IPS Instituto Politécnico de Setúbal
Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

José Pedro Antunes Reis

Sistema de Comunicação PLC: uma análise de capacidade

Dissertação de Mestrado submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Júri

Presidente: Prof. Dr. Armando José Pinheiro M. Pires, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Prof. Dr. Filipe Duarte dos Santos Cardoso, ESTSetúbal/IPS

Arguente: Prof. Dr. José Miguel Costa Dias Pereira, ESTSetúbal/IPS

Novembro de 2022

Agradecimentos

Agradeço à escola pública, que me proporcionou receber essa fantástica herança que homens e mulheres cientistas, lutando contra tudo e todos ao longo da história, nos deixaram: o conhecimento.

A todos os professores que me acompanharam desde o início, da educadora Rosa Candeias, escola dos arcos até ao meu último professor.

A todos os técnicos que, de uma maneira ou de outra, tornaram possível este caminho: Guiomar Oliveira, Teresa São Miguel, Maria José Sobral, Vanessa Mestre, Andreia Lopes, Rui Nobre.

Aos professores José e Eugénia, que me ajudaram a desvendar os caminhos da matemática durante sete anos.

Ao professor José Luís de Sousa, que provou aos técnicos que os engenheiros não são só pragmáticos, também conseguem compreender os caminhos da psicologia.

Ao meu "último" professor Filipe Cardoso, orientador desta dissertação, porque reconheço que nem sempre fui um aluno colaborante, a minha gratidão.

À minha família, aos meus amigos e colegas, e a todos os que compõem o universo IPS, obrigado.

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim, e que fizeram da "escola" o foco da minha educação, dedico este trabalho.

Resumo

Esta dissertação foi desenvolvida para se estudar o comportamento de redes PLC (*Power Line Communication*), no que respeita à capacidade do canal em diferentes contextos de utilização.

Para isso, estudou-se como funciona a comunicação PLC, qual a sua utilização atual, que tipo de aplicações é que foram desenvolvidas de modo a utilizar este tipo de tecnologia, quais as normas existentes, e os constrangimentos que a sua utilização pode apresentar.

Após esta pesquisa sobre comunicação em linhas de potência, decidiu-se utilizar um modelo de canal PLC já desenvolvido, de modo a avaliar qual a relação entre os valores de débito binário obtido e a distância entre os módulos emissor e recetor. Após avaliação de diversos modelos que utilizam diferentes tipos de abordagem, foi decidido utilizar um modelo baseado e aferido com recursos a medições efetuadas em ambiente real, permitindo obter resultados relativamente realistas e ser modificado de modo a ser executado com diferentes condições.

Este modelo foi desenvolvido em torno das normas 47 FCC parte 15 e CISPR 22, e baseia-se num canal composto por dois modems PLC ligados em duas tomadas elétricas que comunicam entre si.

Por forma a permitir obter os resultados pretendidos, o modelo existente foi modificado de modo a permitir executar múltiplas simulações com base numa configuração inicial de parâmetros de simulação.

Com as simulações efetuadas foi possível obter diferentes resultados quer numéricos, quer gráficos, que permitiram avaliar o desempenho deste tipo de sistema.

Verificou-se que nos três cenários de aplicação analisados: curta, média e longa distância entre os dois modems, os valores mais elevados de débito binário são obtidos no cenário de menor distância, e os valores mais baixos no cenário de longa distância entre modems. Em termos gerais para uma distância de 10 m entre modems o valor de débito binário obtido é da ordem dos 210 Mbps. Para distâncias da ordem dos 40 m o valor obtido é de 6 Mbps.

Com base nos resultados das simulações efetuadas nesta dissertação é proposto um modelo analítico do canal PLC.

Palavras-chave: Telecomunicações, Linhas de Potência, *Power Line Communication*, Débito Binário.

Abstract

This dissertation was developed in order to study the behaviour of PLC (Power Line Communication) networks, in terms of channel capacity in different contexts.

To do so, PLC communication works were studied, namely, what are its current use, what type of applications were designed to use this type of technology, what are the existing standards, and the restrictions that its use may present.

After this research on power line communications, it was decided to use an already developed PLC channel model to study the relation between the achievable datarate and the distance between the transmitter and the receiver. After the evaluation of several models, based on different types of approaches, it was decided to use a model, assessed with measurements in real environments, allowing to obtain realistic results and being modified in order to be configured with different simulation parameters.

This model was developed based on 47 FCC part 15 and CISPR 22 standards and is based on a channel composed of two PLC modems connected to two electrical outlets.

From the performed simulations it was possible to obtain different numerical and graphical results allowing two evaluate the performance of such kind of system.

It was found that in the three application scenarios being studied: short, medium and long distance between the two modems, the highest values of bitrate are obtained in the scenario of shortest distance, and the worst values in the scenario of long distance between modems.

Globally, for distances up to 10 m between the modems the obtained datarate is of the order of 210 Mbps. For a distance of 40 m the obtained value is 6 Mbps.

From the simulation results an analytical model of the PLC channel is proposed.

Keywords: Telecommunications, Powerline, Power Line Communication, Datarate.

Índice

Agradecimentos i

Resumo iii

Abstract v

Índice vii

Lista de Figuras ix

Lista de Tabelas xi

Lista de Siglas e Acrónimos xiii

Lista de Símbolos xv

Capítulo 1 - Introdução 1

1.1. Motivação 2

1.2. Trabalho desenvolvido 2

1.3. Estrutura da dissertação 3

Capítulo 2 - Comunicação em redes de energia 5

2.1. Tecnologia PLC 6

2.2. Normas e protocolos PLC 10

2.3. Constrangimentos da tecnologia PLC 14

Capítulo 3 - Simulação do canal PLC 17

3.1. Estado da arte 18

3.1.1. Abordagens top-down 18

3.1.2. Abordagens bottom-up 19

3.2. Modelo utilizado 20

Capítulo 4 - Resultados obtidos 27

4.1. Cenários de referência 28

4.2. Resultados obtidos e modelo proposto 30

Capítulo 5 - Conclusão 33

Bibliografia 35

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de uma rede BPL [8]. 8
Figura 2 - Diagrama de blocos de um injetor BPL [10]. 8
Figura 3 - Exemplo de esquema de uma rede PLC outdoor [10]. 9
Figura 4 - Diagrama de blocos de um modem PLC da Cypress, mostrando a sua ligação a uma rede PLC e a um circuito acoplador [11]. 10
Figura 5 - Exemplo de uma rede LonWorks [19]. 14
Figura 6 - Exemplo de interferência harmónica [19]. 15
Figura 7 - Modelo de canal. 21
Figura 8 - Rede PLC. 22
Figura 9 - Constelação QAM para L = [4 2 7 1] – receção. 22
Figura 10 - Relação sinal-ruído para L = [4 2 7 1]. 23
Figura 11 - Valores médios do BER em relação a l_{L1} e l_{L3}. 23
Figura 12 - valores médios de Br em relação a l_{L1} e l_{L3}. 24
Figura 13 - Variação do BER em relação a l_{L2} e l_{L4}. 24
Figura 14 - Variação de B_r em relação a l_{L2} e l_{L4}. 25
Figura 15 - Variação do valor de BER com l_{L2} e l_{L1+L3}. 25
Figura 16 - Variação do valor de B_r com l_{L2} e l_{L1+L3}. 26
Figura 17 - Variação do valor de BER com l_{L4} e l_{L1+L3}. 26
Figura 18 - Variação do valor de bit rate com l_{L4} e l_{L1+L3} 26
Figura 19 - Cenário 1: apartamento. 28
Figura 20 - Cenário 2: vivenda. 28
Figura 21 - Cenário 3: armazém. 29
Figura 22 - Valores de B_r em diferentes cenários. 29
Figura 23 - Constelação de desmodulação QAM para L = [12 4 12 4]. 30
Figura 24 - Valores de S/N para L = [12 4 12 4]. 30
Figura 25 - Constelação de modulação QAM para L = [20 4 20 4]. 31
Figura 26 - Valores de S/N para L = [20 4 20 4]. 31
Figura 27 - Modelo proposto. 32

Lista de Tabelas

Tabela I - Comparação entre sistemas NB-PLC e BB-PLC [7]. 7
Tabela II - Normas NB e BB- PLC. 10
Tabela III - Características de NB-PLC por débito binário. 12
Tabela IV - Análise dos resultados obtidos em cada cenário. 32

Lista de Siglas e Acrónimos

ANSI	*American National Standards Institute*
AVAC	Aquecimento, Ventilação, Ar-Condicionado.
BPL	*Broadband over Power Line*
BB-PLC	*Broadband Powerline Communication*
BER	*Bit Error Rate*
CA	Corrente Alternada
CENELEC	*Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*
CISPR	*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*
EN	*European Norm*
ERDF	*European Regional Development Fund*
FCC	*Federal Communications Commission*
IEC	*International Electrotechnical Committee*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ISO	Organização Internacional de Normalização
ITU	*International Telecommunications Union*
ITU-T	*ITU's Telecommunication Standardization Sector*
HAN	*Home Area Network*
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
HD-PLC	*High-Definition Powerline Communication*
MF	*Medium Frequency*
NAN	*Near Area Network*
NB-PLC	*Narrowband Powerline Communication*
PLC	*Power Line Communication*
SNR	*Signal to Noise Ratio*
TCP/IP	*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*
VHF	*Very High Frequency*
VLF	*Very Low Frequency*
Wi-Fi	*Wireless Fidelity*

Lista de Símbolos

B_r	Débito binário
L_n	Troço da linha *n*
l_{Ln}	Comprimento do troço da linha *n*
L	Vetor dos comprimentos das linhas L_1, L_2, L_3 e L_4
S/N	Relação sinal-ruído

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é efetuada uma introdução ao tema principal desta dissertação, a comunicação em redes de energia, em particular no que respeita à capacidade de transmissão em sistemas deste tipo, bem como possíveis constrangimentos deste tipo de tecnologia. Por último, é efetuada uma breve descrição do trabalho desenvolvido e apresentada a estrutura desta dissertação.

1.1. Motivação

A comunicação em redes de energia, em inglês PLC (*Power Line Communications*), é uma tecnologia de comunicação que permite o envio de informação através de uma rede elétrica já existente, como a que se encontra, por exemplo, em edifícios de habitação ou de serviços. Este tipo de comunicação possui vantagens em relação a outros, como a comunicação por cabo ou fibra ótica, pois permite utilizar um meio físico já existente: a rede de cabos de baixa tensão, sem necessidade de recorrer à instalação de uma infraestrutura cablada própria. Os sistemas PLC apresentam, no entanto, limitações importantes quando comparados com outros sistemas cablados ou sem fios, uma largura de banda inferior e níveis de ruído habitualmente superiores colocando naturalmente desafios à transmissão de informação com elevados débitos binários [1], [2].

Atualmente existe um interesse crescente na implementação de medição remota de energia, monitorização de qualidade e segurança da rede de distribuição. A base fundamental de todas estas implementações, na rede elétrica, é a possibilidade de implementar uma rede composta por diferentes equipamentos eletrónicos capazes de realizar estas funções, o que é possível através de redes PLC [3]. Uma rede PLC pode ser uma rede “exterior”, ligando uma rede principal a uma habitação, ou uma rede “interior”, onde um sistema PLC liga vários equipamentos a um sistema domótico.

O interesse crescente pela utilização de redes PLC tem atraído grande atenção de fabricantes, industriais e reguladores. Nesta dissertação, dá-se uma visão global dos sistemas de banda larga e banda-estreita atualmente existentes, BB-PLC (*Broadband PLC*), e NB-PLC (*Narrowband PLC*), bem como as suas características [4] e é estudado o efeito da distância na degradação do débito binário obtido em sistemas BB-PLC.

1.2. Trabalho desenvolvido

Nesta dissertação é efetuada uma descrição das redes PLC, de normas e aplicações de redes PLC existentes e sua aplicação.

Com base num modelo do canal PLC já existente, são efetuadas simulações de modo a avaliar qual a relação entre os valores de débito binário obtido e a distância entre os módulos emissor e recetor. O modelo utilizado é baseado em medições efetuadas em ambiente real, permitindo obter resultados relativamente realistas e ser modificado de modo a ser executado com diferentes condições. Este modelo foi desenvolvido em torno das normas 47 FCC parte 15 e CISPR 22, e baseia-se num canal composto por dois modems PLC ligados em duas tomadas elétricas que comunicam entre si.

São considerados diferentes cenários em função da distância entre os dois modems, nomeadamente um apartamento, uma vivenda, e um armazém.

Com base nas simulações efetuadas são obtidos valores do débito binário, taxa de erro de bit e outros parâmetros que permitem avaliar o desempenho do sistema nos cenários de aplicação estudados nesta dissertação.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada da seguinte forma. No capítulo 2 é efetuada uma descrição da tecnologia PLC, como funciona e que aplicações tem no dia a dia das pessoas. Faz-se também uma comparação entre sistemas de banda estreita e banda larga, do tipo de equipamentos que esta tecnologia utiliza e normas atualmente existentes.

No capítulo 3 descrevem-se várias abordagens à modelação do canal PLC comparando as vantagens e desvantagens de cada uma. Após esta análise é efetuada a escolha do modelo mais adequado tendo em conta os objetivos propostos nesta dissertação.

No capítulo 4 é efetuada uma descrição dos cenários de referência considerados para efeito de simulação, são apresentados os resultados de simulação e é efetuada uma análise dos resultados obtidos. Com base nestes resultados é proposto um modelo analítico que permite relacionar o valor do débito binário com a distância entre modems.

Capítulo 2
Comunicação em redes de energia

Neste capítulo é efetuada uma descrição da tecnologia PLC, como funciona e que aplicações tem no dia a dia das pessoas. Faz-se também uma comparação entre sistemas de banda estreita e banda larga, e do tipo de equipamentos que esta tecnologia utiliza.

Para além disso são apresentadas as normas existentes e suas principais características e é efetuada uma descrição do atual estado da arte no que respeita à utilização deste tipo de tecnologias de comunicação.

2.1. Tecnologia PLC

Com múltiplas tomadas elétricas em todas as divisões, a rede de energia doméstica é a rede mais pervasiva numa habitação. Utilizando esta infraestrutura existente para criar uma rede de comunicação de dados traz vários benefícios: em primeiro lugar, não há necessidade de instalar outra infraestrutura cablada ou uma rede de fios, nem modificar redes existentes; em segundo lugar, quase todos os aparelhos que precisem de ser ligados à rede já estão ligados à rede. Portanto, ligar um aparelho à rede PLC torna-se tão simples como ligá-lo a uma tomada, estabelecendo-se uma LAN (*Local Area Network*) que permite interligar diferentes aparelhos num edifício.

Esta tecnologia pode suportar débitos binários médios da ordem dos 200 Mbps, operando em várias frequências entre os 1.7 e 30 MHz [4].

O mercado para soluções PLC para o consumidor pode ser dividido em dois: até à sua casa, exterior, e dentro da sua casa, interior:

- Interior (*indoor*), onde a transmissão é efetuada utilizando a rede elétrica interna de um edifício (prédio, apartamento, etc.), com aplicações em domótica e telecomunicações, como ligação à internet;
- Exterior (*outdoor*), onde a transmissão é efetuada utilizando a rede pública exterior de energia elétrica sendo utilizado para aparelhos de diagnóstico do estado da rede ou medição remota [5].

Em relação à largura de banda, a tecnologia PLC subdivide-se em dois tipos de sistemas [6]:

- PLC de banda estreita (NB-PLC), que pode ser utilizado em *Smart Grids* (uma rede de distribuição de energia que utiliza comunicação digital para medições e detetar mudanças na sua operação, bem com reagir a elas).
- PLC de banda larga (BB-PLC), utilizado em aplicações de domótica e na distribuição de internet, por exemplo, considerando o seu elevado débito binário que pode atingir valores da ordem das várias centenas de Mbps.

Pode-se comparar estes dois tipos de sistemas com base na análise da Tabela I. Como se pode verificar, em NB-PLC opera-se numa gama de frequências de 3 a 148,5 kHz, com um débito binário até 500 kbps, e transmite-se mensagens curtas com uma cobertura pequena, NAN (*Neighbourhood Area Network*). Já em BB-PLC, opera-se numa gama de frequências da ordem das unidades/dezenas de MHz, tem-se débitos binários maiores, na ordem de centenas de Mbps, as mensagens podem ser maiores e a cobertura é mais abrangente (HAN (*Home Area Network*) e NAN).

Tabela I – Comparação entre sistemas NB-PLC e BB-PLC [7].

	NB-PLC	**BB-PLC**
Tecnologias	ITU-T G.hnem, IEEE 1901.2, PRIME, G3 PLC	Homeplug 1.0, IEEE 1901, ITU-T G.hn, Homeplug Green PHY, Homeplug AV, HD-PLC, UPA Powermax
Banda de operação	3-148,5 kHz	1.7 a 50 MHz
Débitos binários	até 200 kbps	de alguns Mbps até centenas de Mbps
Cobertura	NAN	HAN, NAN
Modulação	FSK, PSK, OFDM	OFDM

A tecnologia PLC de banda-estreita e banda-larga opera em diferentes bandas de frequência. A norma EN 50065 (EN 50065-1: 2011), emitida pela CENELEC (*Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*), especifica quatro bandas de frequência para operação de sistemas NB-PLC, utilizadas na Europa:

- Banda A: 3-95 kHz, exclusivo para aparelhos eletrodomésticos;
- Banda B: 95-125 kHz, para qualquer tipo de aplicação;
- Banda C: 125-140 kHz, dedicada a sistemas de rede doméstica;
- Banda D: 140-148.5 kHz, reservada para sistemas de alarme e segurança.

Algumas implementações de BB-PLC utilizam a tecnologia BPL (*Broadband over Power Line*), que é utilizada para transmissão de dados a altas velocidades. Banda larga sobre rede de energia, ou BPL, é o uso de tecnologia PLC para fornecer acesso de internet de banda larga através de uma rede de energia elétrica. Um computador, como qualquer outro aparelho elétrico, precisa apenas de ser ligado a um modem BPL num edifício equipado para ter acesso a internet de alta velocidade. Neste sistema, aparelhos chamados injetores, instalados em subestações, inserem sinais BPL em linhas de média tensão, como se pode ver na Figura 1, preparadas para transportar tensões na ordem das centenas de kV. Como apresentado na Tabela I é utilizada a banda de frequência dos 1.7 aos 50 MHz [6].

Como representado na Figura 1, uma rede BPL é composta por um injetor, que insere um sinal BPL na rede, repetidores, e um extrator, que extrai o sinal BPL da rede de acesso, e efetua a respetiva adaptação à rede doméstica.

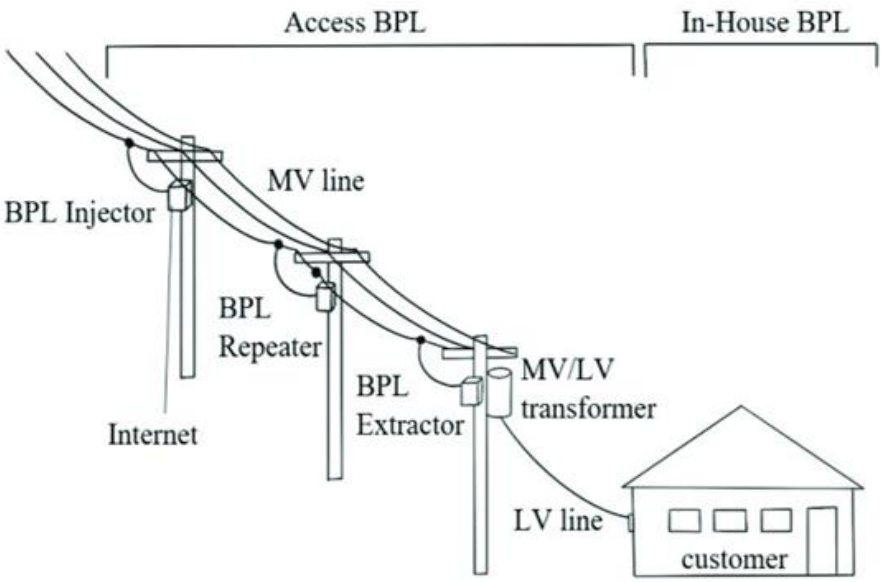

Figura 1 - Exemplo de uma rede BPL [8].

Os injetores são usados para converter o sinal de internet num formato que possa ser transmitido em redes de potência. Esta conversão pode ser feita por OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) ou FSK (*Frequency Shift Keying*) [9].

Estes aparelhos têm quatro secções, como se pode ver na Figura 2: recetor, modulador, transmissor e acoplador. O sinal de internet entra no injetor utilizando um cabo de fibra ligado ao recetor e o transmissor é ligado à linha de média tensão [10].

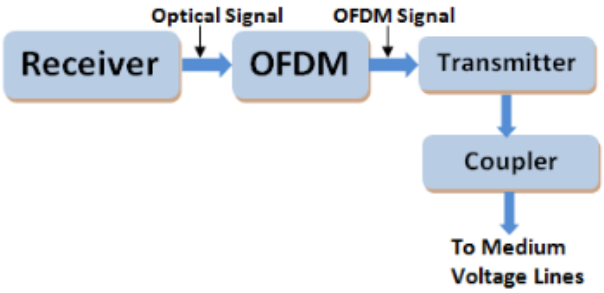

Figura 2 - Diagrama de blocos de um injetor BPL [10].

Em NB-PLC, esta tecnologia é usada em aplicações de domótica, com diversos protocolos como X10 (desenvolvido em 1975) ou LonWorks a utilizá-la nas suas aplicações e produtos.

Uma vantagem das redes PLC é que, como a frequência dos seus sinais é da ordem dos kHz ou MHz, e os sinais elétricos (potência) são da ordem dos Hz (50 a 60 Hz), os dois sinais podem interagir sem problemas de interferência no mesmo meio, note-se no entanto que atualmente o conteúdo harmónico em redes de energia, devido à existência de cargas não lineares, é significativo, o que naturalmente atua como elemento limitador da transmissão dado que conduz naturalmente a uma degradação da relação sinal-ruído em sistemas PLC.

Dentro e fora do local de instalação, a rede elétrica está sujeita a diferentes tipos de interferência e ruído produzido por fontes de alimentação, motores ou até *dimmers*. Outro fator limitativo das redes elétricas é a variação no tempo das suas características: impedância, atenuação e resposta em frequência podem variar significativamente, à medida que aparelhos ligados à rede elétrica são ligados ou desligados.

Outra desvantagem vem do fato do sistema PLC ser um meio compartilhado e estruturado de modo paralelo. Deste modo, todas as casas ligadas numa mesma subestação elétrica partilham a largura de banda disponível. Isto significa que o desempenho da ligação pode variar de acordo com o número de utilizadores.

No que respeita à rede de distribuição, uma rede PLC *outdoor* pode ser dividida numa parte de PLC média tensão (MV-PLC, *Medium Voltage Powerline Communication*) e numa parte de PLC de baixa tensão (LV-PLC, *Low Voltage Powerline Communication*), como se ilustra na Figura 3. A rede MV-PLC utiliza uma linha de 22.9 kV entre a subestação e o transformador, enquanto a rede LV-PLC utiliza uma linha de 110V/220V entre o transformador e a habitação. A rede PLC é composta por vários equipamentos tais como um modem mestre, um modem escravo, um modem repetidor e um *gateway* MV/LV.

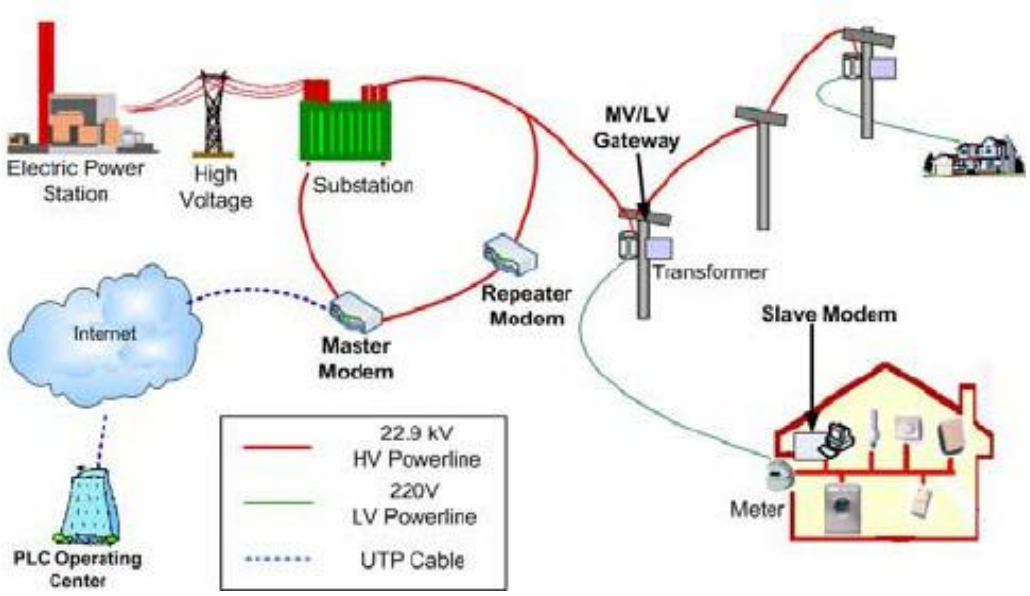

Figura 3 - Exemplo de esquema de uma rede PLC outdoor [10].

A título ilustrativo, na Figura 4, apresenta-se um diagrama de blocos de um modem PLC da empresa Cypress. Para transmitir sinais de internet para a rede elétrica, este modem recebe um sinal de internet que é processado por um transmissor digital (*Digital Transmitter*), modulado em FSK, e amplificado por um amplificador de ganho programável (*Programmable Gain Amplifier*) e envia-o para um circuito acoplador, que faz a ligação com a rede de energia elétrica. Na receção o processo é o inverso, ou seja, o sinal é amplificado, filtrado, desmodulado e finalmente processado.

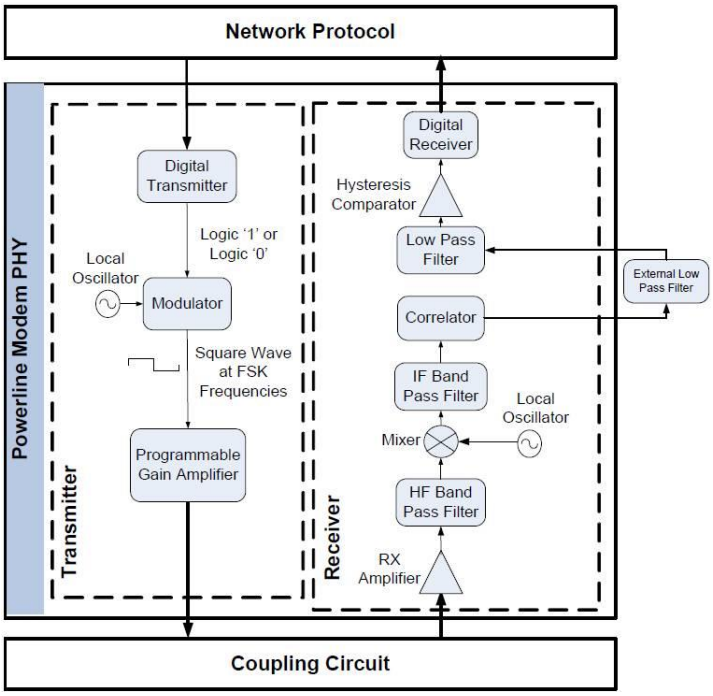

Figura 4 - Diagrama de blocos de um modem PLC da Cypress, mostrando a sua ligação a uma rede PLC e a um circuito acoplador [11].

2.2. Normas e protocolos PLC

Várias entidades de normalização desenvolveram normas que determinam o funcionamento e implementações de tecnologia PLC de banda estreita e banda larga em diversas bandas de frequência, Tabela II.

Tabela II – Normas NB e BB- PLC.

	Região	Norma	Frequência de operação
NB-PLC	União Europeia	EN 50065 [12]	3-148.5 kHz
		IEEE1901.2 [13]	148.5-500 kHz
	EUA	47 CFR §15 [14]	9-490 kHz
	Japão	ARIB STD T-84 [15]	10-450 kHz
	Internacional	IEEE 1901-2020 [13]	< 500kHz
		ITU-T G.hnem (ITU-T G.9902) [16]	< 50MHz
		IEEE P1901.2 [13]	< 50MHz
BB-PLC	União Europeia	CENELEC EN 50561-1 [17]	1.6065 MHz-30 MHz
	EUA	47 CFR §15 [14]	1.705-80 MHz
	Internacional	IEEE 1901-2010 [13]	1.8 - 86 MHz
		ITU-T G.hn (ITU-T G.9960) [18]	1.8 - 86 MHz

A nível europeu a norma EN 50065 regula equipamento elétrico utilizando sinais na gama de frequências de 3 kHz a 148.5 kHz para transmitir informação em sistemas de baixa-tensão, quer na rede elétrica pública quer dentro da habitação de um consumidor. Esta norma especifica as bandas de frequência atribuídas a diferentes aplicações e limites da tensão, entre outros parâmetros relevantes, definindo também métodos de medida.

Nos EUA e no Japão, o espectro reservado para sistemas NB-PLC é regulado pela FCC (Título 47, Parte 15 (47 CFR 15)), indo dos 9 aos 490 kHz, e pela ARIB, que permite que dispositivos PLC funcionem na banda dos 3 aos 500 kHz.

A norma americana 47 CFR §15 (*Code of Federal Regulations*, título 47, parte 15), também referida como FCC parte 15, regula diversos tipos de emissões, desde as que resultam do uso de equipamento doméstico até transmissões de sistemas de telecomunicações, estabelecendo os limites de radiação e interferência que os equipamentos de rádio-frequência podem emitir sem interferir com outros sistemas de telecomunicações, incluindo sistemas PLC. Esta norma está focada em compatibilidade eletromagnética (CEM), ou seja, a capacidade dos equipamentos elétricos e eletrónicos para funcionarem adequadamente e da forma prevista no ambiente eletromagnético a que se destinam, sem produzirem perturbações eletromagnéticas que provoquem interferências nos outros equipamentos que lhes estão próximos. Deste modo, a FCC parte 15 regula níveis de emissões eletromagnéticas e limites de interferência. As regulações da FCC Parte 15 foram desenvolvidas para serem compatíveis com as regulações europeias CISPR. Em geral, as duas regulações estão alinhadas entre si nas suas características principais.

A norma japonesa ARIB STD T-84, de 2002, é uma norma criada pela ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*) de modo a regular métodos de medida e requerimentos técnicos para equipamentos PLC.

A norma IEEE 1901-2020, estabelece comunicações para aparelhos de rede de energia de banda estreita de baixa frequência, abaixo dos 500 kHz, por meio de redes de energia de corrente contínua ou de corrente alternada.

Para NB-PLC até 50 kHz duas normas foram desenvolvidas, a ITU-T G.hnem (ITU-T G.9902) e a IEEE P1901.2 (IEEE 1901.2-2013), que disponibilizam débitos binários da ordem de centenas de kbps.

No espectro de frequências reservado para sistemas BB-PLC, as tecnologias BB-PLC de banda larga operam em frequências acima de 1.8 MHz e até 86 MHz, podendo atingir taxas de 1 Gbps em redes domésticas. Neste caso, foram definidos dois padrões mundiais, nomeadamente ITU-T G.hn (ITU-T G.9960) e IEEE P1901 (IEEE 1901-2010).

A norma IEEE 1901-2010, refere-se aparelhos de comunicação a alta velocidade (superior a 100 Mbps) via redes de energia elétrica, também chamados de banda larga sobre a rede de energia (BPL). Esta norma utiliza frequências abaixo dos 100 MHz, e é utilizável por qualquer classe de aparelhos BPL, incluindo aparelhos utilizados para redes LAN, aplicações

inteligentes de energia ou aplicações de plataformas de transporte. Esta norma é focada no uso eficiente e balançado do canal de PLC por todas as classes de aparelhos PLC.

A tecnologia NB-PLC é habitualmente classificada como NB-PLC de alto debito binário e de baixo débito binário, Tabela III.

Tabela III - Características de NB-PLC por débito binário.

	NB-PLC de baixo débito binário	NB-PLC de alto débito binário
Portadora	Única	Múltipla
Débito binário	Alguns kbps	De dezenas até 500 kbps
Protocolo	LonWorks [19], X10 [20], Homeplug [21], CEBus, IEC 61334 [22]	ITU-T G.hn [16][18], IEEE P1901.2 [13], PRIME [23]

A tecnologia NB-PLC de baixo débito binário tem uma onda portadora única, um débito binário a rondar os kbps, e é utilizada em protocolos como X10, LonWorks, Homeplug, CEBus ou IEC 61334.

A tecnologia NB-PLC de alto débito binário utiliza portadoras múltiplas, apresenta débitos binários que podem atingir várias centenas de kbps e é utilizada por normas como ITU-T G.hn, IEEE P1901.2 ou PRIME.

Entre vários protocolos que fazem uso da tecnologia PLC, destacam-se pela sua popularidade:

- **O X10**, um protocolo criado em 1975 pela empresa Pico Electronics em Glenrothes, Escócia, de modo a permitir o controlo remoto de diferentes aparelhos e eletrodomésticos [20]. Este protocolo utiliza módulos para substituir interruptores e casquilhos normais. Com este sistema, um aparelho pode ser controlado localmente e remotamente, por via de teclados, interfaces de computador, temporizadores e comandos. Algumas das usas aplicações incluem a operação automática de estores e cortinas ou o controlo da iluminação de um espaço a partir de diferentes pontos, sem ter a necessidade de instalar cablagem adicional.

  Como os circuitos de iluminação e da rede elétrica de um edifício tendem a originar do mesmo ponto, um aparelho de controlo numa parte de um edifício pode controlar aparelhos noutra parte do edifício, o que significa que os controladores não necessitam de ser ligados diretamente aos aparelhos que se quer controlar.

  Os sinais de controlo podem ser gerados por várias fontes, incluindo controladores *plug-in*, recetores infravermelhos ou interfaces de computadores, e são detetados pelos controladores. O protocolo X10 também possui um controlador para verificar o estado de um aparelho (ligado/desligado), embora seja uma capacidade que não é suportada por todos os seus módulos.

  Como todos os controladores e aparelhos estão ligados à mesma rede de energia, uma

implementação do protocolo X10 é capaz de determinar para que aparelho deve dirigir um determinado código de controlo utilizando um código de casa e um código de unidade, ambos incluídos em cada trama do sinal X10.

Cada aparelho ou lâmpada está preparado para responder a uma única combinação de código casa/código de unidade. O código de casa foi originalmente concebido para distinguir habitações adjacentes que utilizam o protocolo X10 sem haver interferência de sinais, devido a uma partilha da mesma rede de energia. Se não ocorrer essa situação, o código de casa pode se utilizado em conjunto com o código de unidade para determinar a que aparelho se ligar, aumentado de 16 para 256 o número de aparelho ligados á rede X10 que podem ser controlados independentemente numa dada instalação deste sistema.

Quando o sistema é instalado, cada aparelho controlado é configurado para responder a um dos 256 endereços possíveis.

O protocolo pode transmitir uma mensagem que diz “selecionar código D5”, seguido por “desligar”, que comanda a unidade D5 a desligar. Várias unidades podem ser endereçadas antes de ser dado o comando de modo que este seja aplicado a vários aparelhos.

- **CEBus**, abreviatura de *Consumer Electronics Bus*, também conhecido por EIA-600, um conjunto de normas e protocolos de comunicação para transmissão de comandos e dados entre aparelhos.

  Em 1984, membros da Aliança de Indústrias Eletrónicas (EIA) necessitavam de uma norma com maiores capacidades que a tecnologia X10, tendo desenvolvido o protocolo CEBus para expandir as suas capacidades. A norma CEBus foi publicada em setembro de 1992.

  O CEBus é um conjunto de documentos de especificação de arquitetura aberta que define protocolos para que os produtos comuniquem por meio de condutores elétricos, par trançado, cabo coaxial, infravermelhos, rádio-frequência e fibra ótica. O padrão CEBus foi desenvolvido com base num protocolo desenvolvido pela GE (*General Electric*). Este trabalho foi posteriormente transferido para o EIA.

  O protocolo CEBus inclui aspetos como espalhamento espetral o que envolve alterar a frequência de trabalho de forma aleatória durante o processo de transmissão. A taxa de transmissão é variável, dependendo de quantos caracteres são um e quantos são zero sendo o débito binário médio de cerca de 7.5 kbps.

- **LonWorks** (*local operating network*) é uma plataforma de rede criada especificamente para atender às necessidades de aplicativos de controlo. A plataforma é baseada num protocolo criado pela *Echelon Corporation* e é usado para a automação de várias funções dentro de edifícios, como iluminação e AVAC, Figura 5.

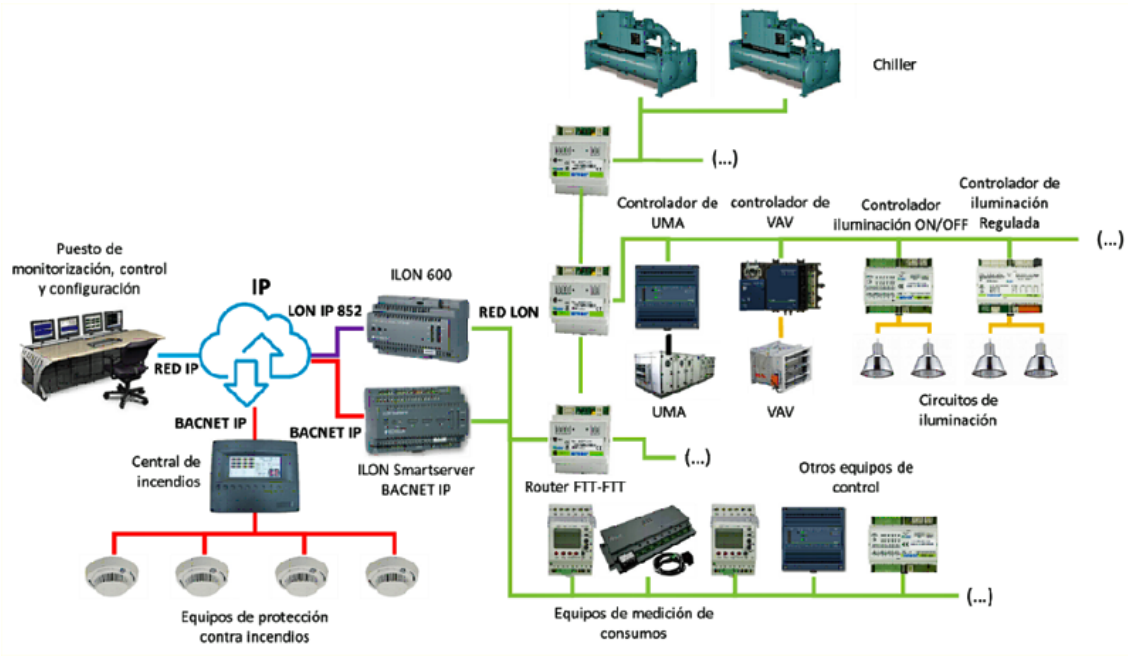

Figura 5 - Exemplo de uma rede LonWorks [19].

2.3. Constrangimentos da tecnologia PLC

A rede de energia elétrica não foi desenhada especificamente para transmissão de dados e mostra ser um ambiente hostil para esse propósito, com impedâncias variáveis, ruído e elevados valores de atenuação dependentes da frequência do sinal, que dificultam a comunicação neste meio.

Um sistema PLC, estando intrinsecamente ligado à rede elétrica, está sujeito a uma série de problemas a que a mesma está sujeita. Um desses problemas é a existência de ruido harmónico na rede elétrica: com a criação de componentes elétricos semicondutores, começaram a surgir problemas de sobrecargas nas centrais elétricas. Estas sobrecargas eram causadas por semicondutores utilizados em eletrodomésticos, como televisões ou aparelhos micro-ondas; devido ao seu comportamento não linear, em que a relação I/V (corrente/tensão) não segue um modelo linear, estes semicondutores distorcem o sinal de tensão, que deixa de ser sinusoidal e passa a conter ondas harmónicas, ondas sinusoidais cuja frequência é um múltiplo da frequência do sinal original.

Devido à prevalência deste tipo de componentes, este ruído harmónico interfere em sistemas elétricos e em tecnologias que se baseiam neles, incluindo os sistemas PLC. Esta interferência que ocorre em sistemas PLC, prejudica a qualidade do sinal PLC, pondo em causa a qualidade da transmissão e limitando o débito binário máximo neste tipo de sistemas. No caso ilustrado na Figura 6, um conversor de energia elétrica, contento cargas não lineares, injeta ruido harmónico no canal PLC (rede elétrica), o que prejudica o sinal transmitido.

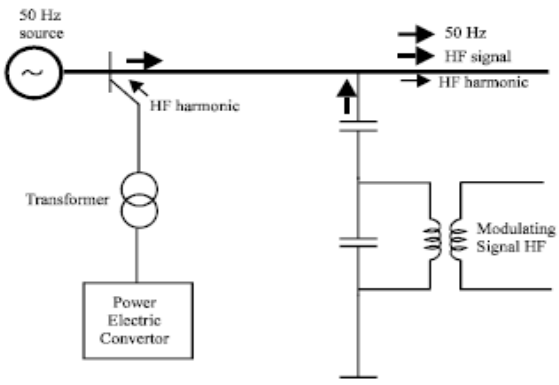

Figura 6 - Exemplo de interferência harmónica [19].

Capítulo 3
Simulação do canal PLC

Neste capítulo é efetuada uma descrição das várias abordagens existentes para modelação do canal PLC, é apresentado o modelo de canal utilizado nas simulações e são apresentados resultados ilustrativos dos resultados obtidos.

3.1. Estado da arte

Existem múltiplos estudos que abordam a modelação do comportamento do canal PLC. De acordo com [24] existem duas abordagens para a modelação de um canal PLC, *Top-down* e *Bottom-up*.

Na abordagem *Top-down*, o modelo é desenvolvido baseado em medições físicas: em diferentes locais de aplicação são efetuadas medidas no canal PLC, e a partir dessas medidas é elaborado um modelo teórico. Uma desvantagem desta abordagem é que é necessário fazer um elevado número de medidas em diferentes cenários para poder ter um modelo que abranja diferentes cenários. Já uma vantagem é a facilidade em criar o modelo sem a necessidade de efetuar uma pesquisa e estudo teórico detalhado acerca dos aspetos físicos envolvidos na transmissão de sinais neste tipo de sistemas.

As múltiplas medidas em diferentes cenários são feitas para assegurar que o modelo consegue dar resultados mais diversos, dado que resultados de um cenário específico só se "aplicam" a esse cenário, sendo diferentes de outro cenário estudado, dificultando a generalização do modelo.

Esta abordagem é vantajosa na medida em que os modelos desenvolvidos são geralmente simples e fáceis de utilizar. Com base nos resultados estatísticos derivados das medições, o canal e até mesmo o desempenho do sistema podem ser facilmente descritos e implementados analiticamente.

A desvantagem mais significativa desta abordagem é a sua baixa flexibilidade. O modelo e seus parâmetros derivados para uma determinada rede e faixa de frequência não podem ser aplicados a outras redes e faixas de frequência.

Na abordagem *Bottom-Up*, o modelo é criado analiticamente a partir de fórmulas que traduzem comportamentos teóricos. Esta abordagem requer um conhecimento completo da rede de energia a modelar, incluindo a sua topologia, cablagem e impedâncias de carga dos terminais. Esses elementos de rede são modelados matematicamente para que possam ser incorporados para criar o canal. A teoria das linhas de transmissão, originalmente desenvolvida para descrever a propagação de ondas eletromagnéticas num troço de linha de transmissão é utilizada como base de desenvolvimento deste tipo de modelos. Uma vantagem desta abordagem é a facilidade em modificar e personalizar o modelo para um tipo de cenário específico, podendo o mesmo ser aferido à posteriori com base numa abordagem *Top-down*, baseada em medidas.

3.1.1. Abordagens top-down

Em [25] uma descrição estatística do canal é efetuada com base em medições na faixa dos 0 aos 100 MHz. Mostra-se que o perfil de atraso de potência tem uma distribuição estatística que pode ser bem descrita pelas distribuições *Weibull* e *Gauss*. Verifica-se também que a atenuação do canal tem um comportamento linear em função da frequência e que a atenuação

média do canal e o espalhamento do atraso são inversamente correlacionadas. Com base nas descrições estatísticas efetuadas, é proposto um modelo de canal e é demonstrada a coerência entre os resultados obtidos e resultados de medidas.

Em [26] é apresentada uma campanha de medições de canais PLC efetuada em cinco habitações. Este estudo adota o formato de um modelo de canal multipercurso e ajusta-o às medidas obtidas para obter os parâmetros do canal. Com estes parâmetros é gerada uma matriz de canal.

Em [21], é estudada a influência de ruído em sinais PLC. Este estudo mostra que o comportamento de canais PLC pode ser representado com base num modelo multipercurso, mesmo com pouco conhecimento da topologia da rede, no entanto, utiliza como base um modelo baseado em medições físicas, o que dificulta a sua generalização e a sua replicação para utilização nesta dissertação.

3.1.2. Abordagens bottom-up

Em [27] é efetuada uma análise do efeito que a presença de ruído tem nos valores de relação sinal-ruído a partir de um modelo de simulação simplificado da rede elétrica, limitando assim a sua aplicabilidade e precisão dos resultados obtidos.

Em [28] é apresentado um método de calculo analítico que pode ser utilizado para calcular os componentes multipercurso de um canal PLC. Este método calcula todas as características de transmissão da rede, podendo ser utilizado no desenvolvimento de algoritmos para otimizar a atuação do sistema. O método proposto é aplicado a um exemplo de rede para ilustrar a sua capacidade em explicar o comportamento temporal da rede e em estimar parâmetros do canal.

Em [29] é apresentado um simulador de canal PLC. Neste artigo é mostrado que as relações fundamentais da linha de transmissão multicondutora são uma extensão em forma de matriz das equações da linha de transmissão de dois condutores, e permitem o cálculo da função de transferência do canal. Assim, qualquer rede complexa pode ser remapeada para obter uma representação simples em termos de unidades elementares.

Em [30] é apresentada uma abordagem para modelar a função de transferência de linhas de energia elétrica em sistemas BB-PLC. Nesta abordagem, a linha de energia é aproximada como uma linha de transmissão e dois parâmetros intrínsecos, a impedância característica e a constante de propagação, são obtidos. Utilizando estes parâmetros intrínsecos, são obtidas as características de transferência duma rede multi-ramal. O modelo foi verificado com medições práticas realizadas em redes elétricas reais. É demonstrado que o modelo determina com precisão as características da linha sob diferentes configurações de rede.

3.2. Modelo utilizado

Em [31] é apresentado um modelo MATLAB completo de modo a permitir simular o comportamento do canal em função dos comprimentos dos troços que o compõem. Este modelo está desenvolvido de modo a permitir simular vários aspetos da transmissão e geração de um sinal PLC, tal como a geração de ruído, a codificação QAM adaptativa, e a modulação OFDM.

De um ponto de vista técnico, este modelo foi desenvolvido de modo a permitir não só simular fielmente o comportamento de um canal PLC, como também a permitir simular o tipo de transmissão e interferência a que um sinal PLC está sujeito em condições "reais" de utilização. Para esse efeito o modelo foi aferido com base em medições reais efetuadas em vários ambientes

Face a outros modelos descritos e estudados nos artigos anteriormente mencionados, foi decidido utilizar este modelo nesta dissertação devido às várias vantagens que este apresenta face a outros modelos:

- encontra-se rigorosamente documentado em vários documentos; neles, estabelece-se as bases teóricas da codificação OFDM, limites legais de interferência, bem como modelos de transmissão;
- ao contrário de outros encontrados na literatura, contém múltiplas características que não estão presentes num modelo de canal PLC mais simples, nomeadamente a sua capacidade de simular ruído realista e a implementação de processos de codificação e transmissão de acordo com o previsto em normas existentes;
- foi implementado numa ferramenta de simulação, neste caso o programa *MATLAB/ Simulink*, permitindo a sua fácil utilização;
- todo o código fonte está disponível, e é facilmente modificável, o que permite a sua utilização no contexto desta dissertação.

Este modelo está parametrizado para com base na operação de aparelhos classe B da norma FCC Parte 15, classe reservada a aparelhos de uso doméstico. Deste modo, deve operar dentro dos limites definidos na norma CISPR 22, dado que estas duas normas, descritas no Capítulo 2, regulam as mesmas tecnologias e foram concebidas para serem usadas em simultâneo em mercados diferentes (neste caso, o mercado europeu e o norte americano).

O funcionamento deste modelo é descrito no diagrama de blocos apresentado na Figura 8.

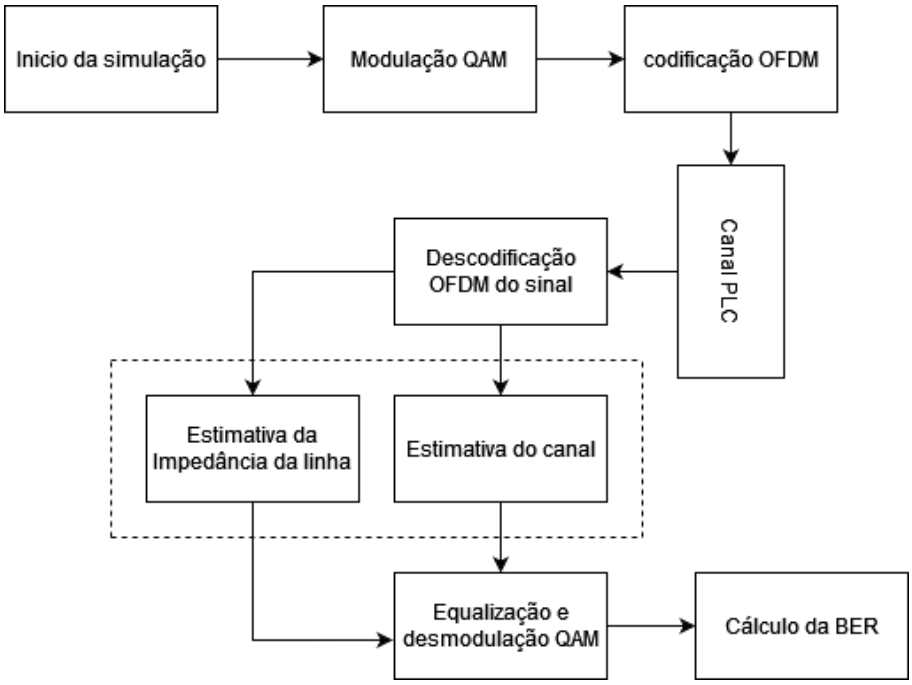

Figura 7 – Modelo de canal.

Como ilustrado, o modelo funciona da forma que a seguir se descreve. No início da simulação é gerado um sinal PLC aleatório cuja tensão e corrente estão limitadas por valores da norma FCC parte 15. O sinal utiliza modulação QAM adaptativa (cujo número de níveis de quantificação depende da relação sinal-ruído no canal) e codificação OFDM.

Na receção, o sinal OFDM é descodificado e é obtida uma estimativa da impedância da linha e dos parâmetros do canal os quais são utilizados para equalização e posterior desmodulação do sinal QAM.

Como parâmetros de saída o simulador fornece informação relativa a taxa de erro de bit (BER) e outros parâmetros relevantes, nomeadamente, débito binário obtido, constelações das modulações, relação sinal-ruido e outros parâmetros relevantes.

O modelo de rede implementado é composto por quatro linhas tal como ilustrado na Figura 8. Estas linhas são denominadas por L1, L2, L3 e L4, e asseguram a ligação entre dois modems (L1 e L3) e duas tomadas elétricas às quais não está ligado qualquer equipamento (L2 e L4). Pretende-se nesta dissertação avaliar o desempenho da comunicação entre modems em função dos comprimentos das linhas, l_{L1} e l_{L3} para os comprimentos das linhas dos modems, e l_{L2} e l_{L4} para os comprimentos das linhas das tomadas.

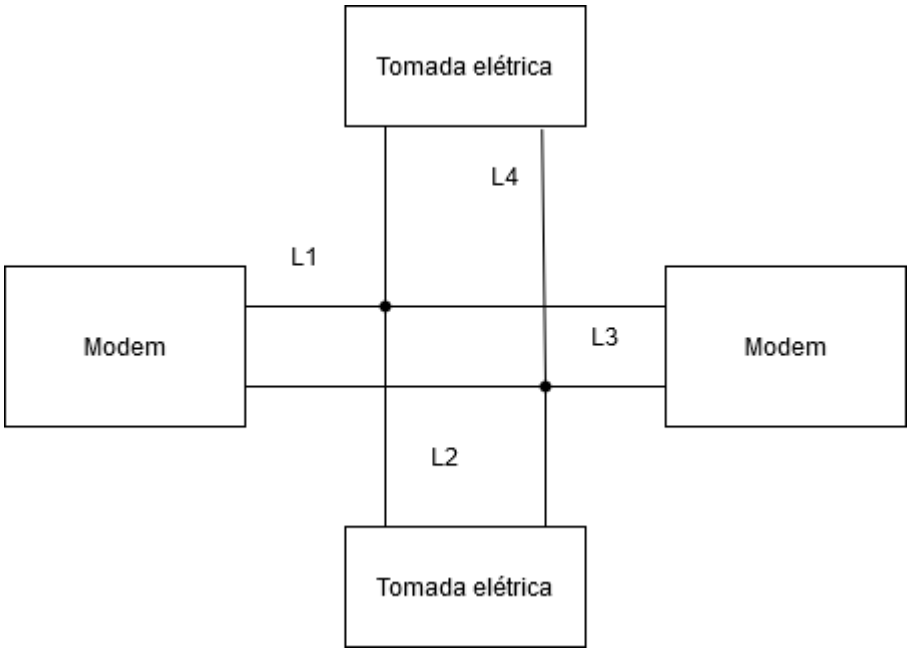

Figura 8 – Rede PLC.

De modo a avaliar o funcionamento do modelo e a dependência dos resultados obtidos dos valores de l_{L1}, l_{L2}, l_{L3} e l_{L4}, foram efetuadas diversas simulações para valores de comprimento dos troços L1, L2, L3 e L4, representados como L= [l_{L1}, l_{L2}, l_{L3} e l_{L4}]. A título exemplificativo, nas Figuras 9 e 10 apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos (constelação QAM na receção e relação sinal-ruído) para L = [4 2 7 1].

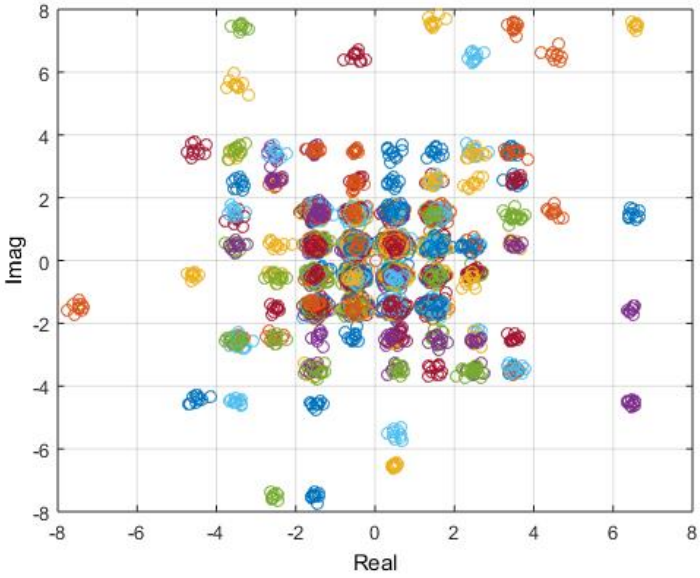

Figura 9 - Constelação QAM para L = [4 2 7 1] – receção.

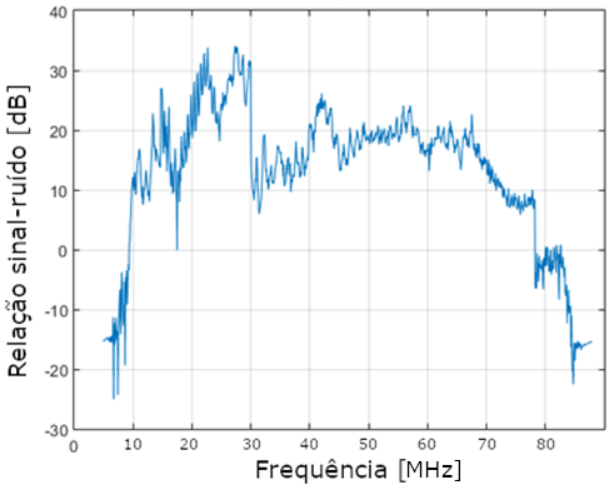

Figura 10 – Relação sinal-ruído para L = [4 2 7 1].

Como se pode observar por análise da figura 9, nestas condições, parte significativa dos símbolos transmitidos são modelados em 4, 16 e 64-QAM (mancha central na figura 9) sendo que pontualmente existem condições para transmissão em 256-QAM.

A análise da Figura 10 evidencia a dependência do valor da relação sinal-ruído em função da frequência, verificando-se que a mesma não é uniforme em toda a banda, afetando de forma diferente as condições de transmissão em cada portadora OFDM.

Modificando os ficheiros do simulador de modo a poder correr múltiplas simulações variando as distâncias entre modems, l_{L1} e l_{L3} pretendeu-se avaliar a influência destes parâmetros nos valores taxa de erro de bit, BER, e débito binário, B_r, obtidos, apresentados nas figuras 11 e 12, respetivamente.

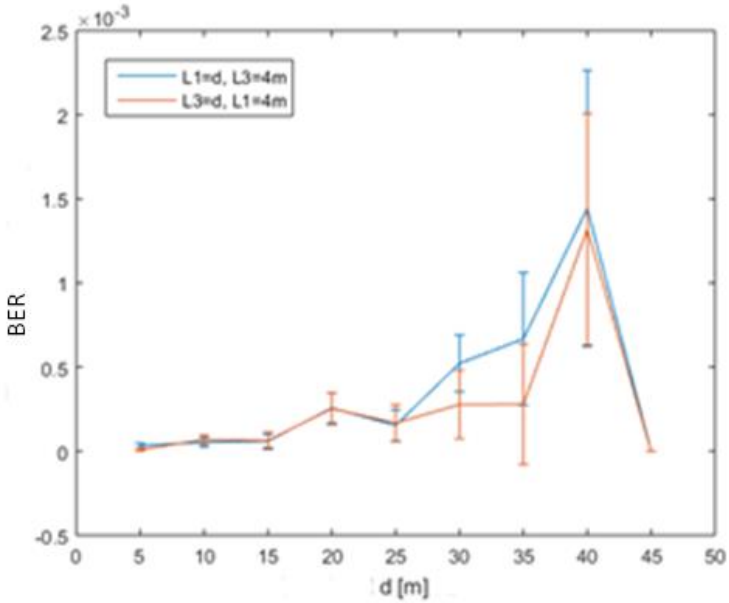

Figura 11 - Valores médios do BER em relação a l_{L1} e l_{L3}.

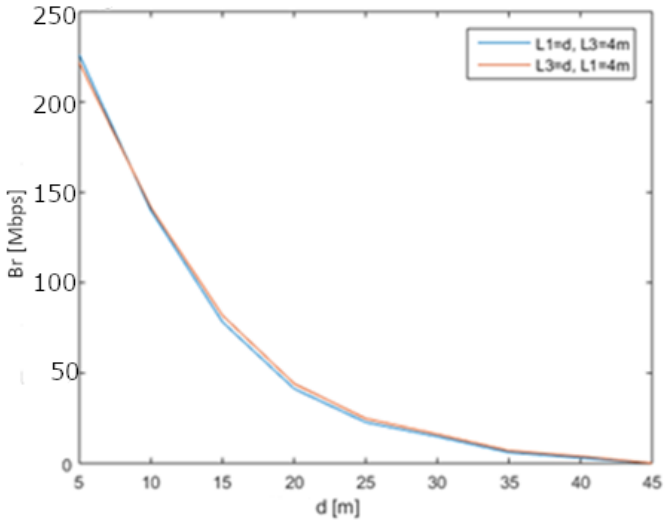

Figura 12 - valores médios de Br em relação a l_{L1} e l_{L3}.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o valor de BER aumenta com o aumento da distância entre modems, não existindo, no entanto, diferenças significativas em função da variação de, l_{L1}ou l_{L3} com o outro parâmetro fixo, Figura 11. Note-se que para *d* = 45 m, o que corresponde a uma distância entre modems de 49 m o valor de BER na Figura 11 é zero o que na realidade não corresponde a uma situação real dado que nestas condições o valor de B_r tende a ser praticamente nulo pelo que o simulador não efetua o cálculo do BER.

Como esperado, o valor de B_r, diminui com o aumento da distância entre modems, Figura 12.

Analisando a dependência dos resultados com a variação de l_{L2} e l_{L4} (distâncias entres tomadas), que se encontram ilustrados nas figuras 13 e 14, verifica-se que os mesmo não sofrem alterações significativas e as curvas obtidas para a variação de l_{L2} ou l_{L4} com o outro parâmetro fixo, encontram-se paticamente sobrepostas ou são mesmo coincidentes no caso da Figura 14.

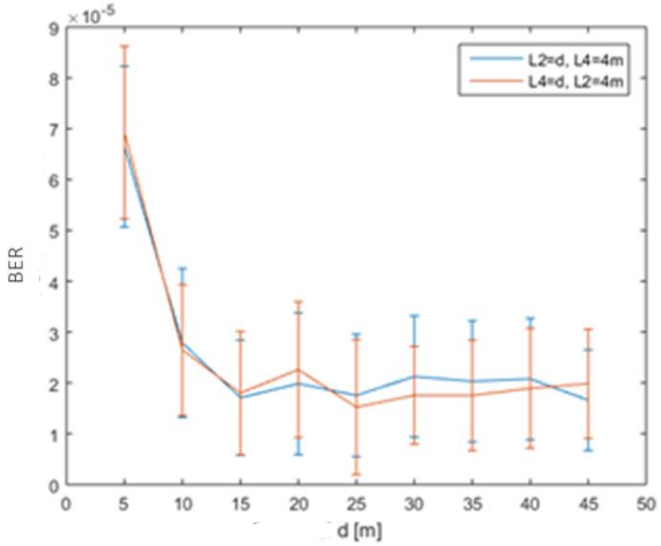

Figura 13 - Variação do BER em relação a l_{L2} e l_{L4}.

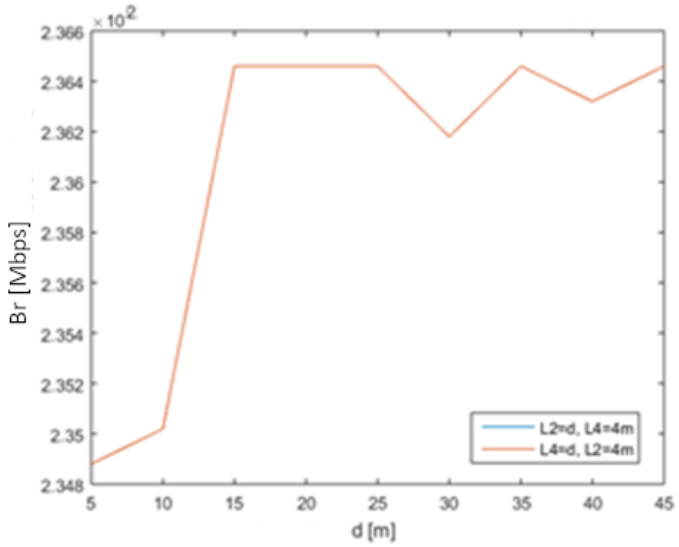

Figura 14 - Variação de B_r em relação a l_{L2} e l_{L4}.

Analisando a influência que L4 e L2 têm na transmissão em conjunto com a distância entre modems, foram feitos dois conjuntos de simulações, um a variar os valores de l_{L2} e l_{L1+L3}, figuras 15 e 16, e outro a variar os valores de l_{L4} e l_{L1+L3}, figuras 17 e 18, onde l_{L1+L3} é definida como:

$$l_{L1+L3} = l_{L1} + l_{L3} \qquad (3.1)$$

Com base nestas simulações, verifica-se que os valores de l_{L2} e l_{L4} não têm uma influência significativa na evolução dos valores de B_r e BER para um dado valor de l_{L1+L3}.

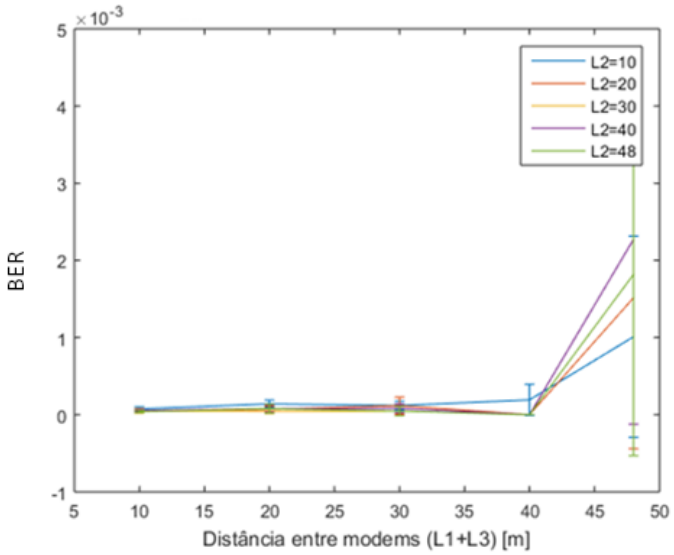

Figura 15 - Variação do valor de BER com l_{L2} e l_{L1+L3}.

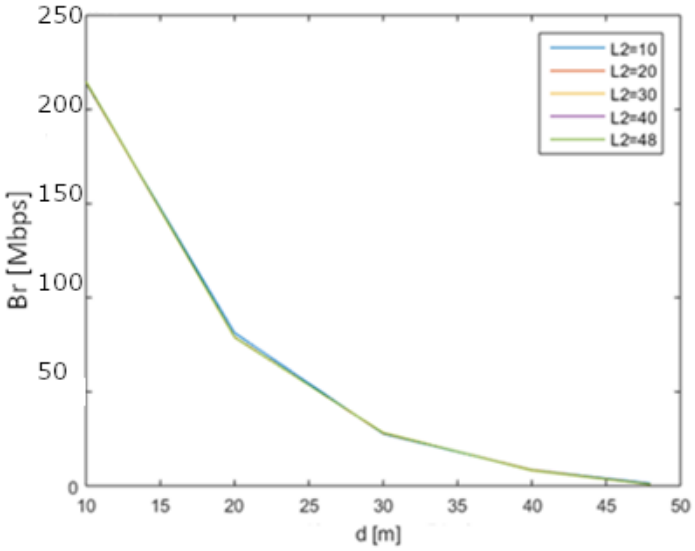

Figura 16 - Variação do valor de B_r com l_{L2} e l_{L1+L3}.

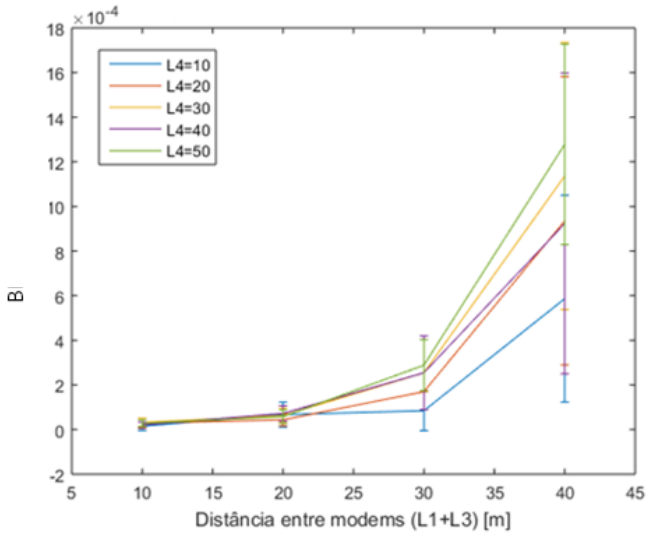

Figura 17 - Variação do valor de BER com l_{L4} e l_{L1+L3}.

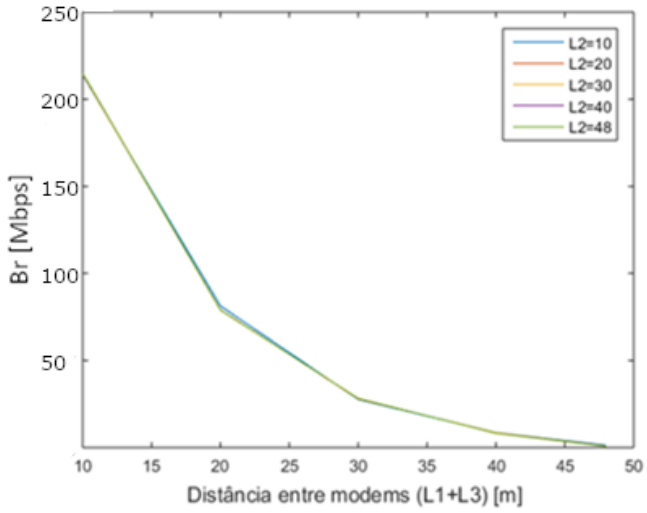

Figura 18 - Variação do valor de bit rate com l_{L4} e l_{L1+L3}

Capítulo 4
Resultados Obtidos

Neste capítulo faz-se uma análise do canal PLC, analisando seu comportamento em diferentes cenários de aplicação, um apartamento, uma vivenda e um armazém, correspondendo a situações reais de funcionamento e diferentes valores de distância entre modems.

Com base nos resultados obtidos é proposto um modelo analítico que permite avaliar o valor do débito binário obtido em função da distância entre modems.

4.1. Cenários de referência

De modo a poder fazer uma análise do comportamento do canal PLC em contextos reais, foram efetuadas diferentes simulações em que as distâncias entre modems e entre tomadas correspondem a valores encontrados em cenários reais.

- Um apartamento composto por uma sala e dois quartos, onde é feita transmissão a curtas distâncias, em que a distância máxima entre os modems é da ordem dos 20 metros, Figura 19.
- Uma vivenda de dimensão média, onde é feita transmissão a médias distâncias, em que a distância máxima entre os modems pode atingir os 30 metros, Figura 20.
- Um armazém, onde é feita uma transmissão a longas distâncias, em que a distância média entre os modems pode atingir os 50 metros, Figura 21.

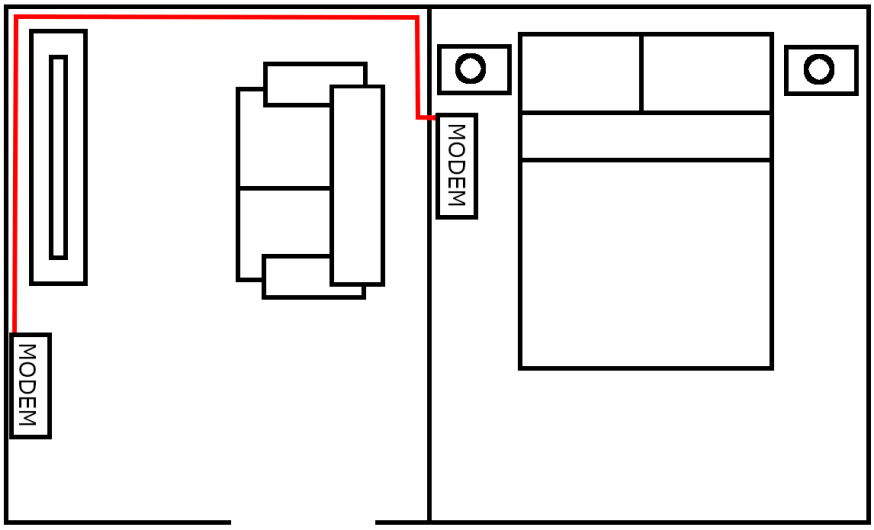

Figura 19 - Cenário 1: apartamento.

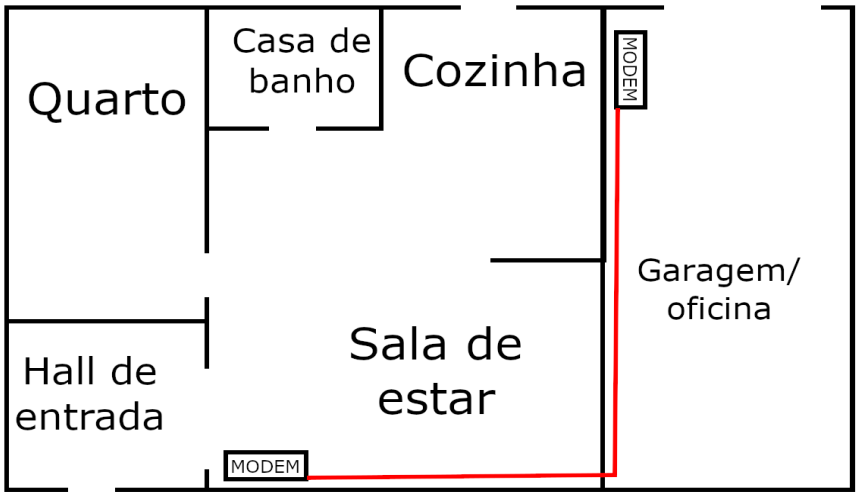

Figura 20 - Cenário 2: vivenda.

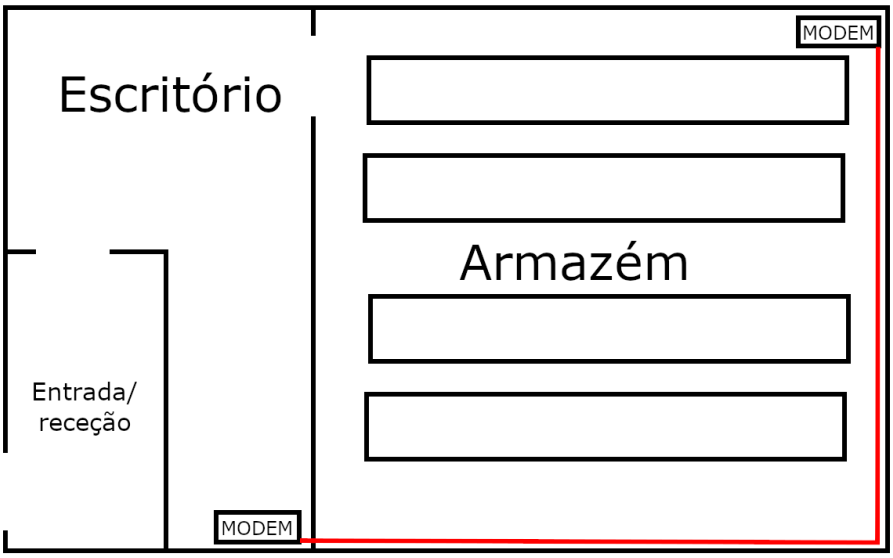

Figura 21 - Cenário 3: armazém.

Para os diferentes cenários de referência apresenta-se na Figura 22 a gama de valores de débito binário obtidos.

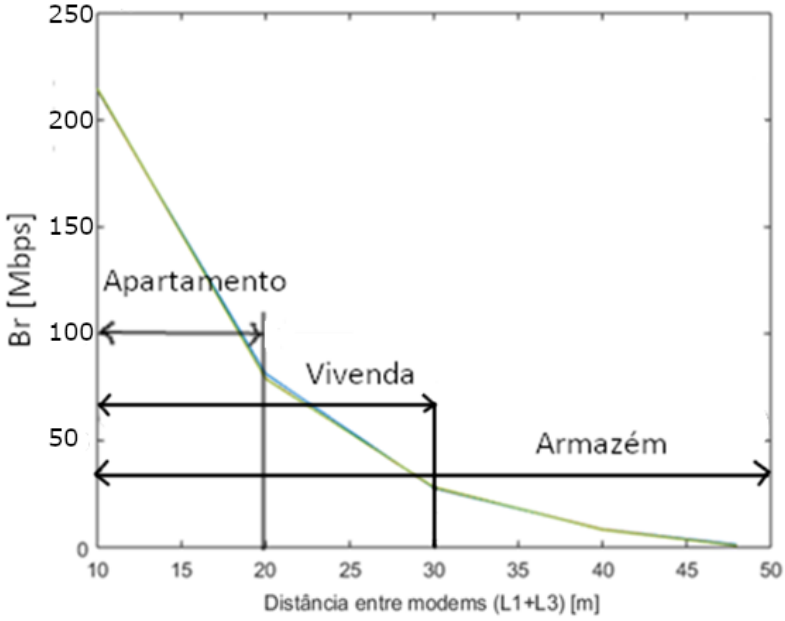

Figura 22 – Valores de B_r em diferentes cenários.

Num cenário com distâncias curtas entre modems (apartamento), e valores de l_{L1+L3} inferiores a 20 metros, o valor de B_r evidencia uma grande variação associada a variação do valor de distância entre modems, l_{L1+L3}.

Num cenário com médias distâncias entre modems, como o caso da vivenda e valores de l_{L1+L3} entre os 20 e os 30 metros, os valores de B_r sofrem uma descida menos acentuada com o aumento da distância.

A longas distâncias entre modems (armazém), com valores de l_{L1+L3} entre os 30 e os 50 metros, os valores de B_r são inferiores aos obtidos nos outros cenários, no entanto, a sua dependência com a variação de l_{L1+L3} é inferior.

4.2. Resultados obtidos e modelo proposto

A título ilustrativo, nas figuras 23 a 26 apresentam-se resultados das constelações QAM obtidas e valores da relação sinal-ruído para l_{L1+L3}=16 m e l_{L1+L3}=24 m.

Nos resultados apresentados verifica-se mais uma vez o funcionamento da modulação QAM adaptativa. No caso l_{L1+L3}=16 m são utlizadas modulações 4, 16 e 64 QAM para uma distância superior, l_{L1+L3}=24 m, apenas a modulação 4-QAM é utilizada dado que se verifica uma degradação de cerca de 10 dB no valor máximo da relação sinal-ruído relativamente à situação anterior.

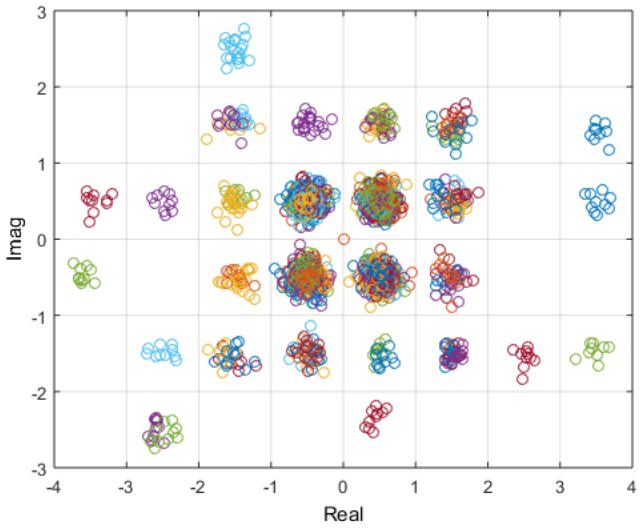

Figura 23 - Constelação de desmodulação QAM para L = [12 4 12 4].

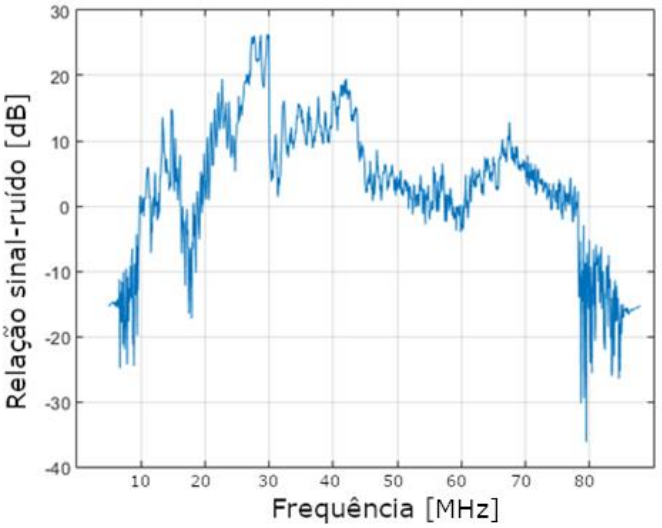

Figura 24 - Valores de S/N para L = [12 4 12 4].

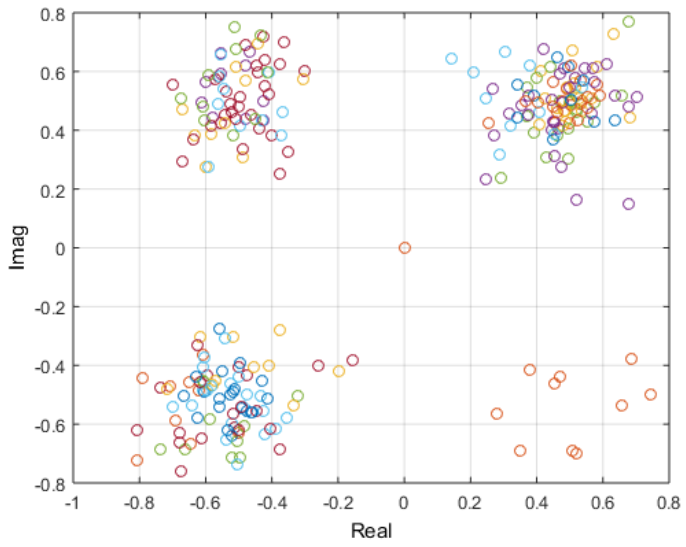

Figura 25 – Constelação de modulação QAM para L = [20 4 20 4].

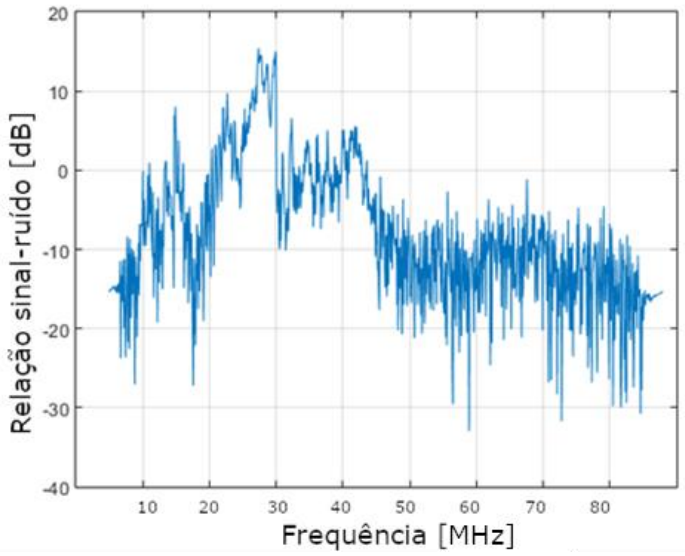

Figura 26 - Valores de S/N para L = [20 4 20 4].

Por forma a avaliar os valores de débito binário, B_r, em função da distância l_{L1+L3} foram realizadas nove simulações para a gama de distâncias consideradas nos diversos cenários, e um incremento entre simulações Δl_{L1+L3}=5 m.

Na Tabela IV apresentam-se os valores máximo, mínimo, médio e respetivos desvio padrão dos valores de B_r, obtidos em cada tipo de cenário. O valor máximo de B_r corresponde a uma distância l_{L1+L3}=10 m por se considerar que valores inferiores de distância são pouco comuns neste tipo de cenários. Importa no entanto referir que para distâncias significativamente inferiores, por exemplo l_{L1+L3}=1 m, o valor de B_r pode atingir valores da ordem dos 500 Mbps.

Tabela IV - Análise dos resultados obtidos em cada cenário.

Cenário	B_r min. [Mbps]	B_r máx. [Mbps]	Valor médio [Mbps]	Desvio padrão [Mbps]
Apartamento	71	210	148	74
Vivenda	19		102	83
Armazém	< 1		59	> 77

Note-se que, no caso do armazém o valor do desvio padrão de R_b é superior ao seu valor médio, o que em termos práticos significa que poderão existir situações em que é impossível estabelecer ligação entre ambos os modems.

Com base nos resultados de simulação foi obtido através de regressão linear um modelo analítico que permite relacionar o valor de débito binário obtido, R_b, com a distância entre modems l_{L1+L3}, sendo dado por:

$$B_{r[\mathrm{Mbps}]} = -0.007 \cdot l_{L1+L3\,[\mathrm{m}]}{}^{3} + 0.83 \cdot l_{L1+L3\,[\mathrm{m}]}{}^{2} - 33.55 \cdot l_{L1+L3\,[\mathrm{m}]} + 465.60 \qquad (4.1)$$

O resultado obtido, que corresponde a um fator de regressão R^2=0.9994, encontra-se representado na Figura 27.

O modelo obtido é válido para 9 m < l_{L1+L3} < 49 m, o abrange a gama de distâncias habitualmente encontrada em aplicações PLC em ambientes residenciais e industriais.

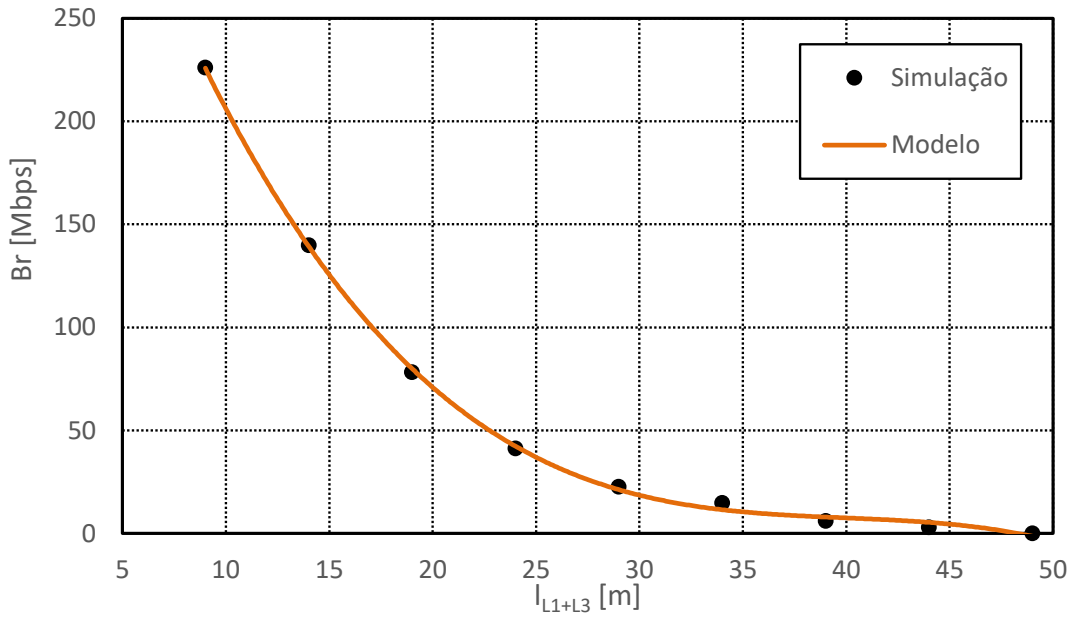

Figura 27 – Modelo proposto.

Capítulo 5

Conclusão

A principal motivação desta dissertação foi estudar o comportamento de redes de comunicação PLC e avaliar o seu desempenho no que respeita aos valores de débito binário obtido em diferentes cenários de utilização.

Para isso, estudou-se como funciona a comunicação PLC, quais as normas existentes, e quais as limitações que esta tecnologia apresenta.

Para simulação do canal PLC foi utilizado um modelo de canal já existente, de modo a avaliar qual a relação entre os valores de débito binário obtido e a distância entre os módulos emissor e recetor. Este modelo foi desenvolvido em torno das normas 47 FCC parte 15 e CISPR 22, e baseia-se num canal composto por dois modems PLC ligados em duas tomadas elétricas que comunicam entre si.

Por forma a permitir obter os resultados pretendidos, o modelo existente foi modificado de modo a permitir executar múltiplas simulações com base numa configuração inicial de parâmetros de simulação.

Foram efetuadas simulações em três cenários de utilização distintos, um apartamento, uma vivenda e um armazém. Como esperado, os valores mais elevados de débito binário são obtidos no cenário de menor distância entre modems, o apartamento, e os valores mais baixos no cenário de maior distância entre modems, o armazém. Em termos gerais até uma distância de 10 m entre modems o valor de débito binário obtido é da ordem dos 210 Mbps. Para distâncias da ordem dos 40 m o valor obtido é de 6 Mbps.

Com base nos resultados das simulações efetuadas nesta dissertação foi proposto um modelo analítico do canal PLC que permite relacionar o valor de débito binário obtido em função da distância entre modems.

Bibliografia

[1] https://itigic.com/wifi-repeater-and-plc-features-differences/, acedido em maio de 2021.

[2] López, G., Matanza, J., de la Vega, D., CASTRO, M., Arrinda, A., Moreno, J. I., e Sendin, A., *The Role of Power Line Communications in the Smart Grid Revisited: Applications, Challenges, and Research Initiatives*, IEEE Access, Vol 7, 2019, pp. 117346-117346.

[3] Yousuf, M. S. e El-Shafei, M., "Power Line Communications: An Overview - Part I", Innovations in Information Technologies (IIT), Dubai, United Arab Emirates, 2008.

[4] Cano, C., Pittolo, A., Malone, D., Lampe, L., Tonello, A.M. e Dabak, Anand G., *State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 34, 2016, pp. 1935-1952.

[5] Newbury, J., *Communication requirements and standards for low voltage mains signaling,* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13 2016, pp. 46-52.

[6] https://www.cypress.com/documentation/technical-articles/what-power-line-communication, acedido em fevereiro de 2022.

[7] Di Fazio A. R., Erseghe T., Ghiani, E., Murroni, M., Siano, P., Silvestro, F., *Integration of renewable energy sources, energy storage systems, and electrical vehicles with smart power distribution networks*, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, Vol. 4, 2013.

[8] https://www.researchgate.net/figure/A-typical-BPL-architecture-1_fig1_349953984, acedido em outubro de 2021.

[9] https://circuitdigest.com/article/what-is-power-line-communication-plc-and-how-does-it-work, acedido em outubro de 2021.

[10] Gawde, A., Patel C., Masani N., Parekh T., *Broadband Over Power Lines: Internet Everywhere*, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 5, 2014, pp. 1018-1022.

[11] https://www.cypress.bc.ca/product-ctm-one/, acedido em março de 2022.

[12] https://standards.globalspec.com/std/1379982/EN%2050065-1, acedido em março de 2022.

[13] https://standards.ieee.org/ieee/1901/7598/, acedido em março de 2022.

[14] https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15?toc=1, acedido em junho de 2022.

[15] https://www.arib.or.jp/english/std_tr/telecommunications/desc/std-t84.html, acedido em novembro de 2021.

[16] https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9902, acedido em março de 2022.

[17] https://hd-plc.org/standards/cenelec-en-50561-1/, acedido em março de 2022.

[18] https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9960, acedido em março de 2022.

[19] https://www.casadomo.com/2018/06/29/lonworks-automatizacion-control-climatizacion-integracion-sistemas, acedido em junho de 2021.

[20] http://home.planet.nl/~lhendrix/x10_history.htm, acedido em maio de 2021.

[21] Lee, M. K.; Newman, R. E.; Latchman, H. A.; Katar, S.; Yonge, L.; "HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs -Protocol Description and Performance Results version 5.4", 2000

[22] https://webstore.iec.ch/publication/5308, acedido em abril de 2022.

[23] https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9904, acedido em março de 2022.

[24] Wenfei Z., Xu Z., Enggee L., Yi H., *State-of-Art Power Line Communications Channel Modelling*, Procedia Computer Science, Vol. 17, 2013, pp. 563-570.

[25] Veronesi D., Riva R., Bisaglia P., Osnato F., Afkhamie K., Nayagam A., Rende D., Yonge L., "Characterization of in-home MIMO powerline channels", IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Udine, Italy, 2011.

[26] Hashmat R., Pagani P., Zeddam A., Chonave T., "A Channel Model for Multiple Input Multiple Output in-home Power Line Networks", IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Udine, Italy, 2011.

[27] Chebotayev P., Urazayev D., Pospelova I., Karassenko A., Zykov D, Shelupanov A., *Analysis of the level of SNR in the PLC channel based on the results of mathematical and physical modelling*, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1145, 2018, pp. -.

[28] Anastasiadou D., Antonakopoulos T., *Multipath Characterization of Indoor Power-Line*

Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, 2005, pp. 90-99.

[29] Versolatto F., Tonello A. M., *An MTL Theory Approach for the Simulation of MIMO Power-Line Communication Channels*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, 2011, pp. 1710-1717.

[30] Meng H., Chen S., Guan Y., Law C., So P., Gunawan E., Lie T., *Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, 2004, pp. 1057-1064

[31] https://web.tecnico.ulisboa.pt/paulo.lopes/PLCNoise/index.html, acedido em maio de 2021.