



Licenciatura em Engenharia Informática, Redes e  
Telecomunicações

Unidade Curricular: Rádio Comunicações

# Simulador

43874 – João Florentino

42367 – Daniel Pires

Docente: Pedro Vieira

1º Semestre letivo 2020/2021

23/01/2021



## Resumo

No âmbito da unidade curricular de Rádio Comunicações, é realizado o presente trabalho pratico, de forma a explorar os conhecimentos adquiridos nas aulas. Conhecimentos esses relacionados com as comunicações por feixes hertzianos e com diversas componentes adjacentes a esta temática. Para o desenvolvimento do simulador pretendido são realizadas diversas funções na plataforma Matlab.

# Índice

|   |    |
|---|----|
| Resumo .....  | 3  |
| Índice de Figuras .....   | 6  |
| Índice de Tabelas .....   | 7  |
| Índice de Equações .....  | 8  |
| Lista de Símbolos .....   | 10 |
| 1. Introdução.....  | 12 |
| 1.1 Organização do documento .....  | 12 |
| 2. Terra plana / Terra esférica.....  | 13 |
| 2.1. Terra plana.....   | 13 |
| 2.2. Terra esférica .....   | 13 |
| 2.2.1. Sistema Europeu.....   | 14 |
| 2.2.1. Sistema Americano.....   | 15 |
| 2.3. Raio Direto e Elipsoide de <i>Fresnel</i> .....                          | 16 |
| 2.4. Potência Total, Atenuação em Espaço Livre e Fator de Divergência.....    | 17 |
| 2.5. Andamento da potência em função da altura.....                           | 20 |
| 2.5.1. Frequência de 1GHz.....  | 20 |
| 2.5.2. Frequência de 10GHz.....   | 20 |
| 2.5.3. Frequência de 30GHz.....   | 21 |
| 2.5.4. Frequência de 60GHz.....   | 21 |
| 2.6. Variação dos ângulos de fogo de emissão e receção .....                  | 22 |
| 2.7. Comparação Terra Plana-Terra Esférica: Análise da Diferença de fase..... | 24 |
| 3. Influência da atmosfera .....  | 24 |
| 3.1. Atenuação suplementar provocada pelo oxigénio e vapor de água .....      | 24 |
| Variação da Atenuação Suplementar em função da frequência .....               | 26 |
| Concentração de vapor de água $\rho$ .....                                    | 26 |
| 3.2. Atenuação suplementar provocada pela precipitação .....                  | 27 |

|   |    |
|---|----|
| 3.3. Cálculo da atenuação provocado pela à chuva .....  | 28 |
| 3.4. Efeitos Refrativos.....  | 29 |
| 3.5. Representação da atenuação provocada pelo vapor de água e pelo oxigénio presente na atmosfera..... | 30 |
| 3.6. Representação da atenuação provocada pela chuva.....   | 32 |
| 3.7. Representação do perfil da ligação em sistema Europeu .....  | 33 |
| 3.8. Cálculo do raio de curvatura do raio direto.....   | 35 |
| 4. Propagação por Difração em Terra Esférica e Dispersão Troposférica.....                              | 36 |
| 4.1. Difração por obstáculos .....  | 36 |
| 4.2. Dispersão troposférica .....   | 38 |
| 5. Propagação por Difração devido ao Terreno.....   | 41 |
| 5.1. Método de Deygout .....  | 41 |
| 6. Conclusões .....   | 43 |
| 7. Bibliografia.....  | 44 |

# Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Referencial da Terra .....  | 14 |
| Figura 2 - Perfil de ligação Europeu .....   | 15 |
| Figura 3 - Perfil de ligação Europeu .....   | 16 |
| Figura 4 - 1º Elipsoide de Fresnel .....   | 16 |
| Figura 5-Potencia total recebida em Terra plana com 1GHz .....                         | 20 |
| Figura 6-Potencia total recebida em Terra plana com frequência 10GHz .....             | 20 |
| Figura 7-Potencia total recebida em Terra plana com frequência 30GHz .....             | 21 |
| Figura 8-Potencia total recebida em Terra plana com frequência 60GHz .....             | 21 |
| Figura 9-Angulo de Fogo Terra Esférica .....   | 23 |
| Figura 10-Angulo de Fogo Terra Plana .....   | 23 |
| Figura 11-Comparação Terra Plana-Terra Esférica .....                                  | 24 |
| Figura 12-Atenuação em função da frequência .....                                      | 26 |
| Figura 13-Tabela dos valores k e a .....   | 27 |
| Figura 14-Intensidade de precipitação e percentagem do tempo que é excedida .....      | 28 |
| Figura 15-Atenuação oxigénio e vapor de água em função da temperatura .....            | 31 |
| Figura 16-Atenuação oxigénio e vapor de água em função da humidade .....               | 31 |
| Figura 17-Atenuação provocada pela chuva média anual e pior mês .....                  | 32 |
| Figura 18-Perfil de ligação, em Sistema Europeu com $dndh = -400 \times 10^{-6}$ ..... | 33 |
| Figura 19-Perfil de ligação em Sistema Europeu com $dndh = -157 \times 10^{-6}$ .....  | 33 |
| Figura 20-Perfil de ligação Sistema Europeu com $dndh = -43 \times 10^{-6}$ .....      | 34 |
| Figura 21-Perfil de ligação Sistema Europeu com $dndh = 50 \times 10^{-6}$ .....       | 34 |
| Figura 22-Variacao do raio de curvatura do raio ótico .....                            | 35 |
| Figura 23-Perfil de ligação com influência da esfericidade .....                       | 37 |
| Figura 24-Metodo de Deygout .....  | 41 |

# Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Ângulos de fogo nas antenas de transmissão e recepção Terra plana.....       | 21 |
| Tabela 2 – Ângulos de fogo nas antenas de transmissão e recepção Terra esférica.....    | 21 |
| Tabela 3 – Parâmetros meteorológicos e da estrutura atmosférica para os diferentes..... | 38 |

# Índice de Equações

|   |    |
|---|----|
| Equação 1 – Distância do ponto especular.....                           | 13 |
| Equação 2 – Cálculo da altura equivalente.....                          | 13 |
| Equação 3 – Decaimento da superfície da Terra no Sistema Europeu.....   | 14 |
| Equação 4 – Decaimento da superfície da Terra no Sistema Americano..... | 15 |
| Equação 5 – Equação Raio Direto.....                                    | 16 |
| Equação 6 – Equação primeiro Elipsoide de Fresnel.....                  | 17 |
| Equação 7 – Interseção da superfície da Terra com Elipsoide .....       | 17 |
| Equação 8 – Equação de Friis.....                                       | 17 |
| Equação 9 – Equação ganho das antenas.....                              | 18 |
| Equação 10 – Equação da atenuação das antenas.....                      | 18 |
| Equação 11 – Equação ponto especular.....                               | 18 |
| Equação 12 – Equação da potência recebida.....                          | 18 |
| Equação 13 – Equação da potência total recebida.....                    | 19 |
| Equação 14 – Equação do fator de divergência.....                       | 19 |
| Equação 15 – Cálculo ângulos de fogo.....                               | 22 |
| Equação 16 – Distância máxima de ligação.....                           | 36 |
| Equação 17 – Raio máximo do primeiro Elipsoide de <i>Fresnel</i> .....  | 36 |
| Equação 18 – Atenuação entre dois terminais.....                        | 37 |
| Equação 19 – Comprimento normalizado do percurso.....                   | 37 |
| Equação 20 – Altura da primeira antena normalizada.....                 | 37 |
| Equação 21 – Altura da segunda antena normalizada.....                  | 37 |
| Equação 22 – Natureza ou polarização do solo.....                       | 37 |
| Equação 23 – Admitância com polarização horizontal.....                 | 38 |



|  |    |
|--|----|
| Equação 24 – Admitância com polarização vertical.....                | 38 |
| Equação 25 – Equação $F(X)$ .....                                    | 38 |
| Equação 26 – Equação $G(Y)$ .....                                    | 38 |
| Equação 27 – Ganho resultante das antenas de emissão e recepção..... | 39 |
| Equação 28 – Propagação troposférica.....                            | 39 |
| Equação 29 – Altitude da base do volume comum.....                   | 39 |

## Lista de Símbolos

$c$  – Velocidade da luz no vazio [m/s]

$\lambda$  – Comprimento de onda [m]

$f$  – Frequência

$h_E$  – Altura da antena de emissão [m]

$h_R$  – Altura da antena de recepção [m]

$h'_E$  – Altura equivalente da antena de emissão [m]

$h'_R$  – Altura equivalente da antena de recepção [m]

$d$  – Distancia de ligação [m]

$\theta_E$  – Ângulo de fogo da antena emissora [°]

$\theta_R$  – Ângulo de fogo da antena recetora [°]

$P_d$  – Potencia do raio direto [dB]

$P_E$  – Potencia de emissão [dB]



# **1. Introdução**

No presente trabalho é desenvolvida uma aplicação em Matlab, uma vez que esta linguagem de programação apresenta uma maior facilidade quanto ao processamento de resultados a nível gráfico e a nível de cálculos.

Ao longo do trabalho são abordados diversos tópicos lecionados em aula ao longo do semestre, porem de forma pratica. Estes tópicos são referentes ao dimensionamento de ligações por feixe hertziano, tendo em conta os conhecimentos académicos adquiridos em aula de forma teórica.

Em alguns momentos de simulação é possível comprovar os resultados obtidos através da mesma recorrendo a formulas teóricas presentes nos slides da unidade curricular.

## **1.1 Organização do documento**

O relatório técnico encontra-se organizado como pretendido pelo docente da unidade curricular, onde a secção de desenvolvimento se apresenta ordenada pelos tópicos abordados no enunciado do trabalho prático.

## 2. Terra plana / Terra esférica

### 2.1. Terra plana

Começamos por apresentar uma solução para a representação de ligações de feixe hertziano, o modelo de aproximação Terra Plana, válido para curtas distâncias. Este modelo despreza a curvatura da Terra, o que simplifica consideravelmente os cálculos, como tal, tem-se em consideração que o campo total na antena de recepção é dado pela soma do raio direto com o raio refletido pela superfície da Terra, podendo este, ter uma interferência construtiva ou destrutiva. No entanto, para ligações de longa distância este modelo deixa de ser válido uma vez que a terra já vai apresentar uma curvatura que tem significância no sinal.

O sinal refletido chega à antena receptora com amplitude e fases diferentes do raio direto devido ao percurso do próprio sinal. Tendo em conta o conceito referido, pode-se encontrar o ponto especular que indica a distância onde ao incidir um raio, este chega à antena especular. Esta distância é descrita pela seguinte expressão:

$$x_e = \frac{h_E}{h_E + h_R} d$$

**Equação 1 – Distância do ponto especular**

### 2.2. Terra esférica

Como indicado anteriormente, o modelo Terra Plana apenas é considerado de forma a simplificar os cálculos e apenas é aplicado para curtas distâncias. De forma a aproximar o máximo possível à realidade, considera-se o modelo Terra Esférica. No procedimento de cálculo deste modelo, é necessário determinar a altura equivalente da antena devido ao decaimento da superfície terrestre, este cálculo representa-se na expressão seguinte:

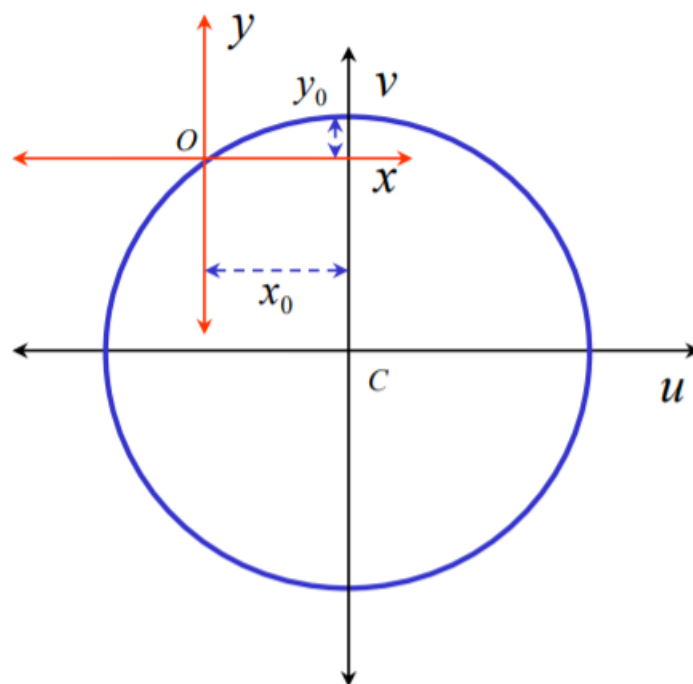
$$y = y_0 - \left( \frac{(x - x_0)^2}{2r_0} \right)$$

**Equação 2 – Cálculo da altura equivalente**

Tendo em conta que a Terra é aproximadamente esférica de raio  $r_0 = 6370 \text{ km}$ , existem duas possíveis representações dos perfis de ligação:

- Sistema Europeu
- Sistema Americano

A única diferença entre estes sistemas é a origem dos referenciais. A representação mais utilizada será o Sistema Europeu.



**Figura 1 - Referencial da Terra**

### 2.2.1. Sistema Europeu

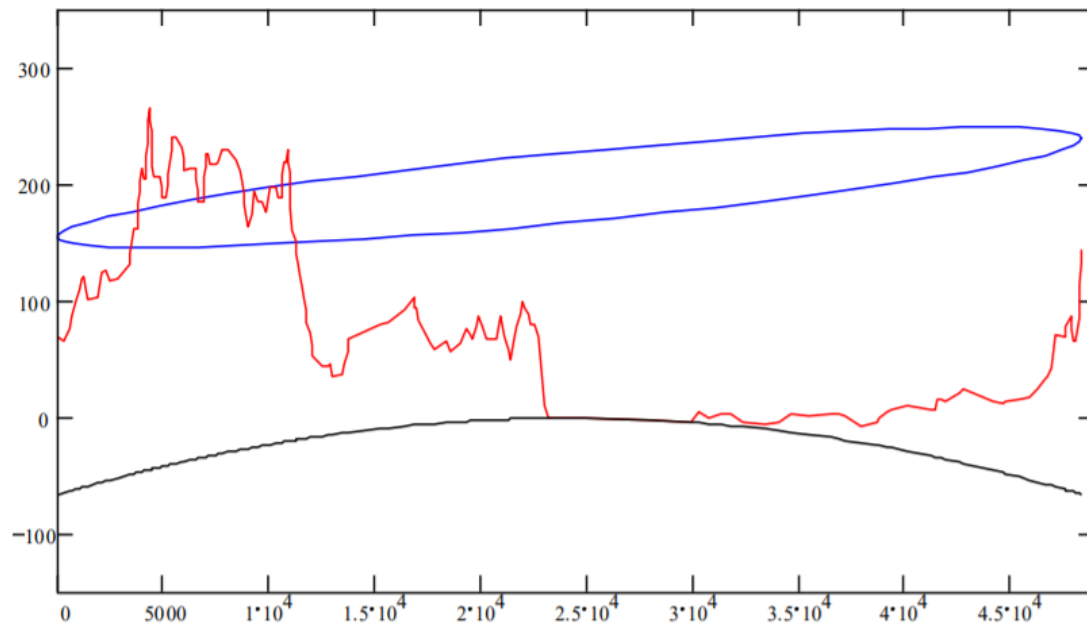
- $x_0 = \frac{d}{2}$
- $y_0 = 0$

Deste modo, a superfície da Terra pode ser traduzida por:

$$y = -\frac{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2}{2r_0}$$

### **Equação 3 – Decaimento da superfície da Terra no Sistema Europeu**

Na figura seguinte apresenta-se o perfil de ligação Europeu:



**Figura 2 - Perfil de ligação Europeu**

### 2.2.1. Sistema Americano

- $x_0 = 0$
- $y_0 = 0$

Deste modo, a superfície da Terra pode ser traduzida por:

$$y = -\frac{x^2}{2r_0}$$

#### **Equação 4 – Decaimento da superfície da Terra no Sistema Americano**

Na figura seguinte apresenta-se o perfil de ligação Americano para melhor esclarecimento deste modelo de perfil.

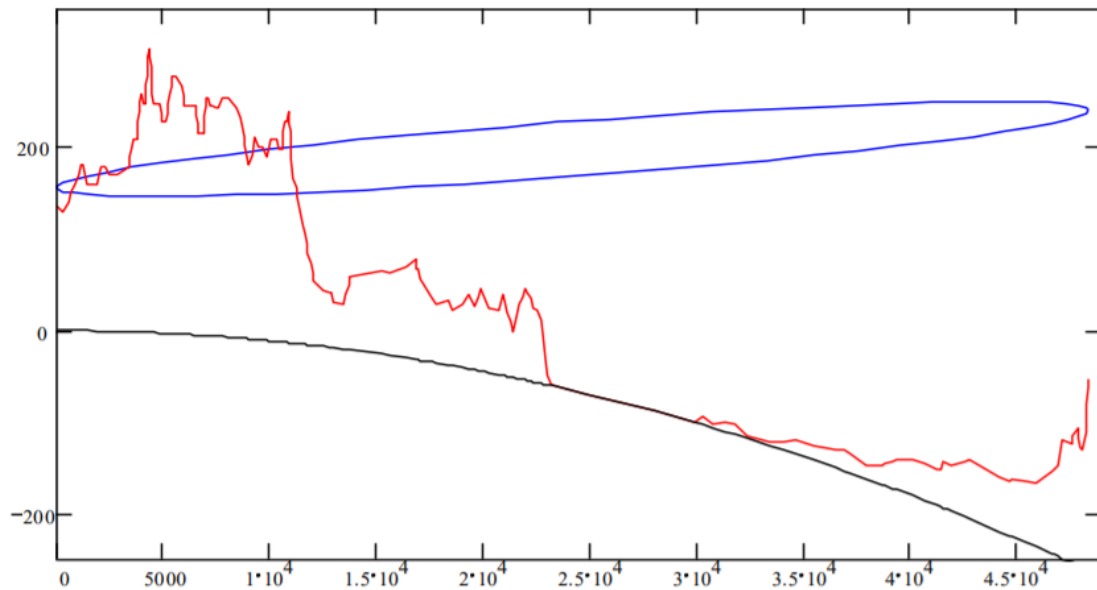


Figura 3 - Perfil de ligação Europeu

## 2.3. Raio Direto e Elipsoide de *Fresnel*

O raio é a linha que une a antena emissora à antena recetora, sendo a sua equação dada por:

$$y = \frac{h_2 - h_1}{d}x + h_1$$

Equação 5 – Equação Raio Direto

Um dos pontos mais importantes no dimensionamento de ligações por feixe hertziano é verificar se a propagação ocorre em espaço livre, ou seja, verificando se o 1º elipsoide de

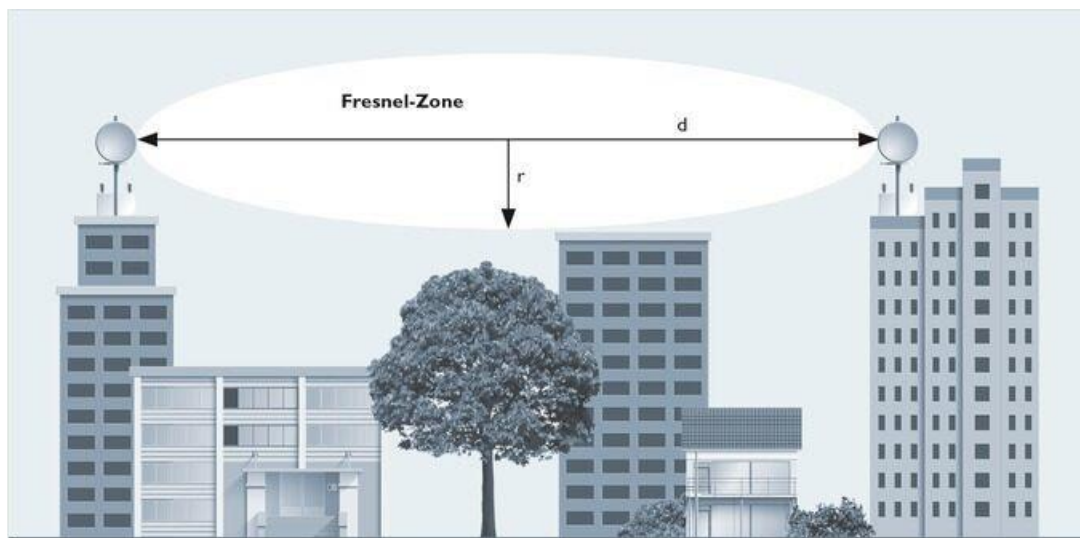


Figura 4 - 1º Elipsoide de *Fresnel*



*Fresnel* não se encontra obstruído por nenhum obstáculo, pois é nele que se propaga a maior parte de energia favorável ao campo direto.

O raio do 1º elipsoide é dado por:

$$r_{1m} = \sqrt{\frac{d \times \lambda}{4}}$$

#### **Equação 6 – Equação primeiro Elipsoide de Fresnel**

Este parâmetro de ligação é necessário que não se encontre obstruído, como tal é necessário verificar se em algum ponto a ligação interceta a superfície da Terra com a seguinte equação:

$$elipsoide = y + r_{elipsoide} = \left(\frac{h_2 - h_1}{d}x + h_1\right) \pm \sqrt{\frac{x(d-x)}{d}\lambda}$$

#### **Equação 7 – Interceção da superfície da Terra com Elipsoide**

## **2.4. Potência Total, Atenuação em Espaço Livre e Fator de Divergência**

Para calcular o nível e potencia de receção aos terminais da antena, numa ligação ponto-a-ponto, considerando apenas um perfil de ligação simples, deve-se utilizar a equação de *Friis*:

$$P_{r[dBm]} = P_{e[dBm]} + G_{e[dBi]} + G_{r[dBi]} - A_{e[dB]} - A_{r[dB]} - L_{FS[db]}$$

#### **Equação 8 – Equação de Friis**

sendo que:

- $P_{r[dBm]}$  e a potência de receção em dBm
- $P_{e[dBm]}$  e a potência de emissão em dBm
- $G_{e[dBi]}$  e  $G_{r[dBi]}$  são os ganhos respetivos das antenas de emissão e receção
- $A_{e[dB]}$  e  $A_{r[dB]}$  são parâmetros que dependem das atenuações dos guias bem como na sua distância
- $L_{FS[db]}$  e a atenuação em espaço livre

Os ganhos das antenas de emissão e recepção,  $G_e$  e  $G_r$ , dependem do tamanho da antena ( $l$ ), assim como do seu rendimento ( $\eta$ ) que, sendo estas antenas isotrópicas, tem o valor de 0.5:

$$G_{r[db]} = G_{e[db]} = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \right) + 10 \log_{10}(\eta)$$

#### **Equação 9 – Equação ganho das antenas**

Para calcular a atenuação das antenas ( $L_{FS[db]}$ ), temos a seguinte equação:

$$L_{FS[db]} = 32,4 + 20 \log_{10}(d_{[km]}) + 20 \log_{10}(f_{[MHz]})$$

#### **Equação 10 – Equação da atenuação das antenas**

A potência recebida não tem apenas como fonte a potência transportada pelo raio direto. A presença da Terra e a sua curvatura, podem originar reflexões que podem alterar o sinal recebido e até anulá-lo em casos mais extremos. Para calcular essa interferência temos de calcular o ponto especular,  $x_e$ . O ponto especular é dado por:

$$x_e = \frac{h_E}{h_E - h_R} d$$

#### **Equação 11 – Equação ponto especular**

Quando calculamos o ponto especular a potência total recebida é dada por:

$$P_{t[dbW]} = P_{d[dbW]} + 20 \log_{10} \left( \left| 2 \sin \left( \frac{2\pi h_R h_E}{\lambda d} \right) \right| \right)$$

#### **Equação 12 – Equação da potência recebida**

Em Terra esférica o ponto especular é calculado de maneira diferente que considerando Terra plana. Este cálculo em Terra esférica é dado por:

$$x_e = d_1$$

$$d = d_1 + d_2 \Leftrightarrow d_2 = d - d_1$$

$$h'_E = h_E - \frac{d_1^2}{2r}$$

$$h'_R = h_R - \frac{d_2^2}{2r}$$

$$\tan \alpha = \frac{h'_E}{d_1} = \frac{h'_R}{d_2}$$

Quando desenvolvemos a equação:

$$\begin{aligned}
\frac{h'_E}{d_1} &= \frac{h'_R}{d_2} \Leftrightarrow \frac{h_E - \frac{d_1^2}{2r}}{d_1} = \frac{h_R - \frac{d_2^2}{2r}}{d_2} \Leftrightarrow d_2(h_E - \frac{d_1^2}{2r}) = d_1(h_R - \frac{d_2^2}{2r}) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow (d - d_1)(h_E - \frac{d_1^2}{2r}) = d_1(h_R - \frac{(d - d_1)^2}{2r}) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow h_E d - \frac{d_1^2}{2r} d - h_E d_1 + \frac{d_1^2}{2r} d_1 = h_R d_1 - \frac{(d - d_1)^2}{2r} d_1 \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow h_E d - \frac{d_1^2}{2r} d - h_E d_1 + \frac{d_1^2}{2r} d_1 - h_R d_1 + \frac{d^2 - 2dd_1 + d_1^2}{2r} d_1 = 0 \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow h_E d - \frac{d}{2r} d_1^2 - h_E d_1 + \frac{1}{2r} d_1^3 - h_R d_1 + \frac{d^2}{2r} d_1 - \frac{d}{r} d_1^2 + \frac{1}{2r} d_1^3 = 0 \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow d_1^3 - \left(\frac{d}{2} + d\right) d_1^2 + \left(\frac{d^2}{2} - rh_E - rh_R\right) d_1 + rh_E d = 0 \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow d_1^3 - \frac{3d}{2} d_1^2 + \left(\frac{d^2}{2} - rh_E - rh_R\right) d_1 + rh_E d = 0 \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

Fazendo a primeira mudança de variável novamente:

$$x_e^3 - \frac{3}{2} dx_e^2 + \left(\frac{1}{2} d^2 - r(h_E + h_R)\right) x_e + h_E dr = 0$$

E a potência total recebida é dada por:

$$P_{t[\text{dBW}]} = P_{d[\text{dBW}]} + 10 \log_{10} \left( 1 + D_v^2 - 2D_v \cos\left(\frac{4\pi h'_E h'_R}{\lambda d}\right) \right)$$

### **Equação 13 – Equação da potência total recebida**

Onde  $D_v$ , fator de divergência, é dado por:

$$D_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2d_1 d_2}{r d \sin \alpha}}}$$

### **Equação 14 – Equação do fator de divergência**

## 2.5. Andamento da potência em função da altura

Foi-nos proposto o seguinte exercício de forma a testar a funcionalidade da nossa aplicação:

Andamento da potência recebida, em função da altura da antena de receção, para as seguintes situações:

**Potência de Emissão:** 10 W

**Altura da Antena de Emissão:** 40 m

**Altura da antena de receção:**  $0 < \text{Altura Antena} < 150$  m

**Frequências:** 1 GHz, 10 GHz, 30 GHz e 60 GHz

**Distância:** 45 km

### 2.5.1. Frequência de 1GHz

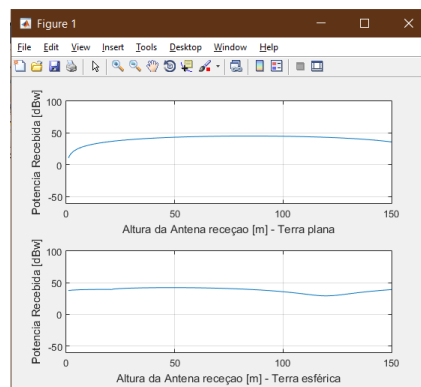


Figura 5-Potencia total recebida em Terra plana com 1GHz

### 2.5.2. Frequência de 10GHz

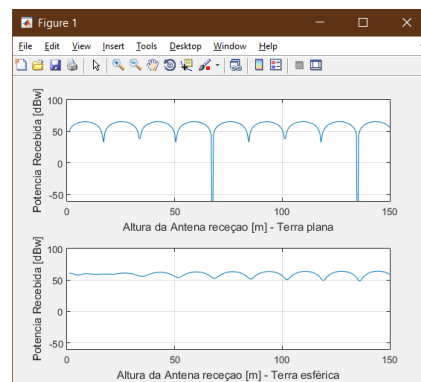


Figura 6-Potencia total recebida em Terra plana com frequência 10GHz

### 2.5.3. Frequência de 30GHz

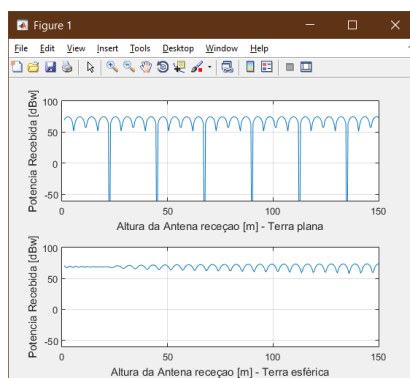


Figura 7-Potencia total recebida em Terra plana com frequência 30GHz

### 2.5.4. Frequência de 60GHz

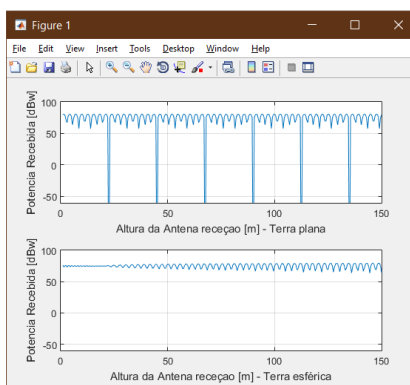


Figura 8-Potencia total recebida em Terra plana com frequência 60GHz

Pela observação das figuras, podemos concluir que a potência recebida aos terminais da antena recetora é fortemente influenciada pela altura da mesma. Tal acontece por estarmos presentes de antenas de diferentes alturas, o raio refletido que chega a antena recetora percorreu um caminho diferente do raio direto, por consequência o ponto especular é alterado provocando assim alterações na diferença de fase entre o raio refletido e o raio direto, verificando deste modo as oscilações de potência. Podemos assim verificar o aumento das oscilações no sinal, e nas reflexões no solo, com o aumento da frequência. Este acontecimento ocorre de forma mais evidente quando o terreno é horizontal e liso, como por exemplo em superfícies líquidas. Uma agravante nestes casos provem do facto dos níveis das superfícies tenderem a variar com o tempo provocando flutuações na receção do sinal.

## 2.6. Variação dos ângulos de fogo de emissão e receção

Apresenta-se na tabela abaixo os valores dos ângulos de fogo (emissão e receção) em terra plana em função da distância entre antenas. Para estes valores foram obtidos através da seguinte equação:

$$\tan \theta_{E \text{ ou } R} = \frac{h_R - h_E}{d}$$

**Equação 15 – Cálculo ângulos de fogo**

|            | d = 15km           | d = 35km           | d = 45km           |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\theta_E$ | 0.4199° para cima  | 0.1801° para cima  | 0.1401° para cima  |
| $\theta_R$ | 0.4199° para baixo | 0.1801° para baixo | 0.1401° para baixo |

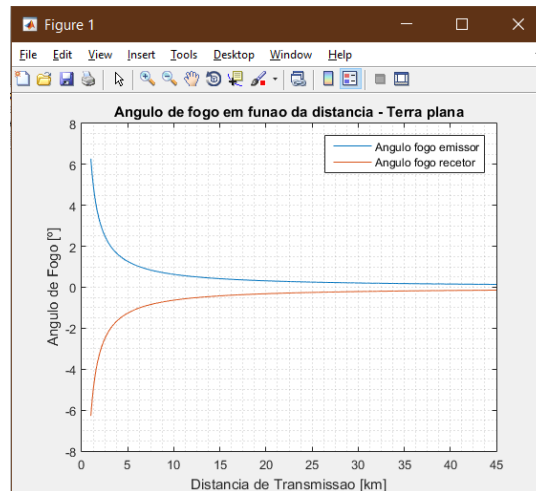
**Tabela 1 – Ângulos de fogo nas antenas de transmissão e receção Terra plana**

Para o cálculo dos ângulos de fogo em terra esférica é necessário calcular as alturas equivalentes das antenas, devido ao decaimento causado pela curvatura da Terra, e como já anteriormente referido utilizamos a equação 3.

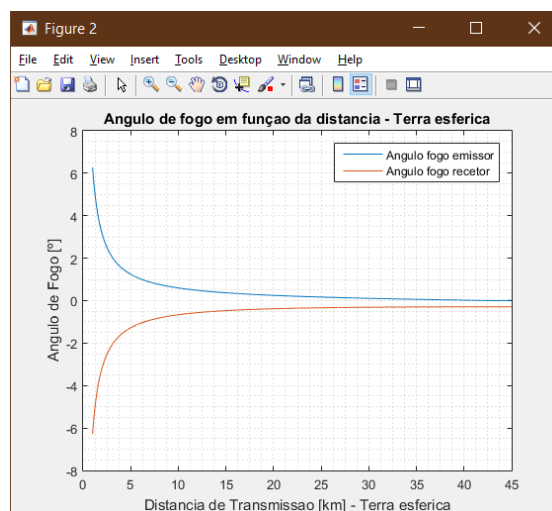
|            | d = 15km           | d = 35km           | d = 45km           |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\theta_E$ | 0.3683° para cima  | 0.06193° para cima | 0.0117° para cima  |
| $\theta_R$ | 0,4703° para baixo | 0,2981° para baixo | 0,2918° para baixo |

**Tabela 2 – Ângulos de fogo nas antenas de transmissão e receção Terra esférica**

Apos análise dos valores obtidos nas tabelas acima apresentadas verificamos que não existe alteração significativa dos valores dos ângulos de fogo, tal deve-se às alturas equivalentes variarem de forma proporcional e ao facto de a distancia entre as antenas não se alterar significativamente.



**Figura 10-Angulo de Fogo Terra Plana**



**Figura 9-Angulo de Fogo Terra Esférica**

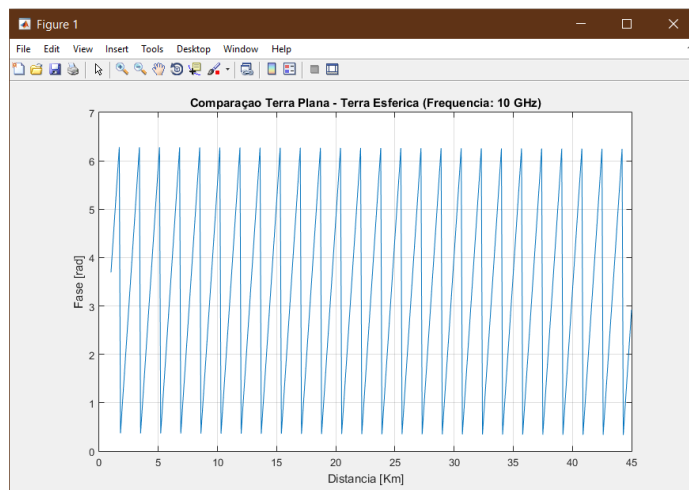
Nos gráficos acima observa-se que o ângulo de fogo do recetor se encontra negativo, o facto de este se encontrar a negativo é apenas para graficamente se poder distinguir entre ângulos que apontam para cima dos que apontam para baixo sendo os negativos os que apontam para baixo. Isto deve-se ao facto do recetor do sinal estar num ponto mais elevado que o emissor do sinal.

Estes resultados vêm comprovar o calculado realizado anteriormente e pode-se concluir que com o aumento da distância de ligação, os ângulos de fogo têm comportamentos idênticos, uma vez que o ângulo de fogo de emissão vai-se tornando cada vez mais pequeno à medida que a antena de receção está mais longe, alterando apenas a sua inclinação passando a apontar para baixo, enquanto na receção o ângulo de fogo também vai diminuindo, mas aqui alterando a sua

inclinação para cima. Podemos assim concluir que no que toca aos ângulos de fogo os modelos terra plana e terra esférica, em distâncias curtas, são semelhantes.

## 2.7. Comparação Terra Plana-Terra Esférica: Análise da Diferença de fase

A diferença de fase aos 5 km no gráfico acima apresentado é muito semelhante



**Figura 11-Comparação Terra Plana-Terra Esférica**

comparativamente com a diferença de fase aos 10 km, onde teoricamente esta deveria ser maior. Para valores de ligação para os quais a diferença de fase entre os dois modelos é superior a 1 radiano os erros cometidos são elevados e por isso o modelo Terra Plana não é uma boa aproximação.

## 3. Influência da atmosfera

Tendo em conta a presença de atmosfera, esta irá ter 5 efeitos principais:

### 3.1. Atenuação suplementar provocada pelo oxigénio e vapor de água

Função do percurso e da inclinação do mesmo, que ocorre devido aos gases constituintes da atmosfera (como o oxigénio e o vapor de água) e aos hidrometeoritos (como a chuva, o nevoeiro, granizo e a neve).

Para um percurso de comprimento  $45\text{km}$ , o valor da atenuação suplementar devida a presença da atmosfera  $A_a$  expressa em dB, e dada por:



$$A_a = \int_0^d [\beta_0(x) + \beta_w(x)] dx$$

Em que  $x$  é comprimento medido ao longo do raio direto e  $\beta_0$  e  $\beta_w$  são os coeficientes de atenuação devidos ao oxigênio e ao vapor de água, respetivamente.

Para os percursos correspondentes a ligações terrestres a expressão é simplificada, uma vez que não há variação significativa dos coeficientes de atenuação ao longo do percurso:

$$A_a = (\beta_0 + \beta_w)d$$

Para altitudes até 5km, as atenuações específicas do ar seco e do vapor de água podem ser estimados com uma precisão de 15% usando as expressões de recomendação P.676-3 da ITU-R.

Para frequências inferiores ou iguais a 57GHz:

$$\beta_0 = \left[ \frac{7.27r_t}{f^2 + 0.351r_p^2r_t^2} + \frac{7.5}{(f - 57)^2 + 2.44r_p^2r_t^5} + \right] f^2 r_p^2 r_t^2 * 10^{-3}$$

Para frequências superiores a 57GHz e inferiores a 63GHz (valor aproximado devido ao elevado número de linhas de absorção do oxigênio):

$$\beta_0 = \frac{(f - 60)(f - 63)}{18} * \beta_0(57) - 1.66 * r_p^2 r_t^{8.5} (f - 57)(f - 63) + \frac{(f - 57)(f - 60)}{18} * \beta_0(63)$$

Para frequências superiores ou iguais a 63GHz e inferiores a iguais a 350GHz:

$$\beta_0 = \left[ 2 * 10^{-4} * r_t^{1.5} (1 - 12 * 10^{-5} f^{1.5}) + \frac{4}{(f - 63)^2 + 1.5r_p^2 r_t^5} + \frac{0.28r_t^2}{(f - 118.75)^2 + 2.84r_p^2 r_t^2} \right]$$

Para frequências inferiores ou iguais a 350GHz:

$$\beta_{\omega} = \left[ 3.27 * 10^{-2} r_t + 1.67 * 10^{-3} \rho \frac{r_t^7}{r_p} + 7.7 * 10^{-4} f^{0.5} + \frac{3.5}{(f - 22.235)^2 + 9.81 r_p^{20} r_t} \right. \\ \left. + \frac{11.73 r_t}{(f - 183.31)^2 + 11.85 r_p^2 r_t} + \frac{4.01 r_t}{(f - 325.153)^2 + 10.44 r_p^2 r_t} \right] f^2 \rho r_p r_t \\ * 10^{-4}$$

## Variação da Atenuação Suplementar em função da frequência

A variação da atenuação devido aos gases atmosféricos em função da frequência para uma temperatura de 15C e uma concentração de vapor de água de 7.5g/m3 é dado por:

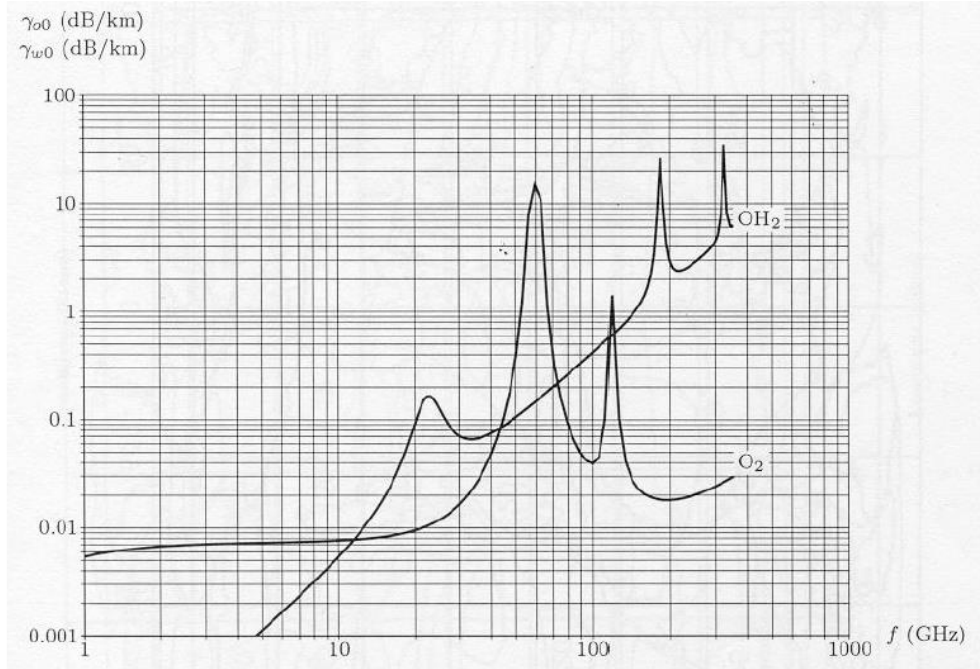


Figura 12-Atenuação em função da frequência

## Concentração de vapor de água $\rho$

A concentração de vapor a partir da humidade relativa  $H$  é definida como a relação, expressa em %, entre a pressão parcial do vapor de água no ar húmido  $e$  e a pressão parcial do vapor de água saturado a mesma pressão e temperatura  $e_s$ :

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

A pressão parcial do vapor de água saturado, em função da temperatura, é dada por:

$$e_s = 6.1121 \exp \left( \frac{17.502T}{240.97 + T} \right)$$

### 3.2. Atenuação suplementar provocada pela precipitação

A precipitação provoca absorção, dispersão e alteração na polarização das ondas radioelétricas. O coeficiente de atenuação por unidade de comprimento,  $\gamma_r$ , pode ser relacionado com a intensidade de precipitação  $R_i$  (expressa em mm/h) da seguinte forma:

$$\gamma_r = k R_i^\alpha$$

Sendo  $k$  e  $\alpha$  são funções que tem em conta a frequência, temperatura atmosférica e a formada gota.

Como conclusão, existem diferenças entre a atenuação para uma polarização vertical e horizontal. E com dadas características assumidas, como por exemplo, intensidade de precipitação inferiores a 50mm/h, com temperatura da chuva a 20°C e que a gota tem uma forma achatada, consegue-se em função da frequência calcular os vários  $k$  e  $\alpha$ :

| Frequência<br>(GHz) | $k_H$     | $k_V$     | $\alpha_H$ | $\alpha_V$ |
|---------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1                   | 0.0000387 | 0.0000352 | 0.912      | 0.880      |
| 2                   | 0.000154  | 0.000138  | 0.963      | 0.923      |
| 4                   | 0.000650  | 0.000591  | 1.121      | 1.075      |
| 6                   | 0.00175   | 0.00155   | 1.308      | 1.265      |
| 7                   | 0.00301   | 0.00265   | 1.332      | 1.312      |
| 8                   | 0.00454   | 0.00395   | 1.327      | 1.310      |
| 10                  | 0.0101    | 0.00887   | 1.276      | 1.264      |
| 12                  | 0.0188    | 0.0168    | 1.217      | 1.200      |
| 15                  | 0.0367    | 0.0335    | 1.154      | 1.128      |
| 20                  | 0.0751    | 0.0691    | 1.099      | 1.065      |
| 25                  | 0.124     | 0.113     | 1.061      | 1.030      |
| 30                  | 0.187     | 0.167     | 1.021      | 1.000      |
| 35                  | 0.263     | 0.233     | 0.979      | 0.963      |
| 40                  | 0.350     | 0.310     | 0.939      | 0.929      |
| 45                  | 0.442     | 0.393     | 0.903      | 0.897      |
| 50                  | 0.536     | 0.479     | 0.873      | 0.868      |
| 60                  | 0.707     | 0.642     | 0.826      | 0.824      |
| 70                  | 0.851     | 0.784     | 0.793      | 0.793      |
| 80                  | 0.975     | 0.906     | 0.769      | 0.769      |
| 90                  | 1.06      | 0.999     | 0.753      | 0.754      |
| 100                 | 1.12      | 1.06      | 0.743      | 0.744      |
| 120                 | 1.18      | 1.13      | 0.731      | 0.732      |
| 150                 | 1.31      | 1.27      | 0.710      | 0.711      |
| 200                 | 1.45      | 1.42      | 0.689      | 0.690      |
| 300                 | 1.36      | 1.35      | 0.688      | 0.689      |
| 400                 | 1.32      | 1.31      | 0.683      | 0.684      |

Figura 13-Tabela dos valores  $k$  e  $\alpha$

No entanto, também dá para calcular para frequências que não estejam presentes na tabela, usando-se as expressões abaixo:

$$\log k_1 + \frac{\log k_2 - \log k_1}{\log f_2 - \log f_1} (\log f - \log f_1)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\log f - \log f_1}$$

| Intensidade de precipitação<br>(mm/h) |        | Percentagem do tempo, no ano,<br>em que o valor da intensidade<br>de precipitação é excedido |
|---------------------------------------|--------|--|
| Zona H                                | Zona K |  |
| 2                                     | 1.5    | 1  |
| 4                                     | 4.2    | 0.3  |
| 10                                    | 12     | 0.1  |
| 18                                    | 23     | 0.03   |
| 32                                    | 42     | 0.01   |
| 55                                    | 70     | 0.003  |
| 83                                    | 100    | 0.001  |

**Figura 14-Intensidade de precipitação e percentagem do tempo que é excedida**

Estes valores existem para se conseguir ter a intensidade de precipitação num local em que não exista ao dispor valores médios de intensidade de precipitação durante um curto período. Na tabela acima, são representadas diferentes regiões/climas de Portugal: Zona H temos Minho, Trás-os-Montes e Beira-Alta e na zona K corresponde aos restantes territórios portugueses.

### 3.3. Cálculo da atenuação provocado pela à chuva

Seguindo o método P.530-7 da ITU-R, para calcular a atenuação da chuva,  $A_r(p)$ , não excedida por p% do tempo, anualmente numa ligação por feixes hertezianos, em que se considera o comprimento entre estações d(Km) com uma dada frequência (GHz) e a polarização estabelecida, usa-se a seguinte expressão:

$$A_r^{(r)} = A_r^{(0.01)} * 0.12p^{-(0.546+0.043 \log p)}$$

Primeiro observam-se os valores de atenuação referentes à percentagem do tempo,  $p_m$ , no mês mais desfavorável, para que haja sempre uma margem para atenuações mais graves, usando a relação  $1.9 * 10^{-4} < p_m < 7.8$ :

$$p = 0.3 * p_m^{1.15}$$

Em segundo lugar, calcula-se a atenuação devido à chuva não excedida mais de 0.01% do tempo, multiplicando a atenuação por unidade de comprimento,  $\gamma_r$ , e pelo comprimento eficaz,  $d_{ef}$ , como estamos a ver pela seguinte formula:

$$A_r(0.01) = \gamma_r * d_{ef}$$

Como no ponto anterior já se explicou como calcular o coeficiente para intensidade de precipitação, neste caso falta a  $d_{ef}$ :

$$d_{ef} = \frac{d}{1 + \frac{d}{35 \exp(-0.015 Ri_{0.01})}}$$

Tendo em conta que  $Ri_{0.01}$ , intensidade de precipitação ultrapassada durante 0.01% de tempo, é visto através de valores meteorológicos ou recorrendo à segunda tabela do tópico anterior.

Tendo realizado estes sub cálculos conseguimos então obter a atenuação provocada pela chuva.

### 3.4. Efeitos Refrativos

Para além das atenuações acima referidas, a atmosfera pode provocar alterações na direção de propagação, provocadas pelas variações do índice de refração ao longo do percurso,  $n$ .

Para as frequências habituais, de acordo com a recomendação P.453-6 da ITU-R, o índice de refração é dado por:

$$n = 1 + N * 10^{-6}$$

Em que  $N$ :

$$N = \frac{77.6}{T} \left( p + \frac{4810e}{T} \right)$$

A pressão parcial do vapor de água  $e$  é calculada para temperatura a partir da humidade relativa e da pressão parcial do vapor de água saturada.

De forma a avaliar as alterações que a variação do índice de refração pode provocar nos raios emitidos da ligação, calcula-se o raio da curvatura do raio ótico:

$$\rho = - \frac{n}{\frac{d_n}{d_h} \sin \Phi}$$

Outro procedimento também utilizado nos efeitos refrativos é o conceito de raio equivalente da Terra que pode ser descrito da seguinte forma:

A trajetória curva de um raio numa atmosfera com estratificação esférica em que  $\frac{d_n}{d_h}$  é constante sobre a Terra de raio  $r_0$ , é equivalente a ter uma trajetória retilínea sobre uma Terra equivalente de raio  $r_e$ . Em que  $r_e = Kr_0$  pelo que K é dado por:

$$K = \frac{1}{1 + \frac{r_0}{n_0} \frac{d_n}{d_h}}$$

De forma a simplificar o projeto de feixes hertzianos, mantém-se o percurso retilíneo e alteramos a curvatura da Terra substituindo o seu raio físico pelo raio equivalente através da expressão acima apresentada.

Conseguimos também através dos valores em cima calculados, valor K e variação do coeficiente de refração, classificar vários tipos de atmosfera:

**Atmosfera Standard:** Com  $k = \frac{4}{3}$  e  $\frac{d_n}{d_h} = 0$

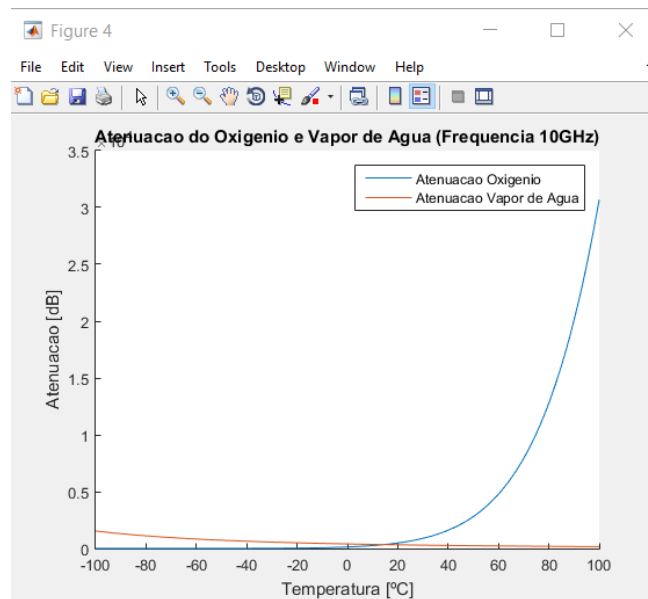
**Atmosfera Sub-Standard:** Com  $0 < k < \frac{4}{3}$  e  $\frac{d_n}{d_h} > 0$

**Atmosfera Super-Standard:** Com  $k > \frac{4}{3}$  e  $157 < \frac{d_n}{d_h} < 0$

**Super-Refrativa:** Com  $k < 0$  e  $\frac{d_n}{d_h} < -157$

### 3.5. Representação da atenuação provocada pelo vapor de água e pelo oxigénio presente na atmosfera

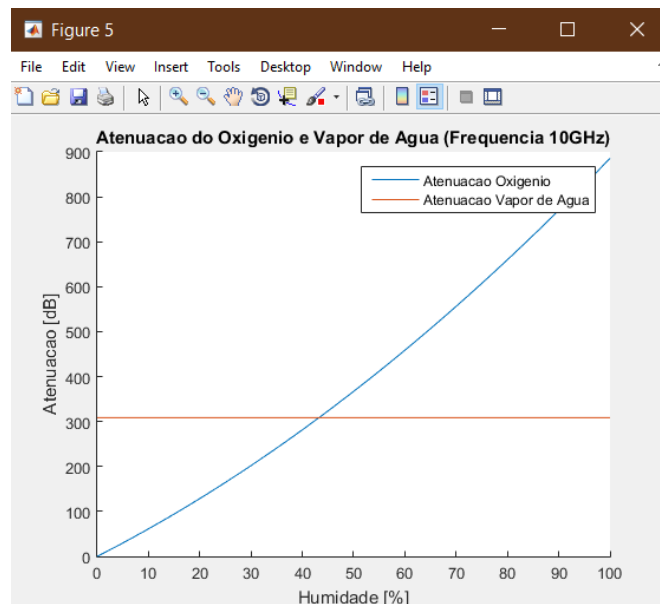
Primeiro, é simulada a atenuação provocada pelo vapor de água e pelo oxigénio presente na atmosfera em função da temperatura ( $T(^{\circ}\text{C})$ ). Ao observar a figura seguinte é possível verificar que a atenuação provocada pelo vapor de água, a partir dos 20º aumenta exponencialmente enquanto que a atenuação provocada pelo oxigénio à medida que a temperatura aumenta, diminui ligeiramente.



**Figura 15-Atenuação oxigênio e vapor de água em função da temperatura**

De seguida, é simulada a atenuação provocada pelo vapor de água e pelo oxigénio presente na atmosfera em função da humidade relativa. Observando a figura seguinte é possível concluir que a atenuação provocada pelo oxigénio é constante uma vez que não depende da humidade relativa. Estes valores eram esperados.

Em relação à atenuação provocada pelo vapor de água, esta tem um comportamento linear à medida que a humidade relativa aumenta.



**Figura 16-Atenuação oxigênio e vapor de água em função da humidade**

### 3.6. Representação da atenuação provocada pela chuva

De modo a estudar a atenuação provocada pela chuva é realizada uma simulação da atenuação provocada por esta, não excedida numa determinada percentagem de tempo, relativamente a uma média anual ou ao pior mês, numa determinada zona climática.

Na figura que se segue é possível verificar que, como espectável, o pior mês possui uma atenuação mais elevada que a média anual, tornando assim uma ligação mais fiável ao dimensioná-la, e colocá-la em funcionamento tendo por base os valores do pior mês.

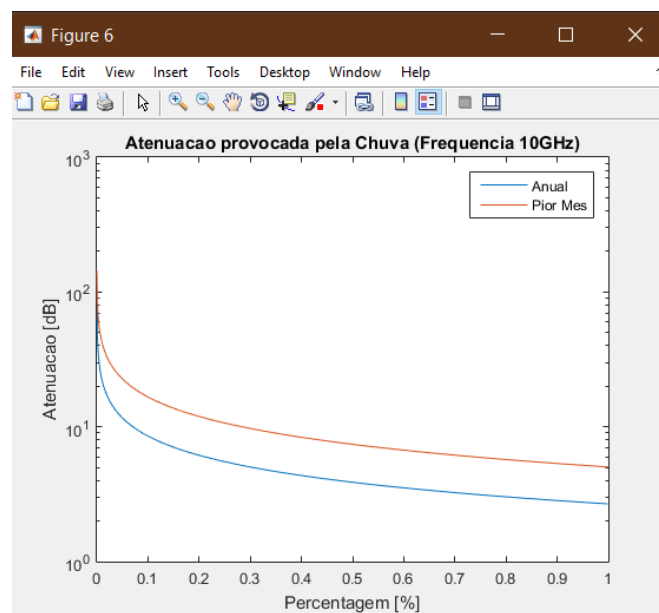


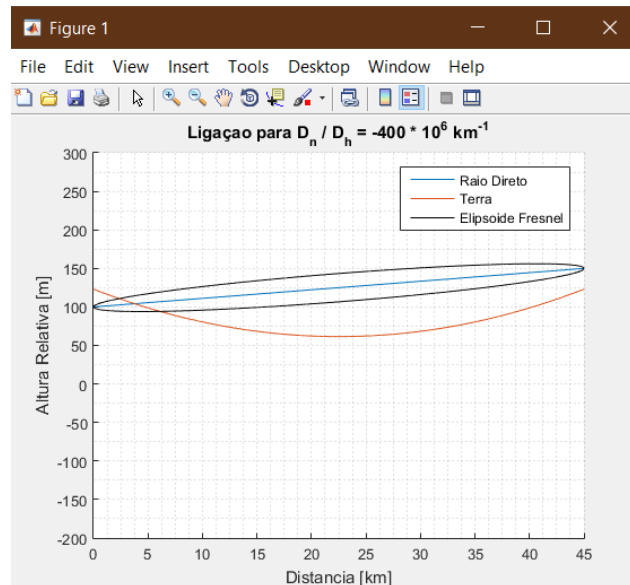
Figura 17-Atenuação provocada pela chuva média anual e pior mês



### 3.7. Representação do perfil da ligação em sistema Europeu

Nesta subsecção efetuou-se a representação do perfil de ligação em Sistema Europeu para os seguintes valores de  $\frac{dn}{dh}$ :

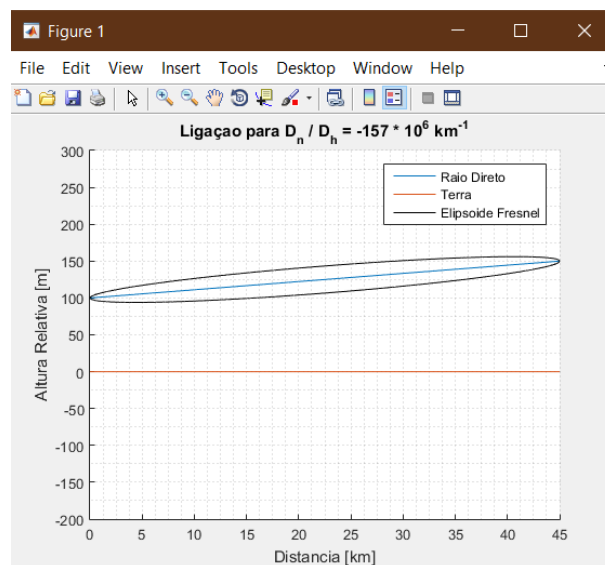
- $\frac{dn}{dh} = -400 \times 10^{-6}$ :



**Figura 18-Perfil de ligação, em Sistema Europeu com  $\frac{dn}{dh} = -400 \times 10^{-6}$**

Com a observação da figura anterior, o fator K, para a variação de coeficiente de refração referida, é negativo. Tal é comprovado na figura, pois o raio possui a concavidade voltada para cima, tendo, deste modo as características de uma Atmosfera Super - Refrativa.

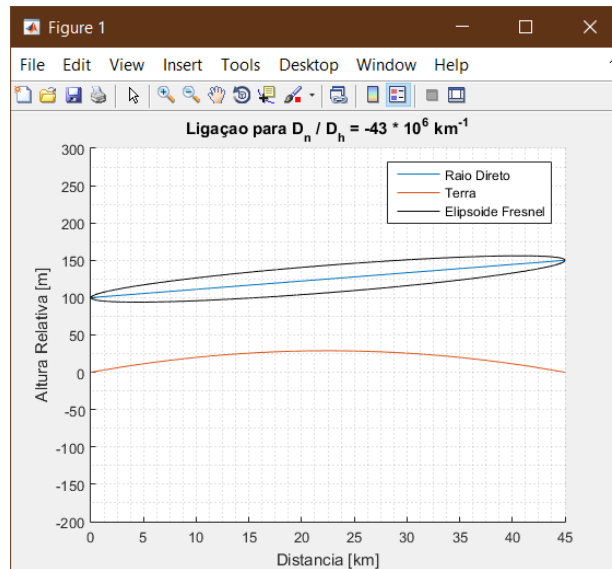
- $\frac{dn}{dh} = -157 \times 10^{-6}$ :



**Figura 19-Perfil de ligação em Sistema Europeu com  $\frac{dn}{dh} = -157 \times 10^{-6}$**

No perfil de ligação acima representado, é possível concluir que devido ao valor da variação do coeficiente de refração,  $K$  infinito, o raio equivalente da Terra é infinito, ou seja, está-se perante a situação de Terra Plana.

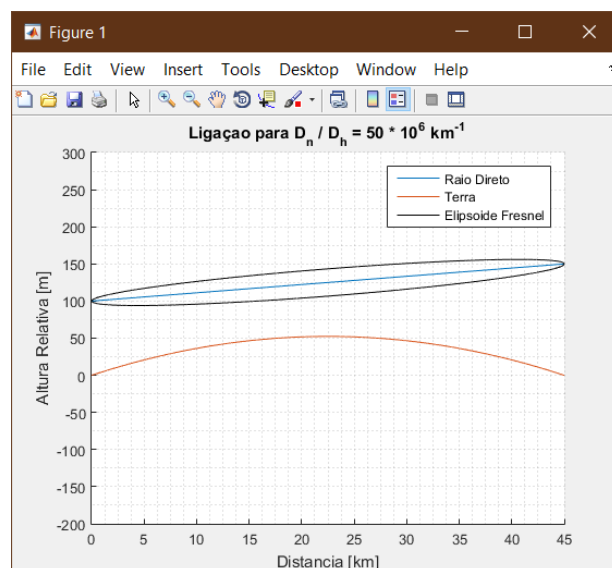
- $\frac{dn}{dh} = -43 \times 10^{-6}$ :



**Figura 20-Perfil de ligação Sistema Europeu com  $\frac{dn}{dh} = -43 \times 10^{-6}$**

Observando o perfil de ligação da figura anterior é possível observar que  $K$  tem como valor  $\frac{4}{3}$ , ou seja, a atmosfera que descreve este perfil é a *Standard*, em que o raio equivalente da Terra é de aproximadamente 8500km.

- $\frac{dn}{dh} = 50 \times 10^{-6}$ :



**Figura 21-Perfil de ligação Sistema Europeu com  $\frac{dn}{dh} = 50 \times 10^{-6}$**

Com a observação do perfil de ligação da figura anterior é possível concluir que como a variação do coeficiente de refração é superior a 0, o raio equivalente da Terra apresenta-se com a concavidade voltada para baixo, sendo deste modo, uma situação de Atmosfera Super – Standard, o valor de K é superior a 0.

### 3.8. Cálculo do raio de curvatura do raio direto

Com uma variação de coeficiente de refração de  $\frac{dn}{dh} = -400 \times 10^{-6}[km^{-1}]$  a  $\frac{dn}{dh} = 100 \times 10^{-6}[km^{-1}]$ :

No gráfico seguinte é possível observar que para os valores de variação de coeficiente positivos a azul são os valores em que os raios assumem a concavidade voltada para cima, ou seja, os seus valores de K são maiores que 4/3 (situação de atmosfera Super-Standard). Os raios a preto representam a situação de atmosfera Sub-Standard em que os raios possuem concavidade voltada para baixo, no entanto com K entre 0 e 4/3 ou seja o raio equivalente é maior que o raio da terra. Por fim os raios que se encontram mais abaixo no gráfico representam a situação de atmosfera Super-Refrativa em que o raio equivalente é menor que o raio da terra e em que o fator K é menor que 0.

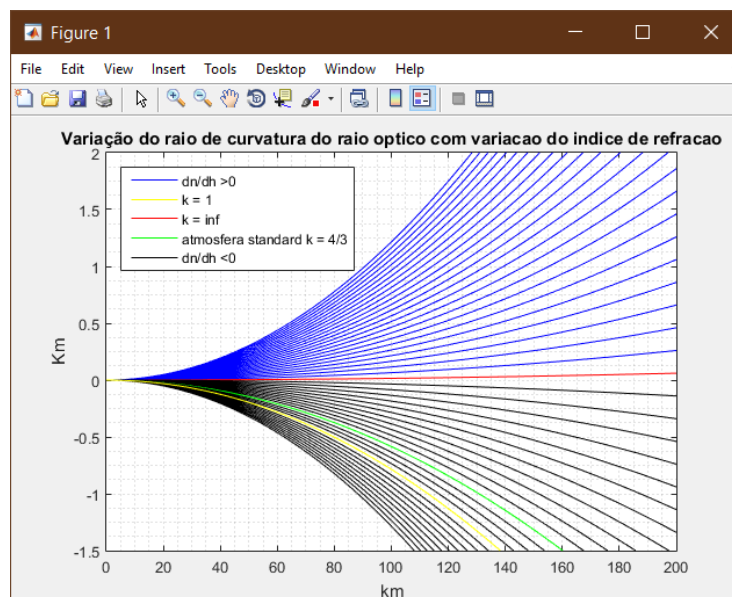


Figura 22-Variacao do raio de curvatura do raio ótico

## 4. Propagação por Difração em Terra Esférica e Dispersão Troposférica

### 4.1. Difração por obstáculos

Quando se considera a propagação de radiação entre dois obstáculos tem de se ter em consideração a influencia da esfericidade da Terra que pode adicionar difração ao percurso. O efeito de difração leva à introdução de atenuação entre dois terminais. Ao desenhar ou projetar a ligação, é necessário garantir que o primeiro elipsoide de Fresnel não se encontra obstruído de forma a maximizar a potencia recebida minimizando a atenuação introduzida.

A esfericidade da Terra vai limitar a distância máxima de propagação em espaço livre do feixe hertziano. Esta distância ( $d_m$ ) calcula-se como a maior distancia para a qual ainda se verifica propagação entre as antenas.

Uma forma de fazer esta estimativa de distância, passa por obter o valor do raio do primeiro elipsoide de Fresnel, através da estimativa anterior e da frequência de trabalho. De seguida, subtraindo à altura das antenas o raio anteriormente encontrado, pode estimar-se a nova distancia máxima à qual ainda se verifica propagação entre as antenas:

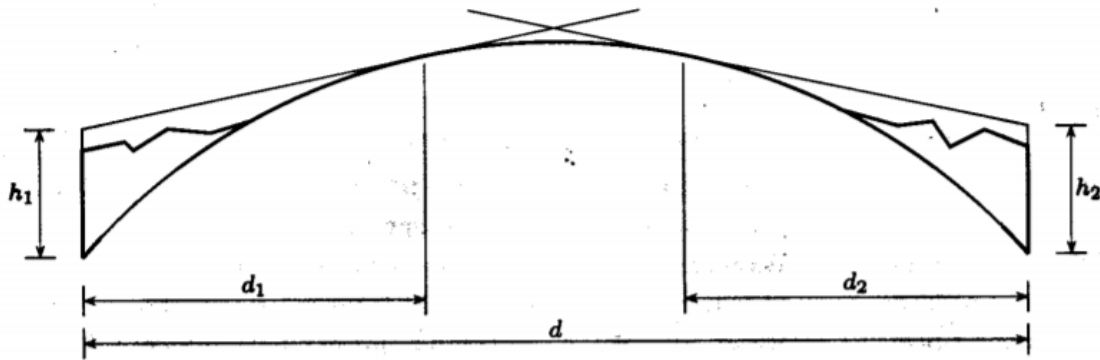
$$d_m = \sqrt{2rh_E} + \sqrt{2rh_R}$$

**Equação 16 – Distancia máxima de ligação**

$$r_{1m} = \sqrt{\frac{\lambda d}{4}} = \sqrt{\frac{c}{f} \frac{d}{4}}$$

**Equação 17 – Raio máximo do primeiro Elipsoide de Fresnel**

$$\left. \begin{array}{l} h'_e = h_E - r_{1m} \\ h'_r = h_R - r_{1m} \end{array} \right\} d_m = \sqrt{2rh'_e} + \sqrt{2rh'_r}$$



**Figura 23-Perfil de ligação com influência da esfericidade**

A atenuação entre os dois terminais irá ser dada pela soma da atenuação em espaço livre, com a atenuação atmosférica e com a atenuação por difração, segundo a seguinte expressão:

$$A_{d[dB]} = -[F(X) + G(Y_1) + G(Y_2)]$$

**Equação 18 – Atenuação entre dois terminais**

Em que X é o comprimento normalizado do percurso e Y1 e Y2 as alturas normalizadas das antenas, estas grandezas são expressas por:

$$X = \beta d \left( \frac{\pi}{\lambda r^2} \right)^{1/3}$$

**Equação 19 – Comprimento normalizado do percurso**

$$Y_1 = 2\beta h_1 \left( \frac{\pi^2}{\lambda^2 r} \right)^{1/3}$$

**Equação 20 – Altura da primeira antena normalizada**

$$Y_2 = 2\beta h_2 \left( \frac{\pi^2}{\lambda^2 r} \right)^{1/3}$$

**Equação 21 – Altura da segunda antena normalizada**

O parâmetro  $\beta$  traduz a natureza do solo e a polarização do mesmo, pode ser relacionado com a admitância generalizada da superfície (K) da seguinte forma:

$$\beta = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,75K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,35K^4}$$

**Equação 22 – Natureza ou polarização do solo**

Os valores de K estão dependentes da polarização (horizontal ou vertical) e são dados por:

$$K_H = \left( \frac{2\pi r}{\lambda} \right)^{-1/3} [(e-1)^2 + (60\lambda\sigma)^2]^{-1/4}$$

**Equação 23 – Admitância com polarização horizontal**

$$K_V = K_H \sqrt{e^2 + (60\lambda\sigma)^2}$$

**Equação 24 – Admitância com polarização vertical**

Por fim interessa saber que as funções F(X) e G(Y) são dadas por:

$$F(X) = 11 + 10 \log_{10}(X) - 17,6X$$

**Equação 25 – Equação F(X)**

$$G(Y) = 17,6\sqrt{Y-1,1} - 5 \log_{10}(Y-1,1) - 8$$

**Equação 26 – Equação G(Y)**

Para  $Y \geq 2$ .

Existem restrições ao nível da altura normalizada das antenas, no caso deste valor ser inferior a 2, então a função G(Y) tem em conta a admitância generalizada da superfície (K), que na generalidade dos casos é considerada a atmosfera *Standard*  $\frac{4}{3}$ :

$$G(Y) \approx \begin{cases} 20 \log_{10}(Y + 0.1Y^3) & \text{para } 10K < Y < 2 \\ 2 + 20 \log_{10} K + 9 \log_{10}\left(\frac{Y}{K}\right) [\log_{10}\left(\frac{Y}{K}\right) + 1] & \text{para } K/10 < Y < 10K \\ 2 + 20 \log_{10} K & \text{para } Y < K/10 \end{cases}$$

À medida que a distância entre as antenas aumenta o efeito da difração sobre a Terra Esférica vai sendo atenuado para dar lugar ao fenómeno de dispersão troposférica.

## 4.2. Dispersão troposférica

A dispersão troposférica acontece quando existem ligações de distância muito elevada. Neste tipo de ligação passa a ser essencial conhecer a influencia que a atmosfera do terreno para a dispersão. Existem 8 tipos de climas diferentes que são:

- Tipo 1 – Equatorial;
- Tipo 2 – Continental Subtropical;
- Tipo 3 – Marítimo Subtropical;
- Tipo 4 – Desértico;
- Tipo 5 – Mediterrâneo
- Tipo 6 – Temperado Continental;
- Tipo 7a – Temperado Marítimo (em Terra);
- Tipo 7b – Temperado Marítimo (sobre o Mar);
- Tipo 8 – Polar.

Apos efetuar a escolha sobre o tipo de clima do local onde a ligação ira ser feita é necessário consultar a tabela dos parâmetros meteorológicos e da estrutura atmosférica para os diferentes climas, esses valores são dados por M e  $\gamma$  respetivamente.

| Clima             | 1     | 2     | 3     | 4     | 6     | 7a    | 7b    |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M (dB)            | 39.60 | 29.73 | 19.30 | 38.50 | 29.73 | 33.20 | 26.60 |
| $\gamma(km^{-1})$ | 0.33  | 0.27  | 0.32  | 0.27  | 0.27  | 0.27  | 0.27  |

**Tabela 3 – Parâmetros meteorológicos e da estrutura atmosférica para os diferentes**

Existem também dois fatores que temos de ter em conta de forma a projetar uma ligação eficiente que são, o ganho das antenas envolvidas e a altura das mesmas. Em propagação troposférica o ganho das antenas é inferior à soma dos ganhos de cada uma e é calculado da seguinte maneira:

$$G(p) = G_E + G_R - L_e$$

**Equação 27 – Ganho resultante das antenas de emissão e receção**

$$L_e = 0,07e^{0,055(G_E+G_R)}$$

**Equação 28 – Propagação troposférica**

A altitude onde se encontra a base do volume comum é dada por:

$$N(H, h) = 20 \log_{10}(5 + \gamma H) + 4,34\gamma h$$

**Equação 29 – Altitude da base do volume comum**

$$H = \frac{\theta d}{4 \times 10^3}$$

$$h = \frac{\theta^2 r}{8 \times 10^6}$$

Finalmente tem-se que a atenuação média horária [dB] por dispersão troposférica é dada por:

$$A(50) = 30 \log_{10} f + 10 \log_{10} d + 30 \log_{10} \theta + M + N(H, h) + G_p$$

**Equação 29 – Mediana da atenuação média horária, entre antenas isotrópicas**



## 5. Propagação por Difração devido ao Terreno

A dispersão ocorre quando, na propagação ao longo de um determinado percurso, as ondas eletromagnéticas intersejam determinados obstáculos. Dois dos fatores da influência da propagação são a esfericidade da Terra, enunciado na secção anterior, e também os materiais do terreno. Para ser possível calcular a atenuação aproximaram-se os obstáculos reais do terreno por dois tipos de obstáculos:

**Obstáculos em lâmina:** Têm comprimento ilimitado, espessura desprezável e são orientados segundo a direção de propagação;

**Obstáculos em cilíndricos:** Tem topos arredondados com curvatura constante;

### 5.1. Método de Deygout

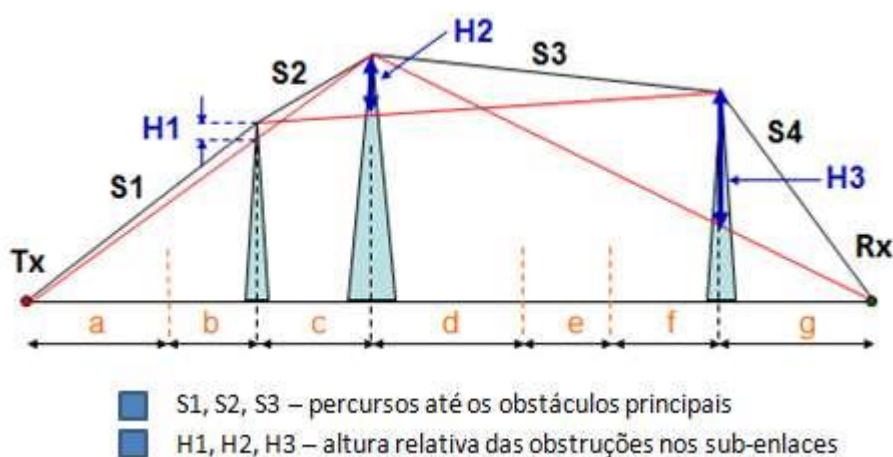


Figura 24-Metodo de Deygout

Este método consiste na identificação de um obstáculo como sendo o obstáculo principal e como tal, começa por calcular-se o valor do parâmetro  $v$ . Este parâmetro relaciona as alturas das antenas com as distâncias de ligação ao obstáculo:

$$v = \pm h \sqrt{\frac{2d}{\lambda d_1 d_2}}$$

Posto isto, o obstáculo principal vai ser aquele para o qual foi obtido um maior valor do parâmetro  $v$ . Quando um obstáculo está muito próximo de uma das antenas, ou seja, quando a distância  $a+b$  muito pequena esse obstáculo terá um maior  $v$ . A Figura acima ilustra a aplicação do método. Seguidamente deve calcular-se a atenuação devida a um obstáculo em lâmina:

$$A_{ot}(v) = 6.9 + 20 \log_{10} \left( \sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right)$$

Finalmente, deve verificar-se se a semi-ligação cumpre o requisito de desobstrução do primeiro Elipsoide de Fresnel. Caso não cumpra devem repetir-se os passos anteriores e deve medir-se a altura do obstáculo que se encontrar “acima” ou “abaixo” do raio direto entre a antena e o mesmo. A nova distância de ligação a considerar deve ligar o último obstáculo tratado à antena de receção e a atenuação vai ser igual a soma das atenuações multipercurso.

## 6. Conclusões

Este trabalho permitiu perceber como é dimensionado um projeto de ligação por feixes hertzianos, após resolução deste trabalho, conseguimos perceber que o processo é complexo devido aos vários parâmetros existentes na Terra que influencia a propagação ao longo de uma ligação.

Em primeiro lugar foi abordado o modelo de Terra plana, onde se concluiu que a sua aplicação é relativamente simples devido a este modelo não ter em conta grande parte dos fatores que influenciam a ligação como é o caso dos gases atmosféricos, perfil do terreno ou até mesmo curvatura da Terra. Este tipo de modelo só é possível ser aplicado quando a diferença de fase entre o raio direto e refletido, para terra esférica e terra plana é relativamente pequena.

De seguida, tomou-se em consideração a influencia da atmosfera, onde é possível observar que esta tem um valor de atenuação considerável na ligação. Neste tipo de modelo, é considerada a atenuação provocada pelos gases atmosféricos e pelos hidrometeoritos. Conclui-se e também que estas atenuações dependem da zona do planeta onde se vai implementar a ligação. Ainda em relação à atmosfera, conclui-se que esta pode ser vista como um meio refrativo pois pode influenciar a curvatura dos raios emitidos, como tal, e necessário um ajuste no que toca ao projeto do raio real da terra para um raio imaginário, calculado com base no tipo de atmosfera presente na zona de implementação. Podemos concluir ainda que, a difração devido a esfericidade da terra pode ser um problema quando esta obstrui os raios diretos especialmente para ligações a grandes distâncias.

Assim sendo, a solução para este problema, passa pelo fenómeno de dispersão troposférica. Este método consiste em percorrer longas distâncias, ao fazer o sinal dispersar-se pelas partículas existentes na atmosfera, deste modo o sinal chega com uma potência mais estável ao recetor.

Finalmente, quando a ligação se encontra obstruída por obstáculos, a propagação dos feixes só é possível através de difração sobre o próprio obstáculo, contudo, este fenómeno ainda influencia a ligação introduzindo atenuações consideráveis que, em muitos casos, impossibilita a conclusão da ligação, tendo esta de ser repartida em várias ligações por forma a contornar os obstáculos existentes.

## **7. Bibliografia**

- VIEIRA, Pedro – Slides Rádio Comunicações - 2013