

RELATÓRIO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
SEL 0371 - SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - SEL

Projeto de Temperatura de Ruído e Enlace de Micro-ondas

Aluno:

Eduardo de Almeida 8066631

Professor:

Amílcar Careli César

São Carlos, 25 de
Novembro de 2018

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| | Sumário | 3 |
| 1 | OBJETIVOS E MÉTODOS | 5 |
| 2 | RESULTADOS | 9 |
| 2.1 | Projeto 1: Cálculo da temperatura de ruído e da figura de mérito | 9 |
| 2.1.1 | Temperatura de ruído associada a cada parte do sistema | 9 |
| 2.1.1.1 | Temperatura de ruído associada à Antena | 9 |
| 2.1.1.2 | Temperatura de ruído associada ao Guia de Onda | 9 |
| 2.1.1.3 | Temperatura de ruído associada ao LNA: | 9 |
| 2.1.1.4 | Temperatura de ruído associada ao cabo: | 9 |
| 2.1.1.5 | Temperatura de ruído associada ao modem: | 9 |
| 2.1.2 | Temperatura de ruído total do sistema e figura de mérito | 10 |
| 2.2 | Projeto 2: Projeto do enlace de micro-ondas | 10 |
| 2.2.1 | Zona de Fresnel | 10 |
| 2.2.2 | Banda de frequências e energia de bit | 12 |
| 2.2.3 | SNR e Potência | 13 |
| 2.2.4 | Margem de enlace | 13 |
| 3 | CONCLUSÃO | 15 |
| 4 | REFERÊNCIAS | 17 |

1 Objetivos e Métodos

A parte inicial do projeto consiste em calcular a temperatura de ruído total T_{sist} bem como a como a figura de mérito G/T associada a um sistema. O sistema é mostrado na Figura 1, além disso os parâmetros associados ao projeto são explicitados na tabela 1.

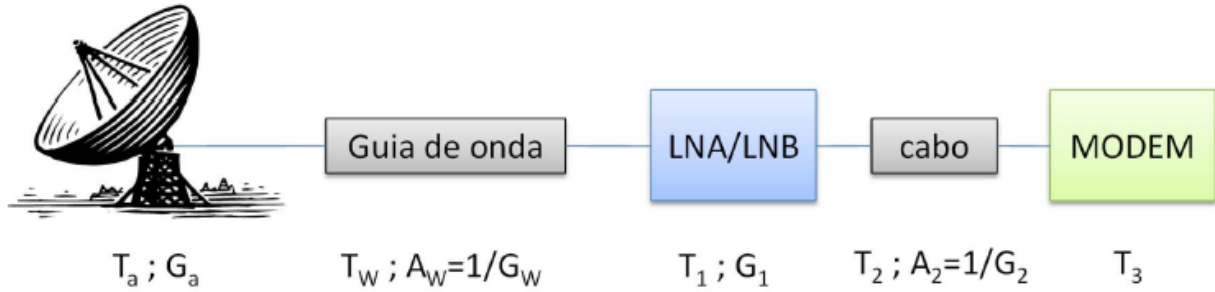


Figura 1 – Receptor do sistema

Tabela 1 – Especificações do projeto

| Parâmetros | Valores |
|-------------|---------|
| T_a (K) | 40 |
| G_a (dBi) | 40 |
| T_w (K) | 290 |
| L_w (dBi) | 1 |
| T_1 (K) | 25 |
| G_1 (dBi) | 60 |
| T_2 (K) | 290 |
| L_2 (dBi) | 20 |
| NF_3 | 2 |

Dos parâmetros dado na tabela acima sabe-se que G_a, G_w, G_1 e G_2 são referentes aos ganhos, L_w às perdas, enquanto T_a, T_w, T_1 e T_2 são as temperaturas associadas ao projeto.

O método utilizado consiste em implementar as equações 1.1 no *Matlab* de modo a calcular as temperaturas de ruído associadas a cada parte, bem como a total referenciada depois da antena.

$$T_{sist} = T_a + T_w + T_1 \cdot L_w + \frac{T_2 \cdot L_w}{G_1} + \frac{T_3 \cdot L_w}{G_1 \cdot G_2} \quad (1.1)$$

Além disso, uma vez calculada T_{sist} , isto é, a temperatura de ruído total é possível escrever a figura de mérito (ou figura de ruído) associada ao sistema uma vez que o ganho da antena G_a é dado.

$$\frac{G}{T} = G_a - 10 \log_{10}(T_{sist})$$

O segundo projeto consiste em implementar de forma efetiva um enlace de radio entre as cidades de São Carlos e Matão para as especificações técnicas mostradas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Especificações do Enlace

| Enlace | Especificação |
|-----------------------|---------------|
| Frequência (GHz) | 13 |
| Modulação | 8-PSK |
| Taxa de bits (Mbps) | 13,2 |
| Local da transmissora | São Carlos |
| Local da receptora | Matão |

Na implementação do enlace, plotou-se a zona de fresnel com auxilio do perfil de relevo. Ora, a antena deve manter a rota de sinal desobstruída, desse modo em análise inicial deve se considerar uma análise detalhada da rota para as considerações relativas à área geográfica de acordo teoria da zona de Fresnel [1].

Caso existam obstáculos na primeira zona os sinais transmitidos e recebidos provavelmente serão atenuados e difratados, dessa forma a zona mínima de Fresnel deve ser mantida livre de obstruções de modo a evitar interferências significativas na recepção, como mostrado na figura.

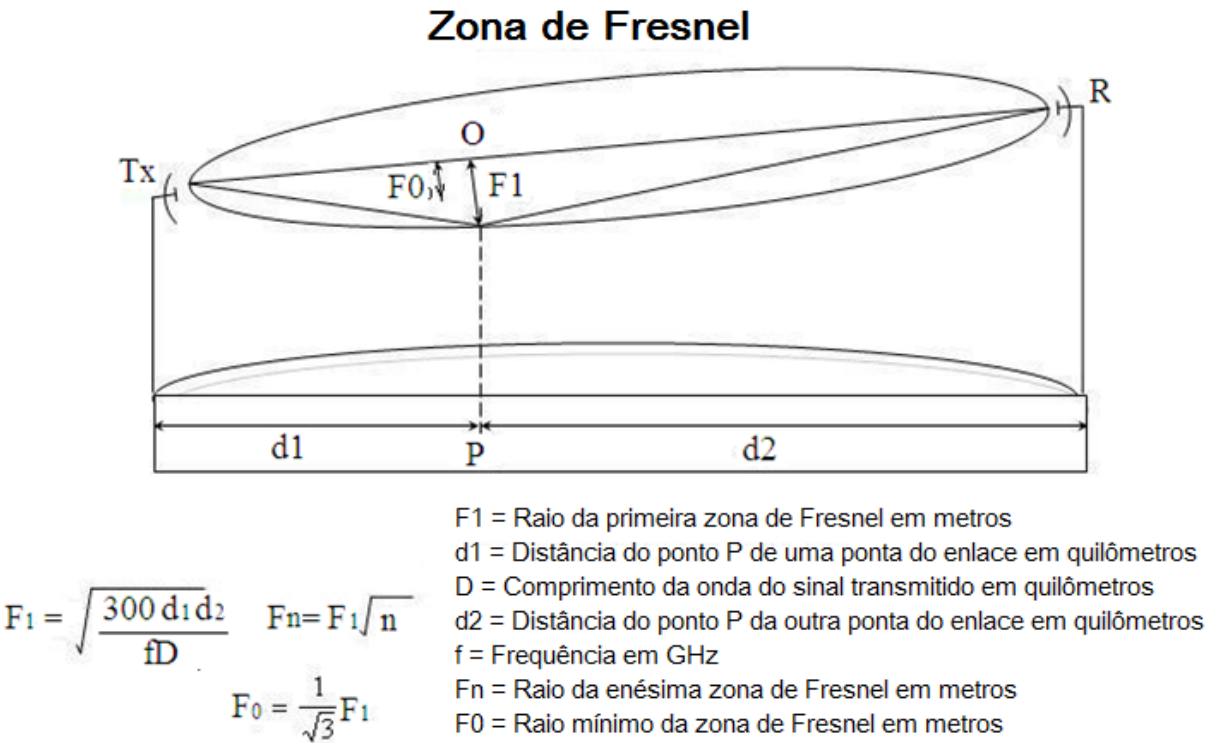


Figura 2 – Zona de Fresnel

Dessa forma, tomando-se a altura das antenas como variável, promove-se o ajuste das variáveis associadas até a escolha que mantém a 1ª zona de Fresnel livre de obstáculos. Ora, como grande parte da energia do sinal está contido nesse volume da zona de fresnel garante-se assim a propagação em condições de espaço-livre [3].

Para efetivamente implementar-se o enlace é necessário determinar a banda de frequência usada. De acordo com as especificações de projeto, empregou-se a modulação 8-PSK e com uma determinada taxa de

bits dada pelas especificações do projeto como mostrado na Tabela 2.

Além disso, com o auxílio dos plots da Figura 3 observa-se que a curva vermelha representa a modulação 8-PSK. Tomando a probabilidade de erro $P_e = 1 \times 10^{-6}$ tida como ótimo, uma vez que a especificação de desempenho do enlace é normalmente definida tendo por base no ITU [2].

Dessa forma, fica especificada a taxa de erro energia de bit sobre potência de ruído do sistema associada $\frac{Eb}{N_0}$ bem como a sua relação sinal ruído associada:

$$SNR = \frac{Eb}{N_0} \cdot \frac{B_w}{R_b}$$

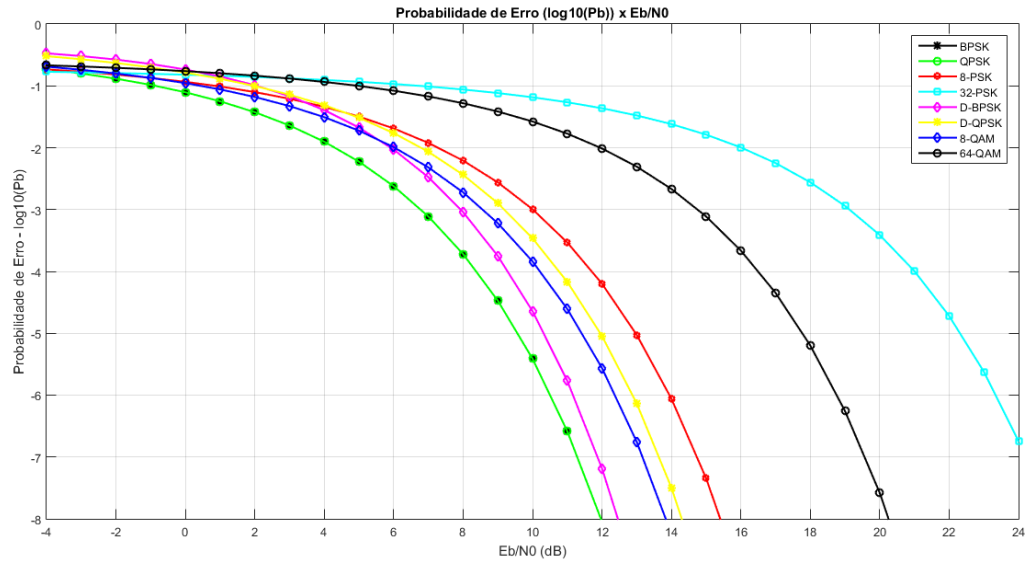


Figura 3 – Probabilidade de Erro em dB pela Energia de bit $\frac{Eb}{N_0}$

Dessa forma com o SNR explicitada, calculou-se a potência de ruído:

$$N_0 = k_b \cdot T_{sist} \cdot B_w$$

Calcula-se também a potência mínima de sinal necessária para o erro em questão, de modo a obter a potência necessária para a transmissão.

Por fim, estipulou-se uma margem de enlace, aumentando a potência transmitida, para que a probabilidade de erro abaixasse a menos de $P_e = 1 \times 10^{-8}$, e fez-se o processo contrário até chegar na energia de bit $\frac{Eb}{N_0}$.

2 Resultados

2.1 Projeto 1: Cálculo da temperatura de ruído e da figura de mérito

2.1.1 Temperatura de ruído associada a cada parte do sistema

Considerando-se a temperatura ambiente como $T_0 = 290K$, bem como tomando-a de referencia, Calcula-se a temperatura de ruído associada cada parte do sistema observado na Figura 1.

2.1.1.1 Temperatura de ruído associada à Antena

Para a antena, assumindo-se o caso mais desfavorável como pratica corrente de engenharia, tem-se que a temperatura de ruído associada é a própria temperatura $T_a = 40K$ especificada no projeto na tabela 1. [3]

2.1.1.2 Temperatura de ruído associada ao Guia de Onda

Para a linhas de transmissão associada ao guia de onda, sabe-se por [2] que:

$$T_r = \frac{1 - G}{G} T$$

Onde, T_r é a temperatura de ruído, G representa o ganho da linha de transmissão e T a temperatura real.

2.1.1.3 Temperatura de ruído associada ao LNA:

Para o LNA, a temperatura de ruído foi considerada a própria temperatura, assim como a da antena. De modo que, a temperatura de ruído associada é a própria temperatura $T_1 = 25K$ especificada no projeto na tabela 1. [3] Para o LNA,

2.1.1.4 Temperatura de ruído associada ao cabo:

2.1.1.5 Temperatura de ruído associada ao modem:

E para o modem, como a informação era a figura de ruído, usou-se a fórmula:

$$Tr = (F - 1)T_0$$

Onde Tr é a temperatura de ruído, F é a figura de ruído e T_0 é a temperatura de referência. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura de cada setor do sistema

| Temperaturas | Valores (K) |
|--------------|-------------|
| T_{ra} | 40 |
| T_{rw} | 75,09 |
| T_{r1} | 25 |
| T_{r2} | 28710 |
| T_{r3} | 169,62 |

2.1.2 Temperatura de ruído total do sistema e figura de mérito

A fórmula para a temperatura de ruído total do sistema, está descrita na seção de objetivos e métodos, assim como a da figura de ruído. E os resultados estão na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Temperatura de ruído do sistema e figura de mérito $\frac{G}{T}$

| Resultado | Valores |
|--|------------|
| Temperatura de ruído do sistema T_{sist} | 146.62 K |
| Figura de mérito $\frac{G}{T}$ | 18.34 dB/K |

2.2 Projeto 2: Projeto do enlace de micro-ondas

O enlace digital de micro ondas se utiliza de algum esquema de modulação para a transmissão, no presente projeto foi proposto o uso do 8-PSK. Cada técnica de modulação demanda uma relação energia de bit E_b por densidade espectral de ruído N_0 , como mostrado no plot comparativo entre as modulações na Figura 3. Na modulação 8-PSK para uma probabilidade de erro da ordem de 10^{-6} está associada $E_b/N_0 = 14dB$

2.2.1 Zona de Fresnel

Começou-se por definir as constantes do projeto, como a frequência $f = 13GHz$, a taxa de bits $Rb = 13,6Mbps$, e a modulação 8-PSK. Além disso, por meio de [2] foi traçado o perfil de relevo entre São Carlos e Matão. Sabe-se que Nas faixas de VHF e UHF é possível trabalhar com enlaces obstruídos, enquanto que nas faixas de SHF(3-30GHz) e EHF(30-300GHz) deve-se necessariamente ter visibilidade direta. Ora, a partir de tais frequências não se utiliza mais da refração ionosférica, uma vez que as ondas refratadas não atingem o ângulo necessário até os limites da ionosfera para retornar à superfície terrestre [4]. Dessa forma, no presente projeto são utilizadas antenas diretivas capazes de concentram a energia em feixes mais estreitos, estabelecendo assim as ligações por meio da onda espacial direta entre as duas antenas. As coordenadas geográficas escolhidas estão explicitadas na Tabela 5, justifica-se tal escolha por se tratar de um pico local. Além disso, seu perfil pode ser visto na Figura 4.

Tabela 5 – Coordenadas e altitude dos pontos escolhidos

| Cidades | Latitude | Longitude | Altitude |
|-----------------|---------------|----------------|----------|
| São Carlos (Tx) | 22°00'45.1" S | 047°53'24.7" W | 870m |
| Matão (Rx) | 21°36'27.0" S | 048°22'09.7" W | 600m |

A partir do perfil de elevação é possível plotar a primeira Zona de Fresnel sem elevação, com seu raio definido pela fórmula:

$$h = \sqrt{\lambda * \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

com λ sendo o comprimento de onda no vácuo, e $d_{1,2}$ sendo a distância do centro até as pontas do lado maior. Explicita-se ainda o plot 60% da Zona de Fresnel sem elevação na Figura 5

A análise por meio do perfil de elevação e zona de fresnel mostra que as antenas teriam de ser elevadas para que não haja obstáculos interferentes na linha de visão entre ambas. Adotando-se a altura como variável

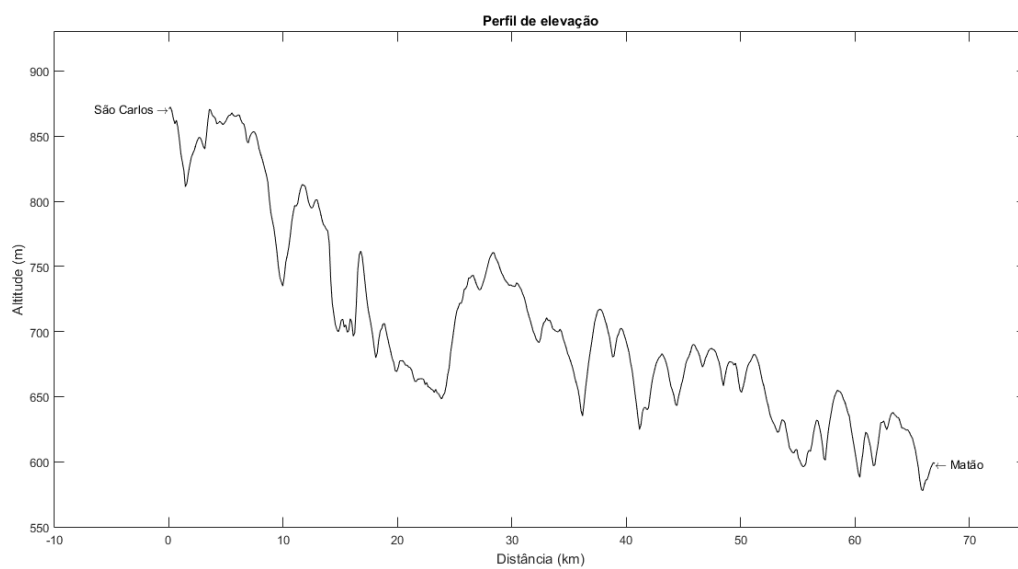


Figura 4 – Perfil de elevação entre as coordenadas das cidades

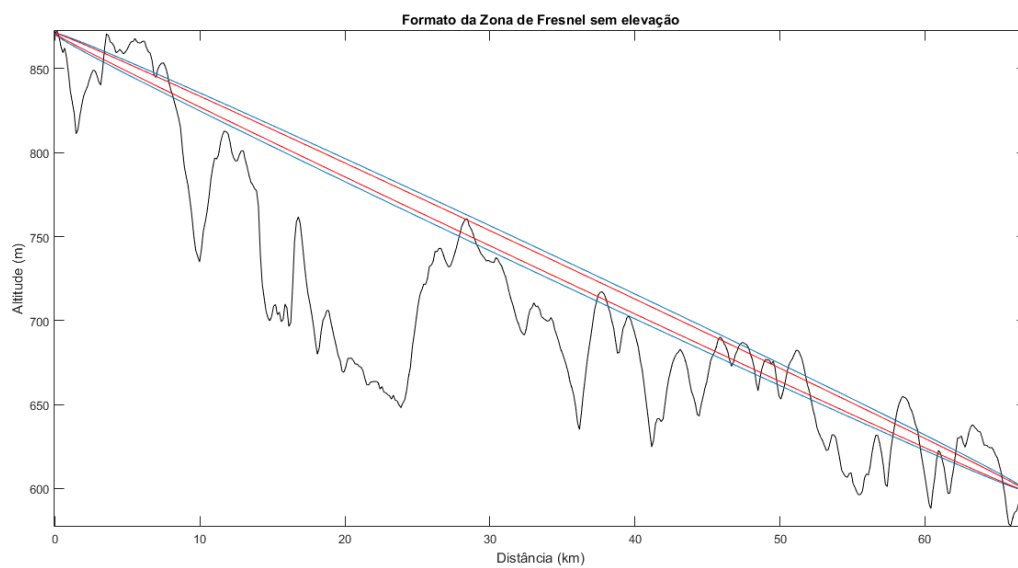


Figura 5 – Primeira Zona de Fresnel sem elevação

foram testados de forma iterativa diferentes valores até se obter a altura implementada no projeto, $T_x = 25m$ e $R_x = 30m$, para transmissão e recepção respectivamente como mostrado na Figura 6

Percebe-se pela análise da figura 6 que não há interferências na linha de visão entre as antenas para a escolha de alturas.

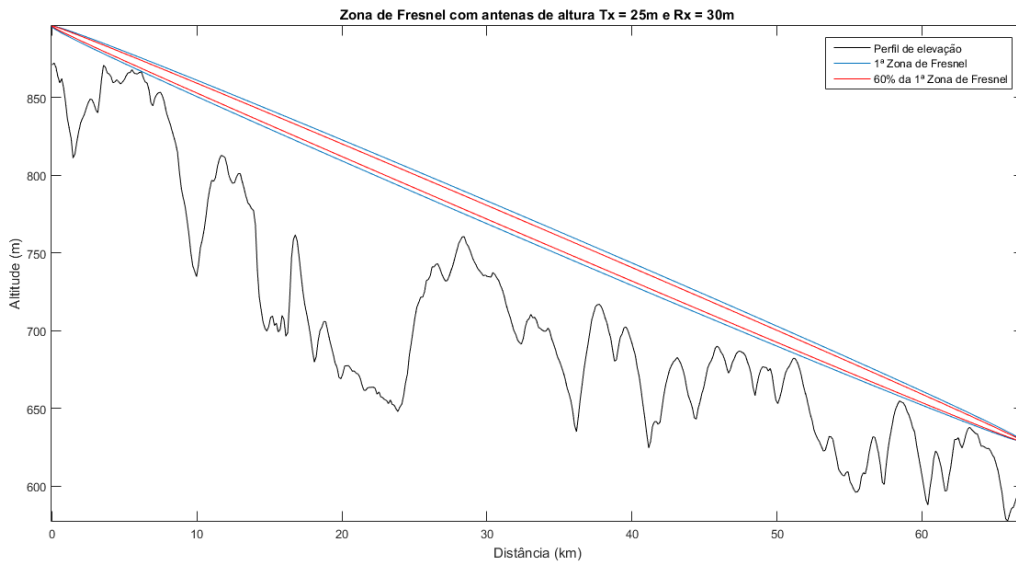


Figura 6 – Primeira Zona de Fresnel com Tx = 25m e Rx = 30m

2.2.2 Banda de frequências e energia de bit

Utilizando-se a tabela disponível em [2] explicitada por meio da Figura 7, a taxa de bits almejada pelas especificações $R_b = 13,2\text{Mbps}$, bem como considerando a probabilidade de erro $Pe = 10^{-6}$ é possível obter a largura de banda BW do sistema por meio da equação $BW = BW_{rel} * R_b[\text{MHz}]$, que ao se substituir $BW_{rel} = 0,33$, destacada na tabela da figura 7. Obtém-se assim uma largura de banda $BW = 4,356\text{MHz}$ de modo a satisfazer as exigências do projeto.

| Modulação | E_b/n_0 necessário (dB) | Max η ($\log_2(M)$) (bits/s/Hz) | C/N (dB) | BW mínimo livre de ISI ($\times R_b$) |
|--------------|---------------------------|--|-------------|---|
| BPSK | 10,6 | 1 | 10,6 | 1 |
| QPSK | 10,6 | 2 | 13,6 | 0,5 |
| 4-QAM | 10,6 | 2 | 13,6 | 0,5 |
| D-BPSK | 11,2 | 1 | 11,2 | 1 |
| D-QPSK | 12,7 | 2 | 15,7 | 0,5 |
| 8-PSK | 14,0 | 3 | 18,8 | 0,33 |
| 16-QAM | 14,5 | 4 | 20,5 | 0,25 |
| 16-PSK | 18,3 | 4 | 24,3 | 0,25 |
| 64-QAM | 18,8 | 6 | 26,6 | 0,17 |
| 32-PSK | 23,3 | 5 | 30,3 | 0,2 |

Figura 7 – Tabela com valores de largura de banda para probabilidade de erro de bit a 10^{-6}

Para a probabilidade de erro estipulada, e a modulação desejada, vê-se que a energia de bit $\frac{E_b}{N_0}$ tem que

ser igual a 14dB, além de explicitado pela esse resultado já foi explicitado a priori pelo gráfico da Figura 3 cuja forma de obtenção está mostrada pelo código no apêndice.

2.2.3 SNR e Potência

A partir da energia de bit é possível calcular o SNR mínimo do sistema para que se tenha tal valor, uma vez que as grandezas se relacionam da forma:

$$SNR = \frac{Eb}{N_0} \cdot \frac{Rb}{BW} = 76.18 = 18.8dB$$

Onde Rb é a taxa de bit, BW é a largura de banda, já calculada na sessão anterior. Dessa forma, a potência de ruído pode ser modelada pela equação:

$$N_0 = K_b T_a BW = 1.74 \times 10^{-14} = -107.6dBm$$

Onde N_0 é a potência de ruído, $K_b = 1.38 \times 10^{-23}$ é a constante de Boltzmann. Logo, tem-se a potência mínima do sinal que se receberá:

$$S_0 = SNR \cdot N_0 = 1.33 \times 10^{-12} = -88.8dBm = P_r(dBm)$$

Utilizou-se a equação de Friis para determinação da potência mínima de transmissão, Considerando-se a distancia entre as antenas como $R = 67km$, bem como o comprimento de onda associado a frequencia de operacao tem-se a perda de percurso $L = 20\log(\frac{4\pi R}{\lambda}) = 151,2dB$. Além disso, a perda por chuvas, foi modelada de acordo com um estudo feito em Bangladesh, para uma região parecida com a do enlace e com precipitação de $140mm/h$ de chuva em média, tem-se aproximadamente $L_{chuva} = 40dB$.

O enlace é implementado por meio de antenas do tipo *COMHAT* HAA1306 00, que possui diâmetro de 0,6m, ganho de 35.8dBi e HPBW de 3°, para as antenas transmissora e receptora.

Com todas essas informações utilizou-se a equação para o cálculo de tal potência.

$$P_t(dBm) = P_r(dBm) - (G_t(dB) + G_r(dB) - L(dB) - L_{chuva}(dB)) = 30.87dBm = 1.22W$$

2.2.4 Margem de enlace

Projetou-se ainda uma margem de enlace, de modo a otimizar a robustez do sistema, com potência transmitida $P_t = 3W = 34.8dBm$.

Os cálculos foram feitos inversamente, como descrito na sessão inicial para que se tenha todos os novos parâmetros, os resultados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do sistema para $P_t = 3W$

| Parâmetros | Resultados |
|----------------------|------------------------|
| $P_r(dBm)$ | -84.9 |
| $P_r(W)$ | 3.26×10^{-12} |
| SNR | 187 |
| $SNR(dB)$ | 22.7 |
| $\frac{Eb}{N_0}$ | 61.7 |
| $\frac{Eb}{N_0}(dB)$ | 17.9 |

Com isso, a probabilidade de erro vai ser menor que 10^{-8} , aumentando em muito a qualidade do enlace.

3 Conclusão

No primeiro projeto, obteve-se uma temperatura de ruído do sistema igual a 146,6K, bem baixa, como esperado de um receptor para radiofrequência, e sua figura de mérito $\frac{G}{T}$ foi de 18,34 dB/K, o que indica quão confiável é a performance da transmissão de radiofrequência.

No segundo projeto, obteve-se um enlace de rádio em 13GHz entre São Carlos e Matão, com probabilidade de erro menor que 10^{-8} e potência transmitida de 3W. Trata-se de um sistema realizável de bom desempenho, uma vez que probabilidade de erro ficou abaixo dos 10^{-6} desejados de acordo com ITU. .

4 Referências

- [1] "<http://www.geocontext.org/publ/2010/04/profiler/en/>". Acessado em 24/11/2018
- [2][b-ITU-T G.821.1] Recommendation ITU-T G.821.1 (2002), *Digital network Quality and availability targets*.
- [3] Materiais de aula.
- [4] IMRAN, A. Z. M.; ISLAM, Md. T.; GAFUR, Abdul; RABBY, Y. W. *Rain Attenuation Prediction Analysis and Contour Map Design over Bangladesh*. 2015.
- [5] FELICE, Fernando. Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4GHz em tecnologia spread spectrum. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 148 p.
- [6] DA SILVA, Luciano B. C.; CHAMON, Marco A. *Cálculo de Enlace para Sistemas de Comunicação Digital via Satélite*. 2004. Tese - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- [7] ATAYERO, Aderemi A.; LUKA, Matthew K.; ALATISHE, Adeyemi A. *Satellite Link Design: A Tutorial*. 2011. International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol: 11 No: 04.