

---

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE – UFF  
ESCOLA DE ENGENHARIA – TCE  
CURSO DE ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES – TGT  
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO TUTORIAL – PET  
GRUPO PET-TELE

## Tutorial

Metodologia de Cálculo de Enlace por Satélite  
(Versão: A2016M06D15)

Autores: Franciele Oliveira  
Paula Woyames  
Gustavo Machado  
Tutor: Alexandre Santos de la Vega

Niterói – RJ  
Junho / 2016

---

# Introdução

Para a realização do cálculo de enlace via satélite, algumas informações deverão ser fornecidas pelo usuário. Tais informações são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Posição orbital	Dado do usuário W
Frequência de operação na banda C	5850 a 6425 MHz subida ( $\approx 6$ GHz) 3625 a 4200 MHz descida ( $\approx 4$ GHz)
Frequência de operação na banda Ku	13750 a 14500 MHz subida ( $\approx 14$ GHz) 10959 a 11200 MHz e 11700 a 12200 MHz descida
Polarização	Linear vertical na subida Linear horizontal na descida

Table 1: Especificações do satélite.

Latitude	Graus <sup>o</sup> Minutos' Segundos" Norte/Sul
Longitude	Graus <sup>o</sup> Minutos' Segundos" Leste/Oeste
Altitude	Metros m

Table 2: Especificações da estação terrena.

Deve-se analisar o comportamento do sinal propagante, conforme as normas estabelecidas pela ITU-R, seguindo o passo-a-passo da Recomendação ITU-R, p. 618.

O roteiro é o seguinte:

- Etapa 1. Distância entre o satélite e a estação terrena e o ângulo de elevação da antena.
- Etapa 2. Atenuação de espaço livre.
- Etapa 3. Atenuações impostas pelo meio físico.
  - Etapa 3.1. Atenuação por gases atmosféricos.
  - Etapa 3.2. Atenuação por precipitação e nuvens.
  - Etapa 3.3. Atenuação por cintilação.
  - Etapa 3.4. Atenuação por múltiplas fontes de ocorrência simultânea.
  - Etapa 3.5. Atenuação tempestades de areia e poeira.
- Etapa 4. Temperatura de ruído da antena.
- Etapa 5. Efeitos de céu claro.
- Etapa 6. Efeitos de polarização cruzada.
- Etapa 7. Retardos de propagação.
- Etapa 8. Limitações de largura de banda.
- Etapa 9. Ângulo de chegada.

## Etapa 1 - Distância entre o satélite e a estação terrena e o ângulo de elevação da antena.

**Passo 1 - Calcular o ângulo entre as projeções do satélite e da estação terrena na superfície,  $\alpha$  (em graus), em relação ao centro da Terra:**

Parâmetros:

A  $\rightarrow$  Projeção do satélite na superfície

B  $\rightarrow$  Projeção da estação terrena na superfície

O  $\rightarrow$  Centro da Terra

P  $\rightarrow$  Ponto de referência

**Passo 1.1 - Converter as coordenadas de A e B, dadas em graus, minutos e segundos, para graus decimais:**

$$\text{Coordenadas decimais} = \text{graus} + \text{minutos}/60 + \text{segundos}/3600$$

**Passo 1.2 - Calcular os arcos  $a$ ,  $b$  e  $c$  (em graus):**

$$a = \text{latitude } P - \text{latitude } A$$

$$b = \text{latitude } P - \text{latitude } B$$

$$c = \text{longitude } A - \text{longitude } B$$

**Passo 1.3 - Calcular o ângulo entre A e B,  $\alpha$  (em graus):**

Podemos calcular o ângulo entre A e B a partir da seguinte relação trigonométrica:

$$\alpha = \text{acos}[\cos(a)\cos(b) + \text{sen}(a)\text{sen}(b)\cos(c)]$$

**Passo 2 - Calcular a distância entre o satélite e a estação terrena, D (em km)**

Parâmetros:

S  $\rightarrow$  satélite

$R_E$   $\rightarrow$  raio efetivo da Terra (8500km)

$H_E$   $\rightarrow$  altitude de E (0km)

$H_S$   $\rightarrow$  altitude de S (36000km)

E  $\rightarrow$  estação terrena

A  $\rightarrow$  projeção de S na superfície

B  $\rightarrow$  projeção de E na superfície

$\alpha$   $\rightarrow$  ângulo entre A e B (1,9477 graus)

$\theta$   $\rightarrow$  ângulo de elevação de antena

$$D = [(R_e + H_s)^2 + (R_e + H_e)^2 - 2(R_e + H_s)(R_e + H_e)\cos(\alpha)]^{1/2}$$

**Passo 3 - Calcular o ângulo de elevação da antena,  $\theta$  em graus:**

$$\theta = \text{atan} \left( \frac{(R_E + H_S)\cos(\alpha) - (R_E + H_E)}{(R_E + H_S)\text{sen}(\alpha)} \right)$$

## **Etapa 2 - Atenuação de Espaço Livre.**

A atenuação de espaço livre,  $A_0$  (em dB) é estimada pela seguinte equação:

$$A_0 = 32,4 + 20\log_{10}(D) + 20\log_{10}(f) ,$$

onde:  $D$  (em km) é a distância entre o satélite e a estação terrena e  $f$  (em Hz) é a frequência de operação.

### **2.1 - Calcular a atenuação de espaço livre para o satélite operando na banda Ku:**

a) Na subida,  $f = 14$  GHz

b) Na descida,  $f = 11$  GHz

## **Etapa 3 - Atenuação impostas pelo meio físico.**

### **3.1 - Atenuação por gases atmosféricos:**

Embora a atenuação por gases atmosféricos apresente um comportamento aleatório em função da temperatura, pressão atmosférica e concentração de vapor de água (apesar de que, definida uma determinada frequência, a contribuição do oxigênio para a absorção de energia seja relativamente constante), para fins práticos, pode ser assumida como uma parcela constante de perda de propagação nos enlaces de subida e descida. Para sistemas que operam em frequências abaixo de 10 GHz, a atenuação por gases atmosféricos normalmente pode ser desprezada. Sua importância aumenta para sistemas que operam em frequências acima de 10 GHz (comprimentos de onda menores que 3 cm), especialmente com pequenos ângulos de elevação.

#### **3.1.2 - Calcular a atenuação por gases atmosféricos para o satélite operando na banda KU:**

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

**Passo 1 - Determinar os parâmetros necessários para o cálculo da atenuação por gases atmosféricos,  $A_G$  (em dB), conforme especificado na Recomendação ITU-R p. 835:**

**Passo 1.1 - Calcular a temperatura média,  $T(H_E)$  (em Kelvin), e a pressão atmosférica média,  $P$  (em hPa), na região da antena da estação terrena:**

$$T(h) = T_i + L_i(h - H_i)$$

$$P(h) = P_i \left( \frac{T_i}{T_i + L_i(h - H_i)} \right)^{\frac{34,163}{L_i}} \quad \text{para } L_i \neq 0$$

$$P(h) = P_i e^{\frac{-34,163 (h - H_i)}{T_i}} \quad \text{para } L_i = 0 ,$$

onde:  $P_i$  (em hPa) é a pressão atmosférica a altitude  $H_i$ ,  $T_i$  (K) é a temperatura na altitude  $H_i$  e  $L_i$  (K/km) é o gradiente de temperatura entre as altitudes  $H_i$  e  $H_{i+1}$ .

**Passo 1.2 - Calcular a densidade do vapor de água (ou umidade absoluta do ar)  $\rho(H_E)$  (em  $g/m^3$ ) na região da antena da estação terrena:**

$$\rho(h) = \rho_o \exp\left(\frac{-h}{h_o}\right) ,$$

onde:  $\rho_o$  ( $g/m^3$ ) é a densidade do vapor de água ao nível do mar ( $\rho_o = 20g/m^3$ ) e  $h_o$  (km) é a escala de altura ( $h_o = 6km$ , ver recomendação ITU-R p. 835).

**Passo 2 - Calcular as atenuações específicas por absorção de energia pelo oxigênio,  $\gamma_o$  (em dB/km) e pelo vapor de água,  $\gamma_w$  (em dB/km), conforme especificado na Recomendação ITU-R p. 676:**

$$\gamma_o = \left[ \frac{7,2r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34r_p^2r_t^{1,6}} + \frac{0,62\xi_3}{(54 - f)^{1,16\xi_1} + 0,83\xi_2} \right] f^2 r_p^2 10^{-13} \quad \text{para } f \leq 54GHz,$$

onde:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0, 0717, -1, 8132, 0, 0156, -1, 6515)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0, 5146, -4, 6368, -0, 1921, -5, 7416)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0, 3414, -6, 5851, 0, 2130, -8, 5854)$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)]$$

onde:  $f$  (em GHz) é a frequência de operação  $\rho$  (em hPa) é a pressão atmosférica  $P(H_E)$  (1013,25 hPa)  $t$  (em graus Celsius) é a temperatura  $T(H_E)$  ( $t = 298K - 273K = 25^\circ C$ ).

$$\gamma_w = \left[ \frac{3,98\eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11,96\eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,31)^2 + 11,14\eta_1^2} + \frac{0,081\eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp[1,6(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} + \frac{25,37\eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17,4\eta_1 \exp[1,46(1-r_t)]}{(f-448)^2} + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \frac{290\eta_1 \exp[0,41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f, 752) + \frac{8,3328 \cdot 10^4 \cdot \eta_2 \cdot \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right] f^2 r_t^2 \rho 10^{-4}$$

$$\eta_1 = 0,955 r_p r_t^{0,68} + 0,006 \rho$$

$$\eta_2 = 0,735 r_p r_t^{0,5} + 0,0353 r_t^4 \rho$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left( \frac{f-f_i}{f+f_i} \right)^2$$

onde:  $\rho$  (em  $\text{g/m}^3$ ) é a densidade do vapor de água  $\rho(H_E)$  ( $\rho = 20\text{g/m}^3$ ).

Para a banda Ku:

a) Na subida,  $f = 14$  GHz

b) Na descida,  $f = 11$  GHz

**Passo 3 - Calcular as altitudes equivalentes do oxigênio,  $h_o$  (em km), e do vapor de água  $h_w$  (em km), conforme especificado na Recomendação ITU-R P. 676:**

Os cálculos especificados são:

$$h_w = 1,66 \left[ 1 + \frac{1,39\sigma_w}{(f-22,235)^2 + 2,56\sigma_w} + \frac{3,37\sigma_w}{(f-183,31)^2 + 4,69\sigma_w} + \frac{1,58\sigma_w}{(f-325,1)^2 + 2,89\sigma_w} \right]$$

$$h_o = \frac{6,1}{1+0,17r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3)$$

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1+\exp[-8,6(r_p-0,57)]}$$

$$t_1 = \frac{4,64}{1+0,666(r_p)^{-2,3}} \exp \left[ - \left( \frac{f-59,7}{2,87+12,4\exp(-7,9r_p)} \right)^2 \right]$$

$$t_2 = \frac{0,14\exp(2,12r_p)}{(f-118,75)^2 + 0,031\exp(2,2r_p)}$$

$$t_3 = \frac{0,0114}{1+0,14r_p^{-2,6}} f \frac{-0,0247+0,0001 \cdot f+1,61 \cdot 10^{-6} \cdot (f)^2}{1-0,0169 \cdot f+4,1 \cdot 10^{-5} (f)^2+3,2 \cdot 10^{-7} (f)^3}$$

a) Na subida,  $f = 14$  GHz.

**Passo 4 - Calcular as atenuações parciais por absorção de energia pelo oxigênio,  $A_o$  (em dB), pelo vapor de água,  $A_w$  (em dB) e determinar a atenuação efetiva por gases atmosféricos,  $A_G$  (em dB):**

$$A_G = \frac{A_o + A_w}{\text{sen}(\theta)} \text{ para } 5 \leq \theta \leq 90$$

$$A_o = h_o \cdot \gamma_o$$

$$A_w = h_w \cdot \gamma_w$$

a) Na subida.

## 3.2 - Atenuação por precipitação e nuvens.

### 3.2.1 - Calcular as atenuações por chuva e por nuvens para o satélite operando na banda Ku:

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

#### 1. Predição das estatísticas de atenuação para uma média anual:

1.1 Cálculo das estatísticas de longa duração de atenuação por chuva para a aplicação do método são necessários os seguintes parâmetros na tabela 3 para calcular a estatísticas de longa duração de atenuação por chuva

Parâmetro	Descrição
$R_{0,01}$	Taxa de precipitação na região da estação terrena excedida para 0,01% de uma média anual.
$h_s$	Altitude da estação terrena
$\theta$	Ângulo de elevação da antena
$\phi$	LatITUDE da estação terrena
f	Frequência de operação na subida (em GHz), onde $f \leq 55$ GHz
$R_E$	Raio efetivo da Terra

Table 3: Parâmetros para calcular a estatísticas de longa duração de atenuação por chuva.

**Passo 1 - Determinar a altitude da chuva,  $h_e$  (em km), conforme especificado na Recomendação ITU-R P. 839:**

$$h_R = h_o + 0,36 ,$$

onde:  $h_o$  é a média anual das altitudes das isotermas a 0 °C ( $h_o = 4,5$ km).

**Passo 2 - Calcular o comprimento do percurso inclinado,  $L_i$  (em km):**

$$L_S = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2(\theta) + \frac{2(h_R - h_s)}{R_E}\right)^{1/2} + \sin(\theta)} \quad \text{para } \theta < 5$$
$$L_S = \frac{(h_R - h_s)}{\sin(\theta)} \quad \text{para } \theta \geq 5$$

**Passo 3 - Calcular o comprimento da projeção horizontal do percurso inclinado,  $L_G$  (em km):**

$$L_G = L_S \cdot \cos(\theta)$$

**Passo 4 - Determinar a taxa de precipitação,  $R_{0,01}$  (em mm/h), na região da estação terrena, e excedido para 0,01% de uma média anual, conforme especificado na recomendação ITU-R P. 837:**

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

**Passo 5 - Calcular a atenuação específica por chuva,  $\gamma_R$  (em dB/km), conforme especificado na Recomendação ITU-R P 838:**

$$\gamma_R = K(R_{0,01})^\alpha$$

$$K = \frac{[K_H + K_v + (K_H - K_v)\cos^2(\theta)\cos(2\tau)]}{2}$$

$$\alpha = \frac{[K_H\alpha_H + K_v\alpha_v + (K_H\alpha_H - K_v\alpha_v)\cos^2(\theta)\cos(2\tau)]}{2K}$$

onde:  $K$  é coeficiente constante ( $K_H$  para polarização horizontal,  $K_v$  para polarização vertical),  $\alpha$  é coeficiente constante ( $\alpha_H$  para polarização horizontal,  $\alpha_v$  para polarização vertical) e  $\tau$  (em graus) é o ângulo de polarização em relação à horizontal.

a) Na subida, a polarização é linear horizontal.

**Passo 6 - Calcular o fator de redução horizontal,  $r_{0,01}$ , e excedido para 0,01% do tempo:**

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78\sqrt{\left(\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}\right)} - 0,38[1 - \exp(-2L_G)]}$$

a) Na subida.

**Passo 7 - Calcular o fator de ajuste vertical,  $v_{0,01}$ , excedido para 0,01% do tempo:**

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin(\theta)}[31(1 - \exp[-(\theta/(1+x))])\frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45]}$$

a) Na subida.

**Passo 8 - Calcular o comprimento efetivo do percurso,  $L_E$  (em km):**

$$L_E = L_R v_{0,01}$$

a) Na subida

**Passo 9 - Calcular a atenuação por chuva,  $A_{0,01}$  (em dB) excedida para 0,01% de uma média anual:**

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E$$

a) Na subida.

**Passo 10 - Calcular a atenuação por chuva,  $A_p$  (em dB), excedida para outra porcentagem  $p$  de uma média anual:**

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033\ln(p)-0,045\ln(A_{0,01})-\beta(1-p)\text{sen}(\theta))}$$

a) Na subida.

**1.2 - Escalonamento das estatísticas de longa duração de atenuação por chuva para frequência e polarização:**

$$A_2 = A_1 (\varphi_2 / \varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)}$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1,12 \cdot 10^{-3} (\varphi_2 / \varphi_1)^{0,5} (\varphi_1 A_1)^{0,55}$$

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1+10^{-4}f^2}, \text{ para } 7 \text{ GHz} \leq f_1, f_2 \leq 55 \text{ Hz},$$

onde:  $A_i$  é atenuação por chuva excedida para uma porcentagem  $p$ , de uma média anual, referente a uma frequência  $f$ .

a) Na subida.

**2 - Variações sazonais (pior mês):**

**Passo 1 - Calcular a porcentagem anual do tempo,  $p$ , correspondente a porcentagem do tempo do pior mês,  $p_w$ , conforme especificado na ITU-R p. 841:**

$$p = \frac{p_w}{Q}$$

$$Q = Q_1^{\frac{1}{(1-\beta)}} p_w^{-\beta(1-\beta)},$$

onde:  $Q$  é o fator de correção composto por dois parâmetros,  $Q_1$  e  $\beta$ , determinados pelo clima e por efeitos de propagação.

**Passo 2 - Calcular a atenuação por chuva,  $A_p$  (em dB) excedida de para  $p$  com correspondência a  $p_w$ :**

$$A_p = A_{0,01} \frac{p}{0,01}^{-[0,655+0,311\ln(p)-0,45\ln(A_{0,01})-\beta(1-p)\text{sen}(\theta)]}$$

**Passo 3 - Cálculo das estatísticas de longa duração de atenuação por nuvens, de acordo com a ITU-R P. 840, para  $f = 14$  GHz na subida:**

$$A = \frac{L K_l}{\text{sen}\theta} ,$$

onde:  $L(\text{Kg}/\text{m}^2)$  é a quantidade total de água líquida na coluna de nuvem e  $K_l(\text{dB}/\text{km})/(\text{g}/\text{m}^3)$  coeficiente de atenuação específica.

a) Na subida:  $L = 1,6\text{Kg}/\text{m}^2$  e  $K_l \approx 0,2(\text{dB}/\text{km})/(\text{g}/\text{m}^3)$ .

### 3.3 - Atenuação por cintilação.

#### 3.3.1 Calcular a atenuação por cintilação para o satélite operando na banda KU:

Para utilização do método, são necessários os seguintes parâmetros, encontrados a seguir na tabela 4:

Parâmetro	Descrição
$t$	Temperatura média em ( $^{\circ}\text{C}$ ) na região da estação terrena
$H$	Umidade relativa média (em %) na superfície da região da estação terrena
$f$	Frequência de operação na subida
$\theta$	Ângulo de elevação da antena
$D$	Diâmetro físico da antena
$\eta$	Eficiência da antena (se desconhecida, estima-se $\eta = 0,5$ )

Table 4: Parâmetros para calcular a atenuação por cintilação do satélite na banda KU

**Passo 1: Calcular o valor da pressão de saturação do vapor de água,  $e_s$  (em hPa), conforme especificado na Recomendação ITU-R P.453:**

$$e_s = a.exp\left(\frac{bt}{t+c}\right) ,$$

onde:  $a, b$  e  $c$  são coeficientes aplicados na faixa de temperatura de  $-20$   $^{\circ}\text{C}$  a  $50$   $^{\circ}\text{C}$ , com precisão de  $\pm 0,20\%$  ( $a = 6,1121$ ,  $b = 17,50$  e  $c = 240,97$ )

**Passo 2: Calcular o termo úmido da retratividade,  $N_{wet}$ , conforme a Recomendação ITU-R P.453:**

$$N_{wet} = 3,732 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$$

$$e = \frac{H e_s}{100} ,$$

onde:  $T$  (em K) é temperatura  $t$  em Kelvin e  $e$  (em hPa) é a pressão de vapor de água.

**Passo 3:** Calcular o desvio padrão da amplitude do sinal  $\sigma_{ref}$  (em dB):

$$\sigma_{ref} = 3,6 \times 10^{-3} + N_{wet} \times 10^{-4}$$

**Passo 4:** Calcular o comprimento efetivo da seção do enlace,  $L$  (em m), na camada turbulência da troposfera:

$$L = \frac{2h_l}{\sqrt{\text{sen}^2\theta + 2,35 \times 10^{-4} + \text{sen}\theta}},$$

onde:  $h_l$  (em m) é altitude da camada turbulenta da troposfera ( $h_l = 1000$  m).

**Passo 5:** Calcular o diâmetro efetivo da antena  $D_{eff}$  (em m):

$$D_{eff} = D\sqrt{\eta}$$

**Passo 6:** Calcular o valor médio da antena  $g(x)$ :

$$g(x) = \sqrt{3,86(x^2 + 1)^{(11/12)} \text{sen} \left[ \frac{11}{6} \arctan(1/x) \right] - 7,08x^{(5/6)}}$$

$$x = 1,22D_{eff}^2 \left( \frac{f}{L} \right)$$

a) Na subida.

**Passo 7:** Calcular o desvio padrão do sinal,  $\sigma$ :

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot f^{7/12} \cdot \frac{g(x)}{\text{sen}(\theta)^{1,2}}$$

a) Na subida.

**Passo 8:** Calcular a porcentagem do tempo  $a(p)$ :

$$a(p) = -0,061(\log(p))^3 + 0,072(\log(p))^2 - 1,71 \log(p) + 3, \quad \text{para } 0,01\% \leq p \leq 50\%$$

**Passo 9:** Calcular a atenuação por cintilação  $A_s(p)$  (em dB):

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma$$

a) Na subida.

### 3.4 - Atenuação por múltiplas fontes de ocorrência simultânea:

$$A_T(p) = A_g(p) + \sqrt{(A_r(p))} ,$$

onde:

$A_g(p)(emdB)$  → Atenuação por gases atmosféricos (ver Seção 3.1)

$A_r(p)(emdB)$  → Atenuação por chuva (ver Seção 3.2)

$A_c(p)(emdB)$  → Atenuação por nuvens (ver Seção 3.2)

$A_s(p)(emdB)$  → Atenuação por chuva (ver Seção 3.3)

#### 3.4.1 - Calcular a atenuação total para o satélite operando em banda Ku:

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

#### 3.4.2 Atenuação por tempestades de areia e de poeira:

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

## Etapa 4 - Temperatura de ruído da antena:

$$T_s = T_m(1 - 10^{-\frac{A}{10}})$$

$$A = A_O + A_G + A_R + A_c + A_s ,$$

onde:

$T_s$  (em K) → Temperatura de ruído da antena.

$T_m$  (em K) → Temperatura efetiva do meio.

$A$  (em dB) → Atenuação de propagação.

#### 4.1 - Calcular a temperatura de ruído da antena para o satélite operando na banda Ku:

a) Na subida,  $T_m = 260$  K.

b) Na descida,  $T_m = 280$  K.

## Etapa 5 - Efeitos do céu claro.

#### 5.1 - Calcular os efeitos do céu claro:

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

## Etapa 6 - Efeitos de polarização cruzada.

#### 6.1 - Efeitos de polarização cruzada para o satélite operacionando na banda Ku:

**1) Cálculo das estatísticas de longa duração de polarização induzida por hidrometeoros (XPD):**

Para utilização do método, são necessários os seguintes parâmetros, encontrados a seguir na tabela 5:

Parâmetro	Descrição
$R_{0,01}$	Atenuação por chuva (em dB), na subida, excedida para 0,01% do tempo Atenuação por chuva (em dB), na descida, excedida para 0,01% do tempo
$\tau$	Ângulo de polarização do sinal, na subida, em relação à horizontal (em graus) Ângulo de polarização do sinal, na descida, em relação à vertical (em graus)
$f$	Frequência de operação na subida (GHz), onde $8 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$ Frequência de operação na descida (em GHz), onde $8 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$
$\theta$	Ângulo de elevação da antena(em graus), onde $\theta \leq 60^\circ$

Table 5: Parâmetros para calcular a estatísticas de longa duração de polarização induzida por hidrometeoros.

**Passo 1: Calcular o termo dependente da frequência,  $C_f$  (em dB):**

$$C_f = 30 \log_{10}(f) \quad , \text{ para } 8 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$$

a) Na subida, para  $f = 14 \text{ GHz}$

**Passo 2: Calcular o termo dependente de atenuação por chuva,  $C_A$  (em dB):**

$$C_A = V(f) \log_{10}(A_{0,01})$$

$$V(f) = 12,8f_{0,19}, \text{ para } 8 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$$

$$V(f) = 22,6, \text{ para } 20 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$$

a) Na subida  $f = 14 \text{ GHz}$  e  $A_r(0,01)$ .

**Passo 3: Calcular o fator de melhoria de polarização  $C_\tau$  (em dB):**

$$C_\theta = -\log_{10}[1 - 0,484(1 + \cos(4\tau))]$$

a) Na subida  $\tau = 90^\circ$  .

**Passo 4: Calcular o termo dependente do ângulo de elevação  $C_\theta$ :**

$$C_\theta = -40 \log_{10}(\cos\theta), \text{ para } \theta \leq 60^\circ$$

**Passo 5:** Calcular o termo dependente do ângulo de curvatura  $C_\sigma$ :

$$C_\sigma = 0,0052\sigma^2 ,$$

onde:  $\sigma$  (em graus) é o desvio padrão da distribuição de curvatura da superfície das gotas de chuva ( $\sigma = 0^\circ$  para  $p = 1\%$ ,  $\sigma = 5^\circ$  para  $p = 0,1\%$  e  $\sigma = 15^\circ$  para  $p = 0,010\%$ ).

*Observação:* Note que o ângulo  $\theta$  é maior do que  $60^\circ$ . Por falta de orientações a respeito dos passos seguintes, esta metodologia seguirá os passos para ângulos menores do que  $60^\circ$ .

**Passo 6:** Calcular as estatísticas de polarização cruzada por chuva,  $XPD_{rain}$  (em dB), excedida para 0,01% do tempo

$$XPD_{rain} = C_f - C_A + C_r + C_\theta + C_\sigma$$

a) Na subida.

**Passo 7:** Calcular o termo dependente dos cristais de gelo,  $C_{ice}$  (em dB):

$$C_{ice} = XPD_{rain}(0,3 + 0,1\log_{10}(p))/2$$

a) Na subida.

**Passo 8:** Calcular as estatísticas de polarização cruzada por chuva,  $XPD_{0,01}$  (em dB), não excedida para 0,01% do tempo, incluindo os efeitos dos cristais de gelo:

$$XPD_p = XPD_{min} - C_{ice}$$

a) Na subida.

**6.2 - Escalonamento das estatísticas de polarização cruzada induzida por hidrometeoros para frequência e polarização:**

$$XPD_2 = XPD_1 - 20\log_{10} \left[ \frac{f_2 \sqrt{1 - 0,484(1 + \cos(4\tau_2))}}{f_1 \sqrt{1 - 0,484(1 + \cos(4\tau_1))}} \right] ,$$

onde:  $XPD$  em (dB) é o valor  $XPD$  não excedido para uma porcentagem,  $p$  do tempo, referente a uma frequência  $f_i$  (em GHz) e o ângulo de polarização  $\tau_i$  (em graus).

a) Na subida

**Etapa 7 - Retardos de propagação:**

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

## **Etapa 8 - Limitações de largura de banda:**

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.

## **Etapa 9 - Ângulo de chegada:**

Aqui, o aluno deverá efetuar uma análise teórica.