

Laboratório 3: Transmissão Digital em Banda Base

Marcelo Bittencourt do Nascimento Filho
marcelo.bn@aluno.ifsc.edu.br

Relatório apresentado para a disciplina de Sistemas de Comunicação I do curso de Engenharia de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina - Campus São José.

1 Introdução

A comunicação digital é uma das grandes responsáveis pela globalização e modernização nas últimas décadas. Através dela é possível enviar dados com taxas altíssimas, com ótimo desempenho e entre grandes distâncias de forma rápida e eficaz. Para o seu bom funcionamento, foi necessário desenvolver diversas técnicas e análises que ao longo do tempo foram se aprimorando para tornar esse tipo de comunicação ainda mais confiável e eficiente.

A presente pesquisa visa o estudo dos principais conceitos para se ter um bom entendimento sobre o assunto. Através de simulações com o *software Matlab* será possível analisar matematicamente e graficamente todos os pontos fundamentais para a compreensão completa da transmissão digital desde o transmissor até o receptor, levando em consideração passos importantes como a análise de ruídos e probabilidade de erros.

Na segunda seção deste documento haverá a descrição dos conceitos abordados durante as simulações para tornar o entendimento o mais claro possível. Na terceira seção serão discutidas as questões utilizadas para as simulações. E por fim, na quarta seção, haverá as considerações finais do laboratório. Todos os códigos desenvolvidos estão públicos para [download aqui](#).

2 Fundamentação Teórica

2.1 Conversão Analógica-Digital (A/D)

A transmissão de voz e de outros sinais analógicos através de um sistema digital trouxe grandes facilidades para a comunicação atual. Porém, para isto acontecer ocorrem várias etapas e processos e, a primeira delas é a conversão desse sinal analógico de entrada para um sinal digital. A conversão A/D é definida em três etapas: **Amostragem**, **Quantização** e **Codificação**.

A primeira etapa consiste em amostrar o sinal analógico através de uma frequência de amostragem, respeitando a taxa de Nyquist ($f_s \geq 2f_m$), para

transformar o sinal contínuo em um discreto, porém ainda analógico, possibilitando assim o trabalho com amostras do sinal. A Figura 1 demonstra este primeiro processo, sendo retratado na Figura 1-a o sinal analógico contínuo e, na Figura 1-b em vermelho, as amostras do sinal obtidas no final da operação.

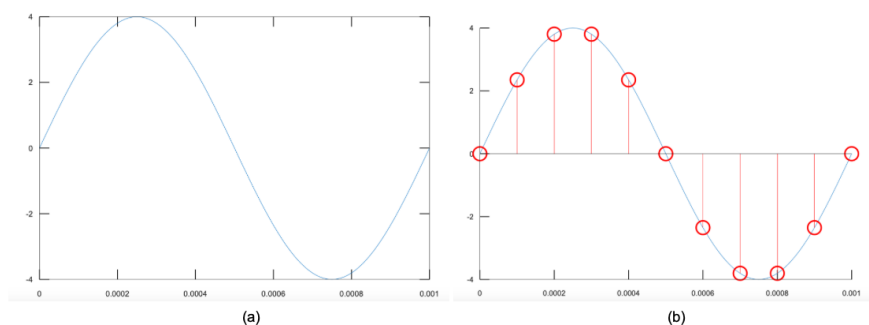


Figura 1. Processo de amostragem. Fonte: Autoria própria.

O próximo passo é a quantização, aqui ocorre o processo de discretização da amplitude do sinal amostrado. Para isto é necessário determinar o número de bits de quantização, denominado de k , que servirá para representar finitos níveis de tensão para os quais as amostras serão aproximadas. O número de níveis depende do número de bits de acordo com a relação: Sendo L o número de níveis e k o número de bits de quantização, $L = 2^k$.

A Figura 2 demonstra um processo de quantização realizada para um sistema onde $k = 3$ bits. Nela é possível visualizar um sinal já amostrado assim como os níveis de quantização tracejados na cor azul, na coluna ao lado há os níveis denominados de 0 a 7 onde cada um é representado por um símbolo que corresponde o valor do nível em binário. Então pegando como exemplo a segunda amostra que possui como valor real a tensão de 2,4 V, ao arredondá-la para um nível mais próximo teremos um novo valor o qual será de 2,5 V que consequentemente será representado pelo sequência binária 110, pois, está sendo representado pelo nível 6.

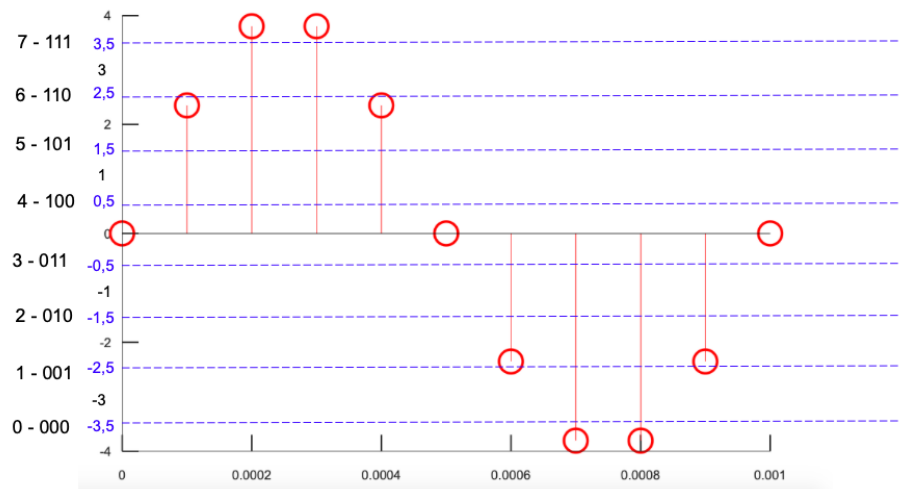


Figura 2. Processo de quantização. Fonte: Autoria própria.

Por fim, ocorre o processo de codificação o qual consiste em analisar todos os valores das amostras arredondadas e representá-las como uma sequência binária. Na Tabela 1 estão demonstrados todos os valores finais assim como a sequência binária gerada através do sinal analógico em questão.

Valor Real	0	2.4	3.6	3.6	2.4	0	-2.4	-3.6	-3.6	-2.4	0
Valor Quantizado	0.5	2.5	3.5	3.5	2.5	0.5	-2.5	-3.5	-3.5	-2.5	0.5
Nível	4	6	7	7	6	4	1	0	0	1	4
PCM	100	110	111	111	110	100	001	000	000	001	100
Seq. binária	10011011111110100001000000001100										

Tabela 1. Dados conversão A/D. Fonte: Autoria própria.

2.2 Formas de onda PCM (Pulse Code Modulation)

No final do processo de conversão A/D, tem-se uma sequência binária correspondente à informação que deseja-se enviar. Porém, não é possível transmitir através de um meio físico esses bits, desta forma será necessário adaptar esta sequência à uma forma de onda que representará os 0s e 1s através de pulsos elétricos.

Esta adaptação, ou formatação, é denominada de PCM e existem variados tipos para diferentes aplicações no que tange a comunicação digital. Alguns exemplos de formas de onda PCM são: NRZ (não retorna zero) unipolar que tem suas amplitudes variando de 0 V a A V, NRZ bipolar com amplitudes variando de -A V a A V, Bifásica L (*Manchester*) utilizada para troca de dados na internet pelo fato de carregar junto com a informação o seu *clock*, entre outras [1].

2.3 Transmissão em Banda Base

Nesta etapa, já com a forma de onda PCM definida, é possível realizar a transmissão dos dados através de um canal de comunicação. Durante todo o trajeto entre o emissor e receptor, o sinal pode sofrer interferências de ruídos como por exemplo o ruído térmico, também denominado de Ruído Branco Gaussiano Aditivo (AWGN).

As principais características do ruído branco é possuir uma densidade espectral de potência constante com valor $N_O/2$ e uma função impulso com amplitude $N_O/2$ como função autocorrelação. Desta forma, ao chegar no receptor, o sinal deverá passar por um filtro que elimine essas frequências ruidosas causadas pelo AWGN.

Ao passar pelo filtro, ocorre um processo de subamostragem que irá captar amostras em determinados instantes de tempo e com isso compará-las a um limiar para determinar se as mesmas correspondem ao bit 0 ou ao bit 1.

Um outro ponto importante de análise na detecção do sinal recebido é o seu parâmetro **SNR**. O SNR é a relação sinal-ruído definida pela *razão da potência média do sinal pela potência média do ruído* [2]. A expressão que define esta relação é: $\text{SNR} = E_b/N_O$, sendo E_b a energia de bit e N_O a densidade espectral de potência do ruído. Vale lembrar que esta fórmula está normalizada pela banda e pela taxa de transmissão do sistema, a qual será melhor detalhada durante o desenvolvimento das questões.

2.4 Probabilidade de erro

Como discutido na seção anterior, um sistema de comunicação digital pode sofrer interferências de ruídos como o AWGN. Dependendo da potência desse ruído a detecção do sinal recebido pode ser comprometida afetando a reconstrução dos dados originais. A Figura 3 demonstra dois gráficos os quais representam a Função Densidade de Probabilidade de um sinal aleatório binário, sendo que cada um representa a probabilidade de detecção de um dos bits. A área em comum às duas curvas representa a probabilidade de erro em detectar esses bits e, a partir dela, se pode chegar à função $Q(x)$ abaixo que demonstra esse valor de erro:

$$Q\left(\frac{a_1 - a_2}{2\sigma}\right)$$

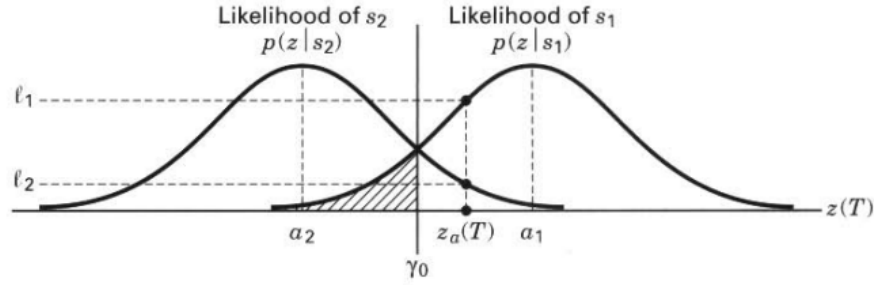


Figura 3. Função Densidade de Probabilidade de um sinal aleatório. Fonte: Sklar, Bernard. 2014.

Na equação descrita acima, a_1 e a_2 representam as amplitudes do sinal e σ o desvio padrão do ruído. Desta forma, para uma menor probabilidade de erro fica evidente que se deve aumentar a diferença entre as amplitudes ou diminuir a influência do ruído através da alteração do seu desvio padrão.

Neste trabalho serão discutidas e analisadas as probabilidades de erros referentes à formatação de onda PCM NRZ unipolar e NRZ bipolar, sendo suas funções de probabilidades as descritas abaixo:

$$Pb_{unipolar} = Q\left(\sqrt{\frac{Eb}{No}}\right)$$

$$Pb_{bipolar} = Q\left(\sqrt{\frac{2Eb}{No}}\right)$$

2.5 Taxa de Erro de Bit (BER)

A Taxa de Erro de Bit (BER - Bit Error Rate) é um gráfico logarítmico utilizado para a determinação do desempenho de um sistema digital, sendo que seu eixo vertical representa a probabilidade de erro e seu eixo horizontal a relação SNR (E_b/N_0). Realizando uma rápida análise, se E_b aumenta e N_0 permanece constante a BER diminui e, caso E_b permaneça constante e N_0 aumente a BER aumenta.

A Figura 4 demonstra o gráfico BER contendo duas curvas, a superior retrata o comportamento da forma de onda PCM NRZ unipolar e a inferior da forma de onda PCM NRZ bipolar. Nela é possível visualizar uma diferença de 3 dB entre as curvas, deixando evidente que a onda bipolar possui uma melhora no desempenho do sinal no quesito probabilidade de erro.

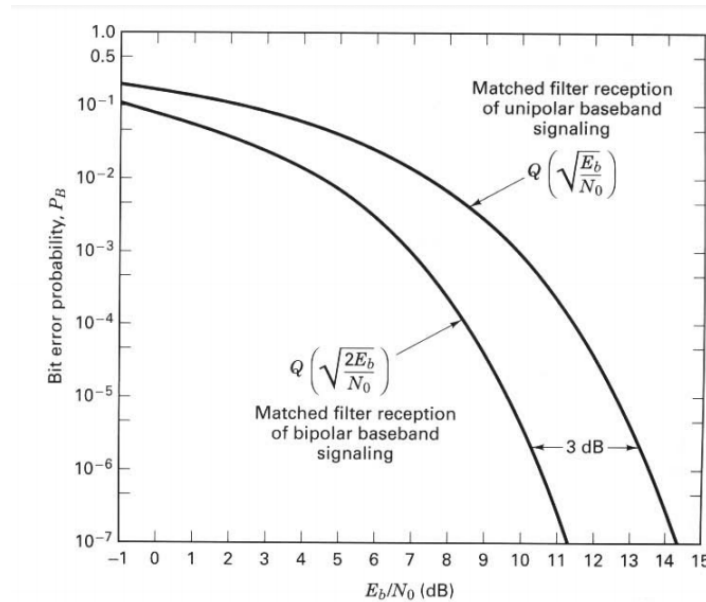


Figura 4. Taxa de erro de bit para NRZ unipolar e bipolar. Fonte: Sklar, Bernard. 2014.

2.6 Filtro casado

No receptor, uma das técnicas utilizadas para melhorar o sinal recebido é aplicar um filtro denominado de Filtro Casado, sendo ele o mesmo filtro utilizado no emissor porém revertido no tempo. O Filtro Casado é um filtro linear desenvolvido para providenciar uma maximização da relação SNR na saída do sistema para, no processo de detecção, ocorrer uma menor quantidade de erros de bits [3].

3 Desenvolvimento

3.1 Questão 1

O principal objetivo desta questão é realizar a transmissão de uma sequência de bits determinada ([0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0]) e analisar sua recepção. Primeiramente foi necessário realizar uma superamostragem na sequência de bits e após este processo foi realizado uma filtragem para formatar esta sequência de dados em uma forma de onda PCM NRZ unipolar com amplitude máxima de 1 V. A Figura 5 demonstra os bits a serem transmitidos, a sequência de bits superamostrada e o filtro NRZ desenvolvido, respectivamente. A Figura 6 representa a forma de onda PCM enviada.

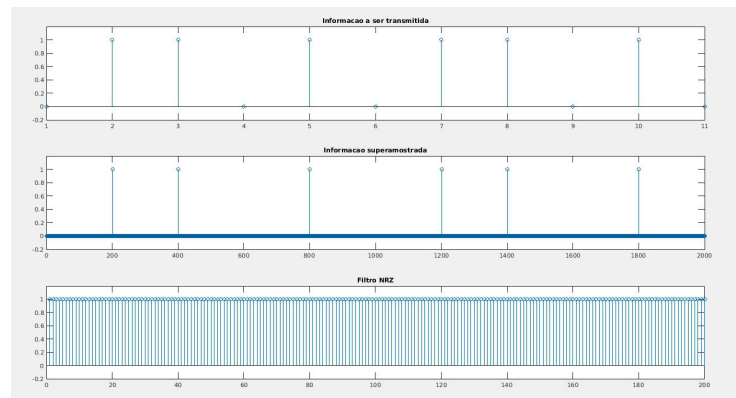


Figura 5. Sinais gerados no transmissor. Fonte: Autoria própria.

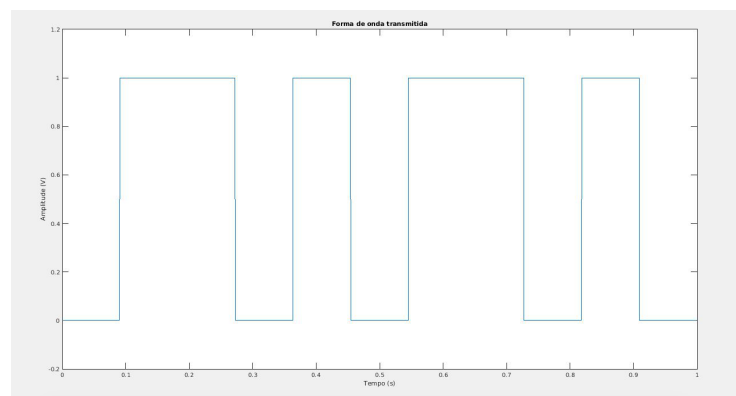


Figura 6. Forma de onda PCM NRZ unipolar transmitida. Fonte: Autoria própria.

Após todos esses processos realizados no transmissor, a onda PCM é transmitida e passa por um canal AWGN com parâmetro SNR de 10 dB, desta forma, adquire o ruído branco que afetará o sinal e sua detecção. Nesta parte do experimento são solicitadas duas análises de recepção, a primeira delas requer que se faça a detecção do sinal **sem** a utilização do filtro casado e a outra **com** a utilização desse filtro.

Bem, antes de iniciar essas análises é importante definir as etapas realizadas no receptor, o primeiro passo a se fazer é subamostrar o sinal recebido para realizar a captura de amostras em determinados instantes de tempo e, após isso, comparar os valores dessas amostras com um limiar (neste estudo o limiar foi definido como a metade da amplitude máxima do sinal) para verificar se a amostra refere-se ao bit 0 ou ao bit 1.

Dependendo das características do sinal e principalmente da sua relação SNR é muito provável a ocorrência de erros na detecção, e desta forma, é extremamente aconselhável a utilização de um filtro casado na entrada do sistema para diminuir a influência do ruído no sinal e consequentemente diminuir os erros na detecção. Para a implementação desse filtro foi utilizada a função *flplr()*, sendo seu parâmetro o filtro NRZ utilizado no transmissor.

Prosseguindo com o experimento, o gráfico em vermelho da Figura 7 retrata o sinal recebido com ruído sem a atuação de um filtro casado, desta forma é possível visualizar que o sinal está muito afetado o que acarretou em 1 bit de erro, que pode parecer pouco porém deve-se levar em consideração que foi transmitido apenas 11 bits, fazendo com que a porcentagem de erro fique em torno de 9%. Por outro lado, o gráfico em verde da Figura 7 demonstra o sinal recebido após a passagem por um filtro casado, o que resultou em um sinal muito mais limpo e que não gerou nenhum erro durante a sua detecção.

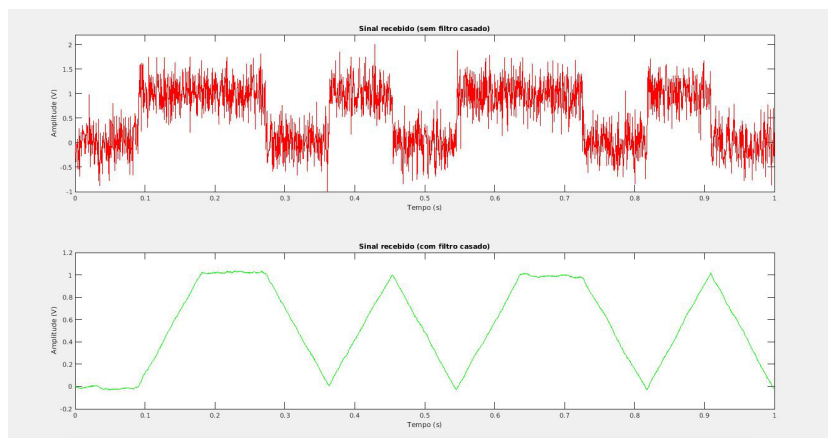


Figura 7. Sinal recebido sem a atuação do filtro casado e com a atuação do filtro casado. Fonte: Autoria própria.

3.2 Questão 2

3.2.1 Sistema 1: O objetivo dessa questão é analisar o comportamento da probabilidade de erro de três sistemas predeterminados. O primeiro deles, denominado de Sistema 1, é composto pela transmissão de dois sinais aleatórios com formatação **NRZ unipolar**, sendo um deles de amplitude 1V e o outro de 2V. Outra característica importante desse sistema é que nenhum dos sinais sofre a atuação de um filtro casado durante a sua recepção.

Para a realização da simulação, foi necessário o uso da função *randint()* que gera uma sequência de bits aleatórios seguindo uma distribuição gaussiana. Após esta etapa, foram criados dois sinais, um com amplitude 1V e outro com 2V, que passaram por um filtro formatador NRZ para dar a forma de onda adequada aos sinais.

Agora, para a análise do desempenho de erro foi utilizado um laço de repetição que irá simular diferentes detecções de acordo com o valor do parâmetro SNR de cada laço. Como valor inicial, o SNR recebeu 0 e como valor final (máximo), o SNR foi definido como 18. A cada iteração os sinais são passados por um canal AWGN, subamostrados e comparados com o seu respectivo limiar e, após isso é realizado a contagem de erros de bits através da soma de uma operação **xor** entre a informação original e a detectada.

Como resultado final, foi obtido o gráfico demonstrado na Figura 8. Nela é possível perceber que o sinal cuja forma de onda possui amplitude de 2V obteve um melhor resultado, pois, a potência do sinal é maior fazendo com o que o ruído não afete tanto a detecção do mesmo.

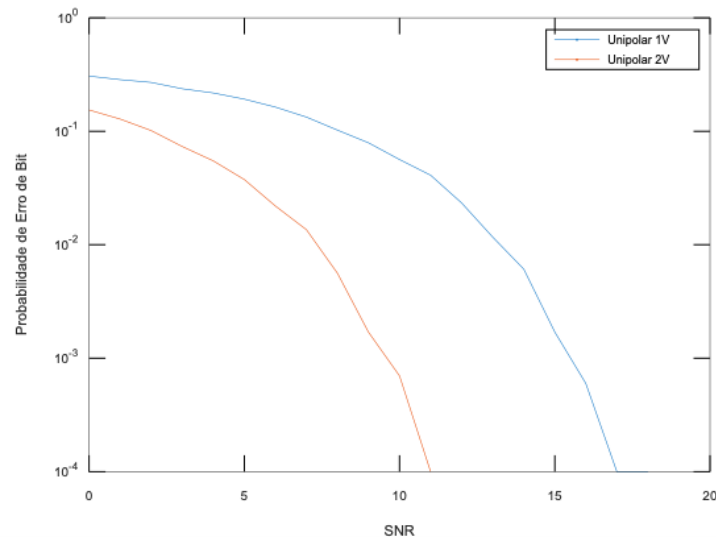


Figura 8. BER para o Sistema 1. Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Sistema 2: Nesse sistema haverá o mesmo tipo de análise que o anterior, porém, será criado apenas um único sinal definido como NRZ unipolar com amplitude de 1V. A diferença aqui, é que na recepção, haverá um filtro casado por onde o sinal pode ou não ser aplicado, ou seja, será feita uma análise de probabilidade de erro entre o que passou pelo filtro com o sinal que não passou pelo filtro.

Como anteriormente, ocorrerá todos os processos de transmissão e recepção, assim como será realizado o laço de repetição para se conseguir gerar o gráfico de BER. A Figura 9 demonstra o resultado obtido com a simulação, com ela se pode concluir que o sinal que passou pelo filtro casado obteve uma taxa de erro menor em relação ao outro, isto porque o filtro diminuí a influência da potência do ruído no sinal fazendo com que a potência própria do sinal se sobressaia para determinados valores de SNR.

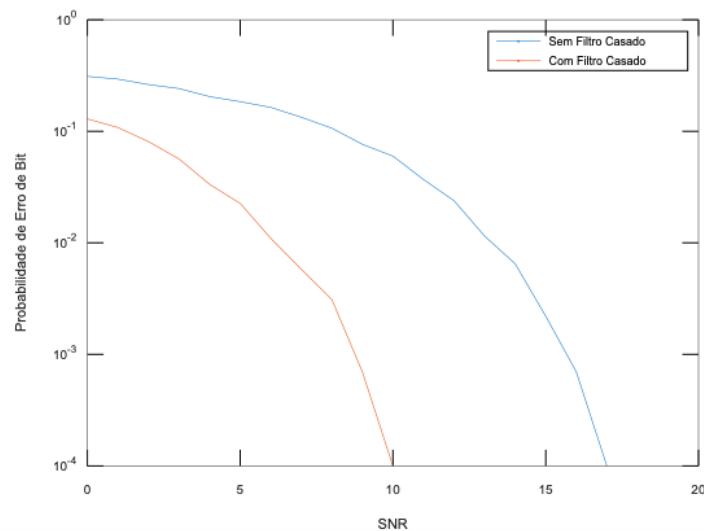


Figura 9. BER para o Sistema 2. Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Sistema 3: O último sistema desenvolvido para a análise de erro de bit é composto por sinais com forma de onda NRZ, porém, uma unipolar (com tensões de 0V e 1V) e outra bipolar (com tensões de -1V e 1V) sendo que ambas irão sofrer a atuação de um filtro casado na sua recepção. Todo o processo de transmissão e recepção foi semelhante aos sistemas anteriores, obviamente, com algumas mudanças devido a um dos sinais ter formatação bipolar.

A Figura 10 demonstra o gráfico obtido ao término da simulação. O resultado final indica que a formatação NRZ bipolar possui um melhor desempenho em relação a unipolar e, isto, confirma o que foi estudado em sala. De acordo com as equações e o gráfico da seção 2.5, realmente a bipolar possui uma taxa de erro menor chegando perto dos 3 dB de diferença. É importante destacar que dentre todas as formas de onda analisadas, essa obteve o melhor desempenho de erro.

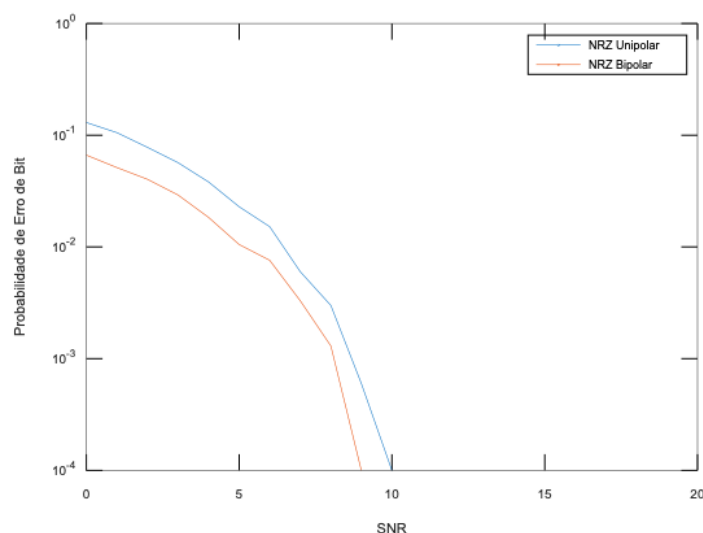


Figura 10. BER para o Sistema 3. Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Parte Final: Por fim, este último item do laboratório solicita que se realize também uma análise de probabilidade de erro de bits para um sistema idêntico ao Sistema 3. Porém, esta análise deve ser feita utilizando além da maneira prática, a forma teórica com o uso das funções $Q(x)$ demonstradas na seção 2.4 para as formas de NRZ unipolar e bipolar.

Antes de iniciar a simulação, é necessário realizar uma análise para determinar a relação entre as expressões S/N e E_b/N_o . Partindo da razão entre S (potência do sinal) e N (potência do ruído), é possível substituir S por E_b (energia de bit) sobre T (período) e N por N_o (densidade espectral de potência do ruído) vezes W (largura de banda). Realizando a troca de $1/T$ por R (taxa de transmissão), fica evidente a relação entre S/N e E_b/N_o , sendo E_b/N_o a razão normalizada pela taxa de transmissão e pela largura de banda.

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b \times 1/T}{N_o \times W} = \frac{E_b \times R}{N_o \times W}$$

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} \times \frac{W}{R}$$

Como nos itens anteriores, foi realizado um laço de repetição para simular diferentes transmissões e recepções, porém, aqui foi variado o valor de E_b/N_o ao invés do parâmetro SNR. Durante a etapa de contabilizar os erros de bits, além da soma de operações **xor** foi utilizado as respectivas funções $Q(x)$ para as formas de ondas trabalhadas. Com isso surge um ponto importante nessa experiência, o parâmetro x da função $Q(x)$ deve ser linearizado e não na escala dB e, portanto, deve ser feita a linearização do mesmo para utilizá-lo nas funções. As Figuras 11 e 12 demonstram o resultado final para a simulação prática e teórica, respectivamente. Por elas é possível perceber que a análise teórica obteve um desempenho muito melhor e, que a formatação NRZ bipolar manteve seu bom desempenho nas duas simulações respeitando a curva da seção 2.5.

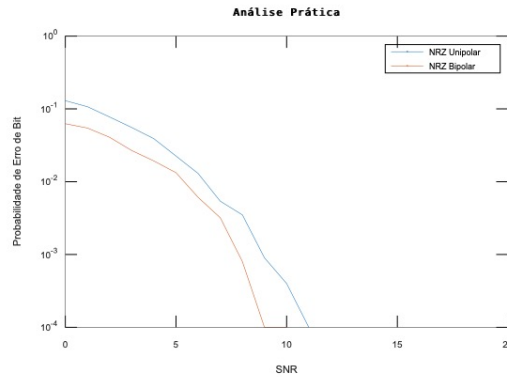


Figura 11. BER para o Sistema 3 com a utilização da simulação prática. Fonte: Autoria própria.

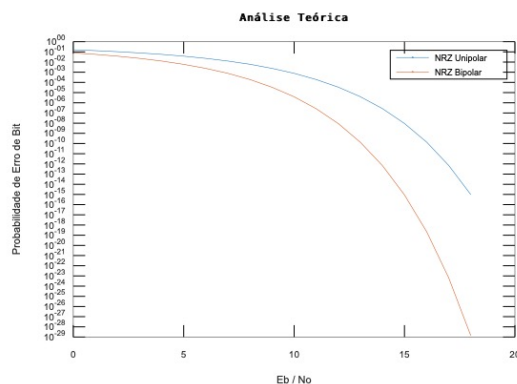


Figura 12. BER para o Sistema 3 com a utilização da simulação teórica. Fonte: Autoria própria.

4 Considerações Finais

Finalizando a pesquisa, foi possível observar todas as etapas que constituem um processo de transmissão digital em banda base. Ao simular e analisar diferentes cenários de transmissão, cada qual com suas respectivas peculiaridades, como por exemplo o tipo de formatação PCM utilizada, modo de recepção com e sem filtro casado e até mesmo maneiras diferentes de se calcular a probabilidade de erro de bits, ficou evidente as vantagens e desvantagens em utilizar diferentes tecnologias.

Na primeira questão, foram abordados todos os conceitos referentes ao tratamento realizado na informação para a sua transmissão. Os processos de inserir a forma de onda contendo a informação original em um canal AWGN e sua recepção também foram detalhados de forma concisa e clara, facilitando ainda mais o entendimento sobre o assunto.

Por fim, na segunda parte do laboratório foi possível visualizar os gráficos BER para diferentes sistemas de transmissão. Através deles se pode ter uma melhor noção das vantagens, no requisito probabilidade de erro, entre as tecnologias trabalhadas, como por exemplo, o melhor desempenho que a transmissão de uma forma de onda NRZ bipolar possui em relação a formatação NRZ unipolar.

Referências

1. Bernard Sklar. Digital communications: Fundamentals and applications. (ed. 2):pag. 90, 2014.
2. Bernard Sklar. Digital communications: Fundamentals and applications. (ed. 2):pag. 117, 2014.
3. Bernard Sklar. Digital communications: Fundamentals and applications. (ed. 2):pag. 122, 2014.