

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Análise de soluções tecnológicas para
comunicações Power Line Carrier (PLC)**

Pedro Hugo Anselmo Soares

Versão Final

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Costa
Co-orientador: Eng. Fernando Gomes

Julho de 2010

Resumo

A tecnologia para comunicações sobre a rede eléctrica, Power Line Carrier (PLC) tem sido objecto de estudo e investigação nos últimos anos.

O crescente interesse nesta tecnologia poderá ser justificado pela necessidade emergente de poupança dos recursos energéticos e automatização dos mesmos.

Através da tecnologia PLC poderá ser efectuado o processo de monitorização e controlo da rede eléctrica em redes inteligentes, levando à diminuição dos desperdícios energéticos e possibilitando uma maior rentabilização da rede.

O cliente passa, assim, a desempenhar um papel mais central, no que respeita à gestão e redução dos seus consumos energéticos.

Nesta dissertação, são abordados e desenvolvidos aspectos fundamentais da tecnologia, nomeadamente, as diferentes técnicas de modulação utilizadas em comunicações PLC. Neste contexto, serão analisadas as técnicas de modulação OFDM bem como a modulação DCSK.

Abstract

The technology for communications on the power grid, Power Line Carrier (PLC) has been the target of study and research in recent years.

The growing interest in this technology could be justified by the emerging need for saving energy resources and automating them.

Through the PLC technology can be made the process of monitoring and control of the power grid at smart grid's, leading to reduction in energy waste and allowing for greater network monetization.

The client is thus playing a more central role, with regard to managing and reducing their energy consumption.

This dissertation addresses key areas of technology, such as different modulation techniques used in PLC communication. On this study the modulation techniques OFDM and DCSK will be analyze.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Costa pela sua dedicação e empenho. O Professor sempre se mostrou disponível e preocupado com a realização deste trabalho. Destaco a abertura e o facto de ter acreditado em mim para desenvolver este trabalho, os seus conselhos, a sua preocupação e a sua disponibilidade para me ajudar em todos os momentos.

Ao Engenheiro Fernando Gomes que me orientou na EFACEC e me transmitiu os seus conhecimentos. Agradeço também a sua disponibilidade e auxílio principalmente no que concerne às redes inteligentes, uma novidade para mim.

Ao Engenheiro António Carrapatoso, a oportunidade de desenvolver este estágio enriquecedor no departamento do ASE. Destaco o seu empenho que contribuiu decisivamente para a minha integração na equipa de investigação e desenvolvimento.

Ao Engenheiro João Rosa Dias, o seu profissionalismo. Sinalizo a sua ajuda com a tecnologia PLC e com o equipamento de testes. Agradeço a sua dedicação e entrega que se traduziu num conjunto de horas que de trabalho essencialmente no tratamento de dados dos testes.

Aos meus colegas de trabalho, o Engenheiro Aníbal Pinto, o Engenheiro Luís Monteiro, o Engenheiro Luís Carvalho, o Engenheiro Hélder Magalhães, o Engenheiro Pedro Portilha e restantes colegas da EFACEC, por me possibilitarem a integração e me auxiliarem, com os seus conhecimentos, na realização desta dissertação.

À minha namorada um enorme agradecimento pelo auxílio no trabalho e pelo tempo que disponibilizou para me ajudar e as horas que passou a apoiar-me, dar-me motivação em alturas mais complicadas.

Aos meu irmão e avó um agradecimento pois foram parte vital na conclusão deste trabalho.

Aos pais da minha namorada por me terem ajudado com a revisão da tese e foram incansáveis no apoio.

A todos os meus amigos que me apoiaram e me deram motivação para continuar no desenvolvimento desta dissertação.

Por último, mas em primeiro plano, gostaria de agradecer de forma incansável aos meus pais pelo facto de terem investido e acreditado sempre em mim. Sem o seu apoio nunca teria tido a hipótese de estar a terminar um curso superior.

*“We make a living by what we get,
But we make a life by what we give.”*

Winston Churchill

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Índice	x
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Abreviaturas e Símbolos	xxi
Capítulo 1	25
Introdução	25
1.1 - Estrutura do Documento.....	25
1.2 - Delimitação do problema.....	26
1.3 - Razões da abordagem: motivação e objectivos	26
1.4 - Metodologia de trabalho.....	27
1.5 - Actividade na área de redes inteligentes	27
1.5.1 - Visão Global	27
1.5.2 - Visão Ibérica.....	30
1.6 - A tecnologia PLC	31
1.6.1 - Breve historial	31
Capítulo 2	33
Conceitos Básicos	33
2.1 - Redes Inteligentes	33
2.1.1 - Introdução	33
2.1.2 - Abordagem teórica.....	34
2.2 - Distribution transformer controller - DTC.....	37
2.3 - A tecnologia PLC	37
2.3.1 - Introdução	37
2.3.2 - Abordagem teórica.....	37
2.4 - Contadores Inteligentes	39
2.4.1 - Introdução	39
2.4.2 - Principais actores da Área	39

2.5 - Caracterização do sistema	40
2.5.1 - Especificação da Arquitectura do Sistema	42
2.6 - Conclusão	43
Capítulo 3	45
O mercado	45
3.1 - Modem da Maxim	45
3.1.1 - Interface entre o MAX2991 e o MAX2990 baseband	47
3.1.2 - Interface AFE	47
3.1.3 - Interface Série	47
3.1.4 - AGCCS (<i>Automatic Gain Control - Control Signal</i>)	47
3.1.5 - Canal receptor	48
3.1.6 - Canal transmissor	48
3.1.7 - Codificação Reed-Solomon	48
3.1.1 - Codificação convolucional	49
3.2 - Modem da ADD (PRIME)	49
3.2.1 - Camadas PRIME	49
3.2.2 - Camada Física	50
3.2.3 - Camada MAC	50
3.2.3.a - Nó base (“mestre”)	50
3.2.3.b - Nó Serviço (“escravo”)	50
3.3 - Técnica de Modulação OFDM	51
3.3.1 - Introdução	51
3.3.2 - Caracterização da técnica de modulação OFDM	52
3.3.3 - BPSK	53
3.4 - Conclusão	53
Capítulo 4	55
Redes Inteligentes - Primeiros passos em Portugal	55
4.1 - Modem da Renesas	55
4.1.1 - Diagrama de Blocos do M16C/6S	57
4.1.2 - Estrutura da malha da Rede	59
4.1.3 - Modulação DCSK	59
4.1.4 - Camada de rede	60
4.2 - Conclusão	61
Capítulo 5	63
Resultados Obtidos	63
5.1 - Modelo de testes	63
5.1 - Sistema de medição de ruído na rede	64
5.2 - Modem Maxim	65
5.2.1 - Apreciação Global de Resultados - MAXIM	67
5.3 - Modem Renesas	69
5.3.1 - Apreciação Global	69
5.4 - Conclusão	69
Capítulo 6	71
Conclusão e trabalho futuro	71
6.1 - Conclusões e trabalho futuro	71
6.2 - Satisfação dos Objectivos	72
Anexo A	73
Resultados Detalhados	73
A.1 - Cenário de teste 1 (Laboratório de Desenvolvimento - EFACEC Renováveis)	73

A.2 - Cenário de teste 2 (Quadro de alimentação QP4 do PT6 - EFACEC).....	77
Referências	79

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Implementação de projectos de AMR, AMI e Redes Inteligentes na Europa, África, Ásia e Oceânia [7].....	29
Figura 1.2 Implementação de projectos de AMR, AMI e redes inteligentes no continente Americano, [7].	30
Figura 1.3 - Implementação de projectos de AMI e smart grids na Península Ibérica, [7].	31
Figura 2.1 - Diagrama exemplo de uma Rede Inteligente	35
Figura 2.2 - Exemplo da rede de Baixa Tensão (Foco desta dissertação).....	36
Figura 2.3 - Imagem do produto Smart Gate (DTC) [19]	40
Figura 2.4 - Produto Energy Box (EB) [19]	41
Figura 2.5 - Exemplo de uma topologia da rede de baixa tensão (BT)	42
Figura 3.1 - Evaluation Board do modem PLC da MAXIM, MAX2991 (1) e MAX2990 (2) [26]	45
Figura 3.2 - Diagrama Funcional do Modem MAX2991 [26]	46
Figura 3.4 - Camadas do PRIME [28]	49
Figura 3.3 - Evaluation Board ADDM2102 [28]	49
Figura 3.5 - Canal de transmissão, camda PHY [28]	50
Figura 3.6 - Ilustração da separação das portadoras na frequência e no tempo [33]	51
Figura 3.7 - Subportadoras de um sinal OFDM, frequência normalizada em relação ao valor $1/T$ [33]	52
Figura 3.8 - Espectros de FDM convencional (1) e OFDM (2) [33]	52
Figura 4.1 - Evaluation Boards da Renesas [35]	55
Figura 4.2 - Visão global da banda CENELEC [35]	56
Figura 4.3 - Evolution Board 08 - M16C/6S (EV08-Europa) [35].....	57

Figura 4.4 - Diagrama de blocos do modem M16C/6S [35]	57
Figura 4.5 - Fonte de alimentação da YITRAN que inclui acoplador à rede eléctrica	58
Figura 4.6 - Estrutura da rede PLC [36].....	59
Figura 4.7 - Exemplo de uma transmissão DCSK [36].....	60
Figura 5.1 - Cenário de teste global.....	63
Figura 5.2 - Interface para aquisição de dados de medições (LabView)	64
Figura 5.3- Equipamento utilizado para aquisição de medições	65
Figura 5.4 - Interface do Modem PLC da Maxim (Transmissor)	66
Figura 5.5 - Interface do Modem PLC da Maxim (Receptor).....	66
Figura 5.6 - Gráfico comparativo das Velocidades de Transmissão de dados recolhidas nos diferentes locais de teste	67
Figura 5.7 - Gráfico comparativo das Velocidades de Recepção de dados recolhidas nos diferentes locais de teste	68
Figura 5.8 - Gráfico comparativo do nível de ruído no canal recolhidos nos diferentes locais de teste	68
Figura 5.9 - Interface do modem sniffer.....	69
Figura a1.1 - Resultados do teste 1 com TX (transmissor) colocado no Laboratório das Renováveis e RX (receptor) colocado no PT, lado do receptor	74
Figura a1.2 - Resultados do teste 1.1 com TX (transmissor) colocado no Laboratório das Renováveis e RX (receptor) colocado no PT (Posto de transformação), do lado do transmissor	74
Figura a1.3 - Resultados da quantificação de ruído no teste 1	75
Figura a1.4 - Resultados do “teste 3” com TX (transmissor) colocado PT e RX (receptor) no Laboratório das Renováveis, do lado do transmissor	75
Figura a1.5- Resultados do “teste 4” com RX no Laboratório e o TX no PT, na parte do receptor.....	76
Figura a1.6- Resultados do “teste 4” com RX no Laboratório e o TX no PT, na parte do receptor.....	76
Figura a2.1- Resultados do “teste 4” com RX no Laboratório e o TX no PT, na parte do receptor.....	767
Figura a2.2- Resultados do “teste 4” com RX no Laboratório e o TX no PT, na parte do receptor.....	767
Figura a2.3- Resultados da quantificação de ruído do “teste 6”.....	768

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Bandas normalizadas para utilização do PLC (Europa)	38
Tabela 4.1 - Especificações do Modem M16C/6S [36].....	58
Tabela a1.1 - Valores médios globais dos testes efectuados no Laboratório (cenário de teste 1).....	76
Tabela a1.2 - Valores médios globais dos testes efectuados no quadro eléctrico 4 (cenário de teste 2).....	78

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AC	Alternated Current
ADC	Analogue to Digital Converter
ADD	Advanced Digital Design
AFE	Analogue-Front-End
AGC	Automatic Gain Control
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMM	Automatic Metering Management
AMR	Automatic Metering Reading
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ASE	Automação de Sistemas de Energia
ATSC	Advanced Television Systems Committee
BPL	Broadband Power Line
BPSK	Binary phase-shift keying
BT	Baixa Tensão
CA	Collision Avoidance
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CL	Convergence Layer
CRC	Cyclic Reduncy Checksum
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DAC	Digital to Analogue Converter
DC	Direct current
DCSK	Differential Code Shift Keying
DFT	Discrete Fourier Transform
DMT	Discrete Multitone Modulation
DTC	Distribution Transformer Controller
DVB	Digital Video Broadcasting
EB	Energy Box
EDF	Électricité de France
EDPD	Energias de Portugal Distribuição
FCC	Federal Communications Commission
FDM	Frequency Division Mutiplexing

FEC	Forward Error Correction
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFT	Fast Fourier Transform
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HPF	High-Pass Filter
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIR	Infinite Impulse Response
LPF	Low-Pass Filter
MAC	Media Access Control
MT	Média Tensão
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPLLOT	Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão
PDU	Protocol Data Units
PLC	Power line Carrier
PLC	Power line Communication
PRIME	Powerline Intelligent Metering Evolution
PSK	Phase-Shift Keying
PT	Posto de transformação
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RAID	Redundant Array of Independent Disks
RF	Radio Frequency
RS	Reed-Solomon
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
UPS	Uninterruptible Power Supply
VGA	Variable Gain Amplifier

Lista de símbolos

KHz	KiloHertz
T	Período
V	Volt

Capítulo 1

Introdução

Este projecto foi realizado no âmbito da disciplina de Dissertação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Com efeito, a dissertação tem como tema, "Análise de soluções tecnológicas para comunicações Power Line Carrier (PLC)", orientada pelo Professor Doutor Joaquim Costa e Co-orientada pelo Engenheiro Fernando Gomes.

Este tema de dissertação insere-se num dos projectos da EFACEC, no departamento de I&D (Investigação e Desenvolvimento), mais concretamente no ASE (Automação de Sistemas Electrónicos).

1.1 - Estrutura do Documento

Este documento segue uma estrutura que se baseia no planeamento temporal do estudo desenvolvido. Encontra-se estruturado em 6 capítulos, da seguinte forma:

Primeiro capítulo Contém uma introdução ao tema da dissertação, PLC assim como uma abordagem aos projectos existentes na área das redes inteligentes. Tem também informação sobre a metodologia de trabalho, a explicação do problema e da motivação que sustenta esta dissertação.

Segundo capítulo São definidos conceitos base como redes inteligentes, dtc, tecnologia PLC, contadores inteligentes. É feita também a caracterização do sistema e explicitada a arquitectura do mesmo.

Terceiro capítulo Este capítulo é dedicado maioritariamente à descrição do modem da Maxim e da técnica de modulação OFDM, sendo também abordadas as características do modem da ADD.

Quarto capítulo Aqui apresenta-se o projecto de redes inteligentes em Portugal, é feita uma apresentação do modem da Renesas e da modulação DCSK.

Quinto capítulo Neste capítulo é apresentado os resultados dos testes realizados com os modems da Maxim e da Renesas.

Sexto capítulo é feita a apreciação global do trabalho desenvolvido e são apresentadas conclusões acerca do mesmo.

1.2 - Delimitação do problema

O projecto InovGrid é o primeiro projecto de redes inteligentes em Portugal. É um grande projecto que está em desenvolvimento e a ser liderado pela EDPD (Energias de Portugal Distribuição) reúne várias empresas de entre as quais a EFACEC, que está responsável pelo DTC (*Distribution Controller Transformer*) e pelas comunicações deste com os contadores inteligentes.

A EFACEC já há muitos anos que desenvolve projectos de automação no sector eléctrico possuindo experiência em redes de energia, sistemas de gestão de incidentes, sistemas integrados de protecção, comando e controlo de subestações e soluções para redes inteligentes, entre outros.

Para o DTC as comunicações assumem um papel fulcral, e como tal, a solução que está a ser utilizada no DTC não se adequa às necessidades do projecto. O modem PLC da Renesas não está a satisfazer, na totalidade, os requisitos da comunicação bidireccional entre o concentrador e os nós, uma vez que a velocidade de transmissão de dados é baixa, cerca de 600 bits por segundo, o que torna o sistema lento e limita a sua capacidade de envio de dados.

Neste sentido, e dada a necessidade de efectuar um estudo alargado sobre os diferentes modems PLC existentes no mercado, uma vez que se trata de uma tecnologia bastante recente, pouco estudada e que faz uso de diferentes modulações, assim demonstra-se a utilidade desta dissertação para o projecto da EFACEC. O principal objectivo que esteve na base do desenvolvimento deste estudo foi o de encontrar a melhor solução tecnológica para este problema nas comunicações PLC.

1.3 - Razões da abordagem: motivação e objectivos

A redução de desperdícios, assim como uma maior optimização e rentabilização dos recursos energéticos disponíveis, é fundamental para a diminuição das altas taxas de poluição que se verificam actualmente.

Nesta óptica, e atendendo à necessidade de debelar este problema, existem algumas soluções, umas em desenvolvimento e outras já implementadas no mercado, que se baseiam em tecnologia PLC.

O carácter inovador desta temática está relacionado com o facto deste tipo de tecnologia PLC estar, neste momento, a ser implementada na rede eléctrica. Este tipo de implementação servirá para melhorar, de uma forma bastante significativa, a eficiência, gestão e monitorização da rede eléctrica, dotando a rede de “inteligência” que está na base da criação das redes inteligentes.

Os estudos realizados em torno deste tema são escassos, uma vez que se trata de uma aplicação bastante recente e porque grande maioria das soluções ainda se encontra numa fase de experimentação e de testes.

As comunicações assumem um papel fulcral nas redes inteligentes, pois permitem a circulação de informação e de dados entre o concentrador e os vários clientes espalhados pela rede eléctrica.

A EFACEC está, neste momento, a desenvolver um projecto de redes inteligentes, juntamente com outras empresas, para a EDPD. Para este projecto existem diferentes soluções PLC, provenientes de diferentes fabricantes que serão alvo de estudo detalhado, nomeadamente, as que utilizam modulação OFDM e DCSK, de forma a avaliar qual o modem PLC que melhor se adequa aos requisitos do projecto, sendo também este um dos objectivos da dissertação.

Para tornar o estudo mais completo foram elaborados ensaios sobre *evaluation boards* dos diversos fabricantes, proprietários dessas tecnologias.

Toda esta informação está reunida neste relatório que abrange as características de cada uma dessas tecnologias e respectiva análise comparativa.

A constante evolução tecnológica e as diferentes soluções de comunicações via PLC, justificam a pertinência do desta dissertação, e a importância deste estudo, quer para a empresa, quer para a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Trata-se de uma investigação pioneira neste campo e de aplicação recente.

1.4 - Metodologia de trabalho

A metodologia utilizada para esta dissertação baseou-se no estudo das características dos diferentes modems PLC, provenientes de diferentes fabricantes, tais como a Renesas, a Maxim e a ADD.

Efectuaram-se testes em ambiente industrial com *evaluation boards* destes modems, nas instalações da EFACEC Renováveis utilizando-se um PT (posto de transformação) e colocando-se os modems em diferentes locais, no perímetro de influência da rede de baixa tensão do PT6 (EFACEC).

Efectuaram-se, também, medições na rede para aferir da sua qualidade, isto é, da quantidade de ruído presente na rede eléctrica em determinados períodos de tempo. Para o efeito foi desenvolvido software em *LabView* e em *Matlab* para tratamento dos dados medidos através de sondas especialmente adaptadas.

Os modems utilizados neste estudo foram programados com diferentes *firmwares* possibilitando realizar diferentes testes às suas características.

1.5 - Actividade na área de redes inteligentes

1.5.1 - Visão Global

Já há muitos anos se tem vindo a desenvolver sistemas de contagem e de monitorização da rede eléctrica. A tecnologia AMR (*Automatic Meter Reading*) foi a primeira a ser implementada na rede eléctrica, com o objectivo de recolher dados da contagem da electricidade consumida, que de outra forma não seriam obtidos. Nas casas dos clientes,

eram colocados contadores, que enviavam, via linha telefónica, os dados da contagem, para um centro de comando da empresa distribuidora de electricidade.

Este sistema abrangia, inicialmente, somente alguns clientes domésticos, sendo depois estendido a consumidores industriais e comerciais. As necessidades de leitura, que no início eram de uma vez por mês foram progressivamente aumentando para contagens diárias e até de hora em hora, o que levou à saturação da rede telefónica e obrigou à expansão para novos sistemas [1].

Com o avanço da tecnologia, novos métodos de recolha de dados apareceram, tais como, Wi-Fi, comunicações móveis, RF (rádio frequência) e PLC, possibilitando a recolha de dados adicionais, o armazenamento dos mesmos e o envio para um computador central, sendo, os dispositivos de medição controlados remotamente [2]. Os dispositivos AMR também permitiam a captura de registos de eventos do contador, processo esse conhecido por *log*. Este registo podia ser usado para controlar a taxa de utilização, pelo cliente, dos recursos energéticos. Adicionalmente, os dados eram utilizados para outros objectivos, nomeadamente o de previsão da procura em determinadas horas e identificação de fugas de energia.

O AMI (*Advanced Meter Infrastructure*) é o termo utilizado para representar a tecnologia de sistemas de rede fixa com novas utilidades que vão para além da tecnologia AMR, em utilidades de gestão remota [3].

Os contadores de um sistema AMI são muitas vezes referidos como contadores inteligentes, possuindo mais funcionalidades do que um contador convencional. Os contadores eléctricos inteligentes permitem identificar o consumo energético com maior detalhe relativamente aos contadores tradicionais, e comunica as informações através de uma rede à empresa distribuidora de electricidade para esta proceder à monitorização e facturação da energia (telemetria). Este sistema tem um papel importante no apoio à implementação da dinâmica de preços e benefícios para o utilizador [4].

A tecnologia AMM (*Automatic Meter Management*) é a evolução da tecnologia AMI implementando novas utilidades e funcionalidades para o sistema de contagem.

As redes inteligentes integram as tecnologias, anteriormente referidas, e visam a monitorização e melhoramento da eficiência da rede, ou seja, diminuir as perdas energéticas ao longo da transmissão na rede eléctrica, em todo o mundo. As redes inteligentes abrangem toda a rede eléctrica, desde a produção da electricidade, até ao cliente final [5] e [6].

As figuras 1.1 e 1.2 que se seguem, representam a actividade mundial relativamente a projectos, uns já implementados, outros em fase de implementação e outros, ainda, em desenvolvimento na área de redes inteligentes, AMI e AMR.



Figura 1.1 - Implementação de projectos de AMR, AMI e Redes Inteligentes na Europa, África, Ásia e Oceânia [7].

Estas imagens foram obtidas através do *Google Maps* e evidenciam a grande quantidade de projectos de automação da rede eléctrica, um pouco por todo o mundo. Destacam-se, no entanto, a Europa e os Estados Unidos da América como as regiões onde existe uma maior predominância de investimento em projectos deste tipo.



Figura 1.2 Implementação de projectos de AMR, AMI e redes inteligentes no continente Americano, [7].

1.5.2 - Visão Ibérica

Ao nível de projectos de automação da rede eléctrica em Espanha existe o projecto PRIME do qual fazem parte várias empresas como a *ADD* e a *Texas Instruments*, bem como a *EDP*. Este projecto é liderado pela *IBERDROLA* e prevê para breve, a instalação de contadores inteligentes em vários milhares de clientes da distribuidora eléctrica espanhola.

Em Portugal, em 2009, foi realizado, sem grande sucesso, um projecto-piloto entre a *EDP* e a *ISA* instalando em 2000 apartamentos, contadores inteligentes para telemetria.

Para 2010, a *EDP* previu a instalação de 50.000 contadores inteligentes na cidade de Évora, para testar, em larga escala, a tecnologia *PLC* e também as tecnologias *GPRS* e *GSM*.



Figura 1.3 - Implementação de projectos de AMI e redes inteligentes na Península Ibérica, [1].

1.6 - A tecnologia PLC

Neste ponto faremos uma apreciação do passado histórico do PLC e da sua evolução diacrónica.

1.6.1 - Breve historial

O primeiro uso dos sistemas de *power line carrier* (PLC), também denominados OPLAT (Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão), remete-nos para a década de 1920. Desde então, estes sistemas têm sido utilizados pelas empresas de energia eléctrica para telemetria, controle remoto e comunicações de voz. Os equipamentos utilizados são robustos e, normalmente, com uma vida útil superior a trinta anos. Só recentemente, com o avanço da instalação de fibras ópticas e redução do preço dos sistemas de telecomunicações, algumas empresas de energia eléctrica decidiram abandonar a tecnologia analógica, *Power Line Carrier* [8].

No entanto, algumas aplicações de banda estreita em residências e sistemas de segurança e automação predial utilizam, ainda, sistemas de *Power line Carrier* de banda estreita, de baixa velocidade e com modulação analógica [24].

No princípio da década de 90, o Dr. Paul Brown da *Norweb Communications* (empresa de Energia Eléctrica da cidade de Manchester, Inglaterra) iniciou testes com comunicação digital de alta velocidade utilizando linhas de energia eléctrica. Entre 1995 e 1997, ficou demonstrado que era possível resolver os problemas de ruído e atenuar (mas não eliminar totalmente) as interferências às quais as linhas da rede eléctrica estão expostas e que a transmissão de dados a alta velocidade poderia ser viável [10].

Em 1997, a *Nortel* e *Norweb* anunciaram que os problemas associados ao ruído e à interferência das linhas de electricidade estavam solucionados em apenas algumas faixas de

frequência. Mesmo assim, foi anunciado pelas mesmas empresas o primeiro teste de acesso à Internet, realizado numa escola de Manchester. Com isto, foi lançada uma nova ideia para negócios de telecomunicações a que a *Nortel/Norweb* chamou de *Digital Power Line* [22].

Em 1998, a *Nortel* e a *Norweb* criaram uma nova empresa, intitulada de NOR.WEB DPL, com o propósito de desenvolver e comercializar *Digital Power Line* (DPL).

O acompanhamento dos desenvolvimentos e progressos da tecnologia *Power Line* era feito na época, no Brasil, pelo Subcomité de Comunicações do GCOI. A APTEL, criada em 1999, realizou o seu primeiro Seminário em 27 Setembro desse mesmo ano, subordinado ao tema: *Tecnologia Power Line Communications* (PLC) [12].

Na Europa, em 1997, foi criado o PLC Fórum e, em 1998, a UTC lançou, nos Estados Unidos da América, o *Power Line Telecommunications Forum* (PLTF).

Actualmente, são comercializados alguns produtos com tecnologia PLC, apesar das reservas enunciadas pelo FCC (*Federal Communications Commission*) sobre a viabilidade da sua aplicação face à inexistência de normalização desta tecnologia [11].

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Neste segundo capítulo são enunciados e desenvolvidos os principais conceitos subjacentes à investigação realizada.

2.1 - Redes Inteligentes

2.1.1 - Introdução

As dificuldades da capacidade de resposta do sistema eléctrico derivadas do aumento da procura de electricidade, justificada pelo aumento do número de consumidores e de electrodomésticos, cada vez mais potentes, tornam importante o desenvolvimento de um sistema de distribuição de electricidade, ágil e eficiente.

Hoje em dia, particularmente nos países desenvolvidos, existem cada vez mais equipamentos eléctricos, nas residências. Há 50 anos as casas, na melhor das hipóteses, tinham frigorífico, rádio e, excepcionalmente, uma televisão. Actualmente, a situação é muito diferente: para além dos equipamentos supra citados, existem, frequentemente, computador, DVD, micro-ondas, fogão eléctrico, e mais um conjunto de novos equipamentos electrónicos [11].

Esta situação pode conduzir-nos, rapidamente, para o caos energético, um tipo de situação insustentável, semelhante à que ocorreu em 1999, no Brasil.

A necessidade de diminuir ou consumir com mais inteligência os recursos do planeta está a causar intensas movimentações, em diversos países, inclusive nos EUA, um dos maiores consumidores de energia do mundo [12].

Actualmente, a distribuição de energia está demasiado condicionada. Segundo a opinião de muitos especialistas, dependemos, em excesso, de uma única fonte geradora e, caso esta falhe, toda a rede ficará sem abastecimento. Além disso, é de salientar que o formato de medição do consumo, nem sempre é o mais justo para o consumidor final. Um exemplo disso é a existência de medidores analógicos desfasados, um excessivo número de funcionários da empresa distribuidora de electricidade para recolha de dados, casa a casa, a prática de facturação por estimativa, etc[22].

A necessidade da existência de redes inteligentes (de distribuição de energia eléctrica) baseia-se em razões globalmente estabelecidas. De um modo geral, elas podem ser assim agrupadas: necessidade de aumentar a eficiência da rede; minimização dos desperdícios energéticos; controlo parcial do consumo e reconfiguração remota da rede. Presentemente, os aspectos ambientais são também tidos em consideração, através da optimização da rede por parte dos sistemas de redes inteligente possibilitando menores desperdícios e menor emissão de CO₂ pelas centrais de geração de energia eléctrica.

O controlo da iluminação pública, a monitorização de fugas de energia, a redução de custos de manutenção e a monitorização são alguns exemplos de benefícios decorrentes destas sinergias [16].

2.1.2 - Abordagem teórica

Basicamente, uma rede inteligente é uma actualização das redes de energia eléctrica tradicionais que transportavam a energia das centrais eléctricas para um grande número de utilizadores, com o único objectivo de responder às suas necessidades energéticas. A rede inteligente deve ser capaz de escolher o melhor percurso do fornecedor até ao utilizador, minorando o desperdício de energia.

As redes inteligentes beneficiam de vários avanços tecnológicos para renovar energia, infra-estruturas, redefinir as responsabilidades dos utilizadores de energia, e, por fim, conservar recursos energéticos vitais.

As redes inteligentes possibilitam assim, uma melhor gestão da rede eléctrica, permitindo a optimização desta para uma utilização mais equilibrada e económica, reduzindo custos de operação relacionados com a contagem da electricidade e com o corte/ligação da electricidade em casa do cliente, aumentando a fiabilidade e transparência do sistema.

Em síntese, o conceito de rede inteligente é sinónimo de um sistema de monitorização inteligente que mantém o controlo de toda a electricidade que através dele flui. Este sistema de monitorização incorpora, também, o uso de linhas de transmissão supercondutoras para menor perda de potência, assim como a capacidade de integração de fontes alternativas de energia, como a solar e a eólica.

Uma das vantagens das redes inteligentes está relacionada com a monitorização de toda a rede, em tempo real, o que permite, por exemplo, desligar uma subestação ou diminuir a produção de energia eléctrica numa central, caso a necessidade energética, na altura, seja inferior ao que está a ser produzido [17][24].

Num sistema inteligente torna-se possível concentrar o uso da electricidade, nas chamadas “horas mortas”, espaços temporais em que a procura energética é menor, o que torna a energia mais barata.

Estas tecnologias têm por objectivo conferir ao sistema energético a capacidade deste ser reconfigurável automaticamente e, em tempo real, possibilitar a gestão da tensão e da potência reactiva, melhorando assim, o sistema de distribuição eléctrico[3].

As redes inteligentes funcionam, também, como novas janelas de oportunidade para a criação de programas vocacionados para a redução da procura nos períodos de pico energético (predominantemente à hora de jantar e períodos nocturnos até à meia-noite), facilitando assim, o adiamento de investimentos no sistema de distribuição.

Estes programas de inovação e desenvolvimento pretendem aumentar a participação do cliente, através da oferta de tarifários dinâmicos de taxa da energia, ajustáveis de acordo com as necessidades do mesmo, fomentando a utilização eficiente dos recursos energéticos.

A implementação destes tarifários em conjunto com as redes inteligentes e as redes domésticas poderão levar ao aumento da taxa de penetração desses programas, à medida que as ferramentas e controlo passam, progressivamente, do lado do sistema para o lado do cliente.

Estas tecnologias utilizam sistemas de comunicação digital bidireccional, tais como, os sistemas de radiofrequência (RF), sistemas PLC, que foram referidos anteriormente, ou opções de banda larga como o BPL (*broadband power line*) ou redes sem fio [18].

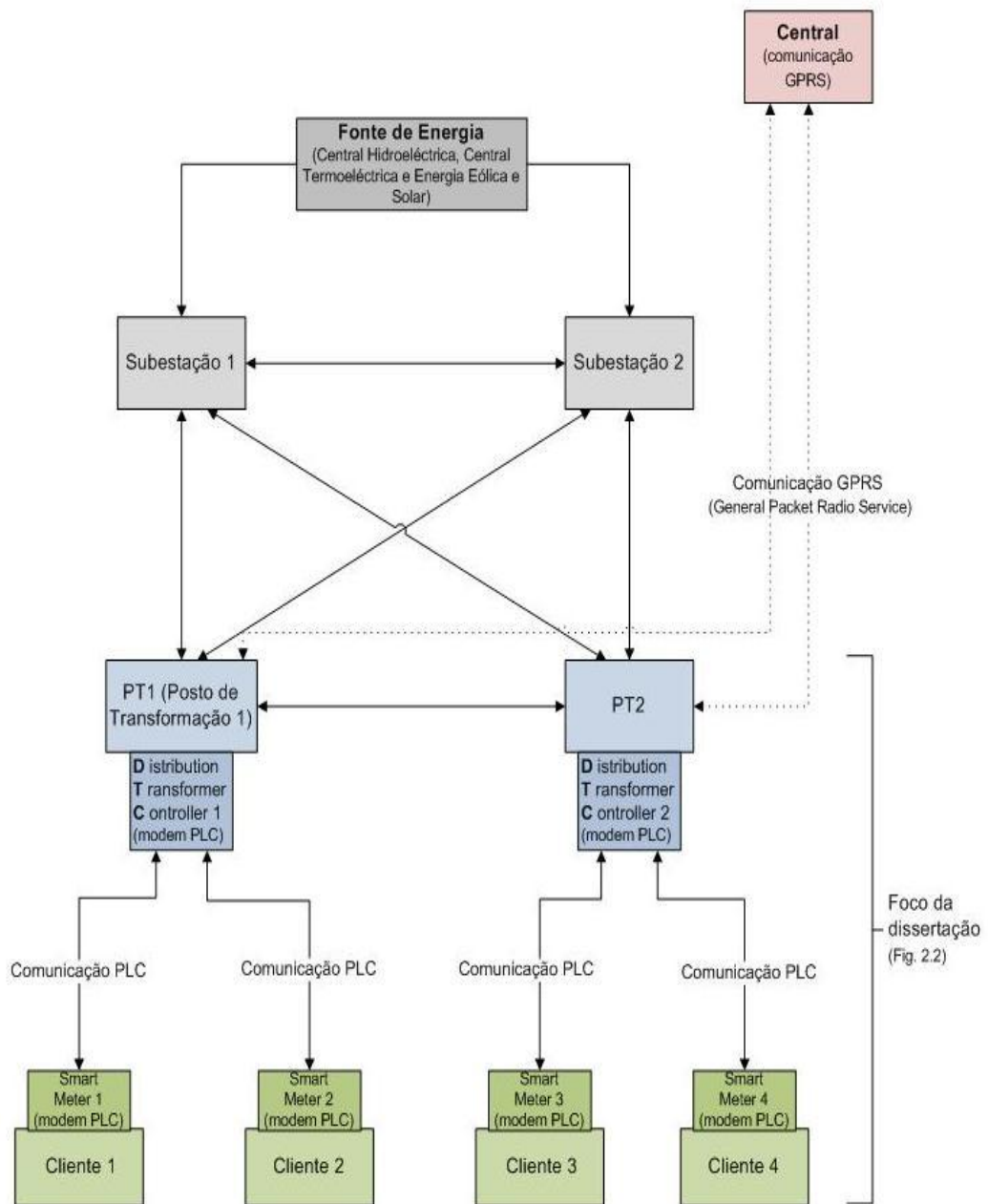


Figura 2.1 - Diagrama exemplo de uma Rede Inteligente

Nota: na realidade, a comunicação entre a *dte* e o contador inteligente frequentemente não é feita por ligação directa, como indica a figura 2.1, mas sim através de um ou mais nós da vizinhança que servem como repetidores como indica a figura 2.4. Foi adoptada esta simplificação dada a transparência do processo de repetição.

O tema desta dissertação é a comunicação de informação entre o troço, Posto de Transformação – cliente final, que se situa na parte de baixa tensão da rede. As várias componentes deste elo de comunicação são: o DTC (instalado no PT) que contém um modem PLC e o contador inteligente também ele dotado de um modem.

A figura 2.2 sumariza o cenário teste utilizado neste estudo, assim como o equipamento usado ou posto em consideração [19][19].

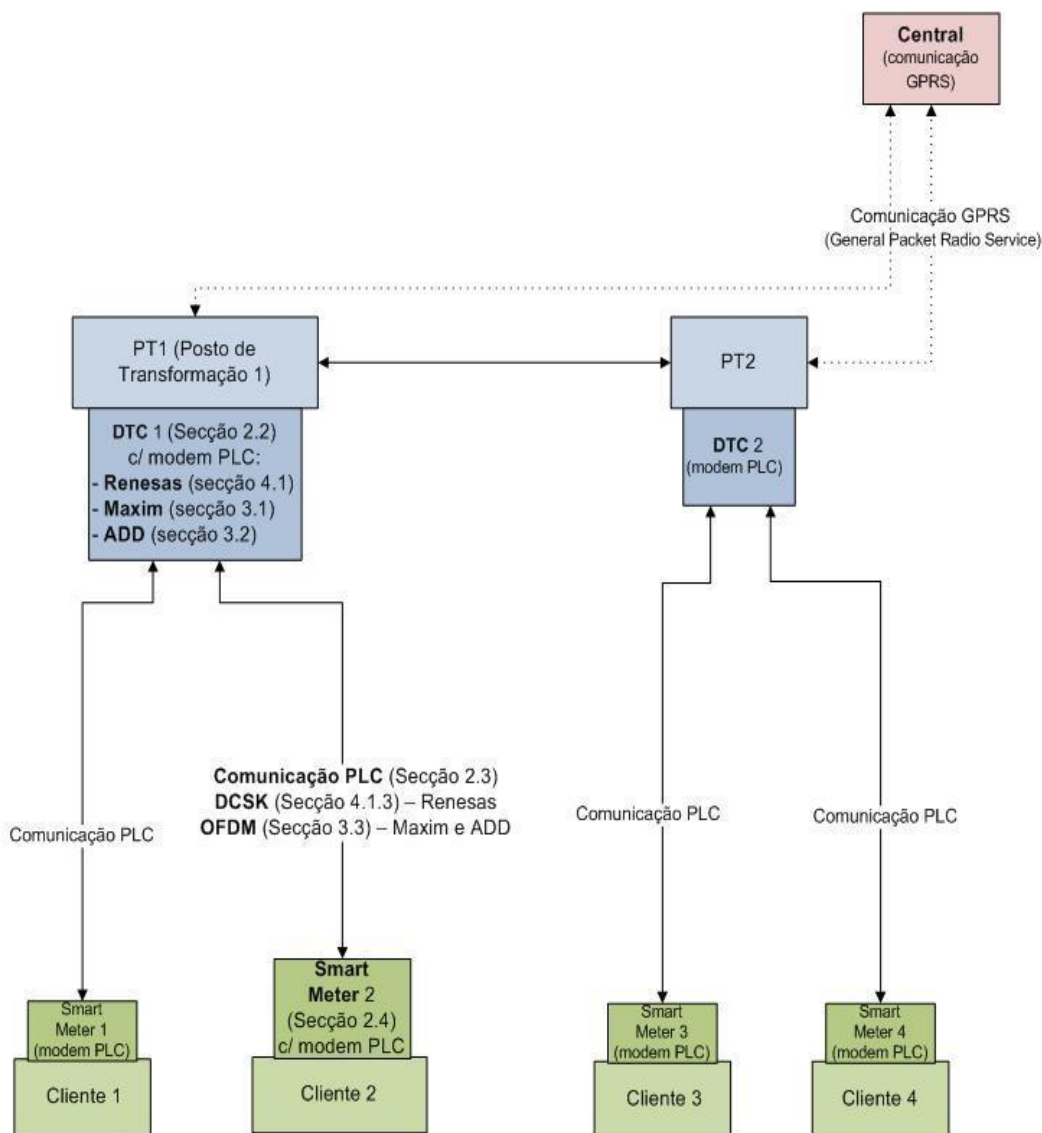


Figura 2.2 - Exemplo da rede de Baixa Tensão (Foco desta dissertação)

2.2 - *Distribution transformer controller* - DTC

O DTC desempenha um papel importante ao nível da gestão da rede eléctrica que serve directamente os consumidores, particularmente os da rede BT (Baixa Tensão).

O DTC é instalado no Posto de Transformação (PT) MT/BT, que contém três modems PLC, um por cada fase, o que lhe permite comunicar, de forma bidireccional, com os contadores que se encontram espalhados pela rede, através da tecnologia PLC.

O DTC tem por função recolher dados de contagem provenientes dos contadores, relativos a troços da rede a jusante do PT. Este dispositivo, o DTC, permite, igualmente, detectar falhas na rede, monitorizar o estado do PT, onde se encontra instalado, bem como dos contadores inteligentes da malha da rede.

O DTC faz a gestão dinâmica dos sistemas de comunicação bidireccionais com os dispositivos de contagem, detectando a sua inserção no sistema, reconhecendo-os e integrando-os, automaticamente, na sua base de dados interna, reconfigurando e optimizando a rede de baixa tensão, garantindo a fiabilidade das comunicações. Assim passa a ser possível reportar os valores de contagem, provenientes dos novos dispositivos, à central (centro de comando da empresa distribuidora de electricidade) [20].

2.3 - A tecnologia PLC

2.3.1 - Introdução

A tecnologia PLC (*Power Line Communication*) permite o uso simultâneo da rede eléctrica para a transmissão de electricidade e dados. Esta tecnologia permitirá oferecer serviços de telecomunicações, através da rede eléctrica (Internet, domótica, *automatic metering*, segurança).

2.3.2 - Abordagem teórica

Os sistemas de comunicação *Power Line Carrier* consistem na injeção de um sinal de alta frequência sobre a rede eléctrica. A tecnologia PLC não foi utilizada no passado, para outras aplicações comerciais pois a rede eléctrica foi sempre considerada como um ambiente hostil, para comunicações de alta velocidade, devido às suas características de ruído e imprevisibilidade.

Ao longo dos anos, a tecnologia PLC tem sofrido constantes evoluções, motivadas pelo desenvolvimento de novas técnicas, quer de modulação, quer de codificação do canal. Isto possibilitou o estabelecimento de comunicações PLC, de alta velocidade, em linhas de média (15/50kV) e baixa (110/230V) tensão, tornando o PLC uma solução atractiva. Porém, existem ainda vários problemas técnicos e questões reguladoras, por resolver, [21][25].

Para além das questões supra citadas, há a realçar o facto de existirem poucos estudos teóricos e práticos, detalhados, sobre PLC. Dispomos apenas de alguns resultados gerais sobre o desempenho máximo que pode ser conseguido, na rede eléctrica. Contudo, a tecnologia PLC poderá constituir-se como uma solução alternativa, rentável, para o problema de conectividade da última milha (*last mile connectivity problem*).

Na maioria dos países há regulamentos e normas específicas para PLC. As várias entidades reguladoras são a FCC nos Estados Unidos da América, a ARIB no Japão e o CENELEC (EN50065) na Europa. O CENELEC EN50065 é a norma que define as faixas de frequências para a

transmissão de dados em baixa tensão. Essas três bandas estão situadas na faixa de frequências entre 3 KHz e 148,5 KHz, tal como indicado na tabela seguinte,[22].

Tabela 1.1 - Bandas normalizadas para utilização do PLC (Europa)

Banda	Frequência (KHz)	Amplitude de transmissão máxima (V)	Utilização
A	3 - 95	10	Distribuidoras
B	95 - 125	1,2	Doméstico
C	125 - 148,5	1,2	Doméstico

Existem vantagens e desvantagens das comunicações PLC, para aplicações de automação da rede eléctrica.

Destacam-se as seguintes vantagens:

- Extensa cobertura geográfica, uma vez que toda a infra-estrutura da rede eléctrica já se encontra instalada, um pouco por todo o mundo (é especialmente vantajosa nas subestações de zonas rurais, mais remotas, onde, geralmente, não existe outro tipo de infra-estruturas para a comunicação);
- Redução de custos, uma vez que a rede de comunicação pode ser estabelecida rapidamente e de forma rentável (são utilizados os fios já existentes da rede eléctrica, para o envio dos sinais de comunicação). Esta rede permitirá, desta forma, a monitorização remota e a redução dos gastos energéticos, [23];

As principais desvantagens assinaladas são:

- Fontes de ruído sobre as linhas de energia: as linhas eléctricas encontram-se em ambientes com variadas fontes de ruído, tais como, motores eléctricos, fontes de alimentação, lâmpadas fluorescentes e interferências do sinal de rádio. Este ruído provoca erros nas comunicações PLC, o que prejudica o seu desempenho;
- Atenuação e distorção do sinal: em linhas eléctricas, a atenuação e distorção de sinais são consideráveis, quer devido à topologia da rede de energia, quer à flutuação das cargas nas linhas de energia, [24];
- Capacidade: alguns protótipos de modems de comunicação PLC conseguiram já alcançar 45Mbps. No entanto, quantos mais utilizadores e aplicações estiverem a partilhar a mesma banda, menor será a velocidade de transmissão de dados[9];
- Segurança: existem algumas preocupações no que diz respeito aos cabos eléctricos, expostos ao meio ambiente, não entrelaçados e sem blindagem. Como consequência, podem reforçar as interferências electromagnéticas (EMI) no meio envolvente. Para além disto, os sinais poderão ser facilmente interceptados por receptores de rádio, obrigando ao uso de técnicas de criptografia.
- Falta de regulamentação: juntamente com os desafios técnicos existem também problemas de regulamentação e de carência de modelos protocolares standardizados internacionalmente. A este respeito, o IEEE (*Institute of Electrical en Electronics Engineers*)

já iniciou o desenvolvimento de regulamentação adequada, processo lento e difícil, dadas as díspares exigências dos diversos interesses envolvidos neste processo, [25][10].

2.4 - Contadores Inteligentes

2.4.1 - Introdução

Na maioria das vezes, o conceito de contadores inteligentes está intimamente associado aos contadores de electricidade, mas pode também ser aplicada aos dispositivos de medição de gás natural ou de água. Para o presente estudo, analisaram-se exclusivamente os contadores de electricidade. Estes contadores são dispositivos electrónicos que medem a quantidade de energia eléctrica fornecida a um cliente, e possuem, também, um interface que permite a transmissão de dados do nó ou do terminal remoto para o dispositivo concentrador, localizado no PT.

Há muitos anos que existem contadores eléctricos, bastante simples, utilizados para fazer contagens em intervalos de tempo pré-programados, mas os contadores inteligentes envolvem, normalmente, uma combinação de diferentes tecnologias, com sensores que fornecem dados em tempo real, comunicação de falhas de energia e monitorização da qualidade da energia fornecida. Estes recursos adicionais são mais do que a simples contagem automatizada da energia gasta pelo cliente, (AMR), sendo semelhantes, em muitos aspectos, à infra-estrutura de medição avançada, (AMI).

Os contadores inteligentes são considerados como uma alternativa menos dispendiosa, quando comparados com os contadores tradicionais, e são destinados ao uso em larga escala, por todas as classes de clientes, incluindo clientes residenciais. Podem ser parte de uma rede inteligente, mas não constituem, por si só, uma rede inteligente, [3].

São inúmeros os benefícios do sistema de contagem inteligente, destacando-se a contagem exacta da electricidade gasta pelo utilizador, sem necessidade de recurso a estimativas, a possibilidade do utilizador escolher o tarifário que mais se adequa aos seus gastos, permitindo assim uma diminuição dos custos do cliente e a minoração do desperdício energético.

Estes contadores permitem efectuar a gestão da energia através de gráficos com dados relativos ao perfil de consumo dos utilizadores. Esta gestão traduz-se numa diminuição dos encargos financeiros, quer com a manutenção da rede, quer com a correcção de erros. No caso de uma avaria ou de falta de electricidade o contador inteligente retrata a situação ao concentrador, emitindo um alerta de aviso e permitindo uma actuação mais rápida e eficaz da empresa distribuidora de electricidade. As despesas com centros de atendimento (*call centers*), para os quais os clientes fornecem as leituras, e com funcionários, que fazem a leitura das contagens porta a porta, são também eliminadas, originando assim uma redução dos custos.

A quantidade de contadores inteligentes instalados na Europa no final de 2008 foi de cerca de 39 milhões de unidades, de acordo com a empresa analista *Berg Insights* [26].

2.4.2 - Principais actores da Área

Esta rede eléctrica inteligente moderna está a ser promovida por diversos governos como uma forma de abordar a independência energética, as questões ambientais e as questões de resiliência de emergência.

Para que isso aconteça é necessário que se produzam novos equipamentos, se instalem medidores inteligentes e sensores na rede eléctrica. Tendo em perspectiva um mercado que se prevê venha a movimentar 20 mil milhões de dólares, empresas como a IBM, a Cisco, a *Landis+Gyr*, a Intel, a GE e até a Google prevêem adequar o seu volume de investimentos à nova realidade do sector de energia. Além das empresas, também alguns países, como os EUA, investem nesta área. A título de exemplo, o Presidente dos EUA, *Barack Obama* disponibilizou um conjunto de incentivos no valor de 3,4 mil milhões de dólares, em 27 de Outubro de 2009.

2.5 - Caracterização do sistema

Como referido no ponto anterior a tecnologia PLC aplicada em redes inteligentes está, neste momento, em forte expansão e desenvolvimento. O sistema é composto por um *SmartGate*, conforme figura que se segue, tecnicamente designado por DTC. Este dispositivo é colocado no PT, tendo como principal função a comunicação e gestão das EBs, existentes na rede de baixa tensão.



Figura 2.3 - Imagem do produto *Smart Gate* (DTC) [20]

O DTC opera, ainda, quer como um dispositivo inteligente de controlo e automação do PT, quer na detecção de defeitos e no controlo da iluminação pública. Este aparelho é, igualmente, responsável pela implementação de outras funções, das quais o balanço energético, a monitorização do desequilíbrio de carga e de sobrecarga do transformador, a análise da qualidade da energia, a detecção e notificação de falhas de energia.

No DTC encontram-se instalados três modems PLC, um por fase, que comunicam com o modem PLC de cada EB, que se encontram colocadas nas habitações. Estas *EB's* são distribuídas equitativamente pelas três fases.



Figura 2.4 - Produto Energy Box (EB) [20]

A EB é um telecontador que permite saber em tempo real o consumo de energia registado até ao momento, assim como as evoluções verificadas em termos de histórico de consumos.

A EB é o dispositivo que fica mais próximo dos produtores/consumidores, implementando os serviços de contagem e contratuais, através da sua capacidade comunicativa local, via modem PLC, possibilita a troca de mensagens entre cliente e fornecedor incluindo a informação detalhada dos consumos.

Os contadores inteligentes fornecem suporte à gestão e controlo da microgeração - tanto ao nível local como ao nível da rede de baixa tensão, respondendo a pedidos recebidos do DTC- assim como à gestão e controlo de cargas locais [20].

A figura 2.5 exemplifica a tipologia de uma rede de baixa tensão. De referir que a informação recolhida nas *EB's* (legendado com letra E) é enviada pelo modem PLC via rede eléctrica para o DTC (C), que tem capacidade para armazenar a informação das várias *EB's*, até ao máximo de mil *EB's*, por cerca de seis meses. A distância máxima entre as *EB's* e o *DTC* é de no máximo um quilómetro.

Quando necessário, a informação armazenada no *DTC* poderá ser enviada para a central (A), via *GPRS* (B), caso esta efectue o pedido, caso contrário os dados permanecem guardados no *DTC*.

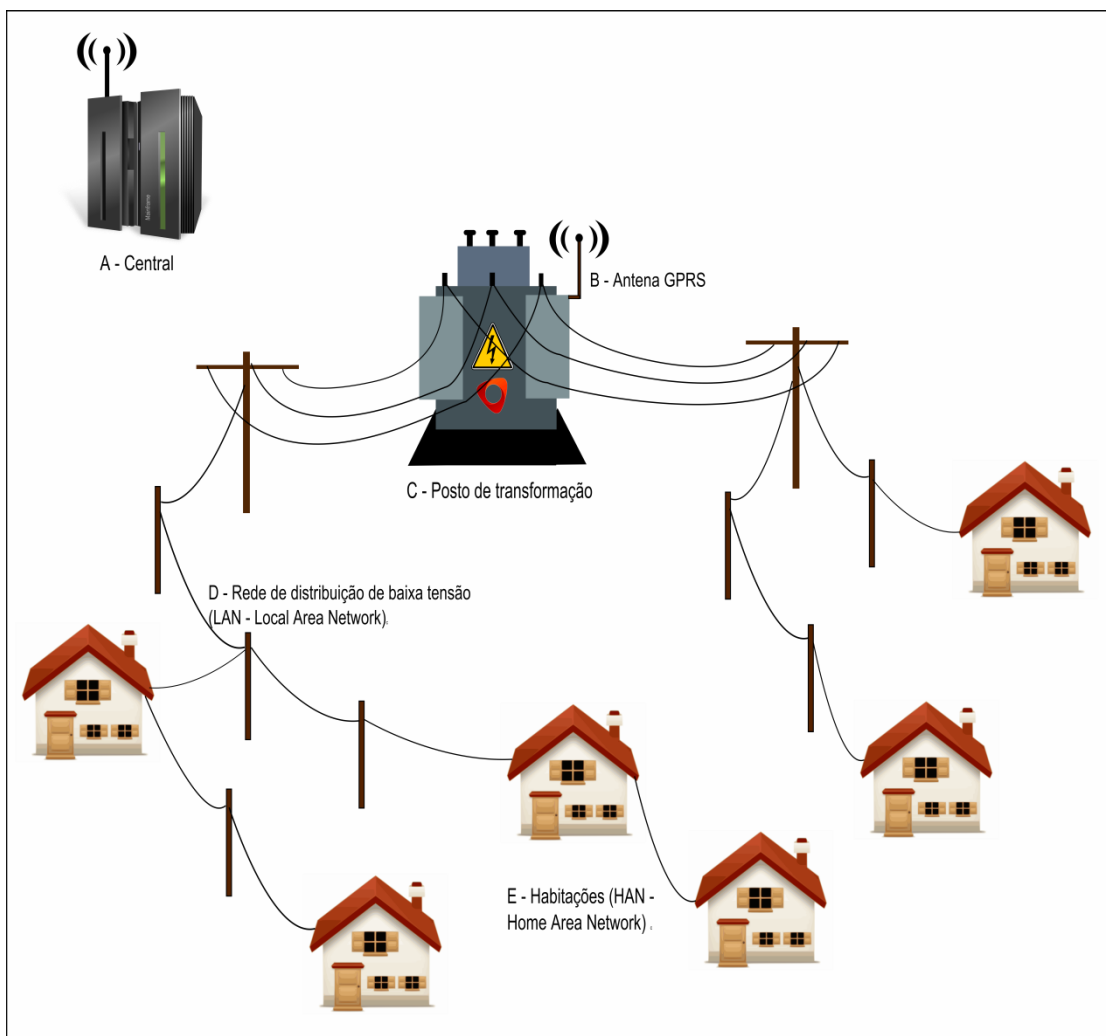


Figura 2.5 - Exemplo de uma topologia da rede de baixa tensão (BT)

2.5.1 - Especificação da Arquitectura do Sistema

A arquitectura do sistema encontra-se dividida em 3 grandes níveis:

1. Nível do produtor/consumidor - Neste nível encontram-se as *EB's*, que implementam as funções de contagem de energia e também a gestão de energia doméstica, incluindo o controlo de equipamentos consumidores de energia e o controlo da microgeração;
2. Nível da subestação MV/LV (posto de transformação) - Neste nível encontra-se o DTC, com funções de concentração de informação, gestão das *EB's* (Energy Boxes) e ainda a monitorização, controlo e automação do PT;
3. Nível de controlo e gestão central - Neste nível é realizada a agregação da informação comercial, ou seja a EDP processa a informação recolhida para, por exemplo, se efectuar a facturação para o cliente, permite também efectuar a gestão da energia, sendo ainda implementado o controlo operacional da rede.

2.6 - Conclusão

Neste capítulo foram desenvolvidos os conceitos básicos nos quais se fundamenta este projecto de investigação.

Esta abordagem permitiu-nos compreender a tecnologia de base que sustenta as redes inteligentes e, de forma mais pormenorizada, as redes de baixa tensão.

A O registo dos pontos fortes e das debilidades desta tecnologia auxiliam-nos a melhor compreender a tomada de decisões.

Os produtos disponíveis no mercado e, em particular, a abordagem concreta a duas soluções PLC constituirão a matéria do capítulo seguinte.

Capítulo 3

O mercado

Actualmente várias empresas concentram esforços na tecnologia PLC, pelo facto das redes inteligentes se encontrarem em forte expansão no mercado. É o caso da *Iberdrola*, empresa do sector energético, com o seu projecto Prime, no qual várias empresas se encontram associadas, tais como, a *Texas Instruments*, a *ADD*, a *Itran* (entre outras).

A EDF (*Électricité de France*) também se encontra a desenvolver um projecto de contadores inteligentes para redes inteligentes, fazendo uso de modems PLC que utilizam a técnica de modulação OFDM. Estes modems estão a ser desenvolvidos pela *Maxim*, sendo o modem *MAX2991*, um exemplo, analisado pormenorizadamente neste estudo. (Este modelo é uma evolução do anterior *MAX2990*).

É de referir que esta tecnologia é recente e se encontra em estado embrionário pelo que pequenas alterações ainda poderão ocorrer, de forma a melhorar o desempenho e robustez destes dispositivos.

3.1 - Modem da Maxim

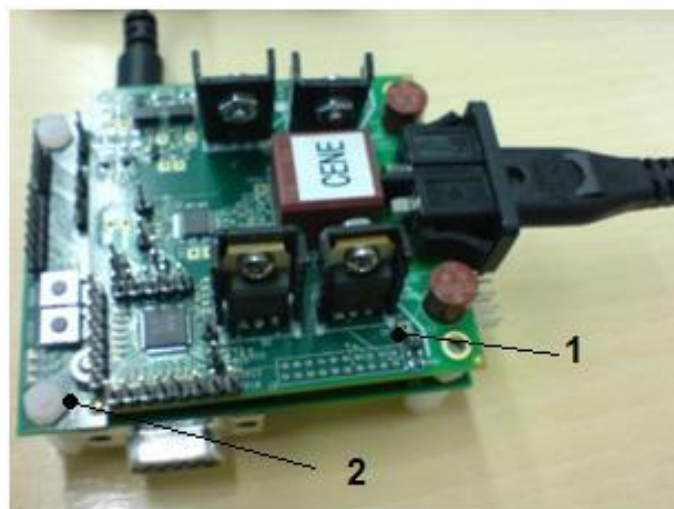


Figura 3.1 - *Evaluation Board* do modem PLC da *MAXIM*, *MAX2991* (1) e *MAX2990* (2) [27]

O circuito integrado MAX2991 é um AFE (*analog-front-end*) projectado especificamente para utilizar modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) na transmissão de sinais sobre as linhas de energia eléctrica. Esta técnica permite a transmissão de dados em canais com ruído impulsivo. O canal quando utiliza a banda de frequência do modelo europeu CENELEC-A é subdividido em 14 portadoras, cada uma delas com modulação BPSK (Binary Phase-Shift; ver secção 3.3), também é utilizado FEC (*Forward Error Correction*) para tornar mais robusta a transmissão de dados.

Este modem opera na banda dos 10KHz até aos 490KHz, os filtros programáveis permitem a sua adaptação para as diferentes normas de comunicação, tais como: CENELEC (Europa); FCC, *Federal Communications Commission* (EUA) e normas ARIB, *Association of Radio Industries and Businesses* (Japão), utilizando o mesmo dispositivo.

O MAX2991 está desenhado para trabalhar juntamente com o modem *baseband* PLC, o MAX2990 formando uma solução para comunicações PLC, tal como se pode verificar na figura 3.1. O MAX2991 acaba por se constituir como um melhoramento ao MAX2990 e juntos formam o novo modem PLC da MAXIM [27].

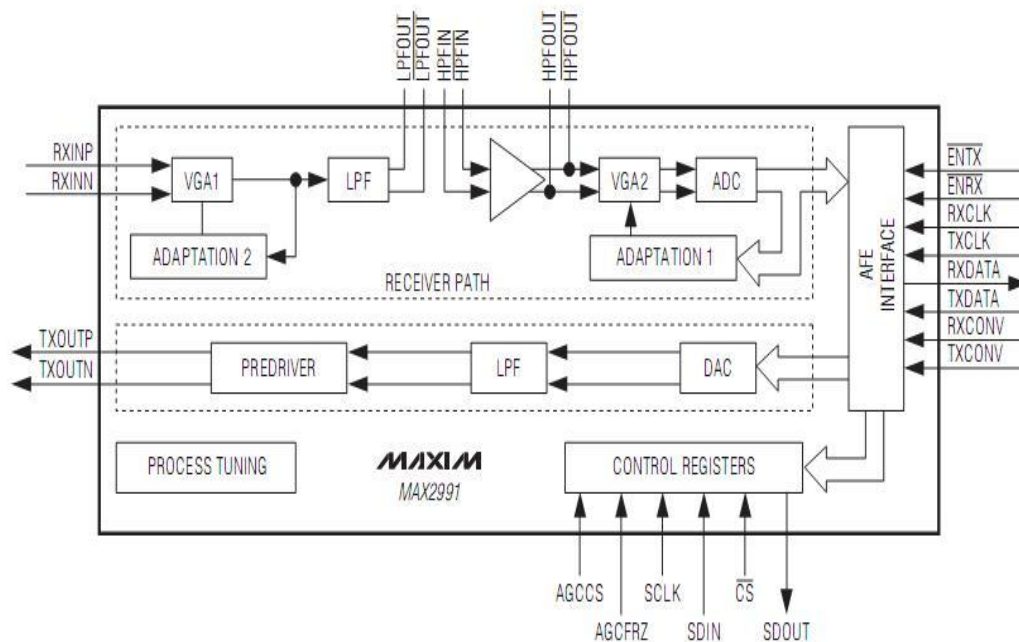


Figura 3.2 - Diagrama Funcional do Modem MAX2991 [27]

Este design integrado combina um ADC (*Analogue to Digital Converter*) e um DAC (*Digital to Analogue Converter*), assim como um bloco de Predriver para tratamento do sinal, como se pode ver no digrama funcional do MAX2991.

O design do MAX2991 permite a operação sem controlos externos, permitindo a conexão simplificada a uma variedade de chips digitais na camada física (PHY).

O MAX2991 tem dois canais principais: o de transmissão e o de recepção. O primeiro é responsável por injectar um sinal modulado com OFDM na linha AC (corrente alternada) e é composto por um filtro digital IIR (Infinite Impulse Response), DAC, seguido por um filtro passa - baixo, e um *preline driver*. O canal do receptor é responsável pela amplificação do

sinal, filtragem e digitalização do sinal recebido. O receptor é composto por um filtro passa - baixo e um filtro passa - alto, um controlador automático de ganho de dois estágios (AGC), e um conversor ADC.

O circuito AGC (*Automatic Gain Control*) é utilizado para maximizar a gama dinâmica do sinal até os 62 dB, já o filtro passa - baixo é utilizado para remover ruído fora da banda utilizada, e para seleccionar a banda de frequência desejada [27].

3.1.1 - Interface entre o MAX2991 e o MAX2990 *baseband*

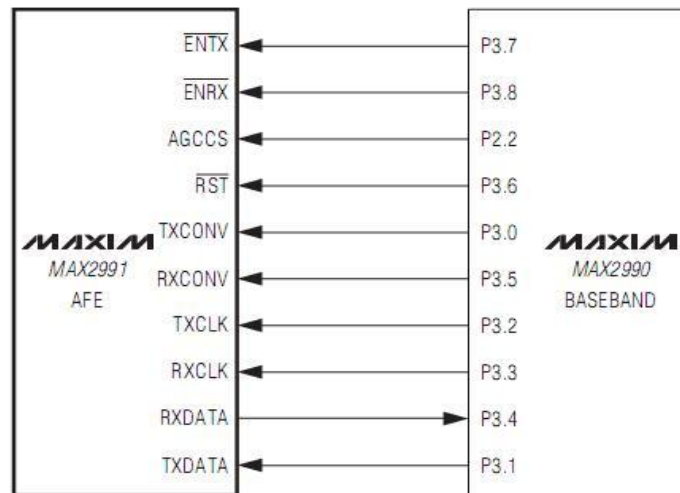


Figura 3.3 - Interface entre MAX2991 AFE e o MAX2990 Baseband [27]

O interface do dispositivo MAX2991 AFE utiliza um barramento bidireccional para transferir dados digitais a partir do ADC para o DAC. O esquema da figura 3.3 ilustra o interface entre o MAX2991 e o MAX2990.

3.1.2 - Interface AFE

Este interface permite a comunicação entre o AFE MAX2991 e o modem *baseband* PLC, o MAX2990 através de um canal de transmissão (*TXCLK*, *TXDATA*, *TXCONV*) e do canal de recepção (*RXCLK*, *RXDATA*, *RXCONV*). A interface AFE fornece também acesso indirecto aos registos de configuração do MAX2991.

3.1.3 - Interface Série

O MAX2991 possui duas interfaces série separadas: uma interface *host* SPI (*Serial Peripheral Interface Bus*) e outra interface AFE. O host SPI dá acesso directo à configuração dos registos do MAX2991 (porta de comunicação utilizada nos testes), por outro lado a interface AFE permite a comunicação de dados com o modem *baseband* PLC.

3.1.4 - AGCCS (*Automatic Gain Control - Control Signal*)

O sinal AGCCS controla o circuito de AGC no caminho de recepção de dados no MAX2991. Um preâmbulo válido detectado pelo PHY digital levanta AGCCS a alta. A camada digital PHY tem o AGCCS ao nível alto durante a recepção de uma transmissão e, em seguida, coloca o

AGCCS no nível baixo, para aumentar o grau de sensibilidade para outros sinais que possam chegar.

3.1.5 - Canal receptor

O canal receptor consiste num amplificador VGA1 (*Variable Gain Amplifier*), seguido por um filtro passa - baixo (LPF), um filtro passa - alto (HPF), e outro circuito amplificador VGA2.

O interface AFE permite a comunicação de dados com a camada PHY (*Physical Layer*). O amplificador VGA1 instalado à entrada do canal reduz o ruído neste, proporcionando o aumento do ganho de sinal à entrada do AFE. Os amplificadores VGA servem para manter um nível de sinal óptimo na entrada do ADC.

A combinação do filtro passa - baixo e o filtro passa - alto é usada para fornecer uma largura adequada para várias faixas de frequências, nas quais o AFE está configurado a operar [27][22].

3.1.6 - Canal transmissor

O canal de transmissão é constituído por um conversor digital - analógico (DAC), um filtro passa - baixo, e um ganho programável *predriver*. O DAC recebe o fluxo de dados da camada física digital (PHY), através da interface AFE.

O DAC converte o fluxo digital de 10 bits numa tensão analógica. O filtro passa - baixo remove os harmónicos adjacentes à banda, para ajudar a reduzir qualquer frequência de transmissão fora da banda desejada. Este filtro garante que o sinal transmitido satisfaz os requisitos especificados nas normas de banda estreita (*narrowband*) e banda larga (*wideband*). O *predriver gain control* permite ajustar o nível da saída, o que proporciona um ganho até 6dB e uma atenuação de 10 dB (Nota: aumentou-se o ganho do sinal emitido pelo modem e também se atenuou o mesmo, ou seja, foram testadas todas as hipóteses).

3.1.7 - Codificação Reed-Solomon

A família de códigos *Reed-Solomon* (RS) é formada por códigos não - binários, inventada por *Irving S. Reed* e *Gustave Solomon*. Os códigos podem corrigir, dentro de um determinado bloco, um certo número de erros, de acordo com o seu desenho. Sendo não - binários, estes códigos são vocacionados para erros que ocorram em rajada, ou seja, são muito úteis no caso de canais que inserem erros contíguos (*bursty channels*).

Na descodificação dos códigos *Reed-Solomon*, os símbolos não - binários da sequência que alcança o receptor são interpretados como os coeficientes de um polinómio $p(x)$ sobre um campo finito. Vários cálculos são feitos com o bloco/polinómio recebido, para detectar a presença de erro (s). Há vários métodos de descodificação, sendo um dos primeiros o que foi inventado por *Elwyn Berlekamp* e *James Massey*, conhecido pelo algoritmo *Berlekamp - Massey*. Os códigos *Reed - Solomon* têm várias aplicações importantes na comunicação nos aparelhos electrónicos de consumo. Os códigos são utilizados hoje em dia em CDs, DVDs, discos Blu-ray, em tecnologias de transmissão de dados, como DSL e WiMAX, em sistemas de transmissão, tais como DVB e ATSC, e em aplicações de computador, tais como sistemas RAID 6. No caso presente, é a sua utilização nas técnicas de OFDM que os torna pertinentes a este estudo [28].

3.1.1 - Codificação convolucional

A codificação convolucional é utilizada no modo de operação denominado por “NORMAL Mode”. Esta codificação, mais simples do que a *Reed Solomon*, permite corrigir uma menor quantidade de erros numa trama.

3.2 - Modem da ADD (PRIME)



Figura 3.3 - Evaluation Board ADDM2102 [29]

Este modem da ADD pertence ao projecto PRIME (*Powerline Intelligent Metering Evolution*), um projecto liderado pela distribuidora eléctrica Espanhola a Iberdrola com intuito de provar a viabilidade da tecnologia AMM (*Automatic Meter Management*) para responder às necessidades do mercado. O projecto PRIME Alliance é o único que continua a evitar tecnologias proprietárias. Dado o atraso deste projecto, os modems para estudo no âmbito desta dissertação só chegaram no início do mês de Junho de 2010, o que impossibilitou um estudo mais detalhado e a inclusão deste modem nos testes no terreno.

3.2.1 - Camadas PRIME

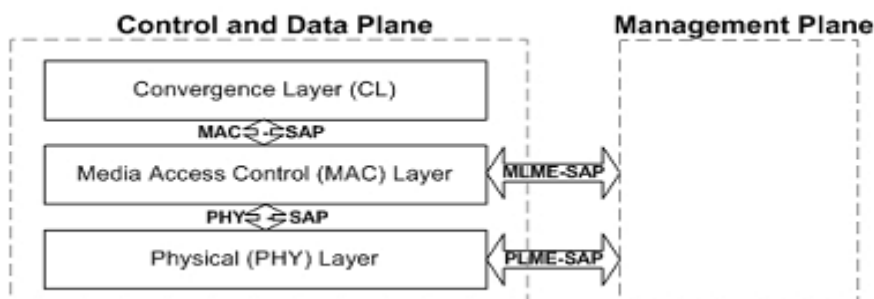


Figura 3.4 - Camadas do PRIME [29]

O projecto PRIME define as camadas inferiores de um sistema de transmissão de dados, de banda estreita, através de tecnologia PLC. O sistema foi criado tendo por objectivos de base

o seu baixo custo e alto desempenho. Na figura 3.4 evidencia as camadas de comunicação, o modelo de referência é baseado na especificação IEEE Std.802,16 camadas de protocolo.

A camada CL (*convergence Layer*) realiza o mapeamento de qualquer tipo de tráfego a ser incluído na camada MAC (*Media Access Control*).

A camada MAC permite fazer a alocação de largura de banda, gestão da ligação entre o concentrador e os nós e resolução da topologia da rede. Foi definida para um ambiente de conexão *master - slave* orientado e otimizado para ambientes de baixa tensão.

A camada PHY transmite e recebe o MAC PDU (*Protocol Data Units*) é baseada em modulação OFDM e opera na banda CENELEC A, poderá atingir cerca de 130kbps, teoricamente [29].

3.2.2 - Camada Física



Figura 3.5 - Canal de transmissão, camada PHY [29]

No lado do transmissor, a camada PHY recebe as entradas provenientes da camada MAC, na saída os dados são independentemente modulados usando DBPSK, DQPSK ou D8PSK. O próximo passo é aplicar modulação OFDM, os dados são também encriptados com codificação convulucional.

3.2.3 - Camada MAC

O sistema PRIME é composto por sub-redes, cada uma delas definida no âmbito de uma estação transformadora ou posto de transformação. A sub-rede tem uma topologia tipo “árvore” com dois tipos de nós, o nó base e o nó de serviço [30].

3.2.3.a - Nó base (“mestre”)

O nó base é a raiz da malha da rede, a raiz da “árvore”, funciona como nó mestre e fornece conectividade para a rede secundária. Este nó faz a gestão dos recursos da sub-rede, fazendo, por exemplo, o registo dos nós de serviço, nós “filhos” na rede secundária.

3.2.3.b - Nó Serviço (“escravo”)

Qualquer nó da rede secundária é um nó de serviço, estes nós tanto podem ser as “folhas” ou pontos de ramificação da “árvore”. Estes nós de serviço têm duas responsabilidades: uma é a de se ligarem à sub-rede e permitir a comutação de dados com os seus vizinhos, a fim de propagar a conectividade na rede [30].

3.3 - Técnica de Modulação OFDM

3.3.1 - Introdução

A técnica de modulação *Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)*, também conhecida como DMT (*discrete multitone modulation*), é uma técnica suplantada na ideia de multiplexação por divisão de frequência (FDM), onde múltiplos sinais são enviados em diferentes frequências. É uma tecnologia com um elevado grau de complexidade ao nível da sua implementação, sendo cada vez mais utilizada em telecomunicações, recorrendo a sistemas digitais para simplificar o processo de codificação e descodificação dos sinais.

OFDM parte deste conceito básico, desenvolvendo-o, pois divide uma única transmissão em múltiplos sinais com menor ocupação espectral, com a particularidade de, em vez de utilizar bandas de guarda para a separação das subportadoras na recepção do sinal, utiliza uma particular sobreposição espectral das subportadoras.

No processo de modulação OFDM, são utilizadas várias subportadoras. Estas subportadoras são ortogonais entre si, para evitar que ocorram interferências entre elas. Isso significa que o espaçamento entre as portadoras é igual ao inverso da duração de um símbolo. A figura 3.4 ilustra a forma como as portadoras são separadas no tempo e na frequência [31].

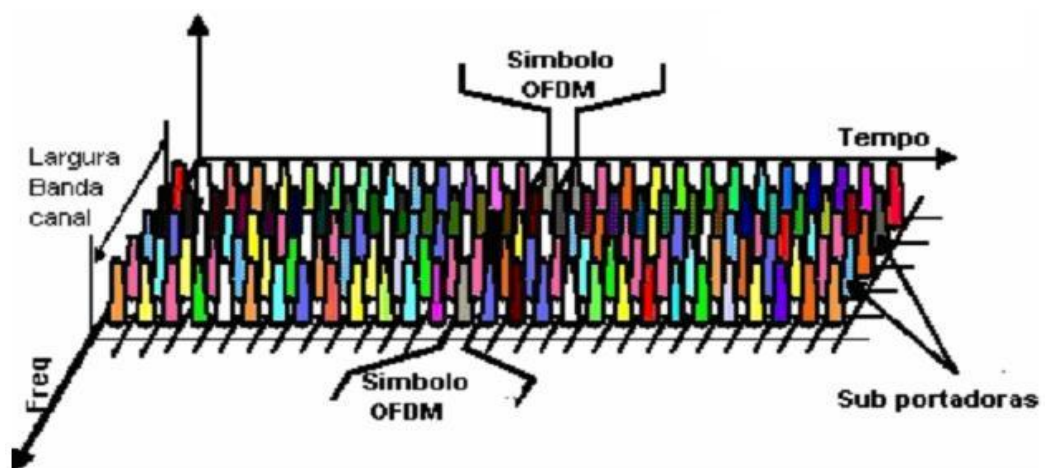


Figura 3.6 - Ilustração da separação das portadoras na frequência e no tempo [34]

Um sinal OFDM em banda base é a soma de várias subportadoras ortogonais, sendo os dados de cada subportadora independentemente. Por exemplo, uma subportadora pode usar uma modulação QAM e a vizinha usar PSK. A modulação OFDM exige uma sincronização precisa entre o transmissor e o receptor, pois qualquer desvio nas subportadoras pode afectar a ortogonalidade [32].

Das diversas vantagens da utilização do OFDM destaca-se a elevada eficiência espectral, imunidade contra fenómenos de multi-percurso e filtragem de ruído simples. Alguns sistemas OFDM usam algumas subportadoras para enviar sinais piloto, que são usados na sincronização entre o transmissor e receptor [33].

3.3.2 - Caracterização da técnica de modulação OFDM

Nos sistemas convencionais de transmissão, os símbolos são enviados em sequência através de uma única portadora, cujo espectro ocupa toda a faixa de frequências disponível. A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas subportadoras, moduladas com BPSK, QAM ou PSK, entre outras, e taxas de transmissão por subportadora tão baixas quanto maior o número destas. A redução na taxa de transmissão (aumento da duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora) implica uma diminuição da sensibilidade à selectividade em frequência causada pelo multipercurso.

Num sistema OFDM o espaçamento entre as subportadoras é cuidadosamente seleccionado conforme se ilustra na figura abaixo [36].

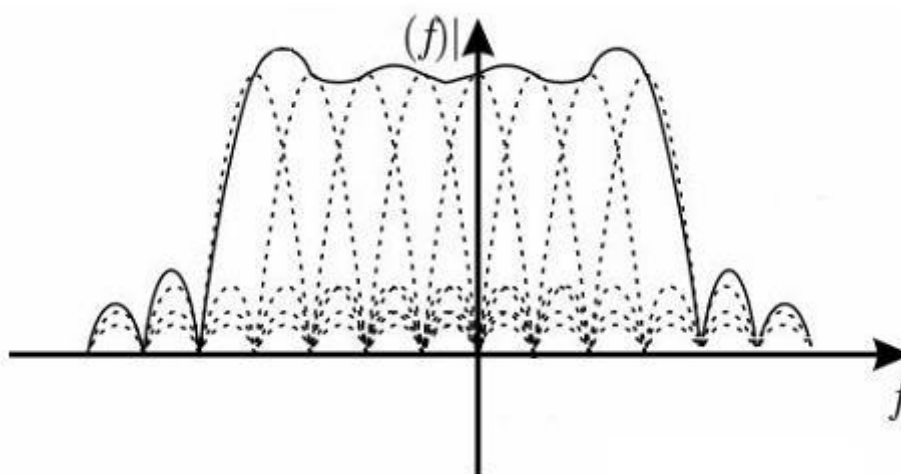


Figura 3.7 - Subportadoras de um sinal OFDM, frequência normalizada em relação ao valor $1/T$ [34]

Apesar de existir sobreposição espectral de subportadoras moduladas, a ortogonalidade entre as mesmas reduz o impacto negativo que tal situação normalmente acarretaria. Esta sobreposição espectral particular permite uma economia significativa de banda relativamente à técnica FDM tradicional, conforme ilustrado na figura em baixo. Pode-se obter uma economia de banda de aproximadamente 50%.

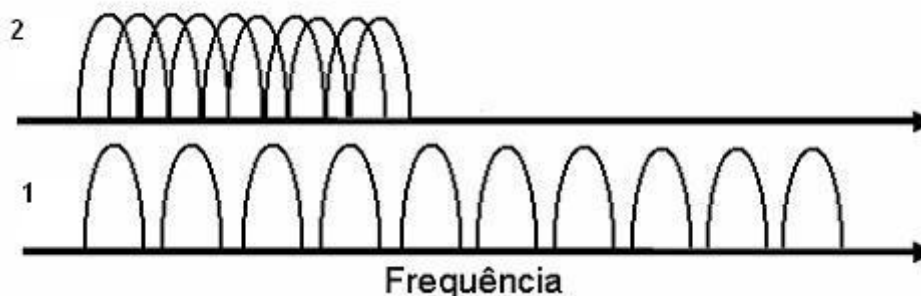


Figura 3.8 - Espectros de FDM convencional (1) e OFDM (2) [34]

Relativamente ao domínio do tempo, a característica de ortogonalidade entre subportadoras implica que duas portadoras quaisquer difiram exactamente por um número inteiro de ciclos, uma vez que estão separadas harmonicamente.

A modulação e desmodulação do sinal OFDM requerem conjuntos de osciladores coerentes, que tornam este processo numa implementação complexa e cara, particularmente quando o número de subportadoras é elevado. Contudo, estes processos de modulação e desmodulação podem ser executados de forma mais simples utilizando nomeadamente algoritmos baseados na Transformada Rápida de *Fourier* (FFT).

A largura de banda dos subcanais de um sistema OFDM é dada pela divisão da largura de banda total destinada ao sistema pelo número de subportadoras. Trabalhar com canais mais estreitos, em vez de um único canal mais largo traz um grande benefício no que diz respeito à selectividade em frequência. Apesar do termo multiplexagem, aparecer ligado à técnica OFDM há que referir que em rigor não ocorre multiplexagem num sistema OFDM, mas sim a transmissão paralela de uma sequência de bits originalmente única [34].

3.3.3 - BPSK

O BPSK (às vezes também chamada PRK, *Phase Reversal Keying*, ou 2PSK) é a forma mais simples de introduzir mudança de fase (PSK). Esta modulação usa duas fases que estão separadas por 180° e assim também pode ser chamado de 2-PSK. Esta modulação é a mais robusta de todos os PSKs pois tem o maior nível de ruído ou distorção para fazer o desmodulador chegar a uma decisão errada. É, no entanto, só capaz de modular a 1 bit por símbolo e assim não é adequado para aplicações de alta taxa de dados quando a largura de banda é limitada [35].

3.4 - Conclusão

Neste capítulo foram examinadas detalhadamente duas soluções existentes no mercado que foram alvo de estudo. Foram explicados os conceitos técnicos, nomeadamente a técnica de modulação OFDM, comum aos dois modems alvo de estudo aqui. Fez-se também uma abordagem técnica dos dois modems, um da *Maxim* e outro da *ADD*.

Capítulo 4

Redes Inteligentes - Primeiros passos em Portugal

Neste momento, a EFACEC juntamente com a EDPD e outras empresas encontram-se envolvidas num projecto de desenvolvimento de redes inteligentes, o *InovGrid* que começou em 2007, e tem implementação prevista no terreno para o final do ano 2010.

A EFACEC está responsável pelo desenvolvimento dos *DTC's* e da comunicação destes com as *EB's*, via tecnologia PLC. Estão instalados *DTC's* e *EB's* de teste em várias zonas do país, tais como: Cruz Quebrada, Paço de Arcos, na Boavista em Lisboa em instalações da EDP e também foram colocados *DTC's* em linhas aéreas na região de Lisboa, em Viana do Castelo e em Évora.

Para Évora está prevista a implementação final de um grande número de *DTC's*, bem como *EB's*, esta será a maior *smart grid* do país, na já apelidada “cidade inteligente”.

4.1 - Modem da Renesas



Figura 4.1 - Evaluation Boards da Renesas [36]

O kit representado na Figura 4.1 tem um modem que funciona como concentrador e outros dois modems que funcionam como nós. O dispositivo *sniffer* permite verificar os endereços de origem e destino das tramas, e também se estas foram correctamente transmitidas, isto é, permite monitorizar as comunicações entre o concentrador e os nós “filhos”. Adicionalmente, tem um dispositivo (E8a *emulator*) que permite reprogramar o

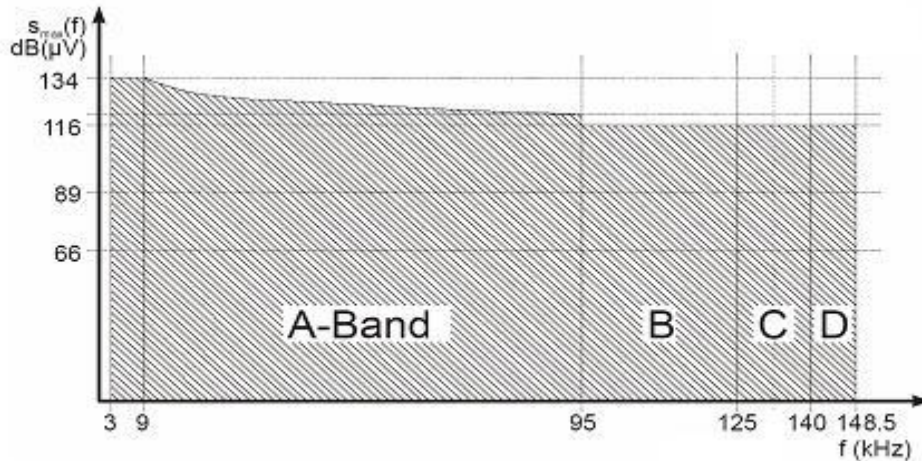


Figura 4.2 - Visão global da banda CENELEC [36]

firmware dos modems.

O modem da *Renesas*, o M16C/6S suporta padrões mundiais, incluindo FCC (E.U.A.), ARIB (Japão), CENELEC A e B (Europa). Esta solução é flexível, à semelhança da solução MAXIM, uma vez que o mesmo dispositivo pode ser usado para suportar todos os padrões mundiais, sendo apenas necessário modificar alguns componentes externos e o software de configuração.

No caso deste estudo o foco incidiu sobre o CENELEC-A, entre os 3-95kHz que é a largura de banda utilizada para comunicações PLC no exterior, a restante largura de banda é reservada a comunicações no interior dos edifícios (rede doméstica). Na solução *Renesas* é utilizada uma técnica única de modulação de espalhamento espectral de banda larga chamada DCSK.

O M16C/6S tem vários mecanismos para tornar a comunicação mais robusta. Estes mecanismos são incorporados no hardware, tais como:

- CRC (*Cyclic Redundancy Checksum*);
- FEC (*Forward Error Correction*);
- CSMA / CA (*Carrier Sense Multiple Access / Carrier Avoidance*);
- LQI (*Quality line Indicator*);
- Três modos diferentes de comunicação (*standard mode, robust mode, extremely robust mode*) [36].

4.1.1 - Diagrama de Blocos do M16C/6S

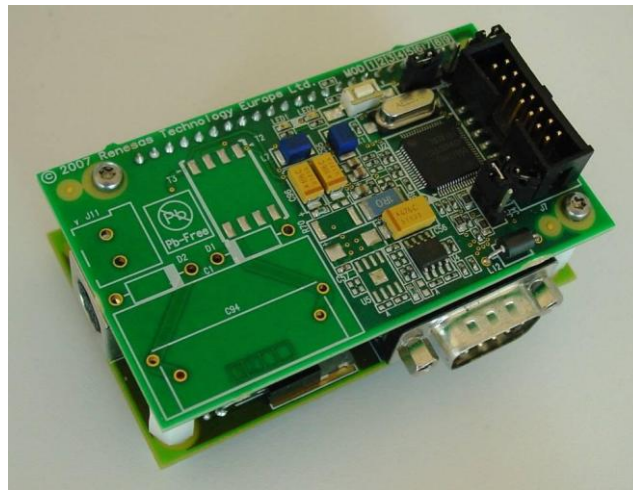


Figura 4.3 - Evolution Board 08 - M16C/6S (EV08-Europa) [36]

O M16C/6S é um microcomputador de chip único, construído utilizando tecnologia CMOS de alta performance. Estes microcomputadores *single-chip* funcionam utilizando instruções sofisticadas com um elevado nível de eficiência de instrução, capazes de executar instruções em alta velocidade.

O M16C/6S é adequado para a rede PLC, porque inclui a tecnologia avançada IT800 desenvolvida pela empresa *Yitran*. No módulo MCU encontra-se uma memória flash de 96kBytes e 24kBytes de RAM.

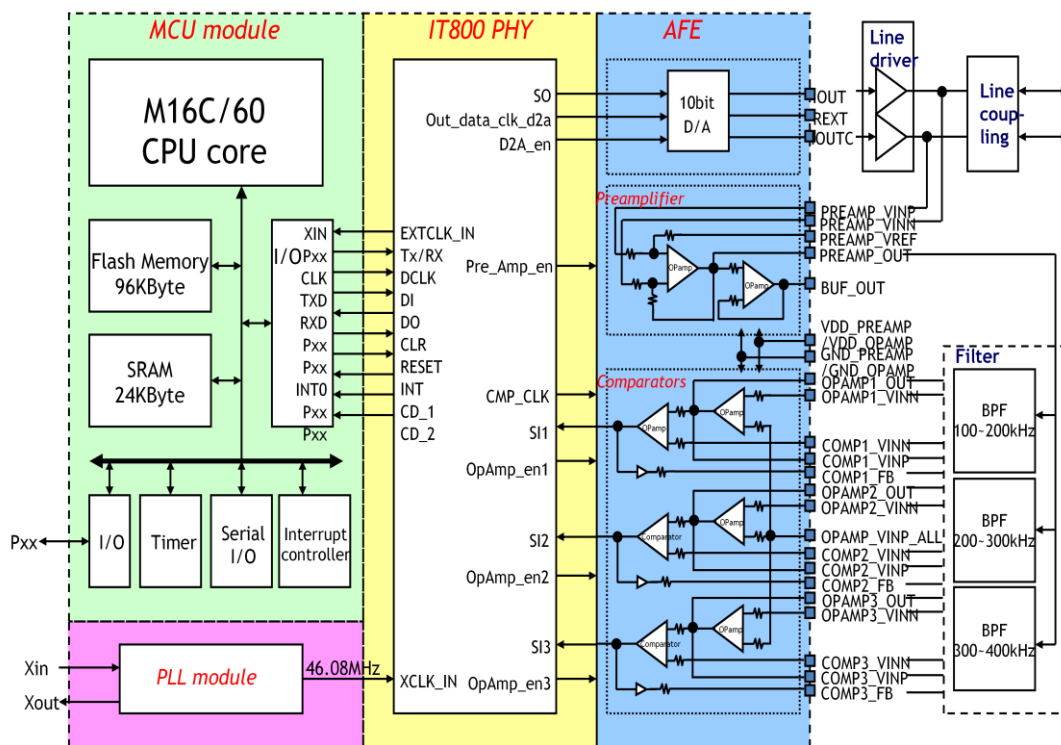


Figura 4.4 - Diagrama de blocos do modem M16C/6S [36]

O circuito *Analogue Front End* (AFE) inclui um conversor digital para analógico (DAC) no canal da transmissão e um pré-amplificador e um conversor analógico para digital (ADC) no caminho da recepção. A figura 4.4 fornece uma descrição geral do diagrama de blocos AFE, bem como dos restantes módulos.

O filtro externo na entrada está ligado ao pré-amplificador, que faz parte do caminho da recepção do sinal. A saída de cada filtro do canal externo, no canal da recepção, está conectado a uma entrada de 1-bit ADC. Existem três unidades semelhantes ADC incorporados no chip. O ADC é construído através de um estágio amplificador e um comparador de fase.



Figura 4.5 - Fonte de alimentação da YITRAN que inclui acoplador à rede eléctrica

A fonte de alimentação do modem PLC EVB08 tem dupla função pois, funciona como acoplador à rede eléctrica permitindo o envio e recepção de dados e alimentando o modem. Portanto, a tensão principal não é fornecida directamente ao modem PLC, permitindo proteger o circuito de eventuais alterações na rede [36].

Tabela 4.1 - Especificações do Modem M16C/6S [36]

Taxa de transferência de pacotes	Cenelec A e B - Europa	
	<i>Robust Mode</i>	<i>Extremely robust mode</i>
	2.5kbps	0.625kbps
Banda de frequência	<i>Indoor</i>	<i>Outdoor</i>
	Cenelec B - 95~125kHz C - 125~140kHz D - 140~148.5kHz	Cenelec A - 3~85kHz
Protocolo de acesso ao canal	CSMA / CA (apenas no Cenelec C)	
Controlo de retransmissão	<i>Acknowledged e Unacknowledged</i>	
Gama de temperaturas	<i>Normal Mode</i>	<i>Extended Mode</i>
	-20 °C ~ 85 °C	-40 °C ~ 85 °C

4.1.2 - Estrutura da malha da Rede

A rede do modem M16C/6S encontra-se estruturada em árvore (figura 4.6), na qual o nó concentrador é o único que ocupa o nível 0 e tem por função controlar toda a rede. Este nó é instalado no PT, dentro do DTC e os restantes nós, encontram se espalhados pelas diversas habitações alimentadas pelo PT. Cada nível poderá ter até 255 nós e cada nó tem um endereço que o identifica na rede, encontrando-se distribuídos pelos diferentes níveis de hierarquia até ao máximo de sete níveis.

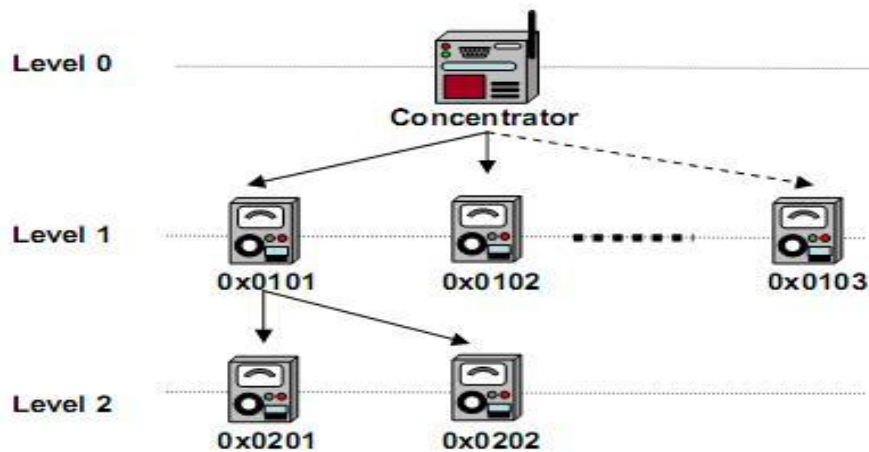


Figura 4.6 - Estrutura da rede PLC [37]

Os nós mais próximos do concentrador comunicam directamente com este, mas os que se encontram mais longe podem não conseguir estabelecer comunicação directa, existindo a hipótese de recorrer a outros nós na sua vizinhança, que irão funcionar, neste caso, como repetidores, permitindo que a informação chegue ao seu destino, o concentrador. Caso vários nós na vizinhança de um nó, que não consegue comunicar directamente com o concentrador, enviem ofertas para funcionarem como repetidores, o nó tem a capacidade para escolher automaticamente qual deles é o melhor, para estabelecer a ponte de comunicação com o concentrador. Esta avaliação é feita com base na intensidade dos sinais dos pacotes enviados e no número de nós "filhos".

Os modems PLC constroem e reconfiguram a rede tendo como objectivo principal a optimização dos recursos [37].

4.1.3 - Modulação DCSK

A modulação utilizada pelo modem da *Renesas* é o *DCSK* (*differential code shift keying*), modulação desenvolvida pela *Yitran*, e pertence à família das técnicas de modulação de espalhamento espectral.

A técnica de modulação de espalhamento espectral é uma técnica na qual é utilizada, aquando da transmissão, uma largura de banda muito superior à banda mínima necessária para transmitir a informação. Desta forma, a energia do sinal transmitido passa a ocupar uma banda muito maior do que a da informação. A desmodulação é feita pela correlação entre o sinal recebido e uma réplica do sinal usado para espalhar a informação.

No caso concreto da técnica de modulação DCSK, caracterizada por particularidades relativamente à técnica de espalhamento espectral, aspectos esses que passo a explicar. No

DCSK a propagação dos bits é feita através de frequências diferentes. Na verdade, existem três faixas de transmissão para CENELEC A que são: 19,2 - 40 kHz; 38,2 - 63,2 kHz e 58,4 - 89,5 kHz. Um sinal *chirp* (sinal com uma determinada frequência) começa e termina em frequências diferentes, dependendo do símbolo transmitido, que lhe confere maior robustez contra erros que possam levar à perda de pacotes, durante a transmissão. O símbolo é enviado em três canais simultaneamente, na recepção existe um sistema de decisão automática de 2-de-3 para cada transmissão, isto é, se os pacotes recebidos em 2 dos 3 canais forem os mesmos o pacote é aceite como correcto.

Um símbolo é uma forma de onda e pode ser constituído por 4 bits ou 6 bits. O ERM (*extreme robust mode*) e o RM (*robust mode*) utilizam DCSK4 que usa 4 bits por símbolo, enquanto no SM (*Standard Mode*) é utilizado o DCSK6 que usa 6 bits por símbolo [37].

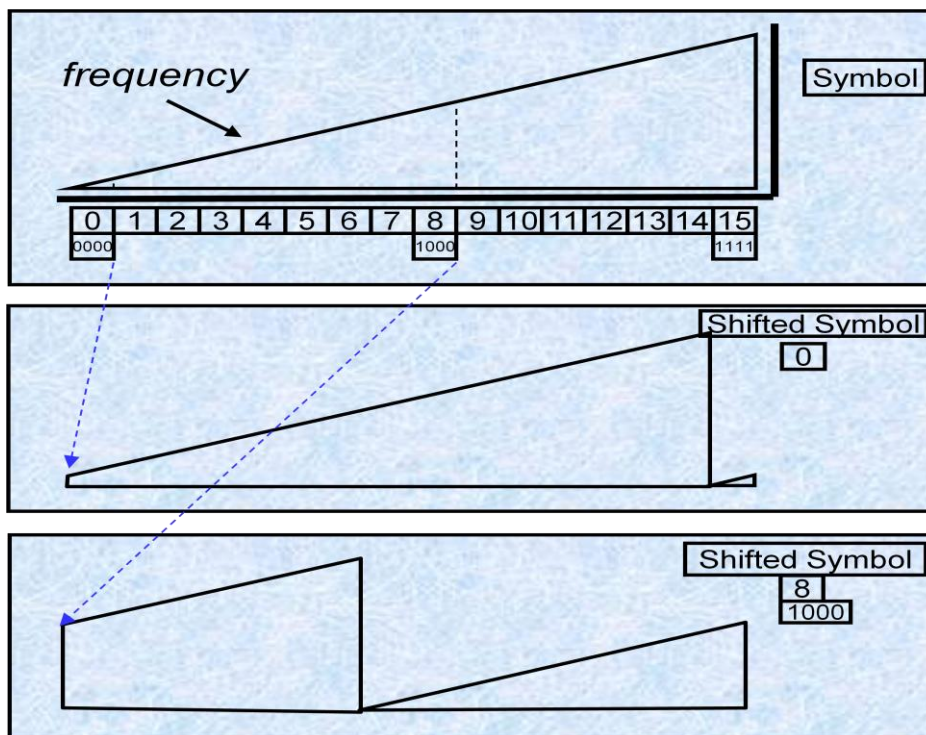


Figura 4.7 - Exemplo de uma transmissão DCSK [37]

Recorrendo a um exemplo, para transmitir H'0000 no modo robusto (RM 4 bits por símbolo), a onda varre a frequência dos 19,2 - 40 kHz, e para o símbolo H'1000 varre a frequência dos 30-40 kHz, de volta para 19,2 kHz e até os 30 kHz no mesmo período. Por isso, esta a ser detectada a mudança de frequência dentro do tempo, que corresponde a um símbolo diferente. O eixo vertical descreve a frequência, aqui pode-se observar que o início e fim das frequências são diferentes representando, portanto, um símbolo diferente. Esta é uma das razões pelas quais DCSK é tão robusto, normalmente, o ruído é maior em determinadas frequências, mas o DCSK não depende de uma única frequência [38] e [39].

4.1.4 - Camada de rede

Neste nível há que referir a implementação do protocolo de comunicações RUN-M (*Renesas Ubiquitous Network layer for Metering Applications*) utilizado no modem da Renesas para aplicações de AMR, telemetria e controlo de iluminação.

A rede RUN-M é composta por 1785 nós (máximo), um concentrador que controla toda a rede e sete níveis (máximo) de encaminhamento de mensagens para comunicação de longa distância. Além disto, o RUN-M tem um mecanismo automático de integração de novos nós, que permite atribuir endereços aos novos nós que se juntem à rede [40].

O protocolo RUN-M possibilita o tratamento inteligente de falha, ou seja, caso um nó perca o seu “pai” existe uma função de *rejoin*, para voltar a integrar a rede e a capacidade de reconfiguração dinâmica, que torna possível a recuperação da configuração da rede via EPROM.

Por último, a funcionalidade de difundir vários tipos de mensagens para a rede; *unicast*, mensagem para um determinado nó; *levelcast*, mensagem para todos os nós em um determinado nível; *multicast*, mensagem para toda a rede [41] e [42][37].

4.2 - Conclusão

Neste capítulo é evidenciado o projecto que está a ser desenvolvido em Portugal bem como as especificações do modem que está a ser utilizado, o modem da *Renesas*.

De realçar o estudo detalhado desta tecnologia PLC da *Renesas*, bem como de alguns conceitos que lhe são inerentes.

Capítulo 5

Resultados Obtidos

Neste capítulo são demonstrados os resultados obtidos dos testes efectuados e apresentam-se também os modelos utilizados, condicionantes e

5.1 - Modelo de testes

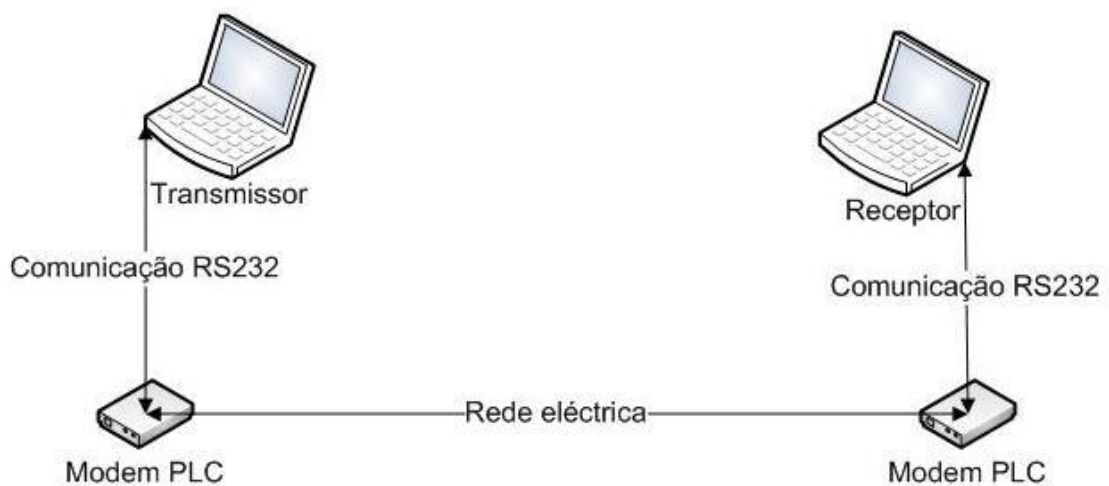


Figura 5.1 - Cenário de teste global

A figura 5.1 exemplifica o cenário de teste que foi utilizado no terreno. Para os testes foram utilizados dois computadores portáteis que foram colocados, como se mostra na figura, junto de cada modem PLC. Um dos modems foi fixado no PT e o outro modem foi colocado em dois locais de teste diferentes.

No cenário de teste 1 foi colocado um dos modems no PT6 que se localiza na fábrica das renováveis da EFACEC e o outro modem foi colocado no Laboratório de Desenvolvimento das

Energias Renováveis que dista cerca de 150 metros, em termos de cabo eléctrico, do PT6 pois, fisicamente a distância é de 10 metros [43].

No cenário de teste 2 colocou-se também um dos modems no PT6 e o outro dos modems foi colocado, num ambiente mais hostil do ponto de vista de ruído na rede, uma vez que o quadro eléctrico 4 se localiza numa pequena sala juntamente com UPS (*Uninterruptible Power Supply*). O quadro eléctrico 4, situa-se (fisicamente) a cerca de 20 metros do PT6, e em termos de cabo eléctrico dista cerca de 100 metros.

5.1 - Sistema de medição de ruído na rede

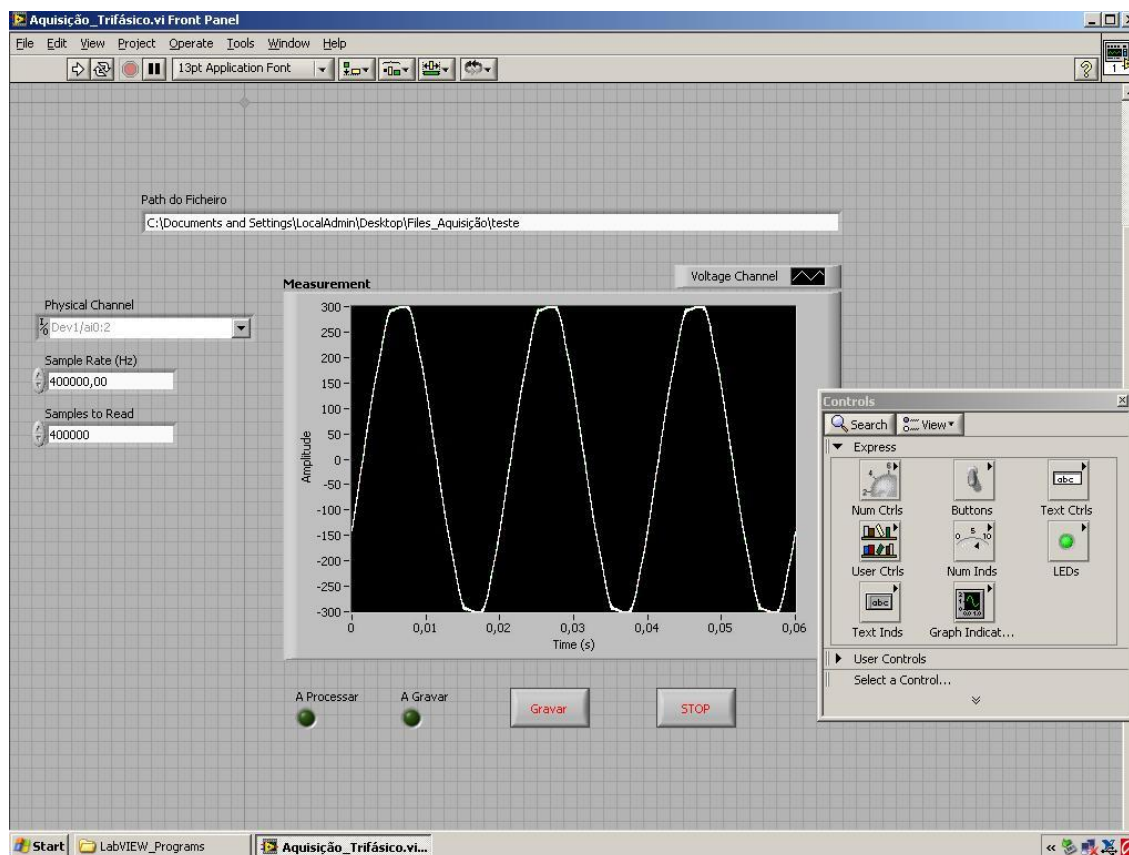


Figura 5.2 - Interface para aquisição de dados de medições (*LabView*)

Este sistema foi cedido pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, pois foi bastante difícil encontrar sondas que pudessem ser ligadas directamente à rede eléctrica e fizessem medições na gama de frequências entre os 3-95kHz. Este equipamento só chegou há pouco tempo, por volta do dia 16 de Maio de 2010, o que levou a que o software que trata os dados adquiridos por este equipamento ainda esteja a ser alvo de melhorias.

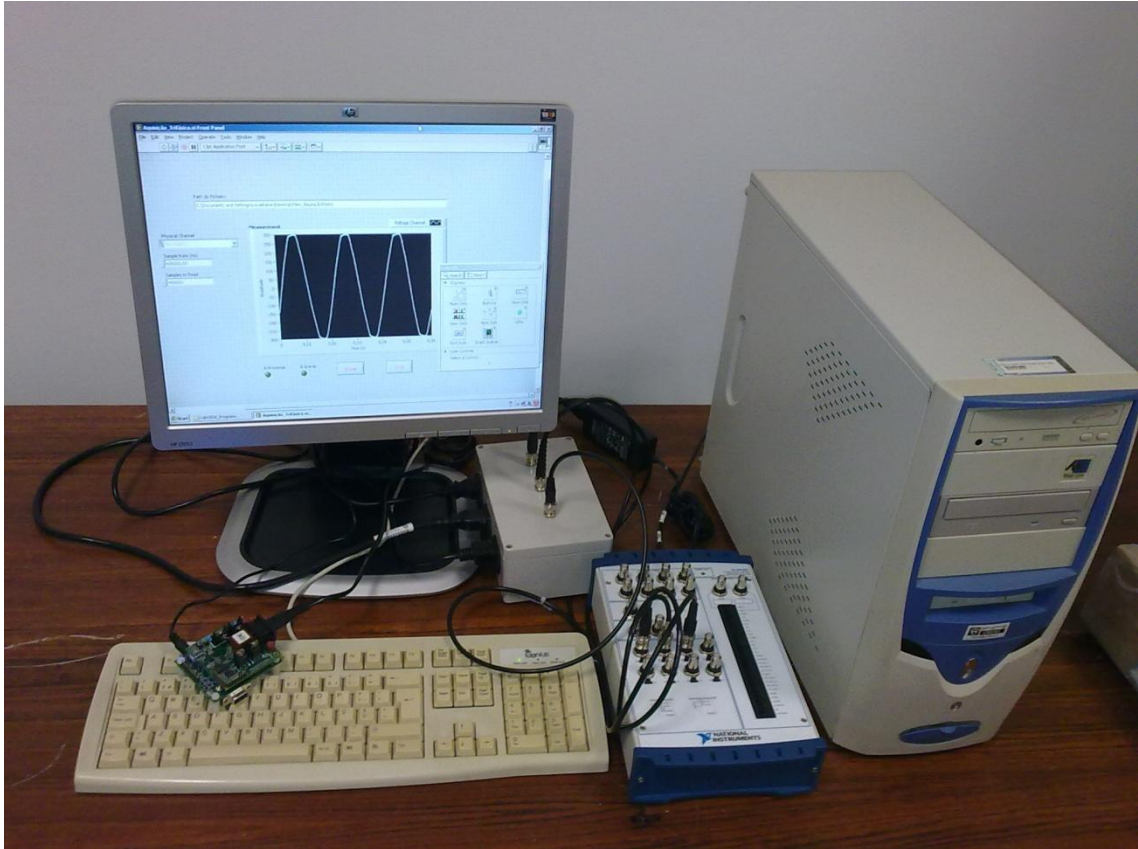
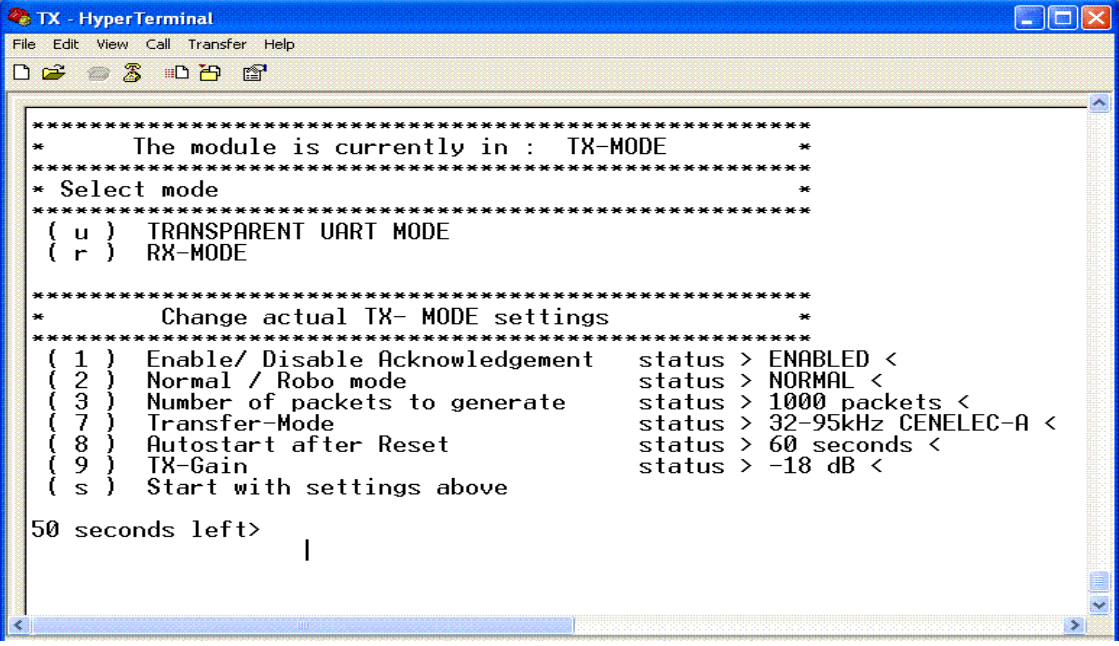


Figura 5.3- Equipamento utilizado para aquisição de medições

5.2 - Modem *Maxim*

No modem da MAXIM, sobre o qual incidiram a maioria dos testes efectuados, a velocidade máxima testada no modo Robusto, pelos responsáveis da MAXIM, foi no máximo de 4Kbps e no modo Normal 24Kbps, sem perda de pacotes.

A diferença principal entre o modo Normal e o modo Robusto, é que neste último existe maior codificação, ou seja, é utilizado um codificador extra, codificador *Reed - Solomon* depois da codificação convolucional, este repete várias vezes os bits. Esta maior correcção de erros é utilizada para permitir diminuir as perdas de pacotes enviados, aumentando assim, a taxa de sucesso de tramas correctamente enviadas, apesar da diminuição da velocidade, explicada pela codificação extra.



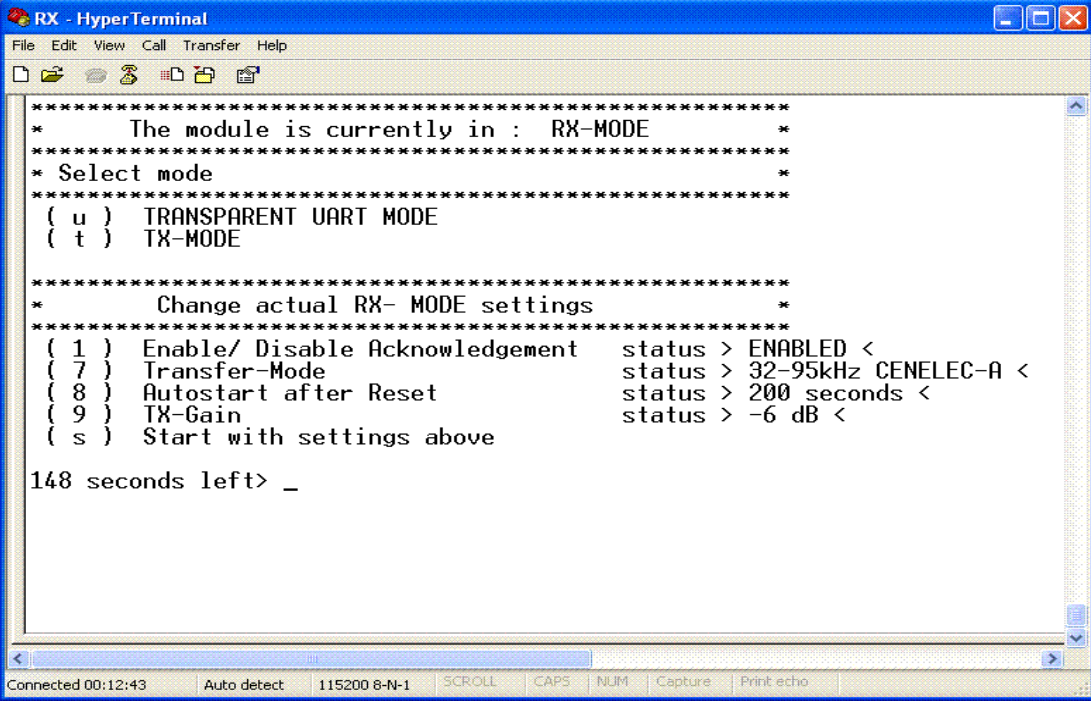
```

TX - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
*****
* The module is currently in : TX-MODE *
*****
* Select mode *
*****
( u ) TRANSPARENT UART MODE
( r ) RX-MODE
*****
* Change actual TX- MODE settings *
*****
( 1 ) Enable/ Disable Acknowledgement status > ENABLED <
( 2 ) Normal / Robo mode status > NORMAL <
( 3 ) Number of packets to generate status > 1000 packets <
( 7 ) Transfer-Mode status > 32-95kHz CENELEC-A <
( 8 ) Autostart after Reset status > 60 seconds <
( 9 ) TX-Gain status > -18 dB <
( s ) Start with settings above
50 seconds left>

```

Figura 5.4 - Interface do Modem PLC da Maxim (Transmissor)

Nos modems é possível alterar directamente, através do interface disponibilizado via porta série, a sua propriedade de emissor ou receptor, como se pode verificar na figura 5.3. Existem mais alguns parâmetros que se podem configurar, tais como: número de pacotes a enviar, bem como o tamanho dos pacotes, definir o modo de transmissão (ROBO, NORMAL ou transparente), atenuar ou aumentar o ganho do sinal a ser enviado pelo modem, no canal de transmissão, e incluir ou não, o recebimento de *Acknowledge*, “ACK”.



```

RX - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
*****
* The module is currently in : RX-MODE *
*****
* Select mode *
*****
( u ) TRANSPARENT UART MODE
( t ) TX-MODE
*****
* Change actual RX- MODE settings *
*****
( 1 ) Enable/ Disable Acknowledgement status > ENABLED <
( 7 ) Transfer-Mode status > 32-95kHz CENELEC-A <
( 8 ) Autostart after Reset status > 200 seconds <
( 9 ) TX-Gain status > -6 dB <
( s ) Start with settings above
148 seconds left> _

```

Figura 5.5 - Interface do Modem PLC da Maxim (Receptor)

No interface do receptor mais básico do que o transmissor, verifica-se que é possível escolher enviar ou não um “ACK” para o transmissor, colocar a potência do sinal emitido pelo transmissor, e escolher o modo de transferência, neste caso o *Cenelec - A* que é o modo utilizado para comunicações PLC outdoor, como se encontra assinalada, a gama de frequências que este modem utiliza vai de 32kHz a 95kHz.

No que toca à programação da memória flash dos modems PLC da MAXIM, ocorreram problemas no que toca à alteração do *firmware* que levaram um tempo a resolver. Vindo depois a constatar-se que os conectores USB - RS232 que estavam a ser usados não poderiam ser usados na programação da memória flash dos modems, apenas na comunicação entre computador - modem via *HyperTerminal*, porque ocorriam sempre erros na programação da memória flash. A situação foi resolvida arranjando um computador com porta RS232 para programar a flash.

5.2.1 - Apreciação Global de Resultados - MAXIM

Para facilitar a leitura e demonstração de resultados procedeu-se à junção no mesmo gráfico de diferentes testes, isto é, sempre na mesma situação, mas com o sinal transmitido a variar entre -10 e -4 dB, ou seja, sinal é atenuado e 4 e 6dB, o sinal é aumentado o seu ganho e 0 dB (situação standard), tudo isto porque o *firmware* dos modems permite efectuar estas mudanças facilmente.

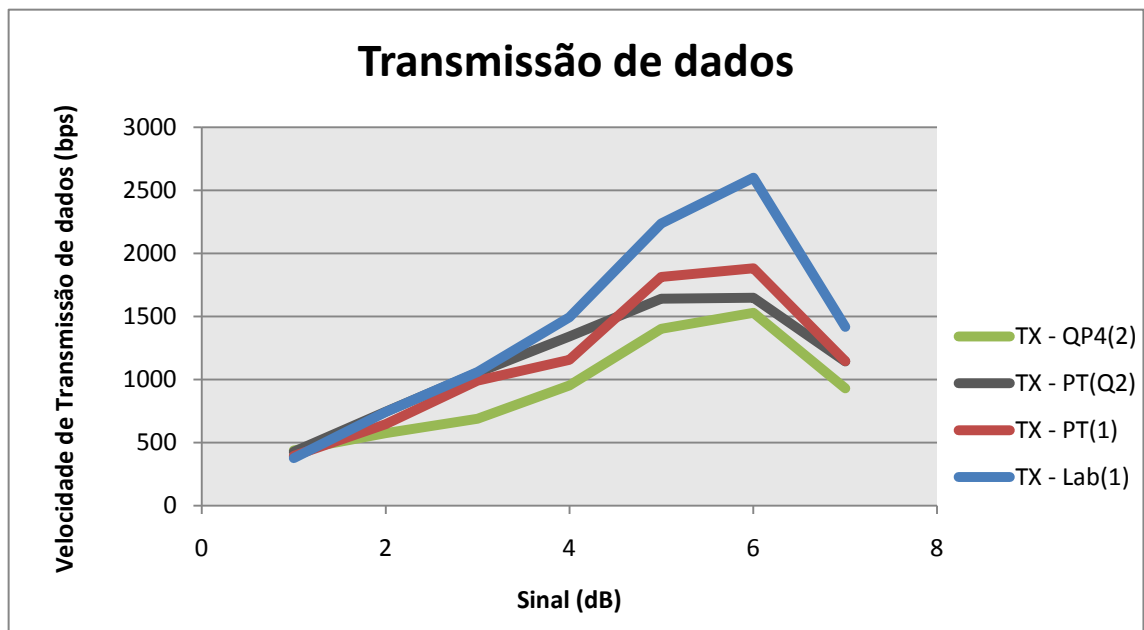


Figura 5.6 - Gráfico comparativo das Velocidades de Transmissão de dados recolhidas nos diferentes locais de teste

Este gráfico da figura 5.6 evidencia que quanto maior é o ganho que se coloca no sinal este consegue transferir as tramas a uma velocidade maior também, acontecendo o oposto quando se atenuo o sinal.

De referir que estes valores foram alcançados no modo robusto, uma vez que no modo normal não se conseguia obter comunicação entre os modems.

De salientar também que os melhores resultados foram alcançados com o transmissor no laboratório das renováveis e receptor no PT e os piores resultados com o transmissor no

quadro eléctrico 4 e receptor também no PT, isto poderá dever-se a uma maior interferência por parte das UPS junto do quadro, o que prejudicaram a qualidade do sinal.

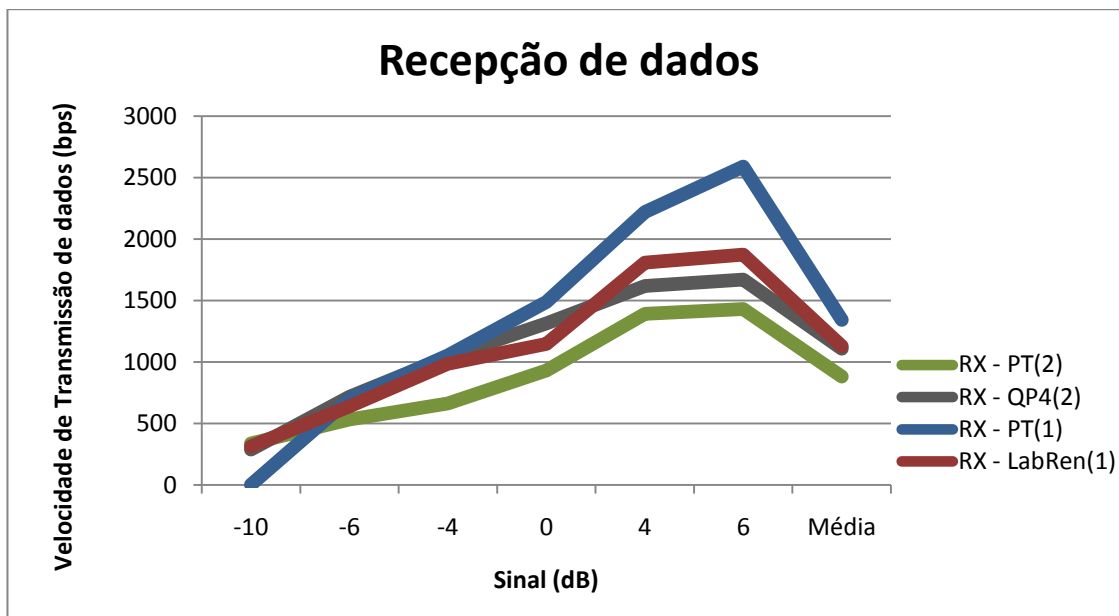


Figura 5.7 - Gráfico comparativo das Velocidades de Recepção de dados recolhidas nos diferentes locais de teste

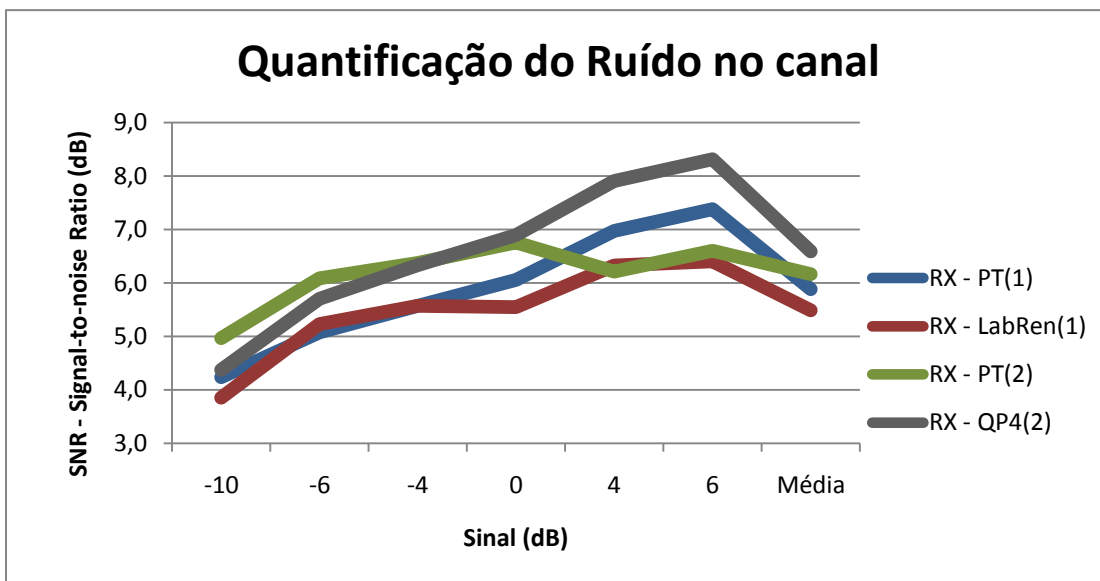


Figura 5.8 - Gráfico comparativo do nível de ruído no canal recolhidos nos diferentes locais de teste

Aqui se evidencia uma característica do modem da MAXIM, este possuía um sistema de qualificação do ruído da rede eléctrica, que servia para dar uma noção muito aproximada da realidade do canal. Assim, verifica-se uma situação curiosa, os melhores e piores valores não são obrigatoriamente aqueles que têm menos e mais ruído no canal, respectivamente aquando da transmissão.

Mais tarde chegou-se à conclusão que depois das 18h30, hora de saída dos funcionários da EFACEC, a rede melhorava bastante de qualidade, principalmente à sexta-feira.

Assim, foram efectuados testes após o horário laboral com sucesso, foi possível comunicar no modo normal e atingir velocidade média de 12kbps com um ganho de 6dB no sinal transmitido, a partir do laboratório das renováveis e o receptor instalado no PT.

5.3 - Modem Renesas

Este modem possui uma particularidade que facilitava o visionamento das tramas, o modem *sniffer*. Este modem era conectado à rede e através da sua ligação ao computador e através de um interface fornecido pela *Renesas* era possível observar o destino e a origem das tramas, a velocidade de transmissão, o número de nós na rede e o seu nível hierárquico.

No.	Time (h:m:s)	Delta (µs)	LQI	Len	Packet Type	Src Network	Src Addr	Dest Addr	RUN Scr/Dst	Info
0	1:13:28.086599	58,906,900	255	27	Join Request	0x03FF	0x03A8	0x0000	0x03A8 >> 0x0000	Join Filter: 0x0001
1	1:13:28.717049	630,450	255	27	Join Offer	0x0142	0x0001	0x03A8	0x0001 >> 0x03A8	
2	1:13:37.768599	9,051,550	255	31	Join Notification	0x03FF	0x03A8	0x0001	0x03A8 >> 0x0001	Network: 0x0142, Parent: 0x0001
3	1:13:38.519624	751,025	255	26	Join Confirmation	0x0142	0x0001	0x03A8	0x0001 >> 0x03A8	Assigned Address: 0x0101
4	1:13:52.167174	13,647,550	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
5	1:13:58.579174	6,412,000	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
6	1:14:05.800999	7,220,925	255	21	Quality Request	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
7	1:14:06.474799	674,700	255	28	Quality Response	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
8	1:14:11.741374	5,286,575	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
9	1:14:17.668124	5,926,750	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
10	1:14:21.668724	4,800,600	255	22	Ping Parent Request	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
11	1:14:22.422174	763,450	255	22	Ping Parent Response	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
12	1:14:43.483398	21,006,225	255	21	Quality Request	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
13	1:14:44.115324	886,925	255	28	Quality Response	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
14	1:14:54.383649	10,268,325	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
15	1:14:59.419549	5,035,900	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
16	1:15:05.229124	5,809,575	255	21	Leave Request	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
17	1:15:05.843974	614,850	255	25	Leave Notification	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
18	1:15:14.519399	8,675,425	255	27	Join Request	0x03FF	0x03A8	0x0000	0x03A8 >> 0x0000	Join Filter: 0x0001
19	1:15:30.344449	15,822,050	255	27	Join Request	0x03FF	0x03A8	0x0000	0x03A8 >> 0x0000	Join Filter: 0x0001
20	1:15:31.136499	795,050	255	27	Join Offer	0x0142	0x0001	0x03A8	0x0001 >> 0x03A8	
21	1:15:46.775299	15,638,800	255	27	Join Request	0x03FF	0x03A8	0x0000	0x03A8 >> 0x0000	Join Filter: 0x06FF
22	1:15:47.387899	612,600	255	27	Join Offer	0x0142	0x0001	0x03A8	0x0001 >> 0x03A8	
23	1:15:56.450049	9,062,150	255	31	Join Notification	0x03FF	0x03A8	0x0001	0x03A8 >> 0x0001	Network: 0x0142, Parent: 0x0001
24	1:15:57.264274	814,225	255	26	Join Confirmation	0x0142	0x0001	0x03A8	0x0001 >> 0x03A8	Assigned Address: 0x0101
25	1:16:00.686274	3,422,000	255	22	Ping Parent Request	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
26	1:16:01.363724	677,450	255	22	Ping Parent Response	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
27	1:16:06.299324	4,935,600	255	22	Ping Parent Request	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	
28	1:16:06.875449	576,125	255	22	Ping Parent Response	0x0142	0x0001	0x0101	0x0001 >> 0x0101	
29	1:16:19.592774	12,747,325	255	121	RUN-M Data	0x0142	0x0101	0x0001	0x0101 >> 0x0001	

Figura 5.9 - Interface do modem *sniffer*

5.3.1 - Apreciação Global

Foram feitos testes com este modem nos mesmos cenários que o modem da *Maxim*. Alterou-se a *firmware* para testar só a camada física e depois para o protocolo RUN-M que permitia executar mais funcionalidades do que o “*minimal test*”, que só permitia executar um teste mais simples.

Os resultados revelaram que os modems só comunicavam no modo extremamente robusto (ERM), ou seja, mesmo que fosse indicado para se estabelecer comunicação no modo robusto, a uma velocidade maior, o sistema reconfigurava-se para ERM, trabalhando a uma taxa de 600bits por segundo.

O comprimento máximo das tramas também não pode ultrapassar os 100bytes, confirmando o que é especificado teoricamente.

5.4 - Conclusão

Neste capítulo pretendeu-se evidenciar os resultados obtidos pelo estudo, documentando de forma precisa o processo evolutivo dos mesmos.

Capítulo 6

Conclusão e trabalho futuro

6.1 - Conclusões e trabalho futuro

Com este trabalho foi possível estudar melhor as tecnologias que estão envolvidas nas redes inteligentes. O trabalho concentrou-se nas comunicações PLC na rede de baixa tensão e permitiu concluir que em termos de velocidade o modem na *Maxim* oferece resultados bem mais satisfatórios do que o da *Renesas*.

Ao nível de ruído o modem *Renesas*, conseguiu estabelecer comunicação no seu modo mais robusto e o modem da *Maxim* também conseguiu, apesar de apresentar mais dificuldades neste tipo de ambientes.

De salientar também o facto do modem da *Maxim* possuir uma grande capacidade de recuperar e retransmitir tramas “perdidas” devido à sua técnica de modulação OFDM, que é mais vantajosa quando comparada com a técnica DCSK do *Renesas*.

Estas tecnologias estão ainda em constante desenvolvimento, não existe ainda um standard que normalize as comunicações PLC no CENLEC A o que dificulta imenso a evolução deste tipo de tecnologias.

No futuro e devido às necessidades emergentes do sistema eléctrico mundial e tendo em conta a quantidade de projectos que estão a ser desenvolvidos por todo o mundo, as comunicações PLC constituíram uma solução segura para automação das redes eléctricas. Poderão também ser desenvolvidos outros trabalhos nesta área explorando por exemplo tecnologias *wireless* ou *zigbee* ou dando continuidade a este estudo, alargando-o a outros fornecedores e trabalhando ao nível do terreno. Conseguir uma implementação destas tecnologias no terreno, verificando as principais dificuldades quando se monta toda a malha da rede, com concentradores e vários nós terminais permitindo assim, obter uma visão mais aproximada do real desempenho desta tecnologia no terreno.

6.2 - Satisfação dos Objectivos

Os objectivos propostos, na sua maioria, foram conseguidos. Existiram bastantes dificuldades ao nível da disponibilidade do dispositivo para medição de ruído na rede eléctrica, pois só Maio é que se conseguiu obter essa aparelhagem.

O modem da ADD só chegou no mês de Junho o que impossibilitou um estudo mais detalhado bem como a execução de testes práticos no terreno.

Apesar disto, os objectivos propostos no início do trabalho foram conseguidos com satisfação.

Anexo A

Resultados Detalhados

A.1 - Cenário de teste 1 (Laboratório de Desenvolvimento - EFACEC Renováveis)

Para facilitar a leitura e demonstração de resultados procedeu-se à junção no mesmo gráfico de diferentes testes, isto é, sempre na mesma situação, mas com o sinal transmitido a variar entre -10 e -4 dB , ou seja, sinal é atenuado e 4 e $6dB$, o sinal é aumentado o seu ganho e 0 dB (situação standard), tudo isto porque o *firmware* dos modems permite efectuar estas mudanças facilmente.

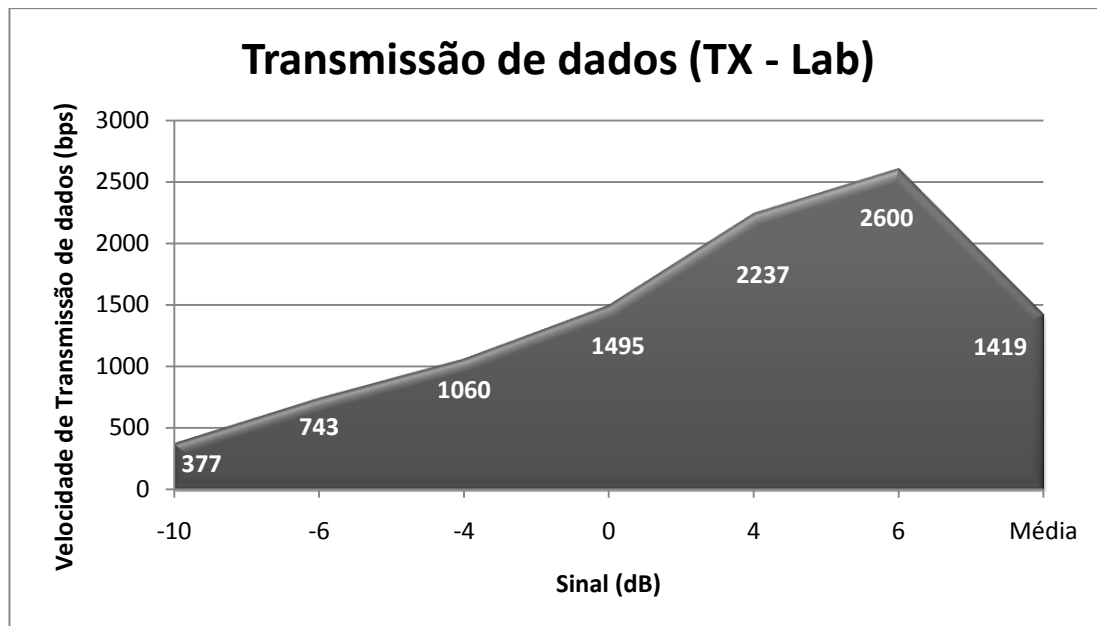


Figura a1.1 - Resultados do teste 1 com TX (transmissor) colocado no Laboratório das Renováveis e RX (receptor) colocado no PT, lado do receptor

No gráfico da figura 1.1 é possível verificar que se atingiu uma velocidade média de 1419bps, com o transmissor sempre no modo robusto, e um sinal com 6dB de potência no canal, mas sem chegar às velocidades esperadas teoricamente. Quando se diminuía a potência do canal dentro do mesmo modo de transmissão, ocorria uma diminuição da velocidade de transmissão, mas os dados eram correctamente enviados e recebidos, apesar de ocorrerem inúmeras retransmissões.

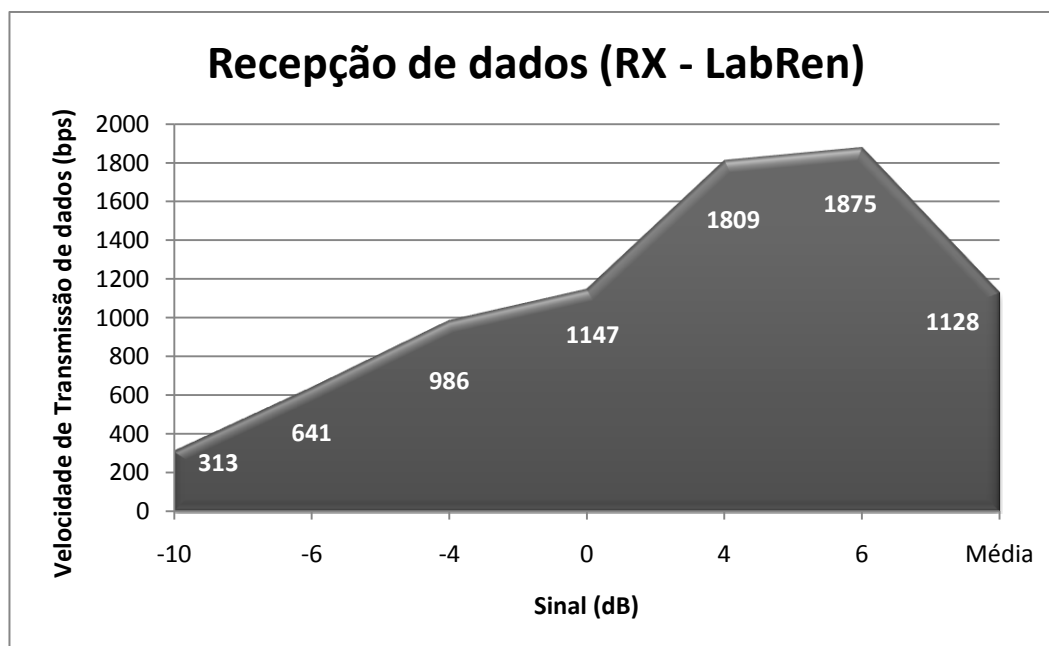


Figura a1.1 - Resultados do teste 1.1 com TX (transmissor) colocado no Laboratório das Renováveis e RX (receptor) colocado no PT (Posto de transformação), do lado do transmissor

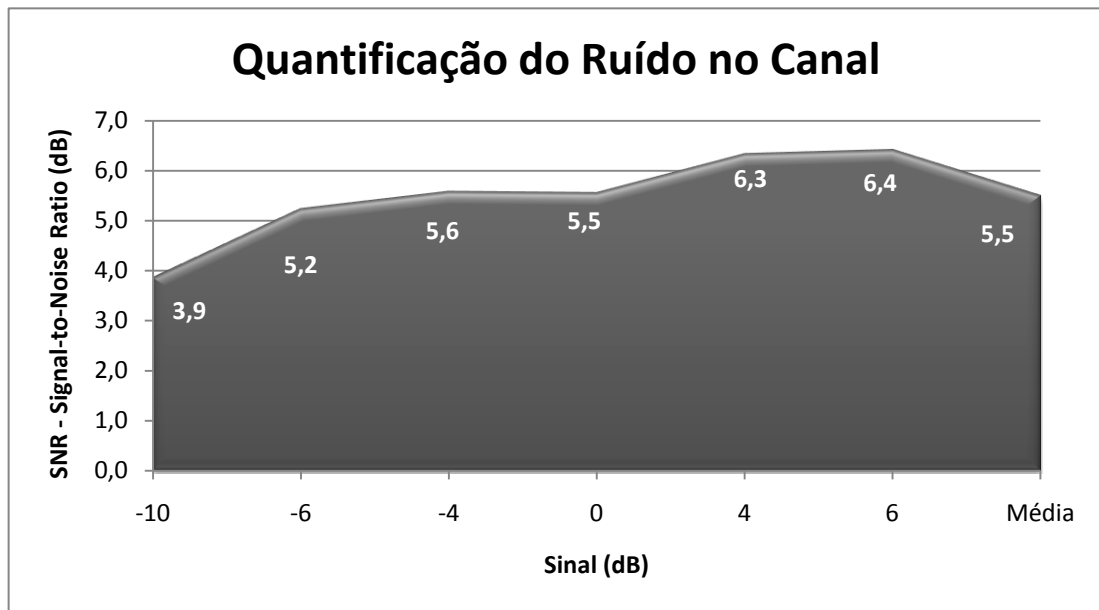


Figura a1.2 - Resultados da quantificação de ruído no teste 1

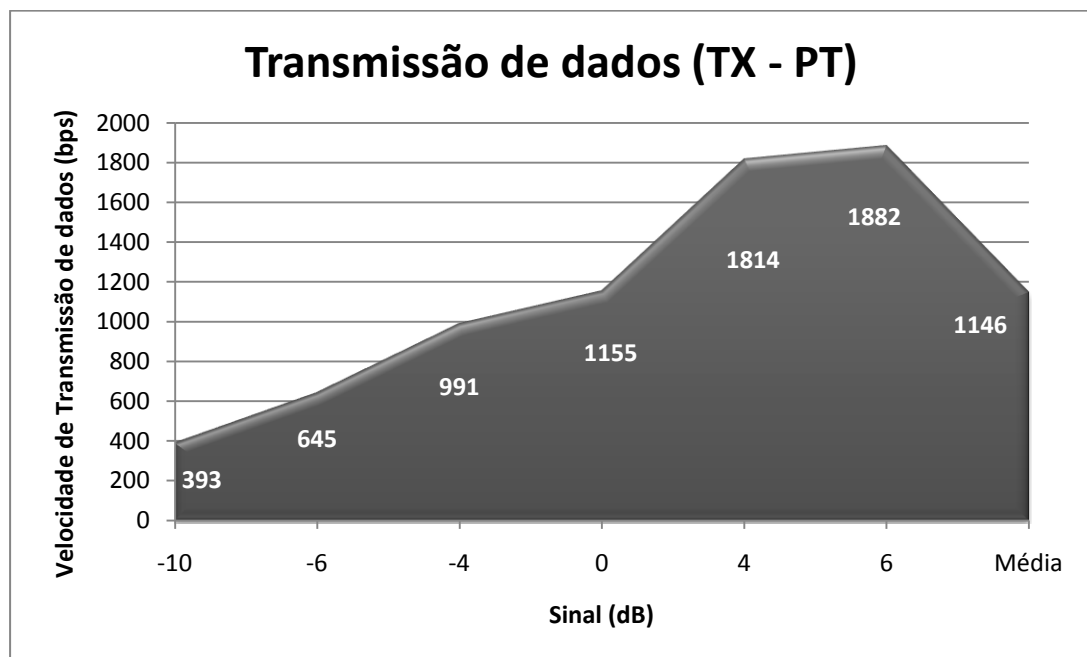


Figura a1.3 - Resultados do “teste 3” com TX (transmissor) colocado PT e RX (receptor) no Laboratório das Renováveis, do lado do transmissor

Neste terceiro teste, da mesma forma que foi referido anteriormente, também as velocidades ficam aquém das esperadas mas mesmo assim melhores do que os modems da *Renesas*. Há aqui que referir uma velocidade mais baixa do que esperado no modo Robusto a 6dB 1882bps, em comparação com o sinal a 0dB. Esta situação poderá ficar a dever-se a uma interferência externa por parte de um motor ou gerador.

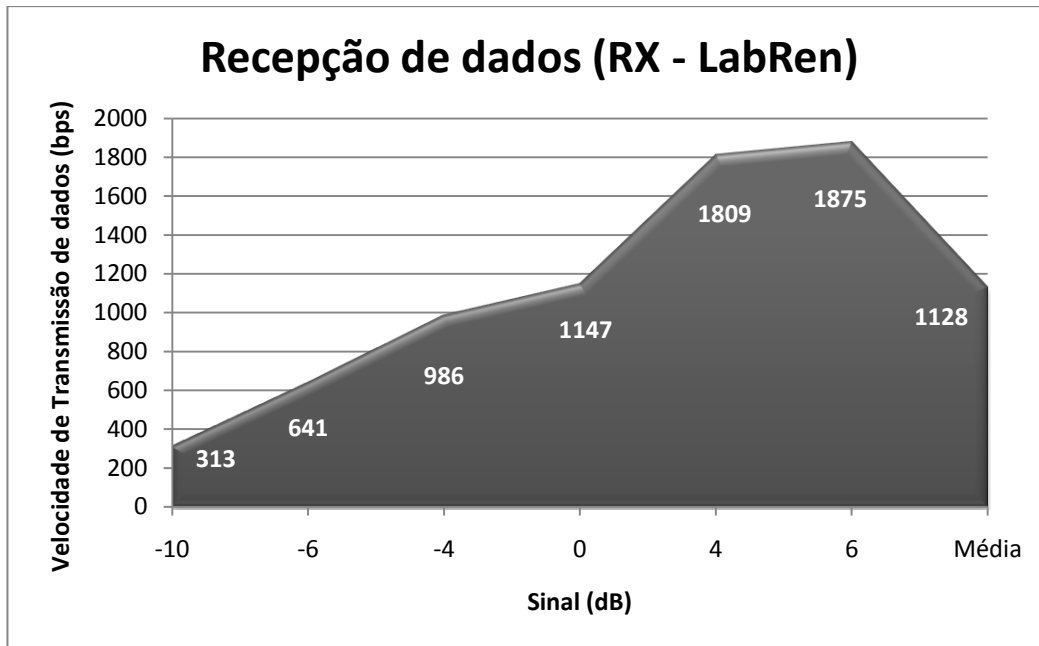


Figura a1.4- Resultados do “teste 4” com RX no Laboratório e o TX no PT, na parte do receptor

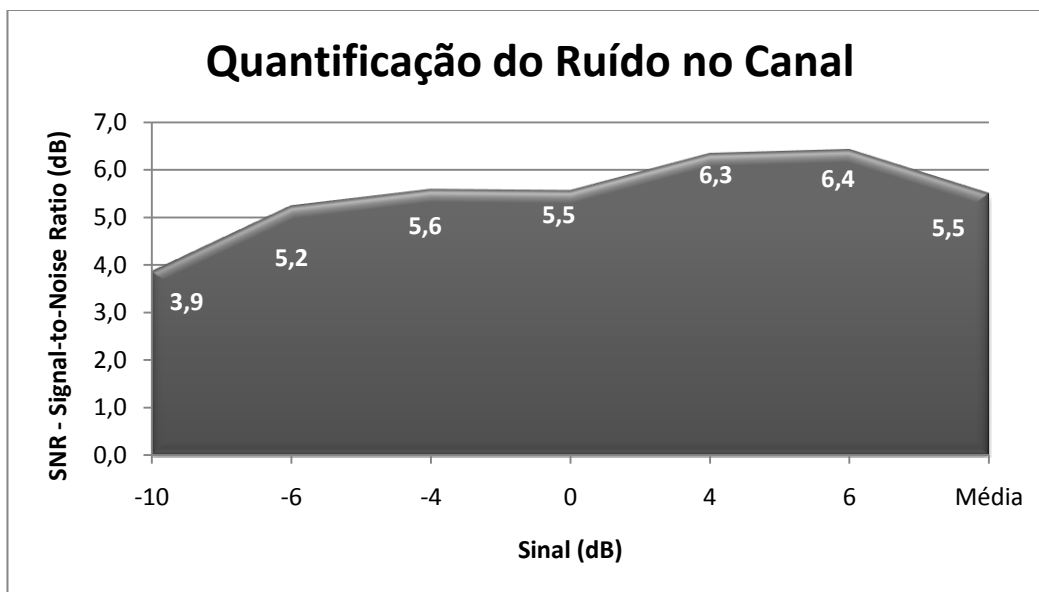


Figura a1.6 - Resultados da quantificação de ruído do “teste 4”

Tabela a1.1 - Valores médios globais dos testes efectuados no Laboratório (cenário de teste 1)

Valor global da média do <i>TX_Rate</i> (bps)	Valor global da média do <i>RX_Rate</i> (bps)	Valor do SNR global médio (dB)
1282	1236	5,7

A.2 - Cenário de teste 2 (Quadro de alimentação QP4 do PT6 - EFACEC)

Neste segundo cenário de teste, o quadro eléctrico 4 que se situa perto do PT6 foi o cenário escolhido por ser um cenário de teste que se encontrava mais perto do PT porém com mais fontes de ruído. Constituindo-se assim, como o elemento diferenciador do cenário de teste 1.

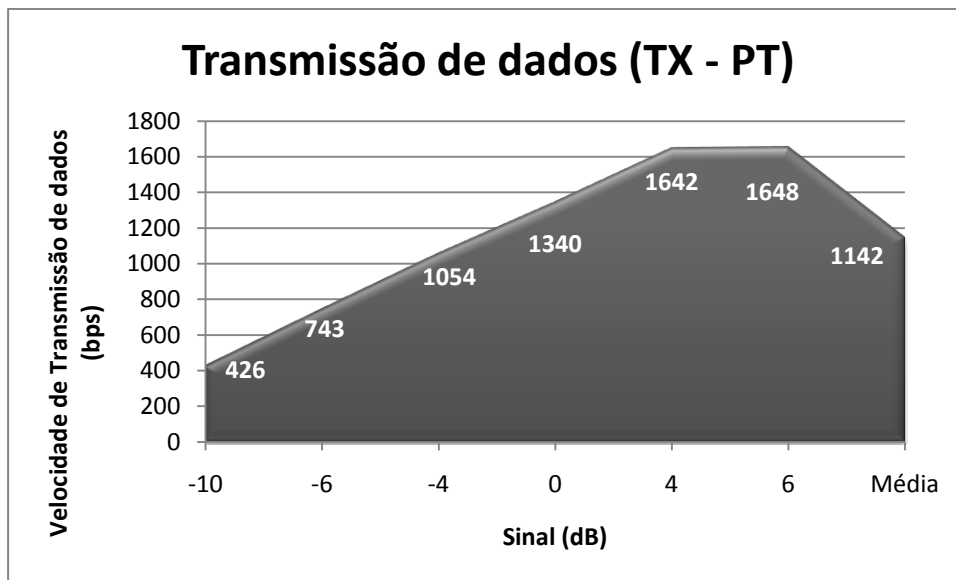


Figura a2.1 - Resultados do “teste 5”, com TX colocado no PT e RX no Quadro Eléctrico 4, do lado do transmissor

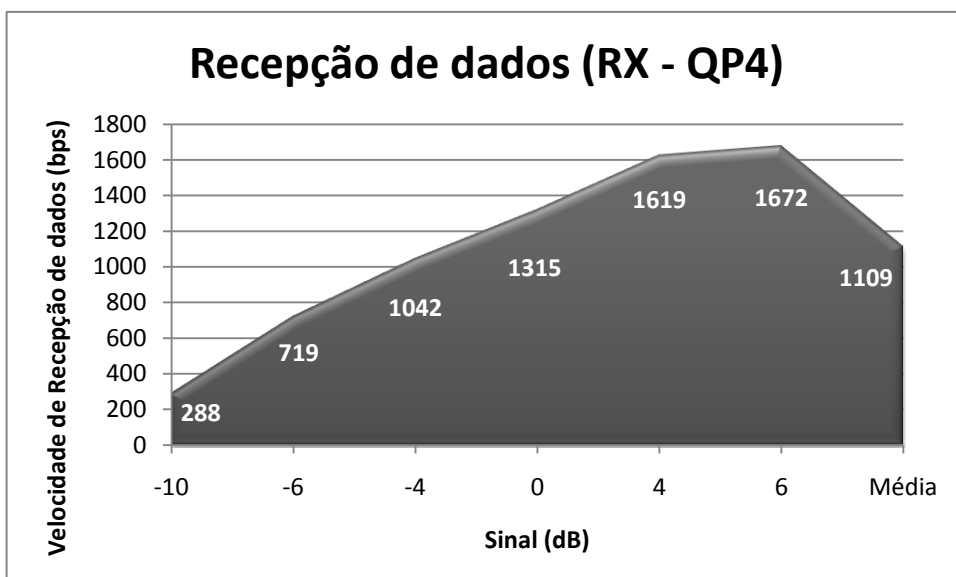


Figura a2.2 - Resultados do “teste 6”, com TX colocado no PT e RX no Quadro Eléctrico 4, do lado do receptor

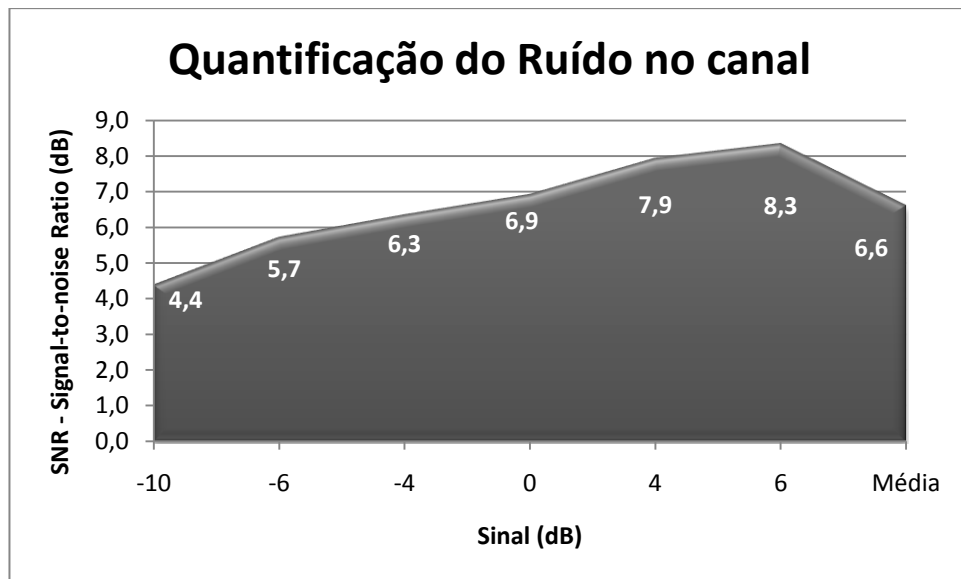


Figura a2.3 - Resultados da quantificação de ruído do “teste 6”

Tabela a2.1- Valores médios globais dos testes efectuados no quadro eléctrico 4 (cenário de teste 2)

Valor global da média do <i>TX_Rate</i> (bps)	Valor global da média do <i>RX_Rate</i> (bps)	Valor do SNR global médio (dB)
1036	996	6,4

Referências

- [1] Jimenez, Manuel Sanchés; (2006). “*European Smart grids Tecnology Platform*”, *European Comission, Brussels, EUR 22040*;
- [2] Haney, Aoife Brophy; Jamasb, Tooraj; Pollitt, Michael G., (2009). “*Smart Metering and Electricity Demand: Tecnology, Economics and International* ”, *Electricity Policy Research Group, University Cambridge, United Kingdom*;
- [3] Heidell, James; Ware, Harold, (2010). “*Is there a case for Broadband Utility Communications Networks? Valuing and Pricing Incremental Communications Capacity on Electric Utility Smart Grid Networks*”, *The Electricity Journal*, 23 (1), 1-13;
- [4] Gerwen, Rob van; Jaarsma, Saskia; Wilhite, Rob, (2006). “*Smart Metering*”, *KEMA, Netherlands*;
- [5] Pedrasa, Michael Angelo; Spooner, Ted; (2006). “*A Survey of Techniques Used to Control Microgrid Generation and Storage during Island Operation*”, *University of New South Wales, Australia e University of the Philippines, Quezon City*;
- [6] Halal, William E., (2009). “*Smart Meters are really Time of Use Meters*”, *George Washington University, TechCast, USA*;
- [7] *Portal do Google Maps*. [Acedido em 20-06-2010]; Disponível em: <http://maps.google.com/maps/>;
- [8] Valdivia, Carla Ferrel; (2006). “*Comunicação de dados através da tecnologia PLC via rede electrica*”, *Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do rio Grande do Sul*;
- [9] Faccioni, André Umberto; Trichez, Lucas Marcon; Macedo, Ronaldo Lopes, (2008). “*Analysis on Technology PLC (Power Line Communication)* ”, *Tecnologias para a Competividade Industrial, Florianópolis, Brasil*, 1 (2), 54-74;
- [10] Gungor, V.C.; Lambert, F.C. (2006). “*A survey on communication networks for electric system automation*”, *School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institue of Tecnology, Atlanta, Computer Networks* 50, 877-897;
- [11] V.C. Gungor, F.C. Lambert; “*A survey on communication networks for electric system automation*”, 21 Fevereiro 2006;
- [12] *Maxim Integrated Products, (2010). “Smart Grid Solutions Guide*”, *Sunnyvale, California, USA*;
- [13] Oborkhale, L.I.; Shoewu, O. (2007). “*Power Line Communication technology*”, *The Pacific Journal of Science and Tecnology*, 8 (2), 398-405;

- [14] Abarretegui, O., Zamora, I.; Larruskain, DM.; Iturregui, A. (2009). “Power Line Carrier Communications and its Interest in the Current Power Grid Scenario”, Department of Electrical Engineering, UPV-EHU, Barakaldo (Spain);
- [15] Zaballos, Agustín; Vallejo, Alex; Majoral, Marta; Selga, Josep M., (2009). “Survey and Performance Comparison of AMR over PLC Standards”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (2);
- [16] Piagi, Paolo; Lasseter, Robert H. (2006). “Autonomous Control of Microgrids”, *IEEE Meeting*, Montreal;
- [17] Carrapatoso, António M.; Gomes, Fernando M. ; “IT 43 - Projecto InovGrid - A evolução da rede de distribuição como resposta aos novos desafios do sector eléctrico”, 2008;
- [18] Faruqui, Ahmad; Hledik, Ryan; Sergici, Sanem, (2009). “Piloting the Smart Grid”, *The Electricity Journal* 22(7), 55-69;
- [19] EDP Distribuição - Inov Grid. Disponível em <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/CidadesInteligentes.aspx>. Acesso em 20/Junho/2010.
- [20] EFACEC - Disponível em Http://www.efacec.pt/presentationLayer/efacec_produto_01.aspx?idioma=1&idProduto=238. Acesso em Novembro de 2009;
- [21] Pavlidou, Niovi; Han Vinck, A. J.; Honary, Bahram; Yazdani, Javad, (2003). “Power Line Communications: State of the Art and Future Trends”, *IEEE Communications Magazine*, 34-40;
- [22] MAXIM, (2008). “10kHz to 490kHz OFDM-Based Power Line Communication Modem-MAX2990 Datasheet”;
- [23] Malaysian Communications and Multimedia Commission, (2006). “Deployment of Power Line Communications Systems in Malaysia”, Malaysia.
- [24] Malathi, P.; Vanathi, (2007). “Power Line Communication using OFDM and OGA”, *AIML Journal, ECE Department, PSG College of Tech, India*, 7 (1), 23-31;
- [25] Hsu, Christine, (2006). “Power Line Communications using OFDM with LDPC Codes”, *Thesis of Master of Science, Department of Electrical and Computer Engineering, Queen’s University, Ontario, Canada*;
- [26] Sanz, A. ; Garcia-Nicolás, J. I.; Estpinán, P. “A Complete Node for Power Line Communications in a Single”, *IEEE, University of Zaragoza, Spain*;
- [27] MAXIM, (11-2009). “MAX2991 Preliminary Datasheet”;
- [28] Sklar, Bernard; (2001). “Reed-Solomon Codes”, *Digital Communications, : Fundamentals and Applications, 2nd edition, Prentice-Hall*;
- [29] ADD Semiconductor, (2010). “ADD1021 User Manual”, ;
- [30] ADD Semiconductor, (2010). “ADD1021 Datasheet”;
- [31] I.H. Cavdar, “A solution to remote detection of illegal electricity usage via power line communications”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 Outubro de 2004;
- [32] N. Pavlidou, A.J.H. Vinck, J. Yazdani, B. Honary; ” Power line communications: state of the art and future trends”, *IEEE Communications Magazine* 41, Abril de 2003;
- [33] Y. Abe et al., “Development of high speed power line communication modem”, *SEI Technical Review* 58, Junho de 2004;
- [34] Manuel Carlos Pereira Baptista, “Identificação e caracterização da Modulação dos sinais digitais”, Departamento de electrónica, telecomunicações e informática da Universidade de Aveiro, 2008.

[35]Hoch, M.; Bumiller, G. (2008).”Interoperability of Carrier-Modulated OFDM Systems with PRIME”, Institute for Information Transmission, University Erlangen-Nuremberg, Germany;

[36]Renesas Technology Corporation, “Manuals of M16C/6S”, Abril de 2007.

[37]Renesas Technology Corporation, “Introduction to PLC micro-controller, M16C/6S”, Fevereiro de 2009.

[38]S. Galli, A. Scaglione, K. Dosterl, “Broadband is power: Internet access through the power line network”, *IEEE Communications Magazine* 41, Maio 2003;

[39]W. Liu, H. Widmer, P. Ran, *Broadband PLC Access systems and field deployment in European power line networks*, *IEEE Communications Magazine* 41, Maio de 2003.

[40]Katsis, P. L.; Papadopoulos, G. D.; Pavlidou, F. N., (2004).Comparison of coded orthogonal frequency division multiplexing and multicarrier code division multiple access systems for power line communications”, Department of Telecommunications, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 17, 889-909;

[41]Deinzer, Manfred; Stoger, Mathias; (2000). “Integrated PLC -modem based on OFDM”, University Hauptstr, Germany;

[42]Hirsch, Martial Monfort Jeremny; ”Performance of open-standard PLC technologies on ERDF distribution network”, 2009;

[43]Faccioni, André Umberto; Trichez, Lucas Marcon; Macedo, Ronaldo Lopes, “Análise sobre tecnologia PLC (Power Line Communication) ”, Junho de 2008.