

## Propagação atmosférica

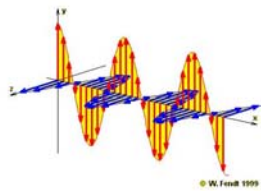


### 1 – Aspectos preliminares 1.1 – Introdução

A comunicação rádio é devida à propagação de ondas electromagnéticas no espaço.

No vazio, estas ondas deslocam-se à velocidade da luz

Possuem campos eléctrico e magnético, ortogonais entre si e ortogonais à direcção de propagação.



## Propagação atmosférica

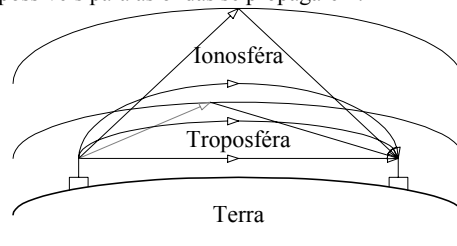


### 1.2 - Tipos de propagação atmosférica

Existem três grandes tipos de propagação, dependendo do trajecto das ondas:

- (1) - troposférica;
- (2) - ionosférica;
- (3) - à superfície da Terra (não é propriamente propagação atmosférica).

Os três caminhos possíveis para as ondas se propagarem:



## Propagação atmosférica



### 2 – Propagação troposférica 2.1 – Mecanismos de propagação troposférica

Assenta em quatro mecanismos:

- (1) - propagação em linha de vista;
- (2) - propagação por difracção;
- (3) - propagação por reflexão;
- (4) - propagação por dispersão.

#### 2.1.1 Propagação troposférica em linha de vista

É o tipo mais utilizado em propagação troposférica.

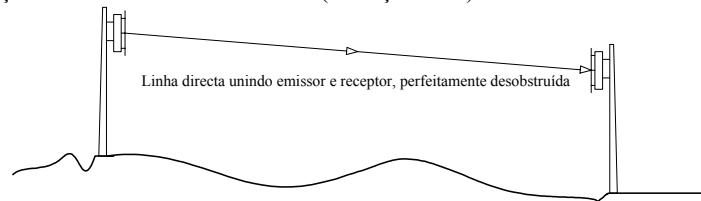
Não existem obstáculos na linha directa que une o emissor e o receptor.

A linha directa unindo o emissor e o receptor designa-se linha de vista, e sempre que essa condição está presente, está-se perante a condição LOS (*line of sight* do Inglês).

## Propagação atmosférica



Ilustração do conceito de linha de vista (condição LOS):



Os efeitos refractivos da atmosfera não são de desprezar.

Permitem que a comunicação seja possível, mesmo para terminais para lá do horizonte.

Existe a definição de limite óptico à custa do limite geométrico de visibilidade provocado pelo horizonte e a definição do limite de rádio.

## Propagação atmosférica



Ilustração dos conceitos de limite óptico e de rádio:



O encurvamento do percurso de propagação é devido à variação do índice de refração com a altitude, cuja tendência é a diminuição progressiva do índice.

## Propagação atmosférica



Uma onda electromagnética incide com ângulo  $\theta_1$  na fronteira entre dois meios com índices de refração distintos  $n_1$  e  $n_2$ .

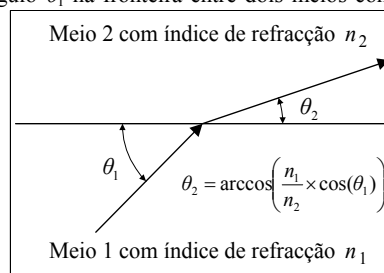
A Lei de Snell diz que:

$$n_1 \cos(\theta_1) = n_2 \cos(\theta_2)$$

o ângulo  $\theta_2$  é portanto

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{n_1}{n_2} \times \cos(\theta_1)\right)$$

Se  $n_1 > n_2$  tem-se  $\cos(\theta_1) < \cos(\theta_2)$ , logo  $\theta_1 < \theta_2$ .



Para não haver transmissão para o 2º meio, o ângulo crítico  $\theta_2$  é:

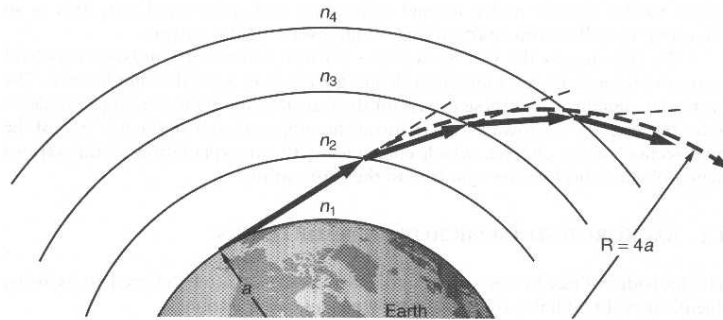
$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

## Propagação atmosférica



Ilustração do encurvamento progressivo e contínuo do percurso de uma onda.

Aproxima-se pela estruturação da troposfera em cascas sucessivas que dão conta da ilusão do encurvamento progressivamente contínuo.



Filipe Santos Moreira - Ondas (2EE)

7

## Propagação atmosférica por difracção



### 1 – Introdução 1.1 – Atenuação suplementar

Quando a linha de vista está total/parcialmente bloqueada, a atenuação  $l$  é tal que

$$p_R = l \cdot p_T = l_F \cdot l_D \cdot p_T \rightarrow l = l_F \cdot l_D, \text{ com } l_F, l_D < 1$$

em que

- (1) -  $l_F$  é a atenuação em espaço livre, sem obstáculos;
- (2) -  $l_D$  é a atenuação suplementar devida às obstruções.

Em dB's tem-se

$$L = L_F + L_D$$

$L_F$  é fácil de obter  $\rightarrow$  resta obter  $L_D$ .

Filipe Santos Moreira - Ondas (2EE)

8

## Propagação atmosférica por difracção



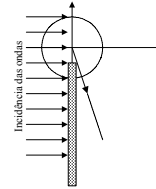
### 1.2 – Princípio de Huygens

Baseado na existência de fontes secundárias de radiação - *wavlets*.

A sua intensidade de radiação é  $\propto [1+\cos(\alpha)]$ .

- (1) - radiação máxima para a frente  $\rightarrow \alpha=0$ .
- (2) - radiação nula para trás  $\rightarrow \alpha=\pi$

Explica o contornamento dos obstáculos (recepção em zonas de sombra).



## Propagação atmosférica por difracção



### 2 – Zonas e elipsóides de Fresnel 2.1 – Geometria das zonas de Fresnel

O espaçamento das antenas é  $d=\rho_0+r_0$ .

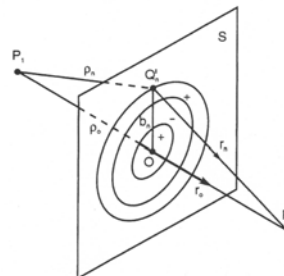
A  $n$ -ésima ( $n \geq 0$ ) zona de Fresnel obedece a  $\rho_n+r_n=\rho_0+r_0+n.\lambda/2 \rightarrow \rho_n+r_n=d+n.\lambda/2$

A altura  $b_n$  dada por

$$b_n^2 = \rho_n^2 - \rho_0^2$$

é então

$$b_n = \sqrt{n\lambda \frac{\rho_0 r_0}{\rho_0 + r_0}}, \quad n \geq 0 \text{ e inteiro.}$$



## Propagação atmosférica por difracção



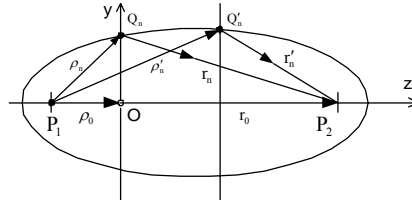
### 2.2 – Geometria dos elipsóides e Fresnel

As antenas estão posicionadas nos focos do  $n$ -ésimo elipsóide.

A distância entre as antenas é  $d$ .

O percurso entre as antenas  $d_{TR}$  é

$$\begin{aligned} d_{TR} &= \rho_n + r_n = \\ &= \rho'_n + r'_n = \\ &= \rho_0 + r_0 + \Delta \end{aligned}$$



O  $n$ -ésimo elipsóide de Fresnel é aquele, em que o excesso do percurso  $d_{TR}$  relativamente ao afastamento  $d$  é  $\Delta = n \cdot \lambda / 2$ .

Em termos práticos, se o 1º elipsóide de Fresnel estiver desobstruído, o percurso directo está em linha de vista  $\rightarrow$  procede-se como no espaço livre.

## Propagação atmosférica por difracção

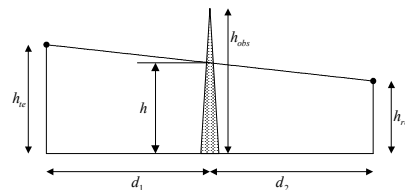


### 2.3 – O parâmetro $\nu$ de Fresnel-Kirchhoff

O grau de obstrução do 1º elipsóide de Fresnel determina qual a atenuação suplementar  $l_D$  ( $L_D$  em dB's).

Este parâmetro adimensional é

$$\nu = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \times \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}}, \quad d_1 = \rho_0, \quad d_2 = r_0 \text{ e } h = b_n.$$



O ponto onde o 1º elipsóide toca o chão tem afastamento  $R_b$  do emissor, é dado por

$$R_b = \frac{1}{\lambda} \left\{ \left[ (h_{te} + h_{re})^2 - (h_{te} - h_{re})^2 \right]^2 - \left[ (h_{te} - h_{re})^2 + (h_{te} + h_{re})^2 \right] \times \frac{\lambda^2}{2} + \left( \frac{\lambda}{4} \right)^4 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Ou simplesmente ( $d \gg \lambda$ ) por  $R_b = 4h_{te} \cdot h_{re} / \lambda$

## Propagação atmosférica por difracção



### 3 – Cálculo da atenuação suplementar $L_D$ 3.1 – Os integrais de Fresnel

Um integral de Fresnel é dado genericamente por

$$I_F(0, \nu) = \int_0^\nu e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt$$

Que desenvolvido é

$$I_F(0, \nu) = \int_0^\nu e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt = \int_0^\nu \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt - j \int_0^\nu \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

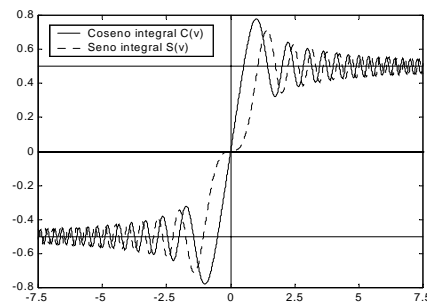
Definindo a função coseno integral  $C(\nu)$  e a função seno integral  $S(\nu)$ :

O integral de Fresnel é  $I_F(0, \nu) = C(\nu) - jS(\nu)$

## Propagação atmosférica por difracção



A figura seguinte ilustra o comportamento das funções  $C(\nu)$  e  $S(\nu)$ .



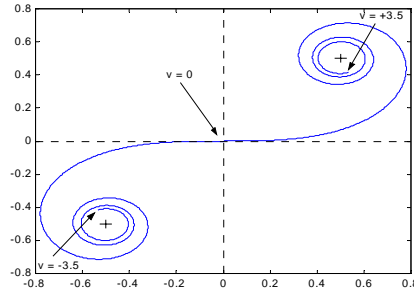
Note-se que:

- (1) - Ambas são nulas na origem
- (2) - Ambas tendem para  $\pm 1/2$ .



## Propagação atmosférica por difracção

A figura seguinte ilustra a Espiral de Cornu, desenhada em função do parâmetro  $v$ .



Note-se que a Espiral de Cornu:

- (1) - passa pelo ponto  $(0,0)$  para  $v=0$ ;
- (2) - converge para os pontos  $(-1/2, +1/2)$  quando  $v \rightarrow \pm\infty$ .



## Propagação atmosférica por difracção

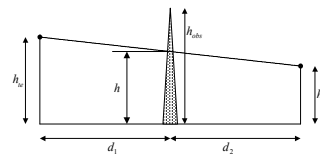
### 3.2 – Cálculo da atenuação suplementar para um obstáculo em lâmina

A atenuação  $l_D$  é dada por

$$l_D = 20 \log(E_D/E_F)$$

$E_D$  é o campo difractado

$E_F$  é o campo recebido em espaço livre.



Esse capo é tal que 
$$\frac{E_D}{E_F} = \frac{1}{2} \left| 1 - (1+j) \int_0^v e^{-j\frac{\pi}{2}y^2} dy \right| = \left| \frac{1+j}{2} \int_v^{+\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}y^2} dy \right| = \frac{\sqrt{2}}{2} \left| \int_v^{+\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}y^2} dy \right|$$

Ou simplesmente 
$$\frac{E_D}{E_F} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left| \left( C(v) - \frac{1}{2} \right) - j \left( S(v) - \frac{1}{2} \right) \right|$$

É dada de forma simplificada em dB's por 
$$L_D = \begin{cases} 0 & , v \leq -0.8 \\ 20 \log(0.5 - 0.62v) & , -0.8 < v \leq 0 \\ 20 \log[0.5 \exp(-0.95v)] & , 0 < v \leq 1 \\ 20 \log[0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}] & , 1 < v \leq 2.4 \\ 20 \log(0.225/v) & , v > 2.4 \end{cases}$$

O valor  $v=-0.8$  garante que 56% do volume do 1º elipsóide está desobstruído.

## Propagação atmosférica por difracção



### 3.3 – Atenuação suplementar em obstáculos com o topo arredondado

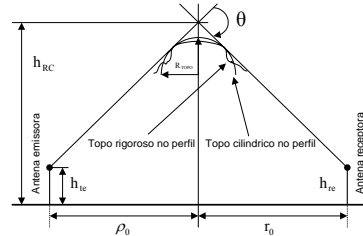
A atenuação (dB) neste tipo de obstáculos é

$$L_D = L_{ke} + L_{ex}$$

Onde:

- (1) -  $L_{ke}$  é a atenuação suplementar para um obstáculo em lâmina;
- (2) -  $L_{ex}$  é um valor adicional para este tipo de obstáculo

$$L_{ex} = (8.2 + 12n)m^{0.73 + 0.27[1 - \exp(-1.43n)]}$$



Os parâmetros  $m$ ,  $n$  são

- (1) -  $m = R_{topo} \times \frac{[\rho_0^2 + (h_{re} - h_{te})^2]^{\frac{1}{2}} + [r_0^2 + (h_{re} - h_{te})^2]^{\frac{1}{2}}}{[\rho_0^2 + (h_{re} - h_{te})^2]^{\frac{1}{2}} \times [r_0^2 + (h_{re} - h_{te})^2]^{\frac{1}{2}}} \times \left( \frac{\pi R_{topo}}{\lambda} \right)^{-\frac{1}{3}}$
- (2) -  $n = h_{re} \times \left( \frac{\pi R_{topo}}{\lambda} \right)^{\frac{2}{3}} \times R^{-1}$

## Propagação atmosférica por difracção



### 3.4 – Atenuação suplementar em múltiplos obstáculos em lâmina

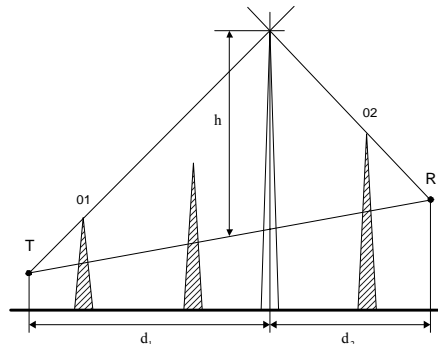
#### 3.4.1 – Método de Bullington (ou do obstáculo equivalente)

O perfil emissor-receptor é substituído por um obstáculo equivalente.

Calcula-se o parâmetro  $v$  para esse obstáculo e depois a sua atenuação suplementar.

Recorda-se que

- (1) -  $v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \times \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}}$
- (2) -  $L_D = 20 \log \left| \frac{\sqrt{2}}{2} I_F(v, +\infty) \right| - 3$



## Propagação atmosférica por difracção



### 3.4.2 – Método de Epstein-Petersson

Para o exemplo de 3 obstáculos, a atenuação (dB) é  $L_D = L_{D1} + L_{D2} + L_{D3}$

Atenuação  $L_{D1}$  no percurso 01:

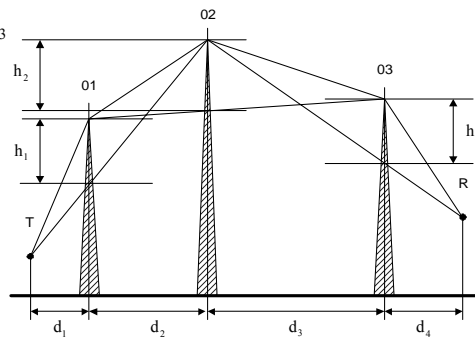
Emissor: antena T  
Obstáculo: obstáculo 01  
Receptor: obstáculo 02

Atenuação  $L_{D2}$  no percurso 02:

Emissor: obstáculo 01  
Obstáculo: obstáculo 02  
Receptor: obstáculo 03

Atenuação  $L_{D3}$  no percurso 03:

Emissor: obstáculo 02  
Obstáculo: obstáculo 03  
Receptor: antena R



## Propagação atmosférica por difracção

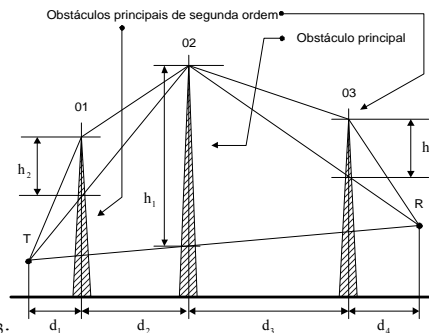


### 3.4.3 – Método de Deygout

Faz o cálculo recursivo das atenuações.

Para o exemplo:

- calcula os parâmetros  $v$  para todos os percursos T-01-R, T-02-R e T-03-R;
- selecciona o obstáculo com o maior valor  $v$ , sendo este o principal, obtendo  $L_{D1}$ .
- repete recursivamente para o percurso T-01-02 (1º recurso), obtendo  $L_{D2}$ , e no percurso 02-03-R (2º recurso), obtendo  $L_{D3}$ .
- A atenuação total é  $L_D = L_{D1} + L_{D2} + L_{D3}$



## Propagação atmosférica à superfície da Terra



### 4 – Propagação à superfície da Terra

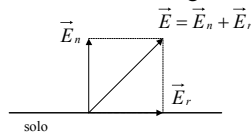
Aproveita o facto da superfície terrestre se comportar como um condutor imperfeito → a propagação é feita à sua superfície.

A atenuação depende do meio sobre o solo, por exemplo:

- (1) - existência de água à superfície;
- (2) - existência de gelo;
- (3) - das características eléctricas do solo.

As ondas apresentam comprimentos elevados –  $f < 30$  MHz.

O campo eléctrico tem componentes normal e tangencial à direcção de propagação.



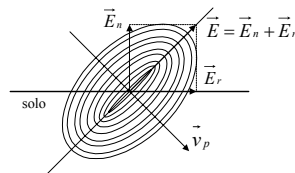
## Propagação atmosférica à superfície da Terra



As duas componentes relacionam-se através de

$$\frac{E_z}{E_r} = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\text{Re}(\epsilon_r) - j60\sigma\lambda}$$

A variação da permissividade  $\epsilon_r$  do solo tem como consequência a penetração progressiva da onda no interior do solo, aumentando a atenuação.



Pormenor da penetração da onda no interior do solo à medida que se propaga.

## Propagação atmosférica à superfície da Terra



Estatisticamente, a amplitude do campo eléctrico na recepção é

$$E = E_0 \times F(p), \text{ com } F(p) = 1 - \sqrt{\pi p} e^{-p} \operatorname{erfc}(j\sqrt{p}) \text{ e } p = \frac{2\pi^2 f \epsilon_0 d}{\sigma + j2\pi f \epsilon} = |p| e^{j\angle p}$$

- (1) -  $E$  é a amplitude do campo eléctrico na recepção;
- (2) -  $E_0$  é a amplitude do campo eléctrico na recepção caso a propagação fosse feita no espaço livre;
- (3) -  $p$  é a distância numérica;
- (4) -  $F(\dots)$  é a função de atenuação da componente radial;
- (5) -  $d$  é a distância horizontal medida em relação ao centro da antena emissora,
- (6) -  $\operatorname{erfc}(\dots)$  é a função de erro complementar,  $\operatorname{erfc}(j\sqrt{p}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{j\sqrt{p}}^{+\infty} e^{-z^2} dz$

Em polarização horizontal as perdas (atenuação) são maiores  $\rightarrow$  é usada a polarização vertical na transmissão à superfície da Terra.

## Propagação atmosférica à superfície da Terra



### 5 – Bandas frequência utilizadas 5.1 – Divisão por aplicações

Banda	Frequências	$\lambda$	Aplicações típicas
VLF	3 – 30 kHz	100 – 10 km	Comunicações em submarinos; Detecção por sonar
LF	30 – 300 kHz	10 – 1 km	As mesmas que em VLF
MF (Ondas médias)	300 – 3000 kHz	1000 – 100 m	Interesse comercial (Rádio difusão em onda média)
HF (Ondas curtas)	3 – 30 MHz	100 – 10 m	Ligações de longa distância (Radio difusão por onda curta)
VHF	30 – 300 MHz	10 – 1 m	Rádio difusão em FM, rádio difusão de sinais de televisão na banda de VHF, comunicações com aviões comerciais, comunicações com a policia.

## Propagação atmosférica à superfície da Terra



### Bandas frequência utilizadas – divisão por aplicações: (continuação)

UHF (Banda inferior das Microondas)	300 – 3000 MHz	100 – 10 cm	Rádio difusão de sinais de televisão na banda de UHF, ligações por feixes de microondas.
SHF (Banda superior das Microondas)	3 – 30/60 GHz	10 – 1/0.5 cm	Aplicações comerciais de comunicação por satélite
EHF	30/60 – 300 GHz	10/5 – 1 mm	O aproveitamento das suas potencialidades está em investigação

## Propagação atmosférica à superfície da Terra



### 5.2 – Bandas utilizadas nas microondas

Bandas (GHz)	Designação antiga das bandas	Designação moderna das bandas
0.5 – 1	VHF	C
1 – 2	L	D
2 – 3	S	E
3 – 4	S	F
4 – 6	C	G
6 – 8	C	H
8 – 10	X	I
10 – 12.4	X	J
12.4 – 18	Ku (K inferior)	J
18 – 20	K	J
20 – 26.5	K	K
26.5 – 40	Ka (K superior)	K

## Propagação atmosférica à superfície da Terra



### 5.3 – Alocação do espectro de acordo com a aplicação

