

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

ESTUDO DE SISTEMAS PLC (POWER LINE COMMUNICATIONS)

DANTE AGUIAR PARENTE

FORTALEZA - CEARÁ
MAIO, 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

ESTUDO DE SISTEMAS PLC (POWER LINE COMMUNICATIONS)

Autor

DANTE AGUIAR PARENTE

Orientador

ELVIO CESAR GIRAUDO

Projeto de Final de Curso submetido à Coordenação do Programa de Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Teleinformática.

FORTALEZA - CEARÁ
MAIO, 2011

RESUMO

O presente trabalho tem como escopo apresentar os conceitos fundamentais acerca da tecnologia de transmissão de dados que utiliza a rede elétrica como meio de transporte, mais comumente conhecida como Power Line Communication (PLC). Primeiramente, é focado o viés econômico por trás do uso dessa tecnologia, qual seja a redução de custos, para em seguida ser abordado uma breve evolução histórica do tema, bem como uma explanação sobre as redes de distribuição de energia elétrica. Realizada essa sucinta contextualização, passa-se para os aspectos técnicos do PLC. Aspectos esses como as topologias em uso atualmente, os modelos de modulação possíveis, as técnicas de acesso múltiplo ao meio, dentre outros. Por fim, é apresentado um estudo detalhado do padrão mais conhecido no setor, o HomePlug, assim como a nova regulamentação do setor no Brasil e estudos de casos envolvendo a tecnologia sob análise.

Palavras-chave: Powerline Communication, PLC, BroadBand over PowerLine, BPL, Rede elétrica, modelo OSI, TDMA, FDMA, CDMA, modulação, OFDM, Spread Spectrum, Códigos de Bloco, Códigos Convolucionais, Códigos Turbo, Homeplug, ANATEL, ANEEL.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. CONSTRUIR NOVAS REDES DE ACESSO	01
1.2. UTILIZAR AS REDES JÁ EXISTENTES	02
2. HISTÓRICO	05
3. COMPREENDENDO A REDE ELÉTRICA	07
4. PROBLEMAS NO USO DO PLC	09
4.1. RUÍDO	09
4.2. ATENUAÇÃO	10
4.3. EFEITO ANTENA	10
4.4. EXISTÊNCIA DE TRANSFORMADORES	10
5. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	12
5.1. TIPOS DE REDE PLC	12
5.2. COMPONENTES DA REDE	13
5.2.1. Injetor	13
5.2.2. Repetidor	13
5.2.3. Extrator	14
5.2.4. Modem	14
5.2.5. Adaptadores	14
5.3. REDE PLC E O MODELO OSI	14
6. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO	17
6.1. SPREAD SPECTRUM	18
6.2. OFDM	20
6.2.1. Geração de sinais OFDM	22
7. CAMADA MAC	24
7.1. MÉTODO DE ACESSO MÚLTIPLO AO MEIO	24
7.1.1. TDMA	25
7.1.2. FDMA	25
7.1.3. CDMA	26
7.2. MÉTODO DE REVESAMENTO	28
7.2.1. Token Passing	29
7.2.2. Polling	29
7.3. MÉTODO DE ACESSO ALEATÓRIO	30
7.3.1. ALOHA	30
7.3.2. CSMA	32

8. MÉTODOS DE CORREÇÃO DE ERROS	33
8.1. ARQ	33
8.2. FEC	34
8.2.1. Códigos de Bloco	35
8.2.2. Códigos Convolucionais	37
8.2.3. Códigos TURBO	41
9. REGULAMENTAÇÃO E PADRONIZAÇÃO	44
9.1. PADRONIZAÇÃO NO MUNDO	44
9.1.1. HomePlug Alliance	44
9.1.2. OPERA	45
9.2. REGULAMENTAÇÃO NO BRASIL	46
10. HOMEPLUG STANDARD	48
10.1. HOMEPLUG 1.0	48
10.2. HOMEPLUG AV	51
10.3. HOMEPLUG GREENPHY	55
11. ANÁLISE DE CASO	56
11.1. ANÁLISE EM REDES DOMÉSTICAS (AMBIENTE INDOOR)	56
11.2. ANÁLISE EM REDES PÚBLICAS (AMBIENTE OUTDOOR)	58
12. CONCLUSÃO	59
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE ABREVIATURAS

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ASK	Amplitude Shift Keying
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BPL	Broadband over Power Line
CDMA	Code Division Multiple Access
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FSK	Frequency Shift Keying
FEC	Forward Error Correction
ICI	InterChannel Interference
ISI	InterSymbolic Interference
ISMA	Inhibit Sense Multiple Access
MAC	Medium Access Control
Mbps	Mega bits per second
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPERA	Open PLC European Research Alliance
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	Power Line Communications
PSC	Physical Sense Carrier
PSK	Phase Shift Keying
RBT	Rede de Média Tensão
RMT	Rede de Baixa Tensão
TDMA	Time Division Multiple Access
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
VSC	Virtual Sense Carrier

LISTA DE FIGURAS

- 1.1. Sistema de comunicação Wireless
- 1.2. Sistema de comunicação de dados pela telefonia fixa
- 1.3. Sistema de comunicação de dados pela rede de TV
- 3.1. Rede de transmissão de energia elétrica
- 3.2. Rede de distribuição próxima ao destinatário
- 4.1. Interferência de outros dispositivos de radiofrequência à rede PLC
- 5.1. Rede PLC indoor
- 5.2. Rede PLC outdoor e seus componentes
- 5.3. Camadas do modelo OSI
- 5.4. Atuação da rede PLC no modelo OSI
- 6.1. Modulação (a) ASK, (b) PSK e (c) FSK
- 6.2. Potência do sinal de entrada, da sequência de redundância e do sinal transmitido
- 6.3. Espectros FDM convencional e OFDM
- 6.4. Subportadoras e seus intervalos de guarda
- 6.5. Geração de sinal OFDM
- 6.6. Característica das subportadoras de serem alocadas em pontos zero das demais
- 6.7. Característica do espaçamento espectral no tempo de quatro subportadoras
- 7.1. União entre as técnicas OFDM e TDMA
- 7.2. Implementação conjunta entre as técnicas FDMA e OFDM
- 7.3. Codificação de sinais em CDMA
- 7.4. Envio simultâneo de sinais e posterior detecção destes
- 7.5. Sistema token passing
- 7.6. Exemplo de colisões entre estações
- 7.7. Uso da técnica slotted ALOHA
- 7.8. Comparação de desempenho ALOHA vs. Slotted ALOHA
- 8.1. Método ARQ de detecção de erro
- 8.2. Codificador Convolutacional (taxa $\frac{1}{2}$, $k=3$)
- 8.3. Diagrama de Estados do Codificador Convolutacional
- 8.4. Diagrama de Treliça
- 8.5. Cálculo das distâncias de Hamming dos dois primeiros passos em Viterbi
- 8.6. Menor caminho de Hamming
- 8.7. Exemplo de codificadores em paralelo na codificação Turbo
- 8.8. Decodificador Turbo
- 8.9. Exemplo de critério MAP para sinais antipodais
- 9.1. Conexão de uma HDTV com a internet via PLC
- 10.1. Formato do Quadro longo
- 10.2. Formato do Quadro curto
- 10.3. Adaptive bit loading e o tone map
- 10.4. Diagrama de blocos de transmissão e recepção no HomePlug AV
- 10.5. Período Beacon

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor de telecomunicações cresceu de modo vertiginoso. A incessante necessidade de comunicação no mundo globalizado fomenta esse desenvolvimento. Do ponto de vista econômico, o crescimento vigoroso de um setor alimenta a perspectiva de lucro sobre ele, perspectiva essa que só se realizará caso seja acompanhada por investimentos neste mesmo setor.

De acordo com Hrasnica, Haidine e Lehnert (2004. p. 01), as companhias, apesar de terem investido bastante em telecomunicações no mundo todo, investiram em redes de transporte que conectam inúmeros provedores, mas que não atingem o usuário final.

Dessa forma, foram criados links de acesso atravessando regiões geográficas imensas, mas que não alcançam o consumidor final, porque na rede de acesso (conexão entre assinante e provedor) não houve o mesmo investimento.

Hrasnica, Haidine e Lehnert (2004. p. 01) afirmam ainda que os investimentos na rede de acesso não foram suficientes devido ao alto custo da operação, cerca de 50% de todo montante para a completa cobertura de uma dada região, pertence a esse tipo de rede.

O Brasil encaixa-se exatamente no modelo dito acima. Apesar de quase todas as cidades brasileiras terem acesso a Internet, a rede mundial de computadores somente alcança cerca de 27% dos lares.

A grande causa desse problema é a chamada “última milha”, ou seja, a conexão torna-se indisponível, por não haver meio físico nas proximidades do usuário (rede de acesso).

Para contornar a falta de infra-estrutura da rede de acesso, surgem duas possibilidades: construir mais redes de acesso ou usar de alguma forma a infra-estrutura já existente.

1.1 CONSTRUIR NOVAS REDES DE ACESSO

Optando pela primeira possibilidade (construir mais rede de acesso), surgem três técnicas de implementação, quais sejam:

- Novos cabos ou rede óptica;
- Sistemas *wireless*;
- Acesso por satélite.

A vantagem do primeiro modelo (novos cabos ou rede óptica) é a velocidade. Hoje, nenhuma meio é capaz de transmitir à velocidade de cabos ópticos. Contudo, há dois grandes empecilhos, o alto custo dos cabos e à dificuldade de montagem em áreas urbanas.

O segundo modelo (sistema *wireless*) atua similarmente a rede de telefonia celular, alocando uma frequência (ou código) para cada usuário, e esses se comunicam com a estação base mais próxima. Diferentemente da rede celular, aqui, os usuários são fixos, melhorando as taxas de transferência de dados.

O sistema *wireless* tem como escopo a facilidade de implementação em grandes cidades, pois não é necessário atravessar todo um assentamento urbano com cabos. Em contra partida, esse modelo possui um alto custo, devido à indispensável montagem de antenas nos prédios dos usuários, bem como nas estações base.

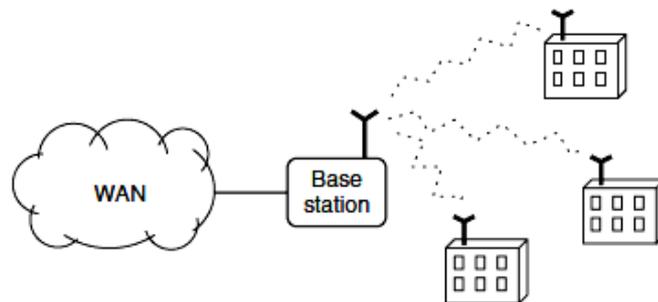


FIGURA 1.1 – Sistema de comunicação Wireless
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

Por fim, a última forma de criar mais rede de acesso é o uso de satélites. Além de tal alternativa possuir a mesma desvantagem do sistema wireless, o custo, soma-se ainda um passado histórico negativo, pois um dos maiores sistemas de telefonia móvel via satélite (o Iridium) faliu devido, entre outros problemas, a baixa qualidade do serviço.

1.2 UTILIZAR AS REDES JÁ EXISTENTES

Ao invés de criar mais redes de acesso, a infra-estrutura já existente pode ser utilizada para conectar o usuário a rede. Três são as formas de alcançar tal desiderato:

- Uso da rede de telefonia fixa;
- Uso da rede de TV a cabo;
- Uso da rede de energia elétrica.

No uso da rede de telefonia fixa para transmissão de dados, o assinante é conectado ao nodo central em uma rede tipo estrela, e este nodo é conectado com o *backbone* da rede. É

uma topologia relativamente simples e barata, pois basta um modem do lado do assinante e outro do lado do nodo central para que a comunicação seja possível.

Entretanto, a rede de telefonia fixa encontra-se presente em apenas 44% das residências brasileiras, percentual esse distante da total completude dos lares nacionais.

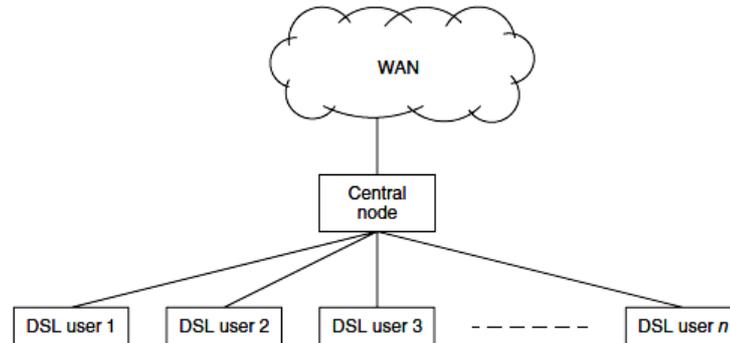


FIGURA 1.2 – Sistema de comunicação de dados pela telefonia fixa
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

A utilização da rede do sistema de TV por assinatura como forma de ampliar a rede de acesso é semelhante ao modelo usado pela telefonia. A única diferença conceitual é que, apesar dela possuir uma taxa de transferência mais elevada, nesta rede de dados, os assinantes compartilham o mesmo meio, tendo assim que partilhar a taxa de transferência. Em razão de tal característica, torna-se um modelo sujeito a maior variação da velocidade de transmissão.

Da mesma forma que o modelo de dados sobre rede telefônica, o uso da rede de TV por assinatura não atende ao propósito de criação de rede de acesso em larga escala, visto que são poucos os assinantes desse tipo de modelo, se comparado ao todo de habitantes do país.

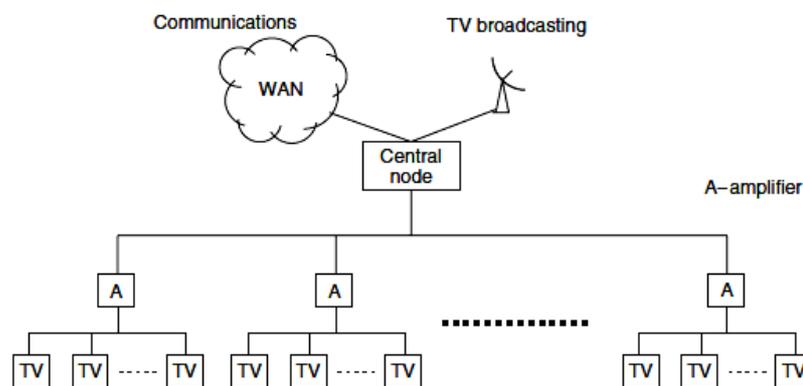


FIGURA 1.3 – Sistema de comunicação de dados pela rede de TV
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

Por último, há a tecnologia Power Line Communication. Ela se propõe a levar uma conexão de dados em banda larga aos domicílios usando como meio de transmissão de sinais a já existente rede elétrica. A rede elétrica, por ter um elevado grau de capilaridade,

alcançando, cerca de, 95% dos lares brasileiros, e por ter a sua estrutura pronta para ser utilizada, torna-se, a priori, um excelente meio de promover a inclusão digital da sociedade brasileira.

A tecnologia Power Line Communication (PLC) assim vem se somar aos já existentes modelos de conexão banda larga, quais sejam, o wireless, satélite, cabo coaxial das redes de TV por assinatura e o ADSL das operadoras telefônicas.

Entretanto, há enormes dificuldades que surgem ao se utilizar a rede elétrica como o meio de transmissão de dados.

É fácil compreender que ao se construir a rede elétrica tal qual foi implementada, em nenhum momento foi visualizado o envio de dados como uma utilidade a mais para ela. Ao invés disso, criaram uma estrutura que fosse a mais adequada para sua finalidade primeira, a transmissão de energia elétrica.

Instalada conforme o modelo atual, a rede elétrica não é o melhor meio para a transmissão de dados em alta velocidade, apresentando problemas graves, principalmente relativos a ruído e interferência.

Os avanços tecnológicos relativos à modulação de sinais, detecção e correção de erro, no entanto, têm gerado soluções eficientes para essa questão, o que possibilitou a tecnologia *powerline* alcançar taxas de transmissão de dados comparáveis a de outras redes de acesso.

No Brasil, a tecnologia ainda dá os seus primeiros passos. O formato indoor, onde apenas a rede local (dentro do mesmo prédio) é empregada como meio de envio de dados, avança lentamente, já sendo possível encontrar fabricantes desses produtos no Brasil (D-link, Netgear e Solimax, por exemplo). Já o formato outdoor ainda encontra-se no estágio inicial, consistindo em objeto de estudos realizados por companhias elétricas ao redor do país. Todavia, com as atuais regulamentações realizadas pela ANATEL e pela ANEEL é de se acreditar que o setor tenha um crescimento mais incisivo com o passar dos anos.

2. HISTÓRICO

A idéia de usar a rede elétrica como meio de transporte de dados não é nova, sua primeira utilização foi realizada em 1838 na Inglaterra. Relata Carcelle (2006, p. 01) que Edward Davy propôs a medição remota de baterias dos medidores de eletricidade de Londres e Liverpool. No entanto, somente em 1897 foi patenteado tal invento.

Em 1950, a tecnologia PLC era mais conhecida como *Ripple Control*. Era por meio dela que as companhias de distribuição de energia elétrica realizava o acionamento automático da iluminação pública, sua portadora possuía frequência na ordem de 100Hz a 1kHz.

Evoluindo, o PLC passou a transmitir dados entre subestações, como observa Faccioni (2008, p. 55):

Inicialmente era chamada de Power Line Carrier e muito usada em redes de alta tensão de 69KV a 500KV pelas concessionárias de energia elétrica para comunicação de voz e dados entre as subestações. Era de baixa velocidade e não ultrapassava os 9,6 Kbps, operando na faixa de frequência de 30 a 400 KHz.

Devido às grandes dificuldades de utilização da rede elétrica como um meio de condução de dados, a Power Line Carrier ficou relegada apenas aos já tradicionais serviços de telemetria, controle remoto e comunicação de voz entre as subestações. Apenas em 1991, com o crescimento vertiginoso das telecomunicações no mundo inteiro, houve uma retomada do interesse pela antiga tecnologia.

A empresa inglesa Norverb Communications iniciou testes visando à comunicação de alta velocidade usando as já existentes linhas de transmissão de energia. Os testes realizados demonstraram a possibilidade do uso dessa tecnologia, apesar dos graves problemas de ruído e interferência.

Não obstante os testes terem começado em 1991, somente em 1997, a Nortel e a Norverb conseguiram acessar a Internet usando a tecnologia em desenvolvimento. Esse foi o marco que demonstrou ao mundo uma nova forma de acesso a rede de computadores, forma essa bastante atrativa, pois possibilitava uma promissora utilização à infra-estrutura já disponível e que já era presente em boa parte dos lares e escritórios de todo mundo.

De acordo com Santos (2008, p. 13):

A partir de então essa tecnologia passou a receber muito destaque, uma vez que as empresas de eletricidade em todo o mundo passaram a querer se tornar também

provedoras de serviços de telecomunicações, utilizando sua infra-estrutura já existente. Com o tempo, foram surgindo comunidades para a discussão da comunicação *PowerLine*, como o PLC Fórum, criado em 1997 na Europa e o *Power Line Telecommunications Fórum* (PLTF), criado em 1998 nos EUA. Em 2000, a *HomePlug Powerline Alliance* surgiu como uma aliança principalmente entre fornecedores, com o objetivo de estabelecer um padrão aberto para a tecnologia PLC de rede domiciliar. Já no Brasil, em 1999 foi criada a Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações (APTEL), que em seu primeiro seminário adotou o tema “Tecnologia *Powerline Communications* (PLC)”.

3. COMPREENDENDO A REDE ELÉTRICA

Para entender o funcionamento do PLC é primordial compreender a rede elétrica.

A energia elétrica é gerada na usina, que consiste basicamente em um gerador elétrico rotativo. Esse gerador pode ser ativado por uma turbina hidráulica de uma hidrelétrica, um grande motor a diesel de uma termoelétrica ou mesmo uma turbina de ar numa usina eólica.

O gerador elétrico rotativo gera a chamada energia trifásica alternada, ou seja, gera três tensões similares, porém defasadas em 120° , uma em relação à outra. Portanto, saem da usina quatro cabos, três de energia e um neutro.

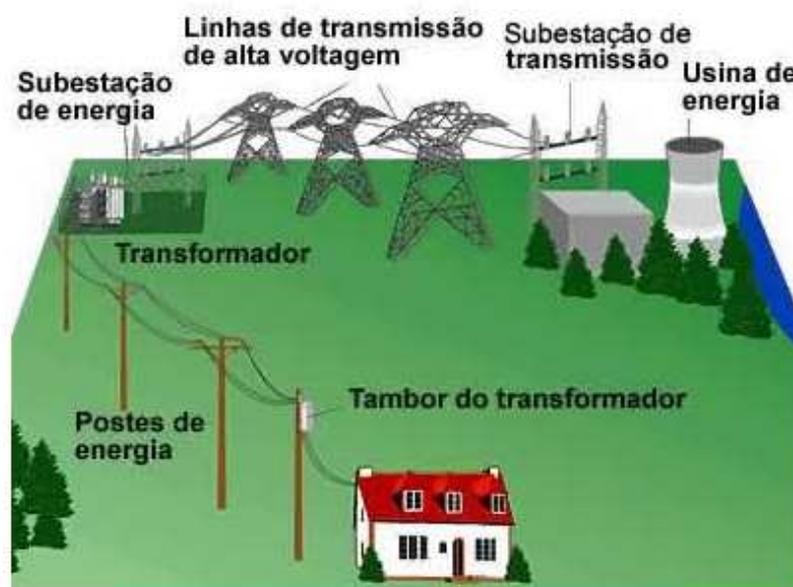


FIGURA 3.1 – Rede de transmissão de energia elétrica.

Fonte: How Stuff Works (www.hsw.com.br).

Após sair da usina, a energia é encaminhada a subestação de transmissão. Nela a tensão de entrada é amplificada (até o patamar de 155 mil a 765 mil volts) por grandes transformadores. Tal etapa tem como objetivo evitar a perda de potência durante a transmissão por longos trajetos, pois os transformadores aumentam a tensão e conseqüentemente baixam a corrente. Com uma corrente elétrica a ser trafegada mais baixa, pode-se utilizar cabos menos grossos (economia financeira) e diminui-se o aquecimento nesses (evitando a perda excessiva de potência).

As linhas de transmissão de alta tensão possuem em geral três cabos, cada um correspondendo a uma fase distinta. Algumas linhas possuem cabos extras (chamados de cabos guarda), sendo eles aterrados e apresentam somente a função de para raios.

As linhas de transmissão finalizam sua rota na subestação de energia. Essa subestação reduz a tensão de saída a patamares entorno de 1 kV e 69 kV para as linhas de transmissão de média tensão (um valor mais comum é de 13,8 kV). São essas linhas que levarão a energia elétrica para dentro das cidades.

Já nas mediações do usuário, ocorre uma nova redução da voltagem. De acordo com o consumo local, a distribuidora aloca transformadores para baixar a tensão ao valor a ser entregue às residências, na ordem de 120 V ou 220 V. São conhecidas como de linhas baixa tensão.

Por fim, na casa do usuário, há um medidor, posto ali com a finalidade aferir o consumo residencial mensal.

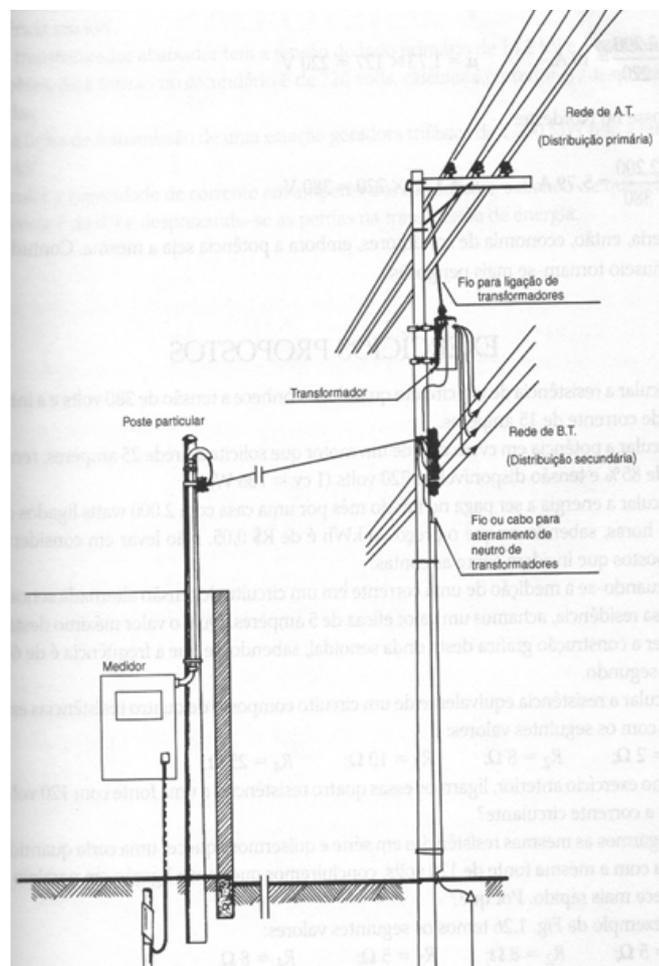


FIGURA 3.2 – Rede de distribuição nas proximidades do destinatário.
Fonte: Portal da Refrigeração (www.refrigeracao.net)

4. PROBLEMAS NO USO DO SISTEMA PLC

Como anteriormente mencionado, o uso da rede elétrica para a transmissão de dados em altas frequências é uma alternativa relativamente barata para as redes de acesso. Todavia, em razão de os cabos elétricos não serem o meio ideal para essa transmissão, uma série de problemas surge, devendo ser contornados para uma comunicação satisfatória.

4.1. RUÍDO

Como os cabos da rede elétrica não são blindados, eles são bastante suscetíveis ao ruído provenientes de várias fontes, de sorte que inúmeros acontecimentos concorrem para o surgimento de ruídos nas linhas de energia.

Primeiramente, existe o fator atmosférico, como os cabos estão continuamente expostos ao ambiente, a incidência contínua de raios solares favorece o aparecimento de ruído. Unido a esse fator, ainda há a probabilidade de descargas elétricas tocarem o solo próximos a rede de energia, criando um tipo de ruído (em rajada) danoso a comunicação.

Em segundo lugar, os picos de corrente ocorridos após o acionamento de algum dispositivo elétrico ligado à própria rede dão azo ao aparecimento de ruídos.

Por último, há a geração de ruído advindo de fontes que emitem radio frequência, como as antenas de radioamador.

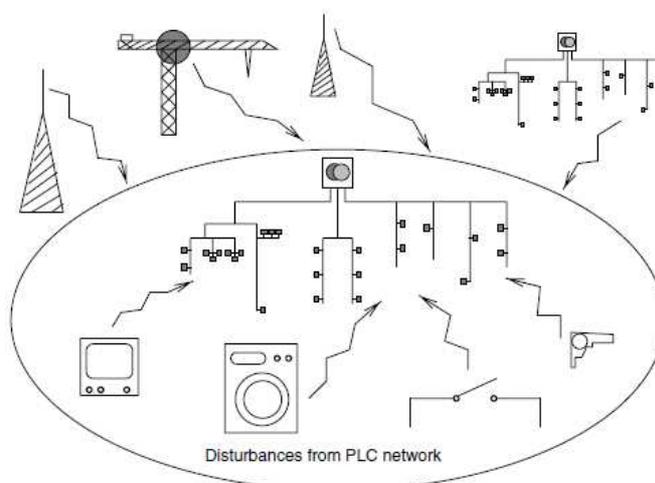


FIGURA 4.1 – Interferência de outros dispositivos de radiofrequência à rede PLC.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks.

4.2. ATENUAÇÃO

Atenuação é a diminuição da força do sinal que ocorre em função da impedância do meio em que esse se propaga.

Nas linhas de transmissão de energia, a distância é maior causa de atenuação do sinal, sendo bastante crítica em longos percursos, o que torna necessário o uso de repetidores para recompor o sinal a ser enviado e assim contornar tal efeito indesejado.

Importante verificar que a atenuação não é uniforme em relação à faixa de frequência, sendo mais crítica em frequências mais altas.

4.3. EFEITO ANTENA

Por transportar altas frequências sem uma blindagem adequada, os cabos da linha de energia poderão comporta-se como antenas.

É cediço que correntes alternadas ao trafegar por condutores criam campos magnéticos (também alternados) ao seu redor, bem como campos elétricos, esses últimos advêm apenas da existência das cargas elétricas. Tais campos podem ser extremamente prejudiciais aos aparelhos de radio-frequência que operam próximo as linhas de energia.

O efeito antena é uma das maiores desvantagens do uso da tecnologia PLC, tendo sofrido severas críticas de diversos ramos da sociedade (como a associação de radio amadores norte-americana) que advogam a vedação a tal tecnologia.

É de ressaltar ainda que a radiação eletromagnética emitida pelo sistema PLC é um dos pontos chave da regulamentação da tecnologia em diversos países.

4.4. EXISTÊNCIA DE TRANSFORMADORES

Os transformadores existem na rede elétrica com o propósito de baixar a tensão das linhas de transmissão, estando sempre presentes entres as linhas de média e baixa tensão.

Ocorre que o transformador é um empecilho para o tráfego de informação em alta velocidade via rede elétrica, pois ele atenua severamente os sinais de alta frequência, podendo ser encarado até mesmo como um circuito aberto.

De acordo com Held (2006, p. 79), só há três formas de prover a comunicação entre as linhas de média e baixa tensão, contornando o problema da existência dos transformadores. A primeira é amplificar em demasia o sinal, de maneira que mesmo a atenuação não seja capaz

de bloquear a passagem do sinal. A segunda é contornar o transformador com o uso de um equipamento especial. Já a terceira, exclui o uso de PLC nas redes de baixa tensão, sugerindo o acoplamento do sinal das redes de média tensão a ponto de acesso *WiFi*, deixando a “última milha” a ser percorrida por uma conexão *wireless*.

Por ser imperativa a inclusão de dispositivos à rede de energia elétrica de forma a permitir o tráfego de dados em alta velocidade, o transformador é uma das grandes empecilhos ao emprego do sistema PLC, em razão de encarecer demasiadamente o projeto.

5. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nessa seção, serão apresentados conceitos técnicos introdutórios da tecnologia PLC, conceitos esses imprescindíveis a sua compreensão.

5.1. TIPOS DE REDE PLC

Há dois tipos de rede PLC em desenvolvimento, a *indoor* e a *outdoor*. A rede *indoor* é bastante simples, ela funciona de forma semelhante às antigas babás eletrônicas, ou seja, um dispositivo envia dados e outro os recebe, tudo via rede elétrica do próprio prédio. Nesse modelo de conexão, não há troca de dados com o meio externo.

A tecnologia PLC *indoor* tem como principal destinação os prédios antigos que sejam de difícil cabeamento. A tecnologia *wireless* por ter chegado ao mercado antes da PLC *indoor*, e por ter ganhado mercado rapidamente, obtendo assim uma diminuição significativa nos preços de seus equipamentos, tornou-se o maior empecilho a difusão do PLC *indoor*.

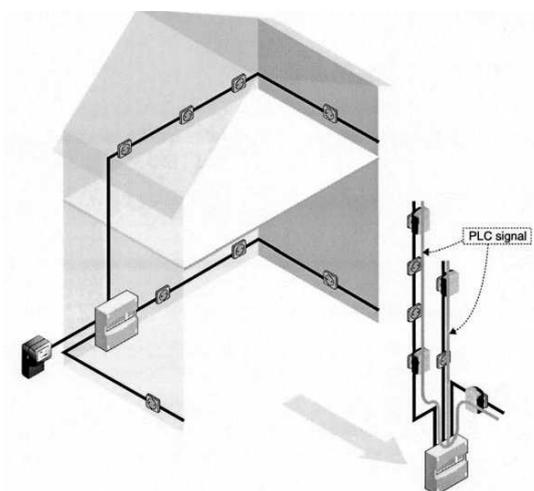


FIGURA 5.1 – Rede PLC indoor.
Fonte: Power Line Communications in Practice.

De maneira oposta, temos a rede *outdoor*. Nesse modelo, a informação circula via a rede pública elétrica. O sistema PLC pode se utilizar das redes de média e baixa tensão para comunicar o usuário com a rede mundial de computadores. É nesta topologia que o PLC promete ser revolucionária.

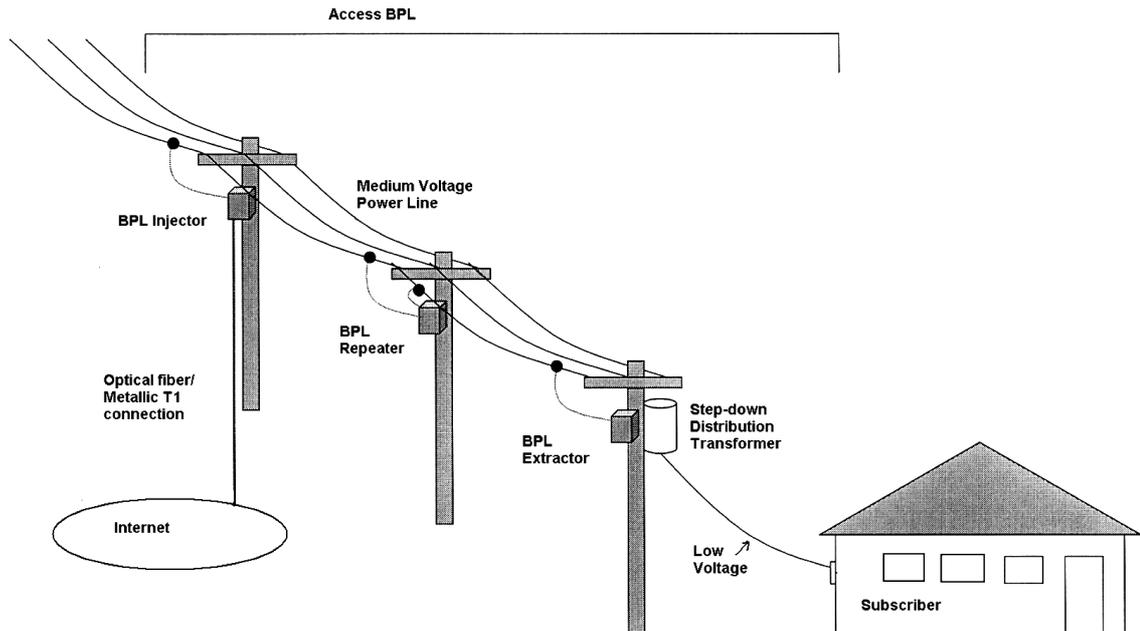


FIGURA 5.2 – Rede PLC outdoor e seus componentes.

Fonte: Understanding broadband over power line

5.2. COMPONENTES DA REDE

A seguir, são listados os principais dispositivos que compõem uma rede PLC. Importante ressaltar que dependendo do desenho da rede, alguns aparelhos podem, ou não, estarem presentes.

5.2.1. Injetor

O injetor (ou estação base) é o dispositivo cuja finalidade é fazer a conexão entre a rede elétrica e a Internet. Para isso, ele pode ser resumido com um modem que, ora modula a informação advinda de um cabo de fibra óptica e a insere na rede elétrica, ora demodula o sinal PLC em dados digitais e o insere no mesmo cabo de fibra óptica.

Dependendo da necessidade da rede, pode ser alocado tanto na rede de média tensão como na de baixa tensão.

5.2.2. Repetidor

Como os cabos da rede elétrica não são apropriados para a comunicação de dados em alta velocidade, surgem alguns empecilhos. O ruído e o desvanecimento do sinal, *e.g.*, podem ser enfrentados pelo uso de repetidores de sinal. Desse modo, o propósito do repetidor é claramente amplificar e estabilizar o sinal, para que esse possa trafegar nas redes de média ou baixa tensão.

Calcula-se que o repetidor deve ser instalado a cada 300 – 500 metros para uma comunicação confiável.

5.2.3. Extrator

É o equipamento responsável por extrair o sinal da rede de média tensão e injetá-lo na rede de baixa tensão de modo a contornar o transformador de MT/BT. Para isso o extrator encontra-se localizado ao lado do transformador.

O extrator pode conter em si um repetidor, para reforçar o sinal que tráfegará nas linhas de baixa tensão. Dependendo de como será construída a rede PLC, pode o extrator possuir ainda uma placa *WiFi* possibilitando o acesso aos usuários de rede *wireless* próximos ao extrator. Nessa configuração, a rede PLC seria apenas a forma de entrega do sinal à rede *wireless*, e essa tecnologia se ocuparia da função de percorrer a “última milha”.

5.2.4. Modem

O modem é o equipamento que conecta o assinante diretamente com a rede, possuindo de um lado uma entrada/saída USB ou Ethernet e do outro lado um conector com a rede elétrica. A conexão com a rede elétrica deve ser realizada de modo a funcionar como um filtro passa-alta, separando assim a frequência de comunicação com a de transmissão de energia.

O modem PLC deve vir equipado com as funções de modulação e codificação.

5.2.5. Adaptadores

Presentes em redes PLC indoor, os adaptadores *powerline* são dispositivos que conectam diferentes aparelhos via rede elétrica doméstica.

5.3. PLC E MODELO OSI

O intercâmbio de informações entre usuários é uma tarefa complexa. A grande variedade de dispositivos envolvidos e tecnologias de transmissão empregados na comunicação poderiam inviabilizar a comunicação, caso não houvesse uma padronização.

Em decorrência desse fato, foi criada uma padronização universal que organiza a comunicação em camadas hierarquizadas. Tal modelo foi batizado de OSI (*Open Systems Interconnection*). Basicamente, o modelo OSI consiste em sete camadas, onde a camada mais elevada significa um maior nível de abstração do que aquela inferior.

- Camada 1 – É a camada física que se preocupa com o envio de bits (ou símbolos) pelo meio escolhido, incluindo as considerações físicas do meio (elétrica e mecânica), a codificação, a sincronização e a modulação.
- Camada 2 – Já a camada de enlace pode ser subdividida em duas outras: a MAC (*Medium Access Control*), mais baixa, e a LLC (*Logical Link Control*), mais alta. A camada MAC comanda o controle de acesso ao canal, a qualidade de serviço e a segurança. A LLC, por sua vez, responsabiliza-se pela detecção de erro e pelo controle do fluxo de dados.
- Camada 3 – A camada de rede ocupa-se da função de endereçamento de pacotes para que estes cheguem ao destino, bem como de roteamento desses, ou seja, determinar a rota que os pacotes devem seguir de acordo condições de tráfego e prioridades. O protocolo IP pertence a essa camada.
- Camada 4 – A camada de transporte é responsável pela conversão dos dados provenientes da camada de sessão em pacotes menores. Que serão repassados à camada de rede. É essa camada que define se o serviço será, ou não, orientado a conexão. Serviços orientados a conexão usam o protocolo TCP e têm um melhor controle de erro. O serviço não orientado a conexão usa o protocolo UDP e relega o controle de erro às camadas inferiores, diminuindo assim o *overhead*. Entretanto, o UDP torna a comunicação menos confiável.
- Camada 5 – A camada de sessão controla a comunicação entre os dispositivos, colocando marcações nos dados com o desiderato de, havendo uma falha na rede, a comunicação retorne do momento em que essa falha ocorreu.
- Camada 6 – A camada de apresentação converte os dados advindos da camada de aplicação em formatos prontos para a transmissão. Nesta etapa é comum a compressão de dados, o que acelera comunicação.
- Camada 7 – Por fim, a camada de aplicação provê a interação com o usuário.

A quarta camada (camada de transporte) separa as chamadas camadas de aplicação, mais próximas do usuário e por isso, responsáveis pelas aplicações de comunicação, das camadas de transporte, mais distantes do usuário e que são responsáveis pela transmissão da informação.

Assim, para que a informação transmitida por um usuário percorra todo o trajeto, desde o modem PLC do transmissor até o modem do receptor, deve este dado, atravessar também todas as camadas do modelo OSI anteriormente expostas.

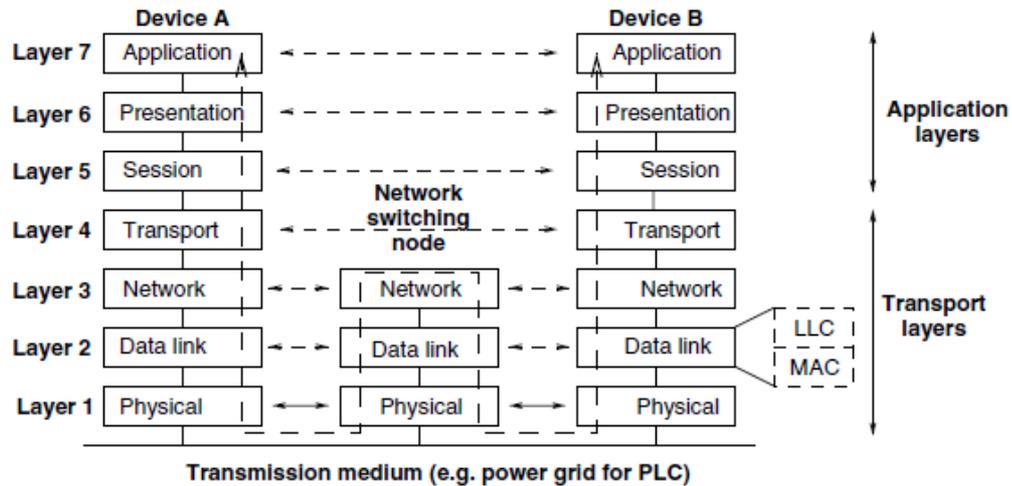


FIGURA 5.3 – Camadas do modelo OSI.

Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

É cediço, que a rede PLC realiza o tráfego de dados pela rede elétrica (camada 1), porém essa tecnologia implementa ainda acesso múltiplo ao canal e emprega detecção e correção de erros, estratégias inerentes à camada 2. Portanto, pode-se afirmar, com base na lição de Hrasnica, Haidine, Lehnert (2004, p. 82) que a interface específica do PLC inclui as duas primeiras camadas da rede.

No entanto, a camada 3 (camada de rede) é imprescindível para a tecnologia PLC, pois é ela a responsável pela interconexão entre a rede PLC e as outras redes de comunicação.

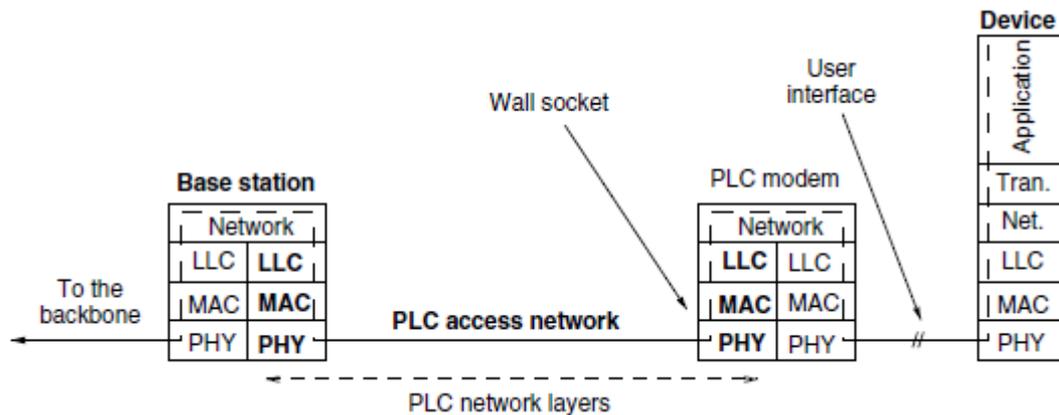


FIGURA 5.4 – Atuação da rede PLC no modelo OSI.

Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

6. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO

A modulação representa o processo onde uma onda portadora tem por modificada uma de suas características (amplitude, frequência ou fase), visando à transmissão de informação.

Os sistemas modernos de comunicação utilizam a modulação digital como forma de transmitir dados, sendo a grande vantagem desse modelo sobre a modulação analógica, sua maior confiabilidade e a possibilidade de alcançar maiores taxas de transmissão.

Os três exemplos mais comuns de modulação digital são a modulação por chaveamento de amplitude, chaveamento de fase e chaveamento de frequência. Emprega-se o termo chaveamento, em virtude de a portadora “chavear” (alterar) a sua característica de acordo com o símbolo a ser transmitido.

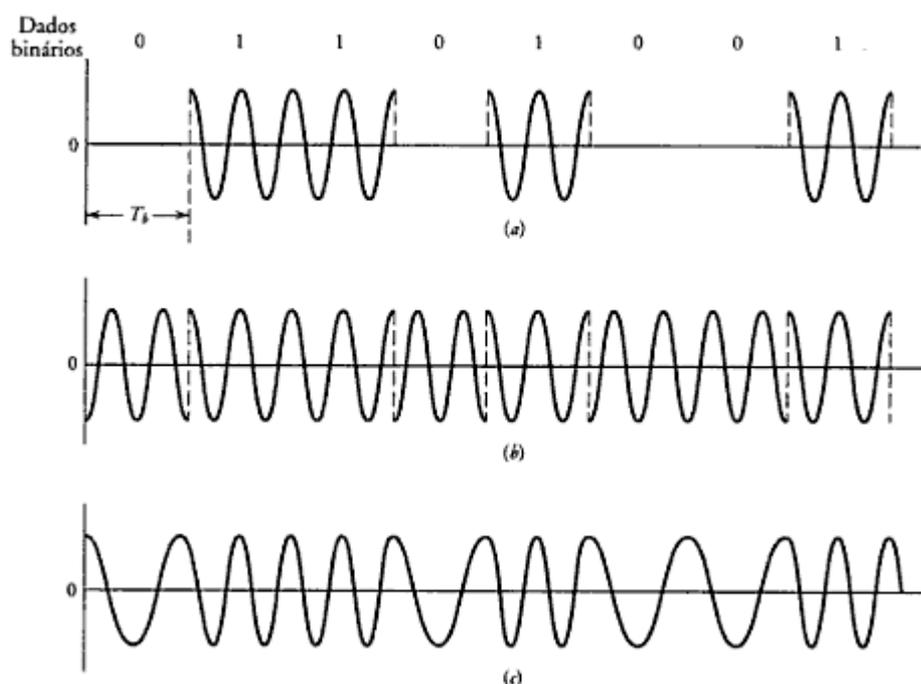


FIGURA 6.1. – Modulação (a) ASK, (b) PSK e (c) FSK.
Fonte: Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais.

É possível, ainda, ao se tratar de modulação digital de sinais, fazer uso conjunto de dois atributos da portadora, criando assim, uma nova forma de modulação. O método QAM, por exemplo, aplica variações tanto na fase quanto na amplitude da onda portadora.

A escolha da técnica de modulação adequada está intrinsecamente ligada às características do meio em que haverá a comunicação. Como a rede elétrica se apresenta como um meio hostil a transferência de dados em alta frequência, apresentando ruídos,

multipercursos e seletividade ao canal, a técnica de modulação deve ser capaz de se sobrepor a todas essas dificuldades e ainda permitir uma alta taxa de transmissão de dados.

Segundo Hrasnica, Haidine e Lehnert (2004, p. 82), uma técnica de modulação para ser candidata a ao sistema PLC deve ser capaz de tolerar um canal não linear, suportar taxas acima de 10 Mbps e não utilizar complicadas técnicas de equalização. A técnica ainda deve ser capaz de uma alta seletividade de frequência, para evitar aquelas que sejam proibidas. Por último, ainda deve ser apta a suportar multipercursos, advindos do descasamento das impedâncias das linhas de transmissão.

Desse modo, as técnicas de modulação digital, anteriormente mencionadas, isoladamente não superam as carências do meio. Disso resulta que duas outras técnicas de modulação despontam como as melhores alternativas, a OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a *Spread Spectrum*.

Vale ressaltar que as técnicas OFDM e *Spread Spectrum* não obstaculizam o uso das modulações digitais clássicas. Ao revés, as modulações PSK e QAM, por exemplo, ainda são necessárias.

6.1. SPREAD SPECTRUM

Os sistemas militares foram os primeiros a utilizar a modulação *spread spectrum*. O intuito aqui era evitar a obstrução intencional do sinal, situação essa que ocorre quando o adversário quer interromper a comunicação do oponente. Para obstaculizar a mensagem, ele identifica que há um sinal de comunicação e depois envia um sinal capaz de confundir o receptor, bloqueando assim a mensagem enviada.

No ambiente civil, essa técnica tem sido utilizada usualmente em sistemas de comunicação sem fio. Nesses casos, não há fontes usadas com o intuito de derrubar o sinal, porém há fontes que tem esse efeito como secundário. Assim, para que o sinal seja capaz de atravessar um meio tão hostil, é imperioso que ele seja apto a suportar fortes interferências.

A técnica *Spread Spectrum* opera de forma a combinar os bits da mensagem com uma grande sequência de bits (de 4-256 para operações civis e 100-1000 para militares). Essa sequência é chamada de *chipping code* e funciona como um modelo de inserção de redundâncias, ou seja, havendo um erro na recepção de um único bit, todos os outros servem como forma de correção da informação.

A tabela abaixo mostra uma sequência de bits de informação (11100) e um *chipping code* (10101) com uma sequência de 5 bits para cada um de informação. Para realizar a

combinação da informação com o *chipping code*, basta realizar uma soma de modulo 2 a partir do bit mais a direita da informação com todos os bits do *chipping code*. Dessa maneira, temos que o valor a ser enviado representando o primeiro bit é 10101.

Information bits	11100
Chipping code	10101
Transmitted bits (modulo-2 addition)	
For first information bit:	10101
For second information bit:	10101
For third information bit:	01010
For fourth information bit:	01010
For fifth information bit:	01010

TABELA 6.1. – Exemplo da modulação Spread Spectrum.
Fonte: Understanding broadband over power line

Haykin (2001, p. 706) ensina que “o espalhamento espectral é um tipo de transmissão na qual a sequência de dados ocupa uma largura de banda que excede a largura de banda mínima necessária para enviá-la.”

Para compreender essa técnica de modulação, torna-se imperioso a compreensão da Lei de Shannon, que pode ser escrita da seguinte forma:

$$C = W \log_2 (1 + S/N)$$

onde

C = capacidade do canal em bps;
W = largura de banda do sinal Hz;
S = potência do sinal;
N = potência do ruído.

De acordo com a equação acima, pode-se concluir que é possível a transmissão de informação por um meio extremamente ruidoso sem alterar a capacidade do canal, desde que haja um aumento na largura do sinal de mensagem.

Dito de outra forma, a Lei de Shannon permite que, dada uma capacidade fixa do canal, haja a comunicação mesmo em meios hostis, bastando que, ou se aumente a potência do sinal emitido, ou se incremente a largura de banda do mesmo. Surgindo, assim, uma possibilidade de negociação entre a largura de banda do sinal e sua potência.

Essa característica dos canais de transmissão é importantíssima para o sistema PLC, pois não é obrigatório aumentar a potência do sinal a ser transmitido como meio de transpor os ruídos inerentes do canal, podendo incrementar a largura de banda do sinal enviado. Isso é interessante na medida em que a ampliação da potência do sinal tem como efeito indesejado o

aumento da radiação eletromagnética emergente da rede, que é um ponto negativo do sistema PLC.

Transportando a explicação da Lei de Shannon para o *Spread Spectrum*, pode-se então afirmar que essa técnica de modulação permite a comunicação através de um canal ruidoso ao ampliar a largura de banda do sinal de mensagem enviado, possibilitando ainda uma diminuição na potência do mesmo.

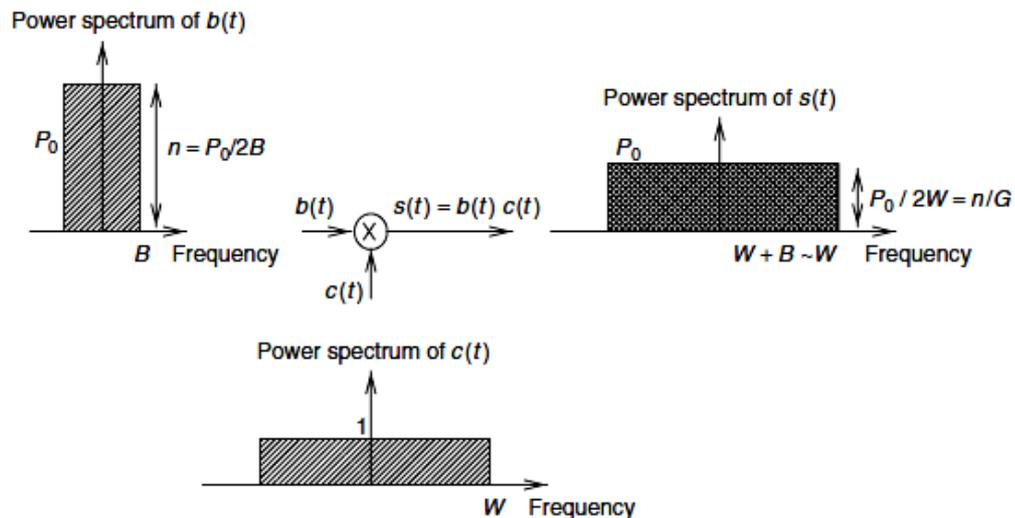


FIGURA 6.2. – Espectro de potência do sinal de entrada (b), da sequência de redundância (c) e do sinal transmitido (t).

Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

6.2. OFDM

Em sinais digitais, a informação encontra-se na forma de bits (ou de conjunto de bits, chamados de símbolos), e para transmiti-los, modula-se geralmente todo o sinal em uma única portadora.

Ocorre que se a taxa de dados desejada for muito elevada, o tempo de transmissão de cada bit se tornará bastante exíguo, favorecendo os erros provenientes de ruído impulsivo, reflexão de sinais e outros. Se elevados, esses problemas podem inviabilizar a comunicação.

Pinto e Albuquerque (2002, p. 01) lecionam acerca da concepção básica da técnica de modulação OFDM:

Num sistema convencional de transmissão, os símbolos são enviados em sequência através de uma única portadora (modulada na taxa de símbolos da fonte de transmissão), cujo espectro ocupa toda a faixa de frequências disponível.

A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas subportadoras com modulação QAM ou PSK e taxas de transmissão por subportadora tão baixas quanto maior o número destas empregadas.

A técnica OFDM surgiu como uma evolução da FDM, de modo que, se nesta usava-se diferentes frequências para transmitir o sinal, frequências essas separadas por uma banda de guarda; naquela, utiliza-se também diferentes frequências, contudo as portadoras, por serem ortogonais, podem ser sobrepostas sem perda de informação. Pinto e Albuquerque (2002, p.02) observam que essa “sobreposição espectral particular produz uma economia significativa de banda relativamente a FDM tradicional”, de forma que “pode-se obter uma economia de banda de aproximadamente 50%”.

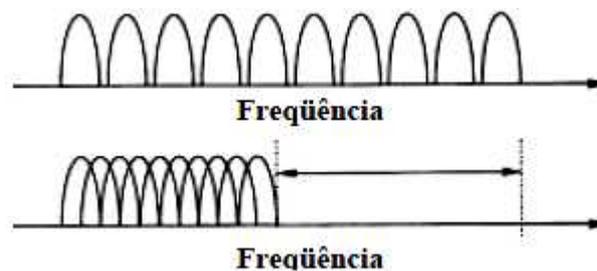


FIGURA 6.3. – Espectros FDM convencional e OFDM.

Fonte: A técnica de transmissão OFDM.

Um benefício significativo no uso da OFDM reside no fato de como os canais utilizados possuem uma seletividade na frequência (frequências mais altas sofrem uma maior atenuação), tais canais irão atenuar apenas algumas subportadoras e, portanto, somente alguns bits. Como uma forma de solucionar o problema da atenuação seletiva, bastaria usar códigos de correção mais robustos apenas nesses dados que serão transmitidos por essas subportadoras, e não em todo o sinal. Há a possibilidade, também, de empregar modulações diferentes a cada subportadora, *e.x.*, QPSK em algumas subportadoras e 1024 QAM, em outras.

Entretanto, ao utilizar a técnica OFDM do modo que foi proposto aqui, surgiria o problema de interferência intersimbólica (ISI). A fim contornar tal dificuldade, deve-se inserir um intervalo de guarda entre símbolos de uma mesma subportadora, de modo que o intervalo transmissão de um bit não é apenas o tempo de seu envio, mas também o tempo despendido em virtude de se evitar a ISI.

Para se criar um intervalo de guarda, poderia ser imaginada apenas a ausência de sinal. Contudo, ao se implementar dessa forma, as subportadoras deixariam de ser ortogonais, dando origem ao problema de Interferência entre Subportadoras (ICI, *Interchannel Interference*).

A fim de transpor tal empecilho, a subportadora mantém seu formato durante o intervalo de guarda. Como aduz Pinto e Albuquerque (2002, p.05),

isso equivale a acrescentar ao início de cada símbolo uma certa quantidade de amostras da parte final do mesmo.

Desde que seus valores de retardo sejam menor que o intervalo de guarda, pode-se garantir que réplicas retardadas do símbolo OFDM terão sempre um valor inteiro de ciclos dentro do intervalo de cálculo da FFT. Como resultado, os sinais multipercurso com retardo menor que o intervalo de guarda não causarão ICI.

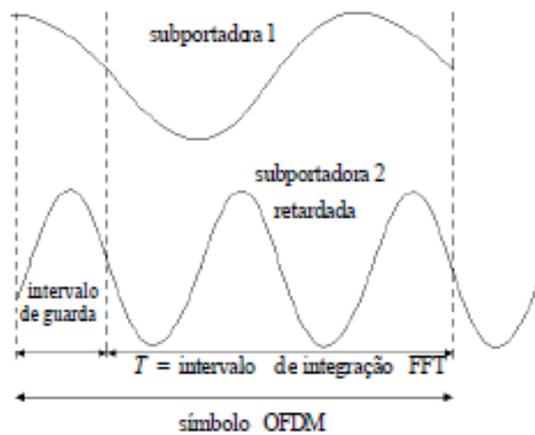


FIGURA 6.4. – Subportadoras e seus intervalos de guarda.
Fonte: A técnica de transmissão OFDM.

6.2.1. Geração dos sinais OFDM

A geração dos sinais OFDM é baseada em duas etapas.

A primeira delas consiste em dividir a sequência de bits (ou símbolos) do sinal original em tantas outras sequências quanto forem o número de subportadoras

A segunda versa sobre a modulação dessas subseqüências. Para garantir a ortogonalidade das subportadoras, elas devem ser separadas, na frequência, por um múltiplo do inverso do tempo de transmissão de um símbolo.

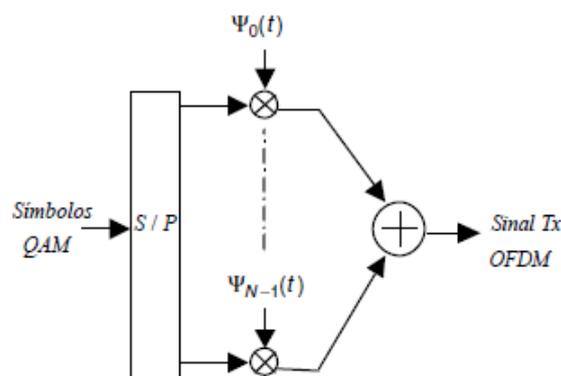


FIGURA 6.5. – Geração de sinal OFDM.
Fonte: A técnica de transmissão OFDM.

Essa ortogonalidade pode ser observada na frequência com facilidade, pois todas as subportadoras são alocadas em pontos zero das demais.

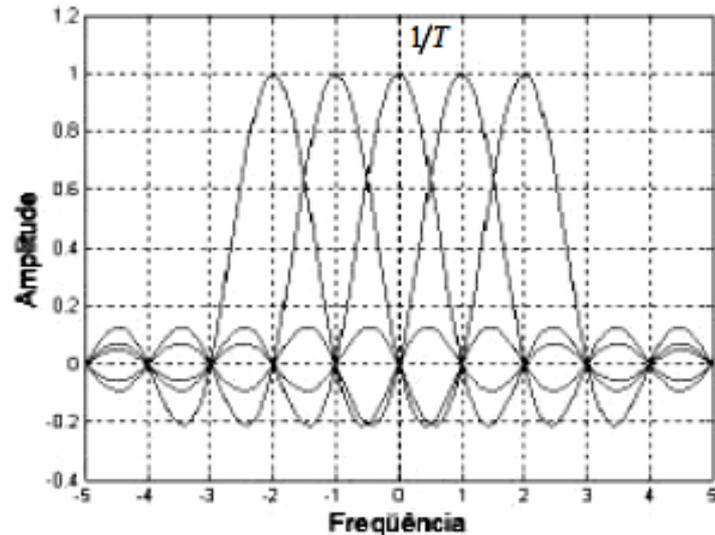


FIGURA 6.6. – Característica das subportadoras de serem alocadas em pontos zero das demais.

Fonte: A técnica de transmissão OFDM.

No domínio do tempo, essa característica de espaçamento espectral de um múltiplo $1/T$ pode ser observada visualizando a quantidade de ciclos das subportadoras pelo período de um símbolo. Conforme Pinto e Albuquerque (2002, p. 02), isso “implica que duas subportadoras quaisquer diferem exatamente por um número inteiro de ciclos durante o intervalo de símbolo OFDM”. Aqui, pode ser observado 4 subportadoras (cada uma com uma quantidade de ciclos diferente da outra) em um período T .

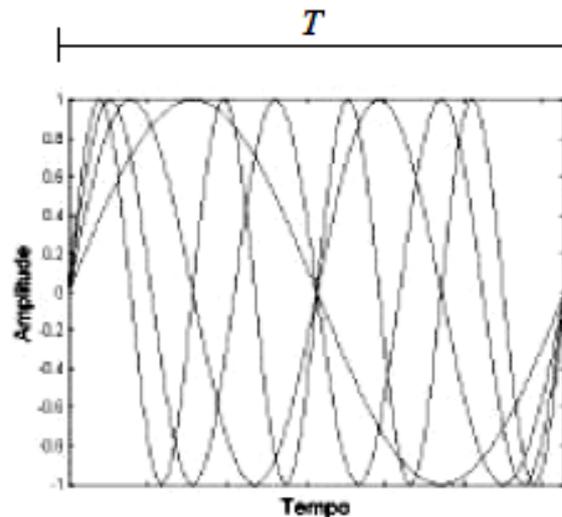


FIGURA 6.7. – Característica do espaçamento espectral no tempo de quatro subportadoras.

Fonte: A técnica de transmissão OFDM.

7. CAMADA MAC

A camada de enlace no modelo OSI tem como responsabilidade fazer uma comunicação nó a nó de maneira segura. Comparando com a camada de rede, se essa (a camada de rede) tem como objetivo movimentar os dados desde o usuário de origem ao usuário de destino, aquela (a camada de enlace) tem como desiderato fazer a comunicação entre duas partes, por um único enlace.

Para realizar uma comunicação satisfatória entre os dois nós, a camada de enlace possui como principais funções controlar o acesso ao meio. Esse controle é de suma importância em sistemas de comunicação de comunicação com múltiplos usuários, pois permite organizar a utilização do canal de comunicação.

Não havendo uma mínima organização, recursos restarão desperdiçados em virtude de colisões entre pacotes, como bem observa Kurose e Ross (2006, p. 338):

Como todos os nós têm a capacidade de transmitir quadros, mais do que dois nós podem transmitir quadros ao mesmo tempo. Quando isso acontece, todos os nós recebem vários quadros ao mesmo tempo, isto é, quadros transmitidos colidem em todos os receptores. Em geral, quando há uma colisão, nenhum dos nós receptores consegue perceber algum sentido nos quadros que foram transmitidos; de certo modo, os sinais dos quadros que colidem ficam inextricavelmente embaralhados. Assim, todos os quadros envolvidos na colisão são perdidos e o canal broadcast é desperdiçado durante o intervalo de colisão.

7.1. MÉTODO DE ACESSO MÚLTIPLO

O acesso múltiplo ao meio permite que, ao se dividir os recursos de transmissão em várias sessões de acesso, uma pluralidade de assinantes possa se comunicar ao mesmo tempo utilizando o mesmo canal.

Em geral, há três formas de possibilitar o múltiplo acesso:

- TDMA – Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo;
- FDMA – Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência;
- CDMA – Acesso Múltiplo por Divisão de Código.

7.1.1. TDMA

O método TDMA, a fim de possibilitar o acesso múltiplo ao canal, divide o tempo total de uso entre os usuários, de maneira que cada um possa transmitir informações sem interferência do outro emissor. Dito de outra forma, o modelo TDMA atua delimitando o tempo de transmissão em *slots*, onde cada emissor deve enviar os seus dados nessa unidade de intervalo de tempo. Ao encerrar o tempo de acesso de um primeiro usuário, um segundo agora poderá aproveitar o canal. O *slot* só retorna ao primeiro usuário quando todos os outros já tiverem sido atendidos.

Para que a informação contida em um *slot* temporal não interfira no *slot* seguinte, criam-se intervalos de guarda. Vale ressaltar que no modelo TDMA, os *slots* temporais podem ou não ter tempos fixos.

A técnica TDMA pode ser utilizada concomitantemente com o *spread spectrum* ou mesmo com a OFDM.

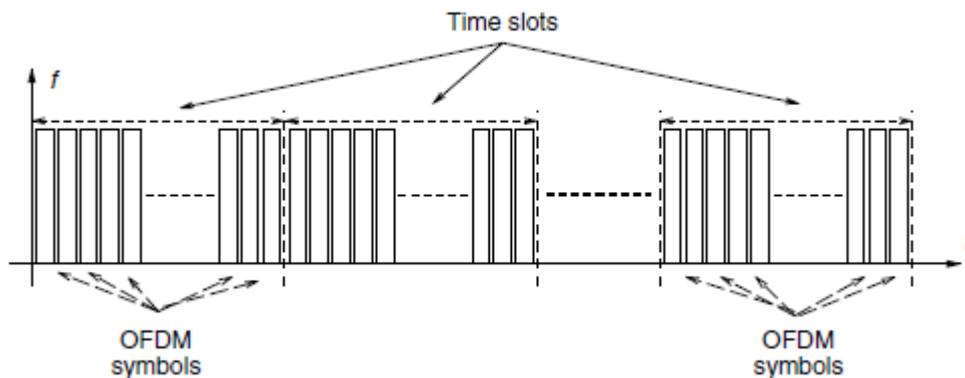


FIGURA 7.1 – União entre as técnicas OFDM e TDMA.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

7.1.2. FDMA

O método FDMA realiza o acesso múltiplo dividindo, não o tempo de acesso de cada emissor, como faz o TDMA, mas sim a largura de banda do canal. Dessa forma, todos os usuários aproveitam o canal ao mesmo tempo, contudo o fazem em faixas específicas de frequência.

A grande vantagem do modelo FDMA ao TDMA é a robustez desse primeiro aos ruídos de banda estreita e aos impulsos de frequência seletiva. Nesses casos, pode-se facilmente evitar tais efeitos indesejados apenas realocando a informação em faixas de frequência onde não ocorram tais fenômenos.

Assim como o modelo TDMA, o FDMA também pode ser implementado com as modulações *spread spectrum* e a OFDM.

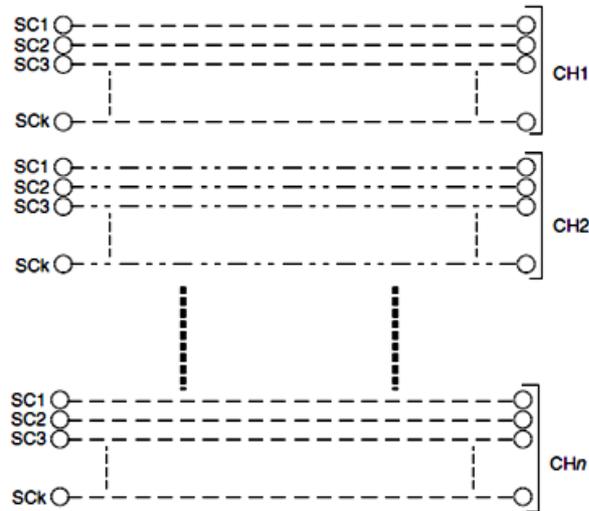


FIGURA 7.2 – Implementação conjunta entre as técnicas FDMA e OFDM.
 Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

7.1.3. CDMA

O método CDMA diferencia-se dos mencionado anteriormente por ele possibilitar o compartilhamento do canal de acesso ao prover diferentes códigos a cada usuário. Assim, nessa forma de acesso ao meio, os dados estão embaralhados tanto no tempo como na frequência, sendo o código a única ferramenta capaz de recuperá-los.

O CDMA funciona basicamente da seguinte maneira:

- Cada par de usuários (emissor e receptor) recebe da rede um código único (C_a e C_b);
- A seguir, a sequência de bits de informação do emissor (S_a e S_b) é embaralhada com o código deste, gerando um novo encadeamento de bits ($S_a * C_a$ e $S_b * C_b$);
- Esse encadeamento de informação pode agora trafegar pelo meio junto com outros encadeamentos sem que haja perturbação na informação contida neles ($S_a * C_a + S_b * C_b$);
- Por fim, o receptor ao receber uma série de encadeamentos de diversos emissores, decodifica informação através de um procedimento simples de multiplicação com o código único (C_a e C_b) fornecido pela rede.

Do mesmo modo que os métodos TDMA e FDMA garantem o não embaralhamento de dados por causa da ortogonalidade no tempo e na frequência, respectivamente, o modelo CDMA utiliza-se da ortogonalidade dos seus códigos.

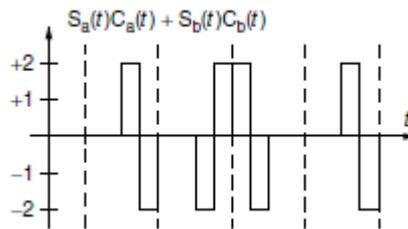


FIGURA 7.3 – Codificação de sinais em CDMA e envio destes no mesmo meio.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

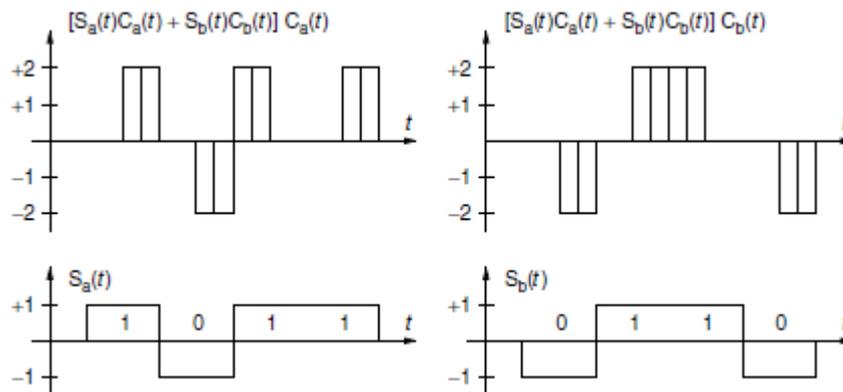


FIGURA 7.4 – Decodificação de sinais CDMA.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

A ortogonalidade dos códigos pode ser verificada se a correlação cruzada entre eles é zero. Matematicamente, no tempo discreto, isso equivale a dizer:

$$R_{xy}(0) = x^T y = \sum_{i=1}^N x_i y_i$$

Por exemplo, se $x^T = [-1 \ -1 \ 1 \ 1]$ e $y^T = [-1 \ 1 \ 1 \ -1]$, pode se verificar que x e y são ortogonais entre si, pois $R_{xy} = (-1)(-1) + (-1)(1) + (1)(1) + (1)(-1) = 0$.

Entretanto a ortogonalidade de código, em canais onde a propagação multipercurso é um efeito recorrente, pode não ser o bastante para se obter uma comunicação desejável, pois um atraso na sequência de bits pode tornar o código não mais ortogonal.

Tome-se como exemplo os mesmo códigos acima mencionados, x e y , mas agora duplicados. Caso haja um atraso de um bit no código y , os códigos x e y não mais seriam ortogonais, comprometendo toda a comunicação.

$$x = -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1;$$

$$y = 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1;$$

$$R_{xy} = (-1)(1) + (-1)(1) + (1)(-1) + (1)(-1) + (-1)(1) + (-1)(1) + (1)(-1) + (1)(-1) = -8.$$

Se a capacidade da rede – quantidade de usuários suportados ao mesmo tempo - nos sistemas TDMA e FDMA corresponde à quantidade de divisões feitas no tempo e na frequência, respectivamente, a capacidade do sistema CDMA é um pouco mais complexa.

Teoricamente, a capacidade da rede deveria ser infinita, pois basta adicionar mais códigos para aumentá-la. Entretanto, a capacidade no sistema CDMA é limitada.

Para calcular a capacidade máxima, partiremos de um importante parâmetro de comunicações digitais, a energia por bit sobre a densidade espectral do ruído (E_b/N_0).

Como $E_b = S * T$, onde T é o período de um bit e S é a potência média do sinal, e sendo R igual à taxa de bits, temos: $E_b/N_0 = S/(R * N_0)$.

Se N_0 é a densidade espectral do ruído, então podemos escrevê-lo como a razão da potência total do ruído pela largura de faixa deste (N/W).

Unificando as duas últimas equações, obtemos: $E_b/N_0 = (S * W)/(N * R)$.

Considerando que o sistema possui um controle de potência perfeito, de forma que a potência recebida por qualquer um dos usuários seja a mesma (isso inclui dizer que cada usuário contribui igualmente também para a interferência no sinal do outro), podemos assumir então que: $SNR = 1/M - 1$, onde M é o número de usuários e SNR é a relação sinal-ruído (ou S/R).

Novamente, ao unificarmos as duas últimas equações alcançamos o seguinte resultado:

$$M - 1 = \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)}$$

A partir da equação exposta acima, é interessante concluir que o sistema CDMA possibilita que o projetista possa negociar entre a qualidade do serviço e a quantidade do número de usuários apenas ajustando da potência do sinal.

7.2. MÉTODO DE REVESAMENTO

Na seção anterior, foram abordados os mecanismos existentes capazes de possibilitar o acesso de vários usuários ao mesmo canal, dividindo os recursos deste. Existem, todavia, outra classe de protocolos que não dividem os recursos do canal para possibilitar a comunicação de múltiplos usuários, mas sim, emprega um revezamento entre os nós.

Tal protocolo visa alcançar a idealidade em sistemas de múltiplos usuários, ou seja, quando só um deseja comunicar-se, todos os recursos do canal remanesçam com ele, já

quando n canais estiverem ativos, os recursos devem ser divididos o mais próximo da igualdade.

7.2.1. Token Passing

É um protocolo de revezamento que determina a prioridade de cada terminal para acessar o canal. Essa prioridade é obtida com a posse de uma ficha (*token*), ao utilizar o canal, o terminal possuidor da ficha a repassa para o próximo terminal a fim de que todos possam acessar de formar circular (um após o outro), sem que haja colisões.

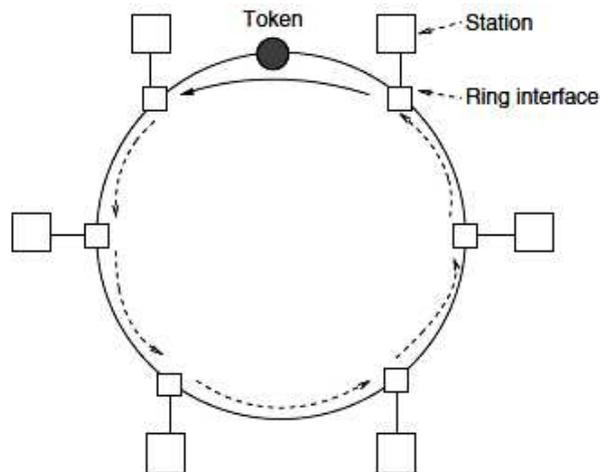


FIGURA 7.5 – Sistema token passing.

Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

Apesar de o modelo *token passing* ser mais bem visualizado em redes de topologia anel, pode ser também utilizado em PLC (modelo barramento), desde que cada terminal receba um número, como o número de endereço MAC, por exemplo. Desse modo, a ficha não é passada para o terminal físico adjacente, e sim para o terminal lógico adjacente.

7.2.2. Polling

O método *polling* é muito similar ao *token passing*, pois somente um terminal utiliza o canal por vez, eliminando as colisões. Essa utilização do canal só pode ser realizada se o terminal possui o direito para tal, se no método *token passing* é o próprio terminal que passa a ficha (*token*) para o próximo, no *polling*, existe uma estação base que faz essa distribuição. Caso o terminal não tenha algo a transmitir, esse emite uma mensagem informando tal estado à estação base, que passa a prioridade para outro terminal.

A existência da estação base acrescenta uma desvantagem, pois se a estação base falhar, o canal inteiro ficará inoperante.

Ademais, ambos os métodos de arbitramento têm como desvantagem o fato de havendo vários terminais, a espera pela prioridade de transmitir se tornar muito prolongada.

7.3. MÉTODO DE ACESSO ALEATÓRIO

Como forma de resolver o problema da espera prolongada (protocolos de revezamento) e tentar alcançar o conceito ideal em sistemas de múltiplos usuários, outra espécie de protocolos sobressai, os protocolos de acesso aleatórios.

Nos protocolos de acesso aleatório, não há coordenação entre os terminais, assim cada estação tenta obter para si os recursos do meio, e ao tentar transmitir dados ao mesmo tempo, surgem colisões. Os protocolos de acesso aleatórios tentam reduzir a quantidade de colisões, melhorando o desempenho da comunicação.

Comparando com os protocolos de revezamento, estes últimos empregam uma coordenação entre as estações dos usuários para determinar de quem seja a prioridade, contudo isso adiciona recursos extras à comunicação.

Conforme Kurose e Ross (2006, p.341):

Com um protocolo de acesso aleatório, um nó transmissor sempre transmite à taxa total do canal, isto é R bps. Quando há uma colisão, cada nó envolvido nela retransmite repetidamente seu quadro (isto é, pacote) até que este passe sem colisão. Mas, quando um nó sofre uma colisão, ele nem sempre transmite o quadro imediatamente. Em vez disso, ele espera um tempo aleatório antes de retransmitir o quadro. Cada nó envolvido em uma colisão escolhe atrasos aleatórios independentes.

7.2.1. ALOHA

O método ALOHA é bastante simples, e nele não há nenhum tipo de coordenação entre as estações da rede. Baseia-se apenas na transmissão de dados por um terminal e a posterior verificação de colisão de informação, caso mais de uma estação envie dados ao mesmo tempo.

No ALOHA puro, as estações enviam seus dados descoordenadamente e caso haja a colisão de informação, ocorre a retransmissão (com a probabilidade p) dos dados imediatamente, ou então espera um tempo predeterminado e tenta novamente retransmitir os dados com a probabilidade p .

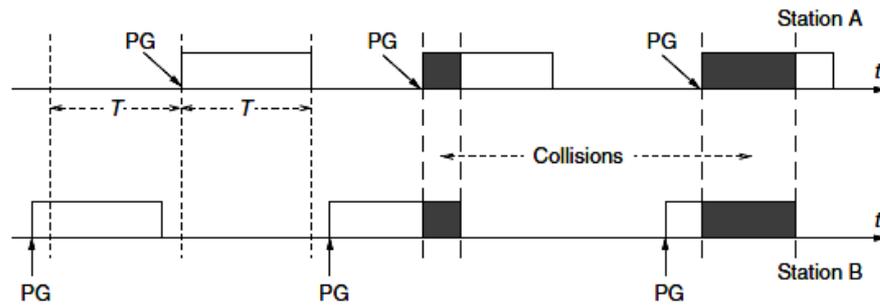


FIGURA 7.6 – Exemplo de colisões entre estações.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

No *slotted ALOHA*, há a inserção do conceito de divisão de tempo para a transmissão, ou seja, cada estação somente pode enviar dados em intervalos fixos de tempo (por isso o nome *slotted*). O emprego de tal técnica possibilita que o começo de cada intervalo de envio seja conhecido por cada estação, e essa somente pode iniciar a transmissão nesse instante de tempo.

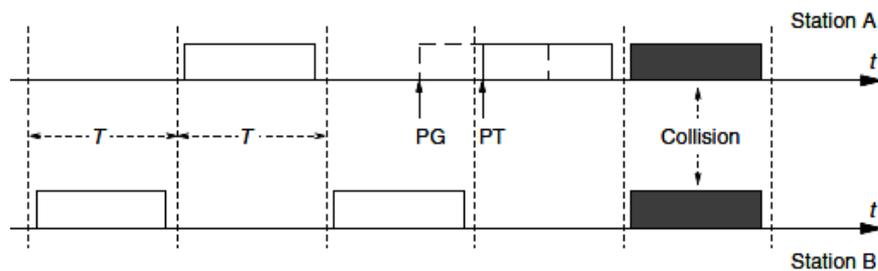


FIGURA 7.7 – Uso da técnica slotted ALOHA.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

Com o emprego de tal conceito, o *slotted ALOHA* ganha em desempenho do ALOHA puro, pois se no último a colisão pode ocorrer em qualquer momento da transmissão, no *slotted*, ou ocorre no início, ou não mais ocorre, diminuindo assim o tempo possível de colisões.

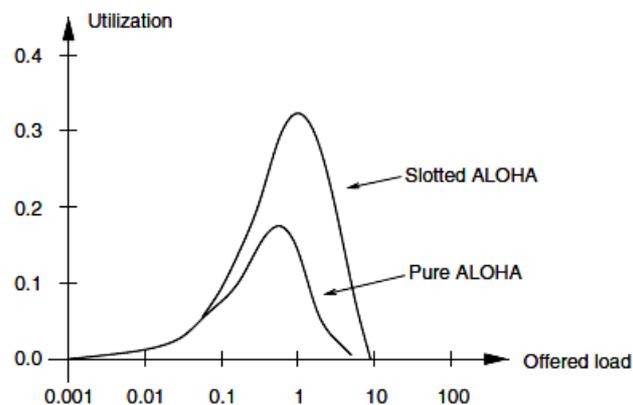


FIGURA 7.8 – Comparação de desempenho ALOHA vs. Slotted ALOHA.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

7.2.2. CSMA

No modelo CSMA (*carrier sense multiple access*) também não há coordenação entre as estações, contudo, diferentemente do modelo ALOHA, no CSMA os terminais detectam portadoras no canal, e assim não transmitem se já existe informação trafegada no meio.

Traçando um paralelo com o protocolo humano de conversação, significa dizer que no modelo CSMA a estação primeiro “escuta”, e somente “fala” se ninguém mais estiver “falando”.

Apesar de utilizar um mecanismo interessante de evitar colisões, estas ainda poderão ocorrer devido aos atrasos de propagação fim-a-fim do canal inerentes a qualquer rede de comunicação. Exemplificando, imagine quatro terminais (A, B, C e D), onde no exato momento só B utiliza o canal. Como há um intervalo de tempo inerente para que a portadora alcance o terminal D, pode ser que D inicie uma transmissão por não ter ainda detectado. Logo, quando a portadora alcançar D, haverá uma colisão.

Apesar de o modelo CSMA ser bastante interessante, ele tem limitações em ambientes PLC, pois semelhantemente ao sistema wireless, o PLC pode apresentar o problema de terminais escondidos (*hidden terminals*). Elucidando a problemática por meio de exemplo, suponha três terminais, A, B e C. A transmite para B, porém C por estar muito longe de A não detecta a portadora e inicia sua transmissão à B, chegando em B haverá uma colisão resultante da não detecção da portadora de A por C.

Uma maneira de evitar o efeito danoso dos terminais escondidos é o emprego do protocolo ISMA (*inhibit sense multiple access*). O protocolo ISMA é uma evolução do CSMA, e nele é aplicada uma técnica de envio de informação (*broadcast*) pela estação base sobre o uso, ou não, do canal por outros terminais, havendo, portanto, uma maior sincronia na transmissão, em razão do emprego de uma estação base.

8. MÉTODOS DE DETECÇÃO E CORREÇÃO DE ERROS

A rede elétrica não é um meio adequado a comunicação digital em alta velocidade. Por ser um meio bastante ruidoso, acaba por distorcer as mensagens enviadas, sendo necessária assim a aplicação de técnicas que diminuam a taxa de erro, aumentando, por conseguinte, a qualidade do serviço.

A tecnologia PLC emprega duas maneiras de minimizar a taxa de erros. A primeira consiste no reenvio de mensagens com a informação de que a mensagem original chegou de forma satisfatória.

A segunda técnica opera inserindo dados redundantes (sem informação) na mensagem, mas que são capazes de proteger a informação do ruído presente no canal. Essa técnica é comumente chamada de codificação de canal.

Essas técnicas corretoras de erro são desenvolvidas na camada 2 do modelo OSI, mais especificamente na camada LLC.

8.1. ARQ

O ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) é um método de controle de erro que opera inserindo tarefas ao receptor. Essa tarefa consiste em enviar uma mensagem de reconhecimento ao emissor sinalizando se houve, ou não, um erro na transmissão (emprega-se o acrônimo ACK para a mensagem de reconhecimento positivo, caso contrário, utiliza-se o NACK). Caso tenha ocorrido um erro, o pacote corrompido é novamente enviado.

Ponto importante nesse método de correção de erro é o uso do tempo de espera (*time-out*). Aqui, caso haja um período muito longo entre a emissão do pacote e o recebimento da mensagem de reconhecimento, o emissor envia novamente o pacote, pois a excessiva demora faz presumir o não recebimento do pacote emitido.

Novos métodos ARQ, visando uma maior eficiência na comunicação, prescindem da mensagem de reconhecimento de cada pacote enviado para enviar um novo pacote (método *Stop and Wait*). Ao invés disso, o emissor envia vários pacotes (quantidade predefinida e chamada de janela) em rajada. Havendo erro, o receptor descarta o pacote defeituoso e continua a receber os pacotes posteriores, após completar o buffer de entrada (a janela), envia-se uma mensagem de erro (NACK) referente apenas ao pacote errado. Por fim, recebido a

mensagem NACK, o emissor envia o pacote outrora corrompido e continua a transmitir pacotes de onde havia parado. Esse método chama-se ARQ *selective repeat*.

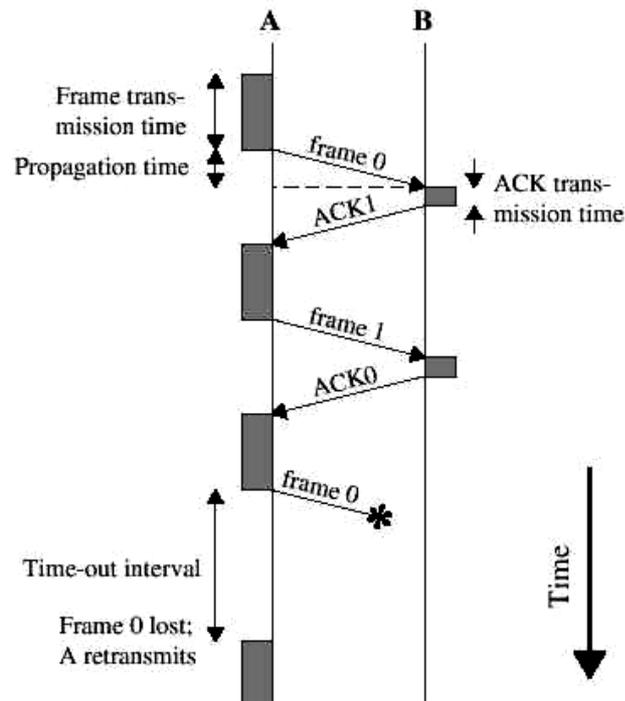


FIGURA 8.1 – Método ARQ (stop and wait) de detecção de erro.
Fonte: Broadband Powerline Communications Networks

8.2. FEC

Diferentemente do modelo acima, onde se faz uso de reenvio de mensagens para a verificação de possíveis erros, aqui a mensagem trafega normalmente pelo canal, e mesmo tendo sido enxertada de deturpações, o demodulador ainda será capaz de recompô-la.

Para que o demodulador consiga realizar tal proeza, é imprescindível o envio, junto com a informação, de dados redundantes capazes de verificar e corrigir a existência de erros.

Como exemplo simplório, cite-se a inserção de bits redundantes para cada bit enviado, de sorte que enviando um bit de informação, poderíamos enviar dois outros bits de mesmo valor. Assim, caso o ruído deturpe apenas um bit da tríade, os outros dois poderiam ser utilizados para recompor a informação.

É fácil ver que o exemplo citado não é muito interessante, pois ao empregarmos tal técnica, mais símbolos redundantes seriam enviados do que símbolos contendo informação.

Contudo, o que é importante salientar é o objetivo desse artifício, pois se adiciona redundância em prol de diminuição da taxa de erro, dado uma relação sinal-ruído (SNR) fixa.

Dizendo de outra forma, dada uma taxa de erro predeterminada, aumenta-se a redundância, para poder utilizar uma SNR mais baixa.

Um importante parâmetro para análise das técnicas de correção de erro, ou FEC (*forward error correction*) é a taxa de codificação, sendo esta a razão entre tamanho do bloco de bits de entrada (k), pelo tamanho do bloco de bits de saída (n), onde n é sempre maior que k , pois em n foi inserido redundâncias.

$$\text{Taxa de codificação (R)} = k/n.$$

As principais técnicas de FEC são a Codificação por blocos e a Codificação Convolutiva. De acordo com Haykin e Moher (2008, p. 2010):

Historicamente, os códigos FEC têm sido classificados com códigos de bloco e códigos convolucionais. A característica que distingue essa classificação particular é a presença ou a ausência de memória no codificador para os dois códigos.

8.2.1. Codificação por bloco

Esse tipo de codificação é caracterizado pela notação (n, k) , onde k é um bloco de bits de entrada do codificador, e n é um bloco de bits de saída. Nesta técnica, a sequência de bits de informação é fragmentada em blocos do tamanho k na entrada do codificador. O codificador, por sua vez, insere novos bits à entrada, modificando a sequência original. Após isso, um novo bloco de tamanho n surge na saída do codificador.

A seguir, expõem-se todo o processo matemático que possibilita a codificação e a decodificação da técnica em comento.

Primeiramente, define-se:

$\bar{\mathbf{b}} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n-k-1}]$, os bits de paridade inseridos pelo codificador;

$\bar{\mathbf{m}} = [m_0 \ m_1 \ m_2 \ \dots \ m_{k-1}]$, os símbolos binários de mensagem original;

$\bar{\mathbf{x}} = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1}]$, a sequência codificada de saída.

Determinados os vetores, pode-se escrever

$$\bar{\mathbf{b}} = \bar{\mathbf{m}} * \mathbf{P}$$

onde \mathbf{P} é a matriz binária $(k \times n-k)$ que determina o código, de maneira que a sequência de paridade seja uma função da sequência de mensagem. Portanto, se

$$\bar{\mathbf{x}} = [\bar{\mathbf{b}} : \bar{\mathbf{m}}],$$

temos

$$\bar{\mathbf{x}} = [\bar{\mathbf{m}} * \mathbf{P} : \bar{\mathbf{m}}]$$

ou

$$\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{m}} * [\mathbf{P} : \mathbf{I}_k],$$

sendo \mathbf{I}_k a matriz identidade de dimensão $k \times k$. A equação acima revela que

$$\mathbf{G} = [\mathbf{P} : \mathbf{I}_k],$$

onde, \mathbf{G} é a matriz geradora do código, de maneira que

$$\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{m}} * \mathbf{G}.$$

Abstraído a análise matemática, pode-se afirmar que a geração da codificação de bloco utiliza os bits de entrada e de paridade para formar a matriz \mathbf{P} , e essa é empregada para criar a matriz geradora, que codificará a mensagem original.

Para que se possa realizar a decodificação da mensagem, é necessário realizar a operação matemática inversa à operada pela matriz \mathbf{G} , para isso cria-se a matriz de decodificação \mathbf{H} , onde:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{n-k} : \mathbf{P}^T], \text{ de dimensão } (n-k \times n).$$

Como $\mathbf{G} = [\mathbf{P} : \mathbf{I}_k]$ e $\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{n-k} : \mathbf{P}^T]$, temos então que:

$$\mathbf{H}\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n-k} & \vdots & \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}^T \\ \vdots \\ \mathbf{I}_k \end{bmatrix} = \mathbf{P}^T \oplus \mathbf{P}^T = \mathbf{0}$$

pois \oplus equivale à soma de módulo 2, o que demonstra serem elas operadores com “sinal trocado”.

O sinal recebido \mathbf{y} , ao chegar ao destino, não necessariamente corresponde ao mesmo valor que foi enviado, tendo sido adicionados erros ao longo do trajeto, em razão disso, pode-se escrever $\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{e}$, onde \mathbf{e} é uma sequência binária, onde 1 (um) significa um erro e 0 (zero) a ausência de erro.

Contudo, o código de bloco é capaz de perceber o erro adicionado, basta que se multiplique o valor de \mathbf{y} por \mathbf{H}^T , de maneira que se $\bar{\mathbf{y}} * \mathbf{H}^T$ for igual a zero, significa que não houve erro (ou então o código não foi capaz de detectá-lo), caso contrário um erro foi detectado.

Além de detectar o erro, o código de bloco ainda é capaz de corrigi-lo.

Para realizar tal função, deve-se, previamente, montar uma tabela contendo os padrões de erro possíveis de serem corrigidos, tendo em vista a capacidade de correção do código, e suas respectivas síndromes.

A montagem dessa tabela pode ser feita inserindo erros bit a bit em cada posição de uma mesma sequência codificada, simulando assim erros de envio e gerando vários padrões de erro. Após essa etapa, multiplica-se cada sequência simulada errada por \mathbf{H}^T . Posteriormente, calcula-se as respectivas síndromes (observe a existência de uma propriedade

que afirma que cada padrão de erro que difere por uma palavra de código possui a mesma síndrome).

Montada a tabela para a decodificação e correção, basta utilizar a matriz \mathbf{H} para calcular a síndrome da palavra recebida, se esta for zero, não haverá erros, caso contrário socorre-se da tabela de correção. O valor da síndrome, obtido a partir da equação $\mathbf{s} = \mathbf{\bar{y}}^* \mathbf{H}^T$, indicará o padrão de erro ocorrido, e este padrão deve ser somado à palavra recebida, corrigindo assim o erro de transmissão.

8.2.2. Codificação Convolutiva

Esse tipo de codificação é empregado quando os bits a serem codificados chegam em série, e não em blocos. O nome dessa técnica advém da operação de convolução, pois, conforme Haykin (2001, p.683), “um codificador convolutiva gera bits redundantes usando convoluções módulo-2, daí seu nome.”

O processamento dessa espécie de codificação é bastante simples. Uma série de bits ao entrar no codificador são manipulados de forma que o valor de saída seja influenciado, tanto pela entrada atual, como por entradas passadas, portanto, é um sistema com memória.

Aqui, será utilizado um exemplo, como forma de melhor explicar tal codificação.

Abaixo segue um codificador convolutiva com três memórias, uma entrada e duas saídas (taxa 1/2).

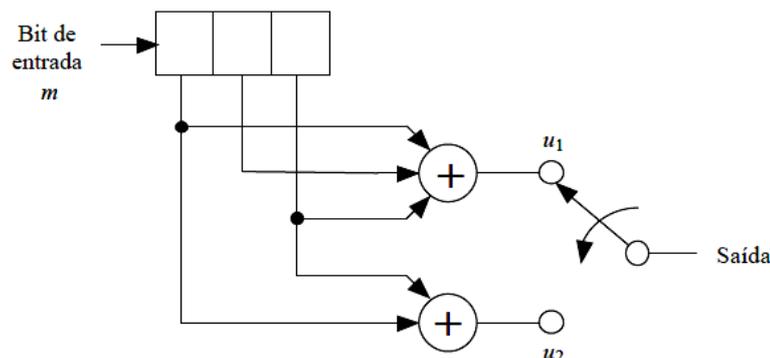


FIGURA 8.2 – Codificador Convolutiva (taxa 1/2, k=3).

Fonte: INATEL

Primeiro, escolhe-se a mensagem a ser codificada, e.g., $m = [1\ 0\ 1\ 1]$.

Segundo, calcula-se as respostas provenientes da entrada, tanto do percurso 1 (u_1), como do percurso 2 (u_2). Ao fazê-lo, obtém-se: $g^1(D) = 1 + D + D^3$ e $g^2(D) = 1 + D^2 + D^4 + D^5$.

Em seguida, multiplexa-se as duas sequências de saída dos percursos 1 e 2, a fim de obter a sequência codificada, qual seja, $c = [11, 10, 00, 01, 01, 11]$.

Como forma de auxiliar a montagem do diagrama de treliça e assim poder decodificar a mensagem, urge montar o diagrama de estado.

Por ser o codificador convolucional uma máquina de estados finita, todo estado possível de ser gerado provém de um estado anterior, mais uma entrada. No exemplo em liça, o estado pode ser entendido como os dois últimos campos da memória, e a entrada como o primeiro campo.

Destarte, na figura abaixo, os dois algarismos dentro da circunferência apontam o estado (t), e os próximos dois algarismo, também dentro de uma circunferência e após a seta, apontam um novo estado ($t+1$). Já o algarismo a esquerda da barra, representa o valor da entrada, e os dois algarismos posteriores (à direita), representam a saída.

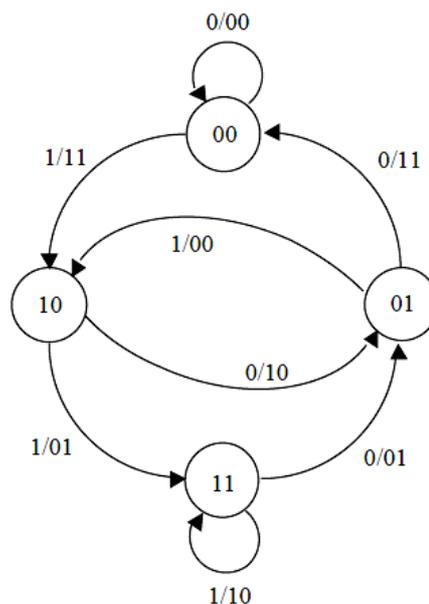


FIGURA 8.3 – Diagrama de Estados do Codificador Convolucional.
Fonte: INATEL

Montado o diagrama de estados, pode-se agora visualizar rapidamente os valores constantes na memória e na entrada que geram a desejada saída.

De posse do referido diagrama, monta-se o diagrama de treliça apenas com o objetivo de compreendê-lo, pois este será imprescindível na compreensão do algoritmo de Viterbi, empregado na decodificação.

O diagrama de treliça representa os estados possíveis do codificador pelo instante de tempo, onde a cada instante uma nova entrada é adicionada ao codificador, modificando o seu estado.

O diagrama de treliça do codificador em enfoque inicia-se no estado zero (não há nada na memória), instante t . Um valor de entrada 1 modifica o estado para 10 (linha contínua), pois, no próximo instante ($t+1$), os campos mais a direita da memória serão preenchidos por 10. Note que uma entrada zero também seria possível (linha tracejada), o que acarretaria a permanência no estado 00, possível instante $t+1$.

Ressalta-se, que apesar da mensagem original ser 1 0 1 1, concatenou-se os bits 0 0 à direita desta, somente para que a memória fosse “limpada” ao fim do processo, pois mesmo sem entrada, ainda haverá saída no codificador, pois há valores na memória.

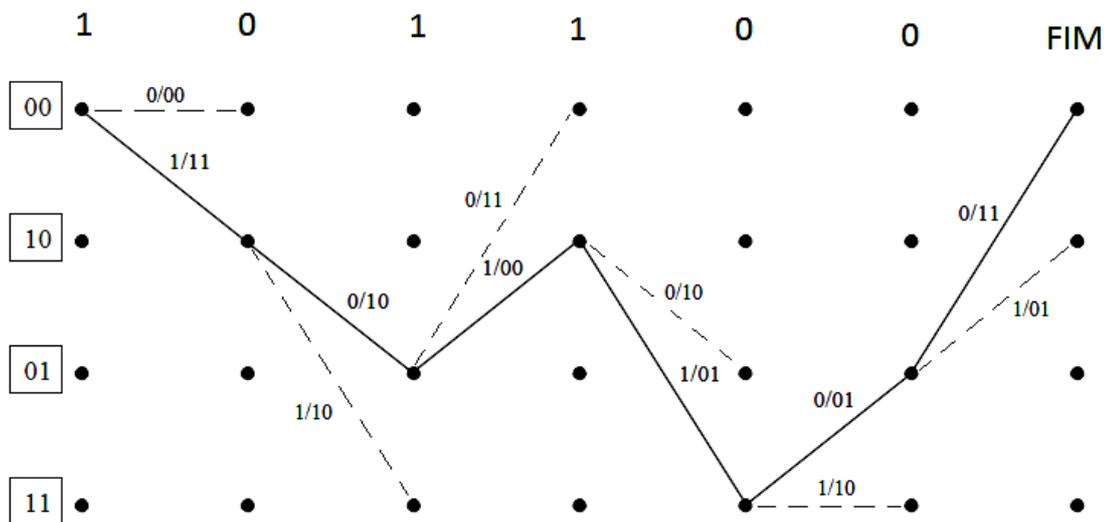


FIGURA 8.4 – Diagrama de Treliça.

Entendido o diagrama de treliça, passa-se ao algoritmo de Viterbi, empregado na decodificação.

O algoritmo de Viterbi é um decodificador de probabilidade máxima, pois pressupõe, na correção de erro, que é mais provável um erro em apenas um bit do que haver um erro em dois ou mais bits. Por isso, ele faz uso da distância de Hamming, que equivale à quantidade de bits diferentes em duas sequências binárias.

Primeiro, suponha que ao invés do receptor receber a mensagem codificada $c = [11, 10, 00, 01, 01, 01, 11]$, houve um erro no quinto bit, resultando em $r = [11, 10, 10, 01, 01, 11]$.

Após isso, emprega-se o diagrama de treliça partindo do estado 00 para todos os estados possíveis. Note que cada estado pode provir de dois outros e pode também originar dois outros estados.

Calcula-se a distância de Hamming entre a mensagem recebida e o valor resultante do diagrama de estado (par de bits a direita da barra). As distâncias de Hamming para as transições possíveis estão entre parênteses.

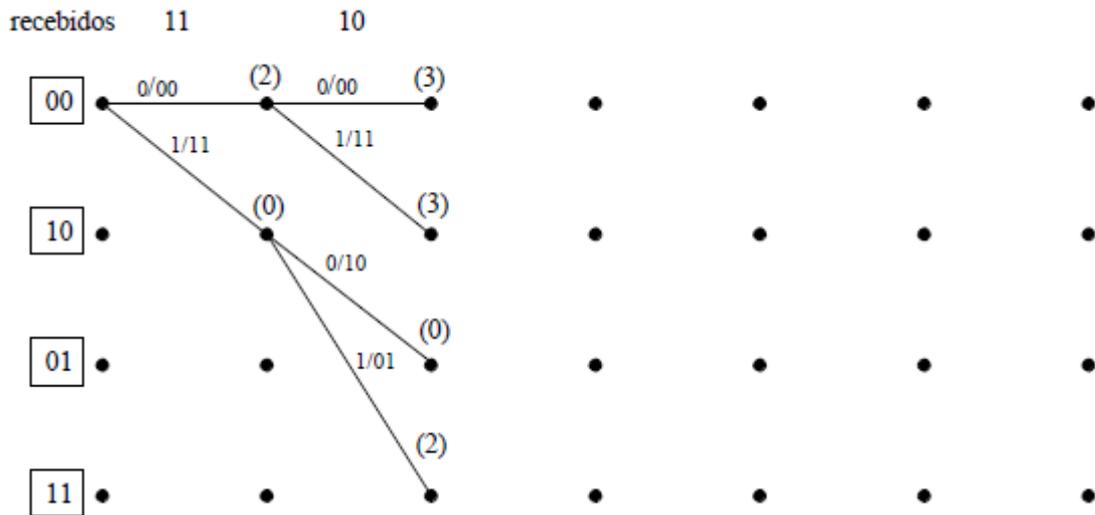


FIGURA 8.5 – Cálculo das distâncias de Hamming dos dois primeiros passos em Viterbi.
Fonte: INATEL

Esse procedimento de cálculo de distância de Hamming, para todos os trechos possíveis, deve ser seguido até o fim. Deve-se permanecer com o caminho que possua a menor distância. No exemplo em questão, obtém-se o seguinte resultado:

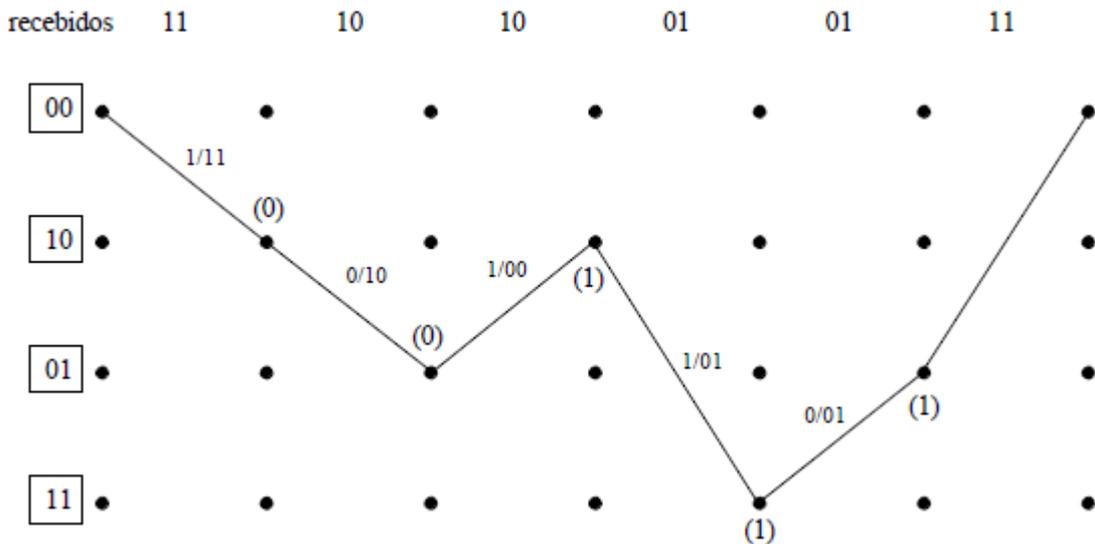


FIGURA 8.6 – Menor caminho de Hamming.
Fonte: INATEL

A menor distância de Hamming proporciona o caminho de Hamming, sendo este a mensagem mais provável de ter sido enviada. Como a distância de Hamming encontrada foi de 1, significa que o erro estava presente em apenas um bit.

Por fim, para decodificar a mensagem enviada basta verificar em cada trecho, o bit de entrada (algarismo a esquerda da barra), resultando na sequência [1 0 1 1 0 0]. O que corrobora com a mensagem inicial, $m=[1 0 1 1]$.

Ressalte-se que os dois últimos bits [0 0] decorrem da inércia intrínseca à memória.

8.2.2. Códigos TURBO

Na busca incessante em alcançar o limite da capacidade do canal de Shannon, os projetistas aumentaram em muito a complexidade dos dois tipos de códigos corretores de erros mencionados acima. Esse aumento de complexidade causa invariavelmente um crescimento na palavra de código, seja de um código de bloco linear, seja um comprimento de restrição de um código convolucional, o que segundo Haykin (2001, p.704) “por sua vez, faz com que a complexidade computacional de um decodificador de probabilidade máxima se eleve exponencialmente. Em última análise, atingimos um ponto em que a complexidade do decodificador é tão elevada que se torna fisicamente irrealizável”.

Uma nova abordagem então surgiu como mecanismo de contornar tal problema.

A codificação turbo emprega, via de regra, dois codificadores e um intercalador (ou entrelaçador ou permutador). A função do intercalador é embaralhar a ordem dos símbolos, fazendo com que a sequência de saída possua uma ordenação diferente da sequência de entrada. Essa atuação tem por finalidade proteger a informação de erros em rajada.

Já os codificadores podem ser dispostos em série ou em paralelo. Na codificação, não há vedação quanto ao uso do mesmo código em ambos os codificadores.

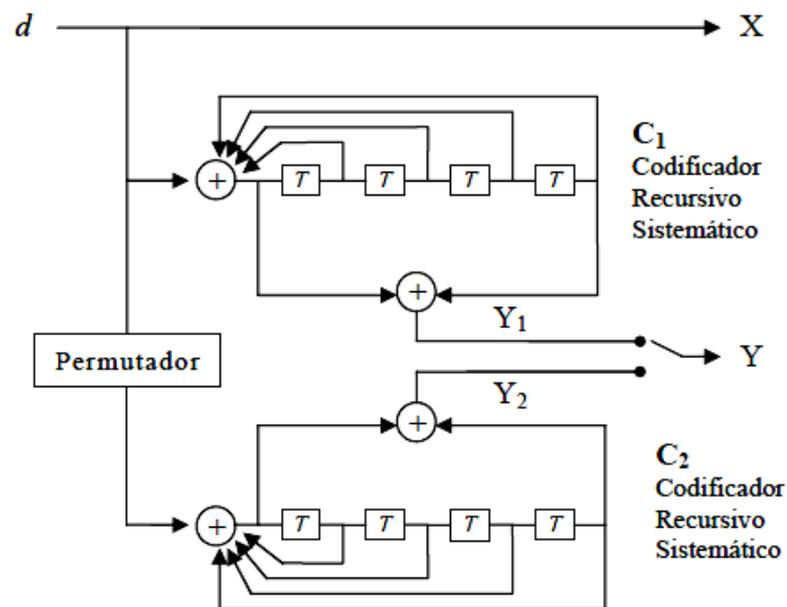


FIGURA 8.7 – Exemplo de codificadores em paralelo na codificação Turbo.

Fonte: Martins (2004, p.24).

No exemplo acima, foi colacionado um codificador Turbo formado por dois codificadores em paralelo, pois estes atuam sobre a sequência de bits da entrada, e não sobre uma sequência já codificada (método serial). Sua saída consiste em uma concatenação das duas saídas codificadas e do sinal de entrada, tendo, portanto, uma taxa de 1/3.

A decodificação Turbo é implementada baseando-se em uma decodificação iterativa, ou seja, há no sistema uma decodificação e uma posterior realimentação, de modo que essas etapas se sucedem reiteradas vezes produzindo saídas suaves.

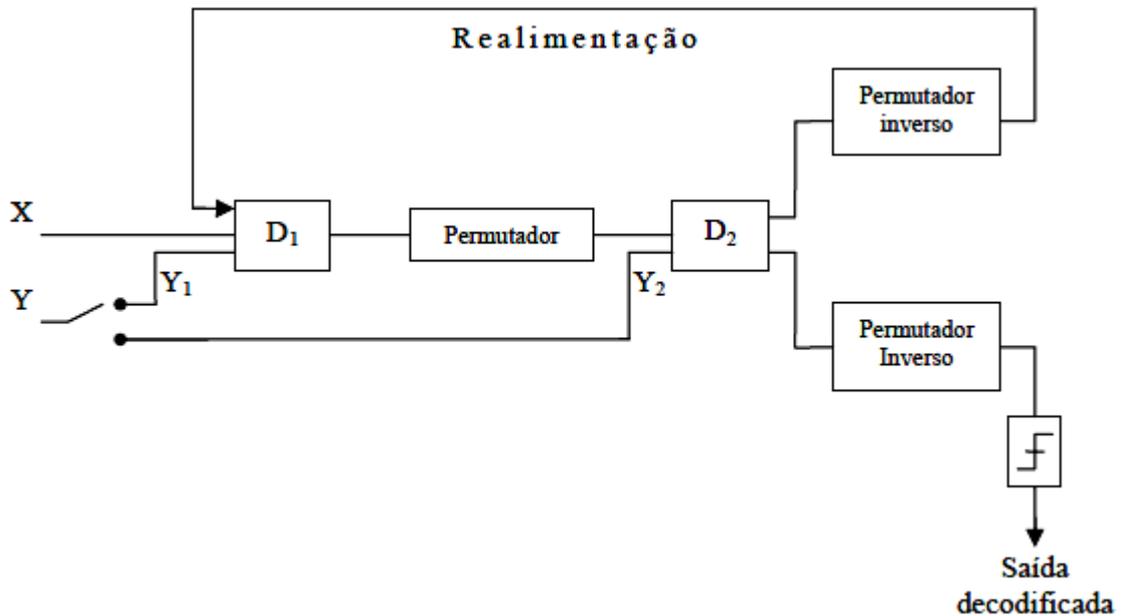


FIGURA 8.8 – Decodificador Turbo.
Fonte: Martins (2004, p. 26).

Conforme Martins (2004, p. 26),

A sequência Y é distribuída para os decodificadores constituintes D1 e D2 separada nas duas sequências Y1 e Y2, cada uma correspondente aos codificadores C1 e C2 (...). Na primeira iteração, D1 receberá as sequências X e Y1, produzindo um refinamento da informação que será utilizado por D2, isto é, D1 irá fazer uma estimativa das probabilidades associadas a cada bit da sequência transmitida. Essa estimativa, chamada informação a posteriori, combinadas com os valores de probabilidades recebidos do demodulador (entrada suave) formam a informação extrínseca. Essa informação será utilizada na próxima meia iteração como nova informação a priori. Na segunda meia iteração, D2, a partir da informação recebida por D1 (considerada por D2 como informação a priori) e da informação recebida do demodulador, gerará sua informação extrínseca.

Ainda segundo o mencionado autor (2004, p. 26),

A medida que as iterações vão ocorrendo, a contribuição dada por cada decodificador constituinte diminui progressivamente. (...). Após um número pré-estabelecido de iterações (tipicamente 6) o processo é interrompido e uma decisão abrupta (*hard decision*) é tomada para cada bit.

Essa conversão de saídas suaves em valores abruptos é realizada a partir de um algoritmo, que pode ser o critério de máximo a posteriori (MAP).

De acordo com o referido critério, e tomando como exemplo uma sinalização de apenas dois sinais (+1, -1), o critério MAP “escolhe” qual será o valor de saída, se +1 ou -1, de acordo com a probabilidade ofertada dos sinais de entrada suaves. Matematicamente, tem-se:

$$P(d = +1 | x) \underset{H2}{\overset{H1}{>}} P(d = -1 | x)$$

Essa equação significa que o sistema escolherá a hipótese H1, caso a probabilidade de haver um valor de entrada +1, dado que x saiu, ser maior que a probabilidade de d ter assumido o valor de -1, dado que na saída consta x ; ou o sistema escolherá a hipótese H2, caso contrário.

O critério de escolha pode ser mais bem compreendido ao se visualizar uma contaminação do sinal de entrada no sistema que implementa o critério MAP por um ruído AWGN. Caso isso ocorra, a função densidade de probabilidade dos sinais que outrora deveriam ser +1 ou -1 ficariam conforme as curvas gaussianas abaixo, sendo o limiar γ o critério de decisão. Maior que γ , o sinal equivale a +1, menor que γ , o sinal equivale a -1.

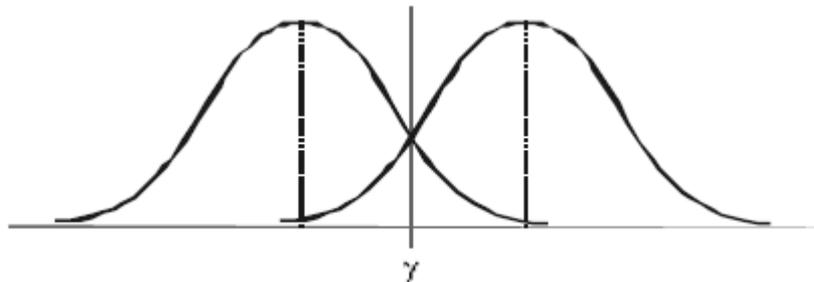


FIGURA 8.9 – Exemplo de critério MAP para sinais antipodais.
Fonte: Guimarães (2002, p. 13).

9. REGULAÇÃO E PADRONIZAÇÃO

Pode-se diferenciar os conceitos de regulação e padronização tendo como base o organismo que o realiza. Sendo o Governo, trata-se de uma regulação, sendo uma entidade particular, será uma padronização.

A diferenciação é essencial para saber os efeitos decorrentes das duas normatizações (a regulação trata-se de uma normatização de direito, ou *de iure*; e a padronização é uma normatização de fato, ou *de facto*).

Como a regulação provém de um organismo estatal, o seu descumprimento poderá acarretar sanções administrativas, como multas ou mesmo a suspensão da atividade. Já a padronização ocorre quando uma empresa (ou um consórcio de empresas) estipula padrões a serem seguidos naquele setor, de sorte que os mais variados modelos de equipamentos possam comunicar-se entre si, sem que haja incompatibilidades técnicas.

Resumindo, o interesse da empresa em respeitar a regulação estatal é para não sofrer penalidades jurídicas, já o interesse em seguir uma dada padronização é meramente técnico e econômico.

9.1. PADRONIZAÇÃO NO MUNDO

Tendo em vista a grande perspectiva de mercado surgido com a possibilidade de usar as redes elétricas para transmitir dados, diversos consórcios passaram a desenvolver padrões, a fim de permitir uma comunicação entre diversos tipos de equipamentos.

9.1.1. HomePlug Powerline Alliance

Como consigna Held (2006, p.92), “o padrão HomePlug surgiu em março de 2000, quando a HomePlug PowerLine Alliance foi fundada por 13 empresas” e estas começaram a desenvolver as técnicas de transmissão de dados via rede elétrica.

A primeira especificação lançada foi o HomePlug 1.0 em 2001, que definia a tecnologia necessária para a transmissão de dados a 14 Mbps.

A pesquisa avançou e em 2005 foi lançado o padrão HomePlug AV que diz ser possível alcançar taxas de 200 Mbps. Para isso esse padrão utiliza técnicas avançadas como o código turbo convolucional para detecção de erros e a modulação OFDM com 1155 subportadoras.

O objetivo do padrão Homeplug AV, por oferecer uma alta taxa de transmissão de dados, é possibilitar que os novos aparelhos domésticos, como HDTV, tocadores de *Blu-ray* e videogames, possam ter acesso à rede em locais onde não há pontos de acesso, bastando apenas uma conexão com tomada elétrica.

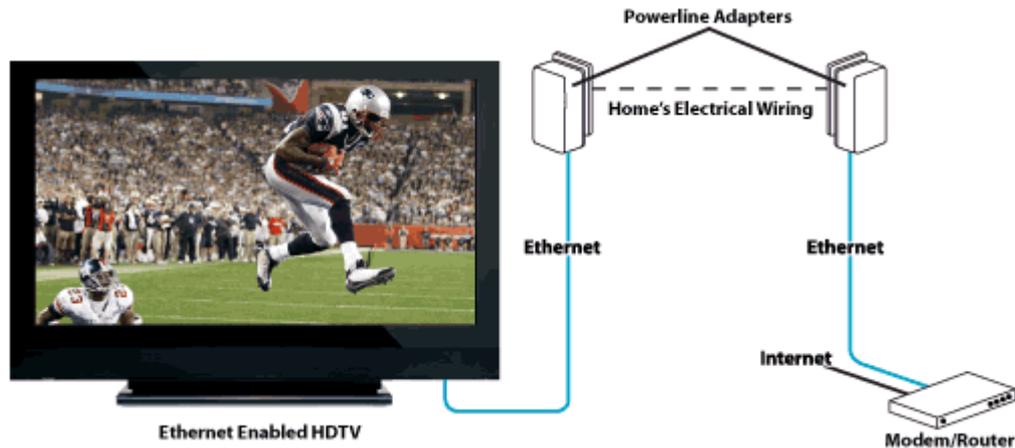


FIGURA 9.1. – Conexão de uma HDTV com a internet via PLC.
Fonte: HomePlug Power Alliance

Recentemente, foi lançado o padrão HomePlug GreenPHY, onde o mote central não é a transmissão massificada de dados (comunicação de apenas 10 Mbps), e sim a comunicação robusta entre os medidores de energia dos usuários e as distribuidoras de energia, de sorte que essas últimas possam monitorar o consumo, propondo aos consumidores alternativas para combater o desperdício de eletricidade, tendo em vista o novo enfoque da energia inteligente.

A energia inteligente é que hoje se chama de um consumo mais racional da energia elétrica. Como o consumo de energia aumenta a cada ano no mundo inteiro, e a entrada dos carros movidos à eletricidade no mercado irá impulsionar ainda mais esse crescimento, as companhias elétricas agora se voltam para auxiliar o consumo mais eficiente de eletricidade.

Atualmente, o consórcio HomePlug Alliance é o maior do mundo em se tratando de PLC, contando hoje com mais de 70 empresas afiliadas e superando a marca de 40 milhões de equipamentos produzidos.

9.1.2. OPERA

Embora o projeto OPERA (*Open PLC European Research Alliance*) embora seja mais acanhado que o HomePlug Powerline Alliance, contando com cerca de 35 parceiros, entre eles companhias e universidades, é nele que o Brasil encontra-se inserido, sendo o único país não europeu a participar deste projeto.

Importante ressaltar que enquanto os padrões HomePlug 1.0 e AV têm como desiderato criar uma rede PLC indoor de alta velocidade, o padrão OPERA tem como escopo levar a Internet à todos os europeus a um custo acessível.

9.2. REGULAÇÃO DO SETOR NO BRASIL

Recentemente, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) expediram resoluções normativas regulando o setor de PLC.

A ANEEL, por meio da Resolução Nº 375, de agosto de 2009, regula “a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais” (Art. 1).

Essa resolução não dispõe de normatizações técnicas, apresentando apenas as definições do que seja PLC, prestadora de serviço PLC e distribuidora, e limitando-se a trazer em seu bojo algumas obrigações contratuais entre a prestadora de serviço PLC e a distribuidora de energia elétrica.

Entretanto, a Resolução Nº 527, de 8 de abril de 2009, da ANATEL dispõe sobre uma série de aspectos técnicos que devem ser respeitados pelas prestadoras de serviço PLC, a fim de que o uso de tal técnica não acarrete prejuízos a outros setores de telecomunicações.

Tal resolução aduz ser a faixa de frequência de 1,705 MHz a 50 MHz como a disponível para o uso nas redes elétricas. Dispondo ainda sobre algumas definições, como:

Art. 4º Para os efeitos deste Regulamento, considera-se:

I – BPL: banda larga por meio de redes de energia elétrica;

II – Faixas de exclusão: faixas de radiofrequências em que os sistemas BPL não poderão emitir sinais;

III – Interferência Prejudicial: qualquer emissão, irradiação ou indução que obstrua, degrade seriamente ou interrompa repetidamente a telecomunicação;

IV – Linha de distribuição de Baixa Tensão (BT): linha de distribuição de energia elétrica com tensão nominal igual ou inferior a 1kV, situada entre os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica e as instalações do usuário BPL, podendo ser aérea ou subterrânea;

V – Linha de distribuição de Média Tensão (MT): linha de distribuição de energia elétrica com tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV, situada entre as subestações e os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica, podendo ser aérea ou subterrânea;

VI – Radiação indesejada: fluxo de energia indesejado liberado sob a forma de ondas de rádio, por uma fonte qualquer;

VII – Rede de distribuição de Baixa Tensão (RBT): conjunto de instalações de distribuição de energia elétrica, com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV;

VIII – Rede de distribuição de Média Tensão (RMT): conjunto de instalações de distribuição de energia elétrica, com tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV;

IX – Zona de proteção de estações costeiras: compreende a área circunscrita ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações costeiras listadas no Anexo I;

X – Zona de proteção de estações terrestres: compreende a área circunscrita ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações terrestres listadas no Anexo II;

XI – Zona de exclusão de estações terrestres: compreende a área circunscrita ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações terrestres listadas no Anexo III;

XII – Zona de exclusão de presídios: compreende a área restrita aos limites dos estabelecimentos penitenciários.

Essas definições iniciais são necessárias para a compreensão da resolução, tendo esse sido elaborada com o objetivo primordial de minimizar a possível interferência, gerada pela radiação eletromagnética proveniente do sistema PLC, nos outros sistemas de telecomunicações.

O escopo de tal regulamento mostra-se evidente, pois a primeira disposição técnica versa sobre os limites de radiação emitidos das redes de baixa e média tensão.

Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RBT

Faixa de frequências (MHz)	Intensidade de campo (microvolt por metro)	Distância da Medida (metro)
1,705-30	30	30
30-50	100	3

TABELA 9.1 – Limites de radiações indesejadas nos sistemas de baixa tensão

Fonte: ANATEL

Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RMT

Faixa de frequências (MHz)	Intensidade de campo (microvolt por metro)	Distância da Medida (metro)
1,705-30	30	30
30-50	90	10

TABELA 9.2 - Limites de radiações indesejadas nos sistemas de média tensão

FONTE: ANATEL

A ANATEL limita ainda algumas faixas de frequência no uso de redes de média tensão com o escopo de proteger o serviço móvel aeronáutico e o radioamador. Bem como veda o uso do PLC em determinadas áreas, como zonas de presídios e zonas de estações terrestres (localidades específicas listadas em um anexo da resolução).

9. HOMEPLUG STANDARD

O HomePlug PowerLine Alliance é um consórcio de várias empresas que projetam e constroem equipamentos para a tecnologia PLC. Esse consórcio vem elaborando padronizações ao longo do tempo com o intuito de popularizar a tecnologia. Dessa forma, foram desenvolvidos os padrões em PLC, quais sejam, o HomePlug 1.0 e HomePlug AV. Atualmente, aposta-se em um novo paradigma, o padrão Home Plug GreenPHY.

Os padrões HomePlug, por terem uma maior divulgação no mercado, serão objeto de análises mais detalhadas.

10.1. HOMEPLUG 1.0

O HomePlug 1.0 foi o primeiro padrão desenvolvido pela HomePlug PowerLine Alliance, tendo como finalidade a comunicação indoor entre dispositivos.

O padrão HomePlug 1.0 utiliza a modulação OFDM, sendo esta constituída de 84 subportadoras igualmente espaçadas em um espectro que abrange as frequência de 4,5 MHz a 21 MHz. Isso equivale dizer que cada símbolo da mensagem enviada trafega em uma única portadora por vez.

Esse padrão, com vistas a uma maior integração, emprega o mesmo formato dos quadros (*frames*) do padrão 802.3 da IEEE.

Destarte, há dois tipos de quadros. O primeiro, mais longo, é utilizado para a transmissão de dados, já o segundo, mais curto, é usado para o procedimento ARQ de correção de erros.

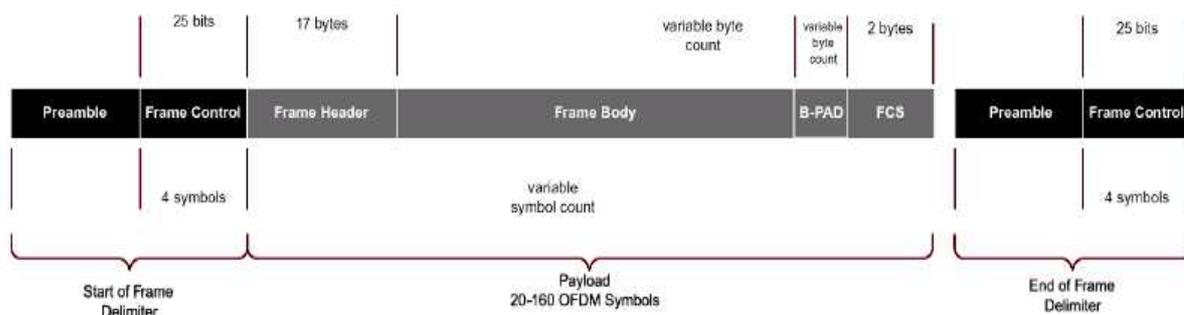


FIGURA 10.1 – Formato do Quadro longo
Fonte: HomePlug Powerline Alliance

O quadro longo consiste em três partes, o delimitador inicial, o corpo da mensagem (*payload*) e o delimitador final. Ambos os delimitadores possuem a mesma configuração, sendo compostos por um preâmbulo e um campo chamado de *frame control*. Os delimitadores têm como finalidade precípua determinar a disponibilidade do meio. O preâmbulo, que é um sinal Spread Spectrum, tem por finalidade apenas indicar o início do delimitador. O campo *frame control* carrega diferentes informações, sendo composto por outros campos, dependendo de que tipo de delimitador se faz presente. Abaixo, segue uma tabela contendo o significado de cada campo pertencente ao *frame control*.

Tipo de delimitador	Campo	Significado
Início de Quadro	Type	Indica se após o envio do delimitador espera-se, ou não, por uma resposta de confirmação
	Contention Control	Se setado em 1, veta que outros nodos Homeplugs com prioridade igual ou inferior ao do quadro atual acessem o meio
	Frame Length	Tamanho do corpo (<i>payload</i>) em símbolos OFDM.
	Tone Map Index	Índice enviado ao receptor contendo informação sobre a adaptação do canal.
Fim de Quadro	Type	Indica se após o envio do delimitador espera-se, ou não, por uma resposta de confirmação
	Contention Control	Função igual a do mesmo campo do delimitador início de quadro. A redundância, no entanto, aumenta a sincronia
	Channel Access Priority	Prioridade de precedência do atual quadro longo
Resposta	Type	Pode ser ACK (reconhecimento positivo), NACK ou FAIL (reconhecimento negativo por falta recursos)
	Channel Access Priority	Prioridade de precedência de quadro longo

TABELA 10.1 – Campos internos do *frame control* e suas funções.

O corpo da mensagem é iniciado por um cabeçalho de 17 bytes. Esse campo contém o endereço do emissor, do receptor e informação de segmentação. Após o cabeçalho segue o corpo da mensagem, contendo os dados a serem transmitidos. Vale ressaltar que o tamanho desse campo varia de 20 a, no máximo, 160 símbolos OFDM, caso a informação seja maior que o limite máximo, uma segmentação se faz necessária. O campo FCS (*frame check sequency*) detecta ainda erros existentes na transmissão.

O HomePlug 1.0 utiliza uma variante do protocolo CSMA/CA de acesso múltiplo ao meio. Dessa forma, cada terminal verifica se há a presença de portadoras, e somente no caso de resposta negativa é que ocorrerá o envio de dados pelo canal.

No entanto, para verificar se há, ou não, portadoras no canal, o nodo utiliza-se de uma combinação de sensor de portadora física (*Physical Carrier Sense*), PCS, e sensor de portadora virtual (*Virtual Carrier Sense*), VCS. O mote dessa combinação é identificar o estado do meio, verificando se ele está, ou não, ocupado, e por quanto tempo. Através do PCS, observa-se a presença de preâmbulos no meio de transmissão (há transmissão no canal), já o VCS recolhe informações do campo *frame control*, como o tempo de duração do quadro presente no meio e o seu grau de prioridade.

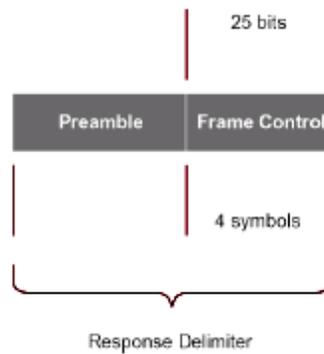


FIGURA 10.2 – Formato do Quadro Curto
Fonte: HomePlug Powerline Alliance

No HomePlug 1.0 existem 4 tipos de prioridade, sendo o nível mais elevado responsável pela transmissão de voz com atrasos máximos de 10 milissegundos, e o nível mínimo, utilizado para transmissões de melhor esforço.

Tal padrão ainda emprega os algoritmos de Viterbi e Reed-Solomon como codificações de canal, de modo a suavizar as interferências provindas de um meio tão ruidoso, como a rede elétrica.

Por fim, vale ressaltar a performance alcançada por esse padrão comparado com outros disponíveis no mercado. Sendo, o *Physical Layer* a taxa, na qual, dados de carga (*payload*) são transmitidos, e *MAC Layer*, a taxa na qual os bytes do quadro Ethernet são transmitidos.

	HomePlug	10 Mbps Ethernet	IEEE 802.11b	HomePNA (2 Baud)	HomePNA (4 Baud)
Physical Layer	13.78	10	11	16	32
MAC Layer	8.2	9.8	7.48	14.6	26.9

TABELA 10.2 - Comparação entre HomePlug 1.0 e outras tecnologias
Fonte: HomePlug Powerline Alliance

10.2. HOMEPLUG AV

O padrão HomePlug AV surgiu com o objetivo de aumentar a eficiência e as taxas de transmissão alcançadas pelo padrão HomePlug 1.0 a partir de melhorias nas tecnologias existentes. Com isso, esse novo padrão é capaz de alcançar taxas de canal de 200 Mbps e ainda ser totalmente compatível com o padrão antecedente, o HomePlug 1.0.

Na camada física, o HomePlug AV emprega também a tecnologia OFDM, entretanto, são aplicadas 1155 subportadoras, das quais 917 são para o tráfego de dados. As modulações BPSK, QPSK e (16 até 1024) QAM operam conjuntamente e são aplicadas independentemente (tecnologia *adaptive bit loading*) a cada subportadora, tendo em vista as características do canal decorrentes das distorções causadas por multipercurso, pois é cediço que o sinal ao ser transmitido por uma estação pode chegar ao destinatário por diferentes caminhos, resultando em uma distorção no sinal de chegada. Essa distorção causada pelos multipercursos afeta o espectro de frequência do sinal de modo variado.

A fim de contornar o mencionado problema, e ainda manter elevadas taxas de transferência, o padrão AV emprega a tecnologia *adaptive bit loading* e o mapa tonal (*map tone*). É através do *adaptive bit loading* que se permite modular cada subportadora diferentemente, possibilitando que faixas de frequências menos atingidas pela distorção de multipercurso, beneficiem-se de uma modulação com maior taxa de transmissão (*e.g.* 1024 QAM). Ao revés, faixas de frequências severamente influenciadas pelo ruído multipercurso, devem aplicar modulações menos suscetíveis a erros, porém não tão velozes (*e.g.* BPSK).

Para que o receptor identifique que tipo de modulação será utilizada em cada subportadora, faz-se necessário o uso dos mapas tonais, pois eles indicam a potência do sinal no receptor para cada faixa de frequência. Destarte, verificado a força do sinal, o receptor envia ao transmissor o mapa tonal para que o transmissor module as subportadoras de acordo com o mapa recebido. Ressalte-se, ainda, que cada estação possui um mapa tonal para cada outra estação presente na rede.

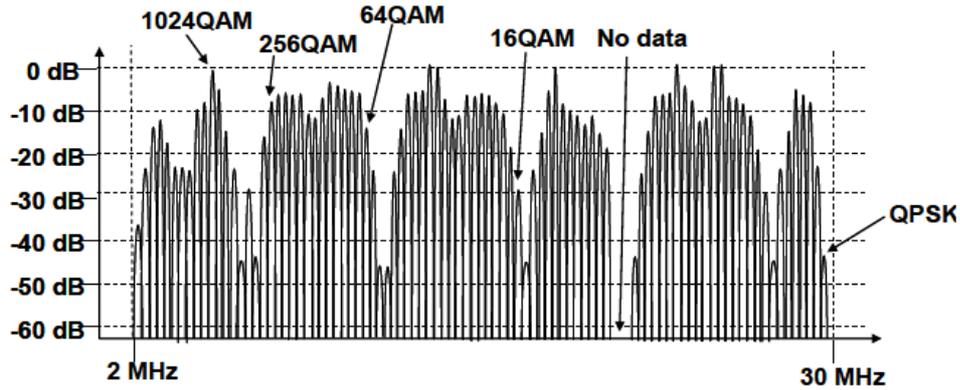


FIGURA 10.3 – Adaptive bit loading e o tone map.
 Fonte: HomePlug Powerline Alliance

O processo de transmissão do sinal é realizado considerando as diferenças entre os dados do padrão HomePlug 1.0 e os dados do campo *frame control*, havendo três processos diferentes, um para o *frame control* do padrão Homeplug 1.0, um para o *frame control* do Homeplug AV e outro para os dados. Primeiramente, realiza-se a codificação do canal, após essa etapa há a concatenação entre os dados advindos dos três processos diferentes. Posteriormente, modula-se a mensagem empregando OFDM, insere-se os preâmbulos e finalmente se acopla, através do *Analog Feed End (AFE)*, o sinal à linha de energia.

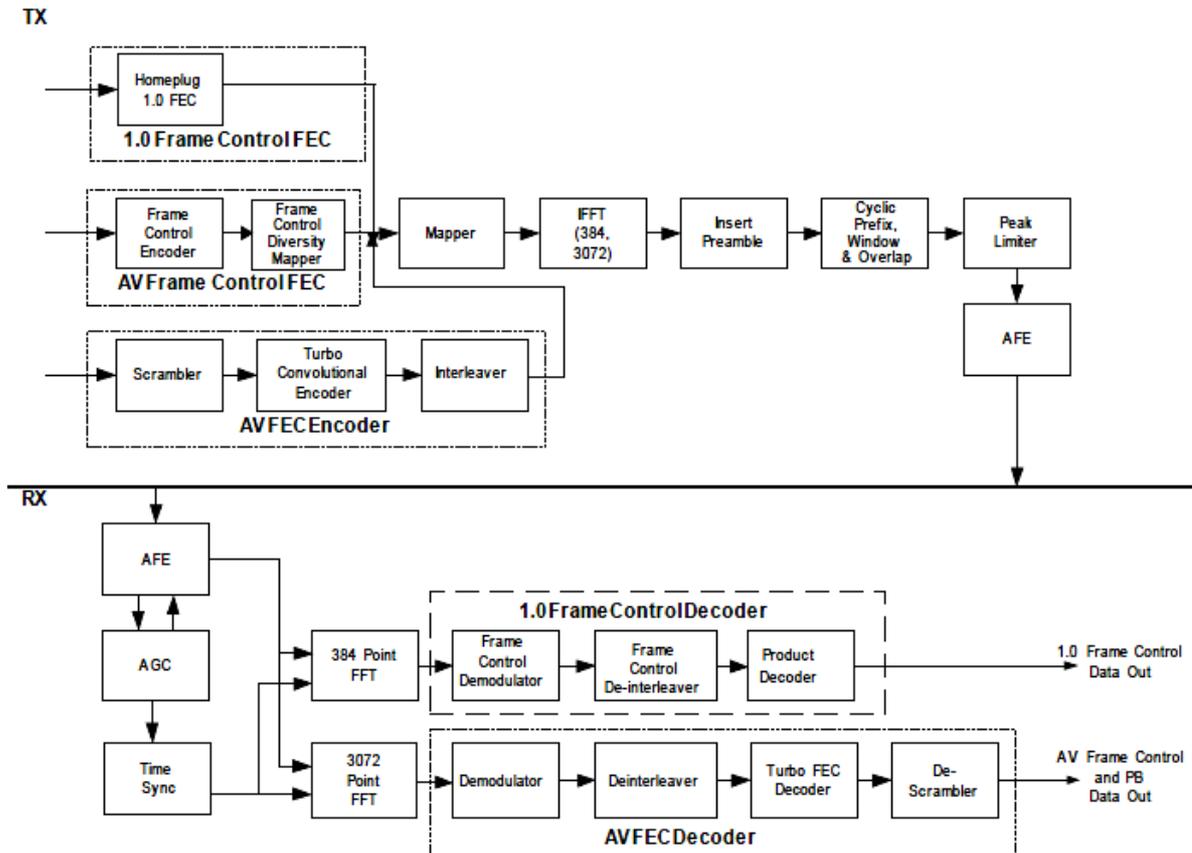


FIGURA 10.4 – Diagrama de blocos de transmissão e recepção no HomePlug AV
 Fonte: HomePlug Powerline Alliance

O processo de recepção é bastante similar, todavia, os passos são invertidos. O bloco AFE recebe o sinal e envia ao demodulador que o recupera, através de FFT. Como pode haver dois tipos de dados – padrões HomePlug 1.0 e AV – utiliza-se o “*time sinc*” para separar os dados em circuitos diversos.

Um conceito novo aplicado ao HomePlug AV é o de *Central Coordinator* (CCo). Cada CCo controla uma rede lógica AV (*AV Logic Network*, AVLN), que consiste em várias estações AV, todas compartilhando a mesma chave de membros da rede (*Network Membership Key*, NMK). A NMK permite que apenas membros da mesma rede possam se comunicar, evitando acessos de estações remotas.

O CCo é responsável pelo escalonamento de alocações de tempo entre os participantes da rede e pela permissão de entrada na rede. Quando uma nova estação AV é ligada, ela “escuta” a linha de energia a fim de procurar uma rede lógica AV (AVLN), e assim conectar-se a ela. Caso não haja uma AVLN disponível, essa estação cria uma nova rede e se torna o CCo. Destarte, toda estação que venha a se conectar a rede de energia, poderá fazer parte daquela AVLN, desde que seja aceita pelo CCo. A topologia de acesso, desse modo, configura-se como estrela.

Quanto a camada MAC do HomePlug AV, esta é projetada para obter uma alta eficiência, suportando as tecnologias TDMA, CSMA e inclui ainda uma sincronização com os ciclos de corrente alternada (AC). A TDMA provê qualidade de serviço (QoS) ao reservar um tempo de uso do canal livre de colisões para estações pretensas a transmitir. Isso facilita a transmissão de informações que não devem suportar atrasos, como vídeo e áudio. A CSMA, ao garantir quatro níveis de prioridade, possibilita que mensagens de maior prioridade trafeguem com maior facilidade. Aqui, o padrão Homeplug AV beneficia o tráfego de informações mais prioritárias. Já a sincronização AC permite uma adaptação melhor aos ruídos do canal.

O Coordenador Central (CCO) é quem controla a atividade na rede, alocando *slots* de tempo para o uso da TDMA e escalonando o uso da CSMA.

O padrão Homeplug AV sincroniza o tempo de envio de dados com o ciclo de corrente alternada (AC). Isso ocorre para promover uma maior adaptação ao canal, pois diminui a interferência entre o sinal de informação e o ciclo de linha. Denomina-se, então, de *Beacon period*, o período de 2 (dois) ciclos AC, sendo o mesmo dividido em três regiões: região *beacon*, região CSMA e região livre de disputa (ou *contention free*).

O CCo, a fim de coordenar as estações pertencentes a sua rede, promove, durante a região *beacon*, o escalonamento de informações na rede. Após essa organização de como se

dará o envio de dados, cada tipo de dados, de acordo com a prioridade e QoS (qualidade de serviço) utilizará, ora a região CSMA, ora a região reservada a TDMA (*contention free*). A região CSMA é utilizada quando não há a especificação dos requisitos de QoS e quando o tráfego de dados é de curta duração. Já a região *contention free* é dividida em outras duas regiões, a persistente e a não-persistente. É na *contention free* persistente onde ocorrem o tráfego de dados mais intenso e onde o CCo realiza o escalonamento para sua utilização. A região *contention free* não persistente é interessante apenas para a necessidade ocasional de mais região *contention free* persistente ser requisitada. Caso isso não ocorra, ela transmuda-se em região CSMA.

Por fim, ressalta-se que apesar de os dados trafegarem diretamente entre estações, o CCo monitora-os, com o objetivo de alocar mais regiões de transmissão, caso as mensagens sejam demasiadamente grandes

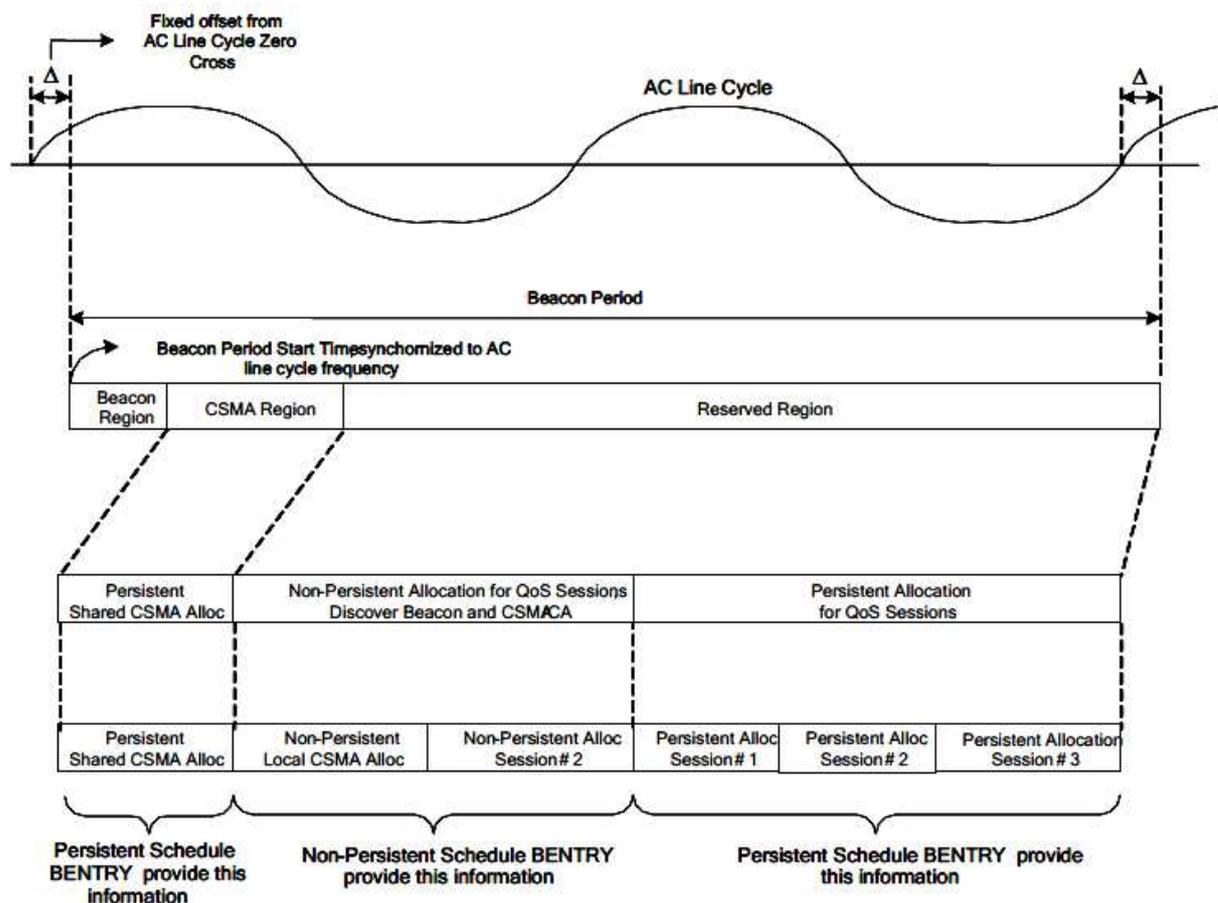


FIGURA 10.5 – Período Beacon.
Fonte: HomePlug Powerline Alliance

10.3. HOMEPLUG GREENPHY

O padrão HomePlug GreenPHY propõe, não mais um aumento de velocidade no tráfego de dados, mas sim uma nova proposta de comunicação. Nesse padrão, a comunicação passa a ser também outdoor, porém não com o escopo de levar a rede mundial de computadores a todos, e sim comunicar os mais variados equipamentos domésticos (e principalmente o medidor de energia) às empresas de fornecimento de energia.

Essa proposta tem como finalidade melhorar o consumo de energia elétrica por parte dos consumidores, evitando o consumo desnecessário, indo assim ao encontro do que hoje se chama de energia inteligente (*smart energy*).

Para que essa nova tecnologia tenha sucesso, requer-se que ela possua alta confiabilidade e compatibilidade com um elevado número de aparelhos, total onipresença na rede elétrica interna à residência e, por fim, baixo custo e baixa potência a fim de ser embarcado em qualquer aparelho

A base da tecnologia HomePlug GreenPHY é o padrão HomePlug AV, de forma a haver inteira compatibilidade entre elas ao trafegarem na rede de energia elétrica indoor.

Na camada física, a faixa de frequência é a mesma, o padrão GreePHY (ou somente GP) também emprega OFDM com 1155 subportadoras. Contudo, suporta somente o formato QPSK de modulação, em razão da velocidade não ser um ponto primordial, não havendo, portanto, obrigação do uso do mapeamento de tons.

Quanto à camada MAC, há semelhanças entre os padrões GP e o AV. Os dois padrões empregam o protocolo CSMA como meio de acesso ao canal, entretanto, o padrão AV, utiliza também TDMA, o que não ocorre no padrão GreenPHY.

	Parameter	HomePlug AV	HomePlug GP
PHY	Spectrum	2 MHz to 30 MHz	2 MHz to 30 MHz
	Modulation	OFDM	OFDM
	# Subcarriers	1155	1155
	Subcarrier spacing	24.414 kHz	24.414 kHz
	Supported subcarrier modulation formats	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM, 1024 QAM	QPSK only
	Data FEC	Turbo code Rate ½ or Rate 16/21 (punctured)	Turbo code Rate ½ only
	Supported data rates	ROBO: 4 Mbps to 10 Mbps Adaptive Bit Loading: 20 Mbps to 200 Mbps	ROBO: 4 Mbps to 10 Mbps

TABELA 10.3 – Comparativo entre a camada física dos padrões HomePlug AV e GP.

Fonte: HomePlug Power Alliance

11. ANÁLISE DE CASO

No presente capítulo são apresentados alguns casos (testes de campo) em que foi utilizada a tecnologia PLC, com o fito de observar o seu comportamento em ambientes próximos àqueles que serão encontrados na realidade prática.

11.1. ANÁLISE EM REDES DOMÉSTICAS (AMBIENTE INDOOR)

Como dito anteriormente, o PLC *indoor* é a topologia PLC que mais cresce comercialmente no mundo. A seguir, serão expostas experiências com o objetivo de medir as taxas de transferências alcançadas no padrão Homeplug.

Araújo, *et al* realizaram testes em laboratórios da Universidade Federal de Goiás e CEFET – Goiás a fim de observar o desempenho do padrão HomePlug AV quando influenciado por ruídos provocados por equipamentos ligados na mesma rede elétrica.

Araújo, *et al* (p. 03) assim descrevem os equipamentos empregados:

Os seguintes dispositivos foram conectados à rede como fontes interferentes: uma furadeira da marca Makita HP 1500, potência de 1.010W e tensão de alimentação de 220Vca; um secador de cabelos profissional da marca TANY Blue 2000, potência de 1.400W, frequência entre 50-60Hz e tensão de alimentação de 220Vca; um carregador de celular da marca Nokia, modelo ACP-12E, entrada de 100-240Vca, frequência entre 50-60Hz, corrente de 125mA, saída de 5,7Vcc e corrente de 800mA; e um liquidificador da marca Walita Quick Clean, modelo RI1730, com potência de 400W, frequência de 60Hz e tensão de alimentação de 220Vca.

A experiência foi realizada da seguinte maneira: dois computadores, ligados à rede elétrica a uma distância de aproximadamente 5m, transferiam um arquivo de 1,5 GB, enquanto aparelhos elétricos eram ligados à mesma rede a fim de monitorar o desempenho da rede PLC sob influência de outros equipamentos. As taxas de transferência eram atualizadas em 5 e 5 segundos.

Confirmaram, eles, que os mencionados dispositivos influem severamente no desempenho do sistema. Se a taxa de transferência média ficou em 33,42 Mbps quando nenhum outro aparelho foi utilizado, ao ligar o liquidificador, a mesma caiu a 1,99 Mbps. Com o secador, a taxa média foi de 3,5 Mbps; com a furadeira, 16,4 Mbps, mas com um alto grau de variância, tendo alcançado picos de 30,1 Mbps e vales de 0,02 Mbps; com o

carregador de celular, a taxa média foi de 18,78 Mbps. Ressalta-se que a taxa de transferência prometida por essa tecnologia é de 200 Mbps.

Finalmente, Araújo, *et al* comentam o experimento quando todos os aparelhos foram ligados conjuntamente:

Com todos os equipamentos conectados à rede, as taxas de transmissão se mantiveram constantes, com taxa média de transmissão de 2,44Mbps/s. No entanto, por volta de 1 minuto e meio de transmissão, houve uma queda na conexão, e o sistema ficou sem transmissão por aproximadamente 15 segundos. A variância das taxas de transmissão foi de 1,51 e o desvio padrão calculado foi de 1,23.

No mesmo sentido, quanto à influência de dispositivos acoplados à rede elétrica, é o experimento de Campos, Moreira e Araújo (2007). Em uma experiência similar a citada anteriormente, porém realizada na Universidade Potiguar e empregando o padrão HomePlug 1.0, Campos, Moreira e Araújo ligaram diferentes tipos de aparelhos elétricos e eletrônicos, como uma televisão, dois carregadores de celular de marcas diferentes e uma lâmpada.

Campos, Moreira e Araújo (2007, p.03) assim relatam as influências externas a que estava sujeito o experimento:

Além dessas cargas, deve-se considerar que o ambiente de testes, a UnP, unidade Salgado Filho possui fator de potência em torno de 0,86. Esse ambiente é bastante poluído de ruídos, pois possui inúmeras fontes chaveadas (computadores, lâmpadas com reatores eletrônicos, etc.). Além disso, o laboratório possui 42 lâmpadas com reatores eletrônicos e um exaustor, que é uma fonte de ruído com o espectro suave.

A metodologia do experimento consistiu na transferência de uma arquivo de 146 MB por intermédio de computadores separados a uma distância de 10 m, sendo realizadas cerca de 5 medições por dia (uma para cada dispositivo eletrônico, mais uma de controle), durante vários dias.

Campos, Araújo e Moreira (2007) obtiveram as seguintes taxas de transferências média e o desvio padrão, respectivamente: sem o emprego de cargas (2,8001 Mbps e 0,3141), com a televisão (3,0067 Mbps e 0,2775), com uma lâmpada (2,0519 Mbps e 0,4528), com o carregador de celular Startac (2,1331 Mbps e 0,4473), por fim, com o carregador de celular V220 (2,5669 Mbps e 0,3063). Destaca-se, no entanto, que a taxa de transferência prometida pelo padrão utilizado é de 8,2 Mbps.

Por derradeiro, menciona-se os testes realizados pela HomePlug Powerline Alliance quanto ao padrão Homeplug 1.0. A desenvolvedora dos padrões PLC mais difundidos no mundo afirma que realizou testes de campo em mais de 500 residências nos Estados Unidos e

no Canadá. Tais experiências foram divididas em dois grupos, um com apenas dois nodos (pontos de transferência) e outro, com cinco nodos.

Afirma-se que nas experiências realizadas com dois nodos, em torno de 75% das conexões obtiveram a taxa média superior, ou igual, a 5 Mbps. Já 97% das conexões superaram a taxa média de 1,5 Mbps.

Quanto aos experimentos com cinco nodos, 97% das conexões alcançaram taxas médias superiores a 3 Mbps.

11.2. ANÁLISE EM REDES PÚBLICAS (AMBIENTE OUTDOOR)

J-J Lee *et al* (2006, p.445) reporta que a primeira experiência com PLC outdoor na Coreia do Sul foi realizada com 20 famílias na área de Chunggae, subúrbio de Euiwang, cidade próxima a Seul. Nesse experimento, a rede PLC percorria uma distância de 5 km, abrangendo linhas de média e baixa tensão.

A rede elétrica coreana possui as mesmas características que a brasileira. A tensão da rede de média voltagem é de 22,9 KV, composta por quatro fios, sendo três deles de tensão e um terra. Cada assinante recebe uma tensão de 220 V e, cerca de, 30 famílias são conectadas a cada transformador MV/BV.

No experimento, os modems dos assinantes suportavam taxas superiores a 24 Mbps usando a banda de frequência de 2-23 MHz.

A taxa de transferência média alcançada na tentativa coreana ficou em torno de 3 a 5 Mbps.

No Brasil, algumas tentativas já foram realizadas a fim de estudar o atual estágio de desenvolvimento do PLC. Em Minas Gerais, a CEMIG (Companhia Elétrica de Minas Gerais) implantou em 2001 um projeto PLC, divulgando os resultados em 2003.

O projeto da CEMIG abrangia redes de média e baixa tensão, fornecendo acesso à Internet para 40 famílias. Operou durante um ano (360 dias), sendo que após seis meses houve uma recalibração do sistema, em função do fim do racionamento de energia que vigorava à época em todo o país.

Foram distribuídos formulários de avaliação da conexão aos clientes, e após a calibração, 63% elegeram como bom, e 31% como ótimo o serviço prestado.

Observa-se que a taxa de transferência nominal era de 2 Mbps e a média alcançada chegou a 500 kbps em algumas localidades.

12. CONCLUSÃO

A tecnologia PLC em razão de possuir a vantagem de aumentar a rede de acesso à internet empregando uma estrutura já existente, estrutura essa que cobre quase a totalidade dos lares nacionais, revelou-se, a priori, bastante atraente. Todavia, os empecilhos técnicos reduziram a euforia inicial.

Atualmente, o PLC encontra-se em uma situação contraditória, enquanto a tecnologia indoor começa a ser divulgada comercialmente, até mesmo aqui no Brasil, a *outdoor* encontra-se ainda em fase de teste.

No campo da tecnologia *indoor*, o PLC está em um estágio mais desenvolvido, onde diversas empresas já comercializam produtos com essa tecnologia. Neste setor, a grande dificuldade não é técnica, e sim comercial, ao enfrentar a concorrência da tecnologia *wireless*.

A tecnologia *wireless* ao introduzir seus produtos no mercado primeiro e por ter recebido uma excelente aceitação dos consumidores, hoje é o grande empecilho para o crescimento vertiginoso da tecnologia PLC. Ademais, como o *wireless* tornou-se amplamente difundido no mercado, o preço dos seus produtos pôde, atualmente, alcançar um patamar mais simpático aos consumidores. Resta saber se com o advento de novas padronizações HomePlug visando a transferência de dados em alta velocidade com o objetivo de possibilitar o envio de vídeos em alta definição, o PLC suplante o *wireless*, ao menos nesse novo ramo.

No que compete ao PLC outdoor, verifica-se a ausência de implementações em larga escala dessa tecnologia no mundo todo. É bem verdade, que há no Brasil alguns projetos piloto que englobam, bairros (*e.g.* Restiga em Porto Alegre) ou somente alguns lares em pequenas cidades (*e.g.* Barreirinhas no Maranhão), mas que estão longe de assegurar uma resposta definitiva quanto à possibilidade técnica de o PLC ser empregado como rede de acesso à Internet para milhares de assinantes.

É cediço, que se antes o PLC estava longe de ser uma alternativa para a transmissão de dados em alta velocidade, hoje, em razão dos constantes avanços em diversas áreas do conhecimento, isso já é uma realidade. Destarte, se hoje essa tecnologia é uma completa desconhecida ao público leigo nacional, o desenvolvimento alcançado por ela em pouco tempo, faz acreditar que dentro de alguns anos ela se fará presente nos lares brasileiros.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Sérgio G. de *et al.* **Análise de Transmissão e Desempenho de Redes PLC em Baixa Tensão.** Universidade Federal de Goiás e Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Disponível em: < <http://www.i2ts.org/I2TS2008/include/Portuguese%20Papers/50266.pdf> >. Acesso em: 28 nov. 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n° 375:** regulamenta a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais. Brasília, 2009. Disponível: < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009375.pdf> >. Acesso em: 27 abr. 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações. **Resolução n° 527:** aprova o Regulamento sobre Condições de uso de Radiofrequência por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalPaginaEspecialPesquisa.do?acao=&tipoConteudoHtml=1&codNoticia=17976>>. Acesso em: 27 abr. 2011.

CAMPOS, Antonio L. P. S.; MOREIRA, Ricardo C. O.; ARAÚJO, Lincoln M. de. Análise de Desempenho de uma Rede de Computadores que Utiliza o Padrão HomePlug 1.0. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 5, N° 5, Setembro 2007.** Disponível em: < http://www.fapparnaiba.com.br/moodle/data/43/Analise_de_Desempenho_de_rede.pdf >. Acesso em: 28 nov. 2010.

CARCELLE, Xavier. **Power Line Communications in Practice.** Artech House, 2006.

CEMIG. **Projeto PLC CEMIG.** 2003. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/plc/>>. Acesso em: 01 dez. 2010.

COSTA, João Sérgio da Silva. **Internet via rede elétrica.** Cataguases: Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases, 2009. 36 p. Monografia (Bacharelado em Sistemas de Informação). Faculdade de Sistemas de Informação. Cataguases, Minas Gerais. 2009. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/25781279/Monografia-Oficial-Joao-Sergio-Da-Silva-Costa>>. Acesso em: 27 jul. 2010.

FACCIONI, André Umberto. **Análise sobre a tecnologia PLC (Power line communication).** 2008. Trabalho de Conclusão de Curso - Senai. Florianópolis, Santa Catarina. E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial, Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 54-74, 2° Sem., 2008. Disponível em: <<http://revista.ctai.senai.br/index.php/edicao01/article/viewDownloadInterstitial/48/36>>. Acesso em: 27 jul. 2010.

GOMES, Geraldo Gil R.. **Códigos Convolucionais.** INATEL. Disponível em: <<http://www.inatel.br/docentes/dayan/TP504/Antes2009/ClassNotes/C%C3%B3digos/na-tp102-2.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2010.

GUIMARÃES, Dayani Adionel. **Decodificação Turbo de código de paridade simples.** INATEL. Volume 05, ano 01, junho de 2002. Disponível em: <

http://www2.inatel.br/revista/volume-05-n1/artigos/Artigo_Decodificacao_Turbo_de_Codigo_Produto_de_Paridade_S.pdf >. Acesso em: 27 abr. 2011.

HAYKIN, Simon. **Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais**. 4ª edição. Artmed Editora S/A. 2001. Título original: Communication Systems.

HAYKIN, Simon. MOHER, Michael. **Sistemas modernos de comunicações wireless**. Tradução de Glayson Eduardo de Figueredo e José Lucimar do Nascimento. Editora Bookman. 2008. Título original: Modern Wireless Communications.

HELD, Gilbert. **Understanding broadband over power line**. Nova York: Taylor & Francis Group. 2006.

HOMEPLUG. **HomePlug 1.0 Technology White Paper**. Disponível em: < http://www.homeplug.org/tech/whitepapers/HP_1.0_TechnicalWhitePaper_FINAL.pdf >. Acesso em: 25 ago. 2010.

HOMEPLUG. **HomePlug AV Technology White Paper**. Disponível em: < http://www.homeplug.org/tech/whitepapers/HPAV-White-Paper_050818.pdf >. Acesso em: 08 set. 2010.

HOMEPLUG. **HomePlug Field Test Results: A White Paper**. Disponível em: < http://www.homeplug.org/tech/whitepapers/HomePlug_Field_Test_Results.pdf >. Acesso em: 28 nov. 2010.

HOMEPLUG. **HomePlug GreenPhy Technology White Paper**. Disponível em: <http://www.homeplug.org/tech/whitepapers/HomePlug_Green_PHY_whitepaper_100614.pdf>. Acesso em: 08 set. 2010.

HRASNICA, Halid; HAIDINE, Abdelfatteh; LEHNERT, Ralf. **Broadband Powerline Communications Networks. Network Design**. John Wiley & Sons, Ltd. 2004.

KUROSE, James F.; ROSS, Keith W.. **Redes de computadores e a internet. Uma abordagem top-down**. Tradução de Arlete Simille Marques. 3ª edição. Pearson Addison Wesley. 2006. Título original: Computer networking: a top down approach featuring the internet.

LAGES, Walter Fatter. **Comunicação de dados através da rede elétrica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/plr/relfin.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2010.

LEE, Jae-Jo et al. **Power line communication network trial and management in Korea**. 2006. International Journal Of Network Management. Disponível em: <http://atlanta.postech.ac.kr/papers/IJNM/06/Power_line_communication_network_trial_and_management_in_Korea.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2010.

MARTINS, João Paulo Trierveiler. **Turbo decodificadores de bloco de baixa potência para comunicação digital sem fio**. São Paulo: USP. 2004. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, São Paulo. 2004.

Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-27092004-161308/pt-br.php>>. Acesso em: 25 abr. 2011.

PINTO, Ernesto Leite; ALBUQUERQUE, Cláudio Penedo de. **A técnica de transmissão OFDM**. Instituto Militar de Engenharia. 2002. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/27.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2010.

SANTOS, Túlio Ligneul. **Power line communication**. 2008. UFRJ. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: < http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/tulio/index.htm >. Acesso em: 27 jul. 2010.

SILVA, Amanda Cunha. **Fundamentos teóricos dos Códigos Turbo**. 2004. PUC. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://www.cetuc.puc-rio.br/~amanda.cunha/Relat%F3rio/relatorio2.pdf> >. Acesso em: 20 out. 2010.

VARGAS, Alessandra Antunes. **Estudo sobre comunicação de dados via rede elétrica para aplicações de automação residencial/predial**. Porto Alegre: UFRGS. 2004. 65 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Computação). Faculdade de Engenharia de Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: < <http://www.scribd.com/doc/32285509/ComunicacaoDe-DadosViaRedeEletricaPLC-by-coldFire> >. Acesso em: 25 ago. 2010.