTT, CoAP e rádio definido por *software* (*Software-Defined Radio* (SDR)), são citadas de forma pontual nos estudos analisados. A Tabela 11 fornece as tecnologias empregadas nos estudos analisados.

Tabela 11 – Tecnologias empregadas nos estudos analisados

Tecnologia	Quantidade de menções
PLC	todos os artigos
Wi-Fi / IEEE 802.11	12
ZigBee	7
LoRaWAN	3
RF / <i>Wireless</i> (sistemas híbridos)	6
RF <i>Mesh</i>	2
VLC	4
GSM / 4G / 5G	3
<i>Ethernet</i>	4
IoT <i>Platforms</i>	3
Outras (TVWS, MQTT, CoAP, SDR)	Menções pontuais

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar a integração dos estudos com sistemas de energia, observa-se que o monitoramento energético é abordado em aproximadamente 27 artigos, seguido pelo gerenciamento de cargas, presente em pelo menos 22 estudos, e pela resposta à demanda (*Demand Response* (DR)), mencionada em torno de 11 trabalhos. A integração com *Smart Grid* e *Smart Metering* destaca-se como a mais recorrente, sendo identificada em aproximadamente 35 artigos, estando presente na maioria dos estudos analisados. De forma mais pontual, são observadas integrações com automação residencial, citada em 8 artigos, e com medição inteligente (*Advanced Metering Infrastructure* (AMI)), mencionada em 6 estudos. Já a integração com fontes renováveis e com veículos elétricos (*Electric Vehicle* (EV)) aparece de maneira menos frequente, sendo identificada em 3 e 2 artigos, respectivamente. Ressalta-se que um mesmo artigo pode contemplar mais de um tipo de integração, motivo pelo qual as quantidades apresentadas não são mutuamente exclusivas. A Tabela 12 fornece a integração dos estudos com sistemas de energia.

Observa-se, na integração dos sistemas PLC com outras tecnologias, que as soluções baseadas em Wi-Fi e em tecnologias sem fio de forma genérica, incluindo redes de sensores sem

Tabela 12 – Integração dos estudos com sistemas de energia

Tipo de Integração	Quantidade de artigos
Monitoramento Energético	Aproximadamente 27
Gerenciamento de Cargas	Aproximadamente 22
Resposta à Demanda	Aproximadamente 11
<i>Smart Grid / Smart Metering</i>	Aproximadamente 35
Integração com Fontes Renováveis	3
Veículos Elétricos	2
Automação Residencial	Aproximadamente 8
Medição Inteligente	Aproximadamente 6

Fonte: Elaborado pela autora.

fio (RF/Rede de Sensores Sem Fio (*Wireless Sensor Network (WSN)*)), são as mais recorrentes, ambas mencionadas em 12 estudos. A tecnologia ZigBee aparece em 7 artigos, enquanto os sistemas híbridos, que combinam PLC com tecnologias sem fio ou com VLC, são citados em 10 estudos, evidenciando a tendência de arquiteturas integradas. A comunicação por VLC é mencionada em 4 trabalhos, e a tecnologia LoRa surge de forma mais pontual, com 2 menções. Além disso, o uso de plataformas de IoT e serviços em nuvem é identificado em 5 estudos, enquanto outras tecnologias, como *Bluetooth*, *GSM* e *Ethernet*, aparecem apenas de forma pontual nos trabalhos analisados. A Tabela 13 fornece a integração dos sistemas PLC com outras tecnologias.

Tabela 13 – Integração dos sistemas PLC com outras tecnologias

Tecnologia	Quantidade de menções
Wi-Fi	12
ZigBee	7
<i>Wireless (RF / Redes de Sensores Sem Fio)</i>	12
VLC	4
LoRa	2
Plataformas IoT / <i>IoT Cloud</i>	5
Sistemas Híbridos (PLC + <i>Wireless</i>)	10
Outras (<i>Bluetooth, GSM, Ethernet</i>)	Menções pontuais

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 Categoria

Esta seção aborda o conteúdo apresentado na Seção 4.3, correspondente a análise categoria descrito na metodologia.

O Quadro 11 reúne quatro estudos que analisam os principais padrões, normas regulatórias e técnicas de modulação empregados em sistemas PLC. Observa-se a recorrência de normas regulatórias como a *Federal Communications Commission* (FCC) e o comitê europeu de normalização eletrotécnica (*Comité Européen de Normalisation Electrotechnique* (CENELEC)), responsáveis por estabelecer limites de emissão e requisitos de compatibilidade eletromagnética. Além dessas, destacam-se normas técnicas como a ITU-T G.9903, a EN 50065-1, a IEC 61000-2-2 e as recomendações do *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* (CISPR), que tratam da padronização do sistema, coexistência espectral e mitigação de interferências eletromagnéticas.

Os principais padrões tecnológicos são o IEEE 1901 e o IEEE 1901.2, aplicados a PLC de banda larga e estreita, além do *HomePlug AV2* e do ECMA-392, destinados a ambientes residenciais. Em relação às técnicas de modulação, a mais explorada é a OFDM, em virtude de sua robustez frente a ruídos impulsivos e ao desvanecimento seletivo do canal PLC, sendo frequentemente combinada com a QAM para aumentar a eficiência espectral. Também são analisadas modulações baseadas em PSK, incluindo a BPSK e a QPSK, que apresentam maior simplicidade de implementação e maior robustez em cenários com elevada interferência. Ademais, um dos estudos investiga o uso da *Wavelet-OFDM*, uma variação da OFDM tradicional que emprega funções *wavelet*, visando melhorias no desempenho espectral e redução de interferências.

Quadro 11 – Categoria C1 – Modulação e Normas

Artigo	Ano	Categoria	Modulação, Normas e Padrões
<i>TV White Space Regulated Broadband Power Line ...</i> (Heggo <i>et al.</i> , 2019)	2019	Categoria C1	Normas: FCC, CENELEC. Padrões: <i>HomePlug AV2</i> , ECMA-392, IEEE 1901. Modulação: OFDM, QAM.
<i>Standardization Challenges and Evolutions ...</i> (Lavenu <i>et al.</i> , 2021)	2021	Categoria C1	Normas: ITU-T G.9903, EN 50065-1, IEC 61000-2-2, CISPR.
<i>Power line Communication: Revolutionizing data ...</i> (Ercan, 2024a)	2024	Categoria C1	Normas: IEEE 1901.2. Modulação: BPSK, QPSK.
<i>A bandpass wavelet OFDM system for power ...</i> (Pinto-Benel; Cruz-Roldán, 2020)	2020	Categoria C1	Normas: IEEE Std 1901-2010. Modulação: <i>Wavelet</i> OFDM.
Quantidade de artigos: 4			

Fonte: elaborado pela autora.

O Quadro 12 fornece os seis estudos que investigam diferentes abordagens da PLC aplicadas ao contexto residencial e à automação de residências inteligentes. Observa-se a

predominância de duas classes tecnológicas principais: BB-PLC e a NB-PLC.

As tecnologias destacadas são, *HomePlug AV* e *HomePlug AV2*, empregadas em serviços como *Internet Protocol Television* (IPTV), *Voice over Internet Protocol* (VoIP) e integração com redes Wi-Fi. Essas soluções utilizam predominantemente a modulação OFDM, operando em faixas de frequência mais elevadas, o que possibilita maiores taxas de dados.

No contexto residencial, as tecnologias NB-PLC atendem aplicações residenciais de baixa taxa e baixo consumo, empregando modulações como OOK, FSK e OFDM em baixas frequências para maior alcance e confiabilidade, com soluções de baixo custo baseadas em microcontroladores.

Observa-se uma tendência recente de integração híbrida entre PLC e VLC em aplicações de IoT em ambientes internos, combinando diferentes meios físicos e padrões como IEEE 1901 e IEEE 802.15.7, com acesso ao meio via CSMA/CA, a fim de aumentar a flexibilidade, a eficiência espectral e a confiabilidade das redes residenciais.

Os Quadros 13, 14, 15 e 16 reúnem estudos que analisam o desempenho de sistemas de PLC por meio de diferentes métricas quantitativas e soluções técnicas propostas na literatura. Entre as métricas de desempenho mais utilizadas nos Quadros 13 e 14, destaca-se o BER, empregada para avaliar a confiabilidade da transmissão, sendo considerados satisfatórios valores inferiores a 10^{-5} , conforme disposto no Quadro 13.

Outras métricas recorrentes incluem o SNR, a atenuação do canal, a impedância da rede elétrica, com valores típicos entre 2 e 36Ω , e a distorção de fase, parâmetros fundamentais para a caracterização do canal PLC. Além disso, a resistência à interferência eletromagnética, medida em $\text{dB}\mu\text{V}$, é empregada para avaliar a robustez do sistema em ambientes com elevados níveis de ruído. Em cenários de comunicação *full-duplex*, destaca-se a métrica de cancelamento de eco, expressa em decibéis, com resultados que alcançam até -62 dB , indicando elevada eficiência da técnica.

No contexto da segurança física da camada, são utilizadas métricas específicas como a capacidade média de sigilo (ASC), a probabilidade de interrupção do sigilo (SOP) e a capacidade de sigilo estritamente positiva (SPSC). Quanto às soluções técnicas propostas, os trabalhos apresentam algoritmos distribuídos baseados na resposta ao impulso do canal (CIR) para aumento da robustez frente a interferências, modelos simplificados de linha de transmissão para melhor representação do canal PLC e abordagens baseadas em Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina voltadas à detecção de falhas e à otimização do desempenho.

Quadro 12 – Categoria C2 – Tecnologias PLC para casas inteligentes

Artigo	Ano	Categoria	Tecnologias PLC para residências inteligentes
<i>Testing home PLC network in multi-storey house</i> (Orgon <i>et al.</i> , 2019)	2019	Categoria C2	<i>HomePlug</i> AV com adaptadores <i>TP-Link</i> AV1200 aplicados a IPTV, VoIP e Wi-Fi residencial.
<i>Remote Control System Based on Power Line Communication</i> (Visan; Lita, 2021)	2021	Categoria C2	NB-PLC com <i>modems</i> KQ-330, modulação OFDM (135 kHz, 9,6 kbps) para automação residencial.
<i>Development of a Cost-effective Half-Duplex Power Line Communication System for Low Bandwidth Home Automation Applications</i> (Wanninayake <i>et al.</i> , 2021)	2021	Categoria C2	PLC <i>narrowband</i> customizado; modulação OOK (78 kHz); MCU MSP430FR2355 e AFE031; controle de iluminação.
<i>A Low Cost and Flexible Power Line Communication Sensory System for Home Automation</i> (Muttillio <i>et al.</i> , 2020)	2020	Categoria C2	PLC <i>narrowband</i> com <i>chip</i> Cypress CY8CPLC10; modulação FSK (2400 bps).
<i>Measurement of powerline performance in residential context</i> (Ciancetta <i>et al.</i> , 2020)	2020	Categoria C2	PLC banda larga <i>HomePlug</i> AV2; modulação OFDM (2–28 MHz); módulos TP-Link TL-PA4020P.
<i>A CSMA/CA based MAC protocol for hybrid Power-line/Visible-light communication networks: Design and analysis</i> (Hao <i>et al.</i> , 2024b)	2024	Categoria C2	Rede híbrida PLC/VLC para IoT <i>indoor</i> ; IEEE 1901, IEEE 802.15.7 e CSMA/CA.
Quantidade de artigos: 6			

Fonte: elaborado pela autora.

Para o Quadro 14 reúne sete estudos que entre as métricas de desempenho mais recorrentes destaca-se o PER é empregada para avaliar falhas na recepção de dados, alcançando 100% em condições críticas. O *throughput*, ou vazão efetiva de dados, também é amplamente analisado, sendo observadas reduções de até 67% em ambientes domésticos adversos, bem como ganhos significativos, com valores próximos a 398,20 kbit/s em abordagens baseadas em fusão de informações.

Outras métricas relevantes incluem a taxa de transmissão, a taxa de sucesso na entrega de dados, a latência e a atenuação do sinal. No domínio espectral, são avaliadas métricas relacionadas à redução de harmônicos e à densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* (PSD)), fundamentais para a caracterização de interferências eletromagnéticas. Quanto às soluções propostas, os estudos apresentam desde a comparação entre materiais condutores, como cobre e alumínio, até o uso de modulação em amplitude (*Amplitude Modulation* (AM)) em

Quadro 13 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 1

Artigo	Ano	Motivo	Métricas de Desempenho e Soluções Propostas
<i>Power grid surveillance ...</i> (Fernandez <i>et al.</i> , 2023)	2023	Categoria C3	Métricas: resistência à interferência (alta sob ruído < 100 dB μ V). Solução: algoritmo distribuído baseado em CIR.
<i>Faults in smart grid systems ...</i> (Rivas; Abrão, 2020)	2020	Categoria C3	Métricas: BER (< 10 ⁻⁵), latência (\leq 1 ms). Solução: revisão de técnicas baseadas em IA/ML.
<i>Narrowband Powerline Communication ...</i> (Alaya; Attia, 2019)	2019	Categoria C3	Métricas: ruído, impedância (2–36 Ω), atenuação e SNR. Resultados: FCC superior à CENELEC-A.
<i>Modeling of Power Line for</i> (Alam <i>et al.</i> , 2019)	2019	Categoria C3	Métricas: atenuação e distorção de fase. Solução: modelo simplificado de linha de transmissão.
<i>Evaluation of Noise ...</i> (Acakpovi <i>et al.</i> , 2019)	2019	Categoria C3	Métricas: ruído (mais elevado em NB-PLC). Solução: recomendação do uso de BB-PLC e OFDM.
<i>Approach to Implementation Full-duplex ...</i> (Movchan <i>et al.</i> , 2020)	2020	Categoria C3	Métricas: cancelamento de eco (até –62 dB). Solução: esquema híbrido analógico-digital.
<i>Secrecy Analysis of PLC System ...</i> (Mohan <i>et al.</i> , 2019)	2020	Categoria C3	Métricas: ASC, SOP e SPSC. Solução: modelos analíticos aplicados à segurança física da camada.
Quantidade de artigos: 7			

Fonte: elaborado pela autora.

sistemas de baixa taxa de transmissão. Também são exploradas soluções baseadas em algoritmos de aprendizado bayesiano adaptativo (*Adaptive Bayesian Learning* (ABL)) com fusão entre PLC e comunicação sem fio, visando ao aumento do *throughput* e da robustez do sistema. Além disso, destacam-se o uso de indutores de suavização para redução de harmônicos, a aplicação de filtros passivos do tipo *Butterworth* para aumento da atenuação e redução da PSD, bem como técnicas de codificação adaptativa *Huffman* associadas à comunicação assíncrona, que contribuem para a redução da latência e o aumento da taxa de sucesso em aplicações de IoT em larga escala.

Conforme disposto no Quadro 15, nove estudos analisam diferentes aspectos de desempenho. Nos Quadros 15 e 16, as métricas mais comuns incluem BER, SNR, taxa de transmissão, *throughput* e a probabilidade de interrupção ou falha na transmissão, a qual indica a confiabilidade do sistema. Em avaliações mais detalhadas, também são consideradas métricas adicionais, como EVM, usada para medir a distorção do sinal; SINR; tempo médio de serviço da camada MAC; probabilidade de bloqueio; e consumo de energia.

No que diz respeito às soluções técnicas, os estudos apresentam estratégias variadas, como injeção de ruído artificial no espaço nulo do canal legítimo para melhorar a segurança, modelagem de canais híbridos PLC–VLC, e estratégias de retransmissão oportunista DF-AF,

Quadro 14 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 2

Artigo	Ano	Motivo	Métricas de Desempenho e Soluções Propostas
<i>The Effects of LED Lamps Emissions ...</i> (Bucci <i>et al.</i> , 2022)	2022	Categoria C3	Métricas: BER (até 49,22%), PER (100%) e <i>throughput</i> (1.566 bps).
<i>Impact of household electrical ...</i> (Duriga <i>et al.</i> , 2020)	2020	Categoria C3	Métricas: <i>throughput</i> (redução de até 67%). Solução: comparação entre condutores de cobre e alumínio.
<i>Development of Power...</i> (Norazman; Dong, 2025)	2025	Categoria C3	Métricas: taxa (9.600 bps), sucesso (100%). Solução: modulação AM.
<i>Information Fusion Method ...</i> (Li <i>et al.</i> , 2022)	2022	Categoria C3	Métricas: <i>throughput</i> (398,20 kbit/s). Solução: algoritmo ABL com fusão PLC e comunicação sem fio.
<i>AC Chopper Harmonic Magnitudes ...</i> (Yener; Mutlu, 2019)	2019	Categoria C3	Métricas: redução de harmônicos (≥ 25 dB). Solução: uso de indutor de suavização.
<i>Passive Analog Blocking Filter...</i> (Cantarino <i>et al.</i> , 2023)	2023	Categoria C3	Métricas: atenuação (> 45 dB), redução da PSD (28 dB). Solução: filtro <i>Butterworth</i> passivo.
<i>Efficient Large-Scale IoT ...</i> (Zhang <i>et al.</i> , 2025a)	2025	Categoria C3	Métricas: latência (670 ms), sucesso (98,8%). Solução: codificação <i>Huffman</i> adaptativa e comunicação assíncrona.
Quantidade de artigos: 7			

Fonte: elaborado pela autora.

visando aumentar a taxa de sucesso da comunicação. Outras abordagens incluem modelagem analítica da função de transferência do canal, comparação entre diferentes tecnologias de PLC e IoT (HPGP, HS-PLC), uso de algoritmos de aproximação baseados em função geradora de momentos (*Moment Generating Function* (MGF)), otimização de retransmissores via *Long Short-Term Memory* (LSTM) e *Simulated Annealing*, e técnicas de cancelamento de eco digital usando algoritmos *Recursive Least Squares* (RLS). Além disso, filtros e modelagens específicas permitem reduzir atenuações de até 50 dB, garantindo maior integridade do sinal.

Estes oito estudos, listados no Quadro 16, exploram oito estudos que investigam diversas métricas de desempenho. Entre as mais utilizadas destacam-se a latência; a capacidade ergódica, que mede a capacidade média do canal; o tempo de serviço da camada MAC; e o consumo de energia por bit, especialmente relevantes para redes de IoT e aplicações de baixo consumo. Além disso, são consideradas métricas específicas, como a taxa eficaz de entrega de quadros (*Effective Frame Delivery Rate* (EFRD)), que avalia a eficiência na entrega de pacotes em cenários sujeitos a ruído.

Entre as soluções propostas, destacam-se transceptores baseados em redes neurais profundas para otimizar a comunicação fim a fim mesmo sem informação perfeita do canal

Quadro 15 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 3

Artigo	Ano	Motivo	Métricas de Desempenho e Soluções Técnicas
<i>Artificial Noise for In-Home ... (??)</i>	2023	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits e relação sinal-ruído. Solução: injeção de ruído artificial no espaço nulo do canal legítimo.
<i>Performance Comparisons of Broadband ... (Chung, 2020b)</i>	2020	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits, taxa de transmissão e espectro de potência. Solução: comparação entre IoT PLC, HPGP e HS-PLC.
<i>MGF-Based Mutual Approximation of ... (Chen et al., 2019)</i>	2019	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits e probabilidade de interrupção. Solução: algoritmos de aproximação baseados em função geradora de momentos.
<i>Channel Characteristics of Hybrid ... (Ding et al., 2024)</i>	2024	Categoria C3	Métricas: taxa de transmissão entre 64,7 e 222,4 Mbps e <i>throughput</i> . Solução: modelagem de canal híbrido PLC-VLC.
<i>Opportunistic DF-AF Selection Relaying (Van et al., 2021)</i>	2021	Categoria C3	Métricas: probabilidade de transmissão bem-sucedida e <i>throughput</i> . Solução: estratégia de retransmissão oportunista do tipo DF-AF.
<i>MAC Performance Analysis ... (Hao; Zhang, 2021)</i>	2021	Categoria C3	Métricas: <i>throughput</i> , tempo médio de serviço da camada MAC e probabilidade de bloqueio. Solução: modelo analítico IEEE 1901 com ARQ.
<i>A Relay Optimization Method for ... (Zhang et al., 2025b)</i>	2025	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits inferior a $1,2 \times 10^{-3}$, capacidade mínima, SINR e consumo energético. Solução: otimização baseada em LSTM e <i>Simulated Annealing</i> .
<i>Method for Digital Cancellation ... (Mukhamadiev et al., 2023)</i>	2023	Categoria C3	Métricas: relação sinal-interferência de 12,08 dB e EVM igual a 0,29. Solução: algoritmo RLS modificado para cancelamento de eco.
<i>Simulation of Some Factors ... (Hmamou et al., 2020)</i>	2019	Categoria C3	Métricas: atenuação de até 50 dB. Solução: modelagem analítica da função de transferência do canal.
Quantidade de artigos: 9			

Fonte: elaborado pela autora.

(*Channel State Information* (CSI)), algoritmos distribuídos de compartilhamento de espectro para aumentar o *throughput* agregado e por enlace, e otimização da alocação de potência para reduzir a probabilidade de interrupção e maximizar a capacidade ergódica. Também são exploradas modulações espaciais em PLC, sistemas MIMO-PLC com equalização de decisão (*Decision Feedback Equalizer* (DFE)) para aumentar a segurança, e aprendizado de máquina aplicado a *Error Correction Coding* (ECC) e protocolos de rede para reduzir erros e latência. Outras

abordagens incluem modelos *cross-layer* com requisição automática de repetição (*Automatic Repeat reQuest* (ARQ) e *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ)) para otimizar *throughput* e consumo de energia, e modelos *semi-hidden Markov* para previsão e mitigação de erros em enlaces *indoor* com amplificação.

Quadro 16 – Categoria C3 – Desempenho e Soluções Técnicas 4

Artigo	Ano	Motivo	Métricas de Desempenho e Soluções Técnicas
<i>An End-to-End Trainable ...</i> (Koh, 2023)	2023	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits comparável a sistemas com CSI perfeito. Solução: transceptor baseado em redes neurais profundas.
<i>Distributed Spectrum Sharing...</i> (Ali <i>et al.</i> , 2021)	2021	Categoria C3	Métricas: aumento do <i>throughput</i> agregado e por enlace. Solução: algoritmo distribuído de compartilhamento de espectro.
<i>Outage and Capacity ...</i> (ElHalawany <i>et al.</i> , 2023)	2023	Categoria C3	Métricas: probabilidade de interrupção e capacidade ergódica. Solução: otimização da alocação de potência.
<i>Noise Modelling and Mitigation ...</i> (Adegoke <i>et al.</i> , 2024)	2024	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits da ordem de 10^{-5} com relação sinal-ruído próxima de 14 dB. Solução: aplicação de modulação espacial em PLC.
<i>Security Transmission in MIMO ...</i> (Yu <i>et al.</i> , 2021)	2021	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits próxima de zero no enlace legítimo e elevada no enlace espião. Solução: sistema MIMO-PLC com DFE.
<i>Machine Learning-Based Error ...</i> (Akinci <i>et al.</i> , 2023)	2023	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits, latência e <i>throughput</i> . Solução: uso de aprendizado de máquina para ECC e protocolos.
<i>A Cross-Layered Theoretical ...</i> (Hao; Zhang, 2021)	2021	Categoria C3	Métricas: <i>throughput</i> entre 1,38 e 3,67 Mbps, tempo MAC e consumo energético por bit. Solução: modelo <i>cross-layer</i> com ARQ e HARQ.
<i>Indoor Amplify-and-Forward ...</i> (Kolade <i>et al.</i> , 2020)	2020	Categoria C3	Métricas: taxa de erro de bits próxima de 0,0019 e EFRD. Solução: modelo <i>semi-hidden Markov</i> .
Quantidade de artigos: 8			

Fonte: elaborado pela autora.

De forma geral, os Quadros 13, 14, 15 e 16 concentram-se em métricas como BER, PER, SNR, SINR, *throughput*, taxa de transmissão, latência, atenuação, consumo energético e redução de harmônicos. As soluções técnicas propostas abrangem modelagem de canal, algoritmos distribuídos e de otimização, técnicas de cancelamento de eco, filtragem analógica, métodos de codificação, escolha de materiais, estratégias de retransmissão, fusão de tecnologias

de comunicação e mitigação de interferências, evidenciando abordagens práticas e avançadas para o aprimoramento do desempenho e da confiabilidade de sistemas PLC.

O Quadro 17 reúne quatro estudos que exploram a aplicação de sistemas PLCs integrados a diferentes soluções de gerenciamento e automação energética. As pesquisas destacam a integração de PLC com IoT para monitoramento e controle de dispositivos como iluminação, eletrodomésticos e veículos elétricos *plug-in*, permitindo a submedição detalhada e automação residencial. Além disso, alguns trabalhos focam em dispositivos de borda (*edge devices*) que possibilitam o monitoramento em tempo real de grandezas elétricas como tensão, corrente, potência e fator de potência, oferecendo dados para controle eficiente do consumo energético. Outra linha importante é a otimização de esquemas de resposta à demanda em *smart grids*, onde o PLC atua como meio de comunicação principal para gerenciar cargas e reduzir picos de consumo. Também se destacam sistemas que combinam medição em tempo real com cálculo de custos e interfaces *web*, permitindo análise detalhada do consumo e tomada de decisão informada.

Quadro 17 – Categoria C4 – Integração com Sistemas de Energia

Artigo	Ano	Categoria	Aplicações em Sistemas de Energia
<i>Can 6LoPLC Enable...</i> (Ikpehai <i>et al.</i> , 2019)	2019	Categoria C4	Integração de PLC com IoT para submedição, controle de iluminação, eletrodomésticos e veículos elétricos <i>plug-in</i> .
<i>An Edge Device for Monitor...</i> (Varanasi; Karri, 2022)	2022	Categoria C4	Monitoramento e controle do consumo energético com medição em tempo real de tensão, corrente, potência e fator de potência.
<i>A Novel Function of...</i> (Al-Mashhadani; Kurnaz, 2024)	2024	Categoria C4	Otimização de esquemas de resposta à demanda em <i>smart grids</i> utilizando PLC como meio de comunicação principal.
<i>Smart Edge Device</i> (Varanasi <i>et al.</i> , 2024)	2024	Categoria C4	Gerenciamento energético com medição em tempo real, cálculo de custos e interface web para análise de consumo.
Quantidade de artigos: 4			

Fonte: elaborado pela autora.

A análise combinada dos Quadros 18 e 19, que abrangem estudos classificados em duas categorias, evidencia a diversidade de modulações, normas e padrões, bem como as diferentes métricas de desempenho, soluções propostas e aplicações em sistemas de energia em pesquisas de sistemas PLC. Nos estudos que abordam modulação, normas e padrões, destacam-se normas como CISPR 16-1, EN 50065-1, *Federal Communications Commission Part 15*, IEEE 1901 e IEEE 1901.2, bem como as normas de padronização de banda estreita e larga CENELEC-

C, ITU-T G.9960–G.9964, e padrões como G3-PLC e PRIME. As técnicas de modulação mais utilizadas incluem OFDM, QAM em diversas ordens, PSK, *BOK-Chirp* e FSK.

Em termos de métricas de desempenho e soluções propostas, os estudos avaliam BER, NDR, taxa de dados, latência, perda de pacotes, confiabilidade e perda de inserção como indicadores centrais de desempenho. Entre as soluções propostas, destacam-se filtros LC diferenciais, esquemas de receptor OFDM, modelos estatísticos de ruído impulsivo usando algoritmo *Baum-Welch*, exploração do limite de pico quase máximo usado em medições EMC (*Quasi-Peak* (QP)) e sistemas de medição inteligente integrados a PLC para otimização de desempenho em ambientes ruidosos.

Quanto às aplicações em sistemas de energia, os trabalhos demonstram que os sistemas PLC podem ser aplicados para controle e monitoramento de redes residenciais, sistemas de medição inteligente, integração com IoT para envio de dados à nuvem e gestão de cargas de iluminação, evidenciando o papel das tecnologias PLC tanto em automação quanto em eficiência energética. De modo geral, os principais destaques são a utilização de OFDM e QAM como modulações robustas, a adoção de normas IEEE 1901/1901.2, CENELEC e FCC.

Os Quadros 20 e 21 que reúnem estudos classificados em mais de duas categorias. Entre as normas regulatórias e técnicas destacam-se IEEE 1901, IEEE 1901.2, ITU-T G.9903/G.9904, CENELEC EN 50065, IEC 61000-2-2, PRIME G3, ARIB STD T-84, além de diretrizes de órgãos reguladores como *Department of Homeland Security* (DHS), *Cybersecurity & Infrastructure Security Agency* (CISA) e ARERA. Quanto às técnicas de modulação, os estudos abordam BPSK, QPSK, OOK, OFDM, incluindo *Wavelet-OFDM*, e o uso de código de correção de erros de baixa densidade *Low-Density Parity Check* (LDPC) para aumentar a confiabilidade da comunicação.

No âmbito do desempenho e das soluções estudadas, destacam-se métricas como BER, latência, *throughput*, e a robustez frente a SNR. As soluções propostas incluem modulação adaptativa, correção de erros antecipada (*Forward Error Correction* (FEC)), drivers híbridos *Digitalize-and-Forward*, *dual-mode* PLC + WiFi, além de *modems* de baixo custo e algoritmos de supressão de ruído impulsivo.

Referente às aplicações em sistemas de energia, os estudos destacam resposta à demanda, monitoramento, automação de redes de distribuição e medição inteligente, submedição, integração com veículos elétricos e suporte a *smart grid*. Já a integração com outras tecnologias envolve principalmente a combinação do PLC com Wi-Fi, ZigBee, LTE, RF *Mesh*, *Ethernet* e

Quadro 18 – Estudos classificados em duas categorias 1

Artigo	Ano	Categoria	Modulação, Normas e Padrões	Métricas de Desempenho e Soluções Propostas
<i>Power Line Communication for Low-Bandwidth ...</i> (Aderibole <i>et al.</i> , 2022)	2021	Categoria C1 e C3	Normas: CISPR 16-1, EN 50065-1, FCC Part 15, IEEE 1901.2. Modulação: <i>Chirp</i> -BOK.	Métricas: confiabilidade (100%), taxa (8 símbolos/s). Solução: exploração do limite de QP.
<i>Impulse Noise Modeling in an Indoor Narrowband Power ...</i> (Iyiola <i>et al.</i> , 2020)	2020	Categoria C1 e C3	Normas: CENELEC-C. Padrões: G3-PLC, PRIME. Modulação: M-QAM.	Métricas: BER indireto. Solução: modelo FMM utilizando algoritmo <i>Baum-Welch</i> .
<i>Formulation and Performance Analysis ...</i> (Gangoso <i>et al.</i> , 2021)	2021	Categoria C1 e C3	Normas: IEEE 1901, IEEE 1901.2. Modulação: OFDM.	Métricas: BER e taxa de dados. Solução: comparação entre diferentes esquemas de receptor OFDM.
<i>Channel estimation for OFDM-based indoor broadband ...</i> (Cortés <i>et al.</i> , 2023)	2023	Categoria C1 e C3	Normas: ITU-T G.9960–G.9964, IEEE P1901. Modulação: até 1024-QAM.	Métricas: NDR e perda de taxa de bits. Solução: comparação entre LMMSE, LS e FD-h.
Quantidade de artigos: 4				

Fonte: elaborado pela autora.

sistemas híbridos PLC-VLC, permitindo interoperabilidade em residências inteligentes (*Home Area Network* (HAN)), IoT e plataformas de gestão energética.

De maneira geral, os estudos evidenciam que os padrões e normas mais adotados são IEEE 1901/1901.2, PRIME G3 e CENELEC, as modulações mais recorrentes são OFDM e BPSK/QPSK, enquanto as soluções de desempenho combinam técnicas de correção de erro, modulação adaptativa e integração com múltiplas tecnologias de comunicação. As aplicações concentram-se em monitoramento energético e integração com sistemas de veículos elétricos.

Vale ressaltar que dois artigos não se enquadraram em nenhuma das categorias definidas. O primeiro concentra-se no escalonamento de acesso a dados de medidores inteligentes, utilizando o algoritmo húngaro (Farooq *et al.*, 2025). O segundo aborda aplicações de Internet das Coisas (IoT) e redes de sensores sem fio (Bagdadee *et al.*, 2020).

Quadro 19 – Estudos classificados em duas categorias 2

Artigo	Ano	Categoria	Modulação, Normas e Padrões	Métricas de Desempenho e Soluções Propostas	Aplicações em Sistemas de Energia
<i>Disturbance and Signal Filter for Power ...</i> (Bernacki et al., 2019)	2019	Categoria C1 e C3	Normas: CENELEC EN 50065-1. Modulação: FSK/PSK.	Métricas: perda de inserção (≈ 16 dB) e ganho no sinal útil (+20 dBV). Solução: filtro LC diferencial.	-
<i>Evaluation of the Impact of...</i> (Delfino et al., 2019)	2019	Categoria C3 e C4	-	Métricas: BER (0%), resistência à interferência. Solução: testes de compatibilidade eletromagnética.	Avaliação do impacto de cargas de iluminação na comunicação PLC aplicada ao controle e monitoramento da rede residencial.
<i>Adaptation of powerline communications...</i> (Sendin et al., 2015)	2023	Categoria C3 e C4	-	Métricas: perda de pacotes (0–2 caracteres) e latência (≈ 5000 ms). Solução: sistema de medição inteligente com módulo PLC KQ-330.	Sistema de medição inteligente com integração PLC e envio de dados para nuvem IoT para monitoramento energético.
Quantidade de artigos: 3					

Fonte: elaborado pela autora.

5.4 Síntese Crítica

Esta seção aborda o conteúdo apresentado na Seção 4.4, correspondente a síntese crítica descrito na metodologia.

A síntese crítica dos resultados permite uma interpretação fundamentada das seis questões de pesquisa. Para a QP1, observa-se que o PLC em redes de baixa tensão opera predominantemente com técnicas de modulação digital robustas a ruídos e atenuações. A modulação OFDM é a mais recorrente, frequentemente combinada com QAM para ganho de eficiência espectral, enquanto modulações como FSK, PSK, OOK e *Chirp-BOK* são mais comuns em sistemas narrowband de baixo custo. Contudo, nota-se uma carência de comparações práticas entre técnicas emergentes, como a *Wavelet-OFDM*, e a validação experimental da conformidade com normas como IEEE 1901 e CENELEC EN 50065 é ainda limitada.

Quanto à QP2, as tecnologias mais discutidas para residências inteligentes incluem *HomePlug AV/AV2* para aplicações de alta taxa, como IPTV e VoIP, e NB-PLC, como G3-PLC e PRIME, para automação de baixo custo. Soluções híbridas, como PLC/VLC, surgem como tendência para aumentar a flexibilidade e confiabilidade. No entanto, a eficácia é geralmente

Quadro 20 – Estudos classificados em mais de duas categorias 1

Artigo	Ano	Categoria	Modulação, Normas e Padrões	Tecnologias PLC para residências inteligentes	Métricas de Desempenho e Soluções Propostas	Aplicações em Sistemas de Energia	Integração com outras tecnologias
<i>Data-driven management for cyber-physical ... (??)</i>	2025	Categoria C1, C2 e C4	Normas: IEEE, IEC, DHS, CISA. Padrões: PLC, ZigBee, WiFi, LTE, RF <i>Mesh</i> , <i>Ethernet</i> , .	PLC em HAN aplicado a residências inteligentes, medição inteligente e integração com veículos elétricos.	-	<i>Framework</i> para gestão energética em redes de distribuição, incluindo resposta à demanda, residências inteligentes e veículos elétricos.	-
<i>Post-metering value-added services for low voltage electricity ... (??)</i>	2022	Categoria C1, C2, C4 e C5	Normas: CEI TS 13-82/83/84, CENELEC EN 50568-4, ARERA. Modulação: B-PSK.	PLC CENELEC C (125–140 kHz) aplicado à comunicação entre medidores e dispositivos residenciais.	-	Serviços de pós-medição voltados à automação residencial, monitoramento energético e estratégias de resposta à demanda.	Menção de alternativas: RF, NB-IoT, ZigBee.
<i>IEEE Standard for Broadband over Power Line ... (IEEE. . . , 2021)</i>	2020	Categoria C1, C2 e C3	Normas: IEEE Std 1901-2020, IEEE 802.1X, FIPS PUB 197. Modulação: <i>Wavelet</i> OFDM e FFT OFDM.	BPL (<i>HomePlug AV</i>) para redes domésticas, IoT e ambientes residenciais inteligentes.	Métricas: BER, latência e <i>throughput</i> (> 100 Mbps). Solução: FEC e modulação adaptativa.	-	-
<i>Simple and Low-Cost PLC Modem for IoT ... (Santos et al., 2022)</i>	2022	Categoria C3, C4 e C1	Normas: EN 50065, IEEE 1901.2, ARIB STD T-84. Modulação: OOK.	-	Métricas: BER (< 1,21%), taxa (9.600 bps). Solução: <i>modem</i> discreto com OOK.	Aplicações em submedição, monitoramento de energia e suporte à resposta à demanda em ambientes IoT.	-
Quantidade de artigos: 4							

Fonte: elaborado pela autora.

avaliada em cenários controlados, com poucos estudos em ambientes residenciais reais e multifamiliares, o que dificulta a definição de uma tecnologia única ideal, sendo a escolha dependente de *trade-offs* entre custo, taxa de dados e robustez.

Quadro 21 – Estudos classificados em mais de duas categorias 2

Artigo	Ano	Categoria	Modulação, Normas e Padrões	Tecnologias PLC para residências inteligentes	Métricas de Desempenho e Soluções Propostas	Aplicações em Sistemas de Energia	Integração com outras tecnologias
<i>Impulse Noise Suppression for G.hn Broad-band ... (??)</i>	2021	Categoria C3, C1 e C4	Normas: ITU-T G.9960, G.9955, IEEE P1901. Modulação: OFDM com LDPC.	-	Métricas: BER (10^{-5} com SNR de 8–10 dB). Solução: algoritmo combinado com LDPC.	Aprimoramento da confiabilidade da comunicação PLC em aplicações de <i>smart grid</i> , monitoramento e controle da rede elétrica.	-
<i>A Case Study on the Integration of ... (Loose et al., 2024)</i>	2024	Categoria C1, C3 e C4	Normas: PRIME G3 (ITU-T G.9904), CENELEC A. Modulação: BPSK.	-	Métricas: BER ($\approx 1,34 \times 10^{-3}$). Solução: <i>driver híbrido Digitalize-and-Forward</i> .	Demonstração de sistema híbrido PLC-VLC aplicado a smart metering e automação residencial.	-
<i>Dual Mode Data Acquisition and Analysis Based on Deep Learning for Smart Home Networks (Zhang et al., 2024)</i>	2023	Categoria C2, C3 e C5	-	G3-PLC (IEEE P1901.2) integrado ao Wi-Fi 802.11 para aplicações em casas inteligentes.	Métricas: latência (5 s), taxa (33,4 kbps em PLC). Solução: sistema <i>dual-mode</i> PLC + WiFi.	-	Tecnologia integrada: G3-PLC + WiFi.
Quantidade de artigos: 3							

Fonte: elaborado pela autora.

Em relação à QP3, as taxas de transmissão máximas variam significativamente: de 9,6 kbps em sistemas NB-PLC a até 222,4 Mbps em configurações híbridas PLC/VLC. Os principais fatores limitantes incluem interferência eletromagnética (especialmente de lâmpadas LED), atenuação do canal (podendo atingir 50 dB), ruído impulsivo e variação da impedância da rede (2–36 Ω). Métricas como *throughput* e BER são frequentemente reportadas, mas raramente acompanhadas de análise estatística ou intervalo de confiança. Estudos que avaliam desempenho em cenários domésticos reais são minoria; a maioria recorre a simulações no Matlab ou ambientes laboratoriais.

No que diz respeito à QP4, o PLC integra-se principalmente a sistemas de *smart metering*, monitoramento energético e resposta à demanda, sendo a comunicação com medidores inteligentes a aplicação mais recorrente. Integrações com fontes renováveis e veículos elétricos são ainda pouco exploradas. A análise crítica aponta que muitas propostas permanecem em nível conceitual, com escassa discussão sobre protocolos de interoperabilidade, escalabilidade em larga escala e aderência a padrões de IoT.

Sobre a QP5, os principais desafios técnicos identificados são o ruído impulsivo, a interferência de dispositivos, a variação da impedância do canal e vulnerabilidades de segurança física. Como soluções, destacam-se algoritmos de cancelamento de eco, filtros analógicos passivos (como *Butterworth*) e o uso de técnicas de IA/ML para otimização e detecção de falhas. Entretanto, a maioria dessas soluções é validada apenas em simulação, com pouca implementação em protótipos ou ambientes reais, e a falta de padronização metodológica dificulta a comparação direta entre as abordagens.

Por fim, para a QP6, a comparação com outras tecnologias indica que o PLC oferece vantagens em alcance interno. No entanto, tecnologias como Wi-Fi superam o PLC em taxa de dados e latência em cenários sem interferência significativa, enquanto ZigBee e LoRa são mais adequados para sensoriamento de baixa potência, embora com alcance limitado. A crítica principal reside na escassez de comparações equitativas, realizadas sob as mesmas condições e métricas, sendo comum a menção ao PLC como complementar, sem quantificação clara das vantagens comparativas.

5.5 Discussão

Em relação à Seção 5.1.1, observou-se que a aplicação da *string* de busca em algumas bases de dados, como IEEE *Xplore* e Google Acadêmico, resultou em um número elevado de estudos recuperados. No entanto, a maioria desses trabalhos abordava a tecnologia de comunicação por linha de energia de forma superficial, limitando-se, em muitos casos, à simples menção do termo ao longo do texto, sem aprofundamento conceitual ou aplicação prática.

Além disso, foi identificada recorrente ambiguidade na utilização da sigla PLC, a qual, em diversos estudos, era associada ao controlador lógico programável, amplamente empregado em automação industrial, mas conceitualmente distinto da tecnologia de comunicação investigada neste trabalho.

Verificou-se que os primeiros resultados retornados pelas bases apresentavam maior

aderência aos termos definidos na *string* de busca, contemplando temas como residências inteligentes, sistemas de baixa tensão e aplicações de PLC em ambientes domésticos. Contudo, à medida que os resultados avançavam, os estudos passaram a tratar a PLC de maneira genérica ou a concentrar-se em tópicos correlatos, como sistemas inteligentes de forma ampla ou aplicações em redes de média e alta tensão, destoando do escopo desta pesquisa. Ressalta-se, portanto, a predominância de trabalhos voltados à aplicação da PLC em contextos de média e alta tensão.

De modo geral, constatou-se que, apesar do volume expressivo de publicações relacionadas à comunicação por linha de energia nas bases analisadas, é limitada a quantidade de estudos especificamente direcionados à aplicação dessa tecnologia em ambientes residenciais inteligentes. Tal constatação evidencia uma lacuna na literatura, reforçando a relevância e a contribuição do presente trabalho.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho consolida 62 estudos publicados entre 2019 e 2025, oferecendo uma visão atualizada do estado da arte e atendendo de forma clara os objetivos propostos. A revisão sistemática seguiu o protocolo PRISMA, aplicando critérios de qualidade do QATSDD adaptado e análise categórica, assegurando transparência e reprodutibilidade.

Os objetivos propostos foram alcançados por meio da análise do funcionamento da comunicação por linha de energia em redes de baixa tensão, evidenciando desafios técnicos como ruído impulsivo, interferência eletromagnética e variações de impedância do canal. Foram identificadas as principais tecnologias aplicáveis a residências inteligentes, com destaque para *HomePlug AV/AV2* em cenários que exigem altas taxas de transmissão e soluções *NB-PLC*, como *G3-PLC* e *PRIME*, voltadas à automação de baixo custo, além de configurações híbridas *PLC/VLC* como alternativa para maior confiabilidade. As taxas de transmissão observadas variam de 9,6 kbps em sistemas *narrowband* a valores superiores a 200 Mbps em soluções de banda larga e híbridas, sendo limitadas principalmente pelas características do canal elétrico. A comparação com tecnologias sem fio demonstrou que a PLC apresenta vantagens relacionadas ao uso da infraestrutura elétrica existente e ao alcance em ambientes internos, porém possui limitações em taxa de dados e latência quando comparada ao *Wi-Fi*, enquanto tecnologias como *ZigBee* e *LoRa* são mais adequadas para aplicações de baixa potência. Por fim, a integração da PLC em sistemas de gestão energética residencial mostrou-se relevante em aplicações de *smart metering*, monitoramento em tempo real e resposta à demanda, apesar de persistirem desafios técnicos cujas soluções ainda são, em sua maioria, validadas por simulações.

A análise também identificou lacunas na literatura, como a escassez de estudos em ambientes residenciais reais e a limitada investigação de sistemas PLC integrados a tecnologias híbridas, sendo que os poucos trabalhos existentes não comparam diretamente com PLC ou utilizam essas tecnologias isoladamente.

Os resultados deste trabalho estão condicionados aos estudos selecionados com base nas bases de dados analisadas e nos critérios metodológicos adotados. A não aplicação da técnica de *snowballing* pode ter limitado a identificação de alguns estudos relevantes; contudo, a abrangência e a relevância das bases utilizadas, suficiente para sustentar uma discussão consistente dentro do escopo proposto.

Dessa forma, o trabalho responde de maneira estruturada e fundamentada a todos os objetivos iniciais, consolidando-se como uma revisão sistemática relevante e conclusiva sobre

o tema. Conclui-se que o PLC é uma tecnologia viável e complementar para comunicação em residências inteligentes, especialmente onde a infraestrutura elétrica já existe e há necessidade de alcance interno robusto. Sua adoção em larga escala, entretanto, depende da superação de desafios técnicos, da maior padronização e da integração harmoniosa com outras tecnologias de comunicação.

REFERÊNCIAS

- ACAKPOVI, A.; MOHAMMED, H.; NWULU, N.; FIFATIN, F.-X. N.; NOUNANGNONHOU, T. C.; ABUBAKAR, R. Evaluation of noise effects on power line communication in a narrow and wide band frequency spectrum: A case study of electricity distribution network of ghana. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMPUTATIONAL MODELLING AND APPLICATIONS, 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 27–276. Acesso em: 17 novembro 2025.
- ADEBISI, B.; RABIE, K. M.; IKPEHAI, A.; SOLTANPUR, C.; WELLS, A. Vector ofdm transmission over non-gaussian power line communication channels. **IEEE Systems Journal**, v. 12, n. 3, p. 2344–2352, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2669086>. Acesso em: 16 julho 2025.
- ADEGOKE, O. M.; GBADAMOSI, S. L.; ADEJUMOBI, B. S.; OWOLABI, I. E.; OKE, W. A.; NWULU, N. I. Noise modelling and mitigation for broadband in-door power line communication systems. **IET Communications**, USA, v. 18, n. 15, p. 869–881, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/cmu2.12797>. Acesso em: 30 dezembro 2025.
- ADERIBOLE, A. O.; SAATHOFF, E. K.; KIRCHER, K. J.; LEEB, S. B.; NORFORD, L. K. Power line communication for low-bandwidth control and sensing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 37, n. 3, p. 2172–2181, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9534927>. Acesso em: 7 novembro 2025.
- AKINCI, T. C.; ERDEMIR, G.; ZENGİN, A. T.; SEKER, S.; IDRİSS, A. I. Machine learning-based error correction codes and communication protocols for power line communication: An overview. **IEEE Access**, USA, v. 11, p. 124760–124781, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3330690>. Acesso em: 1 janeiro 2025.
- AKPARI, E. W.; NUNOO, S.; DEYNU, F. K.; APPREY, M. W. Efficient low-complexity optimized channel estimating methods for ofdm-based low-voltage broadband power line communication systems. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 21, n. 3, p. 453–480, 2022. Acesso em: 15 junho 2025.
- AL-MASHHADANI, S. W. T.; KURNAZ, S. A novel function of a research process based on a power internet of things architecture intended for smart grid demand schemes. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 14, n. 13, p. Art. 5799, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5799>. Acesso em: 11 janeiro 2025.
- ALAM, Z.; KHURSHEED, A.; SINGH, S. V. Modeling of power line for home-building automation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, COMPUTATIONAL AND TECHNOLOGY MANAGEMENT, 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 111–115. Acesso em: 14 novembro 2025.
- ALAYA, R.; ATTIA, R. Narrowband powerline communication measurement and analysis in the low voltage distribution network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER NETWORKS, 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 1–6. Acesso em: 14 novembro 2025.
- ALENCAR, M. S. D. **4 Quadrature Amplitude Modulation Theory**. [S. l.: s. n.], 2018. 121–142 p. Acesso em: 16 julho 2025.

ALI, K.; LIU, A. X.; PEFKIANAKIS, I.; KIM, K.-H. Distributed spectrum sharing for enterprise powerline communication networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, New York, v. 29, n. 3, p. 1032–1045, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9366025>. Acesso em: 30 dezembro 2025.

ALTHAUS, P.; REDDER, F.; UBACHUKWU, E.; MORK, M.; XHONNEUX, A.; MULDER, D. Enhancing building monitoring and control for district energy systems: Technology selection and installation within the living lab energy campus. **Applied Sciences**, Basel, v. 12, n. 7, p. 3305, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3305>. Acesso em: 31 julho 2025.

ANDREADOU, N.; GUARDIOLA, M. O.; FULLI, G. Telecommunication technologies for smart grid projects with focus on smart metering applications. **Energies**, Basel, v. 9, n. 5, p. 375, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/5/375>. Acesso em: 31 julho 2025.

ARRANO, H. F.; AZURDIA-MEZA, C. A. Ofdm: today and in the future of next generation wireless communications. In: IEEE CENTRAL AMERICA AND PANAMA STUDENT CONFERENCE, 2016. **Anais... IEEE**, 2016. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CONESCAPAN.2016.8075209>. Acesso em: 16 julho 2025.

ARXIV. **Coded modulation for power line communications**: preprint. 2011. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1104.1528>. Acesso em: 07 julho 2025.

ARXIV. **For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid**: preprint. 2011. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1010.1973>. Acesso em: 2 julho 2025.

ARXIV. **Analysis of blockage effects on urban cellular networks**: preprint. 2013. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1309.4141>. Acesso em: 31 julho 2025.

ARXIV. **Analysis of the Impact of Impulsive Noise Parameters on BER Performance of OFDM Power-Line Communications**: preprint. 2015. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1502.06821>. Acesso em: 06 julho 2025.

ARXIV. **An Enabling Waveform for 5G – QAM-FBMC: Initial Analysis**: preprint. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1803.03169>. Acesso em: 23 julho 2025.

ARXIV. **Securing Bluetooth Low Energy: a literature review**: preprint. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2404.16846>. Acesso em: 31 julho 2025.

BAGDADEE, A. H.; HOQUE, M. Z.; ZHANG, L. Iot based wireless sensor network for power quality control in smart grid. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 167, p. 1148–1160, 2020. ISSN 1877-0509. International Conference on Computational Intelligence and Data Science. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920308838>. Acesso em: 5 agosto 2025.

BEAUDIN, M.; ZAREIPOUR, H. Home energy management systems: A review of modelling and complexity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 45, p. 318–335, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000568>. Acesso em: 31 julho 2025.

BERNACKI, K.; WYBRAŃCZYK, D.; ZYGMANOWSKI, M.; LATKO, A.; MICHALAK, J.; RYMARSKI, Z. Disturbance and signal filter for power line communication. **Electronics**, Basel, v. 8, n. 4, p. Art. 378, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/4/378>. Acesso em: 15 setembro 2025.

BESHIR, A. H.; NEGRI, S.; WU, X.; LIU, X.; WAN, L.; SPADACINI, G.; PIGNARI, S. A.; GRASSI, F. Behavioral model of g3-powerline communication modems for emi analysis. **Energies**, v. 16, n. 8, p. 3336, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3336>. Acesso em: 13 julho 2025.

BRONZI, W.; FRANK, R.; CASTIGNANI, G.; ENGEL, T. Bluetooth low energy performance and robustness analysis for inter-vehicular communications. **Ad Hoc Networks**, Elsevier, v. 37, p. 76–86, 2016. Special Issue on Advances in Vehicular Networks. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870515001663>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BUCCI, G.; CIANCETTA, F.; FIORAVANTI, A.; FIORUCCI, E.; LANDI, C.; LUISO, M.; MARI, S.; SILVESTRI, A. The effects of led lamps emissions on plc: a preliminary study in a realistic scenario. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 & IOT (METROIND4.0&IOT), 2022. **Anais...** [S. l.], 2022. p. 167–172. Acesso em: 23 novembro 2025.

CANTARINO, W. M.; MONTEIRO, V. E.; COSTA, L. G. da S.; RIBEIRO, M. V. Passive analog blocking filter for narrowband plc systems. In: SYMPOSIUM ON INTERNET OF THINGS (SIOT), 2023. **Anais...** [S. l.], 2023. p. 1–5.

CAO, W.; HUANG, C.; ZHANG, G. Research on measurement system of high-frequency parameters for line traps. **TELKOMNIKA**, v. 11, n. 7, p. 4142–4150, 2013. Disponível em: <https://journal.uad.ac.id/index.php/TELKOMNIKA/article/view/1234>. Acesso em: 14 julho 2025.

CAVDAR, I. H.; KARADENIZ, E. Measurements of impedance and attenuation at cenelec bands for power line communications systems. **Sensors**, Basel, v. 8, n. 12, p. 8027–8036, 2008. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/8/12/8027>. Acesso em: 4 agosto 2025.

CHEN, Q.; HE, J.; ZHOU, W.; SU, Q. Surge protection for interface circuits of communication system. **IEEE Power Engineering Review**, New York, v. 22, n. 8, p. 69–69, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.4312514>. Acesso em: 4 agosto 2025.

CHEN, Z.; YE, C.; YUAN, J.; HAN, D. Mgf-based mutual approximation of hybrid fading: Performance of wireless/power line relaying communication for iot. **Sensors**, Basel, v. 19, n. 11, p. 2460, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/11/2460>. Acesso em: 7 dezembro 2025.

CHUNG, Y. M. Performance comparisons of broadband power line communication technologies. **Applied Sciences**, v. 10, n. 9, p. 3306, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3306>. Acesso em: 05 julho 2025.

CHUNG, Y. M. Performance comparisons of broadband power line communication technologies. **Applied Sciences**, v. 10, n. 9, p. 3306, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3306>. Acesso em: 15 junho 2025.

CIANCETTA, F.; BUCCI, G.; FIORUCCI, E.; MARI, S.; FIORAVANTI, A.; PRUDENZI, A. Measurement of powerline performance in residential context. In: 24TH IMEKO TC4 INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 24., 2020. **Anais...** [S. l.]: IMEKO, 2020. Acesso em: 23 outubro 2025.

COLEMAN, J. O. Signals and systems ii-part iii: Analytic signals and qam data transmission. **IEEE Potentials**, New York, v. 29, n. 3, p. 40–44, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MPOT.2010.936931>. Acesso em: 23 julho 2025.

CORTÉS, J. A.; CAÑETE, F. J.; DíEZ, L. Channel estimation for ofdm-based indoor broadband power line communication systems. **Journal of Communications and Networks**, Seoul, v. 25, n. 2, p. 151–166, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10007862>. Acesso em: 5 agosto 2025.

COSTA, L. G. da S.; QUEIROZ, A. C. M. de; ADEBISI, B.; COSTA, V. L. R. da; RIBEIRO, M. V. Coupling for power line communications: A survey. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 32, n. 1, 2017. Disponível em: <https://jcis.sbrc.org.br/jcis/article/view/415>. Acesso em: 13 julho 2025.

COSTA, W. da S.; SANTOS, W. G. V. dos; ROCHA, H. R. de O.; SEGATTO, M. E. V.; SILVA, J. A. L. Power line communication based smartplug prototype for power consumption monitoring in smart homes. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 11, p. 1849–1857, 2021. Acesso em: 13 maio 2025.

DARROUDI, S. M.; GOMEZ, C. Bluetooth low energy mesh networks: a survey. **Sensors**, MDPI, v. 17, n. 7, p. Art. 1467, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1467>. Acesso em: 1 agosto 2025.

DELFINO, A. S.; BRANDÃO, R. P.; BUMPUS, T. S.; FORTES, M. Z.; HENRIQUES, H. O.; FERREIRA, V. H. Evaluation of the impact of led and compact fluorescent lamps on the plc transmission with x-10 technology. In: IEEE MILAN POWERTECH, 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 1–6. Acesso em: 21 novembro 2025.

DIAN, F. J.; YOUSEFI, A.; LIM, S. A practical study on bluetooth low energy (ble) throughput. In: ANNUAL INFORMATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MOBILE COMMUNICATION CONFERENCE (IEMCON), 9., 2018. **Anais...** IEEE, 2018. p. 768–771. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614763>. Acesso em: 1 agosto 2025.

DING, J.; I, C.-L.; WANG, J.; SONG, J. Channel characteristics of hybrid power line communication and visible light communication based on distinct optical beam configurations for 6g iot network. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, n. 17, p. 7481, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7481>. Acesso em: 20 dezembro 2025.

DURIGA, R.; KOPPL, M.; POCAROVSKY, S.; ORGON, M. Impact of household electrical appliances on transmission speed in plc networks. In: 12TH INTERNATIONAL CONGRESS ON ULTRA MODERN TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS AND WORKSHOPS (ICUMT), 2020. **Anais...** [S. l.], 2020. p. 168–172. Acesso em: 25 novembro 2025.

DWIVEDI, S. K.; PURWAR, V.; MISHRA, S. Ofdm: Orthogonal frequency division multiplexing. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 2, n. 8, 2013. Disponível em: <https://www.ijert.org/ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing>. Acesso em: 16 julho 2025.

ELHALAWANY, B. M.; SAMIR, A.; ELSAYED, M.; KHAN, W. U.; WU, K.; MOHAMED, E. M. Outage and capacity analysis of noma systems over dual-hop mixed powerline-wireless channels. **ICT Express**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 601–607, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959522000881>. Acesso em: 30 dezembro 2025.

ERCAN, S. U. Power line communication: Revolutionizing data transfer over electrical distribution networks. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 52, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098624000661>. Acesso em: 02 julho 2025.

ERCAN, S. U. Power line communication: Revolutionizing data transfer over electrical distribution networks. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 52, p. 101680, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098624000661>. Acesso em: 1 julho 2025.

FACCIONI, A. U.; TRICHEZ, L. M.; MACEDO, R. L. Análise sobre a tecnologia plc (power line communication). **Revista e-TECH: Tecnologias para Competitividade Industrial**, v. 1, n. 2, p. 54–74, 2008. Disponível em: <https://etech.sc.senai.br/revista-cientifica/article/view/48>. Acesso em: 1 julho 2025.

FAROOQ, A.; SHAHID, K.; OLSEN, R. L. Prioritization of smart meters based on data monitoring for enhanced grid resilience. **Computer Communications**, USA, v. 234, p. 108082, 2025. Acesso em: 8 janeiro 2025.

FARUQUE, S. **Phase Shift Keying (PSK)**. Cham: Springer International Publishing, 2021. 201–215 p. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57484-0_11. Acesso em: 13 julho 2025.

FERNANDEZ, J. H.; OMRI, A.; PIETRO, R. D. Power grid surveillance: Topology change detection system using power line communications. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 145, p. 108634, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522006305>. Acesso em: 13 novembro 2025.

FOWDUR, T. P.; RAGPOT, P.; SOYJAUDAH, S. K. M. **Enhanced Audio Transmission over ADSL using Prioritised DMT Modulation and Retransmissions**. 2015. 1–6 p. Acesso em: 7 janeiro 2025.

GABHANE, S. A.; BIJWE, A. D. Design & development of configurable customize plc for power line communication and control. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 3, n. 7, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.17577/IJERTV3IS071127>. Acesso em: 15 junho 2025.

GANGOSO, F.; BLANCO-VELASCO, M.; CRUZ-ROLDÁN, F. Formulation and performance analysis of broadband and narrowband ofdm-based plc systems. **Sensors**, Basel, v. 21, n. 1, p. 290, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/290>. Acesso em: 17 outubro 2025.

GHETH, W.; RABIE, K. M.; ADEBISI, B.; IJAZ, M.; HARRIS, G.; ALFITOURI, A. **Hybrid Power-Line/Wireless Communication Systems for Indoor Applications**. 2018. 1–6 p. ArXiv:1806.10013 [eess.SP]. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1806.10013>. Acesso em: 22 maio 2025.

GIRANEZA, M.; KHALED. Power line communication: a review on couplers and channel characterization. **AIMS Electronics and Electrical Engineering**, v. 6, n. 3, p. 265–284, 2022. ISSN 2578-1588. Disponível em: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/electreng.2022016>. Acesso em: 12 maio 2025.

GOMES, I.; BOT, K.; RUANO, M. G.; RUANO, A. Recent techniques used in home energy management systems: A review. **Energies**, Basel, v. 15, n. 8, p. 2866, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/8/2866>. Acesso em: 31 julho 2025.

GONZALEZ-RAMOS, J.; GALLARRETA, A.; ANGULO, I.; FERNÁNDEZ, I.; ARRINDA, A.; VEGA, D. de la. A review on the empirical characterization of the low voltage distribution grid as a communication channel for power line communications. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 36, p. 101217, 2023. Acesso em: 16 junho 2025.

GONZÁLEZ-RAMOS, J.; URIBE-PÉREZ, N.; SENDIN, A.; GIL, D.; VEGA, D. de la; FERNÁNDEZ, I.; NÚÑEZ, I. J. Upgrading the power grid functionalities with broadband power line communications: basis, applications, current trends and challenges. **Sensors**, v. 22, n. 12, p. 4348, 2022. Acesso em: 16 junho 2025.

GOTZ, M.; RAPP, M.; DOSTERT, K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 42, n. 4, p. 78–86, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1284933>. Acesso em: 4 agosto 2025.

GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G. P. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Piscataway, v. 7, n. 4, p. 529–539, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>. Acesso em: 31 julho 2025.

GUPTA, N. K. **Inside Bluetooth Low Energy**. IEEE, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9101050>. Acesso em: 31 julho 2025.

HAN, J.; CHOI, C.-s.; PARK, W.-k.; LEE, I.; KIM, S.-h. Smart home energy management system including renewable energy based on zigbee and plc. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, Piscataway, v. 60, n. 2, p. 198–202, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TCE.2014.6851994>. Acesso em: 31 julho 2025.

HANZO, L. L.; NG, S. X.; KELLER, T.; WEBB, W. **QAM Basics**. [S. l.: s. n.], 2004. 1–1 p. Acesso em: 16 julho 2025.

HAO, S.; ZHANG, H. Mac performance analysis for reliable power-line communication networks with arq scheme. **Sensors**, Basel, v. 21, n. 1, p. 196, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/196>. Acesso em: 20 dezembro 2025.

HAO, S.; ZHANG, H.; YANG, F.; LI, C.; WANG, J. A csma/ca based mac protocol for hybrid power-line/visible-light communication networks: Design and analysis. **Digital Communications and Networks**, New York, v. 10, n. 2, p. 481–497, 2024. ISSN 2352-8648. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864822001948>. Acesso em: 5 agosto 2025.

HAO, S.; ZHANG, H.; YANG, F.; LI, C.; WANG, J. A csma/ca based mac protocol for hybrid power-line/visible-light communication networks: Design and analysis. **Digital**

Communications and Networks, Amsterdam, v. 10, n. 2, p. 481–497, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864822001948>. Acesso em: 28 outubro 2025.

HAO, S.; ZHANG, H. Y. A cross-layered theoretical model of ieee 1901 power-line communication networks considering retransmission protocols. **IEEE Access**, USA, v. 9, p. 28805–28821, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059246>. Acesso em: 1 janeiro 2025.

HAQUE, K. F.; ABDELGAWAD, A.; YELAMARTHI, K. Comprehensive performance analysis of zigbee communication: an experimental approach with xbee s2c module. **Sensors**, MDPI, v. 22, n. 9, p. Art. 3245, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/9/3245>. Acesso em: 1 agosto 2025.

HARRIS, A. F.; KHANNA, V.; TUNCAY, G.; WANT, R.; KRAVETS, R. Bluetooth low energy in dense iot environments. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 54, n. 12, p. 30–36, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600546CM>. Acesso em: 16 julho 2025.

HASSAN, M.; MOUSSA, H. G.; HO, P.-H. Performance analysis of power line communication system for massive indoor iot applications. **Journal of Networking and Network Applications**, v. 3, n. 3, p. 137, 2023. Disponível em: <https://iecsience.org/public/jpapers/153>. Acesso em: 15 junho 2025.

HAZEN, M. E. The technology behind homeplug av powerline communications. **Computer**, IEEE, v. 41, n. 6, p. 90–92, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MC.2008.205>. Acesso em: 2 agosto 2025.

HEGGO, M.; SUN, S.; ZHU, X.; HUANG, Y. Tv white space regulated broadband power line communication for point-to-multipoint downlink iot networks: A standard perspective. **IEEE Internet of Things Journal**, New York, v. 6, n. 4, p. 6226–6236, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2876415>. Acesso em: 5 agosto 2025.

HERSENT, O.; BOSWARTHICK, D.; ELLOUMI, O. **ZigBee**. [S. l.: s. n.], 2012. 93–137 p. Acesso em: 1 agosto de 2025.

HMAMOU, A.; FOSHI, J.; GHZAOUI, M. E.; MESTOUI, J. Simulation of some factors influencing the transfer function of plc network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA AND INTERNET OF THINGS (BDIOT), 4., 2020, Rabat, Morocco. **Anais...** New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. p. 1–5. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3372938.3372971>. Acesso em: 22 dezembro 2025.

HOSEINZADEH, B.; BAK, C. L.; BLAABJERG, F. Impact of grid impedance variations on harmonic emission of grid-connected inverters. In: MANCHESTER POWERTECH, 2017. **Anais...** IEEE, 2017. p. 1–5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7980873>. Acesso em: 3 agosto 2025.

HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. **Broadband powerline communications network design**. Chichester: Wiley, 2005. Acesso em: 09 junho 2025.

HUANG, J.; RUAN, F.; SU, M.; YANG, X.; YAO, S.; ZHANG, J. Analysis of orthogonal frequency division multiplexing (ofdm) technology in wireless communication

process. In: **2016 10th IEEE International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)**. [S. n.], 2016. p. 122–125. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICASID.2016.7873931>. Acesso em: 16 julho 2025.

IEEE Communications Society. **IEEE Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies**. 2013. <https://standards.ieee.org/ieee/1905.1/4995/>. IEEE Std 1905.1-2013. Comitê: COM/PLC - Power Line Communications. Grupo de trabalho: CDHN - Convergent Digital Home Network. Gerente de programa: Dalisa Gonzalez. Presidente do grupo de trabalho: Purva Rajkotia. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/1905.1/4995/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications. **IEEE Std 1901-2020 (Revision of IEEE Std 1901-2010)**, New York, p. 1–1622, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9329263>. Acesso em: 5 agosto 2025.

IGARASHI, K. Adaptive equalization combined with maximum likelihood decoder for trellis code modulation based on high-order qam signals. In: **OPTO-ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS CONFERENCE AND PHOTONICS GLOBAL CONFERENCE, 2017. Anais...** IEEE, 2017. p. 1–3. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/OECC.2017.8114979>. Acesso em: 23 julho 2025.

IKPEHAI, A.; ADEBISI, B.; ANOH, K. Can 6loplc enable indoor iot? In: **IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS (ISPLC)**, 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 1–6. Acesso em: 9 janeiro 2025.

IYIOLA, A. O.; FAMILUA, A. D.; SHONGWE, T.; SWART, T. G. Impulse noise modeling in an indoor narrowband power line communication channel using m-qam and a software-defined radio approach. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY**, 6., 2020. **Anais...** [S. l.], 2020. v. 1, p. 1–6. Acesso em: 7 novembro 2025.

JAMES, N. R.; ELDHOSE, A.; KRISHNA, D. D. Plc modem for home automation over three phase powerline. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATIONS AND NETWORKING TECHNOLOGIES**, 2013. **Anais...** IEEE, 2013. p. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT.2013.6726836>. Acesso em: 31 julho 2025.

J.H.; SCHALKWYK, J. van. Determination of adsl data rates over subscriber lines using practical dmt modulation simulation. **Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers**, South Africa, v. 93, n. 1, p. 27–32, 2002. Acesso em: 8 janeiro 2025.

KARTCI, A.; SOTNER, R.; JERABEK, J.; HERENC SAR, N.; PETRZELA, J. Phase shift keying modulator design employing electronically controllable all-pass sections. **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, v. 89, n. 3, p. 781–800, 2016. Acesso em: 13 julho 2025.

KATIYAR, R.; PADMAJA, K. V. Performance analysis of time domain and frequency domain equalizer for adsl. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING (ICCSP)**, 2016. **Anais...** [S. l.], 2016. p. 0513–0516. Acesso em: 7 janeiro 2025.

KESKIN, N.; LIU, H. Practical considerations for electromagnetic interference suppression rate with spread spectrum clocking. **IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine**, New York, v. 5, n. 2, p. 57–60, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MEMC.0.7543951>. Acesso em: 5 agosto 2025.

KHALEDIAN, P.; JOHNSON, B. K.; HEMATI, S. Harmonic mitigation and a practical study of torque harmonics in induction motor startup. In: **POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING (PESGM)**, 2018. **Anais... IEEE**, 2018. p. 1–5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586670>. Acesso em: 5 agosto 2025.

KOH, M.-S. An end-to-end trainable power line communication system. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES (ICMLT)**, 8., 2023, Stockholm, Sweden. **Anais... New York, NY, USA: Association for Computing Machinery**, 2023. p. 257–263. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3589883.3589922>. Acesso em: 22 dezembro 2025.

KOLADE, O.; FAMILUA, A. D.; CHENG, L. Indoor amplify-and-forward power-line and visible light communication channel model based on a semi-hidden markov model. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, Germany, v. 124, p. 153108, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841119324823>. Acesso em: 1 janeiro 2025.

KOULOURAS, G.; KATSOULIS, S.; ZANTALIS, F. Evolution of bluetooth technology: Ble in the iot ecosystem. **Sensors**, MDPI, v. 25, n. 4, p. Art. 996, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/4/996>. Acesso em: 1 agosto 2025.

LAMPE, L.; TONELLO, A. M.; SWART, T. G. **Power line communications: principles, standards and applications from multimedia to smart grid**. Hoboken: Wiley, 2014. 624 p. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=8040159>. Acesso em: 09 junho 2025.

LANGÉVIN, M.; AURIOL, P. Load response to voltage variations and dynamic stability. **IEEE Power Engineering Review**, IEEE, PER-6, n. 11, p. 35–36, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MPER.1986.5527477>. Acesso em: 4 agosto 2025.

LATCHMAN, H. A.; KATAR, S.; YONGE, L.; GAVETTE, S. **The HomePlug AV Network Architecture**. [S. l.: s. n.], 2013. 12–17 p. Acesso em: 2 agosto 2025.

LATCHMAN, H. A.; KATAR, S.; YONGE, L.; GAVETTE, S. **HomePlug Green PHY**. [S. l.: s. n.], 2013. 302–311 p.

LAVENU, C.; CHAUVENET, C.; TREFFILETTI, P.; VARESI, M.; HUESKE, K. Standardization challenges, opportunities and recent evolutions for the g3-plc technology. **Energies**, Basel, v. 14, n. 7, p. 1937, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1937>. Acesso em: 8 novembro 2025.

LEE, J.; HSU, H.-H.; DAVULURI, P.; HO, Y.; CHEN, J. Impact of broadband and out-of-band radio frequency interference (rfi) noise on wifi performance. In: **IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY & SIGNAL/POWER INTEGRITY**, 2017. **Anais... IEEE**, 2017. p. 456–457. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2017.8077913>. Acesso em: 31 julho 2025.

LEE, J.-S.; WANG, Y.-M. Experimental evaluation of zigbee-based wireless networks in indoor environments. **Journal of Engineering**, Hindawi, v. 2013, n. 1, p. 286367, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2013/286367>. Acesso em: 1 agosto 2025.

LI, W.-J.; ZHANG, N.; LIU, Z.; WANG, J.-F.; GUO, Y.-S.; LV, D. Information fusion method of power internet of things based on low-voltage power line and micro-power wireless communication. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 89959–89969, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201514>. Acesso em: 2 dezembro 2025.

LI, X. A study of ofdm transmission channels. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND COMPUTER SCIENCE, 3., 2023. **Anais...** [S. l.]: IEEE, 2023. p. 659–665. Acesso em: 16 julho 2025.

LIN, Y.-J.; LATCHMAN, H. A.; LEE, M.; KATAR, S. A power line communication network infrastructure for the smart home. **IEEE Wireless Communications**, v. 9, n. 6, p. 104–111, 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1160088>. Acesso em: 05 julho 2025.

LOOSE, F.; GARCIA-MERÉ, J. R.; ROSANELLI, A. A.; BARRIQUELLO, C. H.; ALVÁREZ, J. A. F.; RODRÍGUEZ, J.; LAMAR, D. G. A case study on the integration of powerline communications and visible light communications from a power electronics perspective. **Sensors**, Basel, v. 24, n. 20, p. Art. 6627, 2024. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/20/6627>. Acesso em: 5 agosto 2025.

LORENZO, H. C. Eletrificação e crescimento industrial no estado de são paulo: 1880–1940. **Perspectivas: Revista de Ciências Sociais**, v. 17/18, 1994. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/108112>. Acesso em: 02 julho 2025.

LU, W.-z.; WANG, Y.-h.; XI, X.-f.; ZHANG, N. Research on powerline communication and design of plc modem. In: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING, 2010. **Anais...** [S. l.]: IEEE, 2010. p. 6823–6826. Acesso em: 13 julho 2025.

LUWEMBA, G.; KISSAKA, M. M.; MAFOLE, P. Exploring carrier sense multiple access with collision avoidance techniques for resource sharing in broadband power line communications. **Tanzania Journal of Science**, v. 48, n. 2, p. 313–323, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.4314/tjs.v48i2.8>. Acesso em: 14 maio 2025.

MARKSTEINER, S.; VALLANT, H. Towards a secure smart grid storage communications gateway. In: SMART CITY SYMPOSIUM PRAGUE, 2017. **Anais...** IEEE, 2017. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SCSP.2017.7973855>. Acesso em: 31 julho 2025.

MIAO, T.; WANG, N.; YANG, H.; YANG, D. Ber modified decode-and-forward protocol for ofdm-based linear multihop networks. **China Communications**, Beijing, v. 11, n. 11, p. 34–43, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CC.2014.7004522>. Acesso em: 23 julho 2025.

MIRABBASI, S.; MARTIN, K. Hierarchical qam: a spectrally efficient dc-free modulation scheme. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 38, n. 11, p. 140–146, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/35.883503>. Acesso em: 23 julho 2025.

MISIC, J.; MISIC, V. **Appendix A: An Overview of ZigBee**. [S. l.: s. n.], 2008. 289–299 p. Acesso em: 1 agosto de 2025.

MLÓYNEK, P.; RUSZ, M.; BENEŠL, L.; SLÁČIK, J.; MUSIL, P. Possibilities of broadband power line communications for smart home and smart building applications. **Sensors (Basel)**, MDPI, v. 21, n. 1, p. 240, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/240>. Acesso em: 2 agosto 2025.

MLÝNEK, P.; RUSZ, M.; BENEŠL, L.; SLÁČIK, J.; MUSIL, P. Possibilities of broadband power line communications for smart home and smart building applications. **Sensors**, v. 21, n. 1, p. 240, 2021. Acesso em: 13 junho 2025.

MOHAN, V.; MATHUR, A.; AISHWARYA, V.; BHARGAV, S. Secrecy analysis of plc system with channel gain and impulsive noise. In: IEEE 90TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC2019-FALL), 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 1–6. Acesso em: 22 novembro 2025.

MOVCHAN, A. K.; ROGOZHNIKOV, E. V.; DMITRIYEV, E. M.; POKAMESTOV, D. A.; PETROVSKIY, K. V. Approach to implementation full-duplex communication technology in power line communication systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG SPECIALISTS ON MICRO/NANOTECHNOLOGIES AND ELECTRON DEVICES, 2020. **Anais...** [S. l.], 2020. p. 112–117. Acesso em: 19 novembro 2025.

MUKHAMADIEV, S.; ROGOZHNIKOV, E.; DMITRIYEV, E.; POKAMESTOV, D.; KRYUKOV, Y.; NOVICHKOV, S.; LAKONTSEV, D. Method for digital cancellation of system interference in a full-duplex power line communication system. **Electronics**, Basel, v. 12, n. 10, p. 2211, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/10/2211>. Acesso em: 22 dezembro 2025.

MUSTAFA, A. M.; NASSAR, M. E.; SALAMA, M. M. A. Voltage-sag origin detection in smart grids for enhanced resiliency. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENERGY AND SMART SYSTEMS, 2024. **Anais...** IEEE, 2024. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/GESS63533.2024.10784762>. Acesso em: 4 agosto 2025.

MUTTILLO, M.; MUTTILLO, V.; POMANTE, L.; PANTOLI, L. A low cost and flexible power line communication sensory system for home automation. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 & IOT, 2020. **Anais...** [S. l.]: IEEE, 2020. p. 191–196. Acesso em: 19 outubro 2025.

NORAZMAN, S. H.; DONG, C. Z. Development of power line communication for dc ceiling fan control. In: IEEE SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS & APPLICATIONS (ISIEA), 2025. **Anais...** [S. l.], 2025. p. 1–5. Acesso em: 28 novembro 2025.

NölLE, M.; MOLLE, L.; GROSS, D.-D.; FREUND, R. Transmission of 5×62 gbit/s dwdm coherent ofdm with a spectral efficiency of 7.2 bit/s/hz using joint 64-qam and 16-qam modulation. In: CONFERENCE ON OPTICAL FIBER COMMUNICATION AND NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE, 2010. **Anais...** [S. l.]: IEEE, 2010. p. 1–3. Acesso em: 23 julho 2025.

ORGON, M.; STEFANICKA, M.; SCHMIDT, I.; ZOLOTOVA, I.; CUPKOVA, D. Testing home plc network in multi-storey house. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ULTRA MODERN TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS AND WORKSHOPS, 11., 2019. **Anais...** [S. l.], 2019. p. 1–6. Acesso em: 28 outubro 2025.

- PANCHAM, J.; MILLHAM, R.; FONG, S. J. Analysis of bluetooth low energy detection range improvements for indoor environments. In: COMPUTATIONAL SCIENCE – ICCS, 2018. **Anais...** Springer International Publishing, 2018. p. 598–609. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93713-7_56. Acesso em: 1 agosto 2025.
- PATEL, K.; KHOSLA, A. Home energy management systems in future smart grid networks: A systematic review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEXT GENERATION COMPUTING TECHNOLOGIES, 1., 2015. **Anais...** IEEE, 2015. p. 479–483. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/NGCT.2015.7375165>. Acesso em: 31 julho 2025.
- PAUL, S. P.; VETRITHANGAM, D. A thorough assessment on orthogonal frequency division multiplexing (ofdm) based wireless communication: Challenges and interpretation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE COMPUTING AND SMART SYSTEMS, 2023. **Anais...** [S. l.]: IEEE, 2023. p. 1145–1151. Acesso em: 16 julho 2025.
- PAVLIDOU, N.; VINCK, A. J. H.; YAZDANI, J.; HONARY, B. Power line communications: state of the art and future trends. **IEEE Communications Magazine**, v. 41, n. 4, p. 34–40, 2003. Acesso em: 13 maio 2025.
- PINOMAA, A.; AHOLA, J.; KOSONEN, A.; NUUTINEN, P. Homeplug green phy for the lvdcc plc concept: Applicability study. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 2015. **Anais...** IEEE, 2015. p. 205–210. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2015.7147615>. Acesso em: 2 agosto 2025.
- PINTO-BENEL, F. A.; CRUZ-ROLDÁN, F. A bandpass wavelet ofdm system for power line communications. **Journal of the Franklin Institute**, Oxford, v. 357, n. 11, p. 7211–7228, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003220302118>. Acesso em: 10 novembro 2025.
- POTISK, L.; HALLON, J.; ORGON, M.; FUJDIK, R. Electromagnetic compatibility of plc adapters for in-home/domestic networks. **Journal of Electrical Engineering**, v. 69, n. 1, p. 79–84, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/jee-2018-0011>. Acesso em: 05 julho 2025.
- PRATIWI, A. F.; PURWIYANTO; AJI, G. M.; CHAIRUNNISA; MUNIR, A. Fsk modulation for electronic information board radio communication of tsunami early warning system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND SMART DEVICES, 2018. **Anais...** IEEE, 2018. p. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISESD.2018.8605479>. Acesso em: 05 julho 2025.
- PROAKIS, J. G. **Digital Communications**. McGraw-Hill, 2001. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=sbr8QwAACAAJ>. Acesso em: 01 jul. 2025.
- QARAGOEZ, Y.; POLLIN, S.; SCHREURS, D. Biased-fsk modulation for simultaneous wireless information and power transfer. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 72, n. 12, p. 7071–7084, 2024. Acesso em: 05 julho 2025.
- RAHMAN, M. M.; HONG, C. S.; LEE, S.; LEE, J.; RAZZAQUE, M. A.; KIM, J. H. Medium access control for power line communications: an overview of the ieee 1901 and itu-t g.hn standards. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 49, n. 6, p. 183–191, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5784004>. Acesso em: 2 agosto 2025.

RENSBURG, P. A. J. van; ALAHAKOON, S.; AGHAEI, J.; WATKINS, B. P.; SIBANDA, M. P.; BUI, L. A.; EMAMI, K.; DAS, N.; SILVA, S. de. A tutorial on modem coupling circuits for low-voltage power-line communications: Operating principles, trade-offs, design, and safety. **IEEE Access**, v. 12, p. 159176–159201, 2024. Acesso em: 13 julho 2025.

RIVAS, A. E. L.; ABRÃO, T. Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 189, p. 106602, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620304065>. Acesso em: 14 novembro 2025.

SAIDALA, R. K.; V, H. V.; PADMAPRIYA, G.; S, J.; PRIYA, V. K.; SHAIKH, A. A. Interoperability and standardization in the internet of things. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE TECHNOLOGY ENGINEERING AND MATHEMATICS, 9., 2024. **Anais... IEEE**, 2024, p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICONSTEM60960.2024.10568856>. Acesso em: 31 julho 2025.

SALEHI, M. Retracted: High-speed fsk modulator using switched-capacitor resonators. **International Journal of Circuit Theory and Applications**, v. 44, n. 3, p. 780–780, 2015. Acesso em: 07 julho 2025.

SALONI, S.; HEGDE, A. Wifi-aware as a connectivity solution for iot pairing iot with wifi aware technology: Enabling new proximity based services. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNET OF THINGS AND APPLICATIONS, 2016. **Anais... [S. l.]: IEEE**, 2016, p. 137–142. Acesso em: 31 julho 2025.

SANTOS, A. D. dos; BACURAU, R. M.; MARTINS, A. V.; DANTE, A.; FERREIRA, E. C. Simple and low-cost plc modem for iot applications. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, n. 12, p. 2455–2462, 2022. Acesso em: 13 maio 2025.

SAYED, W. E.; CROVETTI, P.; MOONEN, N.; LEZYNSKI, P.; SMOLENSKI, R.; LEFERINK, F. Electromagnetic interference of spread-spectrum modulated power converters in g3-plc power line communication systems. **IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications**, New York, v. 3, n. 4, p. 118–122, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2021.3121091>. Acesso em: 5 agosto 2025.

SCHNEIDERMAN, R. **Bluetooth and ZigBee—Fast-Paced Standards Development Boosts Growth**. [S. l.: s. n.], 2015. 56–78 p. Acesso em: 1 agosto 2025.

SENDIN, A.; ARZUAGA, T.; URRUTIA, I.; BERGANZA, I.; FERNANDEZ, A.; MARRON, L.; LLANO, A.; ARZUAGA, A. Adaptation of powerline communications-based smart metering deployments to the requirements of smart grids. **Energies**, Switzerland, v. 8, n. 12, p. 13481–13507, 2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/12/12372>. Acesso em: 9 janeiro 2025.

SLACIK, J.; MLYNEK, P.; RUSZ, M.; MUSIL, P.; BENESL, L.; PTACEK, M. Broadband power line communication for integration of energy sensors within a smart city ecosystem. **Sensors**, v. 21, n. 10, p. 3402, 2021. Acesso em: 15 junho 2025.

SON, Y.-S.; PULKKINEN, T.; MOON, K.-D.; KIM, C. Home energy management system based on power line communication. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 56, n. 3, p. 1380–1386, 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5606273>. Acesso em: 05 julho 2025.

SOUSA, M. C. de; CANTARINO, W. M.; COSTA, L. G. da S.; CURTY, T. A.; FONSECA, D. A. B.; VÍTOR, U. R. C.; SEGATTO, M. E. V. Characterizing mimo channels in low-voltage electric power line communication through impedance and scattering parameters analysis. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 23, n. 2, 2024. Acesso em: 15 junho 2025.

STOLOJESCU-CRISAN, C.; CRISAN, C.; BUTUNOI, B.-P. An iot-based smart home automation system. **Sensors**, v. 21, n. 11, p. 3784, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3784>. Acesso em: 16 julho 2025.

SURE, P.; BHUMA, C. M. A survey on ofdm channel estimation techniques based on denoising strategies. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 20, n. 2, p. 629–636, 2017. ISSN 2215-0986. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616304542>. Acesso em: 16 jul. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616304542>.

TADIVAKA, T.; SRIKANTH, M.; MUNI, T. V. Thd reduction and voltage flicker mitigation in power system base on statcom. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION COMMUNICATION AND EMBEDDED SYSTEMS (ICICES), 2014. **Anais... IEEE**, 2014. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICICES.2014.7034161>. Acesso em: 5 agosto 2025.

TAKEMURA, S.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. An emtp simulation of plc receiver based on ofdm. In: 48TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES' POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC), 2013. **Anais... [S. l.]**: IEEE, 2013. p. 1–6. Acesso em: 13 julho 2025.

TAN, B.; CHEN, Q.; CHETTY, K.; WOODBRIDGE, K.; LI, W.; PIECHOCKI, R. Exploiting wifi channel state information for residential healthcare informatics. **IEEE Communications Magazine**, Piscataway, v. 56, n. 5, p. 130–137, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700064>. Acesso em: 31 julho 2025.

TAN, B.; CHEN, Q.; CHETTY, K.; WOODBRIDGE, K.; LI, W.; PIECHOCKI, R. Exploiting wifi channel state information for residential healthcare informatics. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 5, p. 130–137, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700064>. Acesso em: 16 julho 2025.

TOSI, J.; TAFFONI, F.; SANTACATTERINA, M.; SANNINO, R.; FORMICA, D. Performance evaluation of bluetooth low energy: a systematic review. **Sensors**, MDPI, v. 17, n. 12, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2898>. Acesso em: 1 agosto 2025.

VALLEJO-BALDEÓN, M. A.; RODRÍGUEZ, D. N.; LARA-CUEVA, R. A. Performance evaluation of wireless network in conformance with iee 802.11n in co-channel interference scenarios. In: IEEE COLOMBIAN CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND COMPUTING, 2017. **Anais... IEEE**, 2017. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2017.8088188>. Acesso em: 31 julho 2025.

VAN, H. T.; VAN, Q.-N.; LE, D. H.; VAN, H.-P.; JALOWICZOR, J.; NGUYEN, H.-S.; VOZNAK, M. Opportunistic df-af selection relaying in hybrid wireless and power line communication for indoor iot networks. **Sensors**, Basel, v. 21, n. 16, p. 5469, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5469>. Acesso em: 20 dezembro 2025.

VARANASI, L. N. S.; JONNALAGADDA, A. R.; KARRI, S. P. K. Smart edge device utilizing power line communication for energy management and control of electrical appliances. **IEEE Access**, USA, v. 12, p. 37207–37218, 2024. Acesso em: 9 janeiro 2025.

VARANASI, L. N. S.; KARRI, S. P. K. An edge device for monitor and control of electrical appliances using smart power line communication. In: IEEE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY AND FUTURE ELECTRIC TRANSPORTATION (SEFET), 2022. **Anais...** [S. l.], 2022. p. 1–4. Acesso em: 9 janeiro 2025.

VISAN, D. A.; LITA, A. I. Remote control system based on power line communication. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR DESIGN AND TECHNOLOGY IN ELECTRONIC PACKAGING, 27., 2021. **Anais...** [S. l.], 2021. p. 301–304. Acesso em: 28 outubro 2025.

WANG, C.; SOHRABY, K.; JANA, R.; JI, L.; DANESHMAND, M. Voice communications over zigbee networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 46, n. 1, p. 121–127, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4427240>. Acesso em: 16 julho 2025.

WANG, C.-H.; CHEN, C.-Y.; SUN, T.-P. Circuit implementation of ook modulation for low-speed power line communication@articleperfo_me_compa_iterCinze₁706,AUTHOR = Chung,YoungMo,TITLE = PerformanceComparisonsofBroadbandPowerLineCommunicationTechnologies,JOURNAL = AppliedSciences,VOLUME = 10,YEAR = 2020,NUMBER = 9,ARTICLE – NUMBER = 3306,URL = <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3306>,ISSN = 2076-3417,DOI = 10.3390/app10093306usingx10standard.In : **13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2011)**. [S. l. : s. n.], 2011.p.248 – –453.Acessoem : 13maio2025.

WANG, S.; YIN, Z.; KIM, S. M.; HE, T. **Achieving Spectrum Efficient Communication Under Cross-Technology Interference**. 2017. ArXiv:1706.09922. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1706.09922>. Acesso em: 02 julho 2025.

WANG, W.; XU, Y.; KHANNA, M. A survey on the communication architectures in smart grid. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 55, n. 15, p. 3604–3629, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138912861100260X>. Acesso em: 31 julho 2025.

WANNINAYAKE, W. M. S. G.; KUMARASIRI, B. U.; DHARMAWEERA, M. N.; PILANAWITHANA, B. Development of a cost-effective half-duplex power line communication system for low bandwidth home automation applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 3., 2021. **Anais...** IEEE, 2021. p. 62–68. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EECon52960.2021.9580877>. Acesso em: 19 outubro 2025.

WEI, Z.; YIBING, S.; JINGYUAN, T. Application of an improved adsl technique in the high-speed wireline logging telemetry system. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS, 2007. **Anais...** [S. l.], 2007. p. 2–108–2–112. Acesso em: 7 janeiro 2025.

WHEELER, A. Commercial applications of wireless sensor networks using zigbee. **IEEE Communications Magazine**, v. 45, n. 4, p. 70–77, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2007.343615>. Acesso em: 16 julho 2025.

WU, M.-Y.; WU, S.-H.; CHANG, Y.-E.; LIN, Y.-H.; HUANG, S.-J.; TSENG, H.-T. Intrusion detection with radio frequency sensing based on wi-fi mesh network for home security. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS – TAIWAN, 2023. **Anais... IEEE**, 2023. p. 329–330. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan58799.2023.10226838>. Acesso em: 31 julho 2025.

XIE, H.; ANDRIEUX, G.; WANG, Y.; DIOURIS, J.-F.; FENG, S. Efficient time domain threshold for sparse channel estimation in ofdm system. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, v. 68, n. 4, p. 277–281, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841113002562>. Acesso em: 16 julho 2025.

YAACOUB, J. P. A.; FERNANDEZ, J. H.; NOURA, H. N.; CHEHAB, A. Security of power line communication systems: Issues, limitations and existing solutions. **Computer Science Review**, Amsterdam, v. 39, p. 100331, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013720304317>. Acesso em: 31 julho 2025.

YAMAMOTO, H. Advanced 16-qam techniques for digital microwave radio. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 19, n. 3, p. 36–45, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.1981.1090514>. Acesso em: 23 julho 2025.

YENER, S. Ç.; MUTLU, R. Ac chopper harmonic magnitudes in narrowband power line communication frequencies. In: INTERNATIONAL ISTANBUL SMART GRIDS AND CITIES CONGRESS AND FAIR (ICSG), 2019. **Anais... [S. l.]**, 2019. p. 213–217. Acesso em: 2 dezembro 2025.

YONGE, L. *et al.* An overview of the homeplug av2 technology. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 2013, p. 892628, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2013/892628>. Acesso em: 1 jul. 2025.

YU, L.; LIU, Q.; WU, D.; YAN, Q.; YAN, G.; WU, Y. Security transmission in mimo ubiquitous power internet of things systems. **IEEE Access**, USA, v. 9, p. 121006–121014, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109001>. Acesso em: 1 janeiro 2025.

ZHANG, H.; LI, M.; YANG, M.; ZHOU, C. Dual mode data acquisition and analysis based on deep learning for smart home networks. **IEEE Internet of Things Journal**, New York, v. 11, n. 5, p. 8052–8063, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3317416>. Acesso em: 28 outubro 2025.

ZHANG, H.; YAO, W.; XU, Z.; HU, X. Efficient large-scale iot network: Integrating asynchronous communication and huffman coding in lora/plc systems. In: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING (IWCMC), 2025. **Anais... [S. l.]**, 2025. p. 606–611. Acesso em: 5 dezembro 2025.

ZHANG, L.; YUE, Y.; LI, P.; LIU, D.; REN, H. A relay optimization method for noma-based power line communication systems. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 4, p. 2246, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/2246>. Acesso em: 21 dezembro 2025.

ZHAO, X.; ZHANG, H.; LU, W.; LI, L. Approach for modelling of broadband low-voltage plc channels using graph theory. **IET Communications**, v. 12, n. 13, p. 1524–1530, 2018. Acesso em: 14 junho 2025.

ZHENG, Y.; XU, Y.; FU, Y. Wifi and passive iot symbiotic communication system architecture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION TECHNOLOGY, 24., 2024. **Anais... IEEE**, 2024. p. 355–359. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCT62411.2024.10946308>. Acesso em: 31 julho 2025.

ZYREN, B. J. The homeplug green phy specification & the in-home smart grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS, 2011. **Anais... IEEE**, 2011. p. 241–242. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCE.2011.5722562>. Acesso em: 3 agosto 2025.