

Universidade Federal de Uberlândia
Campus Patos de Minas

Felipe Augusto Machado Corrêa

# Um estudo sobre a tecnologia de transmissão PLC com foco nas smart grids

Patos de Minas
2015

Felipe Augusto Machado Corrêa

# Um estudo sobre a tecnologia de transmissão PLC com foco nas *SMART GRIDS*

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas, como requisito parcial para obtenção do Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro

Patos de Minas
2015

Um estudo sobre a tecnologia de transmissão PLC com foco nas *SMART GRIDS*

Trabalho de conclusão de curso aprovado para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela banca examinadora formada por:

Patos de Minas, 10 de dezembro de 2015.

---

Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro (Orientador, UFU)

---

Prof. MSc. Éder Alves de Moura (Examinador, UFU)

---

Prof. Dra. Karine Barbosa Carbonaro (Examinadora, UFU)

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Maria Isabel e Arnoldo, e à minha irmã Amanda, pelo apoio incondicional ao longo da graduação, pela paciência nos momentos difíceis e pela oportunidade de me dedicar integralmente aos estudos. Dedico este trabalho a vocês.

Agradeço aos meus amigos e colegas que estiveram comigo durante estes cinco anos de graduação, pelos bons e maus momentos vividos, pela oportunidade de conhecê-los e poder trilhar este caminho juntos.

Agradeço a todos os meus Professores que contribuíram para a construção do meu conhecimento. Em especial aos Professores Wilian Eurípedes Vieira, Gláucia Braga e Silva e Karine Barbosa Carbonaro, que ficarão marcados na minha memória.

Agradeço ao Professor Alan Petrônio Pinheiro pela oportunidade de participar de um projeto de iniciação científica, pelos anos de orientação e suporte nos projetos de pesquisa, pelos ensinamentos e incentivos ao longo deste período. Muito obrigado Professor.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de me graduar e pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste projeto. À ST Microelectronics pela doação dos módulos de comunicação e modems. Em especial aos Engenheiros José Ricardo Freitas e Thiago Reis. À FAPEMIG (APQ-02410-12) pelo suporte financeiro que contribuiu para a realização desta pesquisa.

Agradeço a Deus por tornar tudo isso possível.

*Pesquisa realizada no:*



LaPSE – Laboratório de Pesquisas em
Processamento de Sinais e Sistemas Embarcados
www.lapse.eletrica.ufu.br



Universidade Federal de Uberlândia
Campus Patos de Minas
www.ufu.br

# Resumo

A tecnologia de comunicação de dados PLC (Power Line Communication) tem uma ampla variedade de aplicações que vão desde uma simples infraestrutura de comunicação para sistemas de monitoramento e controle residencial/industrial, até serviços de internet de banda larga. No contexto das smart grids, a transmissão de dados na rede elétrica é vista como uma alternativa ao sistema atual de gestão da rede elétrica, pois permite a implementação de uma rede descentralizada e flexível. Este trabalho faz um breve estudo teórico sobre a tecnologia PLC e seus aspectos técnicos em aplicações voltadas a área de transmissão de dados em smart grid, especialmente para transmissão em banda estreita em ambientes domésticos. Ainda, apresenta o projeto de um transceptor de dados PLC de banda estreita que pode ser usado em uma rede elétrica convencional. Ao final, avalia o desempenho deste módulo sob a ótica da aplicação no contexto de um sistema AMI (Advanced Metering Infrastructure) para smart grids. Os resultados mostram que sob o ponto de vista tecnológico a transmissão PLC é confiável e relativamente robusta no ambiente e contexto avaliados (para aplicação em um sistema AMI). Contudo, sua viabilidade econômica para este tipo de aplicação é questionável.

**Palavras-chave**: transmissão de dados; rede elétrica; modulação em camada física; ST7570; smart grids.

# Abstract

The Power Line Communication (PLC) technology has a wide variety of applications ranging from a simple communications infrastructure for monitoring systems and residential/industrial control, to broadband internet services. In smart grids context, the transmission of data in the grid can be seen as an alternative to the current system of power grid management, it allows the implementation of a decentralized and flexible electrical system with a wide data network to manage the power consumer and generation. This work is a brief theoretical study on PLC technology and its technical aspects in applications related to data transmission area in smart grid, especially for narrowband transmission in homes. It also presents the design of a PLC data transceiver narrowband that can be used in a conventional power grid. In the end, evaluates the performance of this module in the application's point of view in the context of an AMI (Advanced Metering Infrastructure) system for smart grids. The result show that the PLC technology is reliable and robust if evaluated in indoor (and home area network) context for application in AMI systems. However, its economic viability for this purpose is questionable.

**Keywords**: power line communication; physical layer modulation; ST7570; smart grids.

# Lista de ilustrações


| | | |
|---|---|---|
| Figura 1 | Representação do sinal de comunicação na rede elétrica | 9 |
| Figura 2 | Exemplo de um sistema AMI residencial | 12 |
| Figura 3 | Sincronização entre receptor e transmissor, padrão IEC 61334-5-1 | 17 |
| Figura 4 | (a) Modelo OSI. (b) Modelo sugerido pelo padrão IEC 61334 | 19 |
| Figura 5 | Representação dos diferentes esquemas de modulação digital | 21 |
| Figura 6 | Sinal S-FSK no domínio da frequência | 22 |
| Figura 7 | Espectro de frequência do sinal OFDM | 23 |
| Figura 8 | Ilustração de uma rede PLC com várias RUs e uma CU | 26 |
| Figura 9 | Atenuação da linha nas áreas rural, urbana e industrial | 31 |
| Figura 10 | Impedância da rede elétrica em uma área urbana | 32 |
| Figura 11 | Modelo teórico de um canal PLC | 33 |
| Figura 12 | Esquemático de um módulo PLC com modulação FSK | 39 |
| Figura 13 | Representação dos circuitos internos do modem ST7570 | 41 |
| Figura 14 | Esquema interno da fonte de alimentação do modem ST7570 | 42 |
| Figura 15 | Circuito esquemático do módulo PLC usando o modem ST7570 | 43 |
| Figura 16 | Resposta em frequência do filtro passivo de recepção | 44 |
| Figura 17 | Resposta em frequência do filtro ativo de transmissão | 45 |
| Figura 18 | Resposta em frequência da combinação entre filtro de acoplamento e filtro ativo de transmissão | 46 |
| Figura 19 | Módulo com o ST7570 e seu analog front end | 47 |
| Figura 20 | Representação dos elementos envolvidos na comunicação entre o modem e o microcontrolador | 48 |
| Figura 21 | Representação do quadro na camada física do modem ST7570 | 49 |
| Figura 22 | Representação do processo de subdivisão dos quadros na camada de enlace (MAC) para o encapsulamento e transmissão | 50 |
| Figura 23 | Formato do pacote para o acesso aos serviços do circuito integrado | 51 |
| Figura 24 | Representação de um pacote de dados para comunicação entre o ST7570 e um microcontrolador | 53 |
| Figura 25 | Diagrama temporal da troca de informações para a configuração do modem ST7570 | 53 |
| Figura 26 | Representação do pacote para a configuração dos endereços | 54 |
| Figura 27 | Diagrama temporal da transmissão de dados na rede elétrica | 54 |
| Figura 28 | Representação do pacote para o envio dos dados de aplicação | 55 |

| | | |
|---|---|---|
| Figura 29 | Representação do pacote gerado pelo modem logo que a sequência de dados é transmitida (a) e recebida (b) | 55 |
| Figura 30 | Representação do pacote gerado pelo circuito integrado logo que a sequência de dados termina de ser transmitida (a) e recebida (b) | 56 |
| Figura 31 | Transceptor PLC montado nesta pesquisa a partir do módulo ST7570 | 59 |
| Figura 32 | Sinal da rede elétrica e o seu espectro de frequência | 60 |
| Figura 33 | Sinal S-FSK em alguns pontos do módulo durante a transmissão | 61 |
| Figura 34 | Espectro de frequência do sinal no ponto 2 do AFE | 61 |
| Figura 35 | Sinal medido em alguns pontos do AFE durante a recepção | 62 |
| Figura 36 | Espectro de frequência do sinal no ponto 1 do AFE | 63 |
| Figura 37 | Sinal de transmissão no domínio do tempo e da frequência | 64 |
| Figura 38 | Gráfico da SNR para a transmissão do bit 0 e do bit 1 | 65 |
| Figura 39 | Gráfico da taxa de erro de bit pela distância entre os módulos | 67 |


## Lista de quadros


| | | |
|---|---|---|
| Quadro 1 | Subdivisão das tecnologias PLC de acordo com a faixa de frequências, nível de tensão, taxa de dados e padronização | 13 |
| Quadro 2 | Modems dos principais fabricantes disponíveis no mercado | 25 |

# Lista de abreviaturas e siglas

8DPSK - *8 Differential phase shift keying*
ABS - *Anti-lock breaking system*
ACK - *Acknowledgement*
AES - *Advanced encryption standard*
AFE - *Analog front end*
AMI - *Advanced metering infraestructure*
AMR - *Advanced metering reader*
ARIB - *Association Radio Industries Businesses*
ASK - *Amplitude shift keying*
BCH - *Bose Hocquenghem Chaudhur code*
BDPSK - *Binary differential phase shift keying*
BER - *Bit error rate*
BPLC - *Broadband power line communication*
BPSK - *Binay phase shift keying*
CATV - *Cable television*
CDMA - *Code-division multiple access*
CEA - *Canadian Electricity Association*
CENELEC - *European Committee for Electrontechnical Standardization*
CI - Circuito integrado
CRC - *Cyclic redundancy check*
CSMA - *Carrier sense multiple access*
CSMA/CA - *Carrier sense multiple access with collision avoidance*
CSMA/CD - *Carrier sense multiple access with collision detection*
CU - *Central unit*
DAC - *Digital to analog converter*
DCSK - *Differential chaos shift keying*
DSP - *Digital signal processing*
ECU - *Electronic control unit*
EPS - *Electric power steering*
ESP - *Electronic stability program*
FCC - *Federal Communications Commission*
FFT - *Fast Fourier transform*
FSK - *Frequency shift keying*
HAN - *Home area network*
HDR - *High data rate*
IEC - *International Electrotechnical Commission*
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IFFT - *Inverse fast Fourier transform*
ISI - *Inter-symbol interference*
ISSO - *International Student Services Office*
ITU-T - *International Telecommunication Union-Telecommunication*

JPEG - *Joint Photographic Experts Group*
LAN - *Local area network*
LDR - *Low data rate*
LLC - *Logical link control*
LVPLC - *Low voltage power line communication*
MAC - *Medium access control layer*
MIB - *Management information base*
MVPLC - *Medium voltage power line communication*
NAK - *Negative-Acknowledgement*
NPLC - *Narrowband power line communication*
OFDM - *Orthogonal frequency-division multiplexing*
OOK - *On-off keying*
OPERA - *Open PLC European Research*
OSI - *Open System Interconnection*
PGA - *Programmable gain amplifier*
PHY - *Physical layer*
PLC - *Powe line communications*
PLL - *Phase locked loop*
POTS - *Plain old telephone service*
PRIME - *Powerline Intelligent Metering Evolution*
PSD - *Power spectral density*
PSK - *Phase shift keying*
PSoC - *Programmable system-on-chip*
QAM - *Quadrature amplitude modulation*
QoS - *Quality of service*
QPSK - *Quadrature phase shift keying*
RMS - *Root mean square*
RU - *Remote unit*
SCADA - *Supervisory control and data acquisition*
SEP - Sistema elétrico de potência
S-FSK - *Spread-Frequency shift keying*
SG - *Smart grid*
SNR - *Signal noise ratio*
TDMA - *Time division multiple access*
TWACS - *Two-Way Automatic Communications Systems*
UART - *Universal asynchronous receiver/transmitter*
UNB - *Ultra narrowband*
VLSI - *Very large scale integration*
xDSL - *Digital subscriber line*

# Sumário

**Resumo** ..... **iv**

**Abstract** ..... **v**

**Lista de ilustrações** ..... **vi**

**Lista de quadros** ..... **vii**

**Lista de abreviaturas e siglas** ..... **viii**

**Capítulo 1 - Introdução** ..... **2**
1.1 – A tecnologia PLC e suas aplicações ..... 2
1.2 - Objetivos da pesquisa ..... 4
1.3 - Justificativa ..... 5
1.4 - Organização do texto ..... 6

**Capítulo 2 - Aspectos gerais sobre a tecnologia PLC para transmissão de dados no contexto das *smart grids*** ..... **7**
2.1 – Visão geral ..... 7
2.2 – PLC e as *smart grids* ..... 9
2.3 – Padronização e alocação de frequências ..... 12
2.3.1 – CENELEC EN 50065 ..... 14
2.3.2 – IEC 61334-5-1 ..... 16
2.4 – PLC e redes de dados ..... 18
2.4.1 – Camada física ..... 20
2.4.2 – Camada MAC ..... 26
2.5 – Caracterização do canal ..... 29
2.5.1 – Atenuação ..... 30
2.5.2 – Impedância ..... 31
2.5.3 – Ruídos ..... 33
2.6 - Resumo e discussão geral do capítulo ..... 34

**Capítulo 3 - Metodologia de desenvolvimento do módulo de transmissão...36**
3.1 – Requerimentos da tecnologia PLC para sistemas AMI ..... 36
3.2 – Elementos do módulo de comunicação PLC ..... 38
3.3 – A unidade de modulação e demodulação ..... 40
3.4 – O hardware do módulo ..... 43
3.5 – O protocolo de comunicação e controle do módulo ..... 47
3.6 – Configuração do modem, transmissão e recepção de dados ..... 52
3.7 – Testes de comunicação ..... 56
3.8 - Resumo e discussão geral do capítulo ..... 57

**Capítulo 4 - Resultados e discussão ..... 58**
4.1 – Análise dos sinais na rede elétrica ..... 59
4.2 – Desempenho dos módulos de comunicação ..... 64

**Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros ..... 68**

**Referências bibliográficas ..... 70**

**APÊNDICE A – Linhas de código ..... 73**

# Capítulo 1

# Introdução

## 1.1 – A tecnologia PLC e suas aplicações

A transmissão de dados usando a rede elétrica convencional como meio condutor de dados é conhecida como PLC (*Power Line Communication*) e surgiu no início do século 20. Sua motivação nasceu da possibilidade de gerenciamento de carga na rede e por facilitar a leitura de medidores à distância [1]. Habitualmente, as empresas fornecedoras de energia elétrica, água ou gás, possuem funcionários que fazem a leitura dos medidores em cada residência. Isto demanda tempo e custos para a empresa. Ainda, um estudo em [2] mostra que a taxa média de informação de uma leitura feita por uma pessoa é lenta e se equipara a cerca de um bit por segundo. Devido sua intrínseca relação com a rede elétrica, a tecnologia PLC possibilita o projeto de Sistemas Automatizados de Medição (AMR – *Advanced Metering Reader*) [3] que são sistemas eletrônicos capazes de fazer a leitura de medidores e enviar esta informação aos centros de operação.

Até a década de 90, a tecnologia PLC era utilizada especialmente para a proteção de sistemas de distribuição de energia e telemetria, com taxas de transmissão de poucos kilo bits por segundo (kbps). Porém, esta taxa não é suficiente para aplicações multimídia, que necessitam de velocidades da ordem de mega bits por segundo (Mbps). Com o crescimento da internet, impulsionado pelos avanços no desenvolvimento de circuitos VLSI (*Very Large Scale Integration*) e no processamento digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processing*), fizeram da transmissão de dados na rede elétrica uma tecnologia viável para redes residenciais de alta velocidade e outras aplicações correlatas [4].

A principal vantagem de se transmitir dados na rede elétrica é a utilização de uma infraestrutura já existente com uma enorme rede com muitas ramificações presentes na maioria das residências. Nota-se, portanto, o poder de alcance da tecnologia PLC se observada toda a estrutura já disponível. Em regiões remotas e áreas rurais, por exemplo, onde algumas vezes não existe uma forma de comunicação, a tecnologia PLC pode ser virtualmente considerada como uma opção para prover conexão [5].

Em relação as redes residenciais e acesso à internet, a tecnologia PLC é uma solução para prover conexão locais (LAN - *local area network*) em lugares com várias paredes, salas e andares como prédios e escritórios [6]. Neste tipo de ambiente as tecnologias sem fio enfrentam grandes dificuldades para conectar todos os dispositivos na rede e a passagem de novos eletrodutos para fios de comunicação é inviável economicamente. Nestas circunstâncias, a tecnologia PLC tem o forte atrativo de não exigir estrutura de transmissão extra.

Inicialmente, a primeira aplicação envolvendo transmissões de dados na rede elétrica foi para a proteção de sistemas de distribuição de energia em caso de falhas [6]. Nestes sistemas, centros de distribuição, subestações e plantas trocam informações entre si, com o intuito de minimizar efeitos prejudiciais e tornar as redes de distribuição mais robustas. Tendo em vista a modernização da rede elétrica, surge uma nova proposta: a *smart grid* [7]. Embora seja um conceito ainda em construção, as *smart grids* visam interligar por uma rede de dados todas as etapas do processo de geração, transmissão, distribuição e consumo (residencial, comercial ou industrial) que passariam a trocar informações entre si visando dar ao sistema elétrico (e ao seu operador) maior flexibilidade e integração.

Uma das aplicações em que a tecnologia PLC se mostra promissora é nos sistemas AMI (*Advanced Metering Infrastructure*). Estes sistemas têm como características a medição, coleta e análise do consumo de energia elétrica a partir de uma rede de sensores medidores [8]. Os sistemas AMI implementam todas as funcionalidades dos sistemas

AMR (medição e tarifação) e permitem ainda o gerenciamento do consumo, coleta e distribuição de informações aos clientes, fornecedores, empresas de serviços públicos e prestadores de serviços. Tudo em tempo real. Neste tipo de aplicação, largamente utilizada nas *smart grids*, a tecnologia PLC ganha grande incentivo e pode ser empregada para o controle remoto de eletrodomésticos, lâmpadas, sistemas de alarme e de segurança, por exemplo. Como a maioria dos equipamentos e eletrodomésticos estão conectados à rede elétrica, existe a possibilidade de serem interligados por uma rede de dados, inclusive com acesso à Internet.

A tecnologia PLC também encontra potencialmente inúmeras aplicações na indústria automotiva que tende a substituir cada vez mais os sistemas mecânicos por sistemas eletrônicos. Atualmente, várias tecnologias que utilizam protocolos de redes de comunicação industriais, como o Fieldbus, foram desenvolvidas para atender as diferentes unidades de controle eletrônico (ECU – *Electronic Control Unit*). Estas unidades podem ajudar o motorista a controlar funcionalidades como sistema de tração, ABS (*Anti-lock Breaking System*), sistema de estabilidade (ESP – *Electronic Stability Program*), direção elétrica (EPS - *Electric Power Steering*), dentre outras [9] e podem usar os cabos de energia para transmitir estas informações visando a diminuição de cabos e problemas com excesso de fiação.

## 1.2 - Objetivos da pesquisa

Esta pesquisa tem dois objetivos básicos. O primeiro deles é fazer um breve estudo teórico sobre a tecnologia PLC e seus aspectos técnicos em aplicações voltadas a área de transmissão de dados em *smart grid,* especialmente para transmissão em banda estreita de dados em ambientes domésticos onde são usados os sistemas AMI. O segundo objetivo, não menos importante, é desenvolver o projeto de um módulo de transmissão e recepção (*i.e.*, *transceiver*) de dados usando a técnica de PLC em banda estreita a partir de um circuito comercial (já contendo todos os recursos necessários para implementação da

camada física) que empregue as principais padronizações para esta tecnologia de transmissão de dados. O desempenho deste módulo é avaliado sob a ótica da aplicação no contexto de um sistema AMI para *smart grids* e da eletrônica. Por fim, alguns testes de desempenho da transmissão e da aplicabilidade desta tecnologia são também avaliados neste trabalho.

## 1.3 - Justificativa

O novo conceito de rede elétrica, denominado de *smart grids*, interliga por dados em tempo real todo o sistema elétrico (desde a geração até o consumo). Este novo modelo faz uso intensivo de vários subsistemas eletrônicos que monitoram os parâmetros elétricos da rede. Por isto, a troca de dados é muito grande neste novo modelo. Em função desta demanda, várias tecnologias têm sido usadas como meio de comunicação entre as unidades consumidoras e os centros de operações ou até mesmo nas redes de sensores locais. Alguns trabalhos [3] [10] têm apontado a tecnologia PLC como candidata para a rede de dados de um sistema AMI em um ambiente residencial. Contudo, por ser uma tecnologia ainda em amadurecimento, sob o ponto de vista da eletrônica, é necessário que se avalie a viabilidade desta tecnologia sob vários aspectos (técnicos, financeiro, controle complexidade, segurança, etc). Uma forma de se avaliar esta viabilidade é através da produção de um circuito de comunicação PLC empregando elementos já disponíveis no mercado e padronizados. Como a rede de dados de um sistema AMI não requer grande fluxo de dados, mas exige alguma robustez, este trabalho terá seu foco voltando à banda estreita PLC, onde os fabricantes de semicondutores têm produzido mais opções de circuitos e modens. Com a produção deste circuito, alguns aspectos construtivos são analisados que permitem avaliar esta tecnologia como alternativa para sistemas AMI em um contexto de *smart grids*.

## 1.4 - Organização do texto

No Capítulo 2 são abordados alguns aspectos teóricos sobre a tecnologia PLC. São focados os aspectos mais importantes para as *smart grids* e os conceitos que podem ser de interesse para a aplicação aqui abordada. O conteúdo abordado neste próximo capítulo deve contribuir para o entendimento dos aspectos tecnológicos que devem ser levados em conta para o projeto de um *transceiver* PLC. A construção de um *transceiver* é abordada no Capítulo 3 onde são destacados os principais elementos deste circuito sob um ponto de vista da eletrônica fazendo uso de módulos PLC comerciais que são interconectados para produzir um protótipo com algum nível de funcionalidade mínimo para um sistema AMI. Alguns testes deste protótipo modular são feitos e os resultados são apresentados no Capítulo 4. Neste mesmo capítulo são feitas algumas discussões sobre o desempenho da tecnologia PLC para uma rede de dados doméstica. Por fim, o Capítulo 5 faz as conclusões sobre o emprego da tecnologia PLC para sistemas AMI residenciais.

# Capítulo 2

# Aspectos gerais sobre a tecnologia PLC para transmissão de dados no contexto das *smart grids*

## 2.1 – Visão geral

A ideia básica da tecnologia PLC é transmitir informação de um ponto ao outro, usando a rede elétrica como canal de comunicação. A rede elétrica foi desenvolvida para ser um meio de transporte de energia até os consumidores e por isto possui uma tensão elétrica constantemente presente. Esta tensão elétrica se alterna em amplitude ao longo do tempo, atingindo aproximadamente 180 volts de pico por fase, com uma frequência de 50 ou 60 Hz (no Brasil a frequência da rede elétrica é de 60 Hz). Além da frequência fundamental de propagação, existem outras frequências que possuem um baixo nível de tensão na rede elétrica. Geralmente, estas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental, ou seja, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e assim por diante. Elas são tradicionalmente chamadas de harmônicas. Convencionalmente, a medida em que a frequência das harmônicas aumenta, a amplitude diminui até se tornar desprezível. Além das harmônicas, podem existir inúmeras outras componentes de tensão em diferentes frequências e amplitudes que são geradas por dispositivos ligados a rede elétrica como, por exemplo, motores elétricos (de geladeiras, ar condicionado, etc), fontes chaveadas, inversores de frequência (muito usado em microgeração solar), reatores, *dimmers*, etc.

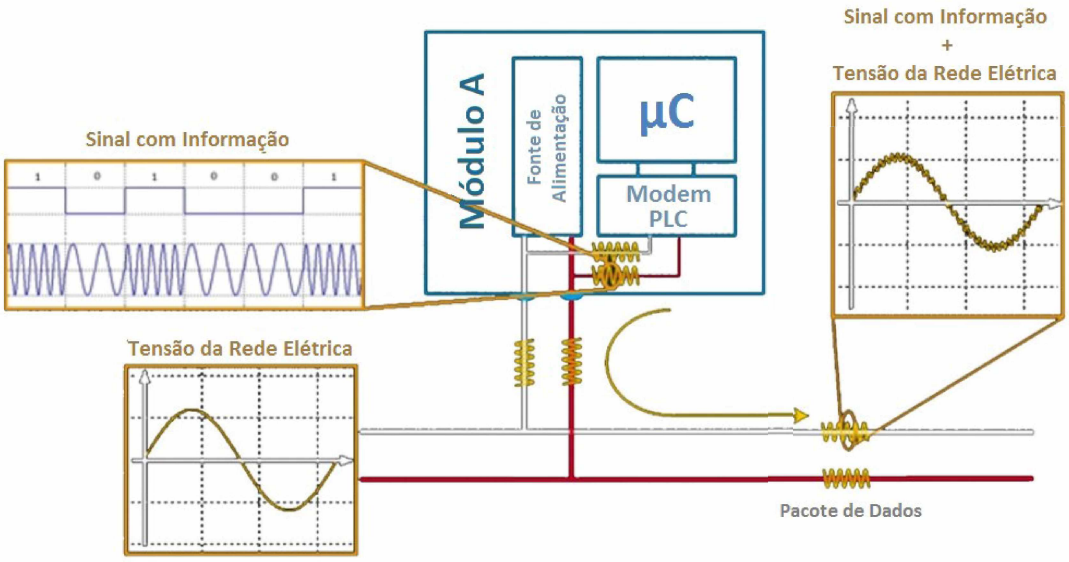
A comunicação pela rede elétrica compartilha o mesmo meio que transporta energia para a transmissão de dados, e (geralmente) utiliza um sinal de no máximo 1 volt

de amplitude para representar a informação. O sinal com a informação se propaga em frequências a partir de 3 kHz (a amplitude das harmônicas nesta frequência é desprezível para tecnologia PLC) de forma a não interferir na tensão da rede elétrica e nem que esta interfira significativamente no sinal de dados [1].

Nos sistemas digitais de comunicação, a informação é representada por uma sequência binária. Entretanto, essa sequência não pode ser simplesmente transmitida. É necessário transformá-la em um sinal elétrico. Para tanto, são utilizados esquemas de modulação que têm por objetivo transportar a informação de um ponto a outro. Na Figura 1, cada bit da sequência binária é transformado em um tipo de sinal senoidal. Ou seja, é associado aos bits 1 e 0 um valor de frequência diferente. Este esquema de modulação é conhecido como FSK (*Frequency Shift Keying*). Nesta figura, a modulação é realizada por um módulo de comunicação denominado de "Módulo A". Após modulado, o sinal com informação é inserido na rede elétrica, compartilhando o meio de propagação com a tensão da própria rede. Ainda na Figura 1 é representada a combinação destes dois sinais. Nota-se a diferença entre o nível de tensão da rede elétrica e do sinal com informação.

Na PLC o sinal se propaga pela rede elétrica até outro módulo de comunicação, que deve recuperar (demodular) o sinal com a informação propagada pela rede cabeada. O módulo de comunicação é composto basicamente de três partes: uma fonte de alimentação, um microcontrolador e modem PLC que é responsável pela modulação e demodulação dos sinais. Na recepção são utilizados filtros seletores em frequência, já que os sinais na rede elétrica se propagam em frequências diferentes. Estes filtros tem a função de atenuar a tensão da rede elétrica (50/60 Hz) que não é de interesse e permitirem a passagem do sinal com a informação ($>$ 3 kHz) que contém a sequência binária que se deseja receber.

Figura 1 - Representação esquemática do compartilhamento da rede elétrica entre o sinal gerado pelo módulo de comunicação e a tensão elétrica presente na própria rede.




Fonte: Figura retirada e adaptada de [11].

## 2.2 – PLC e as *smart grids*

A rede elétrica como um todo é formada por um sistema amplo e complexo aqui chamado de "sistema elétrico de potência" (SEP). Este sistema engloba toda a infraestrutura destinada à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, com a finalidade de fornecer energia elétrica aos consumidores. Inicialmente, o SEP era composto de várias usinas de geração isoladas que atendiam os centros consumidores. À medida em que mais pessoas tinham acesso à energia elétrica, a infraestrutura do SEP se tornou maior. Assim, a interligação entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição se tornou evidente, já que o acesso a um conjunto amplo de recursos proporcionaria maior rentabilidade e assim o sistema elétrico foi gradualmente se transformando em uma rede interligada [3].

A infraestrutura atual é suportada por um sistema de supervisão, controle e aquisição de dados do tipo SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) que é responsável pela gestão da rede elétrica. O SCADA é um modelo de monitoramento centralizado que obtém dados sobre o estado do sistema a partir de uma série de sensores.

Estas informações permitem a realização de funções de monitoramento, atuação e controle com o objetivo de manter o sistema operando de maneira estável.

Por ser um sistema centralizado, todas as informações são concentradas em poucos centros de monitoramento o que pode acarretar atraso em aplicações que envolvam atuação, por exemplo. Além disso, este modelo impõe uma certa dependência entre os elementos que constituem o sistema, visto que, a tomada de decisão é realizada por uma central de controle. Apesar de ser um modelo robusto e amplamente utilizado, o SCADA apresenta dois problemas principais: (i) latência, dada a falta de considerações na arquitetura do sistema e qual topologia necessária para conter os atrasos na comunicação, e (ii) a falta de sincronia na leitura e distribuição das informações pelos sensores, o que dificulta o controle em tempo real do sistema [3].

A implementação de uma rede de monitoramento descentralizada onde as informações encontrem maior alcance que vão além das empresas concessionárias de energia e alcancem os próprios consumidores de tal forma que estes conheçam o estado dos próprios componentes por meio de uma rede de sensores local (em sua residência, comércio ou indústria), permite que os próprios agentes assumam o comando de diversas funções que não são realizados pelos sistemas SCADA das concessionárias [7]. Além disso, os problemas de atraso e falta de sincronia de um sistema centralizado podem ser evitados, visto que, cada agente é capaz de tomar decisões a partir do estado da rede. O monitoramento descentralizado e independente é característico das *smart grids* (SG) [3].

Com o crescente aumento no consumo de energia elétrica, existe um apelo às fontes renováveis de energia e ao desenvolvimento de sistemas mais eficientes. O consumo inteligente de energia é a chave para alcançar uma interação em tempo real entre consumidores e a rede elétrica, além disso, melhorar a rede de elétrica compreende melhorar a capacidade dos serviços e promover a conservação de energia [12]. Como a rede elétrica tende a se tornar mais inteligente, estes sistemas estarão diretamente conectados, produzindo mais informações nas redes de monitoramento e controle. Dessa

forma, tem-se a necessidade de uma rede que suporte e gerencie uma grande quantidade de informações, e que forneça maior flexibilidade e integração para rede. É neste contexto que a tecnologia PLC se insere nas *smart grids*.

A *smart grid* requer uma tecnologia como base de suporte para a transmissão de dados. Entre as alternativas cabeadas, PLC é a única tecnologia que tem custo de implantação que pode ser considerado, comparável às tecnologias sem fio, já que o meio de transmissão está pronto. Além disso, a tecnologia PLC já saiu da fase experimental e agora busca patamares comerciais para implantação em larga escala. Se os serviços idealizados nas *smart grids* podem ser realizados através das redes de distribuição de energia elétrica, existe uma grande via de comunicação universal, com a capacidade de interligar casas, escritórios, indústrias, subestações, usinas, etc [13].

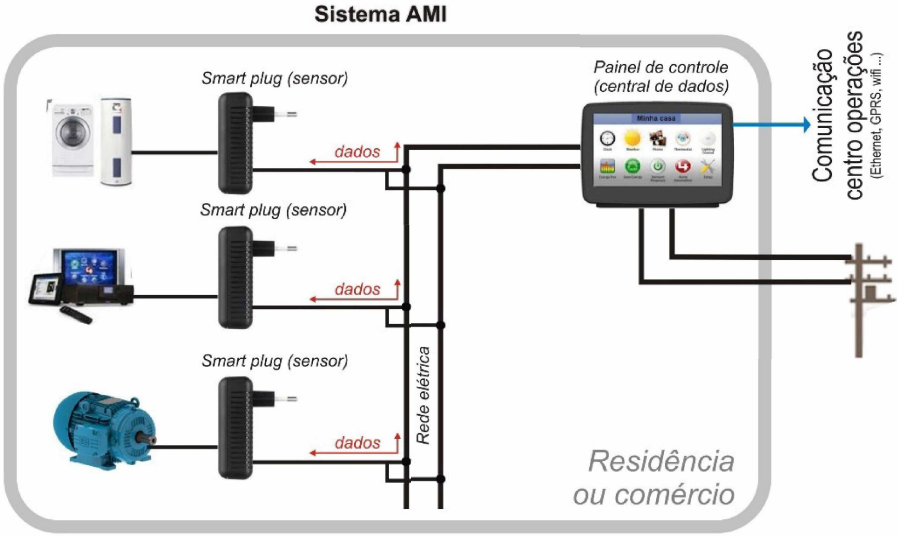
Por fim, a tecnologia PLC provê vários benefícios quando utilizado na *smart grid* [3], dentre eles, podem-se destacar: disponibilidade de canais de comunicação redundantes, desenvolvimento de dispositivos que mesclam medição e transmissão de dados, ligação direta entre dispositivos atuadores e centrais de controle, e uma ampla variedade de tecnologias de transmissão de dados que podem ser empregadas como uma solução na maioria das aplicações *smart grid*.

Uma das aplicações em que a tecnologia PLC se mostra promissora é nos sistemas AMI. Estes sistemas têm como função a medição, coleta e análise de alguma variável física, a partir de dispositivos medidores, através de vários meios de comunicação [8]. A tecnologia PLC pode ser uma delas. Estes sistemas AMI são capazes de determinar o consumo de energia elétrica e podem também incluir sistemas integrados para usuários finais e gerenciamento dos dados coletados.

Em um sistema AMI, os dados coletados podem ser armazenados e transmitidos para uma central de controle (que recebe o nome de painel de controle ou *in home display*). O painel de controle gerencia a distribuição de informações aos clientes, fornecedores, empresas de serviços públicos e prestadores de serviço. Além disso, é

possível a implementação de notificações, tais como, detecção de consumo excessivo de um equipamento, bateria fraca, dentre outros. A Figura 2 ilustra este esquema.

Figura 2 - Exemplo de um sistema AMI residencial que monitora continuamente os equipamentos elétricos de uma rede usando tecnologia PLC.




Fonte: O autor.

## 2.3 – Padronização e alocação de frequências

Nos sistemas de comunicação, a frequência de um sinal é usada como meio de transporte de uma informação. Dessa forma, é muito importante definir uma faixa de frequências adequada para estabelecer uma comunicação. As frequências a serem utilizadas como meio de transporte são limitadas por questões físicas do meio de condução do sinal e questões legais que remetem a uma legislação específica. As questões físicas estão relacionadas com a atenuação do sinal, alcance, ruídos, etc. As questões legais são impostas por órgãos reguladores através de normas e padrões, que visam regulamentar as atividades de comunicação em um meio para garantir que seu espectro seja compartilhado por outros equipamentos, assegurando que diferentes dispositivos possam trocar informações entre si.

Neste sentido, a tecnologia PLC é subdividida em três categorias no que diz respeito ao uso da frequência: transmissão banda ultra estreita (UNB – *Ultra*

*Narrowband*); em banda estreita (NPLC – *Narrowband Power Line Communication*) e em banda larga (BPLC – *Broadband Power Line Communication*).

A tecnologia PLC pode também ser subdividida em duas categorias relativas aos níveis de tensão presentes na rede. São elas: PLC de baixa tensão (LVPLC – *Low Voltage Power Line Communication*) e PLC de média tensão (MVPLC – *Medium Voltage Power Line Communication*). O Quadro 1 mostra um resumo das principais tecnologias PLC e a padronização vigente.

Quadro 1 - Subdivisão das tecnologias PLC de acordo com a faixa de frequências, nível de tensão, taxa de dados e padronização.

| **Banda** | **Faixa de frequências** | **Nível de tensão** | **Taxa de dados** | **Padronização** |
|---|---|---|---|---|
| Ultra estreita | 30-300 Hz | MVPLC e LVPLC | ~100 bps | Proprietária |
| Estreita | CENELEC (3-148,5 kHz)<br>FCC (10-490 kHz)<br>ARIB (10-450 kHz)<br>Chinesa (3-500 kHz) | LVPLC | < 10 kbps | ISSO/IEC 14908-3<br>ISSO/IEC 14543-3-5<br>CEA-600.31<br>IEC 61334-3-1<br>IEC 62334-5 |
| | | | 10-500 kbps | ITU-T G.hnem<br>IEEE 1901.2 |
| Larga | 1,8-250 MHz | LVPLC | > 1 Mbps | HomePlug 1.0<br>IEEE P1901<br>ITU-T G.hn |

Os sistemas que utilizam a banda ultra estreita operam em baixa taxa de dados e com alcances que podem chegar a até 150 km. Atualmente, os sistemas AMR Turtle e TWACS (*Two-Way Automatic Communications Systems*) são exemplos de tecnologias nesta faixa de frequências. O primeiro sistema funciona com uma taxa de aproximadamente 0,001 bps e o segundo sistema com até 120 bps. As tecnologias UNB-PLC são utilizadas a pelo menos duas décadas em campo e desenvolvidas para centenas de utilidades [3].

As tecnologias NPLC ainda são subdivididas de acordo com a taxa de dados, ou seja, baixa taxa de dados (LDR – *Low Data Rate*) e alta taxa de dados (HDR – *High*

*Data Rate*). As tecnologias LDR utilizam uma única portadora de poucos kbps e conseguem uma taxa de transmissão de até 10 kbps. Além disso, são utilizadas largamente em sistemas de medição e monitoramento, bem como em soluções AMI. Atualmente, as tecnologias NPLC-LDR desenvolvidas são baseadas nas modulações FSK ou S-FSK (*Spread*-FSK), especificadas pelos padrões IEC 61334-5-2 e IEC 61334-5-1, respectivamente.

Com o sucesso dos sistemas de transmissão em banda estreita, houve um interesse no desenvolvimento de tecnologias em banda larga, uma vez que a taxa de dados é maior. Inicialmente, foram desenvolvidos dispositivos para aplicações de acesso à internet, de forma que, bastava-se conectá-los na tomada para se ter acesso a rede global. Estes dispositivos são capazes de modular e demodular o sinal utilizando a rede elétrica como canal de comunicação, e de prover acesso à internet (a computadores, notebooks, tablets, celulares, etc) por meio de um "plug" ou wi-fi. Nos últimos dez anos, várias parcerias entre indústrias (HomePlug 1.0, HomePlug Turbo e HomePlug AV) foram formadas para definir uma padronização para aplicações residenciais.

As próximas duas subseções tratam de duas importantes normas para PLC dentro do contexto das *smart grids*. Fabricantes de circuitos eletrônicos as tem empregado para produzir dispositivos comerciais de comunicação PLC e por isto elas tem servido de referência.

### *2.3.1 – CENELEC EN 50065*

O CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) é responsável pela normalização no campo da engenharia eletrotécnica na Europa e em países membros. Em 1992, o CENELEC publica o padrão EN 50065, que tem como objetivo permitir uma comunicação eficiente em instalações elétricas de baixa tensão numa faixa de frequências de 3 a 148,5 kHz [14]. Para tanto, são definidas regras que devem ser implementadas nos dispositivos de comunicação que utilizam a rede elétrica para a transmissão de dados nesta faixa de frequências.

O padrão EN 50065 é largamente difundido e adotado por desenvolvedores, devido a abrangência do sistema de comunicação como um todo. Este padrão é formado por outros quatro subpadrões (Parte 1, 2, 4 e 7). A Parte 1 especifica as regras gerais, protocolo de acesso ao meio, nível do sinal e limites de distúrbios. Além disso, divide a faixa de frequências em quatro bandas.

- Banda A (3 a 95 kHz): restrita a fornecedores de energia elétrica e seus licenciados;
- Banda B (95 a 125 kHz): qualquer aplicação e não requer um protocolo de acesso;
- Banda C (125 a 140 kHz): sistemas residenciais com o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) obrigatório;
- Banda D (140 a 148,5 kHz): sistemas de segurança e alarme.

A Parte 2 está relacionada com os requisitos de imunidade para os dispositivos e equipamentos que operam na faixa de frequências de 3 a 148,5 kHz em ambientes residenciais, comerciais e industriais. Esta parte tem como objetivo minimizar a influência entre dispositivos que se comunicam através da rede elétrica e operam em uma faixa de frequências similar. Além disso, são especificados os principais requisitos de imunidade e métodos de medição de interferência eletromagnéticas com foco em NPLC.

As especificações para os filtros de acoplamento e requisitos de proteção dos circuitos eletrônicos (*i.e.*, *analog front end*) são definidas na Parte 4. Os filtros de acoplamento têm por objetivo amenizar os distúrbios na rede elétrica, que podem danificar o dispositivo de comunicação. Para tanto, estes filtros devem ser capazes de:

- limitar a largura espectral do sinal de comunicação na rede;
- reduzir os sinais indesejados provenientes de frequências superiores e inferiores à frequência de comunicação;
- permitir a comunicação simultânea em cada lado do filtro;
- fazer o casamento de impedância com a rede para a transmissão do sinal;
- fornecer um circuito de retorno para o sinal.

Por fim, a Parte 7 especifica os limites de impedância para equipamentos que operam na faixa de frequências especificada na Parte 1. Os dispositivos conectados à rede elétrica contribuem para carga da rede em geral, causando uma oscilação da impedância da rede. Esta oscilação na impedância da rede provoca um aumento na atenuação do sinal e prejudica a comunicação. Esta norma especifica um valor mínimo de impedância tanto no modo de transmissão quanto no modo de recepção.

### *2.3.2 – IEC 61334-5-1*

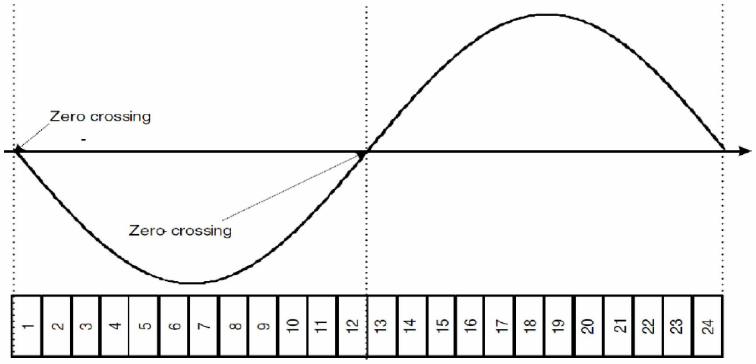
O padrão IEC 61334 é uma série de normas e regulamentações técnicas desenvolvidas pela Comissão Internacional Eletrotécnica (IEC - *International Electrotechnical Commission*) baseadas no comportamento das linhas de transmissão para a comunicação de dados. Além disso, é um padrão desenvolvido para a tecnologia PLC em baixa velocidade de transmissão, voltado a sistemas de medição e SCADA. De forma geral, o IEC 61334 descreve um projeto de camada física (PHY – *Physical Layer*) adaptável, uma camada de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control Layer*) viável e uma interface de gerenciamento.

Na parte 5-1 deste padrão é descrita uma camada física que utiliza a modulação S-FSK para a transmissão de dados na rede elétrica. A modulação S-FSK combina vantagens do espalhamento do espectro e da modulação FSK, ou seja, imunidade contra interferências em banda estreita e baixa complexidade. Na modulação FSK o desvio de frequência é de 0,5 ou 1 vezes a frequência de sinalização, que para uma taxa de transmissão de 2400 símbolos pode se ter um desvio de 1200 ou 2400 Hz. Já na modulação S-FSK o desvio de frequência é maior, em torno de 10 kHz e independe da frequência de sinalização [8].

Além da modulação S-FSK, o padrão IEC 61334-5-1 especifica uma camada física sincronizada com sinal AC da rede elétrica (50 ou 60 Hz) para a temporização de bit e de quadro. O cruzamento por zero da rede elétrica é usado como referência para o tempo de bit, que é sempre um múltiplo de seis vezes a frequência da rede. A **Erro! Fonte de**

**eferência não encontrada.** ilustra como é realizada a sincronia entre transmissor e receptor usando como referência o cruzamento por zero da componente fundamental (50 ou 60 Hz) da rede elétrica. Entre um cruzamento por zero e outro, o receptor envia 12 bits, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Em uma rede de 0 Hz, a taxa de transmissão pode chegar a 1,44 kbps. É possível também enviar 48 bits por ciclo gerando uma transmissão de até 2,88 kbps.

Figura 3 - Sincronização de bits entre receptor e transmissor como especifica o padrão IEC 61334-5-1.




Fonte: Figura retirada de [15].

Em relação aos quadros gerados na camada física, são reservados 4 bytes de preâmbulo e início do quadro, 38 bytes de carga útil (encapsulados pela camada de acesso ao meio) e 3 bytes de pausa interquadro, totalizando 45 bytes. A camada de acesso ao meio (MAC) proporciona vários serviços de controle lógico como, acesso ao canal, segmentação e encapsulamento, repetição, endereçamento e verificação de erro [16].

O método de acesso ao meio é o TDMA (*Time Division Multiple Access*) e a sincronização é realizada pelo envio de um quadro que indica o *time-slot* usado pelos dispositivos conectados à rede. Além disso, cada quadro MAC contém 24 bits de endereçamento, sendo 12 bits para o endereço da fonte e 12 bits para o endereço do destino. Alguns endereços são reservados para dispositivos não registrados, *broadcasting* e assim por diante. A verificação de erro é baseada em código de redundância cíclica (CRC – *Cyclic Redundancy Check*) de 24 bits, que verifica todo o quadro MAC, exceto o quadro de início e os campos de número de subquadros, protegidos por um código BCH

(7,3) (código idealizado pelos pesquisadores Bose, Hocquenghem e Chaudhur. Para cada 3 bits codificados são gerados outros 4 bits de redundância para a decodificação).

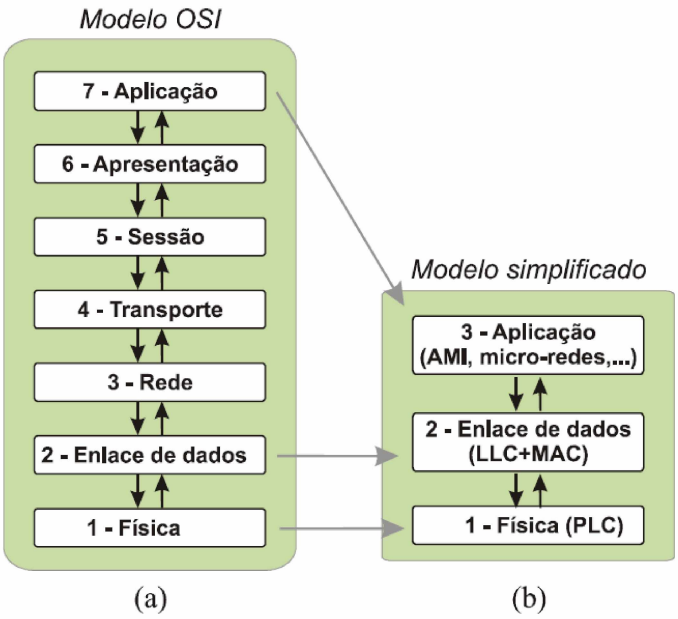
## 2.4 – PLC e redes de dados

A tecnologia PLC é uma técnica de transmissão de dados entre um (ou vários) emissor(es) e um (ou vários) destinatário(s). Isto a coloca em um cenário de rede de dados semelhante ao que acontece com as redes de computadores. Sendo parte de uma rede, seu estudo e projeto pode ser teoricamente dividido em uma rede de "camadas". Esta arquitetura de camadas permite discutir uma parcela específica e bem definida de um sistema grande e complexo. Com esta modularidade, fica mais fácil modificar a implementação das funções executadas por qualquer uma das camadas. Isto quer dizer que cada camada geralmente tem uma finalidade bem específica de comunicação, cuja função é prover algum tipo de serviço para a camada superior ou inferior assim como acontece uma linha de produção industrial. Esta camada pode ser implementada em software, em hardware ou uma combinação de ambos.

Um modelo de referência amplamente difundido é o OSI (*Open System Interconnection*) que divide o processo de transmissão em sete camadas: física, de enlace, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação. A Figura 4 ilustra este modelo que tem como objetivo assegurar a interoperabilidade, portabilidade, compatibilidade e escalabilidade entre sistemas de comunicação heterogêneos.

Apesar da sofisticação do modelo OSI de sete camadas, nem toda transmissão necessita de todas suas funções. Muitas delas podem ser suprimidas para facilitar o projeto de transmissão e recepção de dados. Contudo, esta simplificação depende dos requerimentos do projeto para o qual a comunicação PLC servirá de meio de transporte de bits. Em sistemas AMI a transmissão de dados é geralmente resumida ao que se vê na Figura 4b. Porém, isto pode variar de projeto para projeto e depende dos requerimentos da transmissão.

Figura 4 - (a) Modelo OSI de camadas para transmissão de dados. (b) Modelo de camadas simplificado sugerido pelo padrão IEC 61334 para aplicações em sistemas AMI onde a tecnologia PLC representa a camada física.




Fonte: O autor.

Na camada de enlace de dados do modelo da Figura 4b são executados os protocolos LLC (*Logical Link Control*) que controlam o fluxo de mensagens da rede e o MAC que provê mecanismos de endereçamento de dados na rede. Cabe a camada física PLC enviar e receber bits da rede, filtrar sinais, possuir uma interface elétrica com a rede, (de)codificar eletricamente sinais para que possam ser injetados ou lidos da rede.

A comunicação na camada física requer técnicas de modulação robustas como FSK, CDMA (*Code-Division Multiple Access*) e OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*). Em aplicações de baixo custo e que demandam baixa taxa de transmissão (poucos kbps), a modulação FSK é vista como uma boa solução devido a sua simplicidade de implementação. Para taxa de dados de até 1 Mbps, a técnica CDMA provê uma solução eficaz se considerado o custo de implementação por bit transmitido. Já para aplicações que requerem alta taxa de dados, a técnica OFDM é a melhor escolha se considerada sua eficiência espectral e imunidade contra ruído impulsivo e propagação multipercurso. As próximas subseções tratam de alguns aspectos técnicos relacionados as funcionalidades destas camadas com a tecnologia PLC.

### *2.4.1 – Camada física*

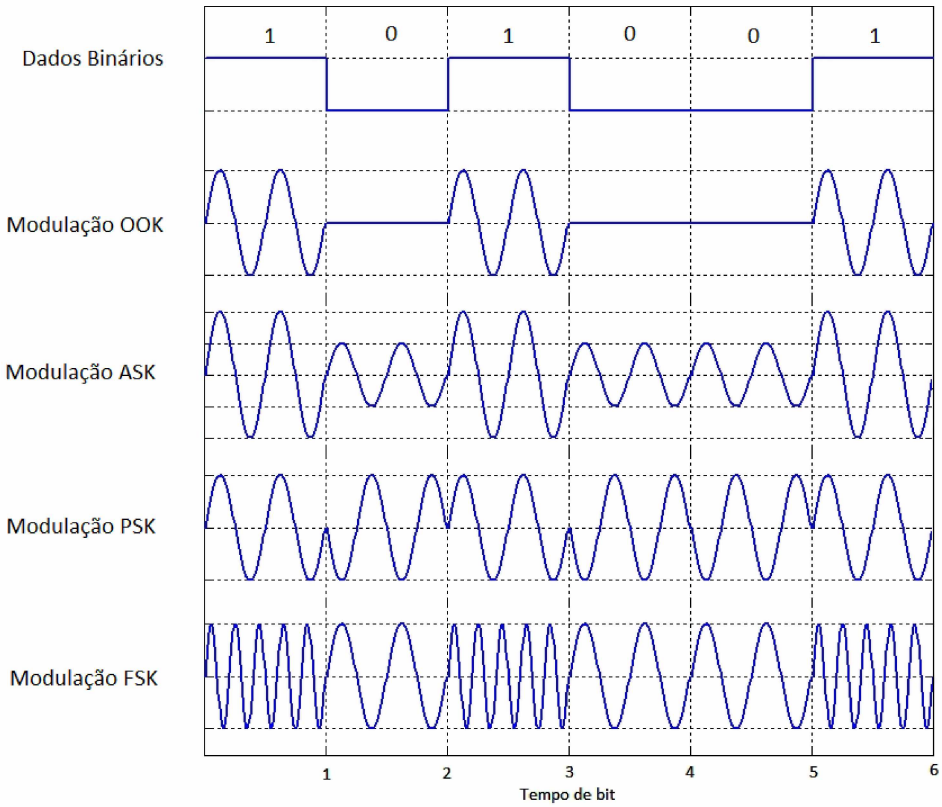
A camada física representa as funcionalidades de mais baixo nível em um sistema de comunicação. Nesta etapa são especificadas várias características e parâmetros fundamentais sobre a transmissão do sinal pelo canal e como recuperá-lo integralmente a nível de bit. Por isso, a camada física é responsável geralmente por especificar a modulação utilizada, a sincronia de bit, palavra e quadro, a taxa e a potência de transmissão, o sentido da comunicação, o tempo de bit, o formato do quadro, dentre outros.

A modulação possui um papel importante nos sistemas de comunicação. Se todas as informações fossem transmitidas em banda base (como são aquisicionadas) em um mesmo canal, ocorreria uma enorme interferência em determinadas faixas de frequência. Ainda, não seria possível transmitir estas informações em longas distâncias. Para evitar a interferência entre sinais no mesmo canal de comunicação, desloca-se o sinal para uma faixa de frequências diferente, e para aumentar o seu alcance, utiliza-se uma faixa de frequências apropriada. Além disso, a modulação possui outras finalidades como aumento da taxa de transmissão, imunidade contra ruídos e distúrbios, dentre outras.

Os primeiros esquemas de modulação digital desenvolvidos e, portanto, os mais simples são o OOK (*On-off Keying*), que representa o bit 1 com o sinal da portadora e o bit 0 sem o sinal da portadora. Já o ASK (*Amplitude Shift Keying*) que representa os bits 1 e 0 com uma diferença na amplitude da portadora. Posteriormente, surgiram os esquemas baseados na fase da portadora, como o PSK (*Phase Shift Keying*) e na frequência da portadora, como o FSK. Estes esquemas estão ilustrados na Figura 5.

Atualmente, os esquemas de modulação mais utilizados na transmissão de dados na rede elétrica são o FSK (e seus derivados), CDMA e OFDM. Cada esquema de modulação possui suas particularidades, vantagens e desvantagens de acordo com os requisitos do sistema.

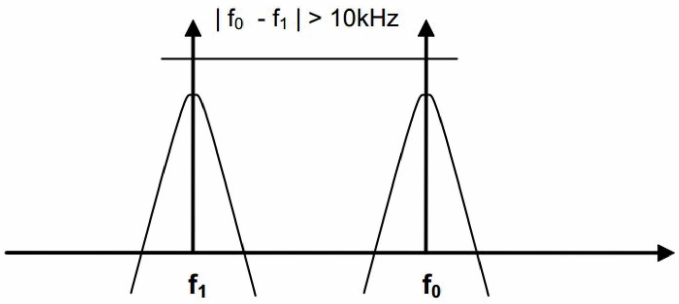
Figura 5 - Representação dos sinais no tempo dos diferentes esquemas de modulação digital. Cada tipo de modulação representa os bits 0 e 1 de uma maneira diferente, de forma que, o receptor deverá ser capaz de recuperar as informações transmitidas.




Fonte: O autor.

A modulação FSK é geralmente utilizada em sistemas de faixa estreita com baixa taxa de transmissão, voltada principalmente para aplicações de leitura remota de medidores de energia elétrica, água e gás. A vantagem de se utilizar este tipo de modulação é a simplicidade do circuito de modulação e demodulação e o considerável alcance do sinal. A modulação S-FSK (especificada pelo padrão IEC 613341-5-1) é uma variante da modulação FSK. A principal diferença está no desvio da frequência entre as portadoras, que na modulação S-FSK é fixada em torno de 10 kHz e independe da frequência de sinalização, o que não ocorre na modulação FSK, que possui o desvio de frequência de 0,5 ou 1 vezes a frequência de sinalização. Além disso, a frequência da portadora que representa o bit 0 é maior que a frequência da portadora que representa o bit 1, como ilustra a Figura 6. O espalhamento no espectro da modulação S-FSK possui maior imunidade contra interferências em PLC banda estreita [16].

Figura 6 - Sinal S-FSK no domínio da frequência.

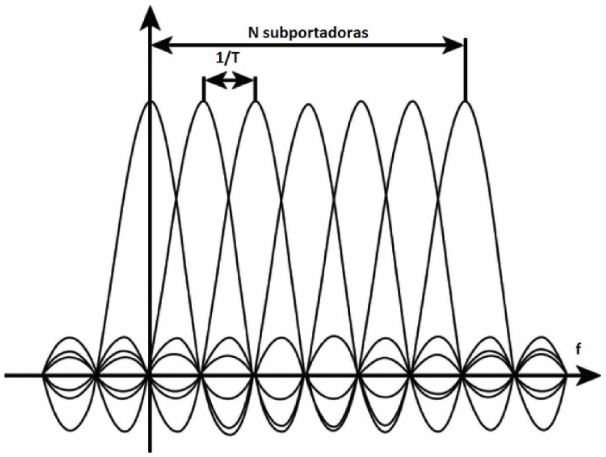



Fonte: Figura retirada de [17].

A modulação CDMA passou a ser considerada para a transmissão na rede elétrica devido ao seu sucesso em outros sistemas de comunicação, como o celular. Neste tipo de modulação o sinal de cada usuário é espalhado utilizando um código de espalhamento no transmissor. No receptor o sinal é recuperado pelo mesmo código. Os sistemas CDMA são efetivos contra o ruído de banda estreita e a interferência entre usuários. No entanto, isso só é possível com um alto nível (*i.e.*, custo) de processamento [4]. O acesso simultâneo utilizando diferentes codificações no mesmo canal permite taxas de transmissão de até 1 Mbps típicas de um sistema de banda larga.

A modulação OFDM é uma técnica que permite maior eficiência espectral, justamente por transmitir mais dados em uma faixa de frequências limitada. Neste esquema uma sequência de bits em série é convertida em várias sequências pequenas em paralelo. Cada sequência será modulada em uma subportadora por esquemas de modulação como QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), PSK e suas variantes, formando vários sinais em banda estreita. As subportadoras, por sua vez, são matematicamente ortogonais entre si fazendo com que não exista interferência entre subportadoras vizinhas. Logo elas podem ser sobrepostas como ilustra a Figura 7. Dessa forma, a associação de sinais em banda estreita com um grande número de subportadoras, permite uma alta taxa de transmissão.

Figura 7 - Espectro de frequência do sinal OFDM. A largura espectral é definida pelo produto de N por 1/T, onde N é o número de subportadoras e T é a duração do símbolo.




Fonte: O autor.

A ortogonalidade entre subportadoras é conseguida através da Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT - *Inverse Fast Fourier Transform*), que é implementada no circuito de modulação. No processo de demodulação basta aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) para a recuperação do sinal. Para a sincronia entre portadoras são utilizados bits pilotos ou de *training,* que facilitam a recuperação do sinal.

O esquema de OFDM oferece várias vantagens. Como cada subportadora possui uma quantidade pequena de bits modulados, o tempo de bit é elevado, aumentando a robustez do sinal à atenuação e à resposta ao impulso do canal. Além disso, a cada símbolo são acrescentados bits de prefixo cíclico. Dessa forma, o receptor consegue identificar os pontos finais de cada símbolo e correlacionar corretamente as informações, eliminando em grande escala o problema de interferência inter-símbolo (ISI – *Inter-Symbol Interference*) [4]. Em canais seletivos em frequência, podem ser adotados métodos adaptativos de modulação. Isto quer dizer que nas frequências de elevada relação sinal-ruído (SNR – *Signal Noise Ratio*) adota-se esquemas de intermodulação de alto nível como 1024/512/256 QAM, o que ajuda a manter a taxa de transmissão constante. Ainda, a utilização de códigos corretores de erros (como o *Reed Solomon*) podem diminuir a taxa de erro de bit, aumentando a confiabilidade do sistema.

Os esquemas de modulação OFDM são encontrados na maioria dos sistemas de banda larga devido a sua possiblidade de alta taxa de transmissão de dados e robustez. Outro esquema de modulação baseado no OFDM, o Wavelet OFDM, também pode ser encontrado em sistemas de banda larga. Diferentemente do OFDM, este esquema de modulação não necessita de um intervalo de guarda, garantindo uma maior eficiência na transmissão [8]. Desenvolvido pela Panasonic, o Wavelet ODFM utiliza a faixa de frequências de 2 a 28 MHz com uma taxa de transmissão de até 210 Mbps. Baseado nesta tecnologia, surge o adaptador Ethernet Panasonic BL PA300, que permite a conexão de vários dispositivos por meio da rede elétrica.

Nos sistemas de banda estreita, além da modulação FSK e S-FSK, são utilizados esquemas de modulação por chaveamento de fase, como o PSK e seus derivados. Um exemplo é a solução proprietária da Echelon, que utiliza a modulação BPSK (*binary*-PSK) baseada no padrão de camada física LonWorks/LonTalk® que opera na banda CENELEC C com uma taxa de transmissão de até 5 kbps.

No que diz respeito à sincronia de bit, palavra e quadro, existem vários protocolos que definem como isto deverá ser feito. De forma geral, são incluídos uma sequência de início de quadro, prefixos cíclicos, bit de início e fim de byte, além de outros métodos para a recuperação correta da informação.

A comunicação pela rede elétrica entre dispositivos pode ser realizada de três maneiras: (i) *simplex*, (ii) *half-duplex* ou (iii) *full-duplex.* Neste último caso, a comunicação entre dois dispositivos ocorre simultaneamente.

A modulação e a demodulação do sinal geralmente é realizada por vários circuitos encapsulados em um mesmo chip chamados de modems PLC. Estes modems possuem todos os elementos necessários para a geração e a recuperação do sinal. Dentre eles, podem-se destacar os filtros passa-baixa, amplificador de ganho variável, somador, conversor digital-analógico, processador digital de sinais, registradores, reguladores de

tensão, dentre outros. Os principais modems comercialmente disponíveis são listados na Quadro 2.

Quadro 2 - Modems dos principais fabricantes disponíveis no mercado.

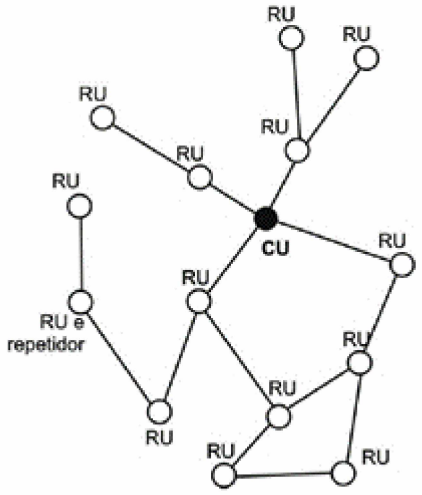
| Fabricante | C.I | Banda/taxa | Características | Aplicações |
|---|---|---|---|---|
| ST Microelectronics | ST7570 | Estreita (3 a 148,5 kHz). Taxa de até 2,8 kbps (@ 60 Hz) | Modulação S-FSK, controle automático de mensagens e várias outras funções orientadas a conexão. Padronização CENELEC 50065-1 e FCC parte 15. | Transmissão em redes *smart grids indoor* domésticas e industriais. Leitura remota automatizada |
| | ST7590 | Estreita (3 a 95 kHz). Taxa de até 128 kbps | Modulação OFDM com 96 subportadoras, intermodulação BDPSK, QDPSK ou 8DPSK programável, código corretor de erro. Padronização CENELEC 50065-1 e PRIME. | Transmissão em redes *smart grids indoor* domésticas e industriais. Leitura remota automatizada. |
| ON Semiconductor | AMIS-49587 | Estreita (9 a 95 kHz). Taxa de até 2,8 kbps (@ 60 Hz) | Modulação S-FSK, frequência de portadora programável e configuração por uma interface serial. Padronização CENELEC 50065-1 e FCC parte 15. | Leitura remota automatizada, transmissão de alertas e controle remoto de sistemas de segurança. |
| Yitran | IT800D | Estreita (9 a 400 kHz). Taxa de até 7,5 kbps | Modulação DCSK, código corretor de erro e mecanismo de retransmissão. Padronização CENELEC 50065-1 e FCC/ARIB. | Transmissão em redes *smart grids indoor* domésticas e industriais. Leitura remota automatizada. |
| Cypress | CY8CPLC20 | Estreita (125 a 140 kHz). Taxa de até 2,4 kbps | Modulação FSK, acesso CSMA e ambiente de desenvolvimento livre (PSoC). Padronização CENELEC 50065-1 e FCC parte 15. | Leitura remota automatizada, sistemas de supervisão, controle e monitoramento. |
| Broadcom | BCM60321 | Larga (2 a 28 MHz). Taxa de até 200 Mbps | Modulação OFDM 1024/256/64/16/8 QAM, QPSK e BPSK, criptografia AES de 128 bits, *plug and play*. Padronização IEEE 1901.2010/HomePlug AV. | Distribuição de conteúdo de banda larga e alta definição residencial de CATV, xDSL e POTS. |

### *2.4.2 – Camada MAC*

A camada MAC ou de acesso ao meio é responsável por vários serviços de controle lógico dentro de um enlace. Estes serviços dão suporte à comunicação entre dispositivos na rede, por meio de mecanismos de endereçamento, acesso ao canal, segmentação de pacotes, encapsulamento, repetição, verificação e correção de erros. A forma como os dispositivos se comunicam na rede é definida por protocolos específicos e varia de fabricante para fabricante.

Independente da arquitetura da rede, um sistema PLC para redes *smart grids* geralmente apresenta dois tipos de dispositivos: a unidade central (CU – *Central Unit* ou *initiator*) e unidades remotas (RU – *Remote Unit* ou *remote node*). Estas nomenclaturas podem variar amplamente. Contudo, seus significados e funções em uma rede mantêm-se. As CUs concentram as informações dos dispositivos conectados à rede e funcionam como uma "central de controle", localizadas no núcleo da rede, como ilustra a Figura 8. As RUs se localizam ao longo da rede elétrica com várias aplicações, como medidores, repetidores, atuadores, dentre outras. Além disso, as RUs alimentam as CUs com informações para que ela tome alguma providência.

Figura 8 - Ilustração de uma rede PLC com várias RUs coordenadas por uma CU em uma arquitetura mista.




Fonte: O autor.

Como mencionado, alguns RUs podem funcionar como repetidores para aumentar o alcance da rede e fazer com que RUs mais distantes consigam comunicar com a central

(o sinal PLC é limitado em potência para atender especificações e assegurar compatibilidade eletromagnética de toda rede elétrica). Este tipo de rede é comum em *smart grids,* onde os sistemas AMR/AMI são as RUs e a central de controle a CU. O papel duplo da RU permite estender o raio de ação do sinal PLC e apresenta um comportamento similar ao visto em redes de arquitetura *mesh*.

A unidade central da rede PLC, por assumir um papel de controle, coleta dados continuamente de suas RUs. Os dados coletados são armazenados e enviados para uma central de operações ou para um sistema de gerenciamento, através do roteamento das mensagens pela rede. As redes PLC geralmente suportam os seguintes tipos de roteamento de mensagens:

- ponto a ponto, com conexão diretamente entre a central e uma unidade remota;
- ponto a múltiplos pontos, com conexão direta entre a central e um grupo de unidades remotas;
- ponto a ponto com comunicação indireta entre a central e uma unidade remota através de um repetidor;
- ponto a múltiplos pontos com conexão indireta entre a central e um grupo de unidades remotas utilizando um ou mais repetidores;
- conexão ponto a ponto entre duas unidades remotas diretamente ou através de uma central.

Com relação ao acesso ao meio, os protocolos MAC especificam como deverá ser compartilhado os recursos e o acesso dos usuários ao canal, de acordo com a capacidade de transmissão da rede. Geralmente, existem dois tipos de acesso: o fixo e o dinâmico. No acesso fixo é atribuído a cada RU uma capacidade de canal pré-determinado, independentemente se ele estará transmitindo ou não. Neste caso, existe um número limite de RUs conectadas à rede. O acesso dinâmico pode ser dividido em duas categorias, livres de colisão e sujeitos à colisão.

Os protocolos sujeitos à colisão não garantem que não ocorra colisão de pacotes durante a transmissão. No caso de haver será necessária a retransmissão do pacote. Entretanto, fornecem maiores taxas de dados, pois utilizam um cabeçalho menor e são uma ótima opção para aplicações que não demandam QoS (*Quality of Service*). Já os protocolos livres de colisão garantem que durante a transmissão não ocorrerá colisão de pacotes, portanto, são utilizados para aplicações que demandam certa QoS.

Os protocolos livres de colisão mais conhecidos e estudados são o Polling e Aloha. No contexto de uma rede PLC, o protocolo Polling (usado no padrão IEC 61334-5-1) especifica que as RUs só irão enviar os dados à CU quando requisitada pela própria CU. Já no protocolo Aloha o acesso é aleatório, no qual as RUs requerem um canal logo que os dados estão disponíveis para transmissão. O transmissor espera por um reconhecimento do receptor por um período de tempo aleatório. Caso ele não receba, haverá retransmissão dos dados.

Outro protocolo de acesso considerado para rede PLC é o CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) que monitora o canal de comunicação antes de transmitir os dados. A principal vantagem do CSMA é o seu baixo custo de implementação e eficiência para lidar com um grande volume de dados. Na detecção de colisões (CSMA/CD – *Collision Detection*), o transmissor aguarda um período de tempo aleatório para retransmitir novamente, caso seja detectada alguma colisão. Contudo, o CSMA/CD tem dificuldade para distinguir o sinal do ruído na rede elétrica, o que diminui a confiabilidade deste acesso na rede PLC [4]. Uma alternativa à detecção de colisões é evitar colisões (CSMA/CA – *Collision Avoidance*). Além de monitorar o canal, o CSMA/CA troca mensagens para autorização da transmissão com os dispositivos da rede, garantindo que nenhum outro dispositivo transmita naquele momento. Os dispositivos baseados nas normas HomePlug e OPERA utilizam o protocolo de acesso CSMA/CA.

No diz respeito ao endereçamento, quando uma RU ou CU enviam dados para o canal, é necessário um sistema de endereçamento de dispositivos para viabilizar o envio

das informações ao receptor correto. Assim, cada elemento da rede possui um endereço único do tipo MAC de 12 bits (ou algum modelo próprio). Quando um novo RU é conectado à rede, ele tem que ser registrado na central que deve tomar seu conhecimento. Segundo o padrão IEC 61334-5-1, a central deve procurar constantemente por novos RUs e, uma vez identificados, deve dar um endereço a este novo item conectado à rede.

Com relação aos códigos verificadores e corretores de erro, existe uma ampla variedade usada nos dispositivos PLC e que muda de acordo com a padrão adotado. De forma geral, estes códigos auxiliam na recuperação da informação transmitida. Entretanto, requerem um maior processamento dos dispositivos e aumentam a quantidade de informação redundante a ser enviada. Códigos de verificação de redundância cíclica (CRC) e o *Reed Solomon* são os mais comuns para a verificação e correção de erros, respectivamente.

## 2.5 – Caracterização do canal

A rede elétrica como canal de transmissão é um ambiente hostil e está sujeita a vários problemas. Inicialmente, a rede elétrica foi projetada para transportar energia aos consumidores, e posteriormente considerada como um meio de transmissão de dados. Por este motivo, existe uma grande variedade de cabos por toda a infraestrutura, o que contribui para aumentar a atenuação neste canal de comunicação. Além disso, o nível de ruído pode ser excessivo e a variação da impedância da rede e a seletividade em frequência do canal devem ser considerados [6].

Outro ponto relevante é a localização do transmissor e do receptor. Uma fonte de ruído próxima a algum deles pode influenciar seriamente na qualidade do sinal de transmissão e aumentar a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) do sistema. Ainda, um número excessivo de ramificações entre o transmissor e o receptor, combinado com o descasamento de impedância durante o percurso, causam ecos e reflexões do sinal pela rede elétrica decrementando a sua relação sinal-ruído.

Assim como nos sistemas de comunicação, o ruído se caracteriza como um dos principais problemas na tecnologia PLC. Muito devido as suas características aleatórias e a uma baixa semelhança com o ruído branco gaussiano. A maioria dos dispositivos conectados à rede elétrica são fontes de ruído, como por exemplo, lâmpadas fluorescentes, aparelho de micro-ondas, fontes chaveadas, motores, dentre outros. De forma geral, os ruídos podem ter características impulsivas, seletivas em frequências ou ambas.

### *2.5.1 – Atenuação*

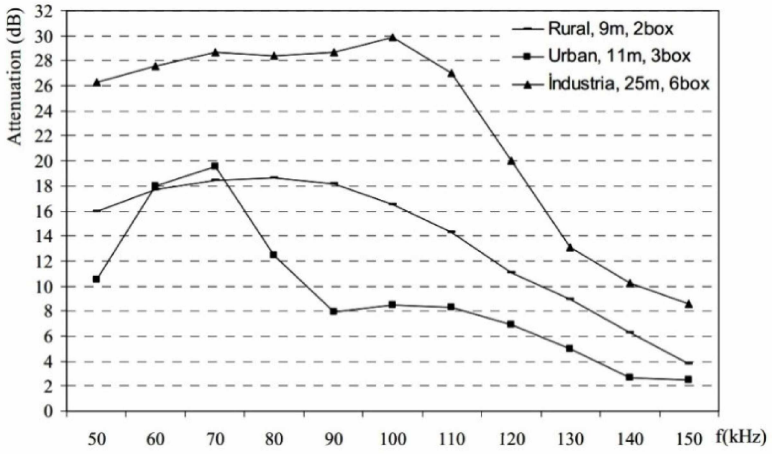
A atenuação de um canal de comunicação é um fator limitante para os sistemas de comunicação. Na tecnologia PLC a atenuação pode ser causada por diferentes fatores, em que na maioria dos casos, estão relacionados com as perdas por acoplamento e as perdas na linha [18]. As perdas por acoplamento estão associadas com o descasamento de impedância na rede elétrica entre os módulos de comunicação e a linha. Este descasamento de impedância somado a um grande número de ramificações entre o módulo transmissor e o módulo receptor, provocam ecos e reflexões do sinal pela linha de transmissão. Dessa forma, o sinal se propaga em multipercursos, causando interferências e atenuando o sinal de comunicação.

As perdas na linha estão diretamente relacionadas com a distância entre os módulos de comunicação. Como os cabos possuem uma impedância intrínseca, fica óbvio que parte da energia do sinal de comunicação será dissipada ao longo do enlace. Além disso, a impedância vista da linha dos equipamentos conectados à rede elétrica faz com que a potência do sinal seja dividida ao longo da linha. No fim, uma parcela da energia transmitida chega ao receptor.

A atenuação varia a partir de vários fatores como comprimento do enlace, quantidade de ramificações, nível de tensão da rede, ambiente de transmissão, entre outros. Com relação ao ambiente, geralmente são analisadas as áreas como rurais, urbanas e industriais. Cada localidade apresenta uma atenuação diferente, visto que, os equipamentos conectados à rede elétrica também são diferentes. Em áreas industriais,

por exemplo, é comum o uso de motores de alta potência e de equipamentos que provocam um grande distúrbio na rede elétrica. Nas áreas urbanas são utilizados equipamentos com uma potência menor em relação às áreas industrias, e existe um aglomerado de pessoas vivendo próximas entre si, o que não ocorre nas áreas rurais. A Figura 9 ilustra um comparativo da atenuação nessas áreas na faixa de frequências usada nos sistemas NPLC.

Figura 9 - Atenuação da linha nas áreas rural, urbana e industrial. O comprimento do enlace é diferente em cada um dos ambientes, ou seja, 9 metros na área rural, 11 metros na área urbana e 25 metros na área industrial. A numeração "2box" foi utilizada somente para identificar a caixa do *plug* usado nos testes.

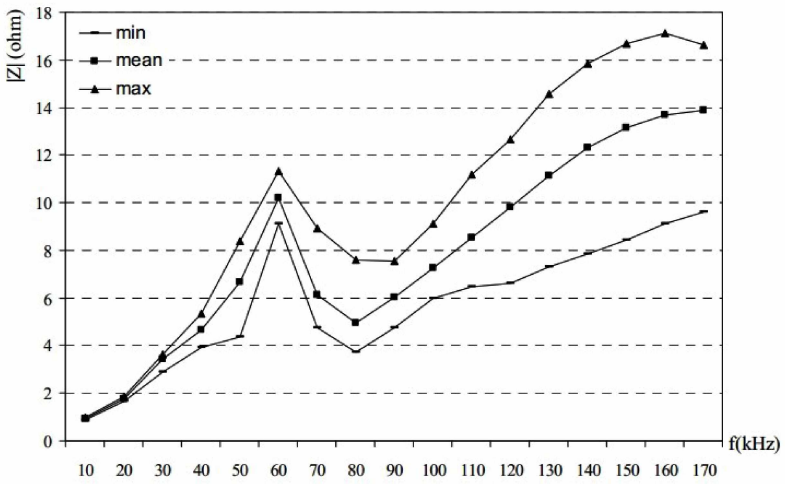



Fonte: Figura retirada de [19].

### *2.5.2 – Impedância*

A impedância da rede elétrica é altamente dependente da frequência e do tempo. Como a rede elétrica é uma linha de transmissão, a medida em que se aumenta a frequência, a impedância tende a aumentar. Em baixas frequências, é comum a medição de uma impedância menor que 1 ohm, variando até 10 ohms, como ilustra a Figura 10. Por outro lado, em altas frequências podem ser medidos valores de poucas dezenas de ohms [8].

Figura 10 - Impedância da rede elétrica em uma área urbana na faixa de frequências CENELEC. Os valores medidos são classificados como máximo, médio e mínimo, devido à mudança da rede com o tempo na mesma frequência.




Fonte: Figura retirada de [19].

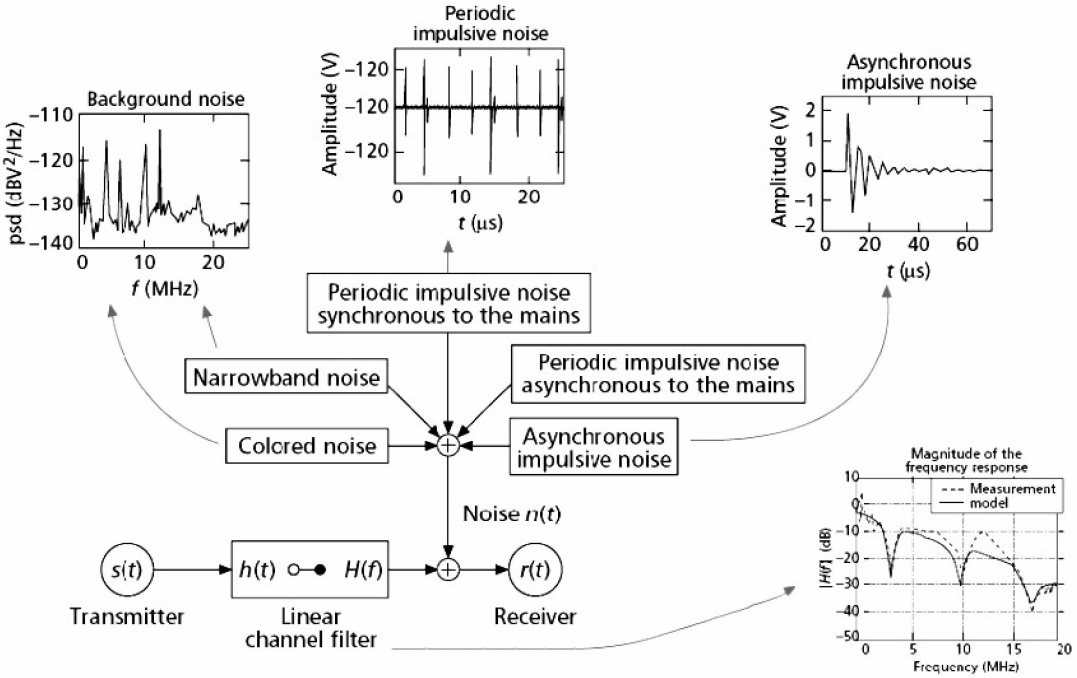
Na rede elétrica são conectados diversos equipamentos que a longo do tempo são ligados e desligados. Estes equipamentos estão conectados paralelamente um ao outro, e o acionamento de cada um deles modifica a impedância equivalente da rede elétrica. A impedância é determinada por diferentes equipamentos conectados à rede. Alguns equipamentos possuem uma impedância inferior à impedância característica da fiação elétrica, como por exemplo, elementos de aquecimento resistivo encontrados em fornos de cozinha, aquecedores, chuveiros e afins, e fontes de alimentação com capacitores compatíveis com as normas de emissões eletromagnéticas. Como os equipamentos são ligados ou desligados aleatoriamente, a impedância da rede elétrica varia ao longo do tempo. Para minimizar as perdas por acoplamento, os modems PLC devem ser projetados com uma impedância de saída a menor possível, preferivelmente menor que 1 ohm para aplicações em faixa estreita [18].

A rede elétrica geralmente tem uma característica capacitiva. Entretanto, o acionamento de equipamentos como motores, lâmpadas incandescentes e chuveiros, por exemplo, podem induzir uma característica reativa à rede, e como consequência, aparecer alguns pontos de 'ressonância' na faixa de 50 a 60 kHz ilustrados na Figura 10.

### *2.5.3 – Ruídos*

Os ruídos presentes na rede elétrica possuem diversas características e são produzidos, em sua maioria, por equipamentos ligados a própria rede elétrica. De forma simplificada, os ruídos são inseridos entre o transmissor e o receptor e podem ser classificados em quatro tipos: ruído de fundo, ruído impulsivo, ruído em banda estreita e ruído colorido [6]. A Figura 11 ilustra o modelo de um canal PLC.

Figura 11 - Modelo teórico de um canal PLC. O ruído inserido pela rede elétrica em baixa tensão é formado por vários tipos de ruídos. Além disso, o modelo leva em consideração a sua resposta em frequência variável do canal, a qual interfere na comunicação como um todo.




Fonte: Figura retirada de [20].

O ruído de fundo (ou *background noise*) é formado por diferentes tipos de ruídos, que estão longe do enlace de comunicação. A densidade espectral de potência (PSD – *Power Spectral Density*) deste tipo de ruído tende a diminuir com o aumento da frequência, principalmente na faixa de 9 a 95 kHz [18]. Além disso, os picos presentes ao longo da PSD estão relacionados com outro tipo de ruído, o ruído impulsivo.

Os ruídos impulsivos geralmente são causados pelo chaveamento e funcionamento de alguns equipamentos conectados à rede elétrica, e são fortemente dependentes da quantidade de atividade humana. O ruído impulsivo periódico (ou *periodic impulsive*

*noise*) pode ou não estar relacionado com a frequência da rede elétrica e surge em intervalos de tempo regulares com elevada amplitude e curta duração, sendo capaz de corromper até 48 bits em uma transmissão com taxa de 2400 símbolos por segundo [8], por exemplo. Geralmente, este tipo de ruído é gerado por fontes chaveadas. Já o ruído impulsivo assíncrono (ou *asynchronous impulsive noise*) possui mais energia, que decresce ao longo do tempo e não possui características periódicas. Este tipo de ruído é causado por mudanças bruscas (chaveamento de equipamentos) na carga da rede elétrica. De forma que, sua frequência depende das características da linha de transmissão e da própria carga. A ocorrência do ruído impulsivo assíncrono é mais comum com cargas capacitivas e indutivas encontradas, por exemplo, em equipamentos como reatores de lâmpadas fluorescente e motores, respectivamente.

O ruído colorido (ou *colored noise*) possui uma baixa densidade espectral de potência que diminui com o aumento da frequência. Geralmente, este tipo de ruído ocupa pequenas faixas de frequências no espectro e pode ser variável no tempo. O ruído colorido é formado pelo somatório das fontes de ruído presentes na rede elétrica.

O ruído em banda estreita (ou *narrowband noise*), assim como o ruído colorido, ocupa pequenas faixas de frequências e são caracterizados por estarem presentes na rede elétrica por longos períodos de tempo e variarem durante o dia [18]. Este tipo de ruído é ocasionado, principalmente, pela interferência eletromagnética produzida por estações de transmissão de sinais modulados em amplitude em determinadas faixas de frequências. Existem ainda outras fontes de ruído em banda estreita como os harmônicos gerados pela televisão na frequência de retraço horizontal.

## 2.6 - Resumo e discussão geral do capítulo

Este capítulo abordou alguns dos principais aspectos teóricos sobre a tecnologia PLC relevantes para sua aplicação em *smart grids*. Nestes aspectos foram descritos os circuitos básicos envolvendo uma transmissão PLC, diferentes tipos de modulação e algumas padronizações mais relevantes para a aplicação aqui estudada. Além dos

aspectos teóricos, foram abordadas também outros aspectos como, por exemplo, os modelos de modens PLC comercializados atualmente. Todos estes elementos devem contribuir para um melhor entendimento dos elementos de eletrônica envolvidos no projeto de um circuito *transceiver* PLC que é descrito no Capítulo 3 deste trabalho.

# Capítulo 3

# Metodologia de desenvolvimento do módulo de transmissão

## 3.1 – Requerimentos da tecnologia PLC para sistemas AMI

A tecnologia PLC pode ser utilizada tanto em ambientes internos (*indoor*), quanto em ambientes externos (*outdoor*). No ambiente *indoor* só é possível usar a rede elétrica de baixa tensão para a transmissão de dados, onde são usualmente empregados os sistemas AMI. Por outro lado, no ambiente *outdoor* tem-se à disponibilidade as redes de média e baixa tensão, que utilizam transformadores entre estas redes. Estes transformadores são um problema para transmissão de dados na rede elétrica uma vez que não foram projetados para a transmissão de dados e funcionam como um filtro, atenuando as frequências de transmissão. Por outro lado, para transpor os transformadores são usados módulos de comunicação (ou dispositivos *bypass*) que formam uma ponte entre as redes. Entretanto, aumentam o custo da tecnologia.

Neste trabalho será usado um ambiente *indoor* doméstico para um sistema AMI. Nestes sistemas os vários sensores se comunicam com um painel de controle em uma arquitetura mestre-escravo. O painel de controle é responsável por controlar a comunicação na rede de sensores e por coletar as informações geradas por eles em uma rede HAN (*Home Area Network*). Os módulos de comunicação são responsáveis por enviar as informações dos sensores ao painel de controle. Ainda, sistemas AMI geralmente não exigem uma alta taxa de dados para a comunicação, visto que, a medição, a coleta e a análise de algum parâmetro como consumo de energia elétrica, requer geralmente uma taxa de transmissão na ordem de alguns poucos kilo bits por segundo (kbps). Ainda,

os custos dos módulos de transmissão devem ser os mais baixos possíveis para ajudar a tornar as *smart grids* mais viáveis aos seus usuários finais (que são o foco desta nova abordagem). Por isto, a implantação de uma nova estrutura de cabeamento é descartada e o uso de *hardware* mais sofisticado também deve ser inviável. Em função disto, a rede de dados usará a tecnologia PLC em banda estreita. Em função destas questões, pode-se estabelecer os requerimentos (alguns quantitativos e outros apenas qualitativos) da rede AMI que serão usados para avaliar a pertinência da tecnologia PLC em banda estreita para este tipo de aplicação. São eles:

- *Latência*: como alguns sistemas *smart meters* comerciais enviam mensagens periódicas a cada período de 15 mim, a latência não é fator crucial e não interfere bruscamente na performance do sistema.
- *Confiabilidade*: este item diz respeito a fidelidade da informação como também a possíveis falhas (problemas de *link*, rota, interferências externas, colisões de dados, etc) na rede que podem impedir a comunicação. No que diz respeito a confiabilidade dos dados, a rede deve suportar algum tipo de verificação de dados para identificar dados corrompidos e evitar o processamento de dados errados. O uso de uma técnica de CRC implementada em *hardware* (visando rapidez) de ser suficiente para assegurar a integridade dos dados. No que diz respeito a confiabilidade do enlace, não há necessidade imperativa de prover mecanismo de redundância de dados para superar perdas esporádicas de pacotes uma vez que o sistema deve ser tolerante a perdas. Ainda, o controle de fluxo deve ser feito por um dispositivo mestre da rede que ajuda a coordenar o acesso ao meio de transmissão dos vários elementos da rede.
- *Taxa de transmissão*: a taxa de transmissão está intimamente ligada a quantidade de elementos que fazem parte dela. Espera-se que façam parte da rede um painel de controle e até (no máximo) 99 dispositivos medidores que atuam como escravos ou nós da rede. Se considerarmos um cenário em que tenhamos 99 medidores ativos e cada um deles enviando um pacote de dados (considerando pacotes de 32 bytes em

camada física) a cada 30 segundos, em slots de tempo de 10ms (*i.e.*, usando uma técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo), seria necessário um enlace com capacidade de aproximadamente 1 kbps (foi desconsiderado o fluxo do painel de controle). Ainda, para assegurar capacidade de transmissão de mensagens em *broadcasting*, retransmissão automática de pacotes e *slots* de tempo vazios (para comportar futuras funcionalidades), a rede deve ter uma taxa mínima de 2 kbps.

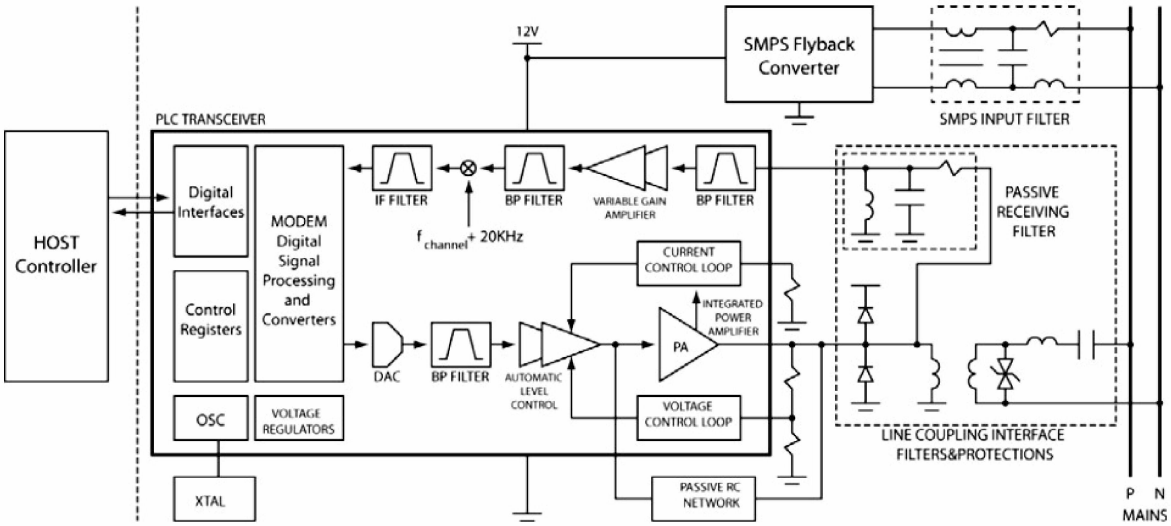
- *Escala*: como considerado anteriormente, a rede deve prover meios para comportar até 99 nós. Por se tratar de ambiente residencial, deve abranger uma área de até 20m de alcance tomando como referência o painel de controle que centraliza e processa as informações obtidas pelos medidores.
- *Segurança*: embora segurança dos dados seja um conceito importante em *smart grids* (principalmente para evitar ataques de *hacker* ou burlar a tarifação inteligente), dentro de um contexto doméstico onde as informações da rede deverão (em um primeiro momento) ser usadas apenas como *feedback* de informações para os usuários, não é prevista nenhuma técnica de criptografia de dados e nem de ataque aos serviços oferecidos pela rede.

## 3.2 – Elementos do módulo de comunicação PLC

Os módulos de comunicação são responsáveis por transmitir informações de um ponto ao outro, bem como, recuperá-las. Contudo, no projeto destes módulos, devem ser considerados todos os problemas relacionados ao canal de comunicação, como distorção, atenuação e dispersão, por exemplo. Se considerarmos a existência de sinais elétricos de potência (frequências harmônicas) que tem amplitude muitas vezes maior do que o próprio sinal de comunicação, a grande presença de ruídos (principalmente o impulsivo), o desequilíbrio de cargas elétricas na rede (que podem causar muita reflexão no sinal), dentre outros fatores de menor relevância, fazem deste canal um ambiente hostil para a transmissão de dados. Como na tecnologia PLC o módulo está diretamente conectado à rede elétrica, distúrbios provenientes da própria rede podem afetar os circuitos de entrada

do módulo de comunicação. Como forma de evitar estes problemas, pode-se utilizar um filtro de acoplamento e um transformador que, associados a alguns componentes de proteção como diodos supressores, devem ser capazes de proteger os circuitos internos de surtos de tensão e distúrbios em geral. A Figura 12 ilustra os principais elementos que deve conter um módulo de comunicação PLC.

Figura 12 - Esquemático de um módulo de comunicação PLC com modulação FSK.




Fonte: Figura retirada de [21].

O filtro de acoplamento é uma interface para a rede elétrica e requer uma resposta em frequência adequada, visto que o sinal de transmissão e recepção trafegam pela rede elétrica. Outro requisito a ser considerado é a impedância, que deve estar de acordo com o padrão CENELEC EN50065-7. Já o acoplador magnético (geralmente um transformador especialmente projetado para trabalhar com as bandas usadas em PLC, como o VAC 5024-X044), além de proteger eletricamente os circuitos internos, possui uma resposta em frequência adequada para a faixa de frequências de interesse, contribuindo tanto na transmissão, quanto na recepção do sinal.

Uma comunicação de dados eficiente implica na máxima transferência de potência do sinal de transmissão para a rede elétrica durante a transmissão. Já no processo de recepção é necessário que a tensão da rede elétrica seja atenuada e o sinal transmitido chegue com uma potência suficiente para que a informação possa ser recuperada. Os

circuitos de acoplamento, juntamente com os filtros de transmissão e recepção, são comumente conhecidos como *analog front end* (AFE).

O filtro de transmissão é responsável por aumentar a potência do sinal modulado, para a inserção na rede elétrica. Para isto é utilizado um amplificador de potência com ganho programável de modo que a potência do sinal injetado na rede possa ser controlado por programação. Além disso, durante o processo de modulação são gerados sinais com frequência múltipla das frequências das portadoras (harmônicos) e para evitar que estes sinais espúrios sejam inseridos na rede elétrica é necessário filtrá-los usando uma realimentação deste amplificador operacional. Um filtro ativo passa-baixa é usada pois permite a passagem do sinal, atenua os harmônicos e amplifica as frequências desejadas.

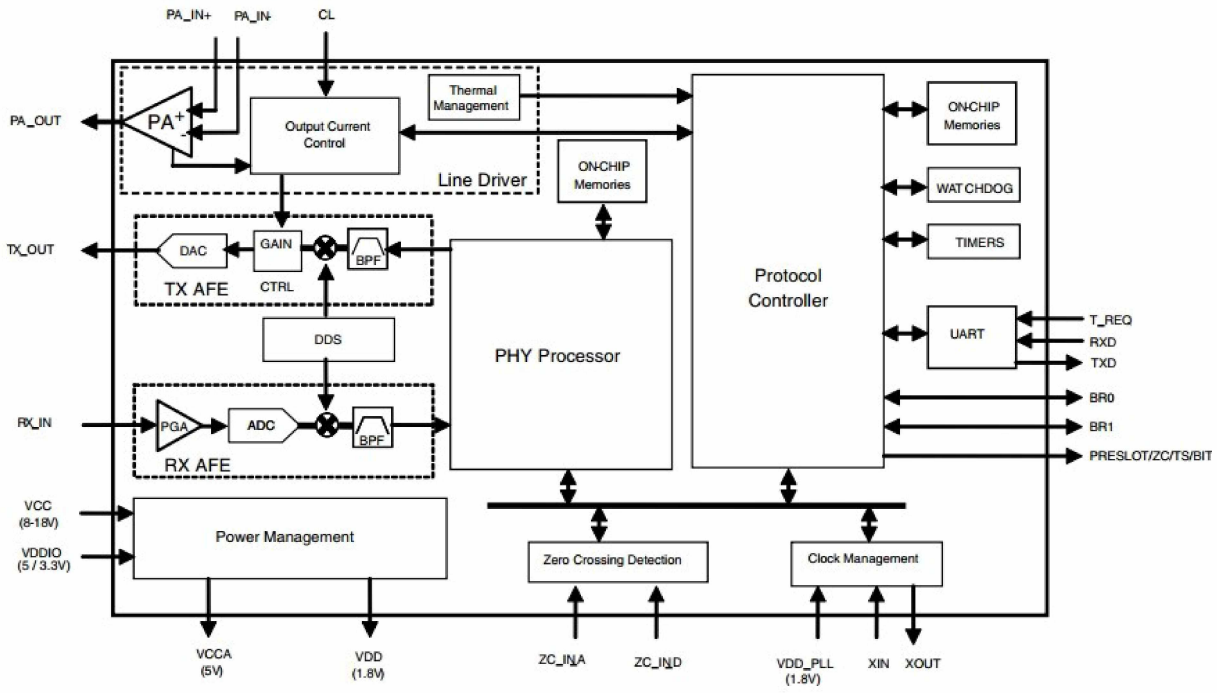
O filtro de recepção deve ter uma resposta em frequência que permita a passagem do sinal de interesse para ser demodulado e a informação transmitida recuperada. Como os dados são transmitidos em uma faixa de frequências em kHz para os sistemas em banda estreita, e em MHz para os sistemas em banda larga, os filtros de recepção devem ser capazes de atenuar todas as frequências fora dessa faixa de interesse. Geralmente, são usados filtros passivos passa-faixa na recepção do sinal.

As funções das camadas superiores são geralmente executadas por um microcontrolador, representado por "Host Controller" na Figura 12. Elas serão tratadas em seções específicas deste capítulo.

## 3.3 – A unidade de modulação e demodulação

A modulação e a demodulação do sinal são realizadas por vários circuitos encapsulados em um mesmo chip (*i. e.*, modem) que auxiliam na geração e recuperação do sinal. Neste trabalho foi usado o circuito integrado ST7570 como opção comercial de modem PLC. Ele emprega a modulação S-FSK (padrão IEC 61334-5-1) na faixa de frequências CENELEC (3 a 148,5 kHz). O diagrama de blocos da Figura 13 ilustra os circuitos internos contidos neste modem.

Figura 13 - Representação dos circuitos internos do modem ST7570.




Fonte: Figura retirada de [17].

Os processos de modulação e de demodulação são realizados pelo AFE, o qual é composto pelas seções “TX AFE” e “RX AFE”. No processo de modulação, os bits passam por um filtro passa-faixa e são somados às frequências das portadoras geradas na seção “DDS”. O sinal então passa por um controlador de ganho e depois por um conversor digital-analógico (DAC), dando origem ao sinal S-FSK. A amplitude do sinal transmitido pode ser programada numa escala de 0 a -32 dB no controlador de ganho. Em 0 dB o sinal não sofre alteração e é transmitido com a maior potência possível. A medida em que se aproxima de -32 dB, sofre uma maior atenuação, diminuindo a potência de transmissão sinal.

O controlador de ganho está diretamente conectado ao circuito do amplificador de potência (*line driver*). Integrado aos circuitos, existe um amplificador de potência altamente linear desenvolvido especialmente para a transmissão do sinal. Este amplificador deve ser usado em um filtro ativo de transmissão para atenuar as harmônicas geradas no processo de modulação. Juntamente com o amplificador de

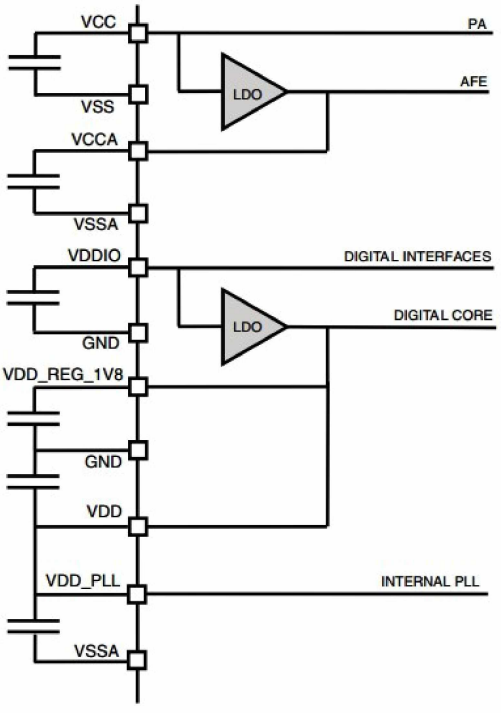
potência, existem sensores de corrente e de temperatura que garantem a integridade do modem caso a corrente elétrica e a temperatura ultrapassem determinados valores.

O processamento do modem é realizado por dois núcleos. Um deles (*PHY processor*) é responsável diretamente pelos processos de modulação e de demodulação. Já o outro (*protocol controller*) é responsável pela comunicação com um microcontrolador externo e implementa o protocolo de comunicação adotado.

A sincronia do modem é conseguida a partir de um circuito PLL (*Phase Locked Loop*) de cruzamento por zero e compensação de atraso. Ele gera uma referência interna através do cruzamento por zero da rede elétrica. Em caso de atraso é possível introduzir uma compensação para que haja sincronia. Além disso, o circuito de gerenciamento de *clock* auxilia no sincronismo e processamento em geral.

Na seção de alimentação o modem é capaz de gerar por meio de vários reguladores, diferentes níveis de tensão para alimentar o circuito. A Figura 14 ilustra a interligação entre as fontes de alimentação.

Figura 14 - Esquema interno da fonte de alimentação do modem ST7570.

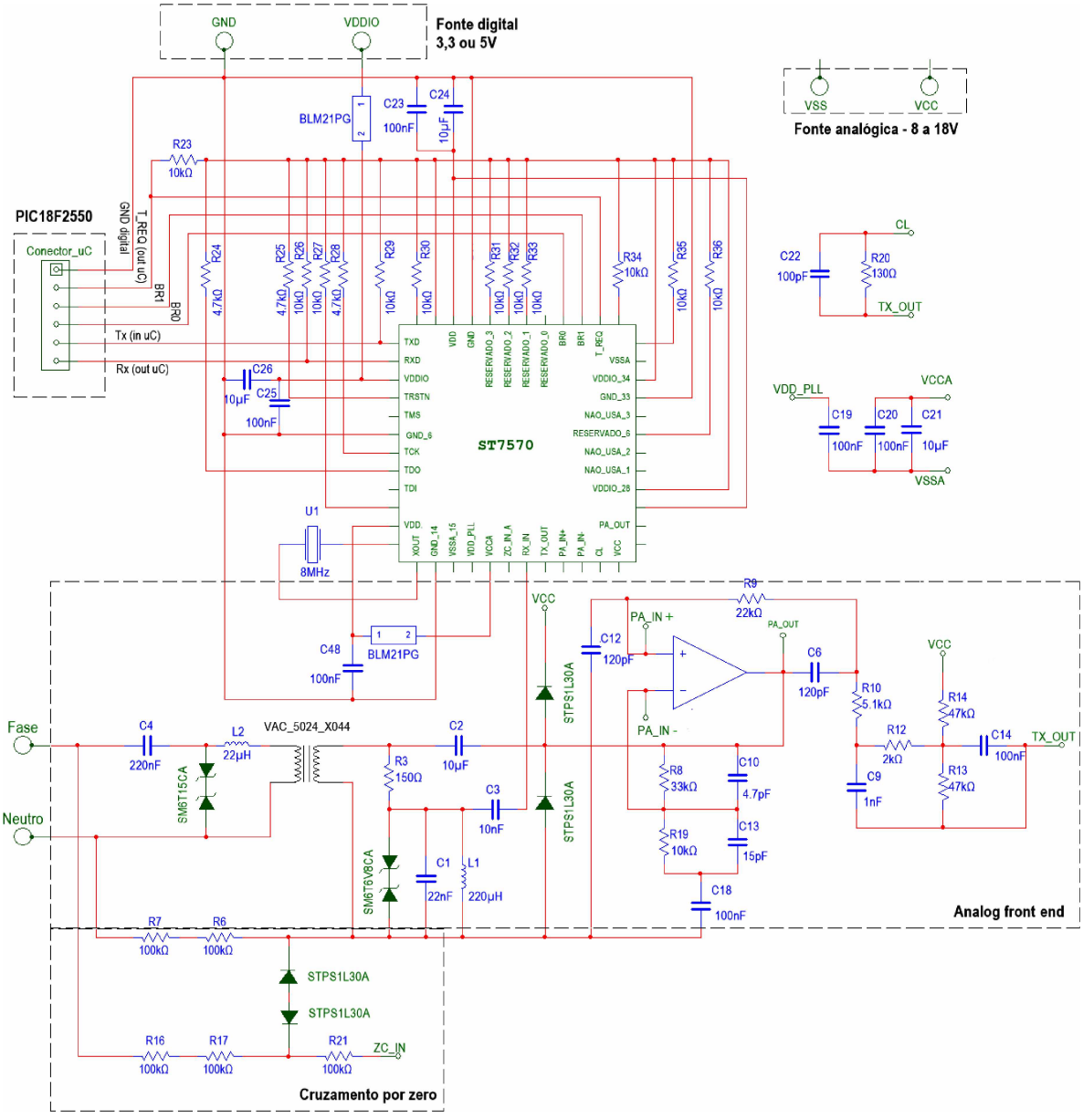



Fonte: Figura retirada de [17].

Basicamente, a alimentação do modem é feita por duas fontes externas: $V_{CC}$ e $V_{DDIO}$. A fonte $V_{CC}$ pode ter um valor de 8 a 18 volts, sendo usada nos circuitos analógicos e no amplificador de potência. Já a fonte $V_{DDIO}$ pode ter um valor de 3,3 ou 5 volts, a qual é usada nos circuitos digitais. A partir de $V_{CC}$ é gerada uma tensão de 5 volts, conectada ao pino $V_{CCA}$, para alimentar o AFE. A partir de $V_{DDIO}$ é também gerada uma tensão de 1,8 Volts para alimentar o núcleo digital e o PLL interno do ST7570.

## 3.4 – O hardware do módulo

Figura 15 - Circuito esquemático do módulo de comunicação PLC usando o modem ST7570.

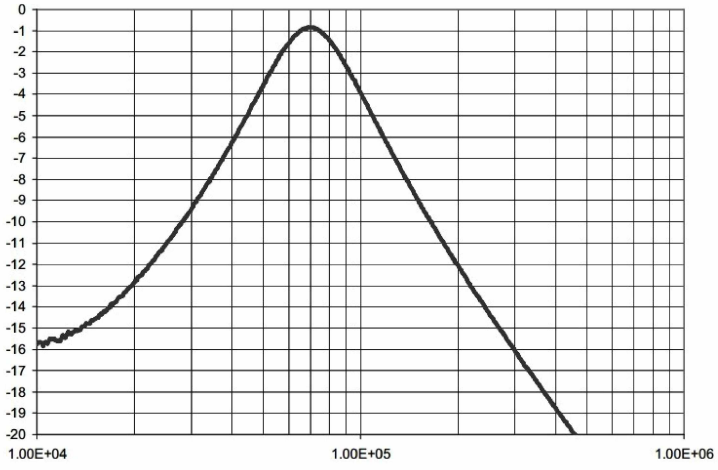



Fonte: O autor.

O módulo de comunicação implementa todos os circuitos mencionados na seção 3.2 – Elementos do módulo. Parte destes elementos está internamente integrada ao ST7570. Já outra parte é executada por um microntrolador, o AFE e os circuitos de interface digital. A Figura 15 representa o circuito eletrônico do módulo. Nele é indicado o AFE onde se pode ver um acoplador magnético (ou melhor dizendo, um transformador) adequado para a faixa de frequências PLC em banda estreita. Como os filtros do AFE foram projetados para trabalhar na banda A do padrão CENELEC (3 a 95 kHz), o acoplador atenua as frequências que estejam fora da faixa de transmissão como, por exemplo, a tensão da rede elétrica de 60 Hz.

O filtro de recepção é formado pelos componentes R14, C13 e L2. Neste caso, as frequências de interesse estão numa faixa próxima de 63,3 a 74 kHz, como mostra a Figura 16. A banda de passagem considerando uma atenuação de 3 dB é de aproximadamente 50 kHz, com a frequência central em 70 kHz. Na recepção, após passar pelo filtro, o sinal entra no pino RX_IN do modem ST7570 para ser demodulado.

Figura 16 - Resposta em frequência do filtro passivo de recepção. O eixo horizontal indica a frequência, em Hertz, e o vertical a atenuação do sinal no filtro em dB.

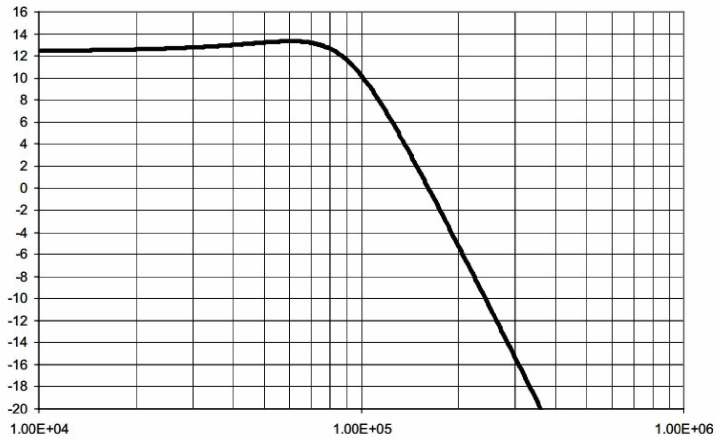



Fonte: Figura retirada de [22].

O filtro de transmissão é projetado a partir do amplificador de potência integrado ao modem. Desta forma, nas frequências de interesse é possível produzir um ganho ao sinal S-FSK que será inserido na rede elétrica. O filtro de transmissão é um passa-baixa

Sallen-Key de três polos composto por dois estágios. No primeiro estágio, tem-se um arranjo RC simples, formado pelos componentes R12 e C9. No segundo estágio, tem-se um filtro passa-baixa Sallen-Key de dois polos, formado pelos componentes R9, R10, C6 e C12. Como o filtro é ativo, existe um ganho na banda de passagem do sinal, como mostra a Figura 17. O ganho na banda de passagem aumenta a potência do sinal de transmissão, que de acordo com a documentação do modem [17], pode alcançar no máximo 14 volts pico a pico e 1 Ampere rms (*root mean square*) de corrente elétrica. Os valores dos componentes foram escolhidos para se ter uma frequência de corte de aproximadamente 125 kHz, que é suficiente para atenuar os harmônicos gerados na modulação.

Figura 17 - Resposta em frequência do filtro ativo de transmissão. O eixo horizontal indica as frequências (em Hertz) e o horizontal o ganho ou atenuação que o filtro impõe a estas frequências (em dB).

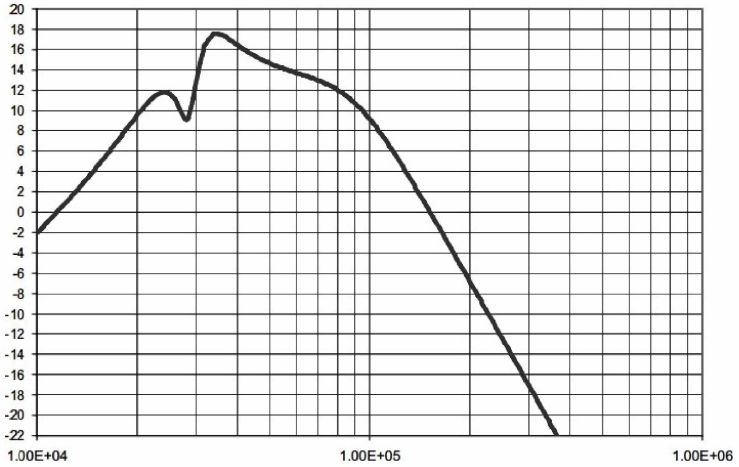



Fonte: Figura retirada de [22].

Ainda tomando por base a Figura 15, o sinal S-FSK é gerado pelo modem, sai pelo pino TX_OUT, e então passa pelo filtro de transmissão onde então está quase pronto para ser injetado na rede. Porém antes disto acontecer, o sinal passa pelo filtro de acoplamento passa-faixa. A Figura 18 mostra a resposta em frequência da combinação entre o filtro de acoplamento e o filtro de transmissão. Nela nota-se o efeito do circuito ressonante do filtro de acoplamento combinado com a resposta em frequência do filtro ativo de transmissão. Além disso, no projeto destes filtros deve se considerar a impedância

vista da linha, de acordo com o padrão EN 50065-1. Geralmente ela está na ordem de 1 a 10 ohms.

Figura 18 - Resposta em frequência da combinação entre filtro de acoplamento e filtro ativo de transmissão. O eixo horizontal indica as frequências (em Hertz) e o horizontal o ganho (ou atenuação) que estes filtros impõem a estas frequências (em dB).




Fonte: Figura retirada de [22].

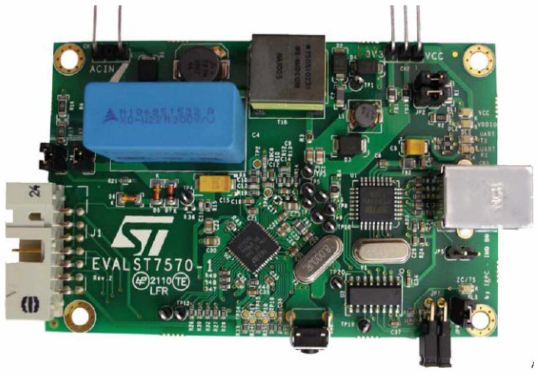
O circuito da Figura 15 também mostra o circuito de detecção de cruzamento por zero. Ele é usado para a sincronia entre os módulos de comunicação usando como referência o sinal de 60 Hz como exemplificou a **Erro! Fonte de referência não ncontrada.**. Além disso, o circuito é alimentado por dois tipos de fontes de alimentação elétrica sendo uma essencialmente empregada para alimentar a interface digital do modem com o microcontrolador (3,3 ou 5 V), e uma segunda essencialmente analógica (na faixa de 8 a 18 V) empregada para alimentar o AFE.

O ST7570 tem uma interface serial (usando o protocolo RS232) que deve ser ligada a um microcontrolador para que este possa indicar quais dados transmitir e como proceder com os dados recebidos. O microcontrolador também é responsável por implementar o protocolo de comunicação com o modem, sua inicialização e configuração. Este microcontrolador também executa as funcionalidades das camadas superiores.

Parte dos elementos do circuito da Figura 15, nisto incluindo o próprio ST7570 e o AFE, são comercialmente disponíveis por alguns fabricantes de circuitos (geralmente os próprios fabricantes do CI, neste caso a STMicroelectronics) para serem utilizados por

projetistas como módulos a fim de auxiliá-los na integração destes CIs aos seus protótipos com maior facilidade e decrementar o tempo de desenvolvimento. A Figura 19 ilustra o módulo que abarca o ST7570 e seu *analog front end* que serão empregados nesta pesquisa.

Figura 19 - Módulo com o ST7570 e seu analog front end comercializado pela própria ST Microelectronics para auxiliar projetistas a prototiparem seus projetos usando suas tecnologias.



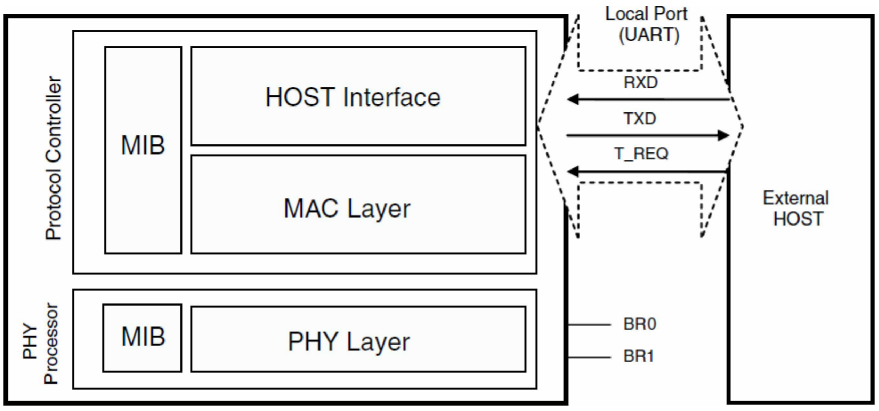

Fonte: ST Microelectronics.

## 3.5 – O protocolo de comunicação e controle do módulo

A comunicação entre os módulos de comunicação, bem como a comunicação entre o microcontrolador e o modem ST7570, são baseados no protocolo IEC 61334-5-1 apresentado na seção 2.3.2 – *IEC 61334-5-1*. Os protocolos e serviços de cada camada definidos por este padrão foram desenvolvidos principalmente para aplicações em sistemas AMI na banda A do padrão CENELEC, mas estendido para outros comandos, aplicações de controle e gerenciamento remoto nas bandas CENELEC B e C.

A comunicação entre o microcontrolador e o circuito integrado é baseada na implementação de algumas funções básicas, que são divididas em partes, similar a uma pilha de protocolos. A Figura 20 representa uma visão geral da comunicação e a pilha de protocolos. As informações necessárias para a configuração, controle e gerenciamento do modem estão disponíveis numa base de dados, chamada de MIB (*Management Information Base*). E a interface de comunicação entre o circuito e um microcontrolador (*host interface*) é responsável por exportar todos os serviços requeridos por meio da porta local (UART - *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).

Figura 20 - Representação dos elementos envolvidos na comunicação entre o modem e o microcontrolador, representado por “External HOST”.




Fonte: Figura retirada de [17].

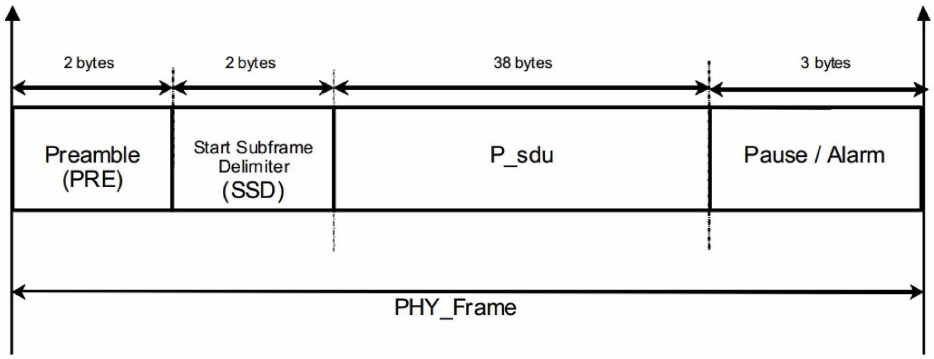
A configuração e o controle do modem é feita por meio de três pinos: RXD, TXD e T_REQ. Em RXD e TXD trafegam as informações e o controle da comunicação é realizado em T_REQ. O microcontrolador escolhido neste projeto para a comunicação com o modem é o PIC18F2550. Ele possui uma porta para comunicação serial com a possibilidade de se utilizar interrupção nos pinos de recepção e transmissão. Além disso, através dos pinos BR0 e BR1 do ST7570, é possível definir a taxa de transmissão na comunicação serial que pode alcançar 57,6 kbps entre este modem e o microcontrolador.

Na camada física, além dos serviços usuais como modulação e sincronia, são implementados alguns serviços adicionais como ganho na recepção (PGA), detecção de fase e falha no cruzamento por zero e estimativa da relação sinal ruído do canal. O quadro nesta camada é composto por 45 bytes, como ilustra a Figura 21. Os campos são divididos da seguinte maneira: 2 bytes de preâmbulo (PRE); 2 bytes de delimitador de início do quadro (SSD); 38 bytes de quadro transmitido pela camada MAC (P_sdu); e 3 bytes de pausa ou alarme.

Os bytes são enviados do byte mais significante para o menos significante, bem como os bits que formam os bytes. O pacote é transmitido em *timeslots*. O início de cada *timeslot* é definido pelo cruzamento por zero da rede elétrica. A cada cruzamento por

zero, o modem pode ser configurado para enviar 12 ou 24 bits. Para uma rede elétrica com frequência de 60 Hz é possível transmitir em uma taxa de até 2880 bps.

Figura 21 - Representação do quadro na camada física do modem ST7570.



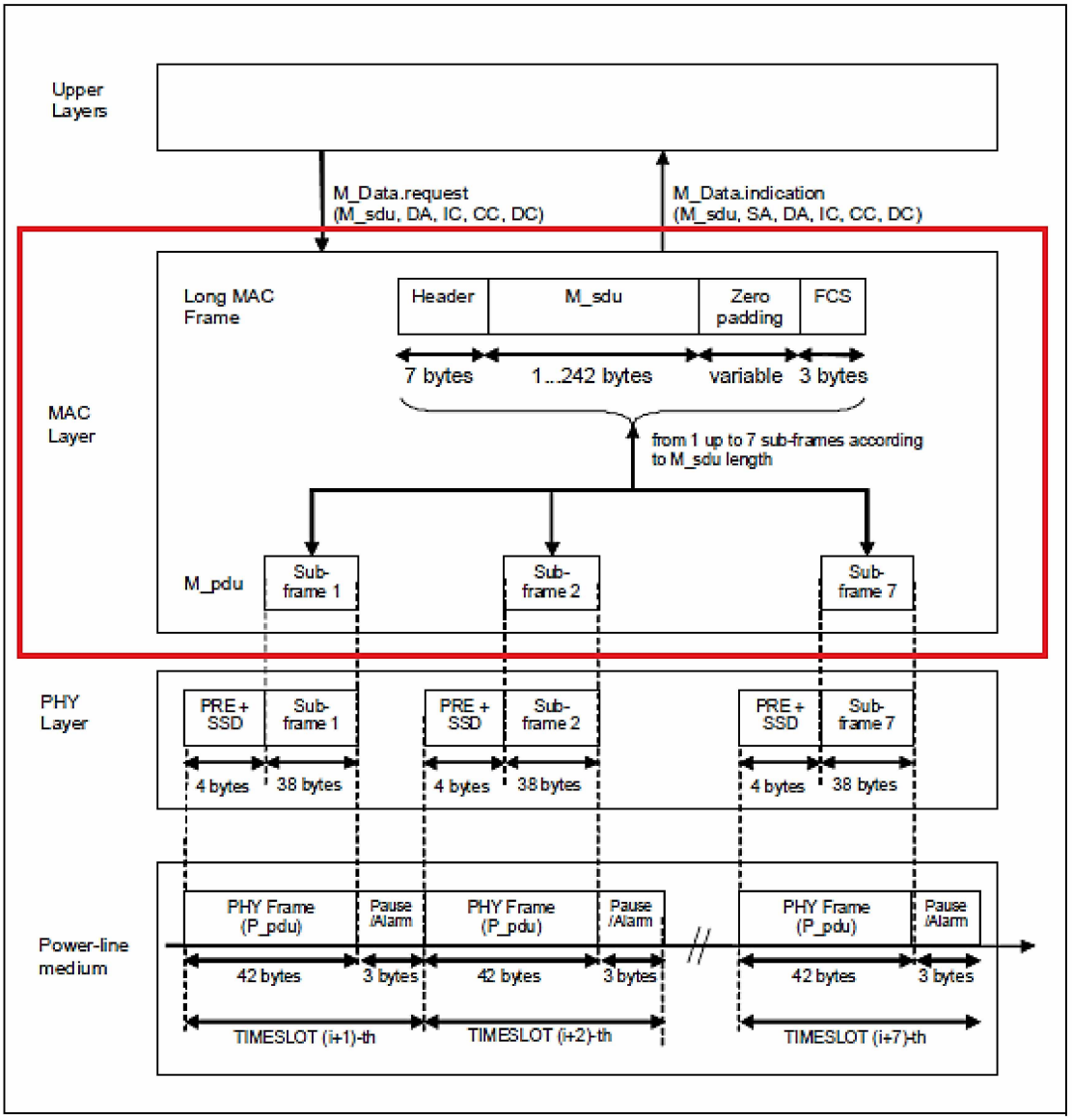

Fonte: Figura retirada de [15].

A camada física suporta os seguintes modos de operação: "Client" (o "mestre" da comunicação) e "Server" (o "escravo" da comunicação), mais os modos de operação adicionais, "Monitor" (usado para facilitar o *debugging* da rede PLC) e "Test" (útil para verificar o nível de interferência eletromagnética de saída do sinal modulado).

A camada de enlace oferece serviços relacionados com a criação de subpacotes, endereçamento dos módulos na rede, verificação de erro de bit e serviços orientados à conexão. Os subpacotes são criados quando a quantidade de dados gerados pela aplicação excede o valor máximo definido pelo protocolo de comunicação. Dessa forma, o pacote é fracionado em subpacotes com o máximo de 38 bytes é repassado à camada física para encapsulamento e transmissão. A Figura 22 mostra como é feito o fracionamento de pacotes na camada de enlace pelo modem.

A comunicação entre três módulos ou mais na rede, impõe que cada módulo possa ser identificado por um número ou endereço. Assim, para que a transmissão de dados se realize de forma eficiente, é necessário identificar para qual módulo será enviado os dados, e ainda, qual módulo está enviando os dados. A camada de enlace é responsável por identificar todos os módulos conectados à rede, e garantir que os dados estão trafegando para o destino correto na rede.

Figura 22 - Representação do processo de subdivisão dos quadros na camada de enlace (MAC) para o encapsulamento e transmissão. Os quadros que excederem 38 bytes são fracionados, encapsulados na camada física e transmitidos em timeslots na rede elétrica.




Fonte: Figura retirada de [15].

Uma forma de identificar se os dados foram corrompidos durante a transmissão é utilizar códigos de verificação de erro. Neste caso, é utilizado um código de redundância cíclica (CRC) de 24 bits. Este código é gerado pelo módulo transmissor e adicionado no cabeçalho, mais especificamente no campo do quadro MAC. No receptor os dados são verificados pelo código recebido, e dessa forma, é possível identificar se houve erro de bit durante a transmissão.

Com respeito à configuração do modem, existem um conjunto de comandos que permitem o acesso aos diversos serviços implementados no modem. Como mencionado anteriormente, a comunicação é realizada na porta UART por meio dos três pinos de comunicação. Basicamente, existem três tipos de pacotes, que são utilizados para acesso aos serviços e estado do modem, além do reconhecimento. O formato do pacote utilizado para acesso aos serviços e configuração do circuito integrado é representado na Figura 23.

Figura 23 - Formato do pacote utilizado para o acesso aos serviços do circuito integrado.




Fonte: Figura retirada de [15].

O pacote contém os seguintes campos:

- STX (1 byte): Delimitador de início do quadro;
- Lenght (1 byte): Soma dos campos “command”, “data” e “checksum”;
- Command code (1 byte): Código do comando;
- Data (0 a 247 bytes): Campo de dados;
- Checksum (2 bytes): Soma de todos os campos, exceto STX.

O campo código de comando é utilizado para requisitar ao modem algum comando. É associado a cada comando um código em hexadecimal. Existem três tipos diferentes de comando:

- Comandos enviados pelo microcontrolador para acesso aos serviços do modem. Exemplo: comandos para configuração de parâmetros do modem;
- Comandos de confirmação/erro enviados pelo modem em resposta a uma requisição de comando. Exemplo: confirmação de recebimento de parâmetros de configuração;

- Comandos de indicação enviados pelo modem para informar o microcontrolador da mudança de serviços; estes comandos não são solicitados, portanto não necessitam de confirmação de recebimento.

O pacote das mensagens de estado contém quatro bytes, preenchido de acordo com o modo de operação selecionado. A sequência dos bytes indicam o estado de alguns parâmetros do modem como modo de operação, estado da sincronia, camada de operação, estado canal, perda de sincronia do cruzamento por zero, dentre outros.

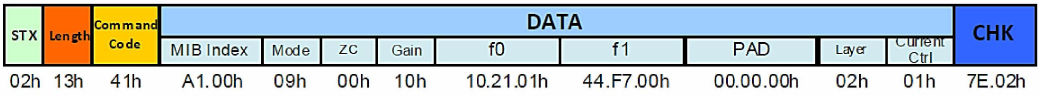
Após a recepção de um quadro, tanto o microcontrolador quanto o modem, devem enviar uma mensagem de reconhecimento (ACK - *Acknowledgement*) e de não reconhecimento (NAK – *Negative-Acknowledgement*). As mensagens possuem um byte de comprimento, sendo o valor 06h para a mensagem ACK e 15h para a mensagem NAK.

## 3.6 – Configuração do modem, transmissão e recepção de dados

A configuração do modem é o primeiro passo para que se realize a transmissão de dados. Pelos pinos RXD e TXD trafegam as informações (pacotes) e o pino T_REQ é responsável pelo controle da comunicação. Após a configuração, o modem está apto a transmitir dados na rede elétrica. A seguir são descritos os processos de configuração, transmissão e recepção de dados.

O primeiro passo para a configuração é definir os principais parâmetros de transmissão, os quais são organizados em pacotes. Os pacotes possuem diversos campos, onde se define em qual camada se deseja transmitir (física ou de enlace), o modo de operação (mestre ou escravo), a frequência de transmissão do bit 1 e do bit 0, a taxa de transmissão, entre outros parâmetros. A Figura 24 exemplifica um pacote de configuração.

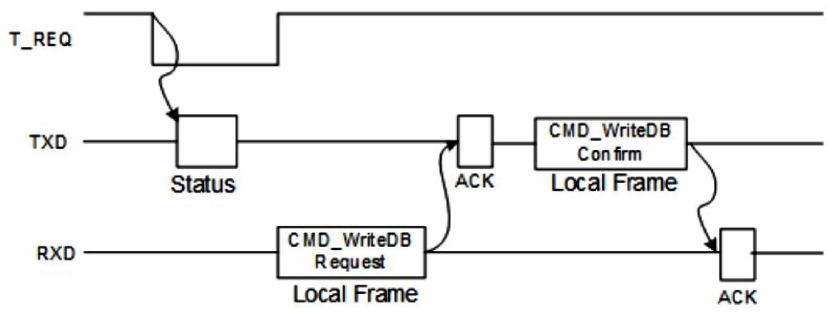
Figura 24 - Representação de um pacote de dados com os campos necessários para comunicação entre o ST7570 e um microcontrolador. Este formato pode variar de acordo com o comando utilizado.




Fonte: Figura retirada de [15].

Após definidos os parâmetros, os pacotes são enviados do microcontrolador para o modem e "escritos" através de comandos específicos (presente no campo "Command Code"). A Figura 25 representa um diagrama temporal da troca de informação entre o modem e o microcontrolador. A configuração se inicia com um pulso de nível baixo no pino T_REQ, que induz uma resposta ("Status") de autorização ao envio do pacote pelo microcontrolador. O pacote então é enviado para o modem pelo comando "CMDWriteDBRequest()". O modem responde com uma mensagem de reconhecimento (ACK) caso o pacote esteja correto, de acordo com a soma de verificação contida no campo "CHK", e logo em seguida envia um outro pacote ("CMDWriteDBConfirm"), semelhante ao representado na Figura 24, para que o microcontrolador verifique se os parâmetros são compatíveis com os parâmetros enviados. Finalmente, o microcontrolador envia um ACK confirmando o recebimento.

Figura 25 - Diagrama temporal que representa a troca de informações entre o circuito integrado e o microcontrolador durante a configuração



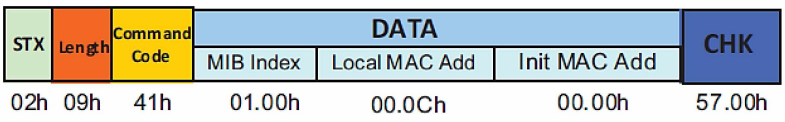

Fonte: Figura retirada de [15].

A implementação deste processo no microcontrolador foi feita em linguagem C e utiliza três pinos para a comunicação. Através da porta RS232 (TXD e RXD) trafegam

as informações e o controle da comunicação (T_REQ) fica a cargo de qualquer pino de saída do microcontrolador.

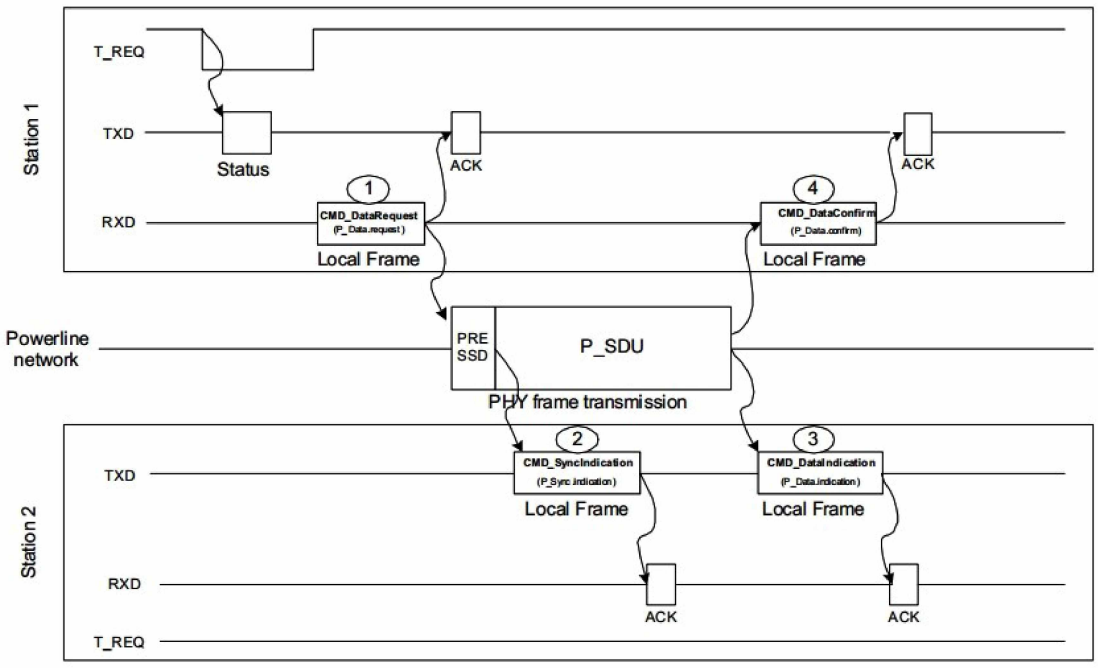
A comunicação entre dois modems através da rede elétrica só é possível se ambos estiverem previamente configurados. O modem permite a transmissão de dados em dois níveis ou camadas, modo PHY (camada física) e modo MAC (camada de enlace). A transmissão no modo PHY é mais simples e não necessita de configuração dos endereços, porém para a transmissão no modo MAC isso se faz necessário. O pacote para a configuração dos endereços é representado na Figura 26. O processo de configuração dos endereços é semelhante ao processo representado no diagrama temporal da Figura 25. Porém, neste caso são incluídos o envio e o reconhecimento dos pacotes de endereço.

Figura 26 - Representação do pacote utilizado para a configuração dos endereços no transmissor.




Fonte: Figura retirada de [15].

Figura 27 - Diagrama temporal do processo de transmissão de dados na rede elétrica. O transmissor é representado pelo “Client” e o receptor pelo “Server”.

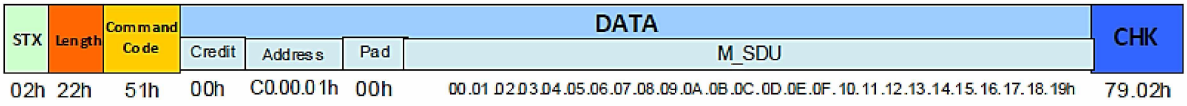



Fonte: Figura retirada de [15].

Após todos os parâmetros de transmissão forem configurados, o modem está apto a transmitir os dados pela rede elétrica. A Figura 27 ilustra o diagrama temporal do processo de transmissão e recepção dos dados.

Os dados de aplicação são inicialmente encapsulados pelo microcontrolador e enviados com o comando "CDM_DataRequest()". A Figura 28 exemplifica um pacote de requisição para a transmissão de dados.

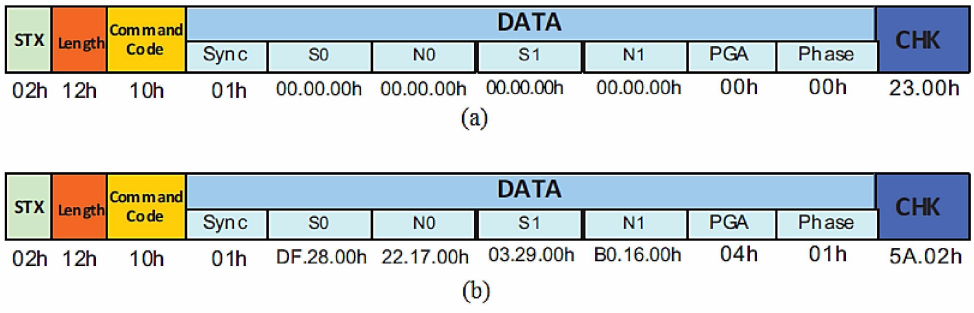
Figura 28 - Representação do pacote utilizado para o envio dos dados de aplicação (M_SDU), para que posteriormente sejam transmitidos na rede elétrica.




Fonte: Figura retirada de [15].

Os dados chegam ao modem e são encapsulados em outro pacote (ver Figura 21), onde as camadas PHY e MAC inserem seus cabeçalhos, formando o pacote de transmissão (MAC *frame transmission*) que será transmitido na rede elétrica. O pacote de transmissão contém ainda o campo PRE+SSD, que indica o *time slot* de sincronização para o receptor ("Server"). Durante a transmissão, é gerado um pacote ("CMD_SyncIndication") que indicam se a sequência PRE+SSD é válida e se a sincronia com a rede elétrica foi alcançada. A Figura 29a ilustra o pacote gerado no transmissor ("Client") e a Figura 29b no receptor ("Server"). Neste caso, é usado o comando "CMD_SynchroIndication()".

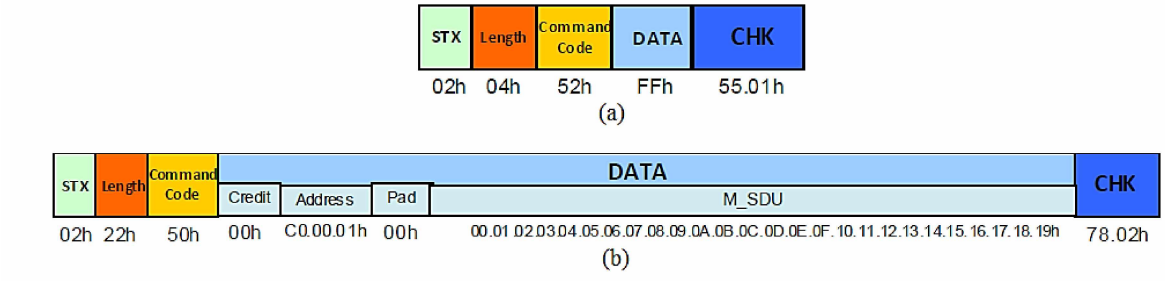
Figura 29 - Representação do pacote gerado pelo modem logo que a sequência de dados é transmitida (a) e recebida (b).




Fonte: Figura retirada de [15].

Até o momento foi descrito o processo de transmissão de dados, que consiste nas etapas de configuração do modem e transmissão dos dados na rede elétrica em si. A recepção ocorre de uma forma mais simplificada. Após configurado, o receptor aguarda a chegada dos pacotes de dados transmitidos. A partir do momento que o pacote de transmissão chega no receptor, são gerados os pacotes "CMD_SyncIndication" e "CMD_DataIndication" pelo modem. O primeiro indica o *time slot* de sincronização com a rede elétrica e o segundo os dados recebidos. Os dados são repassados ao microcontrolador, que os identifica por meio de uma interrupção na porta RS232. Por fim, o pacote "CMD_DataConfirm" indica ao microcontrolador do transmissor que os dados foram transmitidos. Os pacotes gerados nesta etapa estão representados na Figura 30.

Figura 30 - Representação do pacote gerado pelo circuito integrado logo que a sequência de dados termina de ser transmitida ("CMD_DataConfirm") (a) e recebida ("CMD_DataIndication") (b).




Fonte: Figura retirada de [15].

Vale ressaltar que o modem configurado como "Server" só está autorizado a transmitir após receber algum dado do modem configurado como "Client". Dessa forma, o campo PRE+SSD contido no cabeçalho do pacote auxilia na sincronia do transmissor e do receptor. Além disso, o modem é responsável somente por transmitir e receber os dados pela rede elétrica. A interpretação destes dados fica a cargo da camada de aplicação, que pode ser implementada no microcontrolador.

## 3.7 – Testes de comunicação

Para ilustrar o comportamento do circuito em uma transmissão de dados via PLC foram executados alguns testes básicos. Como a medição de alguns parâmetros

de rede frequentemente exigem equipamentos de difícil disposição, foram dados enfoque nos sinais produzidos pelo circuito do módulo PLC e alguns sinais captados na rede elétrica. Com isto foi avaliado no primeiro grupo de testes os sinais (e seus respectivos espectros de frequência) produzidos pelo módulo para se confirmar parte da teoria exposta neste trabalho. Eles também foram usados para verificar a qualidade dos sinais produzidos pelo circuito eletrônico empregado nesta pesquisa.

Um segundo grupo de testes tentou averiguar o desempenho da rede de comunicação PLC. Para isto foi ligado na rede elétrica do laboratório de pesquisas onde esta pesquisa foi realizada dois módulos: um transmissor e outro receptor. A distância entre eles foi mudada e a cada medida foi avaliada a qualidade do sinal (através da estimativa de sua SNR) e a quantidade de bits recuperada corretamente (taxa de erro do canal). Todos estes parâmetros foram avaliados em função da distância entre transmissor e receptor. Foram considerados dois cenários: (i) um onde havia poucos equipamentos elétricos ativos na rede e (ii) um outro cenário onde havia muitos computadores, ventiladores e outros dispositivos eletrônicos ligados à rede elétrica.

## 3.8 - Resumo e discussão geral do capítulo

Este capítulo discutiu os processos envolvidos na montagem de um protótipo de modem PLC em banda estreita. Parte do protótipo empregou um módulo contendo o CI ST7570 que tem várias características desejáveis para sistemas AMI. Este CI é um modem PLC que utiliza modulação S-FSK para transmissão de bits na rede elétrica. Detalhes sobre o circuito do protótipo e do modem foram discutidos além de seu protocolo de funcionamento. O próximo capítulo apresenta o protótipo e os resultados alcançados por ele. A partir disto é discutida a pertinência desta tecnologia PLC tomando como base os requerimentos básicos discutidos no início deste Capítulo 3.

# Capítulo 4

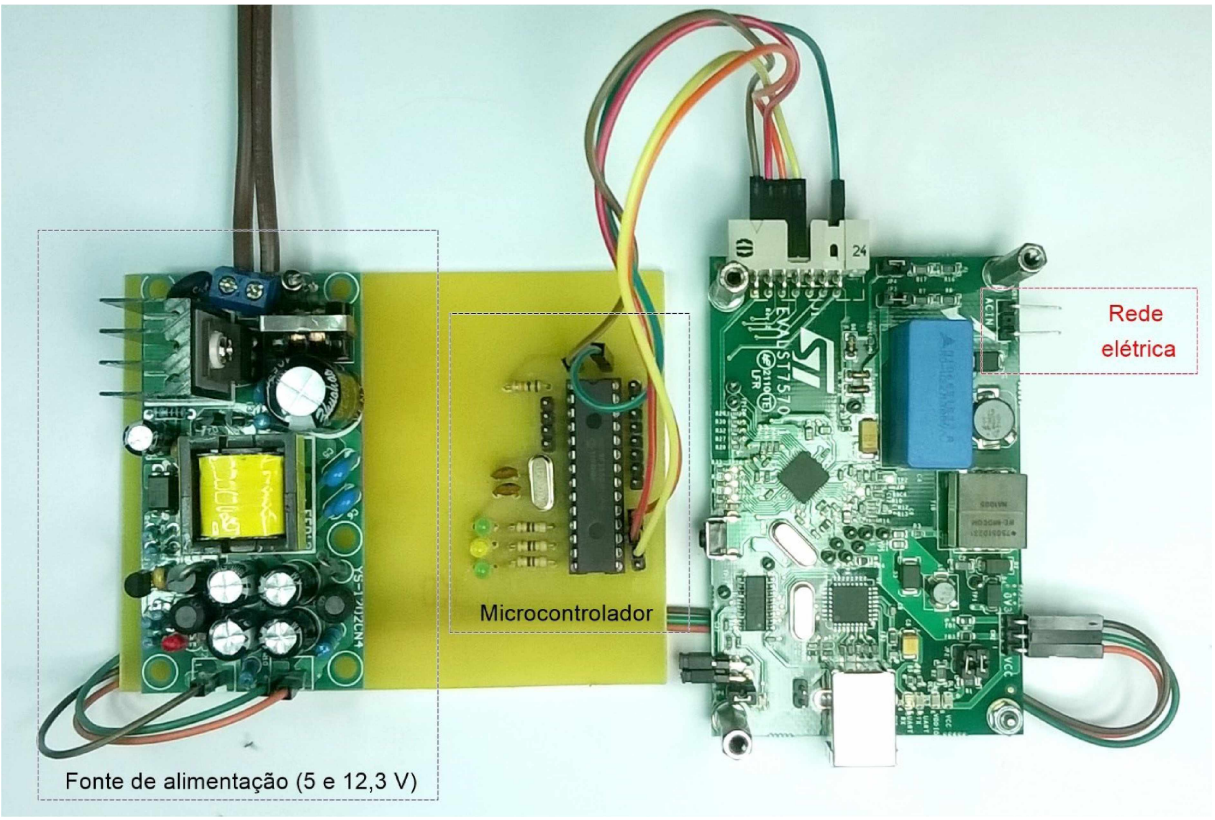
# Resultados e discussão

Os testes a seguir foram feitos usando dois transceptores PLC baseados no projeto descrito no capítulo anterior. Os testes foram executados nas instalações do LaPSE (Laboratório de Processamento de Sinais e Sistemas Embarcados) da UFU. As frequências de transmissão dos bits 1 e 0 dos módulos são de 63,3 kHz e 74 kHz, respectivamente. Estes valores podem ser modificados na faixa de frequências CENELEC. Contudo, os filtros do AFE foram projetados para atuar nestas frequências e por isto elas foram mantidas durante os experimentos. Além disso, durante os testes foi transmitida uma sequência de 304 bits (ou 38 bytes) que se alternam entre 1 e 0 com uma taxa de transmissão de 2,88 kbps.

O módulo é configurado e controlado pelo microcontrolador PIC18F2550 que implementa o protocolo de comunicação descrito na seção 3.5 – O protocolo de comunicação e controle do módulo e as etapas de configuração para a transmissão e recepção dos dados descritas na seção 3.6 – Configuração do modem, transmissão e recepção de dados. A Figura 31 mostra um dos transceptores PLC montados nesta pesquisa. O protótipo é composto por três partes básicas: (i) modem PLC com AFE; (ii) microcontrolador para gerenciamento das informações e (iii) circuitos de alimentação.

Os protótipos foram usados em dois grupos de testes. O primeiro deles consiste na análise do espectro da rede elétrica e dos sinais de transmissão e recepção em alguns pontos do AFE dos módulos. No segundo grupo de testes foi realizada uma análise da qualidade do sinal, a medida em que se varia a distância dos módulos de comunicação. As próximas seções indicam os resultados destes dois grupos de testes.

Figura 31 - Transceptor PLC montado nesta pesquisa a partir do módulo ST7570.

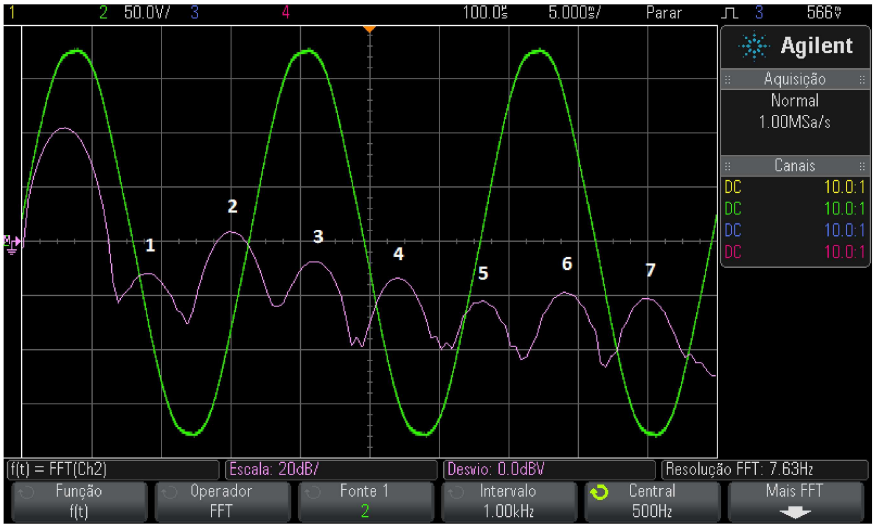



Fonte: O autor.

## 4.1 – Análise dos sinais na rede elétrica

Nestes testes foram feitas análises do espectro de tensão da rede elétrica. Esta análise foi feita por um osciloscópio (Agilent modelo MSO-X 2004) capaz de realizar a FFT dos sinais de entrada. A Figura 32 mostra a forma de onda da tensão da rede elétrica e o correspondente espectro em escala decibel. A análise do espectro revela que a rede elétrica apresenta várias harmônicas em frequências mais altas, algumas numeradas de 1 a 7. Além disso, percebe-se que a amplitude das harmônicas tende a diminuir com o aumento da frequência. As harmônicas são causadas por vários fatores, dentre eles destacam-se os equipamentos conectados à rede elétrica com características indutivas e capacitivas, como motores e fontes chaveadas, respectivamente. Estes equipamentos “infectam” com sinais espúrios a rede elétrica.

Figura 32 - Sinal da rede elétrica (senóide) e o seu espectro de frequência. O espectro é gerado por meio da FFT e está em escala decibel. O primeiro lóbulo está em 60 Hz e tem aproximadamente 43 dB.



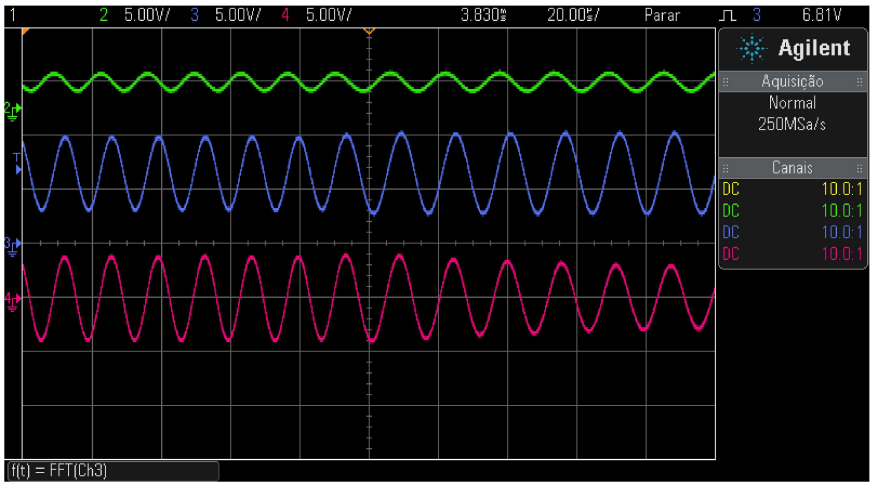

Fonte: O autor.

Os sinais elétricos gerados pelo transceptor PLC foram analisados por meio dos principais pontos para o entendimento do AFE. Usando como referência a Figura 15, foram analisados os pontos do circuito:

- Ponto 1: saída do sinal modulado (pino TX_OUT);
- Ponto 2: saída do amplificador de potência do modem (pino PA_OUT);
- Ponto 3: entre o acoplador magnético e o capacitor C2.

Os sinais do AFE durante a transmissão estão representados na Figura 33. O sinal S-FSK gerado pelo modem sai no ponto 1 (curva superior) com uma tensão de pico a pico de no máximo 2 volts, e um nível DC de 2,5 volts inserido no circuito R13, R14 e C14. A seguir, o sinal é amplificado e sai no ponto 2 (curva situada no meio do gráfico) com aproximadamente 7 volts de pico a pico. Por fim, no ponto 3 é retirado o nível DC no capacitor C2 em série. O sinal passa pelo acoplador magnético e é inserido na rede elétrica (curva inferior).

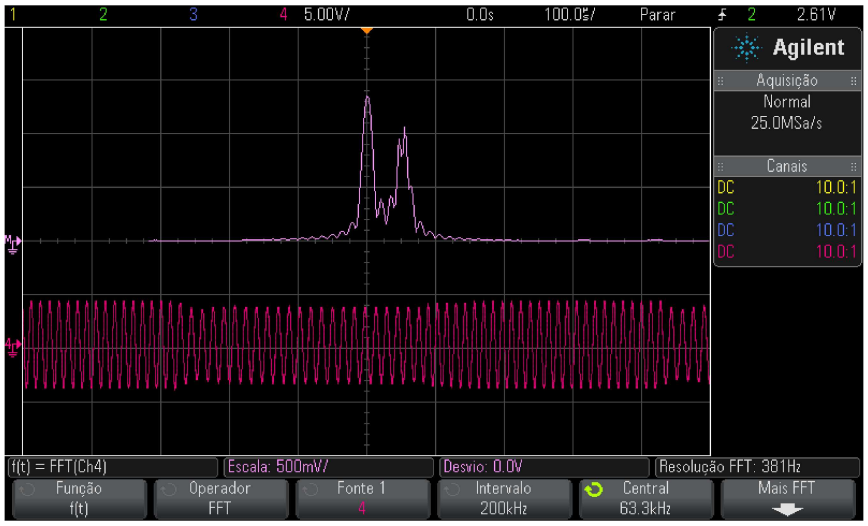
Figura 33 - Sinal S-FSK medido em alguns pontos do módulo durante a transmissão de alguns bits na rede elétrica.




Fonte: O autor.

Na Figura 33 não é possível diferenciar a "olho nu" as frequências de transmissão dos bits 1 e 0. Como forma de confirmar que os bits estão sendo transmitidos em frequências diferentes, foi feito a FFT do sinal no ponto 3. O resultado é mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Espectro de frequência do sinal no ponto 3 do AFE. A escala vertical está em 500 milivots/divisão e o pico do sinal alcança por volta de 1,3 volts.




Fonte: O autor.

A frequência central é de 63,3 kHz, usada para transmitir o bit 1 e é possível notar que existem picos nas frequências superiores, em torno de 74 kHz, que é usada para transmitir o bit 0. Entre estes os picos de 63,3 e 74 kHz, existem componentes de frequência com baixa energia. Estas componentes surgem graças ao fenômeno de

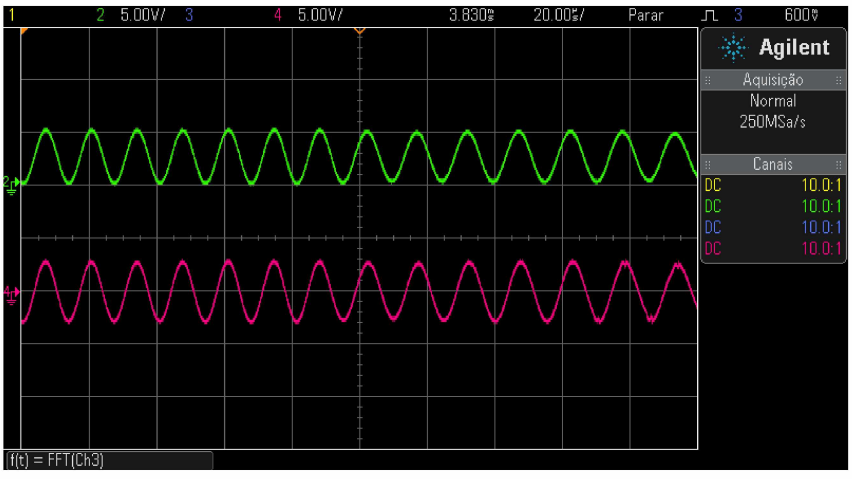
*leakage* [23] causado pelo pela resolução espectral inadequada do equipamento e pelo processo de janelamento retangular do sinal feito pelo *hardware* do osciloscópio. Estas componentes podem ser interpretadas como a soma de algumas energias que "vazaram" da componente de 63,3 e 74 kHz e que quando somadas, produziram um pico.

Durante os testes também foram analisados os sinais no módulo durante a recepção (considerando uma distância medida de 1m entre transmissor e receptor). Os pontos de análise mostram os efeitos dos filtros de recepção sobre o sinal que chega da rede elétrica. Ainda tomando por base o circuito da Figura 15, foram analisados os seguintes pontos do circuito receptor PLC:

- Ponto 1: entrada do sinal filtrado para demodulação (pino RX_IN);
- Ponto 2: entre o acoplador magnético e o capacitor C2.

Os sinais do AFE durante a recepção estão representados na Figura 35. O sinal de recepção chega da rede elétrica, passa pelo filtro de acoplamento com a rede e depois pelo ponto 2 (curva inferior). Neste ponto o sinal de recepção tem uma tensão de pico a pico de no máximo 7 volts.

Figura 35 - Sinal medido em alguns pontos do AFE durante a recepção.

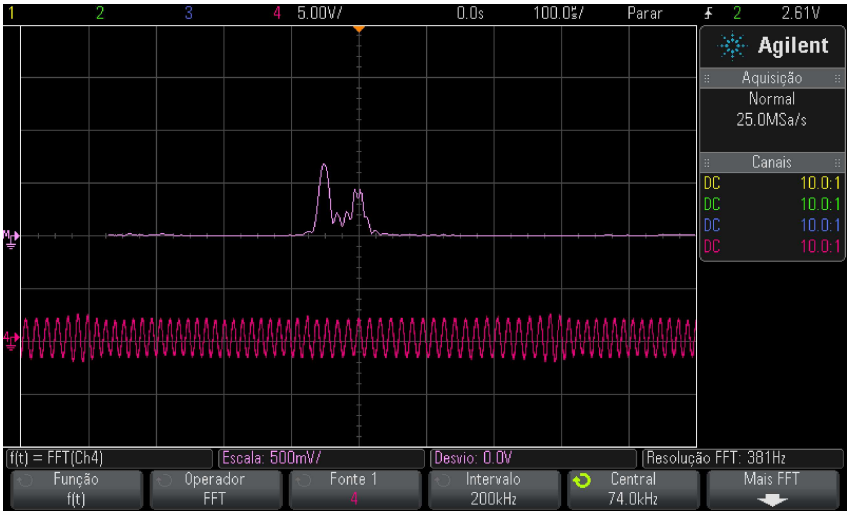



Fonte: O autor.

A seguir o sinal é novamente filtrado, agora no filtro de recepção formado por R3, L1 e C1. Neste ponto o sinal de recepção está pronto para ser demodulado e entra pelo pino RX_IN (curva superior) do modem ST7570. O sinal tem um offset para que as excursões assumam apenas valores positivos e possam ser analisadas para reconstituir a sequência binária reproduzida pela modulação S-FSK.

O espectro do sinal de recepção no ponto 2 está representado na Figura 36. A frequência central é de 74 kHz e da mesma forma que na transmissão, entre 63,3 e 74 kHz, existem componentes de frequência com baixa energia devido ao *leakage*. Contudo, fica claro a recepção dos bits 1 e 0. Observa-se que a amplitude do sinal na recepção é menor que na transmissão. Isso se deve à atenuação do canal e dos filtros de recepção.

Figura 36 - Espectro de frequência do sinal no ponto 1 do AFE. A escala vertical está em 500 milivots/divisão e o pico do sinal alcança por volta de 700 milivolts. A FFT tem resolução de 381 kHz o que pode produzir erros de medição em frequência próximos de 190 kHz.

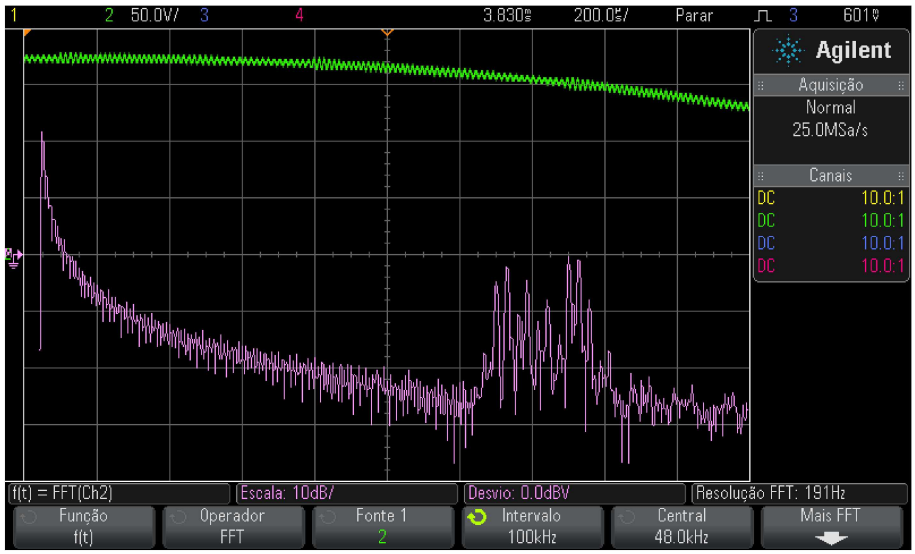



Fonte: O autor.

Por fim, neste primeiro grupo de testes, foi analisado o sinal de transmissão na rede elétrica. A Figura 37 mostra o sinal de transmissão na rede elétrica e o espectro de frequência. Como a frequência de transmissão dos bits é alta em relação à frequência da rede elétrica, foi necessário ampliar a escala no tempo. Dessa forma, é possível notar o sinal de transmissão junto ao sinal da rede elétrica (curva superior). O espectro de

frequência (curva inferior) centrado em 48 kHz mostra as componentes do sinal de transmissão numa faixa de 60 a 75 kHz e o sinal da rede elétrica nas baixas frequências com uma alta energia. Observa-se a grande energia nas frequências próximas de 60 Hz e na faixa próxima de 70 kHz. O gráfico está em escala logarítmica.

Figura 37 - Sinal de transmissão na rede elétrica no domínio do tempo e da frequência. Em torno de 60 Hz existe uma elevada energia proveniente da rede elétrica que decresce com o aumento da frequência. Na faixa de 60 a 75 kHz é possível notar as componentes de frequência do sinal de transmissão.



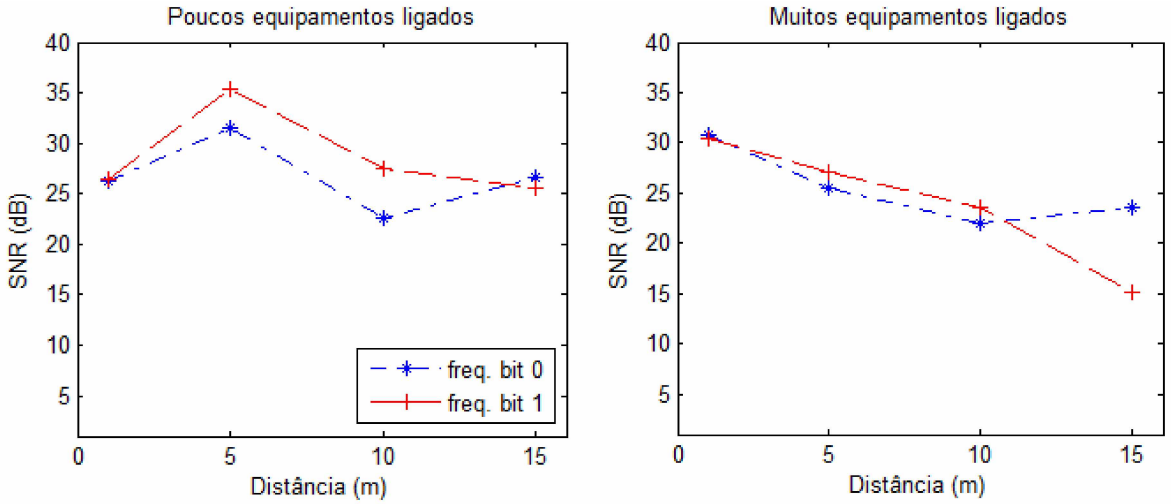

Fonte: O autor.

## 4.2 – Desempenho dos módulos de comunicação

Neste segundo grupo de testes foi avaliado o desempenho dos módulos de comunicação. A distância entre os módulos variou entre os valores de 1m, 5m, 10m e 15 metros. Em cada uma destas distâncias foi medida a qualidade do sinal (através da estimativa de sua SNR) e a quantidade de bits recuperada corretamente (taxa de erro do canal). A estimativa da SNR é feita pelo modem durante a recepção no pino RX_IN. O modem monitora o canal de comunicação, mede o nível de ruído presente nas frequências de transmissão dos bits 1 e 0, e compara com o nível de tensão do sinal transmitido. O resultado é repassado ao microcontrolador durante o processo de recepção juntamente com os dados recebidos. A taxa de erro pode ser encontrada comparando os bits transmitidos e recebidos. Todos estes parâmetros foram avaliados em função da distância entre transmissor e receptor.

Ainda, foram considerados dois cenários: (i) um onde havia poucos equipamentos elétricos ativos na rede e (ii) um outro cenário onde havia muitos computadores, ventiladores, lâmpadas fluorescentes e outros dispositivos eletrônicos ligados à rede elétrica. A Figura 38 mostra os resultados obtidos com relação a SNR. Por ela nota-se que a SNR é diferente para as frequências de transmissão dos bits 1 e 0. Isso mostra a seletividade em frequência do canal, onde o ruído se altera ao longo das frequências.

Figura 38 - Gráfico da SNR para a transmissão do bit 0 e do bit 1 para um cenário de poucos equipamentos conectados à rede elétrica (primeira figura) e de muitos equipamentos conectados (segunda figura). O eixo horizontal indica a distância entre o transmissor e o receptor que foi avaliada em 4 diferentes circunstâncias: 1, 5, 10 e 15 metros. No cenário de 'muitos equipamentos ligado' foram ligados na rede 4 ventiladores de teto, 6 computadores e 10 lâmpadas fluorescentes.




Fonte: O autor.

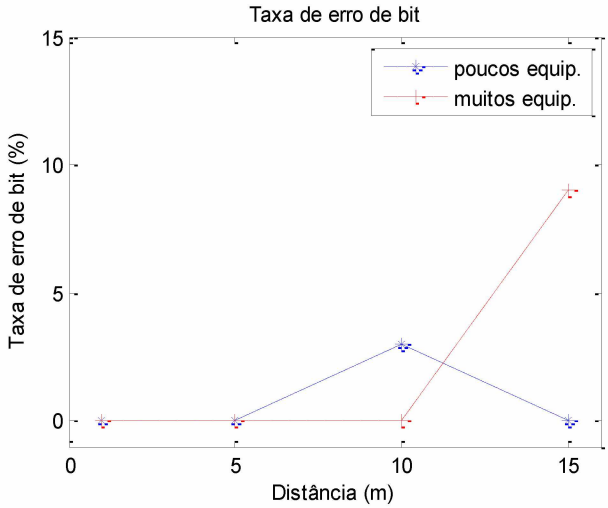
No primeiro cenário (distância de 1m entre transmissor e receptor) a SNR parte de um valor relativamente baixo, próximo a 26 dB, e aumenta quando a distância entre os módulos de comunicação passa a ser 5m no cenário de "poucos equipamentos ligados". Esperava-se que a SNR diminuísse a medida que a distância transmissor-receptor fosse aumentada, o que não aconteceu neste cenário inicialmente. Isto aconteceu porque durante os momentos de teste (onde haviam poucos equipamentos ligado à rede elétrica) as lâmpadas do laboratório (que tem seu acionamento feito automaticamente por sensor de presença) foram acionadas no

cenário de 1m provocando um distúrbio na rede elétrica significativo (uma vez que haviam poucos equipamentos ligados à rede) e influenciando na SNR naquele momento. Com os módulos distanciados em 5 metros isto não acontece e a SNR alcançou 35 dB. Em 10 metros, a SNR apresentou um comportamento esperado, mas em 15 metros houve um comportamento oposto entre as duas frequências de transmissão. Em uma delas a SNR aumentou e na outra a SNR diminuiu. Provavelmente, a seletividade em frequência do canal pode explicar este comportamento para a frequência do bit 0.

No segundo cenário ('muitos equipamentos ligados'), nota-se que a SNR tende a diminuir com o aumento da distância entre os módulos. Como existe uma quantidade maior de equipamentos conectados à rede elétrica, é esperado um maior nível de ruído no canal de transmissão. Assim como no primeiro caso, nota-se uma SNR muito diferente entre as frequências de transmissão na distância de 15 metros. Contudo, neste caso a variação é maior devido principalmente ao aumento do ruído no canal de comunicação.

Outro parâmetro a ser avaliado é a taxa de erros de bit durante a transmissão dos dados. Este parâmetro está diretamente relacionado com a SNR, de forma que, em comunicações com baixa SNR é mais provável o erro de bit. A Figura 39 mostra a taxa de erro de bit dos cenários mostrados anteriormente. No cenário onde haviam poucos equipamentos ligados à rede elétrica, a menor SNR ocorreu em 10 metros de distância e apresentou uma taxa de erro de bit de aproximadamente 3% (8 bits). Já no cenário onde haviam muitos equipamentos conectados, houve aproximadamente 9% (26 bits) de erro de bit na distância de 15 metros. Nos outros casos, a taxa de erro de bit foi nula.

Figura 39 - Gráfico da taxa de erro de bit relacionada com a distância entre os módulos.




Fonte: O autor.

Dentro do contexto da viabilidade financeira do protótipo, estima-se que o mesmo tenha um custo aproximado de R$ 500,00 por *transceiver* PLC. Apesar de haver outras soluções tecnológicas disponíveis comercialmente com taxas de transmissão (bem) mais atrativas, este trabalho focou sua escolha em um componente que privilegiasse a robustez, visando a possibilidade de seu emprego futuro em ambientes industriais. Por isto, privilegiou-se modems que tivessem diversos recursos para garantir que o sinal emitido pudesse ter seus parâmetros controlados (de amplitude de tensão, corrente, frequências de bit, valores de SNR, estimação de potência de ruídos da rede, colisão de dados, etc) para que o transmissor pudesse assumir a flexibilidade de alterar seus parâmetros para se adaptar à rede. A questão de atendimento a padrões e normas também foi muito importante. Neste contexto, o modem ST7570 mostrou-se como a solução tecnológica mais viável embora exigisse um AFE mais complexo e também mais caro o que impactou na viabilidade financeira do protótipo.

# Capítulo 5

# Conclusões e trabalhos futuros

A partir das experiências produzidas nesta pesquisa, que tiveram como foco a análise tecnológica da viabilidade da comunicação PLC (em banda estreita) aplicada ao cenário das *smart grids* (especialmente o de sistemas AMI), foi possível concluir que:

i. a tecnologia PLC é capaz de transmitir, com alguma robustez, uma sequência binária em uma rede elétrica (em um cenário realístico com vários ramais elétricos e sujeito a muitas interferências) em distâncias de até 15 metros sem nenhuma necessidade de repetidores podendo atender os requisitos técnicos básicos de uma rede de sensores para sistemas AMI desde que não haja necessidade de alta taxa de transmissão de dados;

ii. apesar da robustez apresentada pela solução tecnológica empregada aqui (o modem PLC usado apresenta vários recursos para garantir a transmissão de dados na rede como, por exemplo, controle do ganho de potência do sinal), o custo da tecnologia ainda é alto para uma aplicação AMI, uma vez que PLC exige alguns componentes elétricos bem específicos (transformadores, amplificadores de ganho programável, etc) que tem um custo relativamente alto;

iii. a tecnologia PLC é bastante sensível aos ruídos do canal; porém, com as estratégias de controle do sinal emitido, os efeitos destas interferências são amenizadas a ponto de que mesmo com muitas interferências, em todos os testes foi possível a transmissão de dados;

Embora a experiência prática com a tecnologia PLC tenha mostrado que sua viabilidade para sistemas AMI é bastante limitada, vale destacar que ela ainda está em desenvolvimento técnico e que por isto muitas outras soluções devem ser desenvolvidas de modo a baratear seus custos. O fato de não exigir uma nova estrutura de cabeamento é bastante atrativo e por isto encoraja inúmeros pesquisadores a promoverem avanços (tecnológicos) que devem popularizar esta tecnologia.

Ainda, durante o trabalho, foram identificadas várias possibilidades de contribuições para o amadurecimento da tecnologia dentro do escopo deste projeto. Estas oportunidades podem ser vistas como contribuições para trabalhos futuros e dentre elas pode-se destacar:

i. implementação de um novo modelo de AFE usando filtros programáveis e com uso de componentes menos específicos que encarecem o projeto do transceptor;
ii. uso de um modem que utilize uma modulação mais robusta (como o ST7590) e permita maior aproveitamento das frequências do canal, possibilitando uma maior taxa de transmissão de dados;
iii. implementação de nós repetidores de sinal;
iv. implementação de técnicas automáticas de análise de canais por varredura para otimização da transferência e melhoria da qualidade do serviço em camada física.

# Referências bibliográficas


[1] FERREIRA, H. C. et al. **Power Line Communications:** Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines. 1ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2010.

[2] EYRE, B. E. Results of a comprehensive field trial of a United Kingdom customer telemetry system using mainsborne signalling. **Proceedings of the Sixth International Conference on Metering Apparatus and Tariffs for Eletricity Supply**, Londres, 13-16 Abril 1987. 252-6.

[3] GALLI, S.; SCAGLIONE, A.; WANG, Z. For the grid and through the grid - The role of power line communications in the smart grid. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, p. 998-1027, 2011. ISSN 6.

[4] MAJUMDER, A.; CAFFERY, J. J. Power line communications: an overview. **IEEE Potencials**, v. 30, p. 4-13, 2004.

[5] FINK, D.; JEUNG, R. J. Feasible connectivity solutions of PLC for rural and remote areas. **IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications**, Abril 2008. 158-163.

[6] YOUSUF, M. S.; EL-SHAFEI, M. Power Line Communications: An Overview - Part I. **4th International Conference on Innovations in Information Technology**, Dubai, 18-20 Novembro 2007. 218-222.

[7] AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 3, n. 5, p. 34-41, Setembro 2005.

[8] BITTNER, M. et al. **Description of current state-of-the-art technologies and protocols - General overview of state-of-the-art technological alternatives - Task 2.1.0**. The OPEN meter Consortium. [S.l.]. 2009.

[9] NOUVEL, F.; TANGUY, P. What is about future high speed power line communication systems for in-vehicles networks? **7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing**, 2009. 1-6.

[10] BERGER, L. T.; SCHWAGER, A.; ESCUDERO-GARZÁS, J. Power Line Communications for Smart Grid Applications. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 2013, p. 1-16, Dezembro 2012.

[11] EXPLINOVO. Powerline Communication. **Explinovo**. Disponivel em: <http://www.explinovo.com/en/our-business/powerline-communication.html>. Acesso em: 13 Outubro 2015.

[12] LIU, J. et al. **Application of power line communication in smart power consumption**. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2010. p. 303-307.

[13] PAVLIDOU, N. et al. Power line communication: State of the art and future trends. **IEEE Comunications Magazine**, v. 41, n. 4, p. 34-40, Abril 2003.

[14] CENELEC EN 50065 - Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.4 kHz. European Comittee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). Brussels, Bélgica. 2001.

[15] ST MICROELECTRONICS. **UM0934 User manual - ST7570 S-FSK power line networking system-on-chip**. ST Microelectronics. [S.l.], p. 1-113. 2011. (Doc ID 17389 Rev 2).

[16] IEC 61334-5-1 Ed. 2.0:2001, Distribution automation using distribution line carrier systems - Part 5-1: Lower layer profiles - The spread frequency shift keying (S-FSK) profile. International Electrotechnical Commission (IEC). [S.l.]. 2001.

[17] ST MICROELECTRONICS. **ST7570 datasheet, S-FSK power line networking system-on-chip**. ST Microelectronics. [S.l.], p. 1-23. 2012. (Doc ID 17526 Rev 2).

[18] HOOIJEN, O. G. A channel model for the residencial power circuit used as a digital communications medium. **IEEE Transactions on Eletromagnetic Compatibility**, v. 40, p. 331-336, Novembro 1998.

[19] CAVDAR, I. H.; KARADENIZ, E. Measurements of impedance and attenuation at CENELEC bands for power line communications systems. **Sensors**, v. 8, p. 8028-8036, Dezembro 2008.

[20] GÖTZ, M.; RAPP, M.; DOSTERT, K. Power line channel characteristics and their efect on communication system design. **IEEE Communications**, v. 42, n. 4, p. 78-86, Abril 2004.

[21] LOTITO, A. et al. **A complete Narrow-Band Power Line Communication node for AMR**. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Pisa, Itália: [s.n.]. 2007. p. 161-166.

[22] ST MICROELECTRONICS. **AN3213 Application note - ST7570 S-FSK power line networking system-on-chip design guide for AMR**. ST Microelectronics. [S.l.], p. 1-64. 2010. (Doc ID 17429 Rev 1).

[23] LYONS, R. G. **Understanding digital signal processing**. 3ª. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010.

[24] FERREIRA, H. C. et al. **Power line communications:** an overview. 4th IEEE AFRICON. Stellenbosch: [s.n.]. 1996. p. 558-563.

[25] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. A multipath model for the powerline channel. **IEEE Transactions On Communications**, v. 50, n. 4, p. 553-559, Abril 2002.

[26] SUTTERLIN, P.; DOWNEY, W. A power line communication tutorial - Challenges and technologies.

# APÊNDICE A – Linhas de código para configuração e controle do modem ST7570

As linhas de código a seguir foram utilizadas no PIC18F2550 para o controle e configuração do modem ST7570, bem como nos processos de transmissão e recepção dos dados. Como forma de simplificar a implementação, as linhas de código são divididas em duas partes referentes à transmissão e à recepção dos dados. Estes códigos podem ser mesclados para a implementação do *transceiver*.

**Parte I**: Transmissor

```
1   #include <main.h>
2   #include <stdlib.h>
3   #include <stdio.h>
4   #define TAMANHO_BUFFER 60
5
6   void analise(void);
7   void envia_dados(void);
8   void CMD_WriteDBRequest(void);
9   void CMD_DataRequest(void);
10  void verfica_data_confirm(void);
11
12  int1 config = false;
13  int8 buffer[TAMANHO_BUFFER];
14  int8 conta_int = 0;
15  int8 stx = 0b00000010, ack = 0b00000110;
16  int8 f0_1 = 0b00000001, f0_2 = 0b00100001, f0_3 = 0b00010000;
17  int8 f1_1 = 0b00000000, f1_2 = 0b11110111, f1_3 = 0b01000100;
18  int8 length, command, mib_1, mib_2, mode, zc, gain, pad_1, pad_2;
19  int8 pad_3, layer, current, checksum_1, checksum_2;
20  int8 data_01, data_02, data_03, data_04, data_05, data_06, data_07;
21  int8 data_08, data_09, data_10, data_11, data_12, data_13, data_14;
22  int8 data_15, data_16, data_17, data_18, data_19, data_20, data_21;
23  int8 data_22, data_23, data_24, data_25, data_26, data_27, data_28;
24  int8 data_29, data_30, data_31, data_32, data_33, data_34, data_35;
25  int8 data_36, data_37, data_38;
26
27  #INT_RDA
28  void  RDA_isr(void)
29  {
30     buffer[conta_int] = getc();
31     conta_int++;
32     delay_us(150);
33     if(conta_int == TAMANHO_BUFFER)
34        conta_int = 0;
35  }
36
37  void main()
38  {
39     enable_interrupts(INT_RDA);
40     enable_interrupts(GLOBAL);
41
```

```
42      while(TRUE)
43      {
44         delay_ms(1000);
45         analise();
46         envia_dados();
47         delay_ms(3000);
48      }
49   }
50
51   void analise(void)
52   {
53      if(config == false)
54      {
55         output_high(PIN_B7);
56         delay_ms(10);
57         output_low(PIN_B7);
58         delay_ms(10);
59         conta_int = 0;
60         CMD_WriteDBRequest();
61         delay_ms(15);
62         if(conta_int>10)
63         {
64            printf("%c", ack);
65            config = true;
66            conta_int = 0;
67            output_high(PIN_C0);
68         }
69         delay_ms(500);
70      }
71   }
72
73   void envia_dados(void)
74   {
75      if(config)
76      {
77         output_high(PIN_B7);
78         delay_ms(10);
79         output_low(PIN_B7);
80         delay_ms(10);
81         conta_int = 0;
82         CMD_DataRequest();
83         output_high(PIN_C1);
84         delay_ms(500);
85         output_low(PIN_C1);
86      }
87      if(conta_int > 4)
88         verfica_data_confirm();
89   }
90
91   void verfica_data_confirm(void)
92   {
93      int8 index;
94      int1 indexx = false;
95      for(int8 j=0; j<4; j++)
96      {
97         if(buffer[j] == 0b00000010)
98         {
99            index = j;
100           indexx = true;
101        }
102     }
```

```
103
104      if(indexx)
105      {
106         indexx = false;
107         switch(buffer[index+3])
108         {
109            case 0:
110               output_high(PIN_C2);
111               delay_ms(500);
112               output_low(PIN_C2);
113            break;
114            case 4:
115               output_high(PIN_C2);
116               delay_ms(500);
117               output_low(PIN_C2);
118            break;
119         }
120      }
121   }
122
123   void CMD_WriteDBRequest(void)
124   {
125      length = 0b00010011, command = 0b01000001;
126      mib_1 = 0b00000000, mib_2 = 0b10100001;
127      mode = 0b00000001, zc = 0b00001000, gain = 0b00011111;
128      pad_1 = 0b00000000, pad_2 = 0b00000000, pad_3 = 0b00000000;
129      layer = 0b00000001, current = 0b00000001;
130      checksum_1 = 0b00000010, checksum_2 = 0b10001100;
131      printf("%c", stx);
132      delay_us(200);
133      output_high(PIN_C5);
134      printf("%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c", length,
135         command, mib_2, mib_1, mode, zc, gain, f0_3, f0_2, f0_1, f1_3,
136         f1_2, f1_1, pad_3, pad_2, pad_1, layer, current, checksum_2,
137         checksum_1);
138   }
139
140   void CMD_DataRequest(void)
141   {
142      length = 0b00101001, command = 0b01010001;
143      data_01 = 0b00100101, data_02 = 0b00100100, data_03 = 0b00100011;
144      data_04 = 0b00100010, data_05 = 0b00100001, data_06 = 0b00100000;
145      data_07 = 0b00011111, data_08 = 0b00011110, data_09 = 0b00011101;
146      data_10 = 0b00011100, data_11 = 0b00011011, data_12 = 0b00011010;
147      data_13 = 0b00011001, data_14 = 0b00011000, data_15 = 0b00010111;
148      data_16 = 0b00010110, data_17 = 0b00010101, data_18 = 0b00010100;
149      data_19 = 0b00010011, data_20 = 0b00010010, data_21 = 0b00010001;
150      data_22 = 0b00010000, data_23 = 0b00001111, data_24 = 0b00001110;
151      data_25 = 0b00001101, data_26 = 0b00001100, data_27 = 0b00001011;
152      data_28 = 0b00001010, data_29 = 0b00001001, data_30 = 0b00001000;
153      data_31 = 0b00000111, data_32 = 0b00000110, data_33 = 0b00000101;
154      data_34 = 0b00000100, data_35 = 0b00000011, data_36 = 0b00000010;
155      data_37 = 0b00000001, data_38 = 0b00000000;
156      checksum_1 = 0b00000011, checksum_2 = 0b00111001;
157      printf("%c", stx);
158      delay_us(200);
159      output_high(PIN_C5);
160      printf("%c%c", length, command);
161      printf("%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c", data_01,
162         data_02, data_03, data_04, data_05, data_06, data_07, data_08,
163         data_09, data_10, data_11, data_12, data_13, data_14, data_15,
```

```
164         data_16, data_17, data_18, data_19, data_20);
165      printf("%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c", data_21,
166         data_22, data_23, data_24, data_25, data_26, data_27, data_28,
167         data_29, data_30, data_31, data_32, data_33, data_34, data_35,
168         data_36, data_37, data_38, checksum_2, checksum_1);
169   }
```

**Parte II**: Receptor

```
1     #include <main.h>
2     #include <stdlib.h>
3     #include <stdio.h>
4     #define TAMANHO_BUFFER 60
5
6     void configura(void);
7     void CMD_WriteDBRequest(void);
8
9     int1 LED_C2 = false;
10    int1 config = false;
11    int1 dado_recuperado = false;
12    int8 buffer[TAMANHO_BUFFER];
13    int8 dados[TAMANHO_BUFFER];
14    int8 conta_int = 0;
15    int8 stx = 0b00000010, ack = 0b00000110;
16    int8 f0_1 = 0b00000001, f0_2 = 0b00100001, f0_3 = 0b00010000;
17    int8 f1_1 = 0b00000000, f1_2 = 0b11110111, f1_3 = 0b01000100;
18    int8 length, command, mib_1, mib_2, mode, zc, gain, pad_1, pad_2;
19    int8 pad_3, layer, current, checksum_1, checksum_2;
20
21    #INT_RDA
22    void  RDA_isr(void)
23    {
24       buffer[conta_int] = getc();
25
26       if((conta_int == 18))
27       {
28          for(int8 i=0; i<TAMANHO_BUFFER; i++)
29          {
30             dados[i] = buffer[i];
31          }
32          for(int8 ii=0; ii<5; ii++)
33          {
34             if((dados[ii] == 0b00010001) && (dados[ii+1] == 0b00010000))
35             {
36                printf("%c", ack);
37                conta_int = 0;
38             }
39             if((dados[ii] == 0b00110101) && (dados[ii+1] == 0b01010000))
40             {
41                LED_C2 =! LED_C2;
42                output_bit(PIN_C2, LED_C2);
43                dado_recuperado = true;
44             }
45          }
46       }
47
48       if((conta_int == 55) && (dado_recuperado))
49       {
50          dado_recuperado = false;
51          for(int8 j=0; j<TAMANHO_BUFFER; j++)
```

```
52          {
53             dados[j] = buffer[j];
54          }
55          printf("%c", ack);
56       }
57       conta_int++;
58       if(conta_int == TAMANHO_BUFFER)
59          conta_int = 0;
60    }
61
62    void main()
63    {
64       enable_interrupts(INT_RDA);
65       enable_interrupts(GLOBAL);
66
67       while(TRUE)
68       {
69          conta_int = 0;
70          delay_ms(1000);
71          configura();
72          conta_int = 0;
73          delay_ms(4000);
74          conta_int = 0;
75       }
76    }
77
78    void configura(void)
79    {
80       if(config == false)
81       {
82          output_high(PIN_B7);
83          delay_ms(10);
84          output_low(PIN_B7);
85          delay_ms(10);
86          conta_int = 0;
87          CMD_WriteDBRequest();
88          delay_ms(20);
89          if(conta_int>10)
90          {
91             printf("%c", ack);
92             config = true;
93             conta_int = 0;
94             output_high(PIN_C0);
95          }
96          delay_ms(500);
97       }
98    }
99
100   void CMD_WriteDBRequest(void)
101   {
102      length = 0b00010011, command = 0b01000001;
103      mib_1 = 0b00000000, mib_2 = 0b10100001;
104      mode = 0b00000010, zc = 0b00001000, gain = 0b00000000;
105      pad_1 = 0b00000000, pad_2 = 0b00000000, pad_3 = 0b00000000;
106      layer = 0b00000001, current = 0b00000001;
107      checksum_1 = 0b00000010, checksum_2 = 0b01101110;
108      printf("%c", stx);
109      delay_us(200);
110      output_high(PIN_B7);
111      printf("%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c", length,
112         command, mib_2, mib_1, mode, zc, gain, f0_3, f0_2, f0_1, f1_3,
```

```
113         f1_2, f1_1, pad_3, pad_2, pad_1, layer, current, checksum_2,
114         checksum_1);
115 }
```