



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO  
Campus Garanhuns  
Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

KENNETH YAN SANTANA OLIVEIRA

**POWER LINE COMMUNICATION EM REDES ELÉTRICAS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO:  
UMA COMPARAÇÃO COM OUTRAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL**

Garanhuns

2025

KENNETH YAN SANTANA OLIVEIRA

**POWER LINE COMMUNICATION EM REDES ELÉTRICAS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO:  
UMA COMPARAÇÃO COM OUTRAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, campus Garanhuns, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Esp. Manoel Alves Cordeiro Neto.

Garanhuns - PE

2025

O48p

Oliveira, Kenneth Yan Santana

Power line communication em redes elétricas de média e alta tensão: uma comparação com outras tecnologias de comunicação digital / Kenneth Yan Santana Oliveira ; orientador Manoel Alves Cordeiro Neto, 2025.

61f. : il.

Orientador: Manoel Alves Cordeiro Neto.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Energia elétrica - Brasil. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Energia elétrica - distribuição. 4. Redes elétricas - Inovações tecnológicas. I. Título. II. Cordeiro Neto, Manoel Alves (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 621.310981

Louise Machado Freire Dias –CRB4/2267

KENNETH YAN SANTANA OLIVEIRA

**POWER LINE COMMUNICATION EM REDES ELÉTRICAS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO:  
UMA COMPARAÇÃO COM OUTRAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, campus Garanhuns, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Esp. Manoel Alves Cordeiro Neto.

Trabalho aprovado. Local, data.

---

Professor Orientador

---

Convidado 1

---

Convidado 2

Garanhuns - PE

2025

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Esp. Manoel Alves Cordeiro Neto, pela dedicação, paciência e orientação indispensáveis ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e incentivo foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Expresso minha gratidão ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), campus Garanhuns, pela estrutura acadêmica e apoio institucional que tornaram possíveis a minha chegada ao final da graduação e a execução deste projeto. Aos professores e colegas do curso de Engenharia Elétrica, meu reconhecimento pelo aprendizado compartilhado.

À minha mãe, Aline, dedico um agradecimento especial por seu apoio incondicional, amor e motivação, que me impulsionaram a superar os desafios desta jornada acadêmica.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

*“De todas as coisas, eu gostava mais de livros.”*

- Nikola Tesla

## RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade da tecnologia Power Line Communication (PLC) para comunicação de dados em redes elétricas de média e alta tensão, com foco em sua aplicação no Brasil. O objetivo foi comparar o desempenho do PLC com tecnologias como fibra óptica, par trançado e par metálico, analisando critérios como taxa de erro de bit (BER), latência, largura de banda e custo-benefício. A metodologia envolveu simulações computacionais no MATLAB/Simulink, utilizando modulação BPSK, codificação convolucional com decodificação Viterbi e canais AWGN e SISO Fading (Rayleigh e Rician) para modelar condições realistas. Os resultados mostram que o PLC alcançou BER nulo com FEC, taxa de transmissão de 0,01 Mbps (devido ao tempo de amostragem padronizado de 0,0001 s) e largura de banda de 988 Hz, com latência de 11 ms. Apesar de robustez de sinal intermediária e largura de banda inferior ao par trançado (1867,7 Hz), o PLC destaca-se pelo alto custo-benefício, aproveitando a infraestrutura elétrica existente. Comparado à fibra óptica, apresenta latência similar (11 ms), sendo competitivo para aplicações como redes inteligentes e automação. Conclui-se que o PLC é uma alternativa promissora para inclusão digital no Brasil, desde que se invista em mitigação de interferências. Sugere-se explorar modulações QPSK e OFDM e modelagens mais detalhadas da fibra óptica em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Power Line Communication. Redes Elétricas. Comunicação Digital.

## ABSTRACT

This study assesses the feasibility of Power Line Communication (PLC) technology for data communication in medium and high-voltage electrical networks, focusing on its application in Brazil. The objective was to compare PLC performance with technologies such as optical fiber, twisted pair, and metallic pair, analyzing criteria like bit error rate (BER), latency, bandwidth, and cost-effectiveness. The methodology involved computational simulations in MATLAB/Simulink, using BPSK modulation, convolutional coding with Viterbi decoding, and AWGN and SISO Fading (Rayleigh and Rician) channels to model realistic conditions. Results indicate that PLC achieved a zero BER with FEC, a transmission rate of 0.01 Mbps (due to a standardized sample time of 0.0001 s), and a bandwidth of 988 Hz, with a latency of 11 ms. Despite intermediate signal robustness and lower bandwidth than twisted pair (1867.7 Hz), PLC stands out for its high cost-effectiveness by leveraging existing electrical infrastructure. Compared to optical fiber, it shows similar latency (11 ms), proving competitive for applications like smart grids and automation. The study concludes that PLC is a promising alternative for digital inclusion in Brazil, provided investments are made in interference mitigation. Future work should explore QPSK and OFDM modulations and more detailed optical fiber modeling.

Keywords: Power Line Communication. Electrical Networks. Digital Communication.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da transmissão de sinal PLC .....	19
Figura 2 - Sinal modulado em PSK .....	21
Figura 3 - Diagrama de blocos do processo de modulação .....	21
Figura 4 – Diagrama de blocos do processo de demodulação .....	22
Figura 5 – Sinal modulado em FSK .....	22
Figura 6 – Diagrama de blocos do processo de modulação .....	23
Figura 7 – Diagrama de blocos do processo de demodulação .....	24
Figura 8 - Sinal modulado em QAM (diagrama de constelação) .....	25
Figura 9 - Sinal modulado em QAM (diagrama temporal) .....	25
Figura 10 - Diagrama de blocos da modulação QAM .....	26
Figura 11 - Esquema da técnica OFDM .....	27
Figura 12 - Arquivos criados .....	34
Figura 13 - Modelo do PLC .....	36
Figura 14 - Modelo da fibra óptica .....	37
Figura 15 - Modelo do par trançado .....	38
Figura 16 - Modelo do par metálico .....	39
Figura 17 – Comparação das larguras de banda .....	43
Figura 18 - Sinal de saída do PLC .....	44
Figura 19 - Sinal de saída do par trançado .....	44
Figura 20 - Sinal de saída do par metálico .....	45
Figura 21 - Sinal de saída da fibra óptica .....	45

## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1 - Taxas de Transmissão típicas por tecnologia.....</b>	<b>15</b>
<b>Quadro 2 - Avaliação do desempenho do PLC frente a outras tecnologias.....</b>	<b>41</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	Ruído Gaussiano Branco Aditivo (Additive White Gaussian Noise)
BER	Taxa de Erro de Bits (Bit Error Rate)
BPSK	Modulação por Deslocamento de Fase Binária (Binary Phase Shift Keying)
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CSMA/CD	Acesso Múltiplo com Escuta de Portadora e Detecção de Colisão (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)
FDM	Multiplexação por Divisão de Frequência (Frequency Division Multiplexing)
FEC	Correção de Erro Direta (Forward Error Correction)
FSK	Modulação por Deslocamento de Frequência (Frequency Shift Keying)
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
LAN	Rede Local (Local Area Network)
MAN	Rede Metropolitana (Metropolitan Area Network)
OFDM	Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PAN	Rede de Área Pessoal (Personal Area Network)
PLC	Comunicação por Linha de Energia (Power Line Communication)
PSK	Modulação por Deslocamento de Fase (Phase Shift Keying)
QAM	Modulação por Amplitude em Quadratura (Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	Qualidade de Serviço (Quality of Service)
SISO	Sistema de Entrada Única e Saída Única (Single Input Single Output)
WAN	Rede de Longa Distância (Wide Area Network)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	11
1.1 Cenário atual do PLC no Brasil	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Estrutura do trabalho	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	16
2.1 Princípio de funcionamento do PLC	16
2.1.1 Modulação por Deslocamento de Fase (PSK)	17
2.1.2 Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK)	19
2.1.3 Modulação por Quadratura de Amplitude (QAM)	21
2.2 Técnicas de transmissão de sinal	23
2.2.1 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	23
2.2.2 Modulação adaptativa	24
2.3 Códigos de correção de erro (FEC)	25
2.4 Critérios de Avaliação de Desempenho	26
<b>3 METODOLOGIA</b>	29
3.1 Escolha do <i>software</i> simulador	29
3.2 Comparação com outras tecnologias	30
3.3 Modelagem do sistema PLC e outras tecnologias	31
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	38
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	43
<b>REFERÊNCIAS</b>	45
<b>APÊNDICE A – Descrição da modelagem do sistema PLC</b>	47
<b>APÊNDICE B – Descrição da modelagem do par metálico</b>	51
<b>APÊNDICE C – Descrição da modelagem do par trançado</b>	54
<b>APÊNDICE D – Descrição da modelagem da fibra óptica</b>	58

## 1 INTRODUÇÃO

O *Power Line Communication* (PLC) é uma tecnologia de transmissão de dados e sinais de telecomunicações via rede elétrica, que tem por finalidade transportar dados de um ponto a outro, e possui diversas aplicabilidades, dentre elas telefonia IP, serviços de monitoração e vigilância, automação residencial, telemedição, entre outras. Apesar de se utilizar dos mesmos condutores para transmitir energia elétrica, não há interferência entre o sinal de energia elétrica e sinal de telecomunicação, pois, a frequência de operação da rede elétrica é de 50 Hz ou 60 Hz, e a frequência de operação da transmissão de dados varia entre 1 MHz e 30 MHz.

O conceito de tal tecnologia não é novo, tendo em vista que os primeiros registros de sua utilização datam de 1838, segundo Faccioni et. al. (2008). Ainda, segundo Faccioni et. al. (2008), no início do século XX a tecnologia era conhecida como Power Line Carrier, e era muito utilizada em subestações de alta tensão, na faixa de 69 kV a 500 kV, com a finalidade de comunicação de voz e dados entre as subestações, e a velocidade era baixa, não ultrapassando 9,6 Kbps, e com operação na faixa de frequência de 30 kHz a 400 kHz.

Segundo Ronie Weslei Muller (2016), ao longo do tempo a utilização se deu de forma limitada, devido à falta de ferramentas que pudessem contornar fenômenos como o efeito da impedância, ruídos harmônicos e atenuação, que ocorrem nas linhas de transmissão de energia elétrica.

Ao longo da década de 1980, o PLC passou a operar com velocidade de 144 Kbps, e numa faixa de frequência de 500 kHz. E com o avanço da tecnologia de processamento digital de sinais (DPS) e o surgimento dos microcontroladores, foi possível contornar os fenômenos ocorrentes nas linhas de transmissão de energia. Segundo Faccioni et al. (2008), na década de 1990, o PLC teve um salto significativo, passando a operar numa velocidade de 10 Mbps. No início dos anos 2000, obteve-se mais um avanço, com uma velocidade de 45 Mbps e uma frequência de 30 MHz, e, atualmente, a velocidade do PLC chega a 224 Mbps.

Atualmente, o Power Line Communication possui aplicações limitadas devido aos desafios de implementação nas redes de transmissão e distribuição, sendo mais comum em aplicações como automação residencial e domótica, redes locais (LANs), e sistemas implantados em subestações, geralmente na forma de Power Line Carrier. Trata-se, portanto, de aplicações em que o PLC é utilizado principalmente em curtas

distâncias — tipicamente de alguns metros a poucos quilômetros — sendo que, para alcançar distâncias maiores, como entre subestações, é necessário o uso de infraestrutura complementar, como enlaces ópticos, para viabilizar a comunicação.

Segundo Zattar e Freitas (2015), o PLC é uma tecnologia de baixo custo, uma vez que aproveita a infraestrutura já existente das redes elétricas de transmissão e distribuição. Ainda que não alcance as velocidades de tecnologias como fibra óptica ou redes móveis 5G, o PLC pode operar com taxas de transmissão suficientemente elevadas para diversas aplicações práticas, como acesso à internet em áreas remotas, automação e controle de sistemas elétricos. Dessa forma, torna-se uma alternativa viável em cenários onde a instalação de novas infraestruturas de comunicação seja economicamente inviável ou tecnicamente desafiadora.

Como mostrado no quadro 1, embora o PLC não atinja as taxas de transmissão das tecnologias de ponta, como a fibra óptica ou o 5G, apresenta desempenho suficiente para aplicações em redes elétricas, automação e até mesmo fornecimento de internet em áreas de difícil acesso, com a vantagem do aproveitamento da infraestrutura existente.

**Quadro 1** – Taxas de Transmissão típicas por tecnologia.

Tecnologia	Taxa de Transmissão típica (Mbps) <sup>1</sup>
Power Line Communication (PLC)	2 a 200
Par Trançado (Ethernet)	10/100/1000
Par Metálico (ADSL/VDSL)	1 a 100
Fibra Óptica	Até 10000 (comuns: 1000)
4G LTE	10 a 100 (máx. teórico: 300)
5G NR	100 a 100000

**Fonte:** Adaptado de Tanenbaum e Wetherall (2011) e Stallings (2014).

## 1.1 Cenário atual do PLC no Brasil

No cenário brasileiro, o PLC passou a ser explorado em meados dos anos 2000, com diversos testes e estudos sendo realizados por empresas de telecomunicações e concessionárias de energia visando analisar a viabilidade e a eficiência da tecnologia no país. Segundo Marco Martins (2009), a Companhia Paranaense de Energia (Copel) conduziu testes significativos em Santo Antônio da Platina, Paraná, onde foi observada a viabilidade técnica da tecnologia, alcançando uma velocidade de 10 Mbps. Segundo a COPEL (2010), as empresas de energia têm

<sup>1</sup> Essas taxas são valores típicos na literatura. As simulações deste trabalho, devido ao tempo de amostragem padronizado (0,0001 s), alcançaram 0,01 Mbps para todas as tecnologias, como detalhado no Capítulo 4.

agora a oportunidade de aproveitamento de sua rede instalada para prover comunicação de alta velocidade. Além dos testes da COPEL, estudos como o de Souza et al. (2016) demonstram a viabilidade do PLC com OFDM para inclusão digital na Amazônia, aproveitando a capilaridade das redes elétricas.

Até meados de 2022, o Brasil não possuía uma regulamentação atualizada e consolidada sobre o uso da tecnologia PLC. As resoluções conjuntas anteriores da ANEEL e ANATEL, publicadas em 2009, foram revogadas com a publicação da Resolução Normativa nº 1044/2022 da ANEEL, que regulamenta o compartilhamento da infraestrutura das redes elétricas para a instalação de equipamentos de terceiros e o transporte de sinais de comunicação via rede elétrica. Essa resolução facilita o uso do PLC ao permitir o compartilhamento de infraestrutura elétrica, incentivando concessionárias a explorar a tecnologia para serviços como telemetria e acesso à internet em áreas remotas.

Os estudos nacionais sobre PLC ainda são limitados, com a maior parte da literatura composta por publicações estrangeiras. No entanto, trabalhos recentes, como o de Campos (2021), investigam o uso do PLC em sistemas elétricos de potência no Brasil, destacando sua aplicabilidade em redes de distribuição. Embora existam alguns trabalhos no contexto de redes de baixa tensão e aplicações como telemetria e redes híbridas, observa-se uma escassez de pesquisas focadas na utilização do PLC em redes elétricas brasileiras de média e alta tensão. Segundo Picorone e Ribeiro (2014), os países emergentes, como o Brasil, carecem de infraestrutura de telecomunicações ampla e diversificada de tecnologias de comunicações para atender às suas demandas, que diferem das observadas em países desenvolvidos.

O presente trabalho busca contribuir para os avanços da utilização do Power Line Communication (PLC) nas redes elétricas brasileiras, por meio de uma análise comparativa entre essa tecnologia e outras alternativas de comunicação digital. Para isso, são realizadas simulações computacionais que avaliam o desempenho do PLC em diferentes canais de comunicação, visando fomentar novos estudos e soluções práticas diante do crescimento da demanda por serviços de telecomunicações no Brasil.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar o desempenho da tecnologia Power Line Communication (PLC) em redes elétricas de média e alta tensão, por meio de simulações computacionais, comparando-a com outras tecnologias de comunicação digital aplicadas a sistemas elétricos, com o intuito de identificar suas potencialidades, limitações e perspectivas de uso no contexto brasileiro.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- Estudar os fundamentos da tecnologia Power Line Communication (PLC) e seu funcionamento em redes elétricas;
- Modelar sistemas de comunicação digital baseados em PLC e em outras tecnologias (fibra óptica, par metálico, par trançado) utilizando o software MATLAB/Simulink;
- Simular a transmissão de dados nos diferentes modelos, considerando os parâmetros técnicos relevantes (BER, latência, robustez, etc.);
- Analisar e comparar o desempenho das tecnologias simuladas, destacando suas vantagens, limitações e aplicabilidades no contexto das redes elétricas brasileiras.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O trabalho segue a seguinte sequência de organização:

- Capítulo 1: Apresentação do histórico, contexto atual e conceitos básicos da tecnologia PLC, bem como a apresentação dos objetivos gerais e específicos do trabalho.
- Capítulo 2: Fundamentação teórica do princípio de funcionamento do PLC, técnicas de modulação, técnicas de transmissão de sinal, redes de computadores, sistema elétrico de transmissão e sistema elétrico de distribuição.
- Capítulo 3: Apresentação da metodologia considerada para estudar o PLC em longas distâncias.
- Capítulo 4: Análise dos resultados obtidos quanto à efetividade e desempenho do PLC em longas distâncias.

- Capítulo 5: Considerações finais do trabalho e apresentação dos principais resultados e perspectivas de trabalhos futuros.

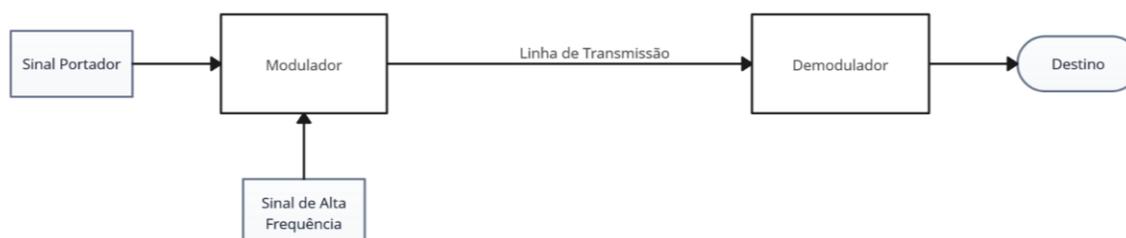
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Princípio de funcionamento do PLC

A tecnologia Power Line Communication (PLC) permite a transmissão de dados digitais utilizando a infraestrutura da rede elétrica convencional. Isso é possível devido à separação espectral entre a energia elétrica — transmitida em baixas frequências (50/60 Hz) — e os sinais de dados, que operam em frequências mais elevadas, geralmente entre 1,7 MHz e 86 MHz (HAYKIN, 2001).

O processo inicia-se com a modulação de dados digitais — como medições, comandos ou pacotes de rede — em sinais analógicos, que são então acoplados à rede elétrica por meio de dispositivos apropriados. No destino, os sinais são desmodulados e os dados recuperados. O acoplamento é feito de forma a evitar interferências com a energia elétrica propriamente dita, permitindo que ambos coexistam no mesmo condutor (COPEL, 2010). Este processo encontra-se esquematizado na figura 1.

**Figura 1** - Fluxograma da transmissão de sinal PLC.



**Fonte:** autoria própria.

Como destaca o relatório técnico da Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2010), essa coexistência é viável devido às diferenças nas características físicas dos sinais: "Assim como em um duto é possível transportar simultaneamente água e óleo, na rede elétrica podem ser transmitidos sinais de dados e energia elétrica sem interferência entre eles, desde que cada um opere em seu próprio domínio de frequência.". Mais recentemente, Rossi (2016) destaca que avanços em DSPs permitem taxas de até 224 Mbps, ampliando as aplicações do PLC.

Diversas técnicas de modulação podem ser utilizadas para a transmissão dos sinais. Historicamente, as modulações analógicas — como amplitude (AM),

frequência (FM) e fase (PM) — foram amplamente empregadas em sistemas legados. No entanto, em redes PLC modernas, sua aplicação é limitada devido à baixa eficiência espectral e vulnerabilidade a ruídos. Por isso, as técnicas de modulação digital, como Phase Shift Keying (PSK), Frequency Shift Keying (FSK) e Quadrature Amplitude Modulation (QAM), são preferidas por sua robustez e maior taxa de transmissão (PROAKIS; SALEHI, 2007).

A modulação é, portanto, um processo essencial para viabilizar a comunicação em longas distâncias, reduzir interferências, garantir segurança e compatibilidade eletromagnética. De acordo com Haykin (2001), o transmissor modifica o sinal de informação para uma forma adequada à transmissão, enquanto o receptor realiza o processo inverso para recuperar os dados originais.

### 2.1.1 Modulação por Deslocamento de Fase (PSK)

A modulação por deslocamento de fase (Phase Shift Keying – PSK) é uma técnica digital que codifica informações por meio da variação da fase de uma portadora senoidal, mantendo sua amplitude e frequência constantes. Essa técnica apresenta alta eficiência espectral e robustez contra ruídos, sendo largamente utilizada em sistemas Power Line Communication (PLC), onde há grande incidência de ruídos impulsivos e interferências eletromagnéticas.

A forma geral do sinal modulado em PSK é dada por:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_i), \phi_i = 2\pi i/M, i = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (1)$$

Onde:

- $A$  é a amplitude da portadora;
- $f_c$  é a frequência da portadora;
- $\phi_i$  é a fase associada ao símbolo  $i$ ;
- $M$  é o número de fases possíveis (ex.:  $M=2$  para BPSK,  $M=4$  para QPSK).

No caso específico da BPSK, são utilizadas duas fases separadas por  $180^\circ$ , representando os bits 0 e 1 como vetores opostos no plano de fase. Esses sinais são denominados antipodais, e sua representação temporal pode ser descrita por:

$$s(t) = A(t) \cos \theta(t), \text{ com } \theta(t) = \omega_c t + \phi_i(t) \quad (2)$$

A amplitude  $A(t)$  pode ser relacionada à potência média do sinal. Como:

$$A(t) = \sqrt{2}A_{RMS} \text{ e } A_{RMS}^2 = P \quad (3)$$

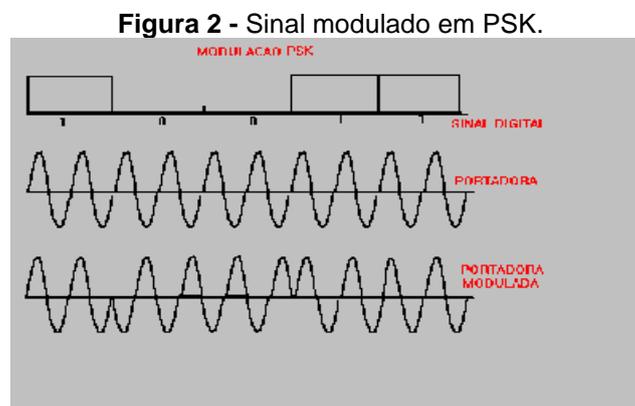
Substituindo em (2), obtém-se:

$$s_i(t) = \sqrt{2P} \cos(\theta(t)) \quad (4)$$

Considerando que  $P = E/T$ , sendo E a energia por símbolo e T a duração do símbolo, a equação final pode ser expressa como:

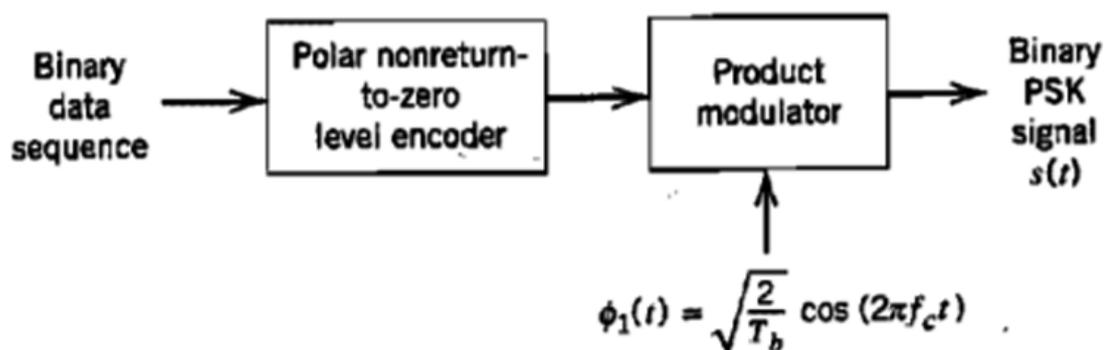
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\theta(t)], 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

A Figura 2 ilustra o sinal modulado em PSK. Já as Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, os diagramas de blocos dos processos de modulação e demodulação, conforme a literatura.



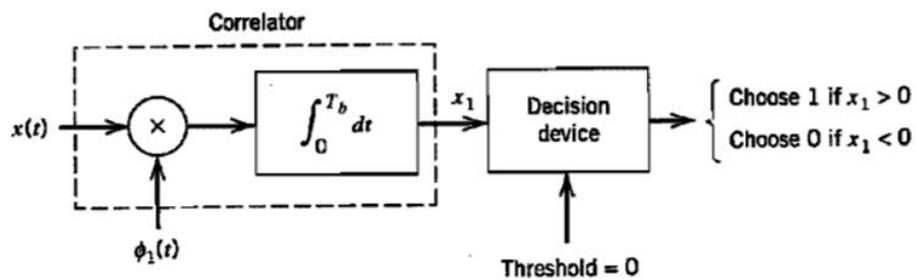
Fonte: Adaptado de UFRGS (1996?).

Figura 3 – Diagrama de blocos do processo de modulação.



Fonte: Adaptado de Bonfim (2018).

**Figura 4** – Diagrama de blocos do processo de demodulação.



Fonte: Adaptado de Bonfim (2018).

### 2.1.2 Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK)

A modulação por deslocamento de frequência (FSK, do inglês *Frequency Shift Keying*) codifica dados digitais por meio da variação da frequência da portadora, mantendo sua amplitude constante. Sua expressão analítica é dada por:

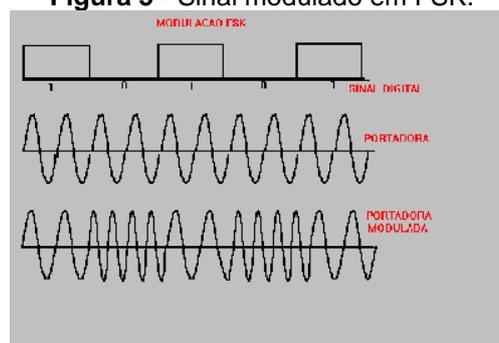
$$s_i(t) = A \cos(2\pi(fc + \Delta f_i)t), i = 1, 2, \dots, M$$

Onde:

- $A$  é a amplitude da portadora;
- $f_c$  é a frequência central;
- $\Delta f_i$  é o desvio de frequência associado ao símbolo  $i$ ;
- $M$  é o número de frequências possíveis (ex.:  $M=2$  para BFSK).

Embora menos utilizada em sistemas modernos de Power Line Communication (PLC) devido à sua menor eficiência espectral, a FSK apresenta boa robustez em ambientes com ruído significativo, sendo especialmente adequada para aplicações com baixa taxa de transmissão de dados. Um exemplo de sinal FSK está ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** - Sinal modulado em FSK.



Fonte: Adaptado de UFRGS (1996?).

Quanto à análise matemática, durante cada intervalo de símbolo, o sinal pode ser expresso como:

$$s(t) = A(t)\cos\theta(t)$$

$$\theta(t) = \omega_i t + \phi$$

$$s_i(t) = A(t) \cos(\omega_i t + \phi), 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$$

Expressando a equação em termos de energia, sabendo que  $A(t)$  é o valor de pico e que este se relaciona ao valor eficaz  $A_{RMS}$  por  $A(t) = \sqrt{2}A_{RMS}$ , tem-se:

$$s_i(t) = \sqrt{2}A_{RMS} \cos(\theta(t)) = \sqrt{2A_{RMS}^2} \cos(\theta(t))$$

Como  $A_{RMS}^2 = P$  representa a potência média do sinal,  $P$ , pode-se reescrever:

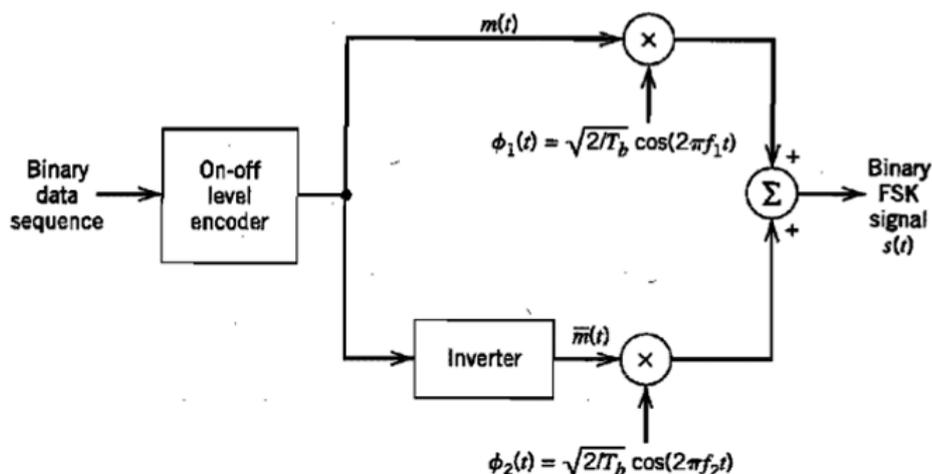
$$s_i(t) = \sqrt{2P} \cos(\theta(t))$$

E, substituindo a potência  $P$  por  $E/T$ , onde  $E$  é a energia do símbolo e  $T$  sua duração, obtém-se a forma final da equação analítica:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\theta(t)], 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$$

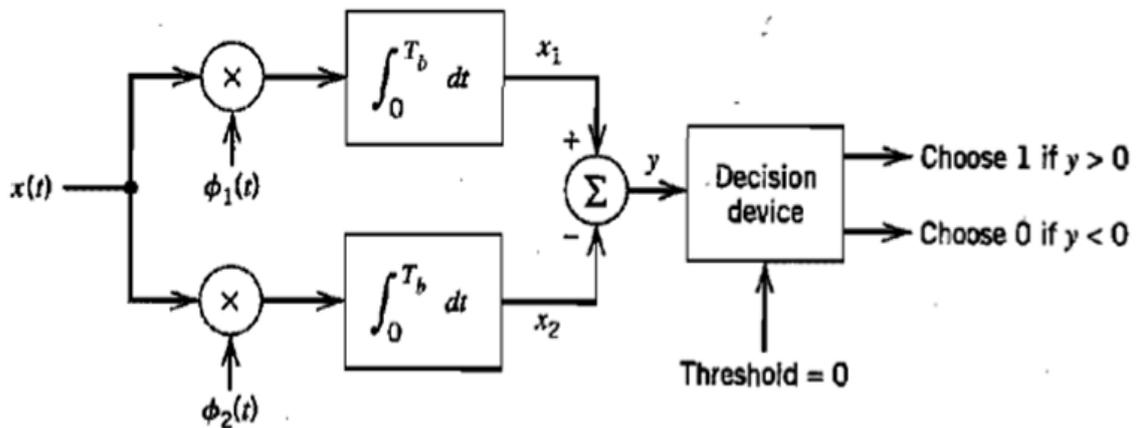
O processo de modulação e demodulação por FSK pode ser representado pelos diagramas de blocos mostrados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Diagrama de blocos do processo de modulação.



Fonte: Adaptado de Bonfim (2018).

**Figura 7** – Diagrama de blocos do processo de demodulação.



Fonte: Adaptado de Bonfim (2018).

### 2.1.3 Modulação por Quadratura de Amplitude (QAM)

A modulação em quadratura de amplitude (QAM, do inglês Quadrature Amplitude Modulation) codifica dados digitais por meio da combinação de variações na amplitude e na fase da portadora, oferecendo alta eficiência espectral. Sua expressão analítica pode ser escrita na forma cartesiana como:

$$s(t) = A_i \cos(2\pi fct) + B_i \sin(2\pi fct)$$

Onde:

- $A_i$  e  $B_i$  são as amplitudes das componentes em fase e em quadratura;
- $f$  é a frequência da portadora.

Na forma polar, o sinal pode ser expresso como:

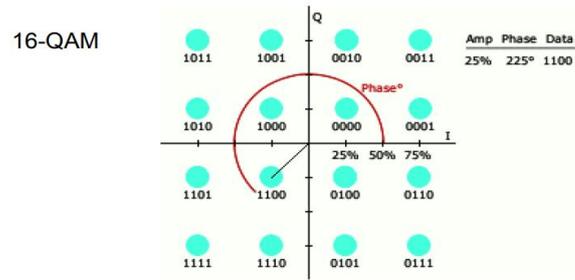
$$s(t) = R_i \cos(2\pi fct + \phi_i)$$

com:

$$R_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \quad \phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{B_i}{A_i}\right)$$

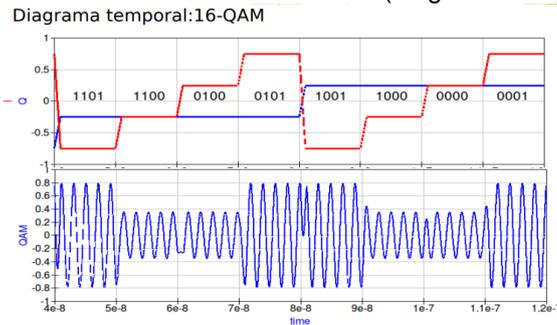
A QAM é amplamente utilizada em sistemas Power Line Communication (PLC) do tipo narrowband, possibilitando altas taxas de transmissão mesmo em redes elétricas com largura de banda limitada. A representação do sinal modulado pode ser visualizada na Figura 8 (diagrama de constelação) e na Figura 9 (diagrama temporal).

**Figura 8 -** Sinal modulado em QAM (diagrama de constelação).



**Fonte:** Adaptado de Bonfim (2018).

**Figura 9 -** Sinal modulado em QAM (diagrama temporal).



**Fonte:** Adaptado de Bonfim (2018).

Para a análise matemática, consideram-se dois sinais ortogonais base:

$$\rho_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T$$

$$\rho_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T$$

Os símbolos transmitidos  $s_i$  são associados a pares ordenados  $(a_i, b_i)$ , que representam coordenadas na constelação. A distância mínima entre dois pontos na constelação,  $d_{min}$ , está relacionada à energia do símbolo  $E_S$  por:

$$\frac{d_{min}}{2} = \sqrt{E_S}$$

Assim, a expressão final do sinal QAM torna-se:

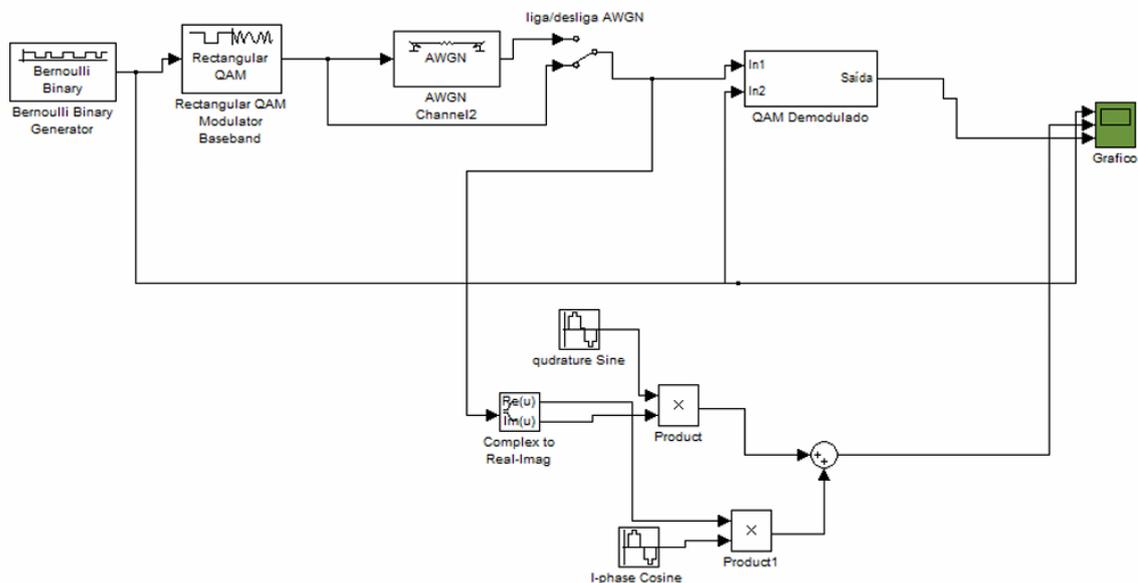
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} a_1 \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} a_2 \sin(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T, i = 0, \pm 1, \pm 2$$

Esse sinal consiste na soma de duas portadoras ortogonais — uma em fase e outra em quadratura — moduladas por amplitudes discretas distintas. A depender do número de bits por símbolo, podem-se utilizar dois tipos principais de constelações:

- Constelação quadrada: quando o número de bits por símbolo é par;
- Constelação em cruz: quando o número de bits por símbolo é ímpar.

O processo completo de modulação e demodulação QAM é representado no diagrama de blocos mostrado na Figura 10.

**Figura 10** – Diagrama de blocos da modulação QAM.



Fonte: Adaptado de Farias e Nascimento (s. d.).

## 2.2 Técnicas de transmissão de sinal

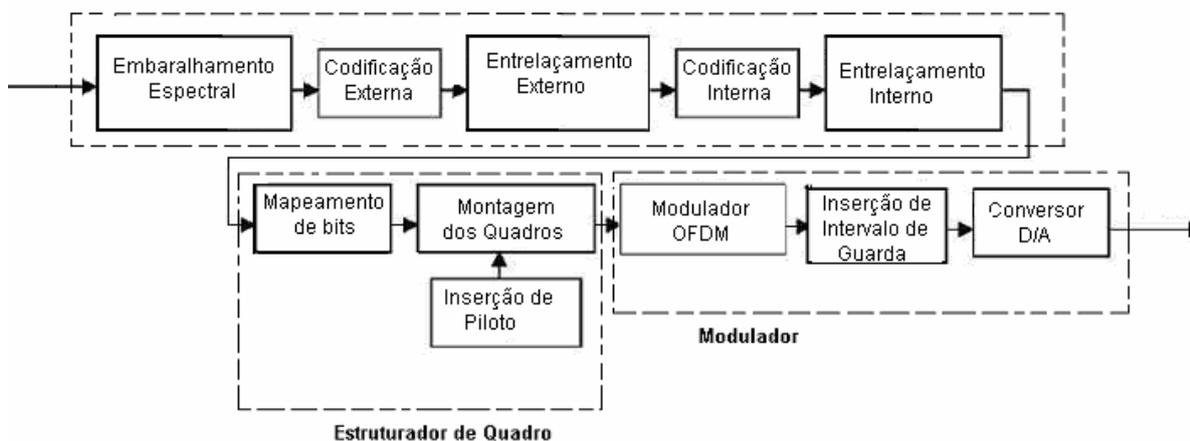
Após a conversão dos sinais de entrada em forma de portadora, é necessário transmiti-los ao receptor. Para isso, existem técnicas específicas de transmissão ao longo dos condutores, tais como a OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) e a Modulação Adaptativa. Assim como as técnicas de modulação, essas estratégias de transmissão são fundamentais para garantir desempenho em longas distâncias, atenuação de ruídos e interferências, segurança da informação e compatibilidade eletromagnética.

### 2.2.1 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

A OFDM é uma técnica de modulação multiportadora que evoluiu da Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM), a qual divide a largura de banda em múltiplos canais transmitidos simultaneamente pelo mesmo meio de comunicação, como ilustrado na Figura 11. A OFDM, ilustrada na Figura 11, divide a largura de banda em subportadoras ortogonais, como descrito por Tomás (2013). Souza et al.

(2016) validaram sua eficácia em PLC, demonstrando transmissão estável em redes elétricas na Amazônia, onde ruídos impulsivos são comuns.

**Figura 11 – Esquema da técnica OFDM.**



**Fonte:** Tomás (2013).

De acordo com Haykin (2001) e Câmara (2019), a OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal) divide a banda disponível em várias subportadoras ortogonais, transmitidas simultaneamente. Diferente da FDM convencional, a OFDM elimina a necessidade de faixas de guarda, pois as subportadoras se sobrepõem de maneira ortogonal. Isso resulta em maior eficiência espectral e maior robustez contra interferências.

Essa ortogonalidade torna a OFDM resistente a distorções causadas por multipercurso (multi path), um fenômeno comum em canais ruidosos ou com reflexões, como ocorre em ambientes wireless e também em redes elétricas. Rappaport (2002) destaca que a OFDM é particularmente eficaz em canais com desvanecimento multipercurso, comuns em comunicações sem fio e redes elétricas. Além disso, a técnica permite o uso de algoritmos de equalização menos complexos, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), reduzindo o custo computacional.

A OFDM é amplamente usada em PLC e outros sistemas modernos devido à sua eficiência espectral e robustez em canais ruidosos (HAYKIN, 2001; SOUZA et al., 2016).

### 2.2.2 Modulação Adaptativa

A modulação adaptativa é uma técnica que ajusta dinamicamente a forma de modulação utilizada, conforme as condições do canal de comunicação. Essa adaptação permite otimizar o desempenho, aumentando a taxa de transmissão

quando o canal está em boas condições ou melhorando a robustez quando o canal está degradado.

Segundo Galdino (2008), a modulação adaptativa possibilita variar a constelação durante o enlace, adaptando a forma de onda na saída do transmissor às condições de propagação. Isso significa que o sistema pode alternar entre esquemas de modulação mais simples, como BPSK, e mais complexos, como QAM-64, conforme a qualidade do canal.

### 2.3 Códigos de Correção de Erros (FEC)

Em sistemas de computação e telecomunicações, um código de correção de erro é uma técnica utilizada para controlar erros na transmissão de dados em canais de comunicação ruidosos ou não confiáveis. Em sistemas de transmissão de dados, a transmissão pode ser comprometida por fatores como interferências eletromagnéticas, atenuação do sinal e ruídos térmicos. Tais erros podem ser:

- Erros únicos: alteração de um único bit.
- Erros em rajada (burst errors): alteração de vários bits consecutivos.
- Erros aleatórios: sem padrão definido.
- Erros sistemáticos: seguem um padrão específico.

Antes de ocorrer a correção de erros, há a fase de detecção de erros, que possui métodos que os identificam, mas não os corrigem. Os métodos mais comuns de detecção de erros são:

- Bit de paridade: consiste em adicionar um bit extra para indicar se a quantidade de bits "1" é par ou ímpar.
- *Checksums*: é feita a soma dos valores de segmentos dos dados transmitidos para verificar integridade.
- *Cyclic Redundancy Check (CRC)*: usa operações matemáticas modulares para gerar um código de verificação.

Os principais códigos de correção de erros utilizados são:

- Códigos convolucionais
- Códigos Reed-Solomon
- Códigos Turbo
- Códigos LDPC (Low-Density Parity-Check)

Além disso, técnicas como interleaving (entrelaçamento de bits para dispersar erros em rajada) e equalização de canal (compensação das distorções do canal) atuam em conjunto com os códigos FEC para melhorar a confiabilidade da comunicação.

#### 2.4 Critérios de Avaliação de Desempenho

A avaliação do desempenho de sistemas Power Line Communication (PLC) exige a consideração de múltiplos critérios, pois esses sistemas operam em ambientes sujeitos a ruídos, atenuações e interferências eletromagnéticas. Esses critérios são fundamentais para validar a viabilidade do PLC frente a outras tecnologias de transmissão de dados, como fibra óptica e par trançado. A seguir, são apresentados os principais parâmetros analisados.

- **Latência:** Refere-se ao tempo necessário para que um pacote de dados percorra o meio de transmissão, do emissor ao receptor. Em redes PLC, a latência é influenciada por fatores como interferência no canal e a necessidade de retransmissões. Pode ser estimada pela fórmula:

$$\text{Latência} = \frac{\text{sample time} \cdot \text{número de bits}}{1000}$$

- **Taxa de erro de bit (BER):** Mede a proporção de bits transmitidos incorretamente em relação ao total enviado. Um BER elevado indica maior suscetibilidade a ruídos e compromete a confiabilidade do sistema. O cálculo é:

$$\text{BER} = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número total de bits}}$$

- **Interferência eletromagnética (EMI):** Avalia o impacto de ruídos provenientes de cargas não lineares, motores e eletrodomésticos. A presença de EMI é crítica em redes PLC devido à utilização da infraestrutura elétrica, que não foi originalmente projetada para comunicação de dados.
- **Taxa de transmissão (Throughput):** Representa a quantidade efetiva de dados transmitidos por segundo, influenciada por fatores como atenuação e ocupação do espectro. A taxa de transmissão é um parâmetro crítico em redes

de comunicação de dados, influenciando diretamente a eficiência do sistema (PUC-RIO, 2003). A fórmula utilizada é:

$$\text{Data Rate} = \frac{\text{número de bits}}{\text{tempo total de simulação}}$$

- Robustez do sinal: Indica a capacidade do sistema de manter a comunicação mesmo diante de variações de carga, ruídos e distúrbios na rede. Uma rede PLC robusta apresenta baixa perda de pacotes e alta confiabilidade sob condições adversas.
- Largura de banda: Corresponde à faixa de frequências que o canal consegue transportar. Esse parâmetro afeta diretamente a capacidade de transmissão e é determinado por:

$$\text{Largura de banda} = f_{\text{maior}} - f_{\text{menor}}$$

- Custo-benefício: Considera os custos de implantação e manutenção frente aos benefícios. O PLC se destaca por utilizar a infraestrutura elétrica já existente, reduzindo os gastos com cabeamento, mas pode demandar dispositivos adicionais, como filtros e repetidores, para garantir a qualidade do sinal.
- Escalabilidade: Avalia a capacidade da rede PLC de acomodar um número crescente de dispositivos sem prejuízo significativo à performance. Esse critério é essencial em aplicações como redes inteligentes (smart grids), onde há grande densidade de dispositivos conectados.

A análise conjunta desses critérios possibilita uma avaliação abrangente da eficiência do PLC, contribuindo para decisões técnicas quanto à sua adoção em diferentes cenários. Fatores como as exigências de qualidade de serviço (QoS), as características da rede elétrica e o tipo de aplicação devem ser considerados na escolha da tecnologia de transmissão mais apropriada.

A partir dos conceitos apresentados na fundamentação teórica, foi possível estabelecer os critérios de desempenho essenciais para a análise da tecnologia PLC frente a outras soluções de transmissão de dados. Com base nesse embasamento, definiu-se a abordagem metodológica adotada neste trabalho, que envolveu a

modelagem computacional dos sistemas e a realização de simulações comparativas, conforme detalhado na próxima seção.

### 3 METODOLOGIA

No presente trabalho, foi adotada como metodologia a definição de critérios de desempenho da tecnologia PLC, a escolha de um software simulador de sistemas de telecomunicações e a comparação com outras tecnologias, como fibra óptica, par metálico e par trançado. Os critérios de desempenho considerados incluem latência, taxa de erro de bit (BER), largura de banda e resistência a interferências eletromagnéticas.

A metodologia está dividida em abordagens quantitativa e qualitativa. A abordagem quantitativa consiste na obtenção e análise de métricas obtidas por meio da simulação, permitindo a avaliação objetiva do desempenho das tecnologias. Já a abordagem qualitativa visa interpretar os resultados e compará-los com base em aplicações reais, destacando as vantagens e limitações da tecnologia PLC frente às demais soluções de comunicação.

#### 3.1 Escolha do *software* simulador

Para contemplar os critérios de desempenho descritos anteriormente, foi escolhido o MATLAB/Simulink, versão R2024b, com licença acadêmica trial, utilizando as toolboxes de Comunicações e Processamento de Sinais. Esse ambiente computacional permite a modelagem e simulação de diversos tipos de sistemas de comunicação, reproduzindo condições reais dos meios de transmissão. Dessa forma, é possível analisar a propagação do sinal PLC, interferências eletromagnéticas e desempenho em diferentes cenários.

Foram utilizadas as seguintes ferramentas e bibliotecas no Simulink/MATLAB:

- Communications Toolbox: para avaliação da taxa de erro de bit (BER), latência e throughput;
- Signal Processing Toolbox: para análise espectral e filtragem dos sinais simulados.

A escolha do Simulink/MATLAB se justifica por sua versatilidade e precisão na simulação de redes de comunicação. Ele possibilita integrar diversos canais em um mesmo sistema, além de permitir a comparação entre diferentes esquemas de modulação, como OFDM e BPSK, frequentemente utilizados em sistemas PLC (HAYKIN, 2001; PROAKIS; SALEHI, 2007). Além disso, a simulação computacional no MATLAB/Simulink foi preferida à modelagem física (ex.: com microcontroladores

como Arduino) devido à complexidade dos sistemas de transmissão e distribuição de energia, que operam em média e alta tensão (69 kV a 500 kV) e estão sujeitos a fenômenos como desvanecimento multipercurso, ruídos impulsivos, e variações de impedância (FACCIONI et al., 2008). Tais condições não podem ser replicadas em protoboards ou pinos UART, que suportam apenas taxas de transmissão limitadas (ex.: 115200 bps) e não modelam interações elétricas de alta potência. O Simulink, com toolboxes como Communications e Signal Processing, permitiu simular canais realistas (AWGN, Rayleigh, Rician) e comparar o desempenho do PLC com outras tecnologias, atendendo aos objetivos do trabalho.

### 3.2 Comparação com outras tecnologias

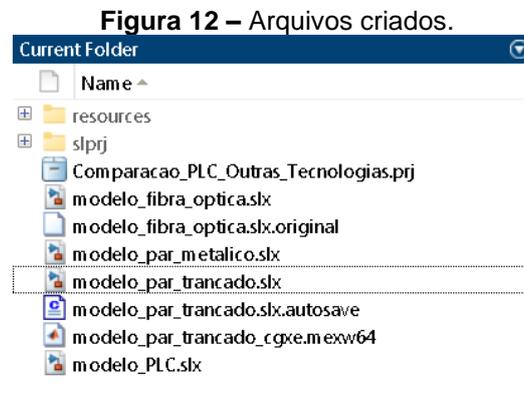
Atualmente, as principais tecnologias empregadas para comunicação de dados via cabo são:

- Par trançado (ex.: cabo de rede RJ45): muito utilizado em redes Ethernet, composto por quatro pares trançados de fios de cobre. O trançamento dos pares proporciona boa imunidade a interferências eletromagnéticas por meio do cancelamento mútuo dos campos (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).
- Par metálico (ex.: par telefônico - RJ11): composto geralmente por um único par de fios metálicos não trançados ou fracamente trançados. Ainda é utilizado em sistemas de telefonia e comunicação industrial de baixo custo. Apresenta limitações quanto à taxa de transmissão e à imunidade a ruídos, mas permanece relevante devido à ampla infraestrutura já existente (BELOTTI, 2013).
- Fibra óptica: utiliza pulsos de luz para transmitir dados através de um núcleo de vidro ou plástico. Essa tecnologia oferece alta taxa de transmissão, baixa latência e completa imunidade a interferências eletromagnéticas. No entanto, seu custo de implantação e manutenção é consideravelmente mais elevado (KEISER, 2010).

A comparação entre essas tecnologias foi realizada por meio de simulação computacional no Simulink/MATLAB, com base nos critérios definidos na metodologia. Cada tecnologia foi avaliada sob diferentes condições, como distância, presença de interferência e robustez do sinal, possibilitando uma análise quantitativa do desempenho do PLC em relação às demais opções.

### 3.3 Modelagem do sistema PLC e outras tecnologias

Os sistemas simulados foram modelados por meio de diagramas de blocos desenvolvidos no MATLAB/Simulink, salvos no formato .slx, conforme ilustrado na Figura 12. A arquitetura de todos os sistemas seguiu a estrutura clássica de comunicação digital (mensagem → modulação → canal → demodulação → decodificação → avaliação de erros), conforme apresentado na Figura 1.



**Fonte:** autoria própria.

Todos os sistemas utilizaram os mesmos blocos de modulação (BPSK), codificação convolucional, decodificação Viterbi e cálculo da taxa de erro, variando apenas os blocos que representam o canal de transmissão. Esses blocos representam diferentes características físicas do meio, incluindo ruído, atenuação e desvanecimento. As justificativas para as escolhas dos blocos são descritas a seguir:

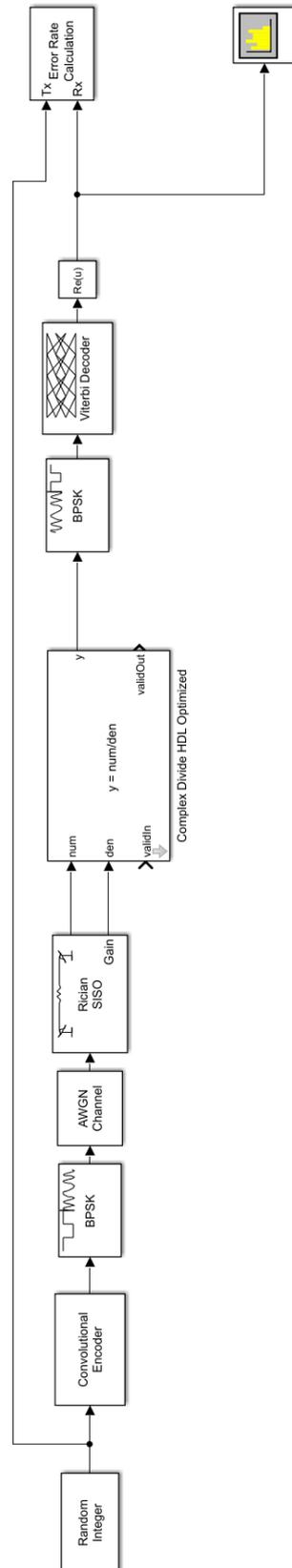
- Modulação/Demodulação BPSK: Escolhida por sua simplicidade e robustez em ambientes ruidosos. Sua natureza binária permite maior imunidade a erros, especialmente importante em linhas de energia sujeitas a ruído. A BPSK também consome pouca largura de banda, sendo adequada para canais com restrições espectrais (HAYKIN, 2001).
- Codificação Convolucional: Utilizada para introduzir redundância controlada, facilitando a correção de erros durante a recepção. É recomendada em sistemas nos quais a retransmissão é indesejada ou inviável (PROAKIS; SALEHI, 2008).
- Decodificação Viterbi: Aplicado como decodificador ideal para códigos convolucionais, o algoritmo de Viterbi proporciona decisões de máxima verossimilhança, recuperando a sequência de bits original com alta acurácia mesmo na presença de ruídos.

Os canais foram representados pelos seguintes blocos:

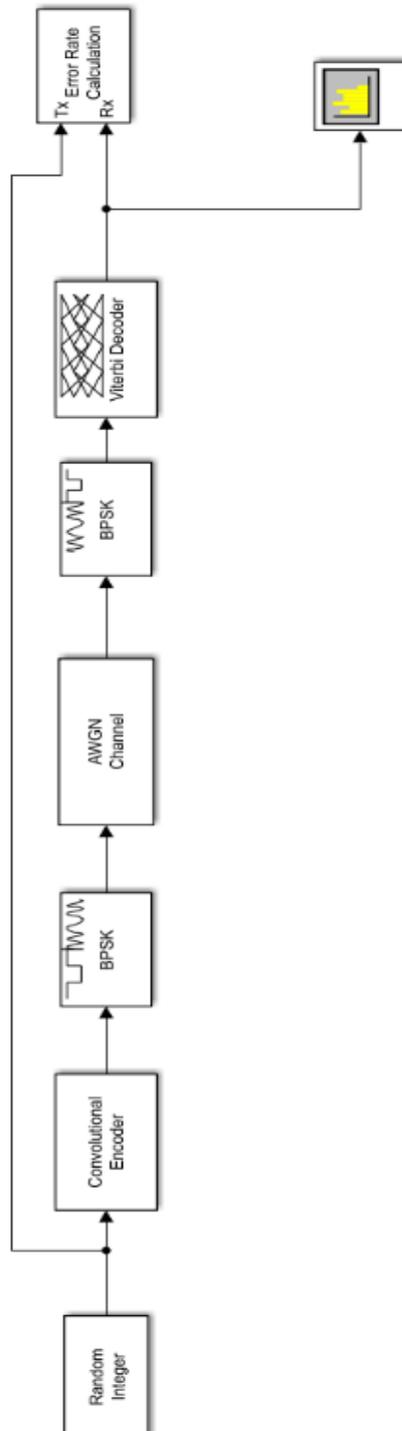
- AWGN Channel: Simula um canal com ruído branco aditivo gaussiano. Foi utilizado como base comparativa para os demais canais, por representar uma condição idealizada de canal com apenas ruído térmico. Esse modelo é amplamente adotado como referência em análises de desempenho de modulações digitais (PROAKIS; SALEHI, 2008).
- SISO Fading Channel (Rayleigh e Rician): Modela canais com desvanecimento devido à propagação multipercurso. O modelo Rayleigh representa canais sem linha de visada (LoS), enquanto o Rician considera uma componente de LoS somada aos ecos. Esses modelos simulam de forma realista o comportamento das linhas de energia em ambientes industriais e urbanos (MOLISCH, 2012).
- Digital Filter Design – Lowpass (IIR): Filtro digital passa-baixa do tipo IIR utilizado para atenuar ruídos de alta frequência e auxiliar na recuperação do sinal útil. Foi empregado no modelo de par trançado.
- Discrete FIR Filter: Filtro passa-baixa de resposta finita, utilizado para representar a resposta espectral do canal do par metálico. Os coeficientes [0.7 0.3] foram utilizados para simular atenuação e dispersão do meio físico.

O AWGN Channel foi utilizado em conjunto com os demais canais, exceto no caso da fibra óptica, onde ele é o único necessário, uma vez que essa tecnologia é imune a interferências eletromagnéticas.

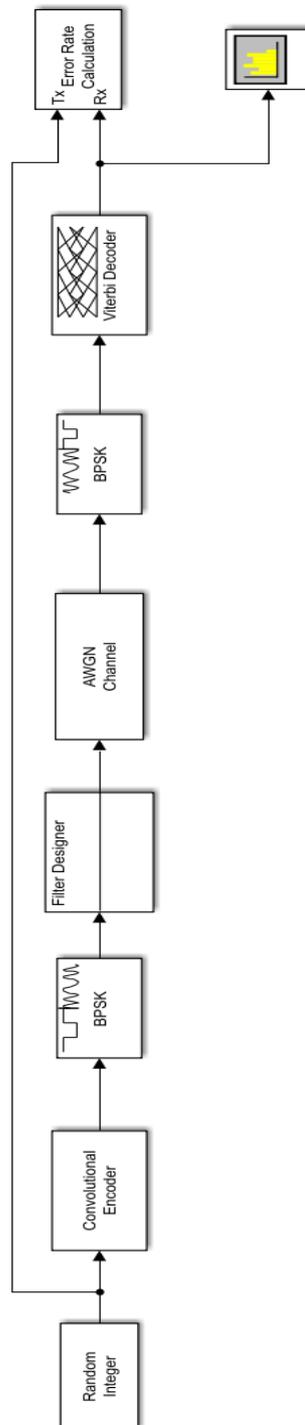
Figura 13 – Modelo do PLC.



Fonte: autoria própria.

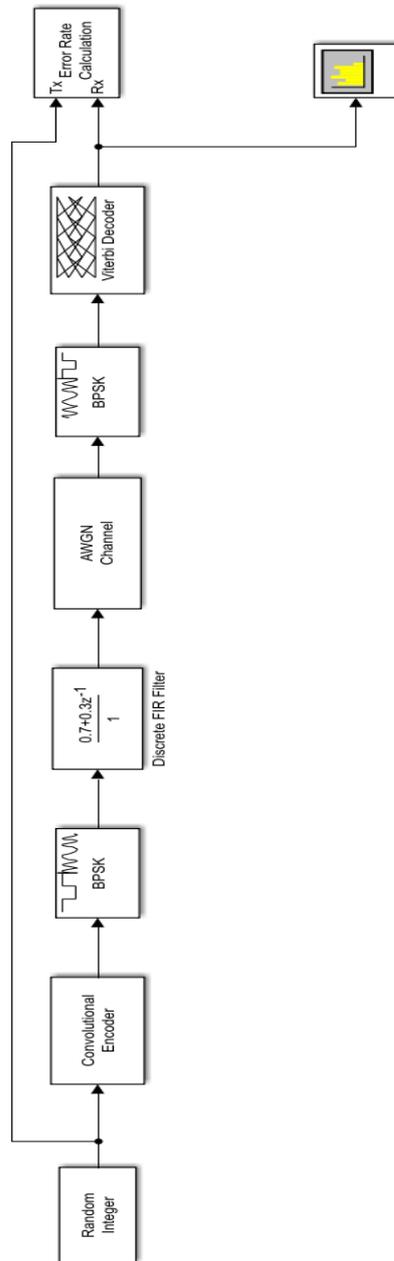
**Figura 14 – Modelo da fibra óptica.**

**Fonte:** autoria própria.

**Figura 15** – Modelo do par trançado.

**Fonte:** autoria própria.

Figura 16 – Modelo do par metálico.



Fonte: autoria própria.

No modelo do PLC, foram utilizados dois blocos adicionais:

- Complex Divide: Atua como equalizador de canal, compensando distorções causadas pelo desvanecimento Rayleigh.
- Complex to Real-Imag: Converte o sinal de valores complexos para reais, adequando o sinal à entrada do bloco de cálculo de erro (Error Rate Calculation), que não aceita entradas complexas.

Concluída a modelagem dos sistemas e a definição dos critérios de avaliação, procedeu-se com a simulação computacional no ambiente MATLAB/Simulink. A partir das simulações, foram obtidos dados quantitativos que permitiram a análise comparativa entre a tecnologia PLC e as demais alternativas estudadas. Os resultados obtidos são discutidos na próxima seção, com base nos critérios previamente estabelecidos, visando identificar o desempenho relativo de cada tecnologia em diferentes aspectos.

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos após a realização das simulações, considerando os critérios qualitativos e quantitativos definidos anteriormente, estão organizados na Tabela 1.

**Quadro 2 – Avaliação do desempenho do PLC frente a outras tecnologias.**

<b>Critério de desempenho</b>	<b>PLC</b>	<b>Par Trançado (RJ45)</b>	<b>Par Metálico</b>	<b>Fibra Óptica</b>
<b>Bits testados</b>	110000	100100	109966	109964
<b>Latência (ms)</b>	11	10.01	10.997	10.996
<b>Taxa de erro de bit (BER) – sem FEC</b>	1.81e-5	0	0.5	0.5
<b>Taxa de erro de bit (BER) – com FEC</b>	0	0	0	0
<b>Interferência eletromagnética</b>	Alta	Alta	Média	Baixa
<b>Taxa de transmissão (Mbps)</b>	0.01	0.01	0.01	0.01
<b>Robustez do sinal</b>	Média	Alta	Alta	Alta
<b>Escalabilidade</b>	Alta	Média	Baixa	Média
<b>Largura de banda (Hz)</b>	988	1867.7	98.87	0.099
<b>Custo-benefício</b>	Alto (Reutilização da rede elétrica)	Médio (Cabeamento comum)	Médio (Cabeamento exclusivo)	Baixo (Cabeamento dedicado)

**Fonte:** autoria própria.

Após a simulação dos modelos no MATLAB/Simulink, foram gerados dois tipos principais de resultados: os vetores ErrorVec, do tipo [BER, erros, bits testados], e os gráficos espectrais do bloco Spectrum Analyzer, localizado entre o decodificador Viterbi e a entrada Rx do bloco Error Rate Calculation. A partir desses resultados, foi possível calcular latência, throughput e largura de banda de cada tecnologia.

Em relação à taxa de transmissão, como o valor de sample time foi padronizado em 0,0001 segundos para todas as simulações, a taxa de dados efetiva (throughput) permaneceu constante, resultando em 0,01 Mbps em todos os modelos.

Esse valor, não representando os limites reais das tecnologias, é suficiente para efeito comparativo, evidenciando que a taxa de transmissão está mais associada à modulação e ao tempo de amostragem do sistema do que às particularidades físicas dos canais simulados neste trabalho. Apesar da uniformidade nesse valor, diferenças em largura de banda, latência e robustez ainda influenciam significativamente a eficiência prática da transmissão entre as tecnologias.

De maneira geral, os resultados obtidos evidenciam que a tecnologia Power Line Communication (PLC) apresentou desempenho satisfatório em comparação às demais tecnologias analisadas. Apesar de o canal PLC estar sujeito a desvanecimentos severos — modelados nas simulações pelos canais Rayleigh e Rician — o sistema demonstrou resiliência, mantendo a taxa de erro de bits (BER) igual a zero quando utilizado o esquema de codificação convolucional com decodificação Viterbi. A robustez do sinal foi considerada intermediária, pois a qualidade da comunicação pode ser impactada por ruídos impulsivos e interferências eletromagnéticas típicas das redes elétricas. Em termos de latência, o PLC obteve valores compatíveis com os demais modelos simulados, com cerca de 11 milissegundos para 110.000 bits transmitidos com sample time de 0.0001 s. A taxa de transmissão média foi de 0.01 Mbps em todos os cenários simulados, devido à padronização do tempo de amostragem. Ainda assim, a tecnologia demonstrou bom custo-benefício, por utilizar a infraestrutura elétrica existente, o que pode representar uma alternativa economicamente viável para ambientes residenciais e industriais.

A menor largura de banda do PLC (988 Hz) em relação ao par trançado (1867,7 Hz) pode limitar aplicações que exigem alta taxa de dados, como streaming em tempo real, mas é suficiente para telemetria e automação em redes inteligentes.

Para o par trançado, observou-se a maior largura de banda (1867,7 Hz) e alta robustez do sinal, resultado da aplicação de um filtro IIR passa-baixa, que suavizou ruídos sem comprometer a integridade do sinal.

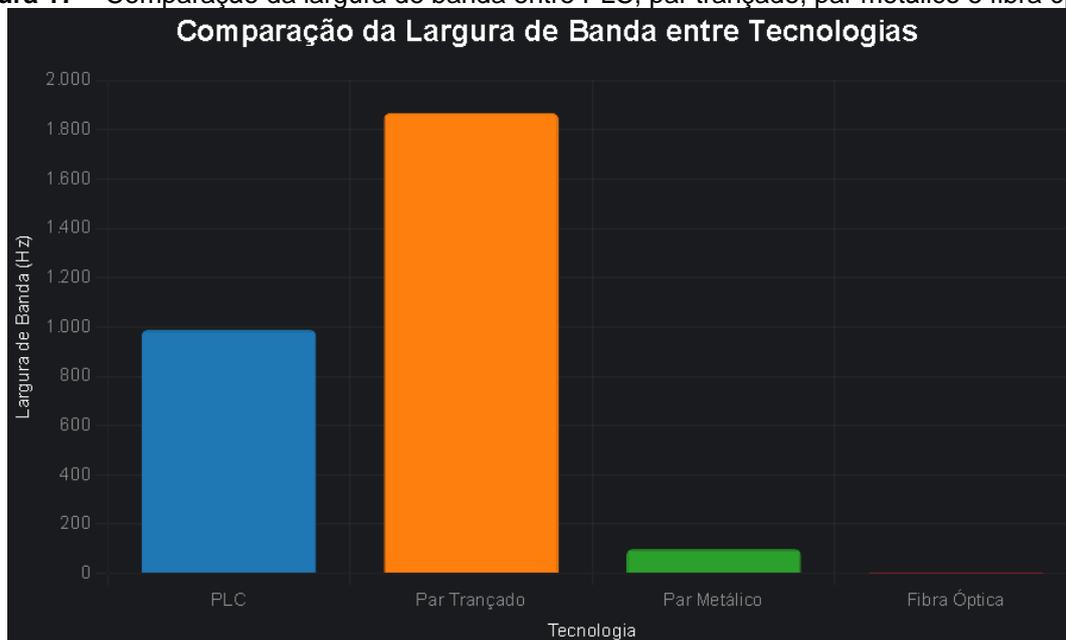
A largura de banda da fibra óptica (0,099 Hz) obtida na simulação é irrealista devido à simplificação do modelo, que utilizou apenas o canal AWGN para representar o meio óptico. Embora a fibra óptica seja imune a interferências eletromagnéticas no cabo, os equipamentos ópticos (ex.: transmissores, fotodetectores) introduzem ruídos elétricos, como ruído térmico e de quantização, que podem distorcer os sinais de luz e causar falhas na comunicação sem filtragem adequada (KEISER, 2010). Esses efeitos não foram modelados devido à ausência de

blocos específicos no MATLAB/Simulink R2024b para filtragem por comprimento de onda ou distorções ópticas, bem como às limitações computacionais dos equipamentos disponíveis, que não suportam toolboxes como Photonics Toolbox ou Simscape Electrical. Assim, o modelo AWGN capturou apenas ruídos genéricos, subestimando a complexidade da fibra óptica, que atinge larguras de banda na ordem de THz na prática.

Quanto ao par metálico, os resultados refletiram a natureza altamente atenuada do canal, modelado por um filtro FIR discreto. A largura de banda foi a menor entre as tecnologias (98,87 Hz), e a taxa de erro de bit sem FEC foi de 0,5, demonstrando grande vulnerabilidade a ruídos.

A Figura 17 apresenta a comparação da largura de banda entre as tecnologias analisadas: PLC (988 Hz), par trançado (1867,7 Hz), par metálico (98,87 Hz), e fibra óptica (0,099 Hz), conforme os resultados do Quadro 2. O par trançado destacou-se com a maior largura de banda, seguido pelo PLC, enquanto a fibra óptica apresentou um valor irrealisticamente baixo devido à simplificação do modelo AWGN, que não considerou fenômenos ópticos, como filtragem por comprimento de onda, nem os ruídos elétricos introduzidos por equipamentos ópticos, como fotodetectores (KEISER, 2010). Esses resultados reforçam a competitividade do PLC em aplicações de média largura de banda, como redes inteligentes, mas evidenciam a necessidade de modelagens mais detalhadas para a fibra óptica em estudos futuros.

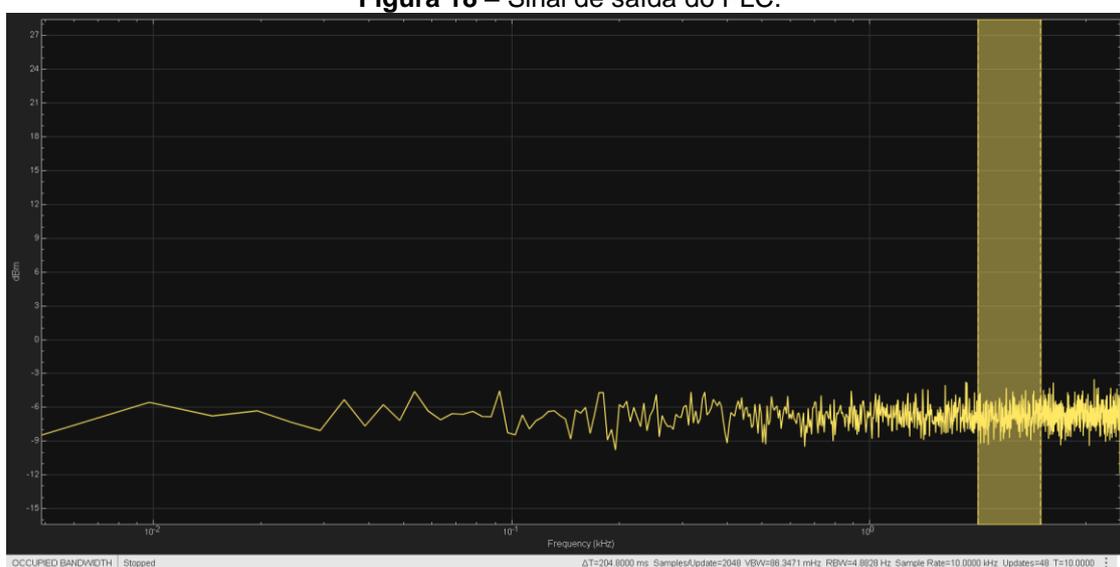
**Figura 17** – Comparação da largura de banda entre PLC, par trançado, par metálico e fibra óptica.



**Fonte:** autoria própria.

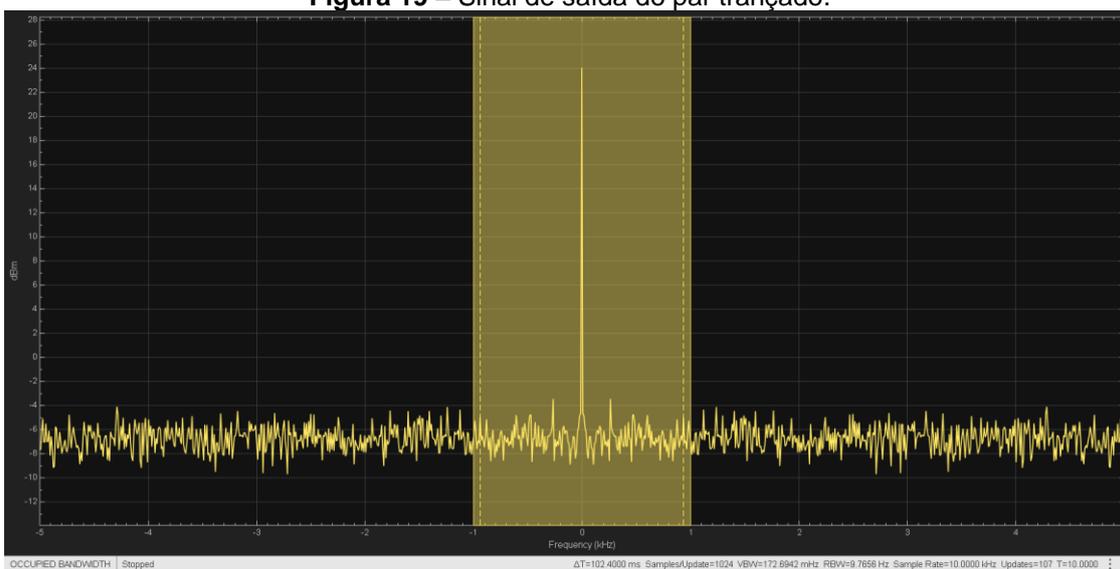
As figuras 18 a 21 apresentam os gráficos espectrais obtidos. Para o PLC (Figura 18), observa-se energia concentrada nas baixas frequências. O par trançado (Figura 19) exibe um espectro mais amplo e distribuído. O par metálico (Figura 20) mostra energia em faixa estreita e limitada. Já a fibra óptica (Figura 21), devido à modelagem com canal AWGN, apresentou um espectro extremamente concentrado.

**Figura 18 – Sinal de saída do PLC.**



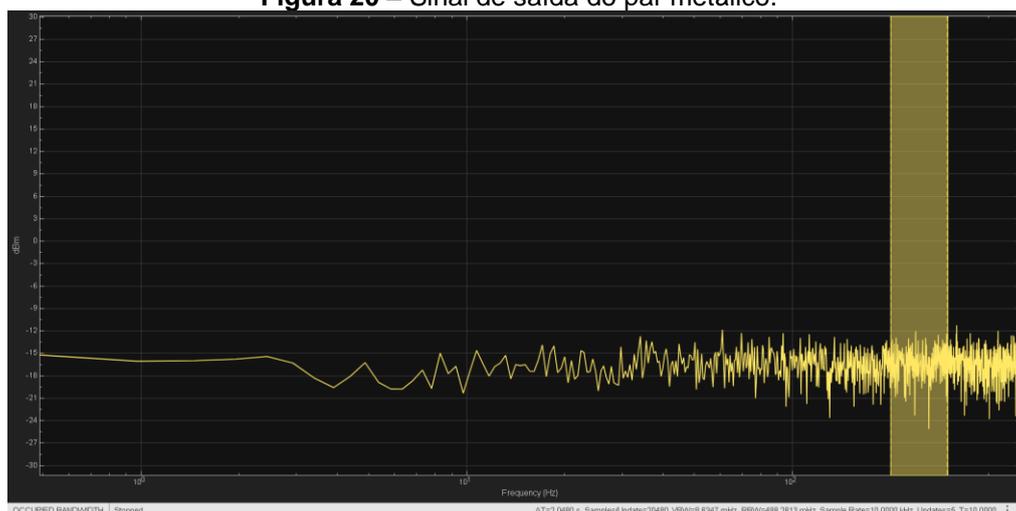
Fonte: autoria própria.

**Figura 19 – Sinal de saída do par trançado.**



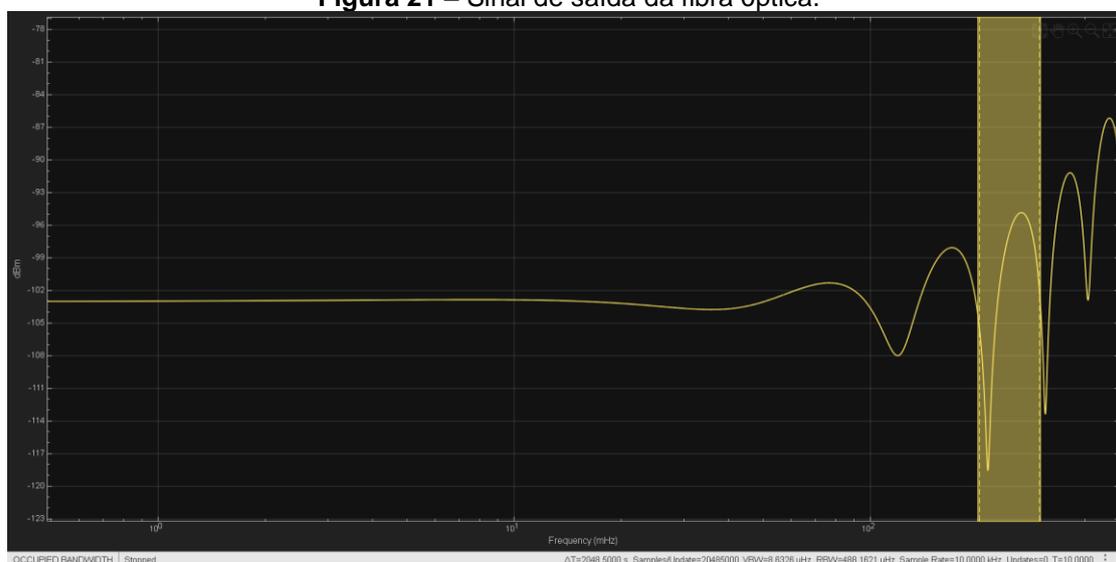
Fonte: autoria própria.

**Figura 20 – Sinal de saída do par metálico.**



Fonte: autoria própria.

**Figura 21 – Sinal de saída da fibra óptica.**



Fonte: autoria própria.

A análise dos resultados permitiu identificar pontos fortes e limitações de cada tecnologia de transmissão de dados, com destaque para os efeitos da interferência, codificação e tipo de canal sobre os principais indicadores de desempenho. Com base nessas observações, a próxima seção apresenta as considerações finais do trabalho, refletindo sobre os principais achados da pesquisa, suas contribuições e as possibilidades de continuidade do estudo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realizado o estudo, e tendo em vista os resultados obtidos por meio das simulações no ambiente MATLAB/Simulink, foi possível avaliar o desempenho de diferentes tecnologias de comunicação digital, com destaque para a Comunicação por Linha de Potência (PLC). A análise contemplou critérios como taxa de transmissão, latência, largura de banda, robustez do sinal e custo-benefício, permitindo uma comparação clara entre as tecnologias simuladas: PLC, fibra óptica, par metálico e par trançado. A modelagem proposta atendeu ao objetivo central do trabalho, que era analisar a viabilidade do uso do PLC como alternativa às tecnologias convencionais, considerando sua aplicação em cenários como redes inteligentes e comunicação de dados em infraestruturas elétricas.

Os resultados demonstraram que o PLC apresentou desempenho competitivo frente às demais tecnologias, destacando-se especialmente pela sua taxa de transmissão e custo-benefício. Ainda que a robustez do sinal e a largura de banda tenham sido inferiores em comparação com o par trançado, o sistema PLC mostrou-se eficiente dentro dos parâmetros avaliados. A utilização de blocos específicos, como codificadores convolucionais, canais com desvanecimento Rayleigh e Rician, filtros e análise espectral, permitiu uma simulação realista das condições de transmissão, evidenciando as características de cada tecnologia. A análise gráfica também contribuiu para a compreensão do comportamento do sinal em diferentes meios, reforçando a coerência dos dados obtidos.

No contexto das redes inteligentes, o PLC destaca-se como uma solução promissora para o Brasil, onde a infraestrutura elétrica alcança 94% dos domicílios (SOUZA et al., 2016). Os resultados do presente trabalho, com BER nulo e latência de 11 ms, indicam que o PLC é viável para aplicações como telemetria, automação de subestações, e inclusão digital em áreas rurais, onde a fibra óptica é economicamente inviável. Comparado ao par trançado (1867,7 Hz) e par metálico (98,87 Hz), o PLC (988 Hz) oferece um equilíbrio entre desempenho e custo, complementando tecnologias como fibra óptica em backbones de smart grids. Investimentos em modulações como OFDM e mitigação de ruídos impulsivos podem ampliar sua adoção, especialmente na Amazônia, onde a capilaridade da rede elétrica é um diferencial.

Embora a modelagem física com microcontroladores, como Arduino, possa ser explorada em experimentos simples de PLC em baixa tensão, sua aplicação em

sistemas de média e alta tensão é limitada pela incapacidade de replicar fenômenos complexos da rede elétrica. Trabalhos futuros poderiam combinar simulações computacionais com protótipos reais, utilizando equipamentos PLC industriais em ambientes controlados, desde que recursos adequados estejam disponíveis.

A amplitude do estudo, que abrange o PLC em redes de média e alta tensão e sua comparação com tecnologias avançadas, como fibra óptica, impôs limitações ao escopo do presente trabalho. Não foi possível modelar detalhadamente fenômenos ópticos, como ruídos em equipamentos ópticos, ou realizar experimentos físicos devido a restrições de tempo, recursos, e acesso a ferramentas avançadas.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação da modelagem do canal de fibra óptica, incluindo efeitos como dispersão cromática, atenuação por distância, filtragem óptica e ruído térmico. Além disso, a utilização de modulações mais avançadas em testes, como QPSK ou OFDM, pode proporcionar uma análise mais abrangente sobre a eficiência espectral e a robustez dos meios estudados. Também seria interessante explorar o uso de sistemas MIMO e múltiplos usuários, especialmente para o PLC, considerando seu uso crescente em aplicações de internet das coisas (IoT) e automação residencial. Por fim, destaca-se o potencial da integração entre a Communications Toolbox e a Simscape Electrical para a modelagem física detalhada do PLC, incluindo aspectos do sistema elétrico e da rede de distribuição de energia.

No contexto brasileiro, explorar essas modulações pode ajudar a atender demandas de inclusão digital em áreas rurais, onde a infraestrutura elétrica é mais acessível que a óptica.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.044**, de 15 de março de 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221044.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BELOTTI, Luiz. **Telecomunicações: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

BONFIM, M. **Aquisição rápida de sinais no tempo**. Curitiba: UFPR, 2018. Disponível em: <http://www.eletr.ufpr.br/marlio/te241/aula9.pdf>. Acesso em: 28 maio 2025.

CÂMARA, Cleverson José. **Análise de desempenho da tecnologia LTE em um cenário de comunicações militares táticas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/8170/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Cap%20C%C3%A2mara%202019.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CAMPOS, Luiz Alfredo da Silva de. **Redes de comunicação em sistemas elétricos de potência utilizando tecnologia Power Line Communication (PLC)**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. Disponível em: [https://www.ppgeet.uff.br/site/wp-content/uploads/2021/01/Luiz\\_Alfredo\\_Da\\_Silva\\_De\\_Campos.pdf](https://www.ppgeet.uff.br/site/wp-content/uploads/2021/01/Luiz_Alfredo_Da_Silva_De_Campos.pdf). Acesso em: 22 abr. 2025.

COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Relatório técnico da avaliação da tecnologia Powerline Communications (PLC)**. Elaboração: Dennis Yonaha Nakatsukasa; Tassilu Faria; Luis Fernando Kerscher. Colaboração: Rodrigo Fagundes Eggea. Curitiba: COPEL, 2010. 195 p. Acesso em: 6 maio 2025.

FACCIONI, André U.; TRICHEZ, Lucas M.; MACEDO, Ronaldo L.. **Análise sobre a tecnologia PLC**. Revista Científica do CTAI, v. 1, n. 1, 2015. Disponível em: <http://revista.ctai.senai.br/index.php/edicao01/article/view/48>. Acesso em: 22 abr. 2025.

FARIAS, I. S.; NASCIMENTO, E. J. **Transmissão de dados: unidade II, aula 6 – modulação**. Mossoró: UERN, [s. d.]. Disponível em: [https://www.uern.br/professor/arquivo\\_baixar.asp?arq\\_id=5913](https://www.uern.br/professor/arquivo_baixar.asp?arq_id=5913). Acesso em: 28 maio 2025.

GALDINO, Juraci Ferreira. **Modulação adaptativa: princípios e características de desempenho**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, 2008. Disponível em: [https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT\\_2\\_quad\\_2008/modulacao\\_adaptativa.pdf](https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_2_quad_2008/modulacao_adaptativa.pdf). Acesso em: 22 abr. 2025.

HAYKIN, Simon. **Sistemas de comunicação analógicos e digitais**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2001.

KEISER, Gerd. **Optical fiber communications**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

MARTINS, Marco. **Copel testa internet elétrica no Norte Pioneiro**. 2009. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/copel-testa-internet-eletrica-no-norte-pioneiro-bfvu9jbfzuzp3vjj7p55bn7y/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MATHWORKS. **AWGN Channel**. Natick: MathWorks, 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/awgnchannel.html>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MATHWORKS. **SISO Fading Channel**. Natick: MathWorks, 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/sisofadingchannel.html>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MOLISCH, Andreas F. **Wireless communications**. 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2012.

MULLER, Ronie Weslei. **Power Line Communication: Uma breve apresentação**. Revista Eletrônica Multidisciplinar, [S.l.], v. 1, n. 5, p. 1-7, 2024. Disponível em: <https://revista.unifacear.edu.br/rem/article/view/131/129>. Acesso em: 22 abr. 2025.

PICCOLONE MISSIAEN, Antonio Luciano; RIBEIRO, Moises V. **Sistema PLC brasileiro para aplicações de telecomunicações e smart grids em redes de baixa tensão**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SENDI, 21., 2014, Santos. Anais [...]. São Paulo: Cemig, 2014. p. 1–12. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/272024082\\_Sistema\\_PLC\\_Brasileiro\\_para\\_Aplicacoes\\_de\\_Telecomunicacoes\\_e\\_Smart\\_Grids\\_em\\_Redes\\_de\\_Baixa\\_Tensao](https://www.researchgate.net/publication/272024082_Sistema_PLC_Brasileiro_para_Aplicacoes_de_Telecomunicacoes_e_Smart_Grids_em_Redes_de_Baixa_Tensao). Acesso em: 22 abr. 2025.

PROAKIS, John G.; SALEHI, Masoud. **Fundamentals of communication systems**. 2nd ed. Boston: Pearson, 2007.

PROAKIS, John G.; SALEHI, Masoud. **Digital communications**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

PUC-RIO. **Modulação e Codificação Adaptativa**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2003. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4273/4273\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4273/4273_4.PDF). Acesso em: 22 abr. 2025.

RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

ROSSI, Silvano Renato. **Análise de desempenho de sistemas de comunicação por linha de potência (PLC) em redes de distribuição de energia elétrica**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/012-tese\\_silvano\\_renato\\_rossi.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/012-tese_silvano_renato_rossi.pdf). Acesso em: 22 abr. 2025.

SOUZA, J. A. M. de. et al. **Um estudo de viabilidade no uso de tecnologia Power Line Communication para inclusão digital na Amazônia**. Belém: UFPA, 2016. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/Busca/Download?codigoArquivo=177470&tipoMidia=0>. Acesso em: 28 mai. 2025

STALLINGS, William. **Data and computer communications**. 10th ed. Boston: Pearson, 2014.

TANENBAUM, Andrew S.; WETHERALL, David J. **Redes de computadores**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

TOMÁS, Anselmo Gomes. **Estudo da implementação da televisão digital na TPA**. Luanda: Universidade Agostinho Neto, 2013.

UFRGS. **Modulação FSK**. Porto Alegre: UFRGS, [1996?]. Disponível em: <http://penta.ufrgs.br/Alvaro/fsk.html>. Acesso em: 22 abr. 2025.

UFRGS. **Modulação PSK**. Porto Alegre: UFRGS, [1996?]. Disponível em: <http://penta.ufrgs.br/Alvaro/psk.html>. Acesso em: 22 abr. 2025.

ZATTAR, Haroldo; FONTES, Jusiel. **PLC – Qualidade da energia elétrica**. O Setor Elétrico, São Paulo, n. 108, p. 1-14, jan. 2015. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/plcqualidade-da-energia-eletrica/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

## APÊNDICE A – Descrição da modelagem do sistema PLC

### a) Random Integer Generator

- Função: Gera uma sequência de números inteiros pseudoaleatórios para representar os bits de informação transmitidos.
- Parâmetros utilizados:
  - M-ary number (tamanho do dado): 2 - valor aceito no BPSK Modulator
  - Source of initial seed: Auto (definido para garantir a reprodutibilidade)
  - Sample time (s): 1/10000 (ou 0.0001)
  - Samples per frame: 10000
  - Output data type: uint8
- Correspondência física: Simula uma fonte digital de dados em um sistema PLC real, como sensores inteligentes, medidores de energia (*smart meters*) ou dispositivos de automação industrial conectados à rede elétrica.

### b) Convolutional Encoder

- Função: Aplica codificação convolucional ao sinal de entrada para introduzir redundância e permitir correção de erros na recepção.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Operation mode: Truncated
- Correspondência física: Representa os mecanismos de codificação embarcados em transmissores PLC modernos, utilizados para garantir maior robustez contra interferências, ruídos e atenuações características do meio de transmissão elétrico.

### c) BPSK Modulator (Baseband)

- Função: Modula os dados codificados usando modulação por deslocamento de fase binária (BPSK).
- Parâmetros utilizados:
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double

- Correspondência física: Corresponde à modulação realizada pelo circuito transmissor PLC, que converte sinais digitais em sinais modulados de alta frequência injetados na rede elétrica.

#### d) AWGN Channel

- Função: Simula a adição de ruído branco gaussiano ao sinal transmitido.
- Parâmetros utilizados:
  - Mode: Signal to noise ratio (Eb/No)
  - Eb/No (dB): 15
  - Number of bits per symbol: 1
  - Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 1
  - Samples per symbol: 1
  - Random number source: Global Stream
- Correspondência física: Representa a presença de ruído branco aditivo gaussiano no canal de comunicação elétrica, simulando interferências aleatórias e de banda larga que ocorrem naturalmente em redes de distribuição de energia. Essas interferências podem vir de motores, inversores, fontes chaveadas e outros equipamentos conectados à rede, afetando diretamente a integridade do sinal transmitido por Power Line Communication.

#### e) SISO Fading Channel (Rayleigh e Rician)

- Função: Simula o desvanecimento do sinal devido a múltiplos caminhos, típico em ambientes de redes de média e alta tensão.
- Parâmetros utilizados:
  - Fading type: Rayleigh
    - Maximum Doppler shift (Hz): 0.001
    - Doppler spectrum: doppler('Jakes')
    - Initial seed: 73
  - Fading type: Rician
    - K-factors: 3
    - LOS path Doppler shifts (Hz): 0
    - LOS path initial phases (rad): 0

- Maximum Doppler shift (Hz): 0.001
- Doppler spectrum: doppler('Jakes')
- Initial seed: 73
- Correspondência física: Modela os efeitos de desvanecimento por múltiplos caminhos na rede elétrica, como ramificações de linhas ou reflexões nos equipamentos.
  - O canal Rayleigh representa cenários de desvanecimento severo, comuns em redes elétricas de média tensão com múltiplos caminhos de reflexão, variações de impedância, ramificações e presença de ruído impulsivo.
  - O canal Rician representa um ambiente com desvanecimento moderado, onde há uma componente de linha de visada (LoS), simulando situações onde parte do sinal se propaga diretamente, e parte sofre reflexões. Essa abordagem é coerente com redes mais organizadas e balanceadas, como as de alta tensão.

#### f) Complex Divide (HDL Optimized)

Este bloco realiza a divisão de números complexos com otimização para hardware digital (HDL), sendo utilizado na simulação para ajustar a saída do canal com desvanecimento (Rayleigh ou Rician), que é complexa, para o formato exigido pelo bloco demodulador BPSK, que opera apenas com entradas reais.

- Função: Garantir compatibilidade de sinal entre o canal de comunicação e o demodulador.
- Parâmetros utilizados:
  - Number of iterations per pipeline register: 1
- Correspondência física: Não representa diretamente um componente físico, mas sim o processamento digital necessário para converter os sinais distorcidos pelo canal em uma forma compreensível pelo receptor. Tal processamento é equivalente a operações de equalização ou normalização realizadas em DSPs (processadores digitais de sinal) nos receptores PLC.

#### g) BPSK Demodulator (Baseband)

- Função: Realiza a demodulação do sinal BPSK recebido.
- Parâmetros utilizados:
  - Decision type: hard decision
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double
- Correspondência física: Simula o processo de demodulação executado nos receptores PLC, que extraem os dados digitais dos sinais elétricos recebidos da rede.

#### h) Viterbi Decoder

- Função: Decodifica o sinal convolucional utilizando o algoritmo de Viterbi para correção de erros.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Decision type: Hard decision
  - Traceback depth: 34
  - Operation mode: Truncated
  - State metric word length: 16
  - Output data type: uint8
- Correspondência física: Representa o sistema de correção de erros incorporado em dispositivos receptores PLC, que garante a confiabilidade dos dados mesmo com a presença de ruído, desvanecimento e distorções.

#### i) Error Rate Calculation

- Função: Compara os bits transmitidos e recebidos para calcular a taxa de erro de bits (BER).
- Parâmetros utilizados:
  - Receive delay: 0
  - Computation delay: 0
  - Computation mode: Entire frame
- Correspondência física: Trata-se de uma métrica computacional, usada em testes laboratoriais para avaliar o desempenho da comunicação por PLC.

## APÊNDICE B – Descrição da modelagem do par metálico

### a) Random Integer Generator

- Função: Gera uma sequência de números inteiros pseudoaleatórios para representar os bits de informação transmitidos.
- Parâmetros utilizados:
  - M-ary number (tamanho do dado): 2 - valor aceito no BPSK Modulator
  - Source of initial seed: Auto (definido para garantir a reprodutibilidade)
  - Sample time (s): 1/10000 (ou 0.0001)
  - Samples per frame: 10000
  - Output data type: uint8
- Correspondência física: Representa a fonte digital de dados, como um dispositivo eletrônico que transmite sinais por condutores metálicos, como por exemplo, um computador ou sistema embarcado.

### b) Convolutional Encoder

- Função: Aplica codificação convolucional ao sinal de entrada para introduzir redundância e permitir correção de erros na recepção.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Operation mode: Continuous
- Correspondência física: Corresponde à etapa de codificação de canal implementada eletronicamente antes da transmissão em sistemas que utilizam par metálico, a fim de aumentar a robustez contra ruídos.

### c) BPSK Modulator (Baseband)

- Função: Modula os dados codificados usando modulação por deslocamento de fase binária (BPSK).
- Parâmetros utilizados:
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double

- Correspondência física: Simula o modulador eletrônico que converte os dados digitais em sinais analógicos que serão transmitidos pelo par de condutores metálicos.

#### d) AWGN Channel

- Função: Simula a adição de ruído branco gaussiano ao sinal transmitido.
- Parâmetros utilizados:
  - Mode: Signal to noise ratio (Eb/No)
  - Eb/No (dB): 10
  - Number of bits per symbol: 1
  - Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 1
  - Samples per symbol: 1
  - Random number source: Global Stream
- Correspondência física: Corresponde a ruídos eletromagnéticos comuns em pares metálicos, como ruído térmico, ruído de linha (*power line noise*), interferência de dispositivos próximos e diafonia de outros condutores.

#### e) Discrete FIR Filter

- Função: Simula a resposta em frequência da linha metálica, com ênfase nas perdas por atenuação e interferência.
- Parâmetros utilizados:
  - Coefficient source: Dialog parameters
  - Filter structure: Direct form
  - Coefficients: [0.7 0.3]
  - Input processing: Elements as channels (sample based)
  - Initial states: 0
  - Integer rounding mode: floor
- Correspondência física: Representa o comportamento do canal de par metálico, como atenuação de alta frequência, distorção por intersímbolos (ISI) e reflexões causadas por descontinuidades ou impedâncias mal casadas.

#### f) BPSK Demodulator (Baseband)

- Função: Realiza a demodulação do sinal BPSK recebido.
- Parâmetros utilizados:
  - Decision type: Hard decision
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double
- Correspondência física: Equivale ao processo realizado no receptor que interpreta os sinais de tensão recebidos no par metálico e converte para a sequência binária original.

#### g) Viterbi Decoder

- Função: Decodifica o sinal convolucional utilizando o algoritmo de Viterbi para correção de erros.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Decision type: Hard decision
  - Traceback depth: 34
  - Operation mode: Continuous
  - State metric word length: 16
  - Output data type: uint8
- Correspondência física: Simula os circuitos de correção de erros utilizados para restaurar os dados em comunicações sobre par metálico, principalmente em ambientes ruidosos.

#### h) Error Rate Calculation

- Função: Compara os bits transmitidos e recebidos para calcular a taxa de erro de bits (BER).
- Parâmetros utilizados:
  - Receive delay: 34
  - Computation delay: 0
  - Computation mode: Entire frame
- Correspondência física: Assim como nas outras tecnologias, mede a qualidade do canal de comunicação, avaliando o desempenho do sistema.

## APÊNDICE C – Descrição da modelagem do par trançado

### a) Random Integer Generator

- Função: Gera uma sequência de números inteiros pseudoaleatórios para representar os bits de informação transmitidos.
- Parâmetros utilizados:
  - M-ary number (tamanho do dado): 2 - valor aceito no BPSK Modulator
  - Source of initial seed: Auto (definido para garantir a reprodutibilidade)
  - Sample time (s): 1/10000 (ou 0.0001)
  - Samples per frame: 10000
  - Output data type: boolean (O Output data type foi configurado como boolean para o par trançado devido à compatibilidade com o modelo de simulação Ethernet, enquanto uint8 foi usado para as demais tecnologias.)
- Correspondência física: Representa equipamentos emissores digitais conectados por par trançado, como computadores, switches ou roteadores.

### b) Convolutional Encoder

- Função: Aplica codificação convolucional ao sinal de entrada para introduzir redundância e permitir correção de erros na recepção.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Operation mode: Truncated
- Correspondência física: Simula a etapa de codificação típica em sistemas digitais que transmitem por par trançado, contribuindo para maior imunidade a ruídos e interferências.

### c) BPSK Modulator (Baseband)

- Função: Modula os dados codificados usando modulação por deslocamento de fase binária (BPSK).
- Parâmetros utilizados:
  - Phase offset (rad): 0

- Output data type: double
- Correspondência física: Corresponde ao circuito modulador presente em transceptores Ethernet ou similares que utilizam par trançado.

#### d) AWGN Channel

- Função: Simula a adição de ruído branco gaussiano ao sinal transmitido.
- Parâmetros utilizados:
  - Mode: Signal to noise ratio (Eb/No)
  - Eb/No (dB): 10
  - Number of bits per symbol: 1
  - Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 1
  - Samples per symbol: 1
  - Random number source: Global Stream
- Correspondência física: Representa os ruídos térmicos e eletrônicos presentes na rede, gerados por dispositivos conectados e pelas propriedades dos cabos. É um modelo genérico de distúrbios não determinísticos.

#### e) Digital Filter Design (IIR Lowpass Filter)

- Função: Atua como um filtro passa-baixa para modelar a resposta do canal ao sinal transmitido.
- Parâmetros utilizados:
  - Response Type: Lowpass
  - Design Method: IIR Butterworth
  - Specify order: 5
  - Fs (kHz): 10
  - Fc (kHz): 5
- Correspondência física: Representa o comportamento típico do meio de transmissão de par trançado, simulando a atenuação das componentes de alta frequência. Essa perda de sinal é causada por fatores físicos como a capacitância e indutância parasitas dos condutores, a impedância do meio e a degradação mais acentuada em maiores distâncias ou em cabos de menor qualidade.

#### f) BPSK Demodulator (Baseband)

- Função: Realiza a demodulação do sinal BPSK recebido.
- Parâmetros utilizados:
  - Decision type: Hard decision
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double
- Correspondência física: Representa o demodulador presente no receptor que converte os sinais elétricos de volta para dados digitais.

#### g) Viterbi Decoder

- Função: Decodifica o sinal convolucional utilizando o algoritmo de Viterbi para correção de erros.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Decision type: Hard decision
  - Traceback depth: 1
  - Operation mode: Truncated
  - State metric word length: 16
  - Output data type: boolean
- Correspondência física: Simula a lógica de correção de erros empregada em sistemas digitais que utilizam par trançado, aumentando a robustez da comunicação.

#### h) Error Rate Calculation

- Função: Compara os bits transmitidos e recebidos para calcular a taxa de erro de bits (BER).
- Parâmetros utilizados:
  - Receive delay: 0
  - Computation delay: 0
  - Computation mode: Entire frame

- Correspondência física: Embora abstrato, esse bloco representa a análise de desempenho do sistema, essencial para avaliar a integridade da transmissão por par trançado.

## APÊNDICE D – Descrição da modelagem da fibra óptica

### a) Random Integer Generator

- Função: Gera uma sequência de números inteiros pseudoaleatórios para representar os bits de informação transmitidos.
- Parâmetros utilizados:
  - M-ary number (tamanho do dado): 2 - valor aceito no BPSK Modulator
  - Source of initial seed: Auto (definido para garantir a reprodutibilidade)
  - Sample time (s): 1/10000 (ou 0.0001)
  - Samples per frame: 10000
  - Output data type: uint8
- Correspondência física: Representa a fonte de dados digitais, como sensores ópticos, switches ou roteadores em redes de comunicação por fibra, responsáveis por enviar pacotes de dados através da rede.

### b) Convolutional Encoder

- Função: Aplica codificação convolucional ao sinal de entrada para introduzir redundância e permitir correção de erros na recepção.
- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Operation mode: Continuous
- Correspondência física: Simula o uso de técnicas de codificação empregadas nos transmissores ópticos para mitigar erros provocados por atenuações ópticas, dispersões ou outros fenômenos físicos no enlace óptico.

### c) BPSK Modulator (Baseband)

- Função: Modula os dados codificados usando modulação por deslocamento de fase binária (BPSK).
- Parâmetros utilizados:
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double

- Correspondência física: Representa o funcionamento do laser ou LED modulador em transmissores ópticos digitais, que converte os sinais digitais em pulsos ópticos modulados por variação de fase ou intensidade.

#### d) AWGN Channel

- Função: Simula a adição de ruído branco gaussiano ao sinal transmitido.
- Parâmetros utilizados:
  - Mode: Signal to noise ratio (Eb/No)
  - Eb/No (dB): 15
  - Number of bits per symbol: 1
  - Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 1
  - Samples per symbol: 1
  - Random number source: Global Stream
- Correspondência física: Simula a presença de ruído óptico adicionado ao sinal transmitido, como ruído térmico nos receptores ópticos ou ruído de quantização em conversores analógico-digitais. Embora a fibra óptica apresente alta imunidade a interferências externas, pequenas fontes de ruído interno ainda podem afetar a transmissão.

#### e) BPSK Demodulator (Baseband)

- Função: Realiza a demodulação do sinal BPSK recebido.
- Parâmetros utilizados:
  - Decision type: Hard decision
  - Phase offset (rad): 0
  - Output data type: double
- Correspondência física: Representa o fotodetector e os circuitos de demodulação dos receptores ópticos, responsáveis por transformar a luz recebida em sinais elétricos e decodificar os dados digitais originais.

#### f) Viterbi Decoder

- Função: Decodifica o sinal convolucional utilizando o algoritmo de Viterbi para correção de erros.

- Parâmetros utilizados:
  - Trellis structure: poly2trellis(7, [171 133])
  - Decision type: Hard decision
  - Traceback depth: 36
  - Operation mode: Continuous
  - State metric word length: 16
  - Output data type: uint8
- Correspondência física: Corresponde ao processamento digital realizado nos receptores ópticos modernos para garantir a integridade da informação transmitida, mesmo na presença de atenuações ou distorções leves no sinal.

#### g) Error Rate Calculation

- Função: Compara os bits transmitidos e recebidos para calcular a taxa de erro de bits (BER).
- Parâmetros utilizados:
  - Receive delay: 36
  - Computation delay: 0
  - Computation mode: Entire frame
- Correspondência física: Assim como nas demais tecnologias, não representa um componente físico, mas sim uma métrica de avaliação do desempenho da transmissão óptica, normalmente medida em testes laboratoriais ou sistemas de monitoramento de rede.