

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



DIOGO FRIGGI ALLOCHIO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA DE
MÉDIA TENSÃO CONFORME PADRÃO OPERA**

VITÓRIA – ES
NOVEMBRO/2016

DIOGO FRIGGI ALLOCHIO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA DE
MÉDIA TENSÃO CONFORME PADRÃO OPERA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Diogo Friggi Allochio**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para graduação no curso de engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva

VITÓRIA – ES
NOVEMBRO/2016

DIOGO FRIGGI ALLOCHIO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE DADOS
VIA REDE ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO CONFORME PADRÃO OPERA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Diogo Friggi Allochio**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 9, de dezembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Dr. Helder Roberto de O. Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

MEng. Leonardo Ribas Martins Castor
Examinador

RESUMO

Apresenta-se nesse trabalho uma análise do desempenho da comunicação via rede elétrica de média tensão. Os resultados são obtidos com simulação de um sistema de portadoras ortogonais OFDM, seguido algumas especificações OPERA. Falará sobre as técnicas utilizadas pelo OPERA e irá comparar e explicar algumas das técnicas para melhoria de desempenho, como modulação por treliça e embaralhamento de bits. Também serão comparadas as modulações Q-PSK, 8-PSK, 4-DPSK e 8-DPSK, cada uma dessas modulações serão comparadas com codificação de erro e embaralhamento de bits. A análise do tamanho do prefixo cíclico também será realizada.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação dos parâmetros OFDM para o padrão OPERA	38
Tabela 2: Especificação dos parâmetros OFDM para o Tipo III ($B_{w\text{eff}} = 10 \text{ MHz}$)	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação entre as classes PLC	17
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Topologia típica de uma rede PLC.....	18
Figura 2: Topologia da rede de acesso PLC	19
Figura 2: Topologia da rede de acesso PLC	19
Figura 3: Topologia da rede de acesso interno ou last inch access	20
Figura 4: Resposta impulsiva da propagação de um pulso em um canal multipercurso	20
Figura 5: Resposta impulsiva e resposta em frequência do sinal transmitido	21
Figura 6: Típico cenário de acesso	23
Figura 7: Estrutura BPL proposta pelo OPERA	24
Figura 8: Estrutura do delimitador.....	24
Figura 9: Inserção de redundância do CRC-16.....	25
Figura 10: Definições do código RS.....	26
Figura 11: Formação dos bits de Reed-Solomon.....	26
Figura 12: Emparelhamento dos bits	27
Figura 13: Mapeamento Hurto.....	28
Figura 14: Mapeamento adaptativo	29
Figura 15: Codificador não recursivo	31
Figura 16: Codificador recursivo e sistemático	31
Figura 17: Codificador convolucional especificado pelo OPERA	32
Figura 18: Resolução tempo frequência dos sistemas uniportadora e multiportadora	32
Figura 19: Divisão do espectro de frequência em N subcanais	33
Figura 20: Modelo de transmissão multiportadora.....	34
Figura 21: Modelo de recepção multiportadora.....	34
Figura 22: Comparação entre modulação FDM e modulação OFDM	35
Figura 23: Representação do sinal transmitido, recebido e do canal.....	36
Figura 24: Representação da comunicação sem intervalo de guarda e sem prefixo cíclico...	36
Figura 25: Representação da comunicação com intervalo de guarda e sem prefixo cíclico ..	37
Figura 26; Representação da comunicação com prefixo cíclico	37
Figura 27: Topologia de testes.....	39
Figura 28: Topologia da rede de média tensão utilizada na investigação da tecnologia BPL	40
Figura 29: Resposta em frequência do canal utilizado nas simulações	41
Figura 30: Resposta impulsiva obtida através da resposta em frequência	42
Figura 31: Modulação B-PSK	44

Figura 32: Diagrama de constelação B-PSK	45
Figura 33: Modulação Q-PSK	46
Figura 34: Diagrama de constelação Q-PSK para padrão A	47
Figura 35: Diagrama de constelação Q-PSK para padrão B.....	47
Figura 36: Modulação DPSK.....	48
Figura 37: Diagrama de constelação DPSK	49
Figura 38: Modelo básico do sistema OFDM.....	50
Figura 39: Modelo OFDM com codificação	52
Figura 40: Codificador convolucional utilizado para as simulações	53
Figura 41: Modelo OFDM com codificação e embaralhador de bits	53
Figura 42: Comparação do BER por SNR para diferentes tipos de prefixo cíclico	55
Figura 43: Comparação do BER por SNR para PSK em um canal AWGN.....	56
Figura 44: Comparação do BER por SNR para DPSK em um canal AWGN.....	57
Figura 45: Comparação do BER x SNR do sinal codificado e não codificado em um canal AWGN para Q-PSK	58
Figura 46: Comparação do BER x SNR do sinal codificado e não codificado em um canal AWGN para 8-PSK	59
Figura 47: Diagrama de constelação Q-PSK.....	60
Figura 48: Diagrama de constelação 8-PSK.....	60
Figura 49: Comparação do BER x SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 4-PSK.....	61
Figura 50: Comparação do BER por SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 4-DPSK	62
Figura 51: Comparação do BER por SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 8-PSK.....	63
Figura 52: Comparação do BER x SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 8-DPSK.....	64
Figura 53: Comparação do BER por SNR para Q-PSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN	65
Figura 54: Comparação do BER por SNR para Q-DPSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN	66
Figura 55: Comparação do BER por SNR para 8-PSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN	66

Figura 56: Comparação do BER por SNR para 8-DPSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN	67
Figura 57: Comparação do BER x SNR para 8-DPSK com um codificador mais complexo	68
Figura 58: Comparando o sistema com embaralhamento de bits e sem embaralhamento de bits.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPL	Broadband over power line
FDM	Frequency Division Multiplexing
ISI	Intersymbol interference
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPERA	Open PLC European Reserach Alliance
PLC	Power line communication
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
PSK	Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
Q-PSK	Quadrature Phase Shift Keying
CENELEC	European committee for electrotechnical standardization
ARPA	Advanced Research Projects Agency
ADSL	Asymmetric Didital Subscriber Line
PHY	physical layer
MAC	medium access control
SNR	signal-to-Noise Ratio
Bw	bandwidth
CP	Prefixo cíclico
TCM	Trellis-Coded Modulation
NSC	Non-Systematic Convolutional
RSC	Recursive Systematic Convolutional
DPSK	Differential Phase Shift Keying
AWGN	Additive white Gaussian noise
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
NB-PLC	Narrowband Powerline
ICI	Interchannel interference
LLC	Logical Link Control
FDR	Frequency Division Reapeater
4D-TCM	Four dimension Trellis-Coded Modulation
FPGA	Field Programmable Gate Array
DSP	Digital Signal Processor
BER	Bit error rate

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Estado da Arte	12
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos.....	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específico.....	15
2	COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA	16
2.1	Histórico	16
2.2	Classes de PLC	17
2.3	Topologia.....	17
2.3.1	Rede de distribuição	18
2.3.2	Rede de acesso.....	18
2.3.2.1	Rede de acesso externo ou Last Mile Access (outdoor).....	19
2.3.2.2	Rede de acesso interno ou Last Inch Access (indoor).....	19
2.4	Caracterização do canal PLC.....	20
3	ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA FÍSICA DO OPERA	22
3.1	Topologia.....	22
3.2	Visão Geral.....	23
3.3	Delimitador para correção de erros	24
3.3.1	CRC-16.....	24
3.3.2	Reed-Solomon	25
3.3.3	Embaralhador de bits do delimitador	26
3.3.4	Data payload.....	27
3.4	Modos de mapeamento.....	27
3.4.1	Mapeamento Hurto.....	27
3.4.2	Mapeamento Adaptativo	28
3.5	Modulação codificada por treliça	29
3.5.1	Estrutura do codificador convolucional	30
3.6	Sistema Multiportadora	32
3.6.1	Modelo de transmissão multiportadora	34

3.6.2 Modelo de Recepção Multiportadora	34
3.7 Multiplexação OFDM	35
3.7.1 Prefixo cíclico.....	35
3.7.2 Especificação OPERA dos parâmetros OFDM.....	37
4 METODOLOGIA E SISTEMAS DE SIMULAÇÃO	39
4.1 Obtenção do prefixo cíclico.....	41
4.2 Modulação	43
4.2.1 Modulação em fase por chaveamento - PSK.....	44
4.2.2 Modulação por chaveamento de fase diferencial – DPSK.....	48
4.3 Simulação do sistema OFDM sem correção de erro	49
4.4 Simulação do sistema OFDM com correção de erro	52
4.5 Simulação do sistema OFDM com codificação e embaralhador de bits	53
5 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
5.1 Análise do prefixo cíclico.....	55
5.2 Análise do canal AWGN	56
5.3 Análise do equalizador	59
5.4 Análise do canal BPL com AWGN.....	60
5.5 Embaralhamento de bits	68
6 CONCLUSÕES	70
6.1 Proposta de trabalhos futuros	70
7 REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A internet teve seu início a partir do desenvolvimento da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada (*Advanced Research Projects Agency - ARPA*), do Departamento de Defesa dos EUA e hoje é um sistema de comunicação que atua em todo o mundo. (COSTA, et al., 2012).

Com a linha telefônica como meio de comunicação, a normatizada ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) surgiu no início do século 21 como a revolucionária tecnologia de última milha (*last mile*). As redes locais sem fio se tornaram a principal escolha das pessoas. A transmissão de dados pela rede elétrica tem sido estudada pelo fato de possuir um custo de instalação reduzido, alcance a altas taxas de transmissão e qualquer ponto de energia pode ser um ponto de acesso à rede. Os investimentos e custos operacionais na rede PLC (*power line communication*) estão ficando a cada ano mais competitivos. (SILVA, 2006) (Silva, et al., 2010).

As principais dúvidas em relação à PLC referem-se à interferência que os aparelhos elétricos exercem sobre ela, e assim, faz com que a tecnologia PLC seja questionada quanto à qualidade do serviço. As frequentes variações de impedância na rede e a topologia do canal ser de multipercurso também contestam a confiabilidade do sistema. (SILVA, 2006) (Silva, et al., 2010). Para tornar a rede elétrica mais confiável, no ponto de vista de comunicação, utiliza-se multiportadora OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), equalizadores, códigos de correção de erro, diferentes tipos de modulação e mapeamento, tornando o sistema mais eficiente.

1.1 Estado da Arte

A normatização da tecnologia de transmissão de dados pela rede elétrica era um problema, não se existiam muitas normas, mas tem evoluído muito ao longo dos anos. Um dos primeiros padrões para transmissão de dados pela rede elétrica foram especificados pelo CENELEC (*European committee for electrotechnical standardization*), estabelecia bandas de frequência entre 3 e 148.5 kHz e não serviria para as aplicações dos dias atuais, visto que suportavam baixas taxas de transmissão. Os padrões dos americanos e dos japoneses, especificavam uma banda de frequência de até 500 kHz. Esses padrões com baixa taxa de transmissão suportavam

serviços como dados de automação, transmissão de dados de baixa velocidade e alguns canais de voz. (CASTOR, 2015) (SILVA, 2006).

Com a evolução das técnicas e das tecnologias houve uma evolução nos sistemas PLC, passando de dezenas para centenas de Mbps. Para que a tecnologia PLC pudesse sair da posição de banda estreita e ocupar um lugar de concorrência com os sistemas atuais de banda larga, novas especificações da camada física precisariam surgir. (CASTOR, 2015). Um dos maiores grupos no assunto é a *HomePlug Alliance* que é um grupo de empresas que trabalham em conjunto para desenvolver especificações de tecnologia e programas de certificação e logotipo para rede eléctrica. *HomePlug Alliance* reúne pesquisadores individuais, tecnólogos, pensadores estratégicos, especialistas do mercado, tomadores de decisão de negócios e desenvolvedores de produtos e os une em um objetivo comum: criar um ambiente global onde as comunicações através da rede eléctrica possam prosperar. Sua primeira versão estabelecia uma taxa de transmissão de aproximadamente 14 Mbps, o *HomePlug 1.0*. Produtos atuais chegam a ter 240 Mbps, o *HomePlug AV2*. (HomePlug Alliance, 2016).

O OPERA (*Open PLC European Research Alliance*) representa um consórcio formado por instituições dos diversos segmentos da Europa tais como companhias do ramo de energia, indústrias, provedores de tecnologia, operadoras de telecomunicações, Universidades, empresas de desenvolvimento, engenharia e consultoria, com o objetivo de fornecer serviços de banda larga a baixo custo de instalação aos seus cidadãos. (CASTOR, 2015). A proposta do OPERA foi impulsionar a tecnologia PLC em todos os diferentes aspectos (padronização, aprimoramento da tecnologia, serviços de telecomunicações, serviços em redes inteligentes e disseminação) de modo a permitir que ela se tornasse uma alternativa competitiva frente às demais tecnologias utilizadas no fornecimento de banda larga aos usuários. O resultado final deste grupo de trabalho, encerrado em 2008, foi a criação de um padrão preliminar para sistemas de acesso banda larga operando sobre redes eléctricas. Um forte inibidor para o desenvolvimento rápido das redes PLC banda larga é a falta de padronização nos produtos. Com a ausência da padronização, não existe interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes. Com a padronização do OPERA pode ser que os produtos de diferentes fabricantes possam se comunicar. (CASTOR, 2015) (Pereira, et al., 2011).

A Anatel publicou a Resolução 527, que aprova o regulamento sobre condições de uso de rádio frequências por sistemas de banda larga por meio de redes de energia elétrica (PLC). O documento estabelece os critérios e parâmetros técnicos que permitem a utilização dessa tecnologia de forma harmônica com as aplicações de radiocomunicação que usam radiofrequência na faixa entre 1,705 MHz e 50 MHz. Todos os equipamentos deverão possuir certificados de homologação da ANATEL. (CASTOR, 2015) (Silva, et al., 2010).

1.2 Justificativa

O trabalho permitirá estudar diferentes técnicas para melhorar o desempenho de um sistema PLC, que apresenta características de um canal multipercurso. Serão seguidas algumas propostas do OPERA para ter como base o sistema PLC simulado. Serão utilizados diferentes tipos de mapeamento e de códigos de correção de erros, também será utilizado equalizador. Serão apresentados os problemas causados pelo canal multipercurso. Cada técnica será analisada separadamente e analisada em conjunto. O sistema OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) será utilizado para minimizar os efeitos do canal multipercurso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho realizado irá simular diferentes características do sistema com rede BPL (*Broadband over power line*), o que permitirá obter informações importantes para uma eventual utilização dessa rede. Com as simulações serão obtidas as curvas de desempenho e a partir delas, será possível fazer diferentes análises quanto às características do sistema para poder melhorar o desempenho. Serão elaborados meios de se melhorar o desempenho do sistema, como modulação OFDM, utilização de diferentes tipos de mapeamento, codificação de erros, equalizadores, embaralhadores de bits (*interleaving*) e a partir do desempenho medido, será obtido um modelo que melhor configura esse sistema, além de um estudo sobre cada uma dessas técnicas.

1.3.2 Objetivos Específico

Visa verificar e analisar as formas de melhoria no desempenho da comunicação de dados via rede elétrica de média tensão e analisar o padrão OPERA. Tem como objetivos específicos:

- i. Descrever as características e os parâmetros do sistema BPL
- ii. Mostrar as especificações OPERA para a camada física
- iii. Explicar as técnicas para a melhora do sistema
- iv. Simular o comportamento de um sistema BPL para diferentes tipos de mapeamento
- v. Nas simulações utilizar códigos para correção de erro, equalizador e embaralhador de bit
- vi. Plotar curvas de desempenho afim de analisar as melhores condições do sistema.

2 COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA

2.1 Histórico

A tecnologia PLC não pode ser considerada nova, pois desde o início do século XX as redes elétricas têm sido utilizadas por empresas de energia elétrica para proteção de seções em caso de falhas em sistemas de transmissão e distribuição. Por volta de 1920 esse sistema foi e ainda é utilizado para telemetria, controle remoto e comunicação por voz. Estas aplicações eram caracterizadas pela largura de faixa estreita que utilizavam, trabalhando com frequências, sobre as linhas de energia, entre 3 kHz e 148,5 kHz. Surge em 1940 o termo *Power Line Carriers* para se referir a tecnologia PLC, mas se tornou viável somente nas décadas de 1970 e 1980, quando os primeiros padrões foram desenvolvidos. A partir de 1990 os estudos nessa tecnologia se intensificaram e novas técnicas de modulação e correção de erro foram propostas e novos padrões foram desenvolvidos. (Santos, 2016) (SILVA, 2006) (Teixeira, 2005).

Nos últimos anos tem-se investido muito na elaboração e na produção de tecnologia que permita a utilização da rede elétrica para a transmissão de dados em banda larga. Este esforço inclui o desenvolvimento de equipamentos para a rede de acesso, tanto em baixa quanto em média tensão, além de equipamentos a serem utilizados dentro das instalações do usuário. (Teixeira, 2005). Para permitir a transmissão de dados em banda larga, é necessária a utilização de frequências mais altas, tipicamente entre 1,6 MHz e 30 MHz. Os dispositivos atualmente disponíveis permitem capacidades de até 200 Mbit/s. A tecnologia PLC de banda larga também é denominada BPL (*Broadband over Power line*).

A tecnologia PLC pode utilizar, para transmissão de dados, tanto a rede de média tensão quanto a rede de baixa tensão. Pelo fato de utilizar a rede elétrica como canal de comunicação, não é necessário passar cabeamento, baixando assim, o custo de implantação da tecnologia. A utilização da rede elétrica para transmissão de dados permite que qualquer ponto de tomada seja, por exemplo, um ponto de acesso à internet, alcance de altas taxas de transmissão e pode ser utilizada para automação, controle e supervisão de equipamentos de segurança e eletroeletrônicos. Um grande problema dessa tecnologia é o ruído, causado pela interferência dos equipamentos ligados à rede elétrica, como motores, capacitores e eletrodomésticos. A

inserção de cargas na rede elétrica provoca variações de impedância e atenuações, o que contesta a confiabilidade da tecnologia. (KARASINSKI, 2015) (SILVA, 2006).

2.2 Classes de PLC

Existem duas classes de sistemas de comunicação PLC, o sistema de banda estreita (NB-PLC) e o sistema de banda larga (BPL). Esses sistemas se diferem em suas aplicações, taxas de transmissão, frequência de operação, e dependendo do caso de aplicação, também diferem no tipo de modulação. No quadro abaixo se apresentam algumas diferenças entre os tipos de sistema. (Santos, 2016).

Quadro 1: Comparação entre as classes PLC

	NB-PLC	BPL
Taxa de transmissão	Até 200 kbps	Acima de 1 Mbps
Frequência de Operação	Até 500 kHz	Acima de 2 MHz
Modulação	FSK, S-FSK, BPSK, SS, OFDM	OFDM
Aplicações	Automação Predial Energia Renovável Medições Avançadas Iluminação Pública Veículos Elétricos Redes Inteligentes	Internet HDTV Áudio Jogos

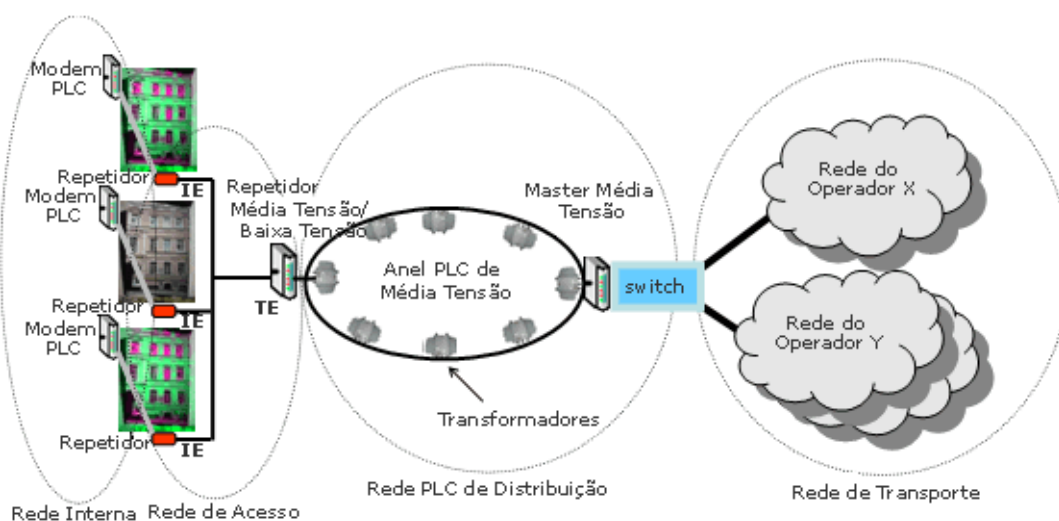
Fonte: Produção do próprio autor.

O BPL é utilizado para aplicações onde se necessita altas taxas de transmissão e esse será o foco do trabalho.

2.3 Topologia

A topologia típica de uma rede PLC contém três níveis de rede, são eles: a rede dos provedores de serviço ou rede de transporte, a rede de distribuição e a rede de acesso.

Figura 1: Topologia típica de uma rede PLC



Fonte: Teixeira, 2005

Pela figura a cima se observa que uma rede PLC pode ser constituída de apenas 4 tipos de equipamentos. O modem PLC, o repetidor de baixa tensão, o repetidor baixa tensão / média tensão e o mestre de média tensão. Dependendo do comprimento da linha pode ser que o repetidor de baixa tensão não seja necessário. (Teixeira, 2005) (SILVA, 2006).

2.3.1 Rede de distribuição

A rede PLC de distribuição interconecta os repetidores de baixa tensão / média tensão (TE), instalados junto aos transformadores de distribuição de energia elétrica e promove a interconexão do sinal PLC com a rede de transporte do operador de telecomunicações. Esta interligação é efetuada através de equipamento denominado mestre de média tensão. (Teixeira, 2005).

2.3.2 Rede de acesso

A comunicação da rede de acesso é controlada por um equipamento mestre, localizado em uma estação de base. Com o auxílio de acopladores de sinal este equipamento de transmissão de dados disponibiliza aos usuários a ele conectados no lado de baixa tensão, o sinal proveniente da provedora de serviços via cabos de fibra ótica, enlace de dados ou mesmo via cabos de energia de média tensão. O usuário capta o sinal em uma tomada, com auxílio de um modem

também com um acoplador para filtrar distorções harmônicas de baixa frequência. (SILVA, 2006) (Teixeira, 2005).

Figura 2: Topologia da rede de acesso PLC

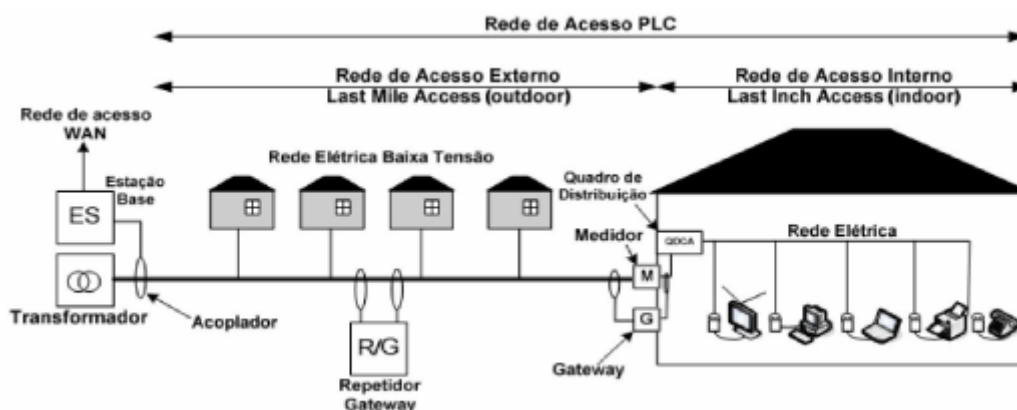


Figura 3: Topologia da rede de acesso PLC

Fonte: Teixeira, 2005

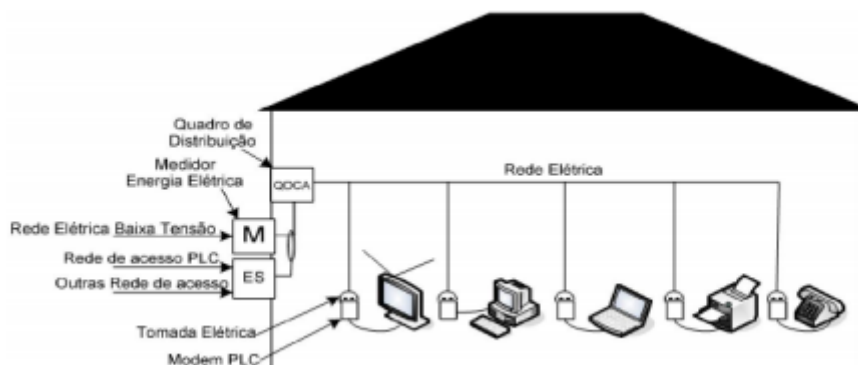
2.3.2.1 Rede de acesso externo ou *Last Mile Access (outdoor)*

A rede PLC *outdoor* é a rede de acesso que chega às residências, indústrias e comércios, que faz a conexão dos usuários com o sinal proveniente da provedora de serviços via cabos de fibra ótica, enlace de dados ou mesmo via cabos de energia de média tensão.

2.3.2.2 Rede de acesso interno ou *Last Inch Access (indoor)*

É a rede dentro das edificações. Este seguimento possibilita ampliar gradativamente o espectro das redes prediais, pois transforma todas as tomadas elétricas em ponto de acesso de sinais de dados para qualquer tipo de dispositivo. (Junior, 2009).

Figura 4: Topologia da rede de acesso interno ou *last inch access*

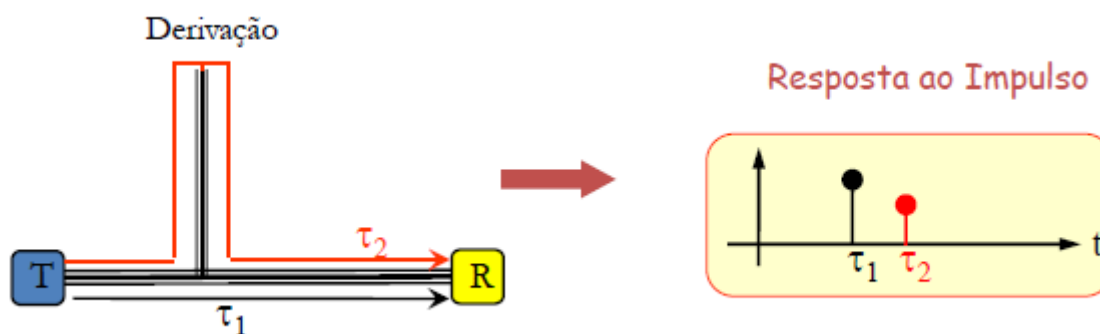


Fonte: Teixeira, 2005

2.4 Caracterização do canal PLC

O sistema PLC utiliza a rede elétrica como canal e a variação de impedâncias e atenuações faz com que o canal seja considerado um canal multipercurso. O sinal se propaga por diferentes caminhos e quando encontra uma derivação em que não está com impedância casada ocorre reflexão desse sinal. Na figura abaixo pode-se ver um transmissor e um receptor, a comunicação dos mesmos se dá em um canal multipercurso. O tempo para um sinal sair do transmissor e chegar ao receptor será de t_1 segundos para o caminho direto e de t_2 segundos se o sinal passar pela derivação, sendo que $t_1 < t_2$. Esse fato resultará em atraso de propagação.

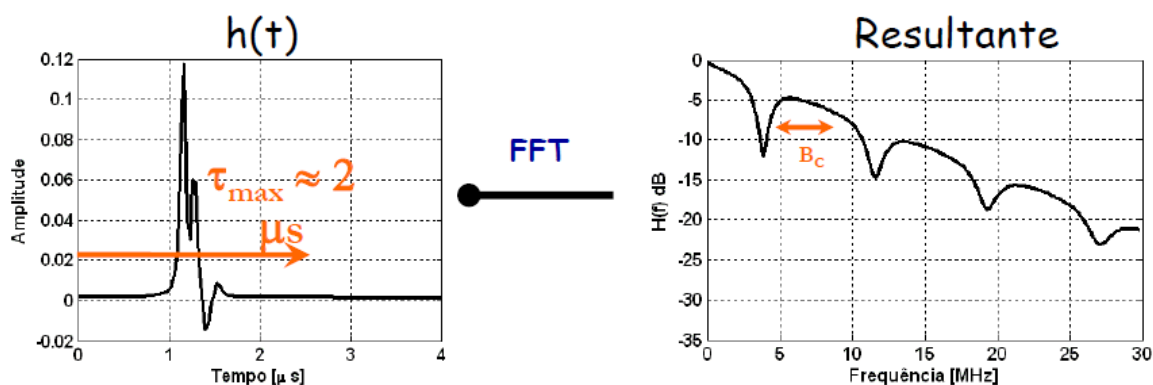
Figura 5: Resposta impulsiva da propagação de um pulso em um canal multipercurso



Fonte: Silva, 2006

Tendo a resposta ao impulso do canal, pode-se aplicar a transformada de Fourier e obter o gráfico da resposta em frequência.

Figura 6: Resposta impulsiva e resposta em frequência do sinal transmitido



Fonte: Silva, 2006

Da figura 5 pode-se ver que quando se tem um canal multipercusso há um espalhamento multipercusso no domínio do tempo. Se o sistema de comunicação for um sistema uniportadora, tem-se a taxa de transmissão é muito alta, sendo que um bit transmitido com tempo menor que $2 \mu\text{s}$, fazendo com que os vários bits cheguem nesse tempo e assim o receptor estará vendo um bit que na verdade está atrasado, ocasionando erro, também chamado de interferência intersimbólica (ISI). Também da figura acima pode-se ver a resposta em frequência do canal, pode-se perceber que ocorre a seletividade em frequência, isso faz com que a banda a ser utilizada diminua pois nos nulos há uma grande perda de informações. O resultado disso é a limitação da frequência máxima utilizável, uma vez que razões de incompatibilidade eletromagnéticas limitam o aumento da potência de transmissão. (Rocha, 2006) (SILVA, 2006).

3 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA FÍSICA DO OPERA

Diante do avanço do uso de redes elétricas como meio de transmissão de dados em banda larga BPL houve a necessidade de projeto e desenvolvimento de um padrão para comunicação de dados de alta velocidade através de redes de baixa e média tensão e assim a proposta OPERA foi impulsionar a tecnologia PLC em todos os diferentes aspectos, sendo que a padronização e o aprimoramento da tecnologia são os mais importantes para este trabalho, de modo a permitir que ela se tornasse uma alternativa competitiva frente as demais tecnologias utilizadas no fornecimento de banda larga aos usuários. O documento OPERA utilizado para o trabalho é uma especificação técnica da tecnologia IEEE P1901. Esse documento especificou a camada física (PHY), controle de acesso ao meio (MAC), da camada LLC (*Logical Link Control*) e da camada de convergência para a de dados BPL sobre as linhas elétricas para redes de acesso. (OPERA, 2007) (Oliveira, 2016). O trabalho realizado levará em conta apenas a camada física.

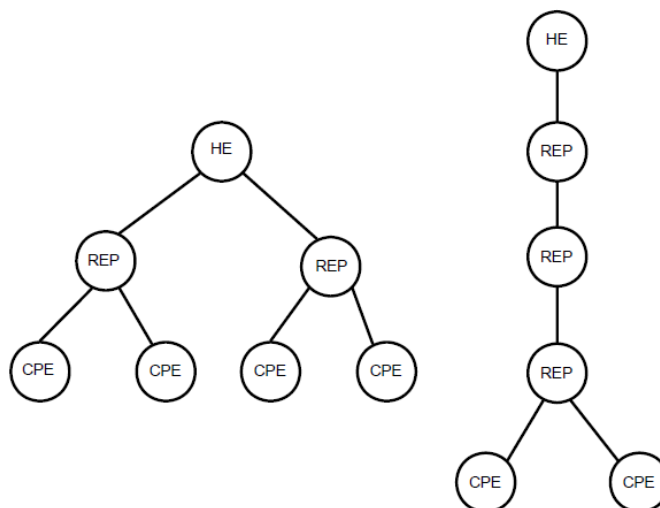
O objetivo deste documento é especificar um sistema de transmissão de dados BPL baseado em *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) para a prestação de serviços de acesso. Especificamente, esta especificação, descreve uma camada física capaz de atingir taxas superiores a 200 Mbps. O OFDM foi escolhido como a técnica de modulação devido à sua adaptabilidade inerente na presença de canais seletivos de frequência, a sua resistência a ISI, a sua robustez ao ruído impulsivo e sua capacidade de alcançar altas eficiências espectrais. Além disso, adotam-se robustos esquemas de codificação de canal de fácil integração à multiplexação OFDM e capazes de combater ruídos de variadas naturezas impostas pelo meio de propagação (OPERA, 2007) (Oliveira, 2016).

3.1 Topologia

A arquitetura especificada para estas redes descreve uma topologia tipo “árvore” composta de um dispositivo mestre HE, que concentra o tráfego *upstream* e *downstream* da rede. Os dispositivos escravos são os CPEs instalados próximos aos usuários, que podem ser ligados diretamente ao equipamento mestre, quando a atenuação do canal assim o permitir. Quando esta atenuação se torna significativa são instalados repetidores chamados de TDR ou FDR (Frequency Division Repeater) cuja função é receber, regenerar e retransmitir o sinal,

aumentando assim a cobertura da rede. Na figura 6 se encontra esse cenário. (OPERA, 2007) (Oliveira, 2016).

Figura 7: Típico cenário de acesso

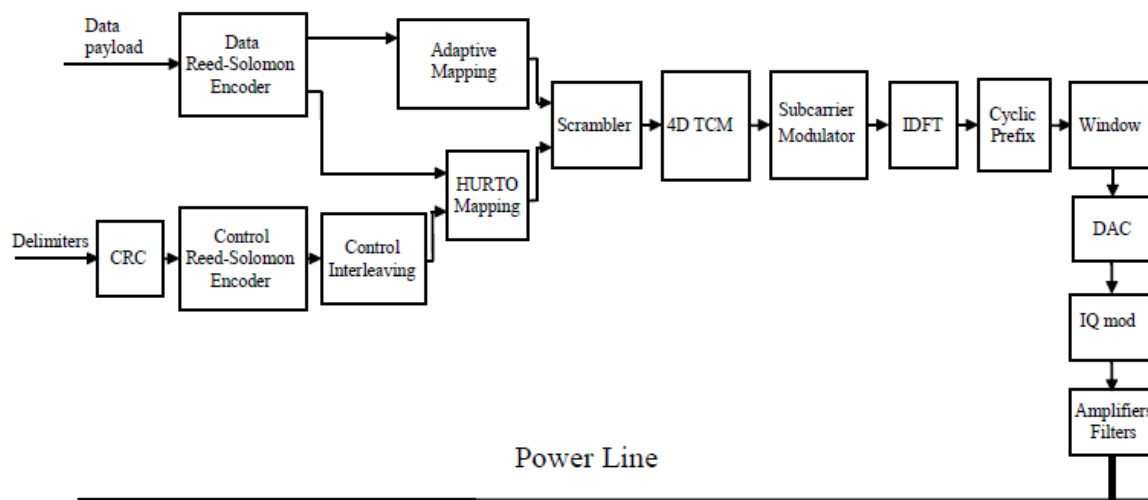


Fonte: OPERA, 2007.

3.2 Visão Geral

No transmissor, a camada física recebe suas entradas da camada MAC. São recebidas duas sequências de bits separadas, uma de codificação de dados e outra de informações de controle. Os delimitadores serão intercalados pelo bloco de controle de intercalação e mapeados pelo bloco mapeamento hurto, enquanto que o fluxo de dados deve ser mapeado usando o bloco mapeamento hurto ou o bloco de mapeamento adaptativo, dependendo com o nível de confiabilidade necessário para a transmissão. As saídas de ambos os blocos de mapeamento levam a um misturador, que é seguido por um codificador 4D-TCM (quatro dimensões *Trellis Coded Modulation*). O próximo passo é a modulação OFDM, a multiplexadora IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*), o gerador de prefixo cíclico e a estrutura de operação símbolo de janelas. O sinal digital resultante é convertido num sinal analógico por meio de um DAC e QI modulada, antes de passar para a amplificação e etapas de filtragem.

Figura 8: Estrutura BPL proposta pelo OPERA

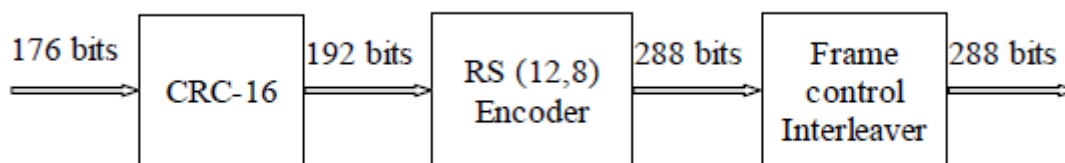


Fonte: OPERA, 2007.

3.3 Delimitador para correção de erros

Os delimitadores fazem o controle de erro por checagem de redundância. A estrutura dos delimitadores é composta por 3 partes, como mostrado na figura abaixo.

Figura 9: Estrutura do delimitador

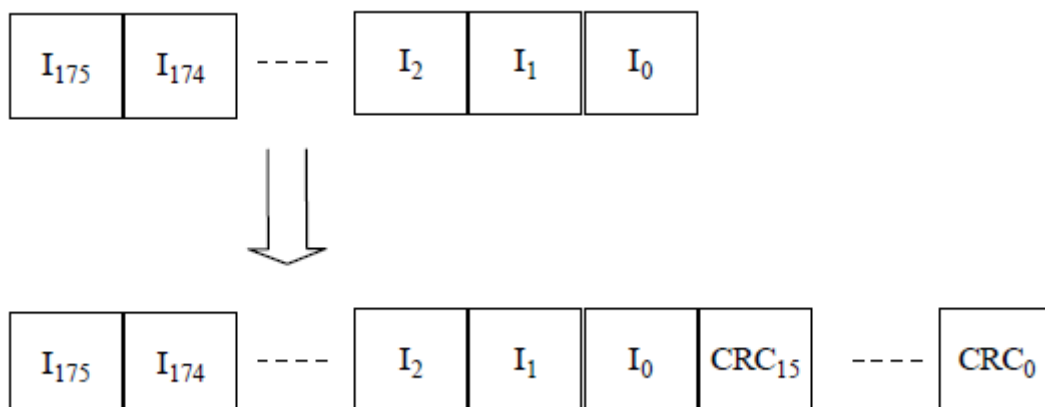


Fonte: OPERA, 2007.

3.3.1 CRC-16

CRC-16 é o método de controle de erro por checagem de redundância cíclica, e 16 é a quantidade de bits inseridos na redundância. Na figura abaixo se pode ver como o CRC-16 insere a redundância.

Figura 10: Inserção de redundância do CRC-16



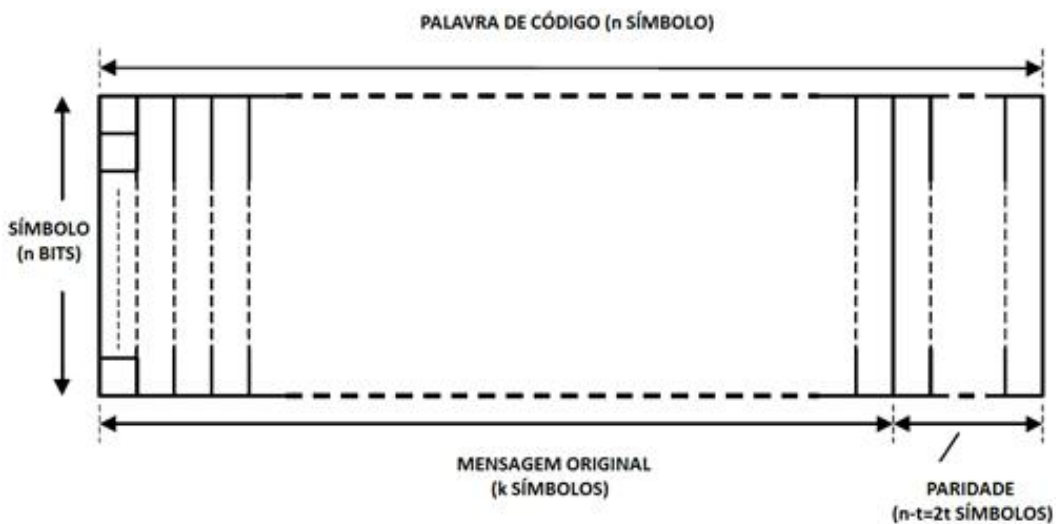
Fonte: OPERA, 2007.

3.3.2 Reed-Solomon

Existem vários tipos de códigos com esse mesmo propósito, porém o Reed-Solomon (RS) provou ter um bom compromisso entre eficiência (quantidade de redundância necessária) e complexidade (dificuldade de codificar e decodificar). (Neto, 2016). O RS insere redundância e reorganiza a ordem dos bits.

Reed Solomon se encaixa nos códigos de blocos, ou seja, a mensagem a ser transmitida é dividida em vários blocos separados de dados. Em cada bloco se tem informação de paridade que junto forma a palavra de código. O Código do OPERA pode ser definido como RS ($n=12$, $k=8$, $t=2$). Tem-se que a mensagem original são 8 símbolos e que $n-k = 4$. A figura 10 mostra a disposição e definições do código RS.

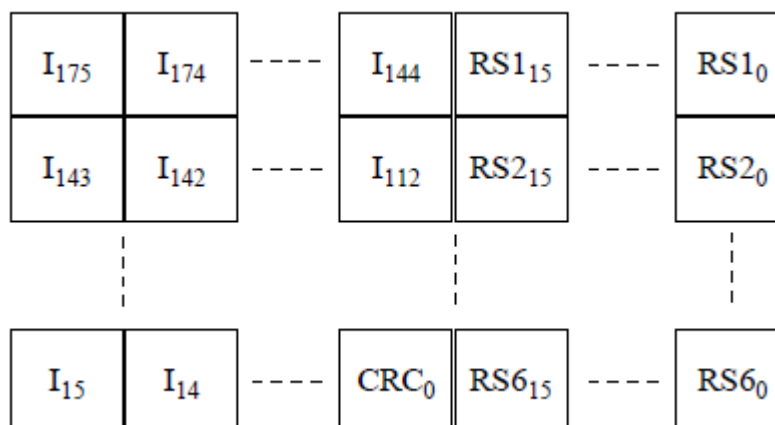
Figura 11: Definições do código RS



Fonte: OPERA, 2007.

A figura 11 mostra como será o formato após a passagem pelo código RS.

Figura 12: Formação dos bits de Reed-Solomon

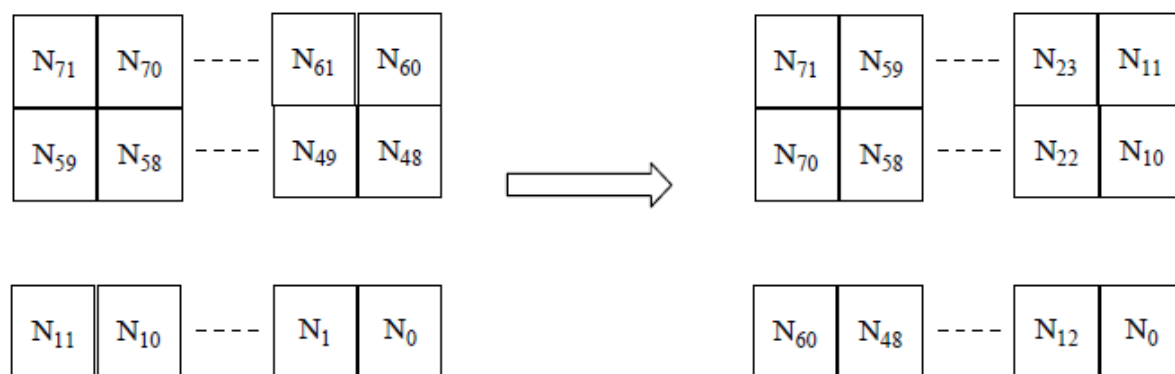


Fonte: OPERA, 2007.

3.3.3 Embaralhador de bits do delimitador

O embaralhador de bits do delimitador divide o código vindo do codificador de Reed-Solomon em grupos de 4 bits, após essa divisão os grupos de bits são embaralhados de uma forma específica, como se pode ver na figura 12.

Figura 13: Emparelhamento dos bits



Fonte: OPERA, 2007.

3.3.4 Data payload

O *data payload* deve ser codificado por um codificador de Reed-Solomon com um símbolo de 8-bit de taxa variável. Após a passagem pelo codificador, os bits irão para o mapeamento adaptativo ou mapeamento hurto.

3.4 Modos de mapeamento

Uma vez obtidas a sequência de dados proveniente do delimitador ou do *data payload*, pode-se utilizar dois tipos diferentes de mapeamento. O modo de mapeamento é indicado no cabeçalho. O mapeamento hurto é fixo e o mapeamento adaptativo é feito seguindo uma tabela com informações com a alocação de bits codificados em cada símbolo em cada uma das 1536 subportadoras.

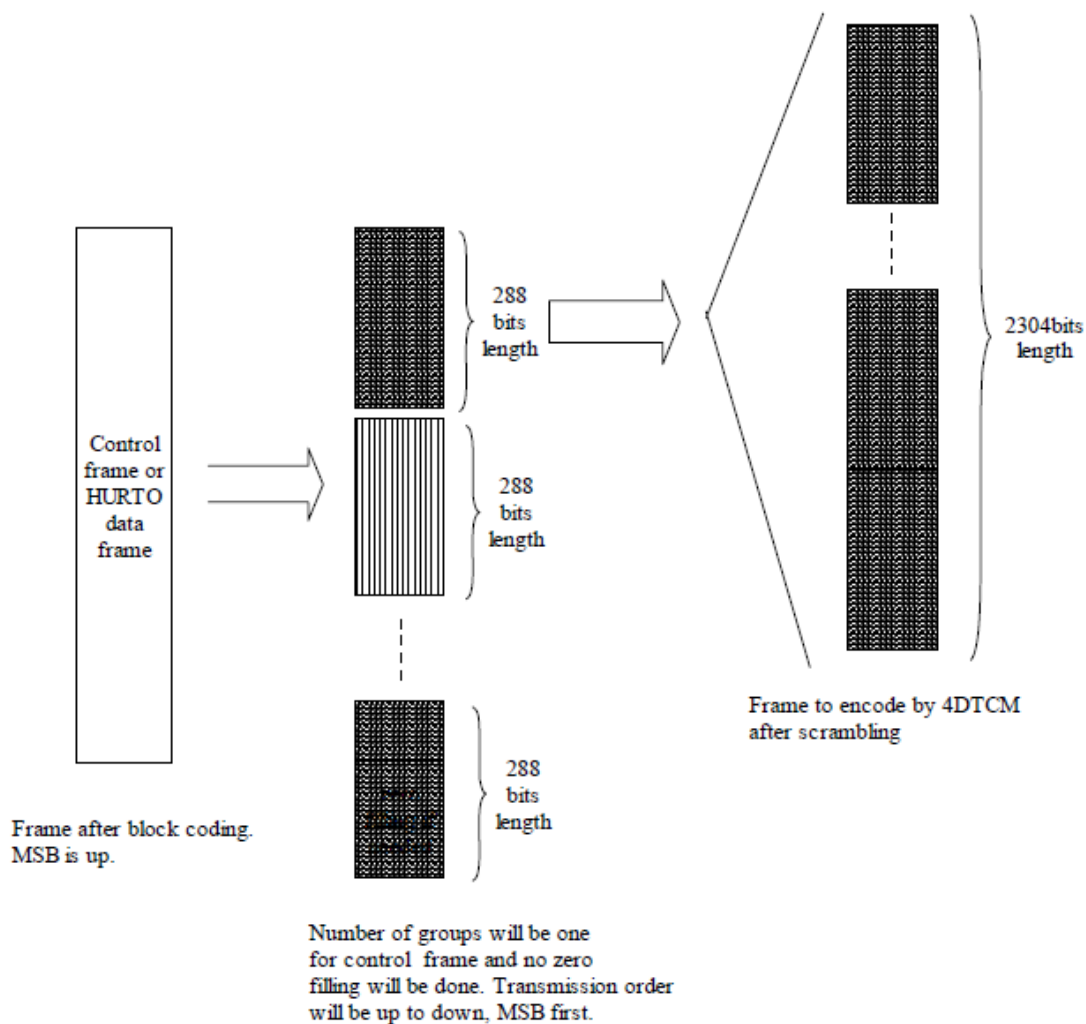
3.4.1 Mapeamento Hurto

O mapeamento hurto deve ser utilizado nos delimitadores e no *data payload* se for indicado no cabeçalho.

Os grupos de 288 bits provenientes da correção de erro são replicados oito vezes, a fim de obter grupos de 2304 bits. A tabela de atribuição de bits será ajustada para 2 bits por subportadora

para todas as 1536 subportadoras de um símbolo OFDM e cada grupo decorrente dos 2304 bits deverá concluir um símbolo OFDM inteiro. No caso de o *data payload* passar pelo mapeamento hurto, o último grupo será completado com zeros, se necessário.

Figura 14: Mapeamento Hurto

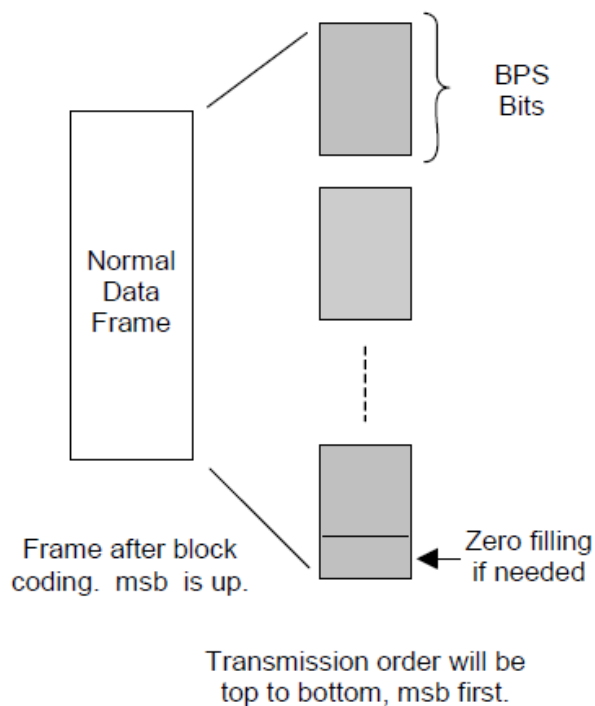


Fonte: OPERA, 2007.

3.4.2 Mapeamento Adaptativo

Quando o hurto bit não está definido no cabeçalho, a *data payload* será mapeada na sequência da atribuição da tabela de bit, que define (após 4D-TCM, *Trellis-Coded Modulation*) quantos bits serão alocados em cada subportadora. Quando o mapeamento adaptativo é utilizado, tem de haver, pelo menos, 24 subportadoras com 2 ou mais bits de informação.

Figura 15: Mapeamento adaptativo



Fonte: OPERA, 2007.

BPS na figura representa um número de bits de dados necessários para preencher um símbolo OFDM. O último símbolo deve ser preenchido com zeros antes da codificação, se necessário, até que um número inteiro de símbolos seja usado.

O mapeamento adaptativo muda o nível de mapeamento utilizado de acordo com a banda de frequência do canal, por exemplo, se tiver como utilizar um mapeamento de um nível de modulação alto, será utilizado, mas se houver um nulo em frequência, será utilizado um mapeamento com nível de modulação menor.

3.5 Modulação codificada por treliça

Uma vez obtido os bits do delimitador ou do *data payload* que irá preencher um número inteiro de símbolos OFDM, um 4D-TCM será utilizado para correção de erros. Este código será aplicado sobre grupos de 1536 subportadoras e repor cada símbolo OFDM, exceto no modo hurto, onde o codificador 4D-TCM será redefinido para cada 192 subportadoras, ou, em outras palavras, cada 288 bits de entrada.

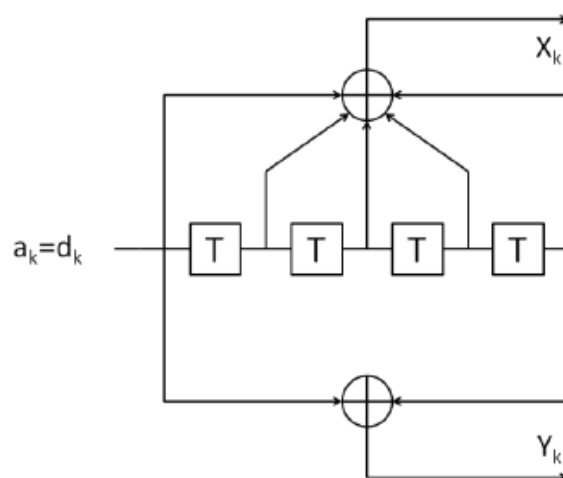
A modulação codificada em treliça, TCM (*Trellis-Coded Modulation*), alcança ganhos de codificação sem expandir a largura de banda, portanto, sem alterar a taxa de transmissão de símbolos. A sua aplicação em sistemas de comunicação resolve o conflito relacionado à eficiência de largura de banda e potência de transmissão. (SILVA, 2006).

3.5.1 Estrutura do codificador convolucional

Um codificador convolucional pode ser descrito através de dois parâmetros: a taxa de codificação e o tamanho de confinamento. A taxa de código, k/n , é expressa como uma relação entre o número de bits do decodificador convolucional (k) e o número de símbolos de canais da saída do codificador convolucional (n) em um dado ciclo do codificador. Neste trabalho, será utilizado a taxa $1/2$ para o código convolucional, embora a especificação OPERA seja de $2/3$. (Rodrigues, et al., 2000).

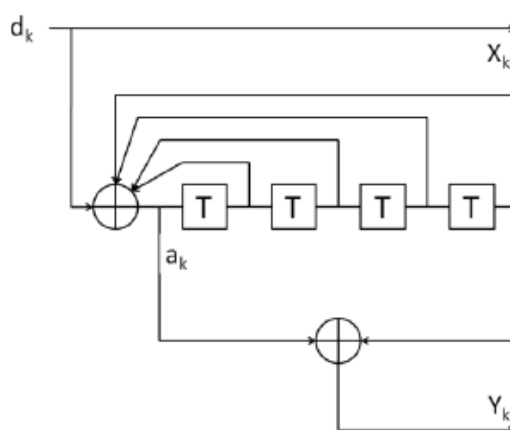
Os codificadores sistemáticos são aqueles que enviam, além do sinal codificado, a própria entrada. Contudo, sabe-se que os codificadores convolucionais não sistemáticos (*Non-Systematic Convolutional* – NSC) apresentam uma melhor resposta de erros para uma relação sinal ruído alta. Tem-se também os codificadores chamados de convolucionais sistemáticos recursivos (*Recursive Systematic Convolutional* – RSC). Recursivos porque existe realimentação na sua estrutura, e sistemático devido ao fato de existirem na saída bits não codificados, ou seja, bits da fonte de informação aparecem inalterados nas palavras código. Nas figuras abaixo tem-se os codificadores recursivos e não recursivos. (Souza, 2013), (SILVA, 2006).

Figura 16: Codificador não recursivo



Fonte: Souza, 2013.

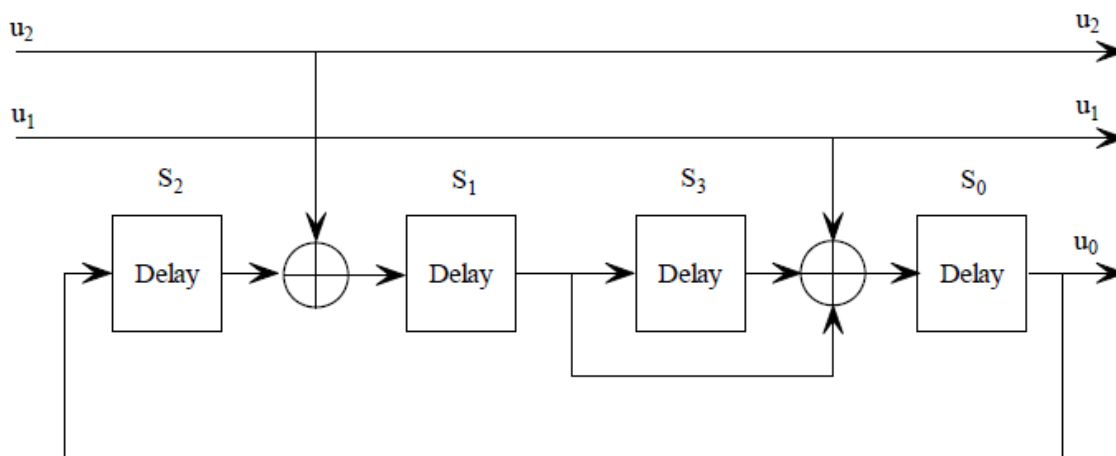
Figura 17: Codificador recursivo e sistemático



Fonte: Souza, 2013

O codificador convolucional especificado pelo OPERA segue na figura 17, é um codificador convolucional recursivo e sistemático.

Figura 18: Codificador convolucional especificado pelo OPERA

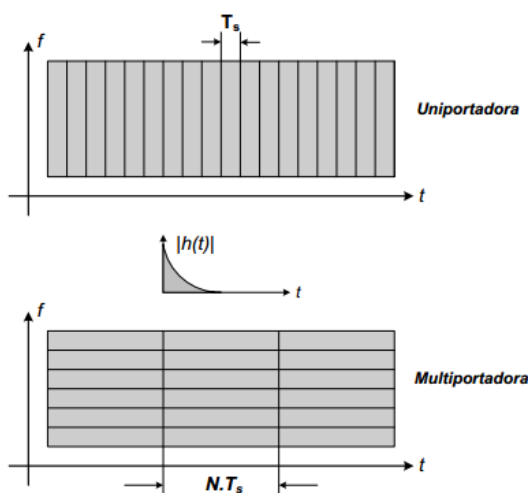


Fonte: OPERA, 2007.

3.6 Sistema Multiportadora

A modulação multiportadora divide a sequência de dados a serem transmitidos em várias subsequências, que paralelamente moduladas em igual número de portadoras são transmitidas simultaneamente em subcanais idealmente ortogonais. A quantidade de subportadoras N é escolhida de tal forma que Tn ($Tn = N * Ts$) seja maior que o espalhamento multipercurso, τ_{max} ($Tn \gg \tau_{max}$). Este fato permite o combate a ISI. (SILVA, 2006).

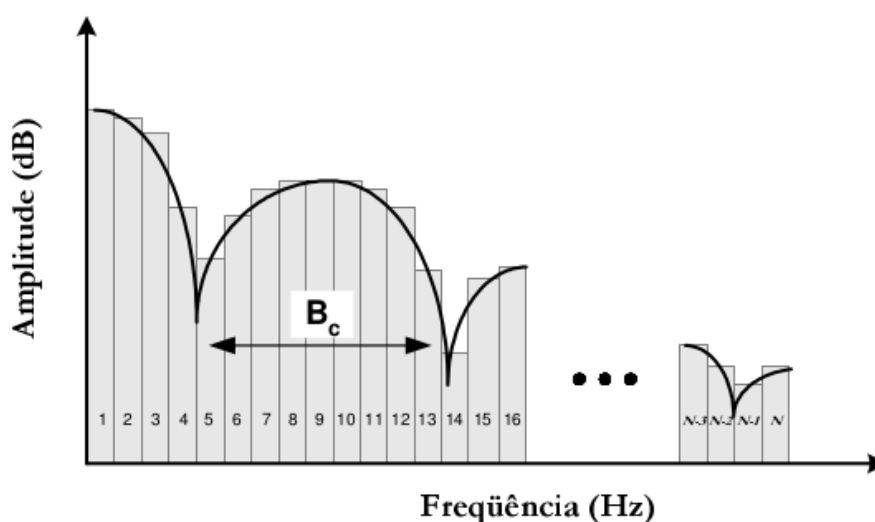
Figura 19: Resolução tempo frequência dos sistemas uniportadora e multiportadora



Fonte: Silva, 2006.

Pela figura acima percebe-se que o tempo de símbolo é N vezes maior que o tempo de símbolo para o sistema uniportadora e com esse fato pode-se perceber que o sistema multiportadora é melhor para combata a ISI em canais multiportadora. Esse efeito é minimizado quando se divide a banda em subcanais. A modulação multiportadora aumenta a duração do símbolo, e consequentemente diminui a banda ocupada. Tem-se que $B_n = B/N$, então terá a largura de banda N vezes menos que a largura de banda da modulação uniportadora, permitindo o combate seletivo em frequência e redução da complexidade de equalizadores.

Figura 20: Divisão do espectro de frequência em N subcanais

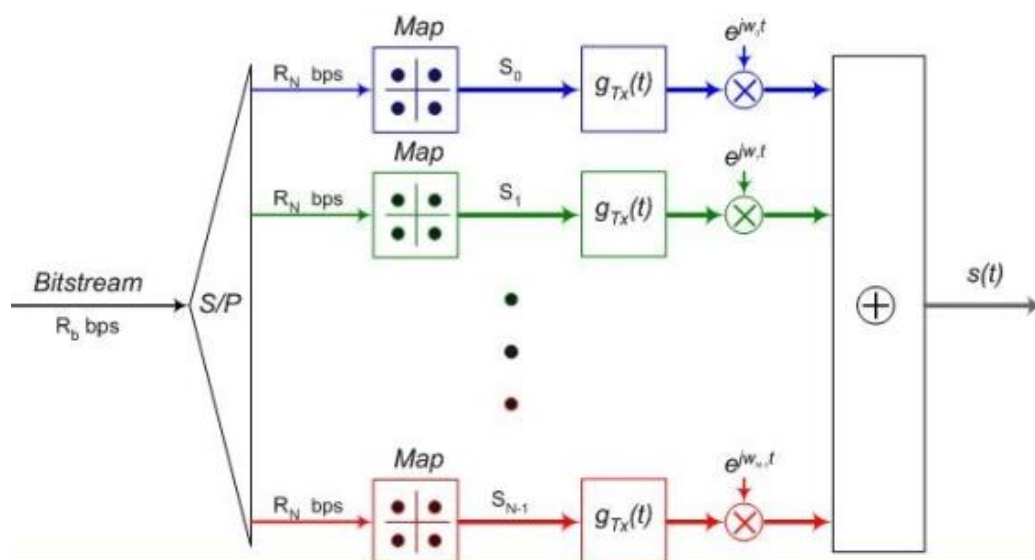


Fonte: Silva, 2006.

A redução na taxa de transmissão (aumento na duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora) resulta em uma diminuição da sensibilidade à seletividade em frequência (dispersão no tempo) causada pelo canal multipercurso. (Albuquerque, 2002).

3.6.1 Modelo de transmissão multiportadora

Figura 21: Modelo de transmissão multiportadora

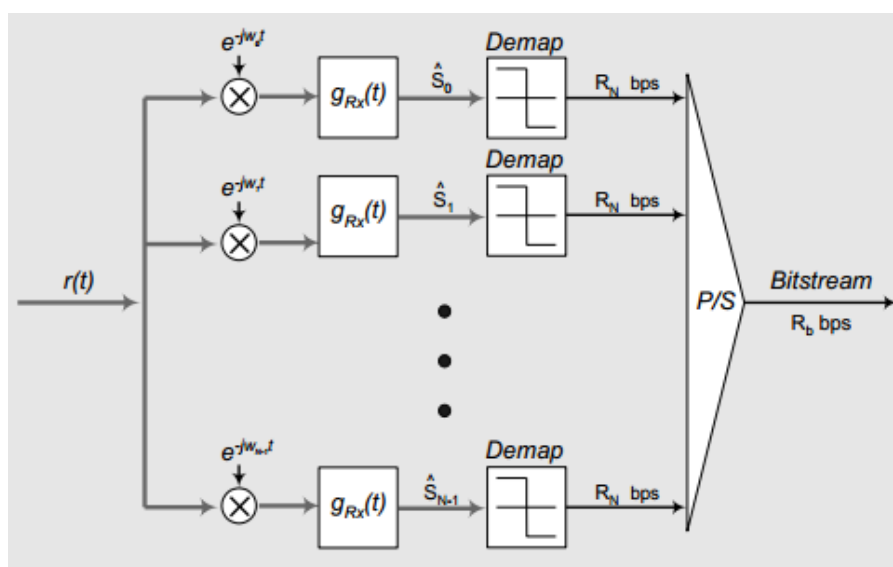


Fonte: Silva, 2006

Pela figura 20 pode-se perceber que o modelo de transmissão multiportadora representa N sistemas uniportadoras.

3.6.2 Modelo de Recepção Multiportadora

Figura 22: Modelo de recepção multiportadora



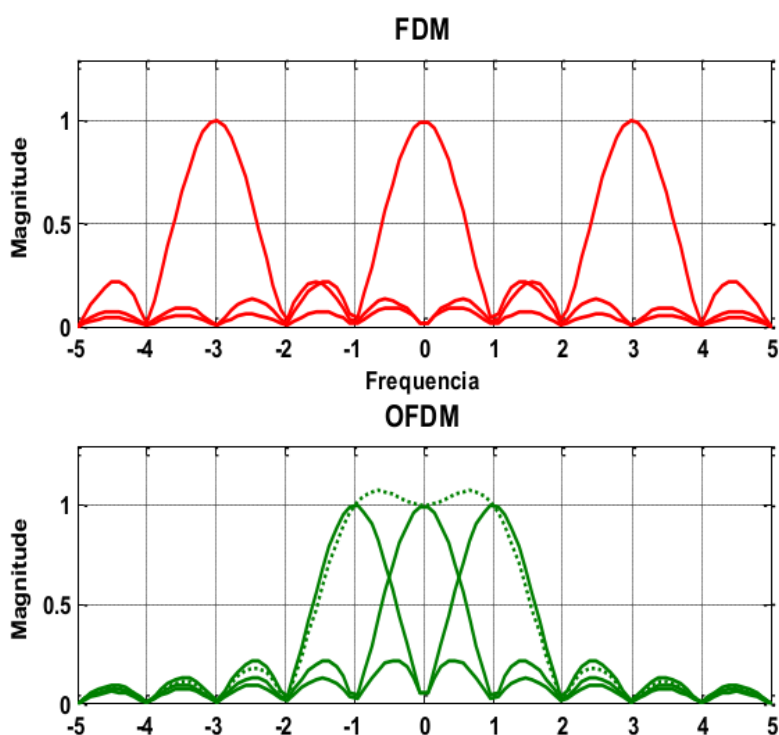
Fonte: Silva, 2006

Esse tipo de sistema tem como dificuldade a quantidade N de moduladores e demoduladores e uma quantidade N de filtros de Nyquist de banda passante, tanto na transmissão quanto na recepção. A figura 21 mostra o receptor multiportadora.

3.7 Multiplexação OFDM

A técnica OFDM é uma forma de implementação digital do sistema multiportadora, onde a modulação e a demodulação são realizadas via IDFT e DFT respectivamente. As subportadoras são ortogonais entre si. (SILVA, 2006).

Figura 23: Comparação entre modulação FDM e modulação OFDM



Fonte: Silva, 2006.

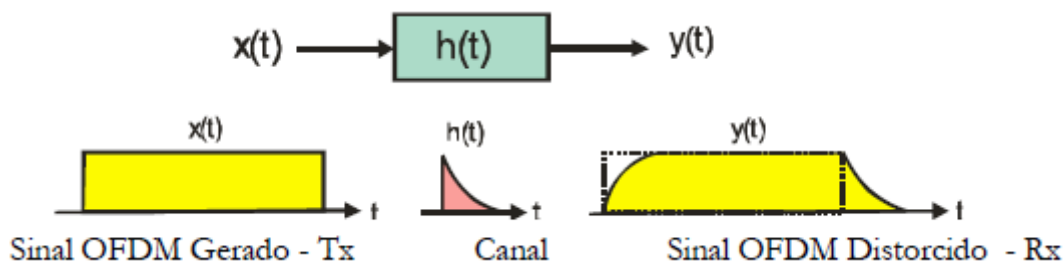
3.7.1 Prefixo cíclico

A interferência intersimbólica proveniente do espalhamento multipercurso, que é causada por transmissões em canais seletivos em frequência, é eliminada com a inserção do prefixo cíclico. O prefixo cíclico poderia ser um espaçamento entre os símbolos, intervalo de guarda, mas a

inserção de uma redundância além de combater a interferência intersimbólica também combate à interferência entre canais (ICI). (Albuquerque, 2002) (SILVA, 2006). A interferência entre canais ocorre quando há um desvio na variação de frequência entre as subportadoras, dessa forma, a máxima frequência de uma subportadoras não ocorre no mínimo das demais. O fato de utilizar espaçamento entre os símbolos melhora a ISI, mas por outro lado, isso faria que no domínio da frequência ocorresse uma variação na frequência das subportadoras, ocorrendo a ICI.

A figura 23 representa um sinal OFDM $x(t)$ que será transmitido por um canal $h(t)$ e chegará no receptor um sinal OFDM distorcido $y(t)$.

Figura 24: Representação do sinal transmitido, recebido e do canal



Fonte: Silva, 2006, modificado pelo autor

Supondo que não utilize o prefixo cíclico e nem o intervalo de guarda, tem-se na figura 24 como estará representado essa comunicação.

Figura 25: Representação da comunicação sem intervalo de guarda e sem prefixo cíclico

Símbolos OFDM Adjacentes

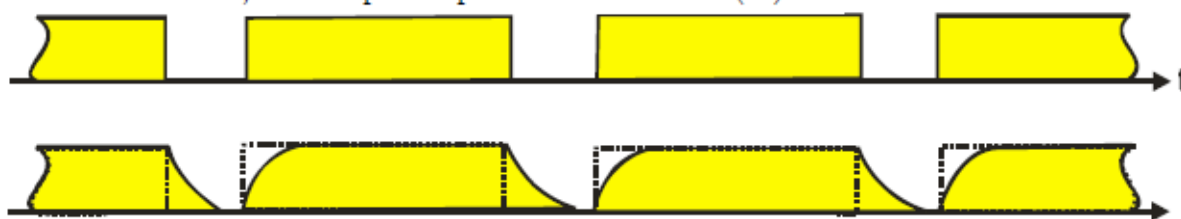


Fonte: Silva, 2006, modificado pelo autor

Na figura 24 pode-se perceber que o sinal sofrerá uma distorção e irá ocorrer a ISI, o que irá causar perda de informações. A figura 25 mostra os mesmos símbolos, porém, com o intervalo de guarda (que não é eficiente pois reduz a ISI mas aumenta a ICI).

Figura 26: Representação da comunicação com intervalo de guarda e sem prefixo cíclico

Símbolos OFDM Adjacentes Separados por Intervalo de Guarda (IG)

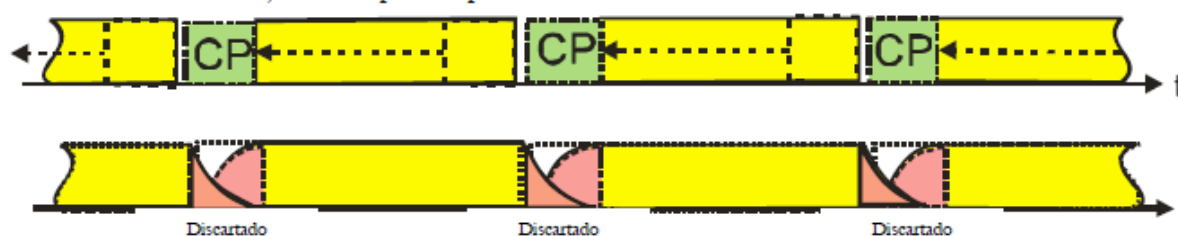


Fonte: Silva, 2006, modificado pelo autor

A inserção do prefixo cíclico resolverá o problema da ISI e também não fará com que a ICI não ocorra com tanta frequência. O prefixo cíclico será descartado após a passagem do sinal pelo canal. O prefixo cíclico é especificado pelo OPERA, assim como os outros parâmetros. O CP é retirado do final do símbolo e é inserido no início do mesmo. Quando o sinal for transmitido a parte que será distorcida será a redundância, que será retirada do sinal.

Figura 27; Representação da comunicação com prefixo cíclico

Símbolos OFDM Adjacentes Separados por Intervalo de Guarda com Extensão Cíclica



Fonte: Silva, 2006, modificado pelo autor

3.7.2 Especificação OPERA dos parâmetros OFDM

A especificação prevê três tamanhos de largura de banda para o funcionamento do sistema, sendo que para cada tamanho tem-se parâmetros diferentes, tem-se que o tipo I possui uma largura de banda de 30 MHz, o tipo II possui uma largura de banda de 20 MHz e o tipo III possui uma largura de banda de 10 MHz. Na tabela abaixo é apresentado as diferentes configurações para os tamanhos de largura de bandas especificados.

Tabela 1: Especificação dos parâmetros OFDM para o padrão OPERA

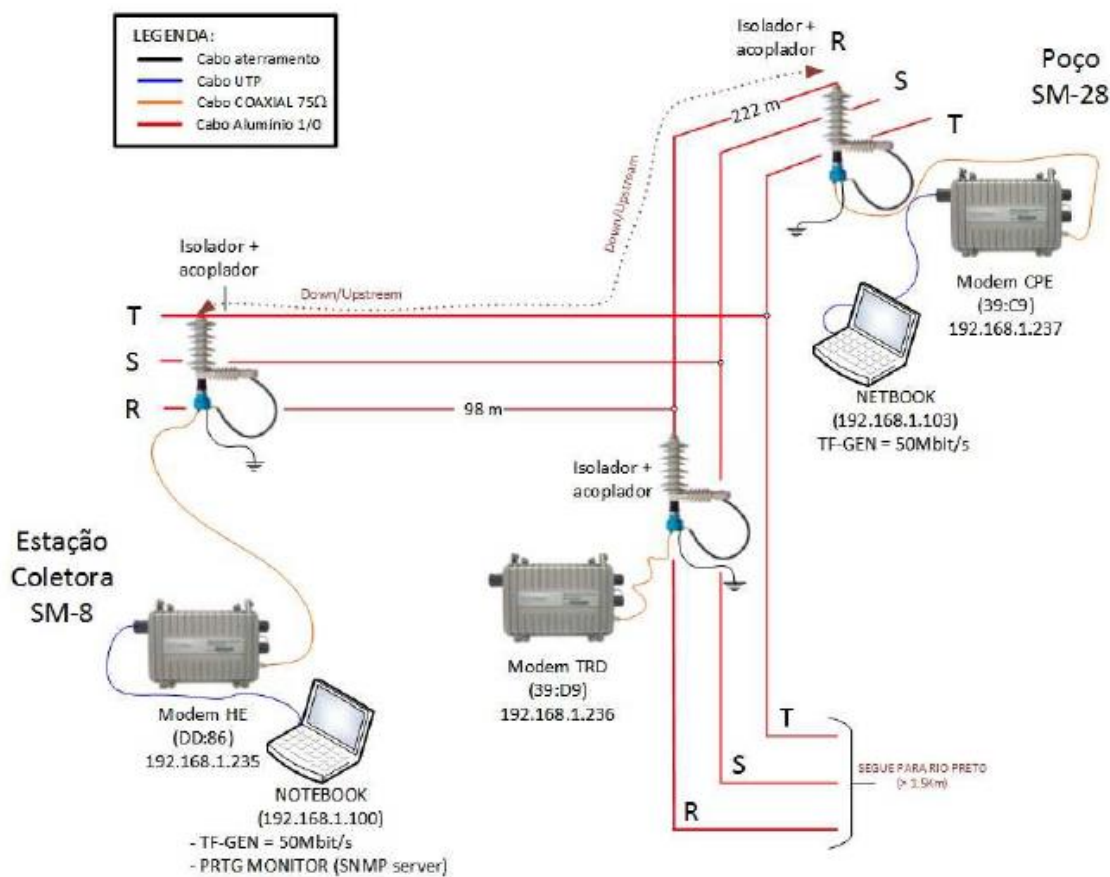
Parâmetro	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Quantidade de subportadoras N_S	1536	1536	1536
Quantidade de amostras da (I)FFT N_{FFT}	2048	2048	2048
Quantidade de amostras do prefixo cíclico N_{CP}	800	532	268
Duração do prefixo cíclico T_{CP} em μs	20	19.95	20.1
Amostras do símbolo OFDM N_{SYM}	2848	2580	2316
Duração do símbolo OFDM T_{SYM} em μs	71.2	96.75	173.7

Fonte: OPERA, 2007

4 METODOLOGIA E SISTEMAS DE SIMULAÇÃO

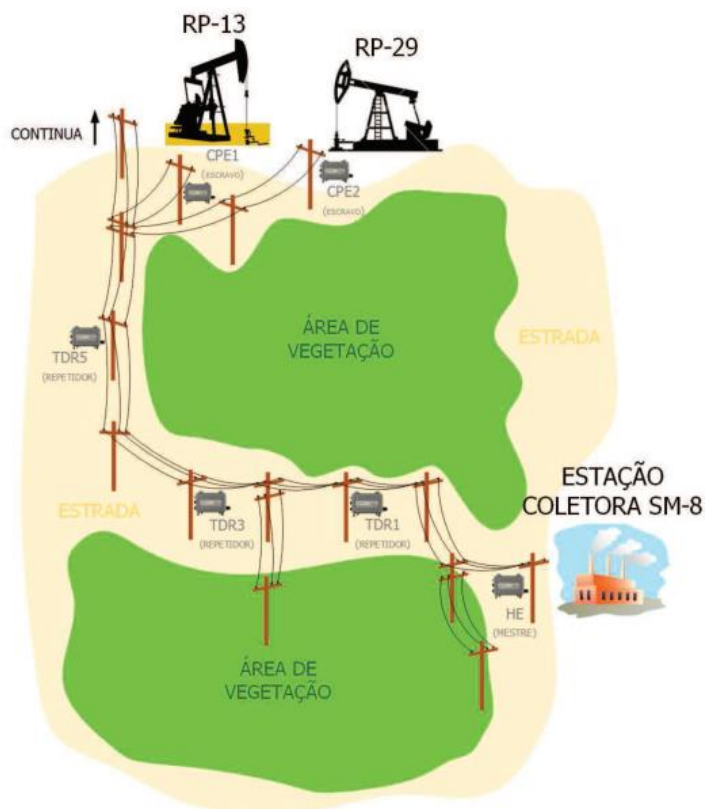
A resposta em frequência é uma das principais medidas para a análise da viabilidade de uso da rede elétrica como canal de comunicação de dados. Equipamentos BPL foram instalados na rede e possuíam a função de fornecer a medida da relação entre a potência do sinal e a potência do ruído SNR (*signal-to-Noise Ratio*) em cada subportadora ao longo da banda configurada para comunicação. (Oliveira, 2016). Esses equipamentos foram instalados em uma rede de média tensão em poços de extração de petróleo, para obtenção de imagens e controle de automação. Assim pode se obter as respostas em frequência de alguns canais BPL reais. Para a realização das simulações, foi utilizado o canal que apresentava maior quantidade de derivações e que era o pior canal. Na figura 27 tem-se a topologia de testes, que é a maneira que foram obtidas as curvas.

Figura 28: Topologia de testes



Fonte: Castor, 2015

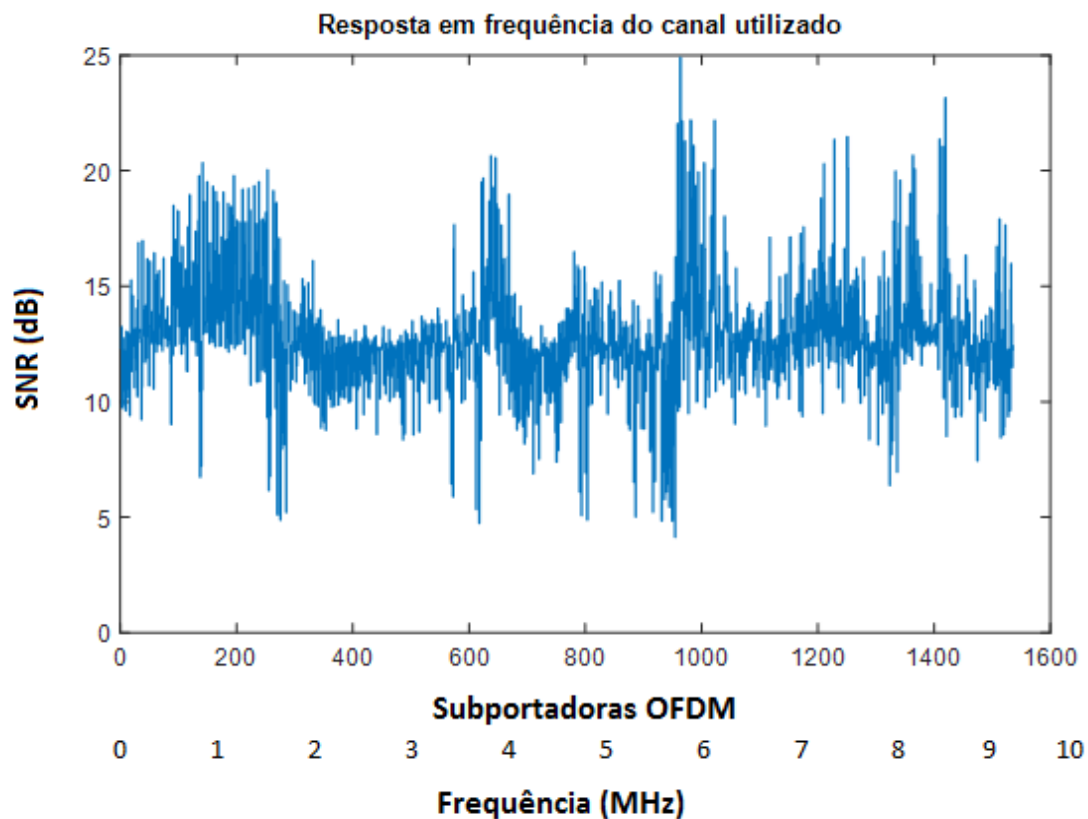
Figura 29: Topologia da rede de média tensão utilizada na investigação da tecnologia BPL



Fonte: Castor, 2015

Na figura 28 tem-se a topologia da rede de media tensão onde se implantou os equipamentos BPL e o trecho escolhido para a realização das simulações foi o CPE1 até o TDR5, que apresenta duas derivações, sendo uma de tamanho limitada e outra que continua por mais alguns quilômetros. A distância do enlace escolhido tem aproximadamente 600 metros e a derivação de tamanho limitado possui 200 metros. Na figura 29 pode-se ver a resposta em frequência do canal utilizado para estudo.

Figura 30: Resposta em frequência do canal utilizado nas simulações

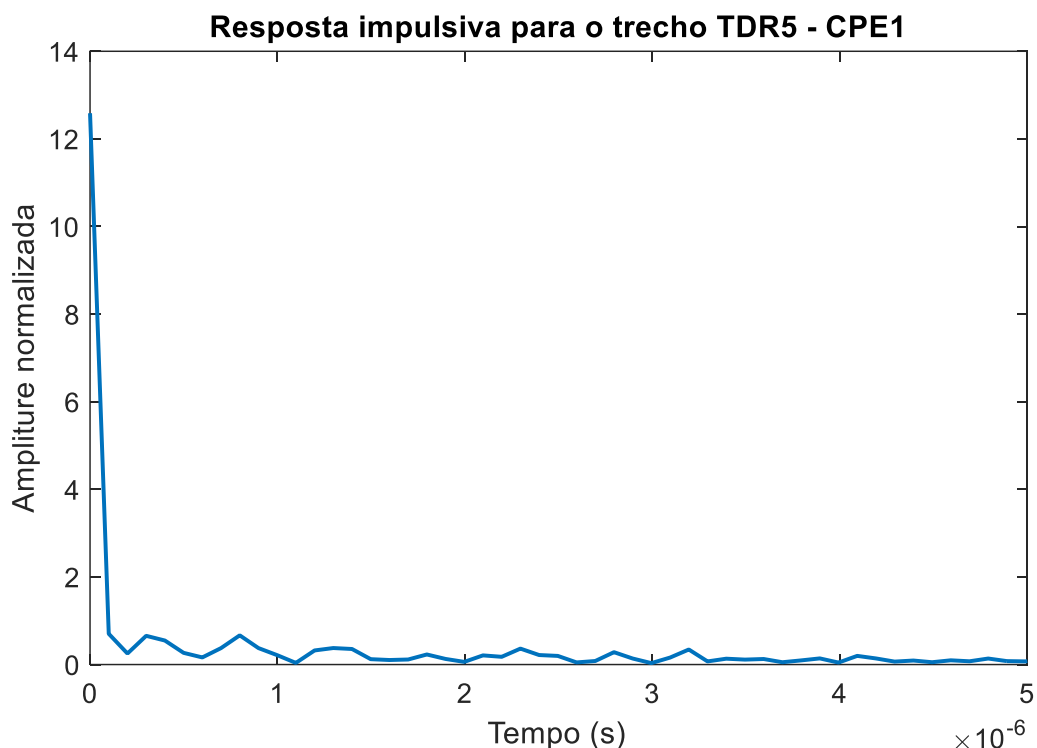


Fonte: Produção do próprio autor.

4.1 Obtenção do prefixo cíclico

Como já visto anteriormente a necessidade do prefixo cíclico, precisa-se calculá-lo. Para calcular o prefixo cíclico precisa-se obter a resposta impulsiva do canal. A partir da resposta em frequência obtida pelas medidas dos equipamentos, aplica-se nessa medida a transformada inversa de Fourier e assim obtem-se a resposta impulsiva do canal.

Figura 31: Resposta impulsiva obtida através da resposta em frequência



Fonte: Produção do próprio autor.

Pela figura 30 pode-se dizer que $\tau_{max} \cong 3,3 \mu s$ e que τ_{max} é o atraso de propagação do canal. Sabendo o valor de τ_{max} , será estimado um valor para Tg , sendo que $2\tau_{max} < Tg < 4\tau_{max}$. Tg é o intervalo de guarda. Para o projeto será utilizado $Tg = 3\tau_{max}$. Assim tem-se que $Tg = 9,9 \mu s$.

Para fazer a conta do CP (prefixo cíclico) é preciso saber a Ts (duração total do símbolo), sabendo que $Ts = Tg + Tu$. Para o cálculo de Tu é preciso utilizar alguns valores especificados pelo OPERA. Na tabela abaixo são listados os parâmetros utilizados no trabalho.

Tabela 2: Especificação dos parâmetros OFDM para o Tipo III ($B_{weff} = 10 \text{ MHz}$)

Parâmetro	Tipo III
Quantidade de subportadoras N_S	1536
Quantidade de amostras da (D)FFT N_{FFT}	2048
Quantidade de amostras do prefixo cíclico N_{CP}	268
Duração do prefixo cíclico T_{CP} em μs	20.1
Amostras do símbolo OFDM N_{SYM}	2316
Duração do símbolo OFDM T_{SYM} em μs	173.7

Fonte: OPERA, 2007, modificado pelo autor

Sabendo que a largura de banda efetiva (B_{weff}) é de 10MHz, pode-se obter Tu .

$$Tu = \frac{Ns}{B_{weff}} = \frac{1536}{10 \text{ M}}$$

Por tanto tem-se que $Tu = 153,6 \mu s$.

Agora que se tem o valor de Tu pode-se calcular o tamanho do CP.

$$CP = \frac{Tg \times Nfft}{Tu} = \frac{9,9 \mu \times 2048}{153,6 \mu} = 132$$

Pode-se observar que o prefixo cíclico projetado foi menor que o prefixo cíclico especificado pelo OPERA, que é 268.

4.2 Modulação

A modulação consiste na variação das características do sinal a ser transmitido. A maioria dos sinais, da forma como são fornecidos pelo transdutor, não podem ser enviados diretamente através dos canais de transmissão. Dessa forma, uma onda portadora cujas propriedades são mais convenientes aos meios de transmissão, é modificada para representar a mensagem a ser enviada. (2016) (Baptista, 2008).

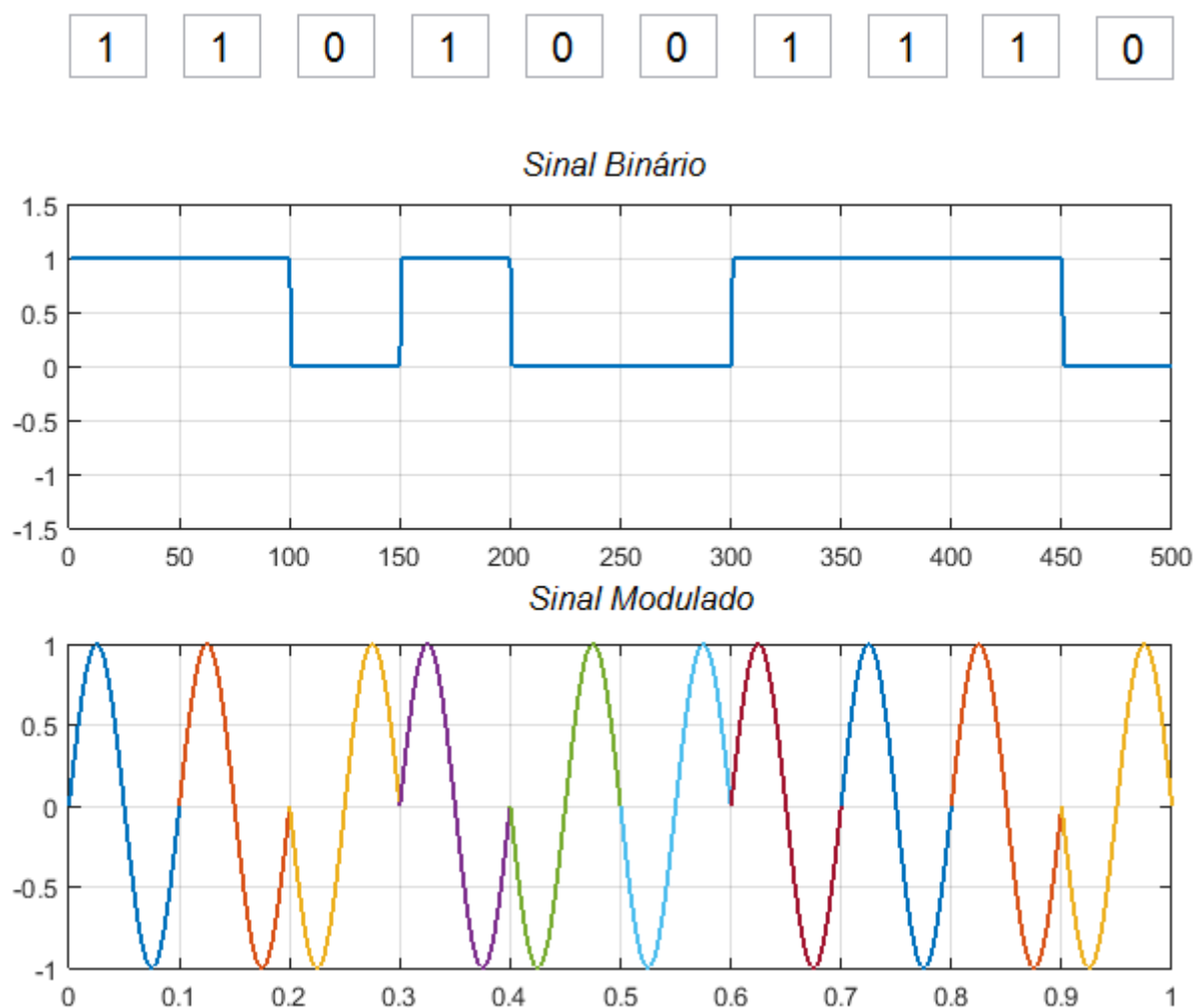
A modulação a ser utilizada pelo trabalho é digital. A modulação digital também denominada modulação discreta ou codificada. Atualmente a maior parte das informações são discretas, apesar de parte dessa informação ser analógica, ela é discretizada e quantificada na fonte. As

técnicas de modulação digital, assim como as analógicas, têm por objetivo transportar a informação de modo adequado ao meio e com eficiência de espectro. (2016) (2016).

4.2.1 Modulação em fase por chaveamento - PSK

A modulação PSK (*Phase Shift Keying*), consiste em variar a fase da portadora de acordo com a informação digital binária a ser transmitida. Na figura 31 tem-se a representação da modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), onde a cada mudança do bit 1 para o bit 0 ocorre uma variação na fase em 180°.

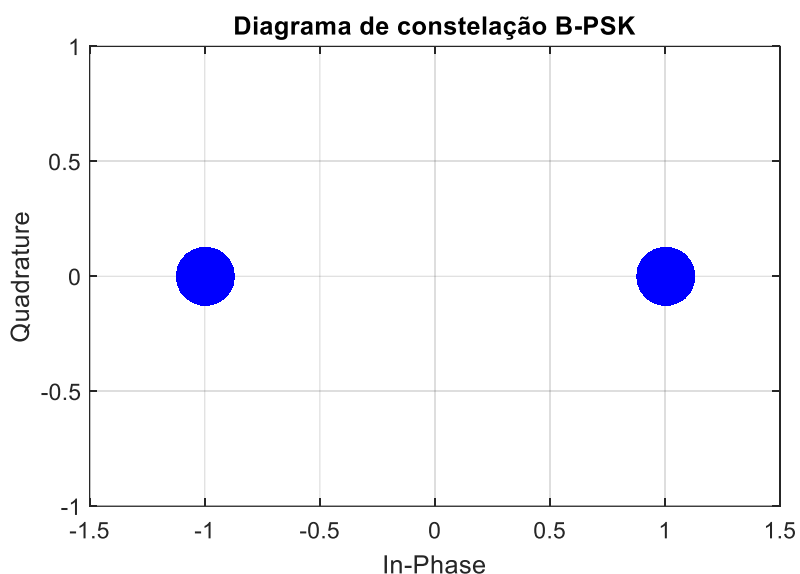
Figura 32: Modulação B-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

Um modo conveniente de representar os esquemas de modulação é fazendo a utilização do diagrama de constelação. O diagrama de constelação consiste em um plano complexo onde são representados a quadratura e a fase do sinal. Cada ponto representado no diagrama representa um símbolo e esse símbolo pode ser representado por bits, dependendo do tipo de modulação utilizada, para o B-PSK é 1 bit. Na figura 32 tem-se o diagrama de constelação para o B-PSK, onde se pode ver 2 símbolos, onde cada 1 possui 1 bit.

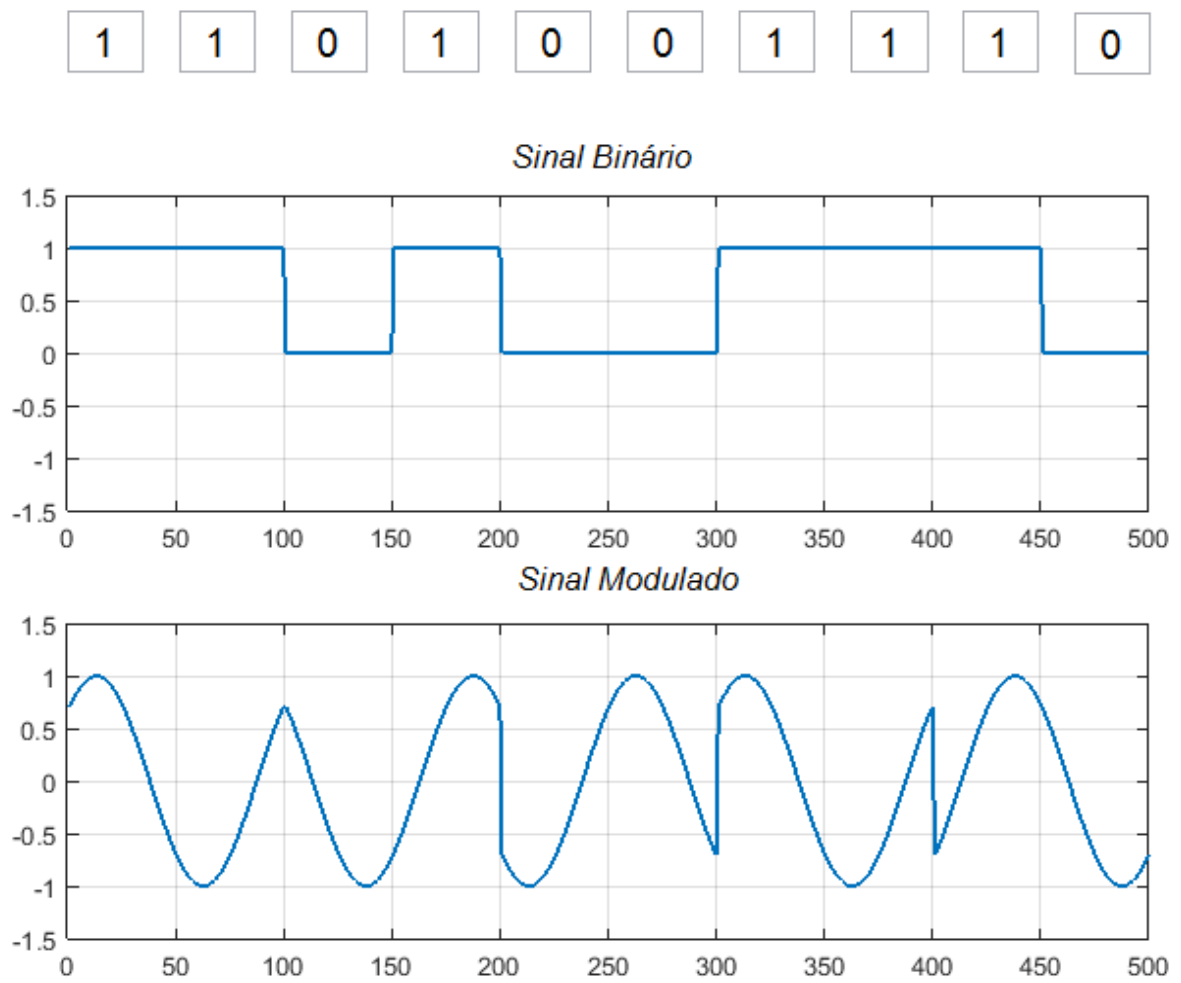
Figura 33: Diagrama de constelação B-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

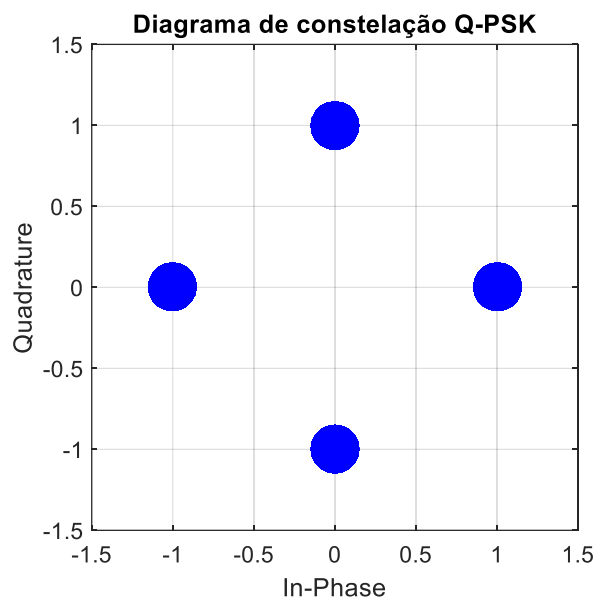
Pode-se utilizar também o Q-PSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), que possui 4 símbolos e possui 2 bits por símbolo. Na figura 33 pode-se notar que a fase do sinal modulado se altera a cada 2 bits, isso pelo fato de possuir 2 bits por símbolo. A defasagem do sinal não é agora sempre 180° , o sinal pode ser defasado também de outros ângulos.

Figura 34: Modulação Q-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

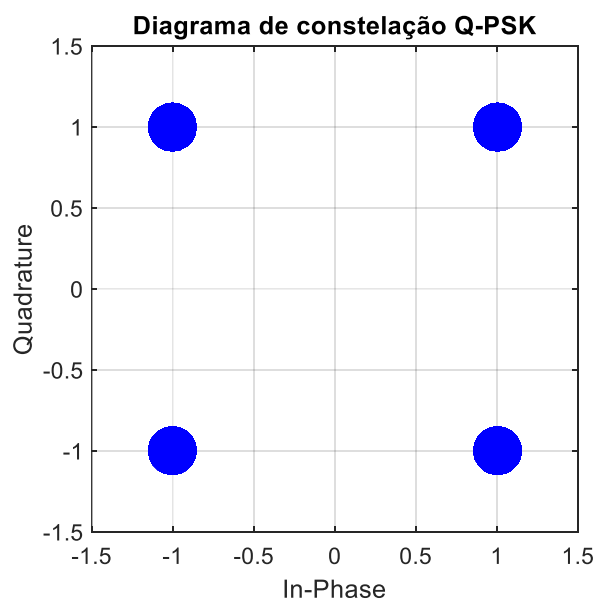
Figura 35: Diagrama de constelação Q-PSK para padrão A



Fonte: Produção do próprio autor.

O diagrama de constelação também pode ser representado com o padrão B, como pode ser visto na figura 35.

Figura 36: Diagrama de constelação Q-PSK para padrão B

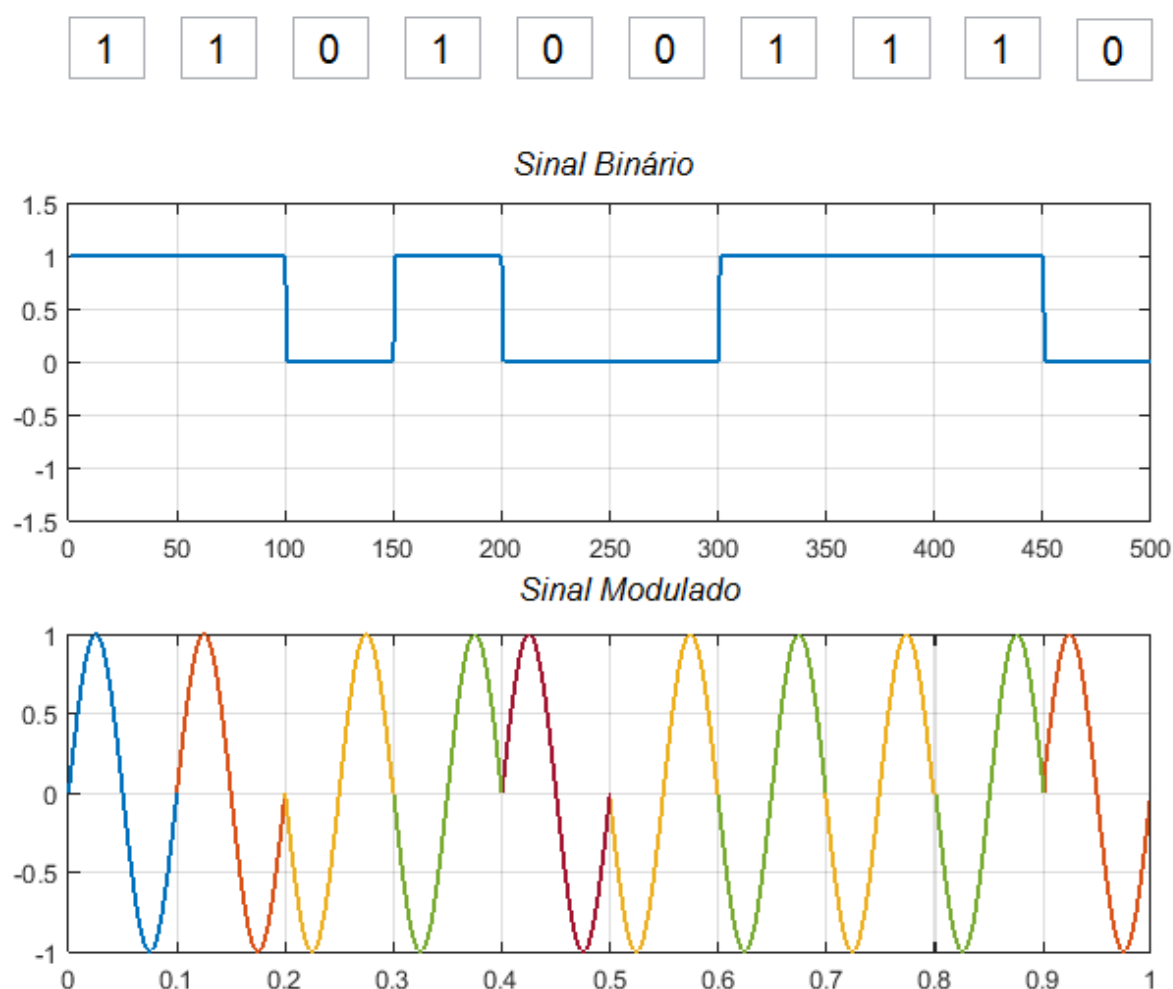


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.2 Modulação por chaveamento de fase diferencial – DPSK

O esquema DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) é uma variação do PSK, onde há a inversão de 180° na fase da portadora sempre que ocorre o bit 0. As alterações consecutivas em uma sequência de bits 0 auxilia no sincronismo da comunicação. (2016). Cada bit não se associa a uma fase da portadora, mas sim, uma mudança ou não desta fase, ou seja, para cada bit 0 efetua-se uma inversão de 180° na fase da portadora e no bit 1 não se altera a fase. Na figura 36 pode-se observar como funciona a modulação DPSK.

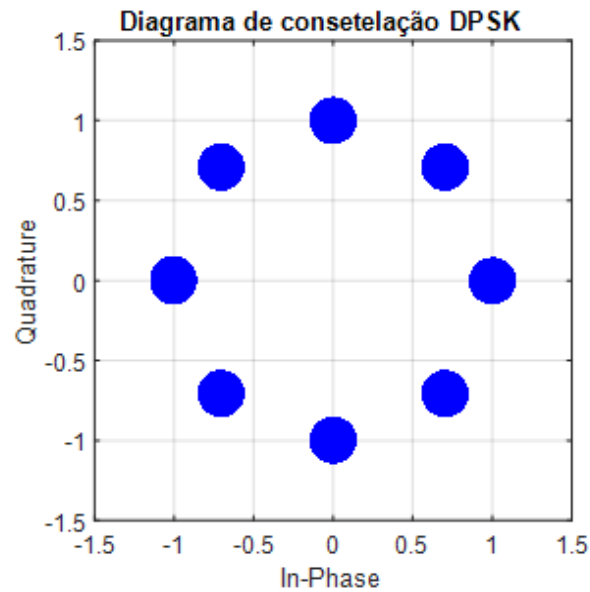
Figura 37: Modulação DPSK



Fonte: Produção do próprio autor.

A modulação DPSK utilizada no trabalho apresenta uma rotação de fase em radianos de $\pi/4$, portanto na figura 37 pode-se ver o diagrama de constelação para DPSK, para nível de modulação 4 e nível de modulação 8.

Figura 38: Diagrama de constelação DPSK

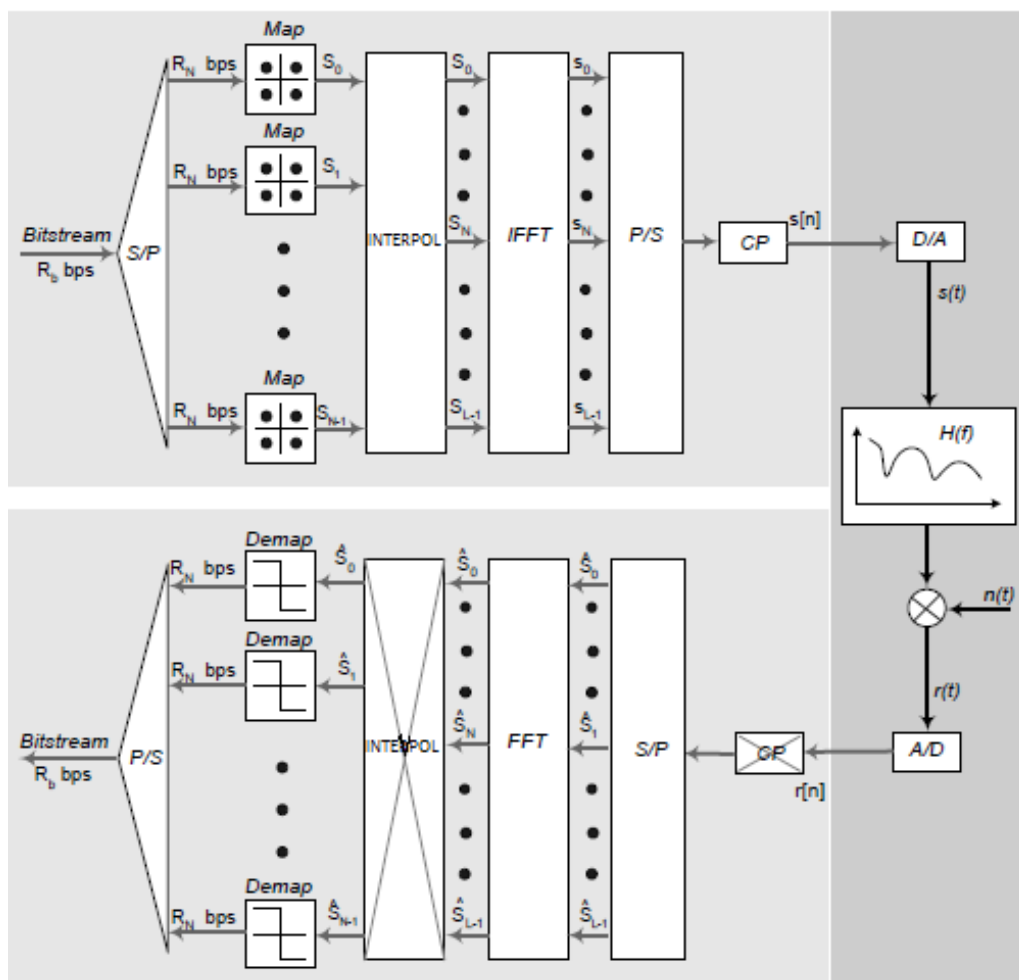


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 Simulação do sistema OFDM sem correção de erro

Após a obtenção do CP, é necessário simular o sistema BPL com todas as informações já reunidas, para a realização das simulações será utilizado o software MATLAB, que é uma ferramenta onde pode-se simular diferentes situações e de cada uma dessas situações obter uma curva para se fazer análise. As primeiras simulações foram realizadas sem código de correção de erro.

Figura 39: Modelo básico do sistema OFDM



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 38 representa o modelo do transmissor que foi simulado. A principal diferença do sistema multiportadora para o OFDM é que a modulação é feita digitalmente, assim não é necessária uma grande quantidade de moduladores e demoduladores, pode-se utilizar FPGA e DSP para realizar a modulação e a demodulação.

O sistema de transmissão apresenta o *bitstream* que é uma matriz aleatório de valores, sendo que a quantidade de linha será o valor de subportadoras utilizadas. Essa sequência de números passará pelo mapeamento. Os mapeamentos testados são: Q-PSK, 8-PSK, 4-DPSK e 8-DPSK.

O mapeamento tem a função de pegar cada valor do *bitstream* e transformá-lo em um símbolo. Os valores gerados no código dependem do valor de M (nível de modulação), terá valor de 0

até $M-1$, assim, o mapeamento pegará esses valores e colocará em um plano complexo, sendo que cada símbolo contém $n = \log_2(M)$ bits.

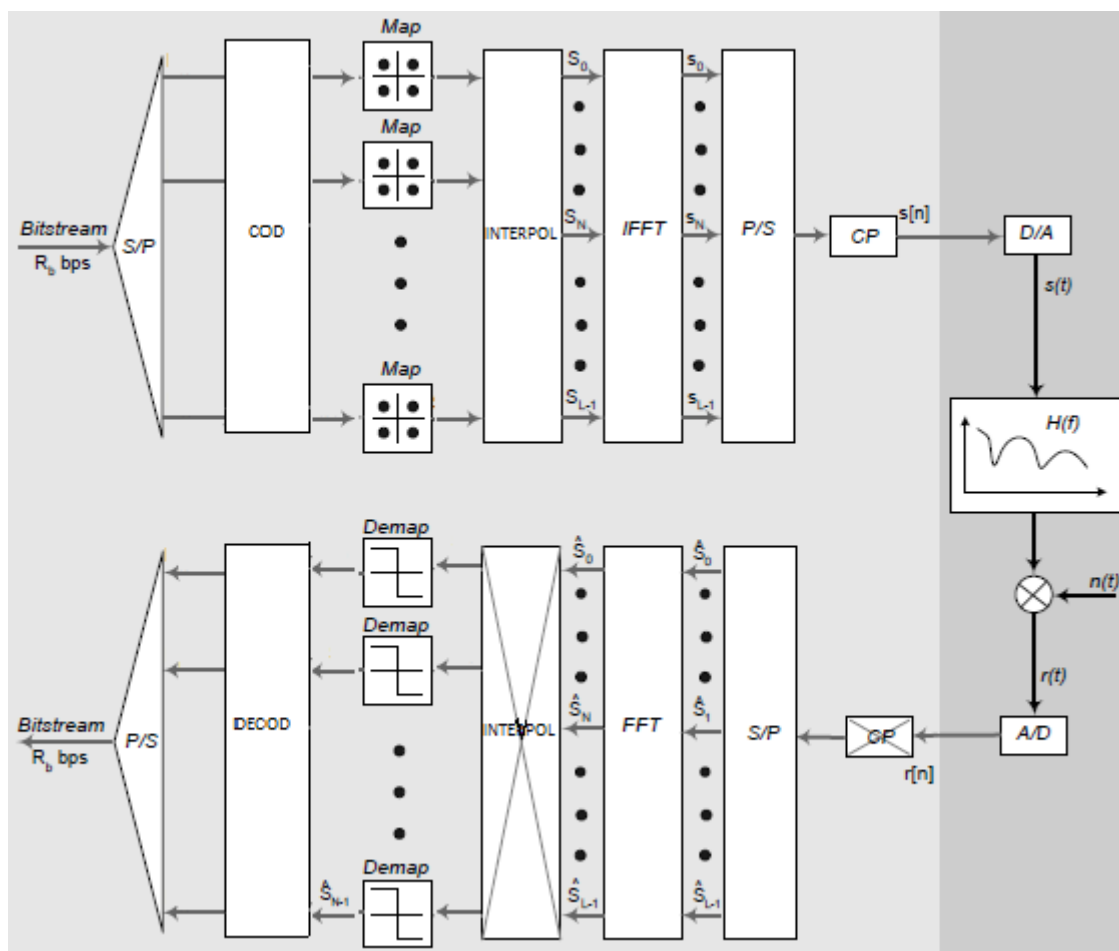
O prefixo cíclico utilizado para as simulações foi o especificado pelo OPERA, que é 268. Foram também realizadas simulações variando o CP para analisar o seu efeito no canal AWGN e no canal BPL com AWGN, foi variado o CP de 1024 até 32, incluindo o prefixo cíclico calculado.

O sistema básico será testado em duas situações, a primeira situação o sinal transmitido irá passar por um canal contendo apenas ruído AWGN, onde serão realizadas as simulações de BER por SNR serão realizadas as simulações para cada tipo de mapeamento já mencionado e para comparar será plotada a curva BER por SNR teórica para cada mapeamento em um canal AWGN. Após a obtenção das curvas, também serão realizadas as simulações para o sistema OFDM passando pelo canal BPL medido em campo adicionado do ruído AWGN. Serão obtidas as mesmas curvas que foram obtidas para o canal AWGN.

Na entrada do receptor o sinal passará por um equalizador, será retirado o CP, esse sinal será aplicado à FFT, será “de interpolado” e será demapeado. Após o demapeamento terá o *bitstream* enviado e que será comparado com o *bitstream* recebido e a diferença entre eles é a quantidade de erro do sistema. Caso não haja erro os *bitstream* serão iguais.

4.4 Simulação do sistema OFDM com correção de erro

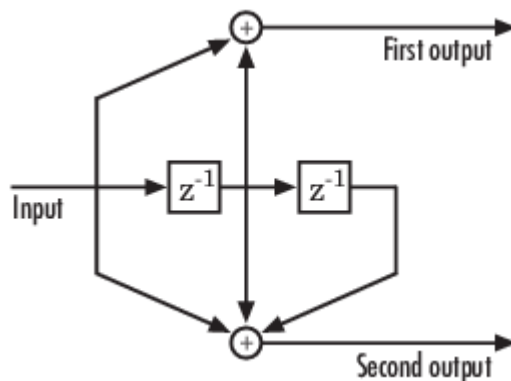
Figura 40: Modelo OFDM com codificação



Fonte: Produção do próprio autor.

A codificador convolucional utilizado para a simulação não foi o mesmo especificado pelo OPERA, foi mudado para simplificação de implementação, mas para efeito de análise não houve muita diferença, dá para se ter a ideia do que o codificador pode fazer com as curvas. Os testes foram realizados para os mesmos mapeamentos utilizados anteriormente. Na figura 40 tem-se o codificador convolucional utilizado para as simulações.

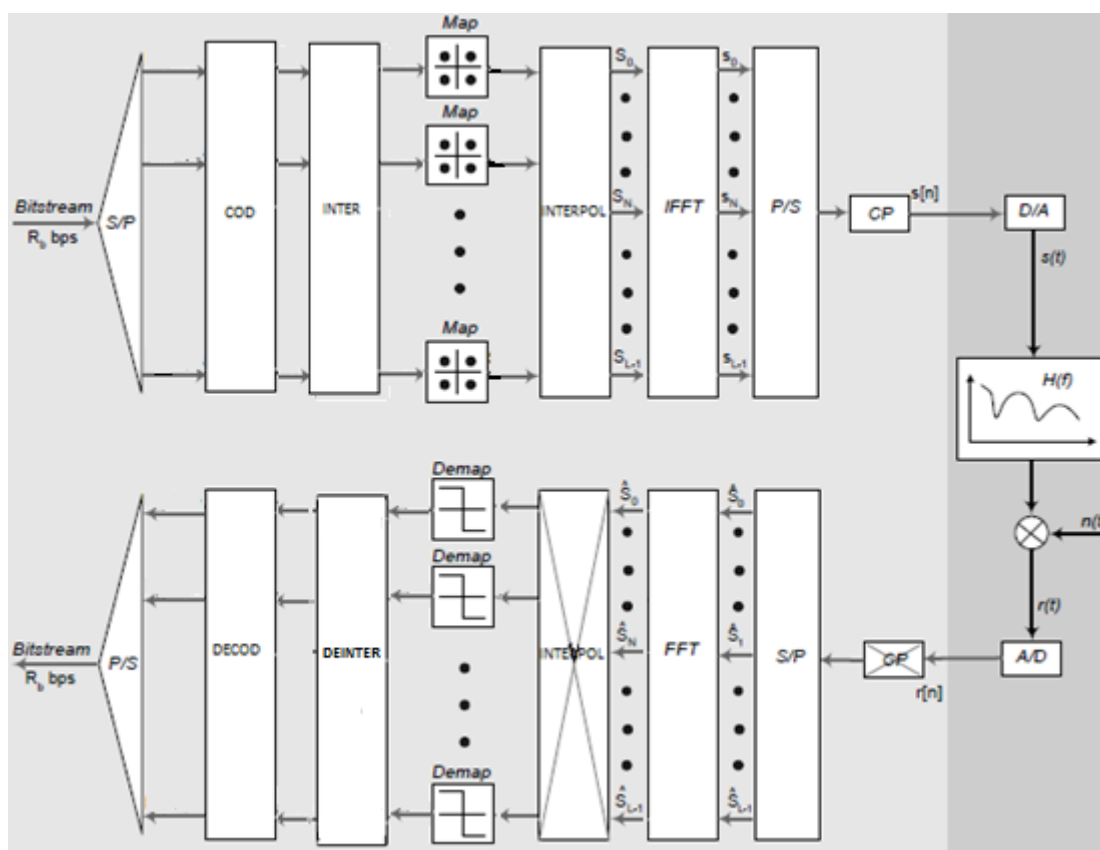
Figura 41: Codificador convolucional utilizado para as simulações



Fonte: MATLAB, 2015

4.5 Simulação do sistema OFDM com codificação e embaralhador de bits

Figura 42: Modelo OFDM com codificação e embaralhador de bits



Fonte: Produção do próprio autor.

O modelo de embaralhado de bits utilizado não foi o mesmo que o especificado pelo OPERA, foi mudado para simplificação de implementação, mas para efeito de análise não houve muita

diferença, dá para se ter a ideia do que o codificador pode fazer com as curvas. Os testes foram realizados para os mesmos mapeamentos utilizados anteriormente.

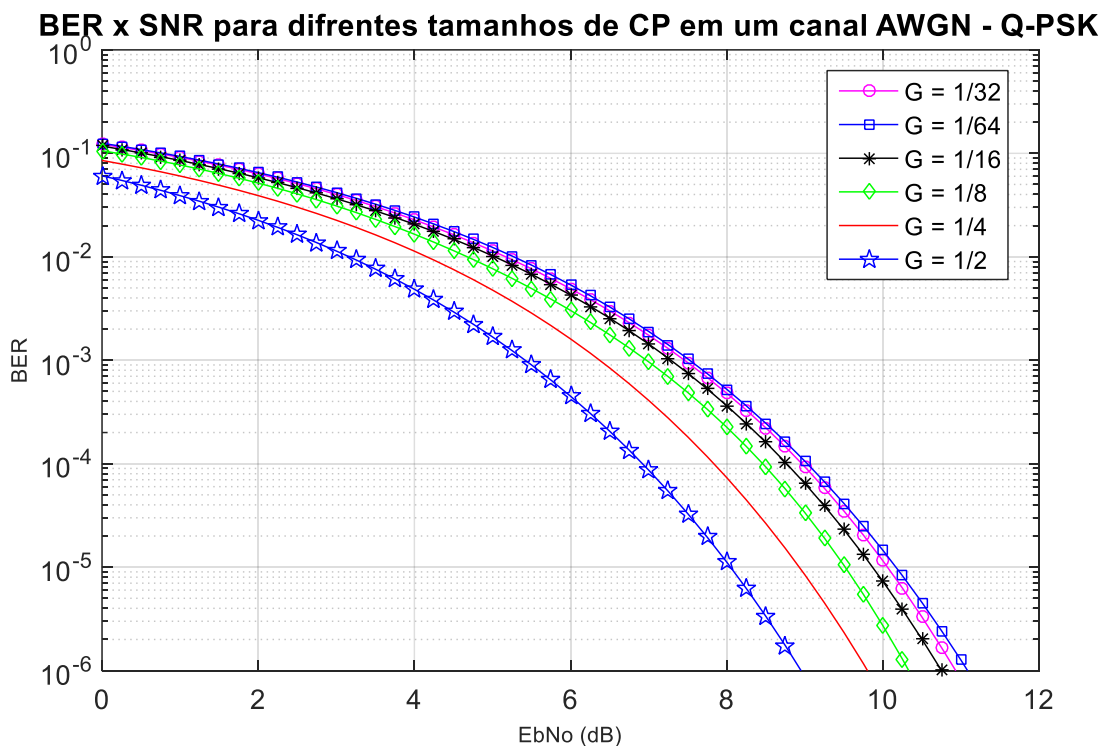
5 ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos pelas simulações no MATLAB permitirá ver uma melhor configuração para a utilização em sistemas de comunicação por rede elétrica. Essa configuração levará em conta valores para melhorar o desempenho do sistema e também algumas especificações do OPERA.

5.1 Análise do prefixo cíclico

O tamanho do prefixo cíclico faz com que a quantidade de erros varie, se utilizar um prefixo cíclico de 32 amostras terá para um BER de 10^{-6} um valor de EbNo quase 12 dB. Já para um prefixo cíclico de 1024 amostras, terá para o mesmo valor de BER um EbNo de aproximadamente 9,7 dB. Apenas variando o prefixo cíclico terá um ganho de 2,7 dB. O prefixo utilizado no projeto será o especificado pelo OPERA. O CP é uma redundância e essa inserção de redundância faz a taxa de transmissão diminuir. Por tanto pode-se ponderar entre maiores taxas ou menores potência de transmissão.

Figura 43: Comparação do BER por SNR para diferentes tipos de prefixo cíclico

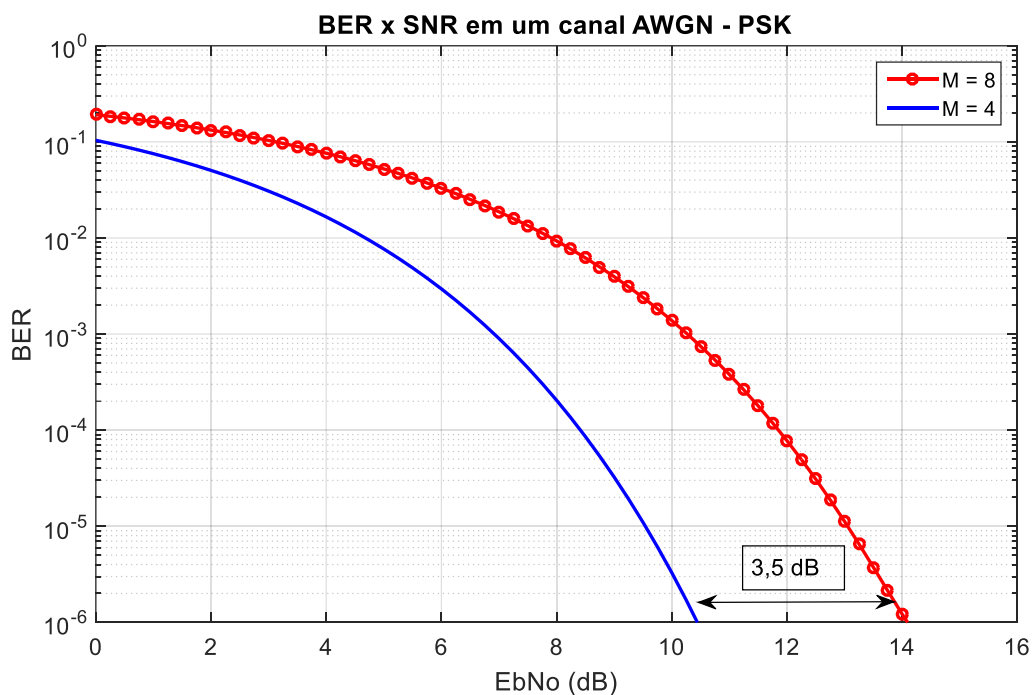


Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 Análise do canal AWGN

A figura 43 mostra as curvas de desempenho para a modulação PSK, para os níveis de modulação utilizados no trabalho, as curvas são para um canal AWGN. Pela figura 43 pode-se perceber que para o BER 10^{-6} o 4-PSK possui um SNR menor que o 8-PSK em 3,5 dB.

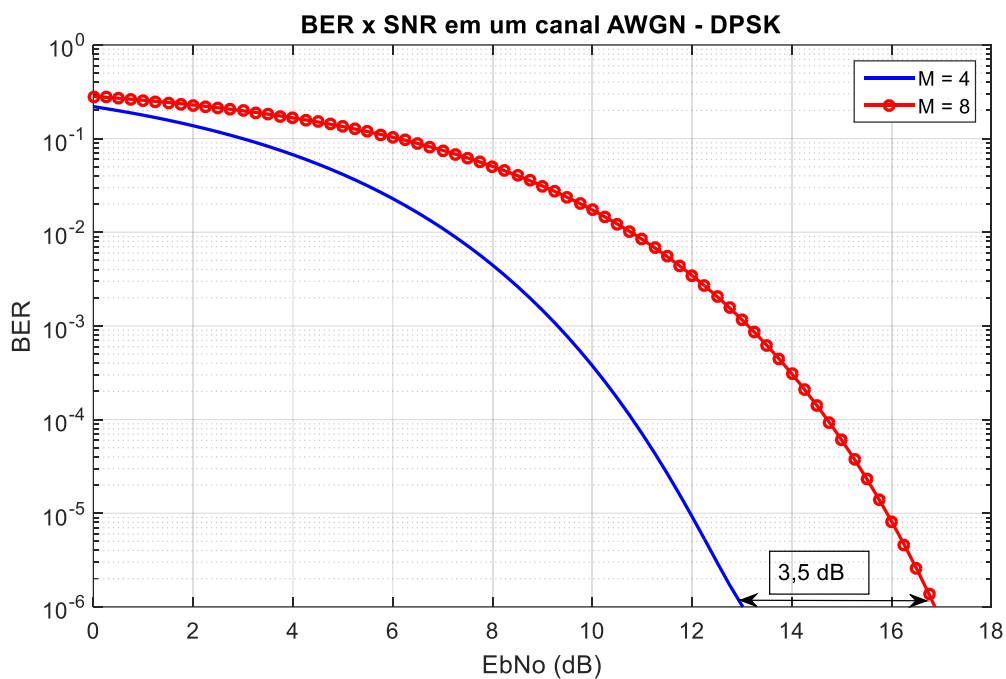
Figura 44: Comparação do BER por SNR para PSK em um canal AWGN



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 44 mostra as curvas de desempenho para a modulação DPSK, para os níveis de modulação utilizados no trabalho, as curvas são para um canal AWGN. Pela figura 44 pode-se perceber que para o BER 10^{-6} o 4-DPSK possui um SNR menor que o 8-DPSK em 3,5 dB.

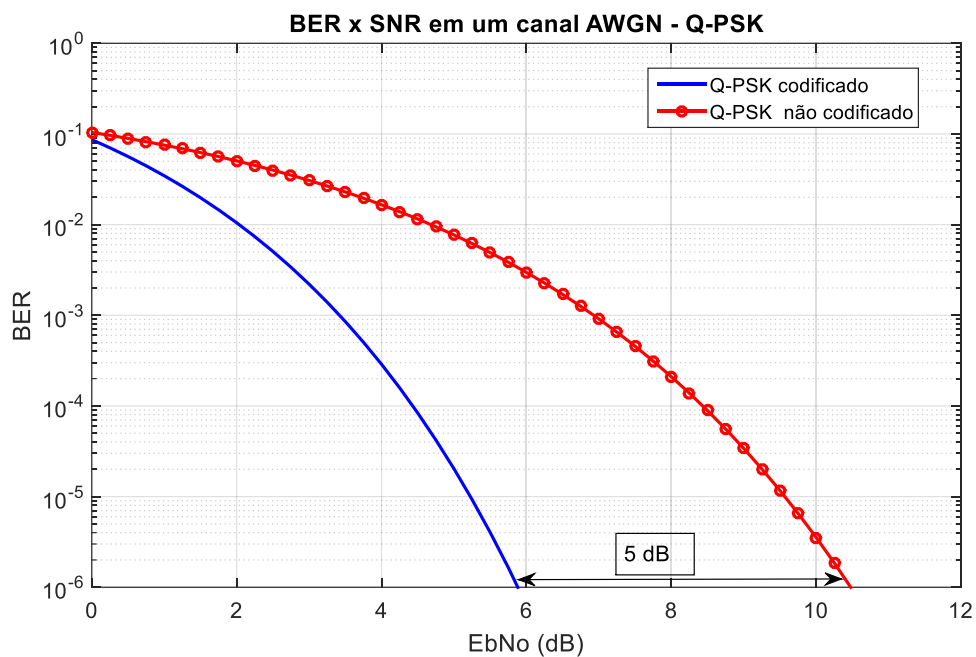
Figura 45: Comparação do BER por SNR para DPSK em um canal AWGN



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a análise do sistema com codificador foram plotadas curvas onde se pode comparar o desempenho do sistema com o codificador e sem o codificador. Observa-se que o sinal codificado possui para um BER de 10^{-6} , em comparação com o não codificado, um ganho de aproximadamente 5 dB para o Q-PSK, como pode ser visto na figura 45.

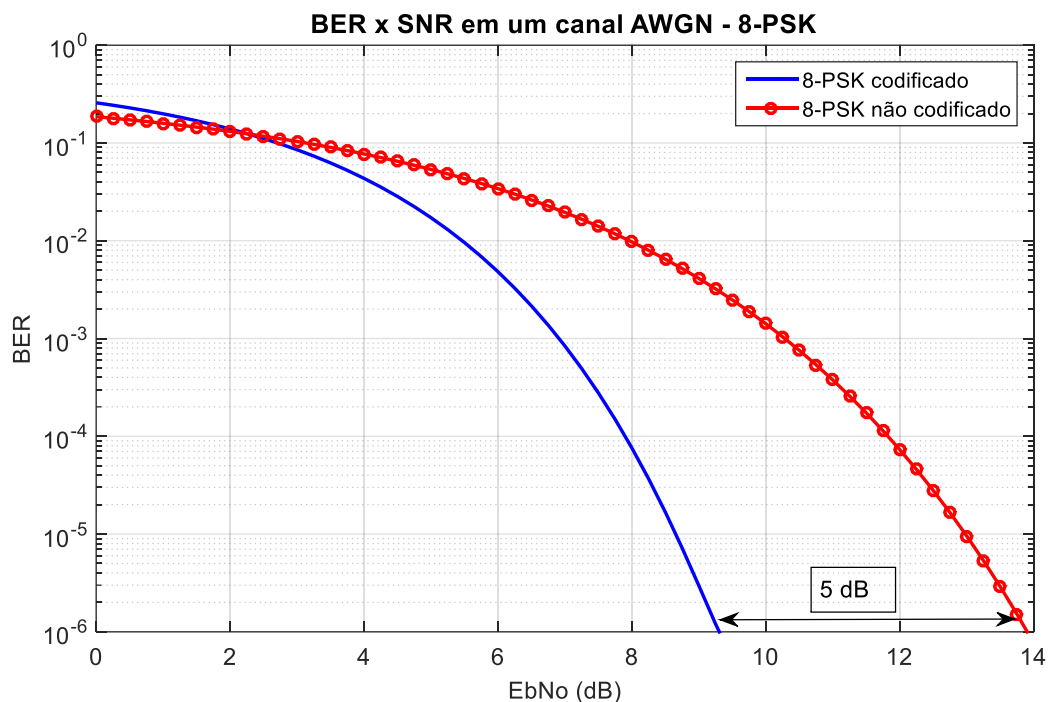
Figura 46: Comparação do BER x SNR do sinal codificado e não codificado em um canal AWGN para Q-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 46 pode ser visto que o ganho é de aproximadamente 5 dB para o mapeamento 8-PSK. Com esses resultados já dá para mostrar que o codificador melhora o desempenho do sistema.

Figura 47: Comparação do BER x SNR do sinal codificado e não codificado em um canal AWGN para 8-PSK

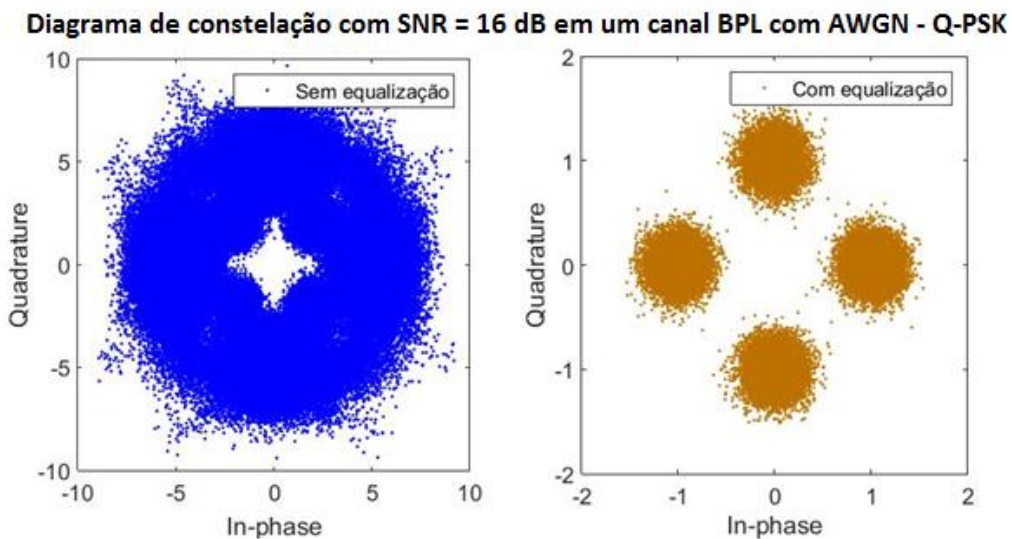


Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 Análise do equalizador

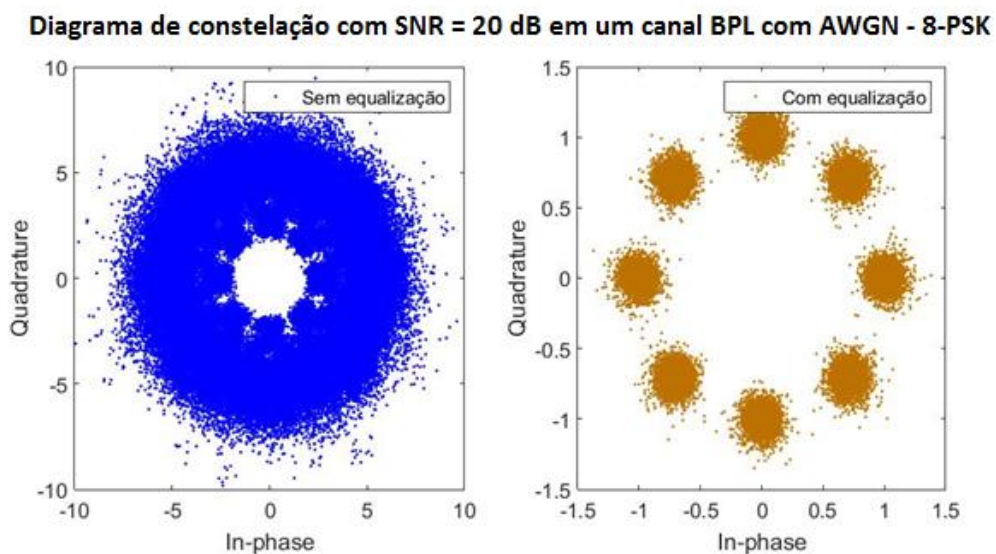
O equalizador tem uma função importante na recepção do sinal, nas figuras abaixo pode-se ver o diagrama de constelação, para o 4-PSK e 8-PSK, sem o equalizador e com o equalizador. Pode-se ver nas figuras 47 e 48 que a equalização, para os dois casos, o sinal não equalizado apresenta uma grande quantidade de erros, não possui símbolos bem definidos, e sim, uma nuvem de pontos. Já para o sinal equalizado pode-se ver como tem-se símbolos mais definidos. Os gráficos foram retirados para o mesmo valor de SNR.

Figura 48: Diagrama de constelação Q-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 49: Diagrama de constelação 8-PSK



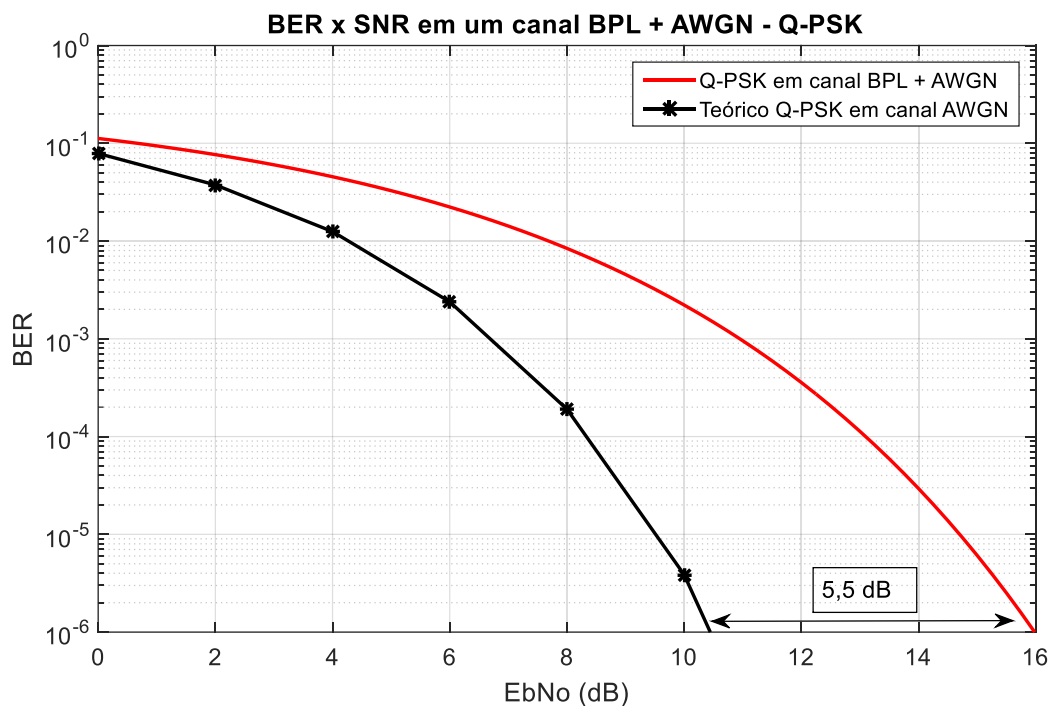
Fonte: Produção do próprio autor.

5.4 Análise do canal BPL com AWGN

Para a análise do canal BPL com ruído AWGN serão analisadas as curvas no canal BPL com ruído AWGN e comparar com a curva teórica para o mesmo tipo de modulação e em um canal AWGN. Para a figura 49 pode-se ver que o canal BPL com AWGN, que é um canal

multipercurso, deixa o sinal pior, em aproximadamente 5,5 dB para o Q-PSK. Para 4-DPSK, 8-DPSK e 8-PSK ocorre um platô que poderá ser retirado com a codificação de canal.

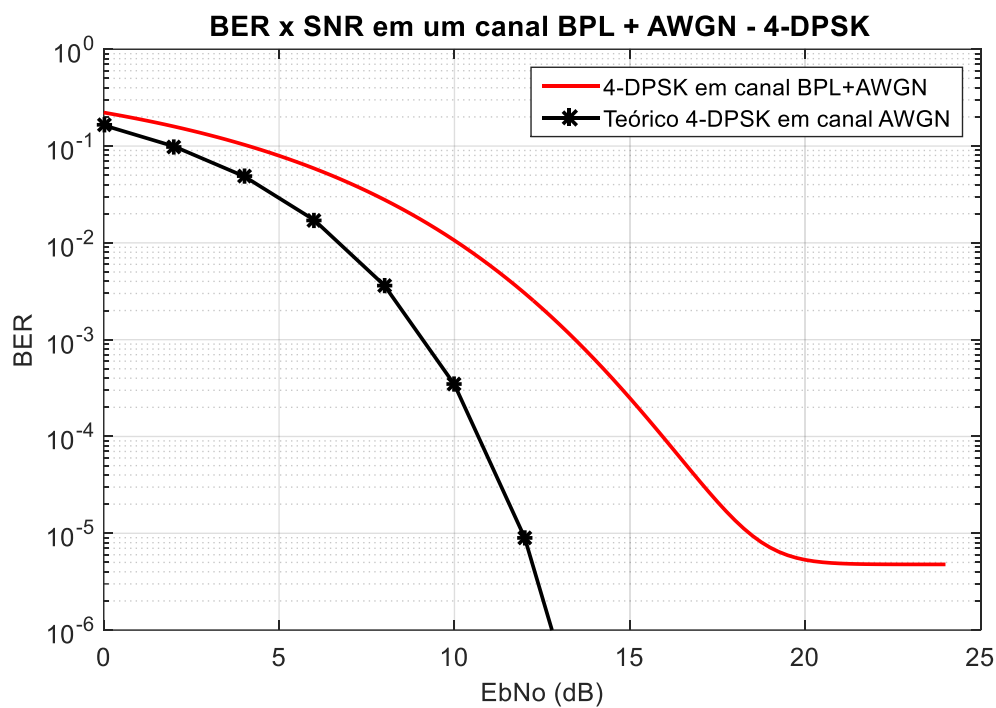
Figura 50: Comparação do BER x SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 4-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 50 representa a curva do 4-DPSK no canal BPL com AWGN, e mostra que ocorre o platô próximo de 10^{-5} .

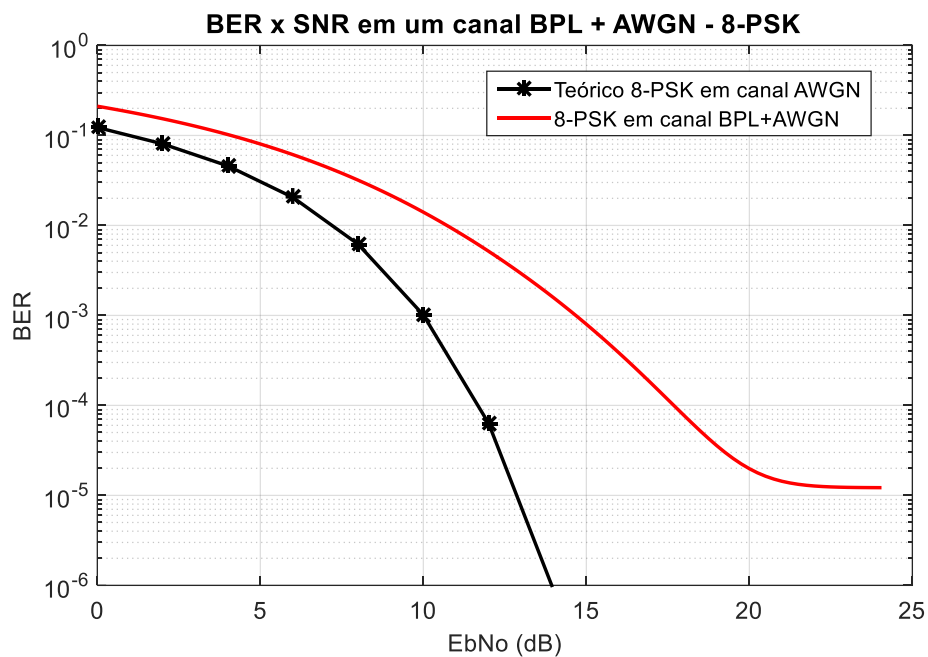
Figura 51: Comparação do BER por SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 4-DPSK



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 51 representa a curva do 8-PSK no canal BPL com AWGN e mostra que ocorre o platô próximo de 10^{-5} .

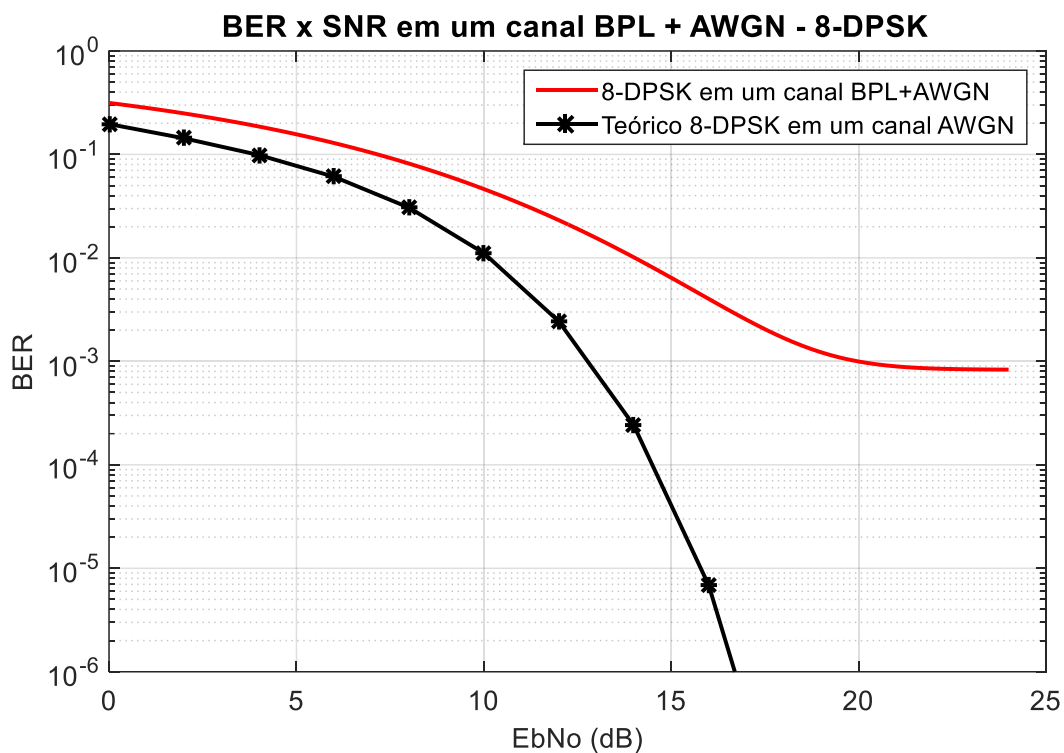
Figura 52: Comparação do BER por SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 8-PSK



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 52 representa a curva do 8-DPSK no canal BPL com AWGN e mostra que ocorre o platô próximo de 10^{-5} .

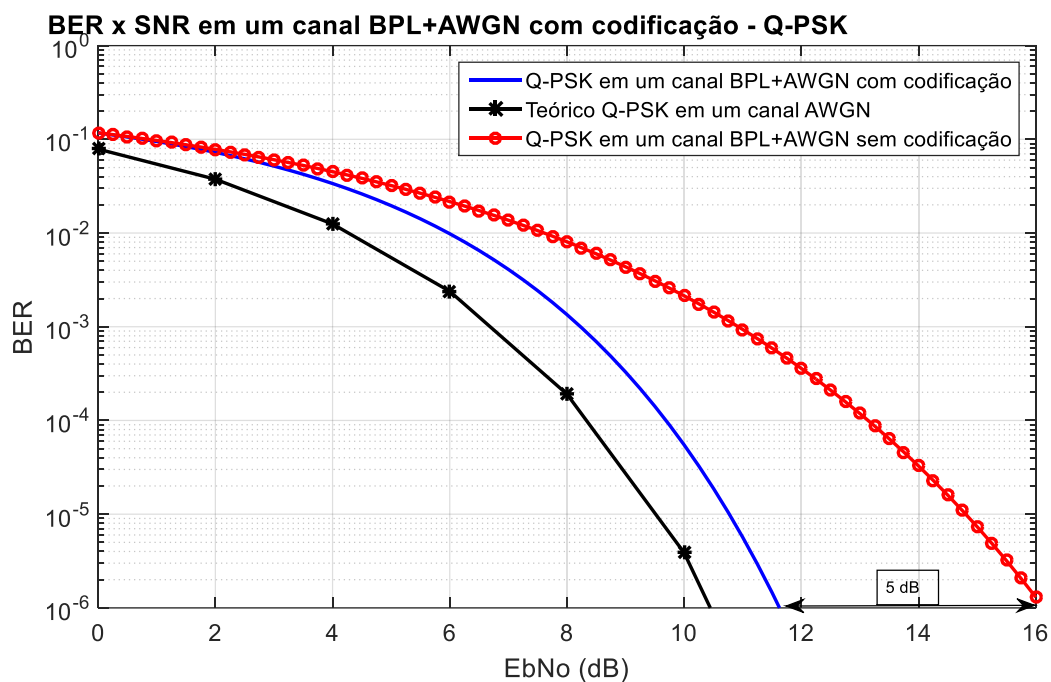
Figura 53: Comparação do BER x SNR em um canal BPL com AWGN e o valor teórico para o canal AWGN para 8-DPSK



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 53 mostra o mapeamento Q-PSK codificado em um canal BPL com AWGN, onde pode-se perceber que a diferença entre as curvas passou de 5,5 dB e passou a ser 1 dB. Houve um ganho de 4,5 dB com a codificação no canal BPL com AWGN para a modulação 4-PSK.

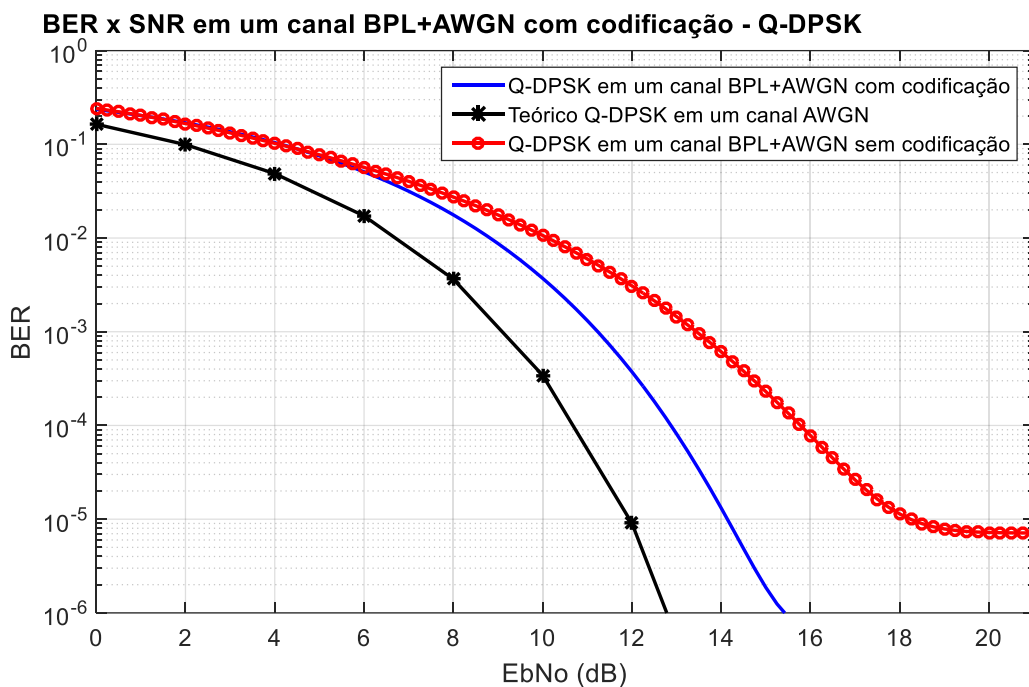
Figura 54: Comparação do BER por SNR para Q-PSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN



Fonte: Produção do próprio autor.

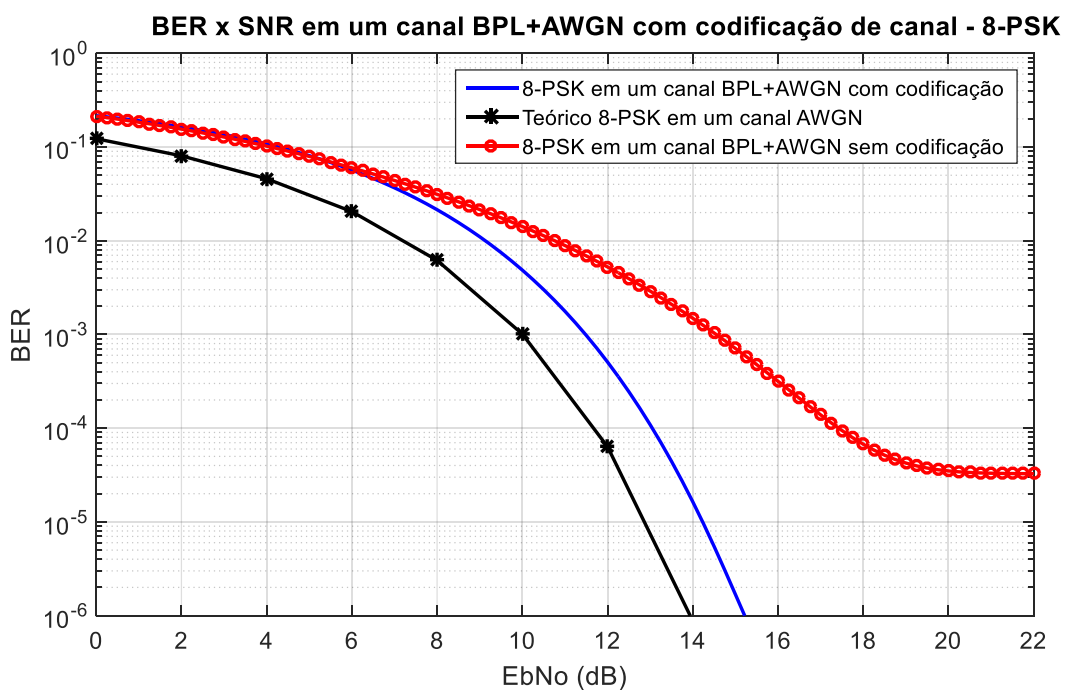
A figura 54 mostra a modulação 4-DPSK em um canal BPL com AWGN e mostra que não ocorre o platô onde ocorria quando não se utilizava a codificação. A figura 55 mostra a modulação 8-PSK, que também havia um platô quando não se utilizava a codificação e com a codificação esse platô sumiu.

Figura 55: Comparação do BER por SNR para Q-DPSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN



Fonte: Produção do próprio autor.

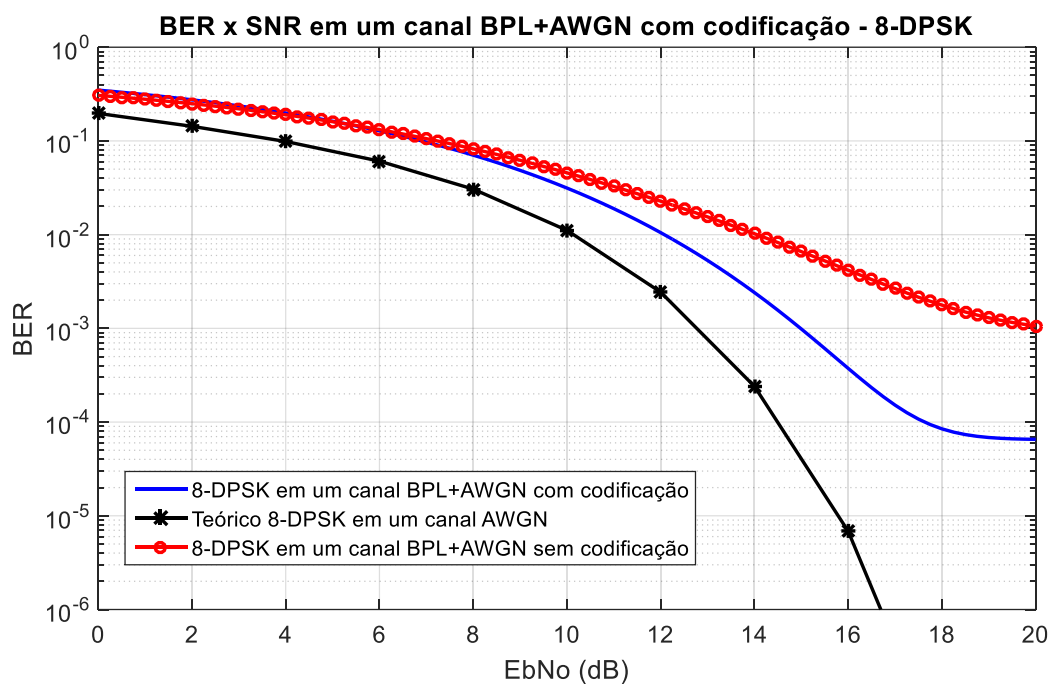
Figura 56: Comparação do BER por SNR para 8-PSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 56 mostra que mesmo com a codificação a modulação 8-DPSK não foi possível retirar o platô, ele simplesmente passou para um patamar inferior.

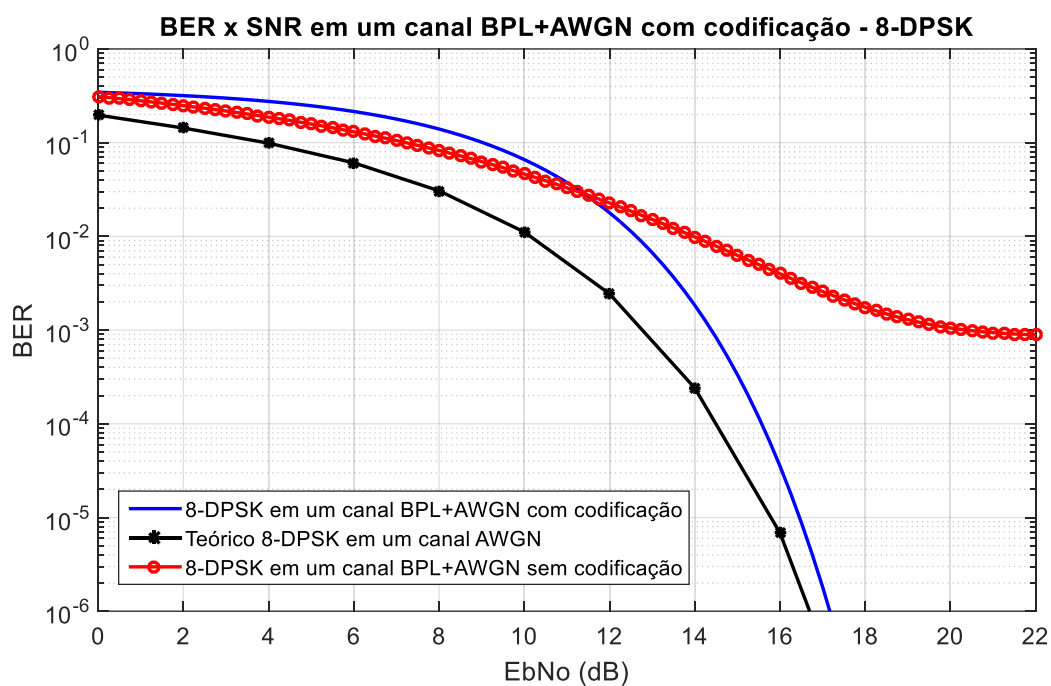
Figura 57: Comparação do BER por SNR para 8-DPSK codificado e teórico para um canal BPL com ruído AWGN



Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se ver na figura do 8-DPSK que o platô continua aparecendo mesmo com a codificação, mas o codificador utilizado foi o mais simples possível, portanto, se trocar a complexidade do codificador esse platô será retirado e além dessa retirada do platô, também terá uma melhora no desempenho do sistema. Esse codificador apresentará uma maior quantidade de memória. Na figura 57 tem-se o 8-DPSK codificado com um codificador mais complexo, assim, o platô que estava presente foi retirado. Quanto mais complexo o codificador melhor o desempenho do sistema.

Figura 58: Comparação do BER x SNR para 8-DPSK com um codificador mais complexo

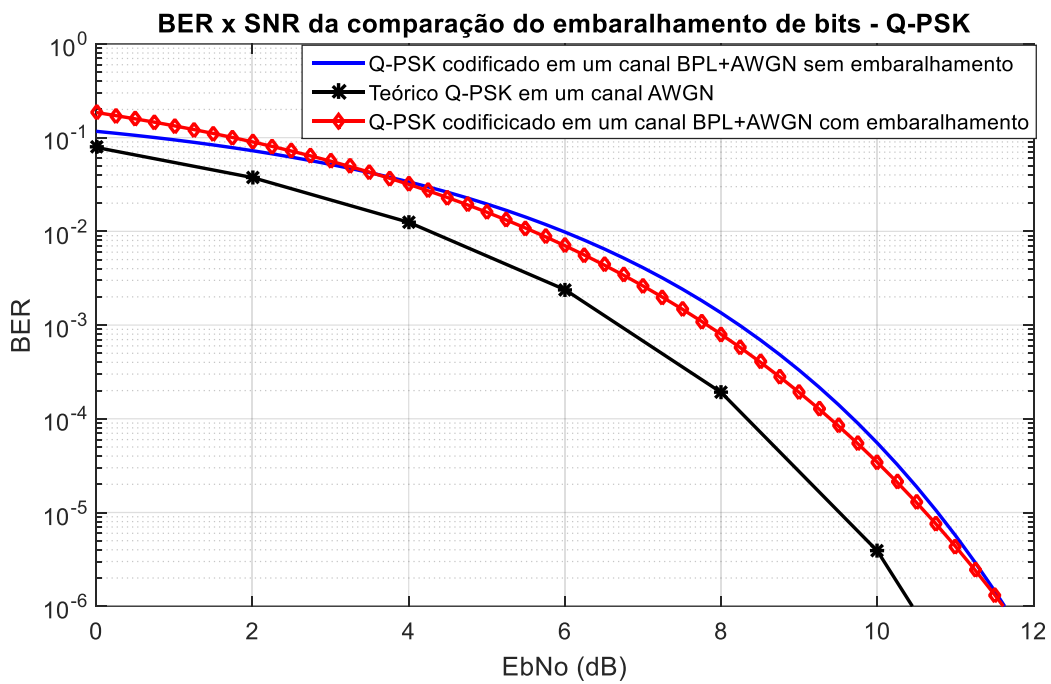


Fonte: Produção do próprio autor.

5.5 Embaralhamento de bits

O *interleaving* (embaralhador de bits) embaralha o sinal que será transmitido e desembaralha na recepção, não foi implementado igual ao do OPERA por simplificação na implementação, mas pode-se ver o efeito desse embaralhador na figura 58.

Figura 59: Comparando o sistema com embaralhamento de bits e sem embaralhamento de bits.



Fonte: Produção do próprio autor.

6 CONCLUSÕES

A comunicação via rede elétrica é viável e tem taxas bem atrativas tanto para aplicações na indústria quanto para usuários residenciais, tendo um grande potencial por não precisar de instalação de cabos. Com as especificações OPERA o sistema tem capacidade de transmissão de 200 Mbps. O maior problema a ser enfrentado pela utilização da rede elétrica como canal de comunicação é esse canal poder ser representado como um canal multipercurso, fazendo com que os sistemas de portadora única não consigam transmitir as informações, sendo assim implementados utilizando sistemas multiportadoras, como o OFDM. Mesmo o sistema básico modelado não apresenta um bom desempenho, assim, a codificação de canal é muito importante e faz com que o desempenho fique muito melhor, também é necessário fazer uma boa análise do prefixo cíclico, pois com um prefixo muito pequeno tem-se interferência intersimbólica e um prefixo muito grande tem-se dados sendo transmitidos em redundância, fazendo a taxa de transmissão diminuir. As especificações OPERA permitem uma padronização do sistema, podendo tornar o sistema cada vez utilizado entre os usuários de internet.

6.1 Proposta de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros pode se fazer uma análise utilizando todas as especificações OPERA, implementando todos os blocos não implementados nesse projeto, como mapeamento adaptativo e simular as especificações ditas no OPERA, utilizar o mesmo codificador e o mapeamento ADPSK.

Por muitos livros trazerem informações diversas a respeito dos codificadores recursivos e não recursivos, uma análise nesses codificadores poderia fazer parte de um trabalho e também fazer uma proposta de um codificador convolucional mais eficiente.

7 REFERÊNCIAS

Albuquerque, Enersto L. Pinto e Claudio P. de. 2002. A técnica de transmissão OFDM. *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*. Junho de 2002, pp. 1-10.

Baptista, Manuel Carlos Pereira. 2008. *Identificação e Caracterização da Modulação dos Sinais Digitais em RF*. Portugal : Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Aveiro, 2008.

CASTOR, LEONARDO RIBAS MARTINS. 2015. *A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Dados em Redes Smart Grid*. Universidade Federal do Espírito Santo : Dissertação em mestrado , 2015.

COSTA, André Filipe, et al. 2012. *Redes PLC: uma análise dos motivos da não implantação desta tecnologia em escala comercial no estado de Minas Gerais*. Faculdade Pitágoras de Belo Horizonte : Projeto de graduação no Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores, 2012.

HomePlug Alliance. 2016. <http://www.homeplug.org/>. *HomePlug Alliance*. Acessado em: 28 de Novembro de 2016. <http://www.homeplug.org/alliance/alliance-overview/>.

Junior, Alcir Rodrigues de Melo. 2009. *TRANSMISSÃO DE DADOS POR PLC: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS CABEADAS E WI-FI*. Minas Gerais : Universidade Presidente Antônio Carlos, 2009.

KARASINSKI, Eduardo. 2015. Powerline Communication: a rede na tomada. *Tecmundo*. Acessado em: 03 de Novembro de 2015. <http://www.tecmundo.com.br/o-que-e/3068-powerline-communication-a-rede-na-tomada.htm>.

Neto, Alfredo de Carvalho. 2016. A Inserção de Entrelaçadores Temporais em Sistemas de Transmissão de TV Digital Diante de Ruído Impulsivo. *Teleco Inteligência em*

telecomunicação. Acessado em: 1 de Novembro de 2016.
<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentri1/default.asp>.

Oliveira, Alinne P. de. 2016. Análise de desempenho da comunicação BPL em uma rede elétrica de 13,8 KV: Estudo de caso. Julho de 2016.

OPERA. 2007. First draft of the OPERA specification version 2. *Open PLC European Research Alliance*. 4 de Junho de 2007.

Pereira, Alexandre Cesar, et al. 2011. *A Viabilidade da Tecnologia PLC como Alternativa para o PNBL*. Universidade Paulista : Graduação em engenharia elétrica, 2011.

Rocha, João Wilson Vieira. 2006. Teleco - Inteligência em telecomunicações.
<http://www.teleco.com.br>. Acessado em: 19 de 6 de 2006.
<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswlanI/default.asp>.

Rodrigues, Augusto Baccaro, et al. 2000. *Codificação convolucional com decodificador Viterbi*. Trabalho entregue para a disciplina: Processamento Digital de Sinais : Universidade Federal do Paraná, 2000.

Santos, Willian Garcia Viegas dos. 2016. *TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA: TOMADA INTELIGENTE*. Projeto de graduação em engenharia elétrica : Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

Silva, Elisângela dos Santos e Júnior, Josafá Alves dos Santos. 2010. *Redes PLC I: Alternativa para Acesso Banda Larga*. Unidade Baiana de Pesquisa e Extensão : Projeto de conclusão do curso de Engenharia de Telecomunicações, 2010.

SILVA, JAIR ADRIANO LIMA. 2006. *ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA COFDM PARA COMUNICAÇÃO VIA REDE ELÉTRICA*. Universidade Federal do Espírito Santo : Dissertação em Engenharia Elétrica, 2006.

Souza, Ilan Schnitman. 2013. *PROJETO DE UM SISTEMA DE CORREÇÃO DE ERROS EM COMUNICAÇÃO MÓVEL USADO NO PADRÃO LTE*. Universidade Federal da Bahia : Dissertação de pós-graduação em engenharia elétrica, 2013.

Teixeira, Edson Rodrigues Duffles. 2005. <http://www.teleco.com.br/>. *Teleco - Inteligência em telecomunicações*. Acessado em: 18 de Abril de 2005. <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplc/default.asp>.