

**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

Câmpus
São José

Relatório 3

Transmissão binária e análise de desempenho de erro

Curso: Engenharia de Telecomunicações
Disciplina: COM29007 - Sistemas de Comunicação 1
Professor: Mario de Noronha Neto

Aluno
João Pedro Menegali Salvan Bitencourt

20 de outubro de 2023

Sumário

Introdução	2
Fundamentação teórica	2
Detecção e demodulação	3
Filtro casado	3
Gráficos gerados	3
Conclusão	11

Introdução

Neste documento serão apresentados dois experimentos realizados na linguagem MATLAB, cujo objetivo é demonstrar a transmissão de dados de forma binária. Além disso, será demonstrado o efeito do ruído térmico AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) na recepção do sinal.

Para tal demonstração, será simulada a recepção sem nenhum tipo de filtro e utilizando o filtro casado. Serão utilizadas as sinalizações binárias NRZ unipolar e bipolar para codificar o sinal de informação.

Fundamentação teórica

Na transmissão da informação em formato binário, por um canal de comunicação, pode ocorrer a interferência por ruído, prejudicando o processo de recepção. O receptor capta os pulsos recebidos em um intervalo de tempo constante, ou seja, em um período constante. Dessa forma, é importante que cada pulso possua uma duração suficiente para que possa ser corretamente identificado.

Há diferentes tipos de sinalização binária, sendo as mais conhecidas:

- **NRZ (Não Retorna a Zero):** consiste em manter o nível do sinal em alto quando o bit é “1” e em nível baixo quando o bit é “0”.
- **RZ (Retorna a Zero):** consiste em uma pequena modificação onde o sinal retorna ao nível baixo no meio do bit “1”.
- **Bipolar ou AMI:** consiste em gerar pulsos positivos e negativos, de forma alternada, cada vez que a informação é um pulso “1”. Os espaços “0” são caracterizados pela ausência de pulso.
- **Manchester ou Bifase:** o bit “1” é representado por um pulso positivo seguido de um pulso negativo, ambos de mesma amplitude e largura. Já para o bit “0”, a polaridade dos pulsos é invertida.
- **HDBn:** é uma família de códigos semelhante ao bifase, porém evita longas sequências de zeros. Dessa forma, sequências de mais de “n” bits nulos sucessivos são substituídos por uma marca de violação “V”.

Por exemplo, a regra de codificação do HDB3 é substituir toda a sequência de quatro zeros consecutivos pela sequência B00V ou 000V, o qual B é um pulso em conformidade com a regra bifase, e “V” representa um pulso que viola a mesma. A escolha da sequência B00V ou 000V é feita de tal modo que o número de pulsos entre dois pulsos violados consecutivos seja sempre ímpar.

Há, também, diferentes tipos de pulsos binários que podem ser utilizados:

- **Unipolar:** é o código mais simples, sendo o bit “1” (um) transmitido com um pulso positivo e um bit “0” (zero) transmitido quando o sinal é nulo (ausência de sinal).
- **Polar:** pulso binário cujo bit “1” (um) é transmitido com um pulso positivo e o bit “0” (zero) com um pulso negativo.
- **Bipolar:** o bit “0” (zero) é codificado sem pulso e o bit “1” (um) alterna entre pulsos positivos e negativos, sempre diferenciando do último um transmitido.

Quando um sinal é transmitido por um canal de comunicação, está sujeito ao ruído branco, também denominado AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Tal ruído não pode ser eliminado e é causado pelo calor do movimento dos elétrons nos condutores. Esse movimento produz ruído térmico em amplificadores e circuitos, que corrompe os sinais recebidos.

Conforme indicado no nome, o ruído estudado possui uma distribuição gaussiana, cuja as amplitudes mais prováveis de ocorrer são aquelas de pequenos valores positivos ou negativos. Podem ocorrer picos em valores de grande amplitude, mas são raros.

A principal característica do ruído AWGN é que sua densidade espectral de potência bilateral, dada por $G_n(f) = \frac{N_0}{2}$, é a mesma para as frequências de interesse. Ou seja, a potência do ruído branco é praticamente igual para as frequências baixas e altas, com essa característica prevalecendo até uma frequência próxima a 10^{12} hertz. Sendo $n(t)$ o ruído AWGN, a variância deste é dada por:

$$\text{var}[n(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{N_0}{2}\right) df = \infty$$

Dessa forma, a variância do ruído AWGN é infinita. Entretanto, a variância do ruído AWGN filtrado é finita.

Por conta dessa inevitabilidade, esse ruído é utilizado como base para a modelagem do processo de detecção de qualquer receptor.

Um fator que influencia na capacidade do sinal poder ser detectado e demodulado é o SNR (*Signal to Noise Ratio*) que, quanto maior for, menor é a quantidade de ruído no sinal de informação e mais precisa é a detecção pelo receptor.

Detecção e demodulação

O processo de detecção é realizado quando o receptor faz a tomada de decisão sobre o significado da forma de onda analisada em um dado período T . Durante esse processo, podem haver algoritmos de correção de erro. Dessa forma, essa é a etapa onde ocorre o processamento do sinal.

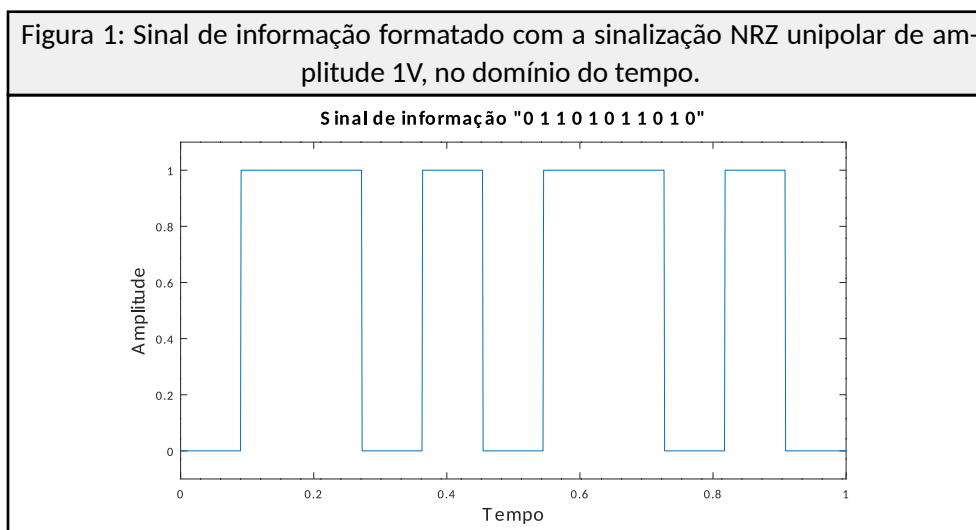
Já na etapa de demodulação, o sinal processado é convertido na sequência de bits correspondente e, por consequência, reduzindo a frequência de bits do sinal. Essa etapa é chamada de *down-conversion* pois na saída não há mais pulsos com duração de mais de um bit, sendo a efetiva sequência de bits.

Filtro casado

É linear e possui a função de prover o maior SNR possível a partir de um sinal recebido. É esperado que este possua ruído AWGN em seu espectro. Dessa forma, o filtro casado está entre a recepção do sinal e o amostrador que realizará o processo de detecção do sinal.

Gráficos gerados

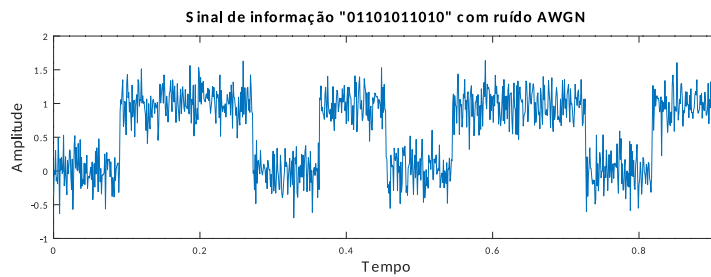
No **primeiro experimento**, uma sequência de informação "01101011010" é sinalizada com impulsos unipolares NRZ. Isso faz com que os bits "1" possuam um período longo o suficiente para que possam ser detectados por um receptor.



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 1, é mostrado o sinal de informação formatado com a sinalização NRZ unipolar. Em seguida, foi aplicado um ruído AWGN ao mesmo, simulando a transmissão por um canal de comunicação com SNR de 10 dB.

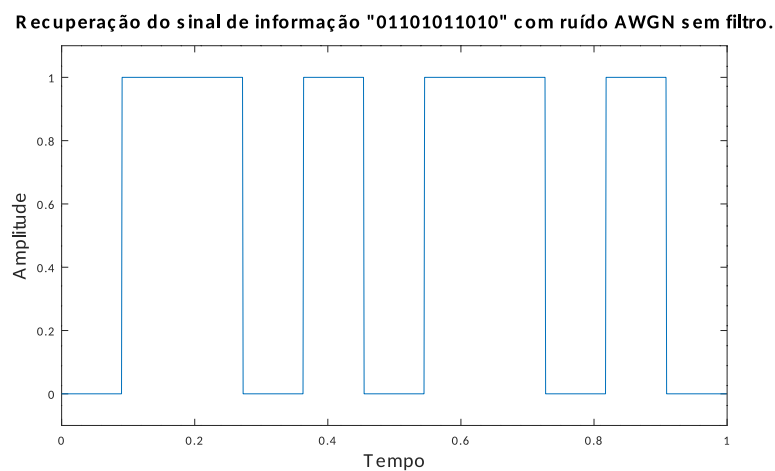
Figura 2: Aplicação de ruído AWGN ao sinal de informação formatado com sinalização NRZ unipolar, simulando a transmissão por um canal de comunicação com SNR de 10 dB.



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 2 é possível averiguar que o sinal ficou mais ruidoso, fazendo com que o receptor possa interpretar de forma equivocada o pulso capturado. Na figura abaixo, é mostrado como fica a recepção do sinal sem a utilização de nenhum filtro:

Figura 3: Sinal da Fig. 2 demodulado no receptor sem a utilização de filtro algum.

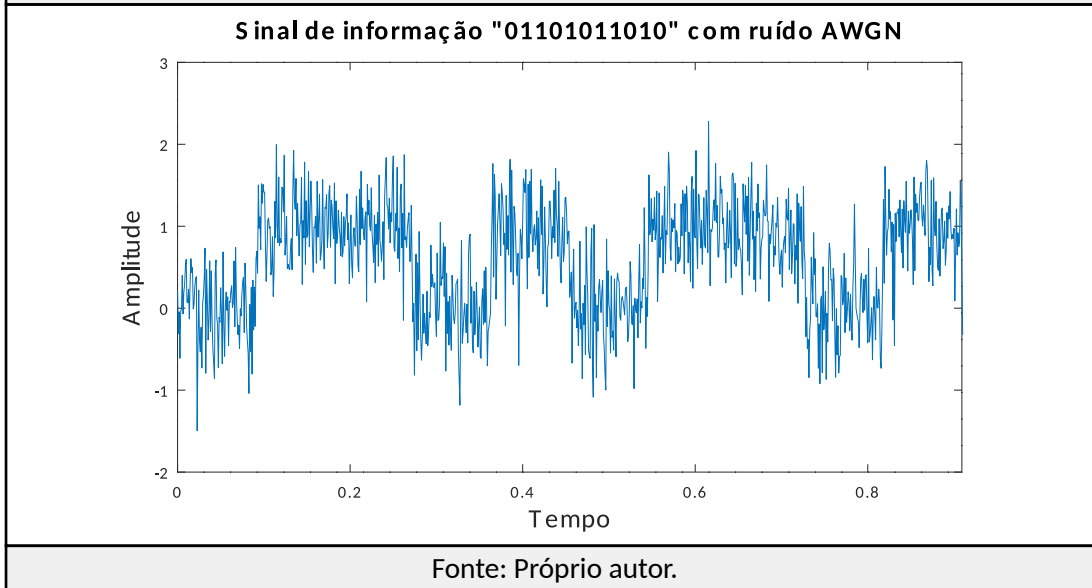


Fonte: Próprio autor.

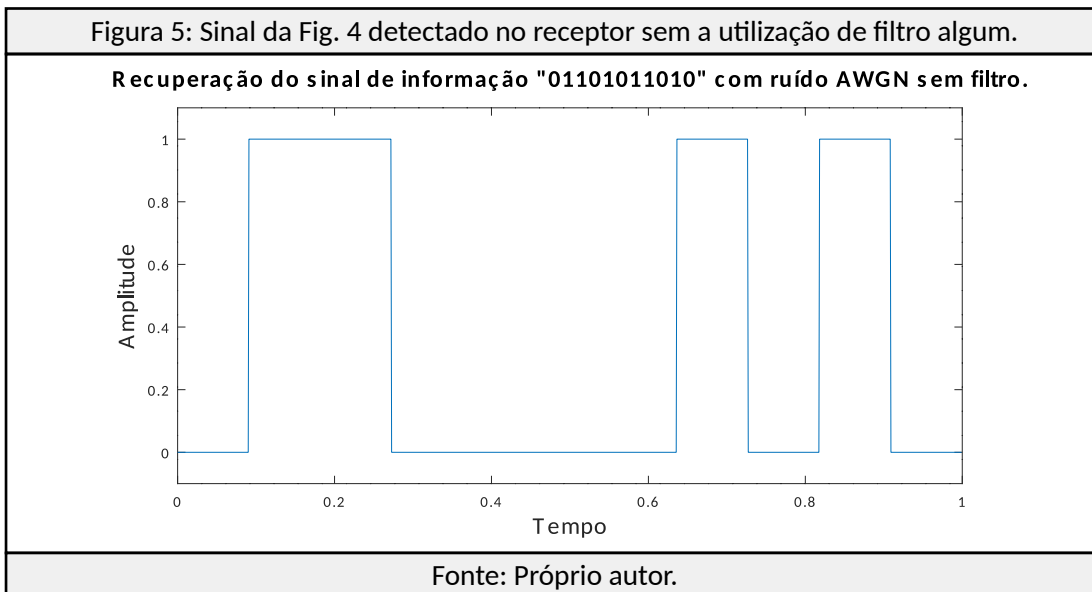
Na Fig. 3 é possível observar que, mesmo com a introdução do ruído, o sinal pode ser demodulado. Isso deve-se ao fato do SNR de 10 dB ser suficiente para o critério utilizado na detecção por parte do receptor. No caso desse experimento, é utilizado o critério de detecção para "1" quando a amostra capturada for acima de 0,5 e detecção para "0" quando o valor da amostra capturada for menor do que 0,5.

Na Fig. 2 é possível visualizar que na amplitude 0,5 V praticamente não há amostras, o que aumenta a chance da detecção ser correta. Na figura a seguir, o SNR foi reduzido para 5:

Figura 4: Aplicação de ruído AWGN ao sinal de informação formatado com sinalização NRZ unipolar, simulando a transmissão por um canal de comunicação com SNR de 5 dB.

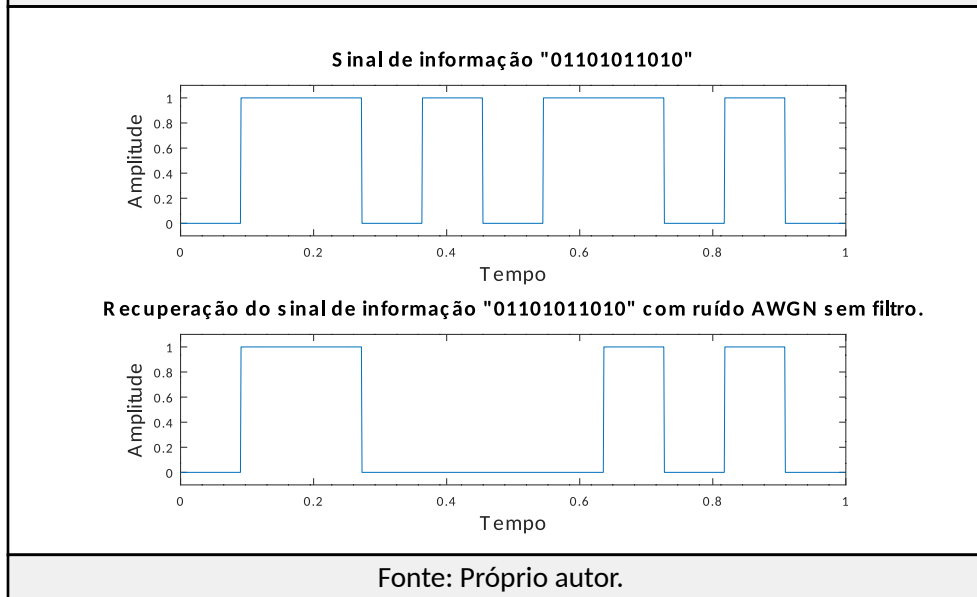


Na Fig. 4 nota-se que o sinal ficou mais ruidoso, de tal forma que agora faixa de amplitude 0,5 possui amostras consideráveis. Abaixo, é mostrado foi a interpretação no receptor sem filtro:



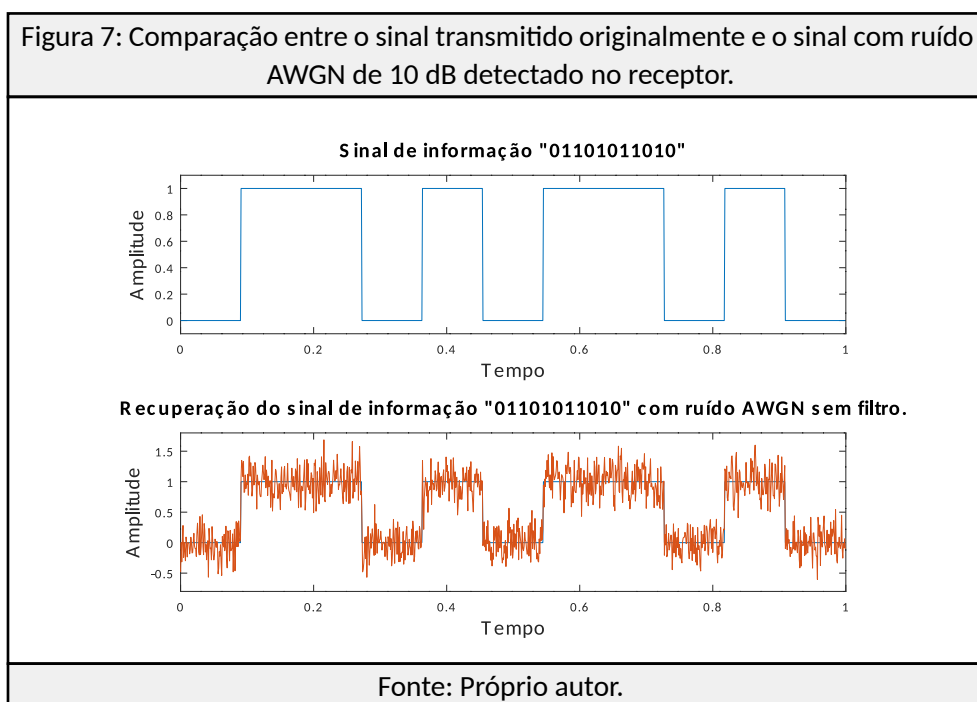
Com o SNR em 5 dB, na Fig. 5, é possível observar que o sinal detectado pelo receptor difere do sinal transmitido. Os bits demodulados foram: "01100001010", e os bits transmitidos originalmente são: "01101011010".

Figura 6: Comparação entre o sinal transmitido originalmente e o sinal com ruído AWGN de 5 dB detectado no receptor.



Na Fig. 6 é mostrada a comparação, quando o SNR é 5 dB, do sinal original e do resultado após ser detectado pelo receptor sem nenhum filtro.

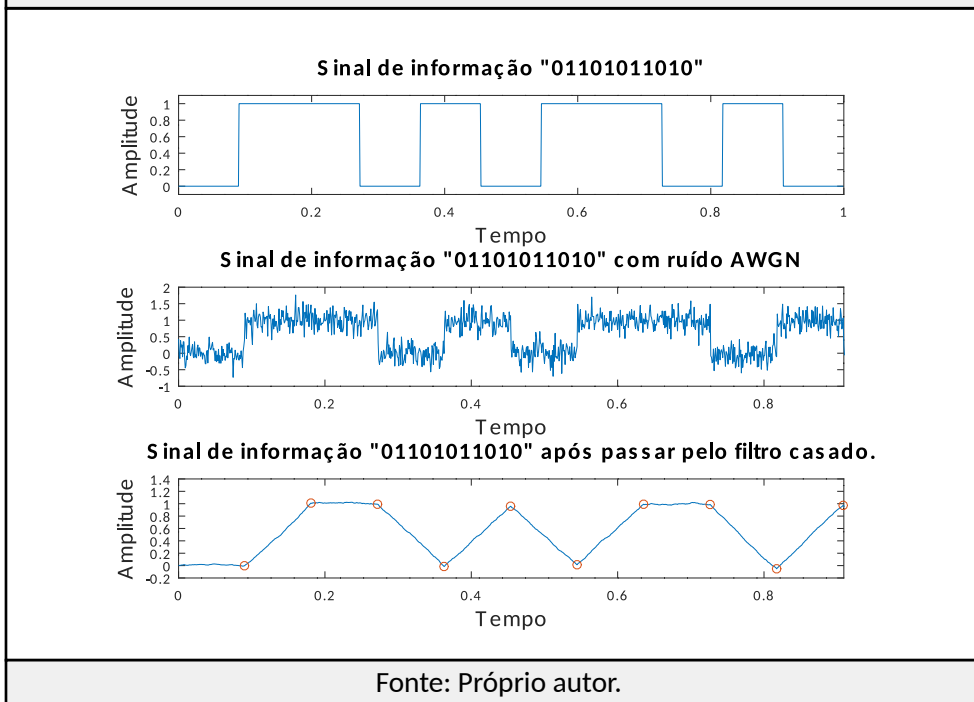
Na figura abaixo, é mostrada a comparação lado a lado do sinal original e do sinal ruidoso recuperado, quando o SNR é 10 dB:



Na Fig. 7, conforme explicado anteriormente, é possível observar a recuperação da informação original quando o SNR é 10 dB.

Na figura a seguir, é mostrado o mesmo processo, porém, será utilizado um filtro casado no receptor:

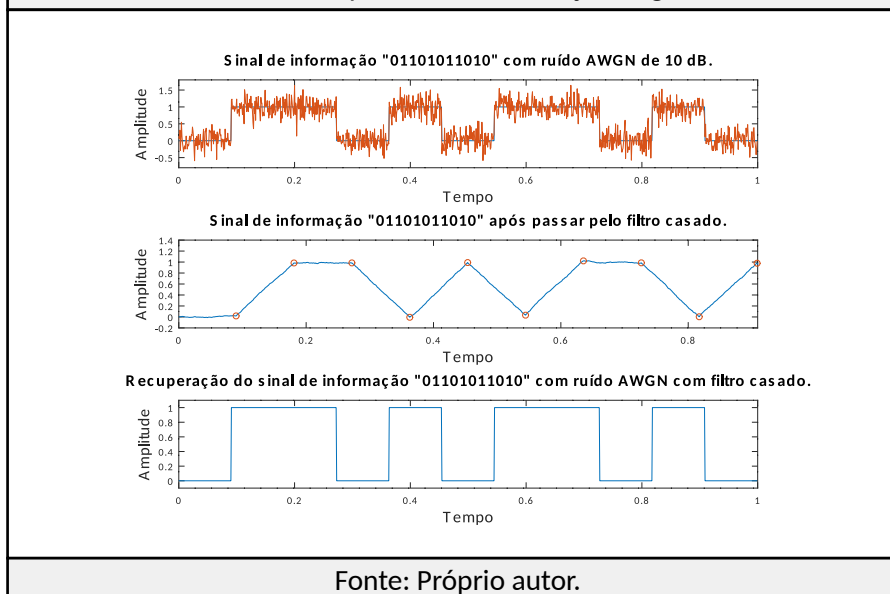
Figura 8: No primeiro gráfico é mostrado sinal binário original de informação. No segundo gráfico é mostrado o resultado desse sinal após a inclusão do ruído AWGN de 10 dB. Por fim, no terceiro gráfico, é mostrada a filtragem que ocorre no receptor utilizando o filtro casado.



Fonte: Próprio autor.

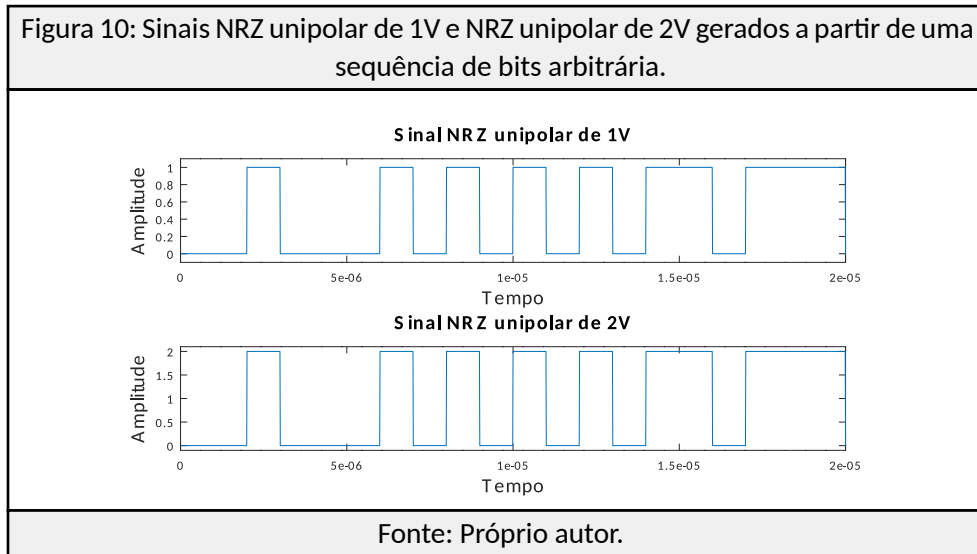
Na Fig. 8, é possível constatar que o filtro casado faz com que o sinal, outrora ruidoso, seja de fácil detecção, diminuindo a probabilidade de um bit ser considerado de forma incorreta. Seguindo o mesmo critério de detecção apresentado nas figuras 3 e 5, abaixo, é ilustrado o sinal de informação recuperado do sinal recebido após passar pelo filtro casado:

Figura 9: No primeiro gráfico é mostrado sinal binário original de informação com o ruído AWGN de 10 dB sobreposto. No segundo gráfico é mostrado a resultante desse sinal no receptor após passar pelo filtro casado. Por fim, no terceiro gráfico, é mostrada a detecção do sinal vindo do filtro casado, recuperando a informação original.



Fonte: Próprio autor.

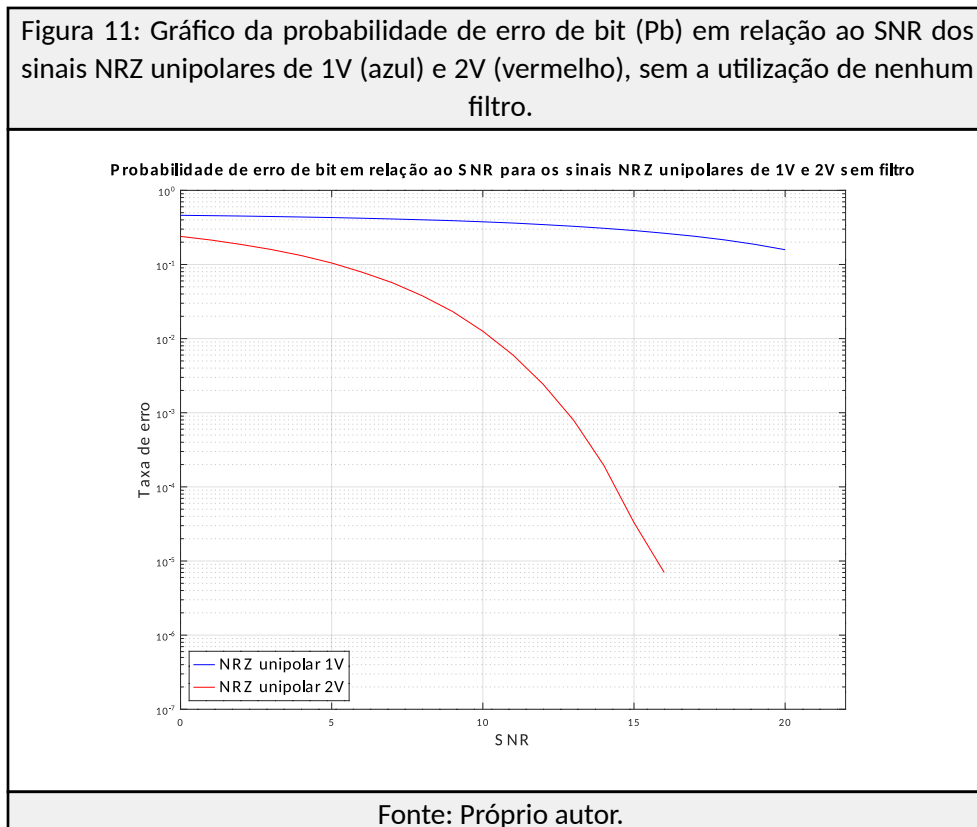
No **segundo experimento** foram gerados bits arbitrários e, destes bits, criados os sinais utilizados nas etapas seguintes. Na primeira etapa, foi criado um sinal NRZ unipolar de amplitude 1 V e um sinal NRZ unipolar com amplitude de 2 V, conforme ilustrado abaixo:



No primeiro gráfico da Fig. 10, é possível observar que a menor amplitude é zero, representando o bit “0”, e a maior amplitude é 1 volt, representando o bit “1”, caracterizando o sinal NRZ unipolar gerado aleatoriamente. O limiar de detecção de bit, nesse caso, é 0,5 volts.

Já no segundo gráfico da Fig. 10, o bit “1” é representado pela amplitude de 2 volts, sendo o limiar de detecção de bit 1 volt.

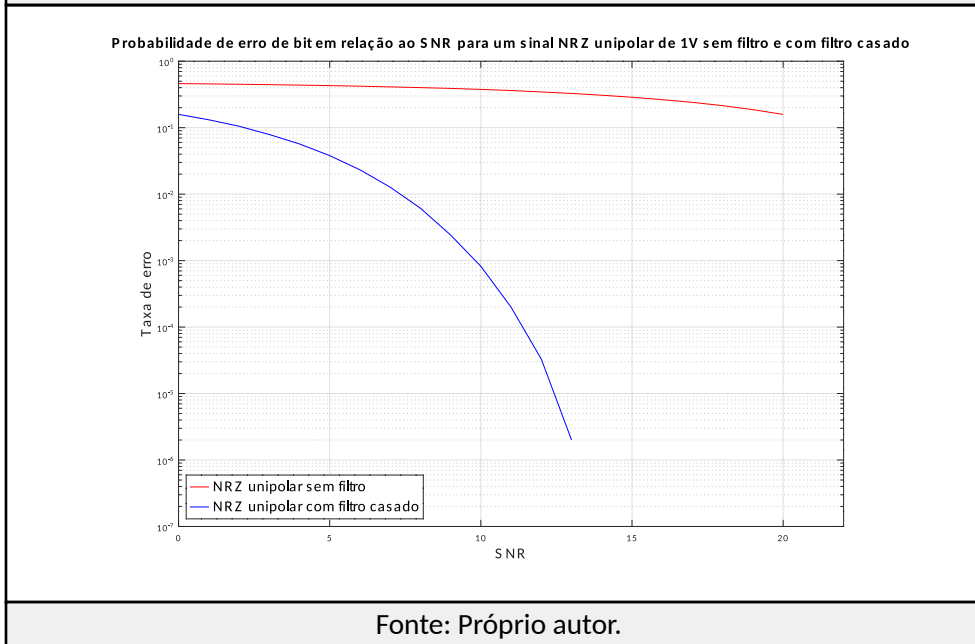
Simulando a transmissão sem a utilização de nenhum tipo de filtro, ou seja, sem nem mesmo um filtro passa baixa, obteve-se o seguinte gráfico de probabilidade de erro de bit:



Na Fig. 11, é possível aferir que o sinal NRZ unipolar de 2 V passa a diminuir a probabilidade de erro de bit conforme o SNR aumenta. Entretanto, o sinal NRZ unipolar de 1 V possui pouca redução na probabilidade de erro de bit. Isso deve-se ao fato do limiar para o sinal de 2 V ser o dobro do sinal 1 V, ou seja, há mais tolerância à erros.

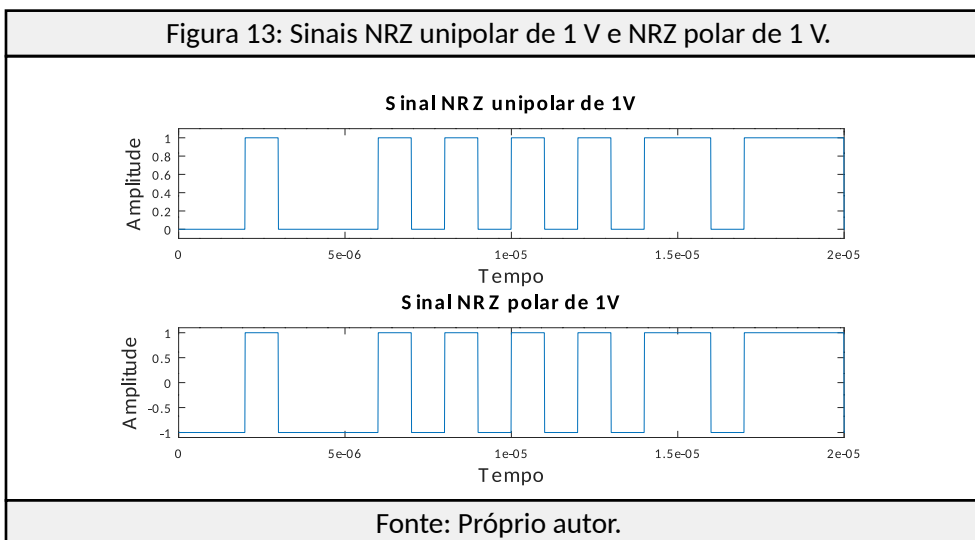
Na segunda etapa, foi simulada a transmissão do sinal de 1 V da Fig. 10 sem a utilização de nenhum filtro e depois utilizando o filtro casado.

Figura 12: Gráfico da probabilidade de erro de bit (P_b) em relação ao SNR do sinal NRZ unipolar de 1V sem a utilização de nenhum filtro (vermelho) e utilizando o filtro casado (azul).



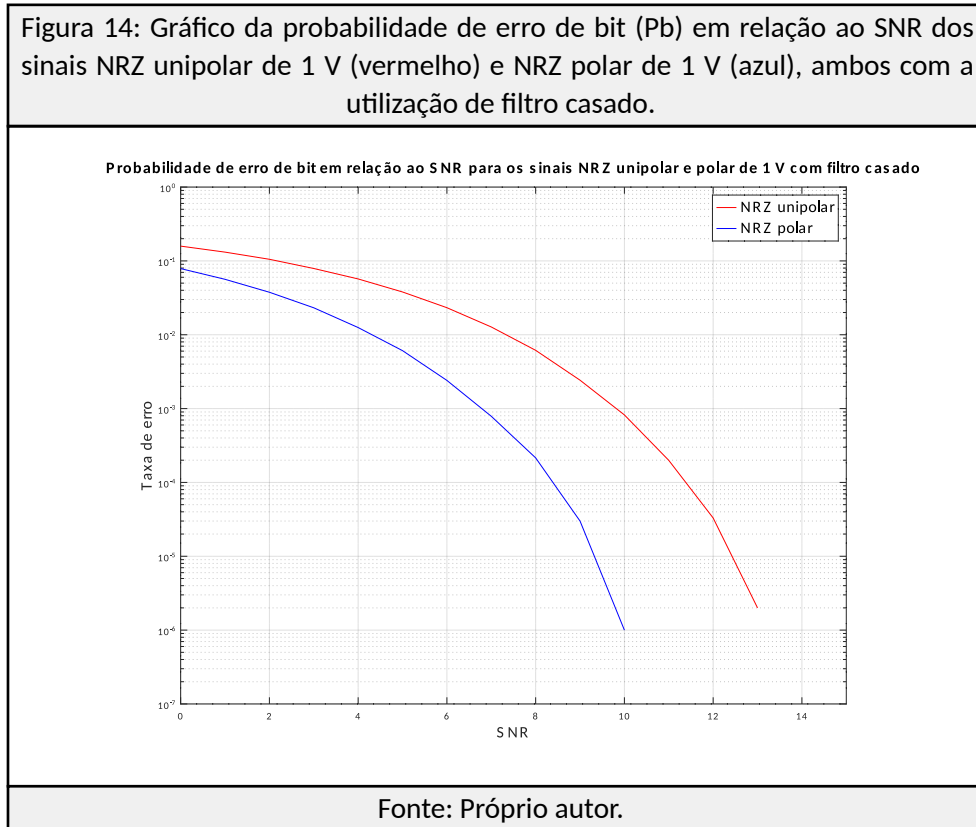
Na Fig. 12, a curva de probabilidade para o sinal NRZ unipolar detectado sem nenhum filtro é mesma que ocorre na Fig. 11. Já na curva em azul, é mostrado que a utilização do filtro casado faz com que a probabilidade de erro diminua muito rapidamente conforme o SNR aumenta.

Na terceira etapa, foi simulada a transmissão do sinal NRZ unipolar de 1 V da Fig. 10 e de um sinal NRZ polar de 1 V, conforme mostrado abaixo:

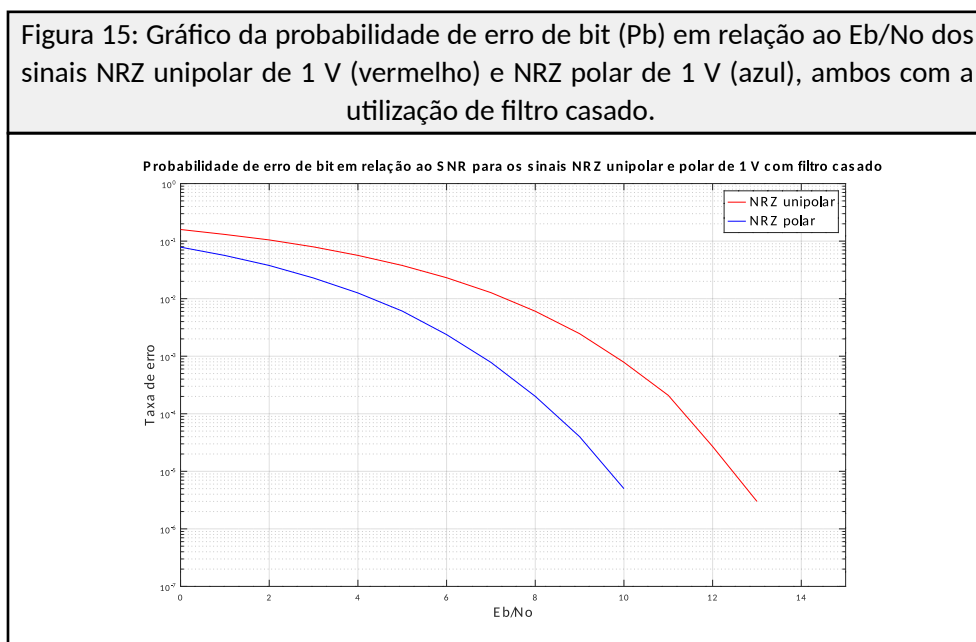


No sinal NRZ polar da Fig. 13 o pulso negativo representa o bit "0" e o pulso positivo representa o bit "1", ou seja, há uma polaridade para representar cada bit. Nesse caso, o limiar de detecção é 0 (zero).

Na simulação da transmissão desses sinais, foi utilizado o filtro casado para ambos, resultando no gráfico de probabilidade abaixo:



Na Fig. 14, é mostrado que o sinal NRZ unipolar de 1 V teve uma redução muito maior na taxa de erro de bits quando foi utilizado o filtro casado. Já o sinal de NRZ polar de 1 teve um desempenho ainda melhor, já que possui o dobro de energia e, como consequência, maior tolerância ao ruído.



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 15, é mostrada a curva de probabilidade em função de $\frac{E_b}{N_0}$, cuja diferença do sinal unipolar para o polar é de 3 dB, ou seja, o sinal polar teve o dobro da eficiência.

Conclusão

No primeiro experimento, foi possível observar o efeito do filtro casado em um sinal ruidoso, bem como a influência do SNR no mesmo, de tal forma que, quanto menor for o SNR, mais ruidoso é tal sinal. Além disso, foi verificado o processo de detecção do sinal recebido no receptor e como o alto índice de ruído pode causar uma má interpretação no valor do bit. A Fig. 6 evidencia esse fato, sendo a sequência recuperada diferente da sequência transmitida.

Já no segundo experimento, foram realizadas três simulações que permitiram visualizar melhor o efeito do filtro casado na qualidade de detecção do sinal. No sinal NRZ unipolar de 1 V, quando detectado sem nenhum filtro, teve uma elevada taxa de erro de bit. Ao aplicar o filtro casado no mesmo, a taxa de erro em relação ao SNR diminuiu consideravelmente.

Também no segundo experimento foi averiguado que um sinal polar possui o dobro da eficiência em relação ao sinal unipolar.