



Propagação Radioelétrica

2017/II

Profa. Cristina

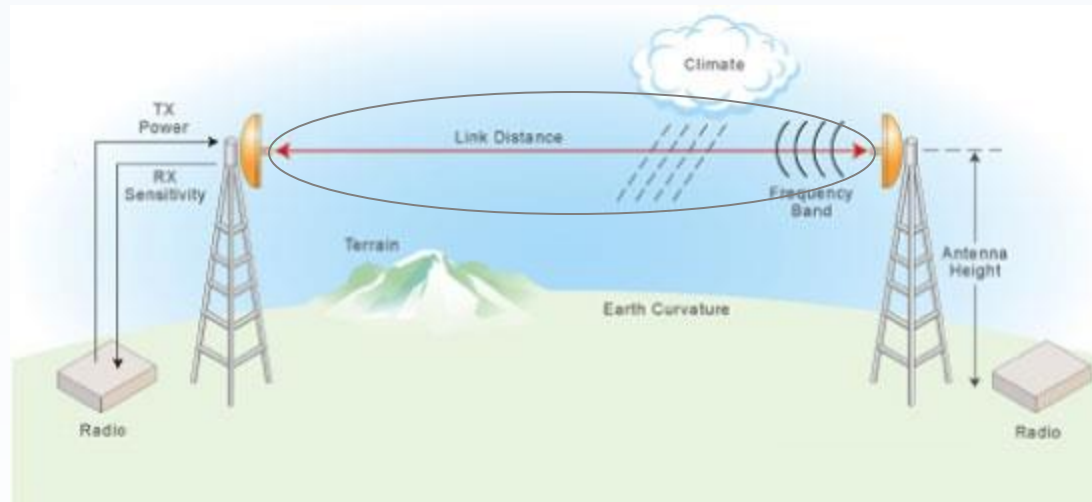
Módulo III

Introdução ao *link budget*

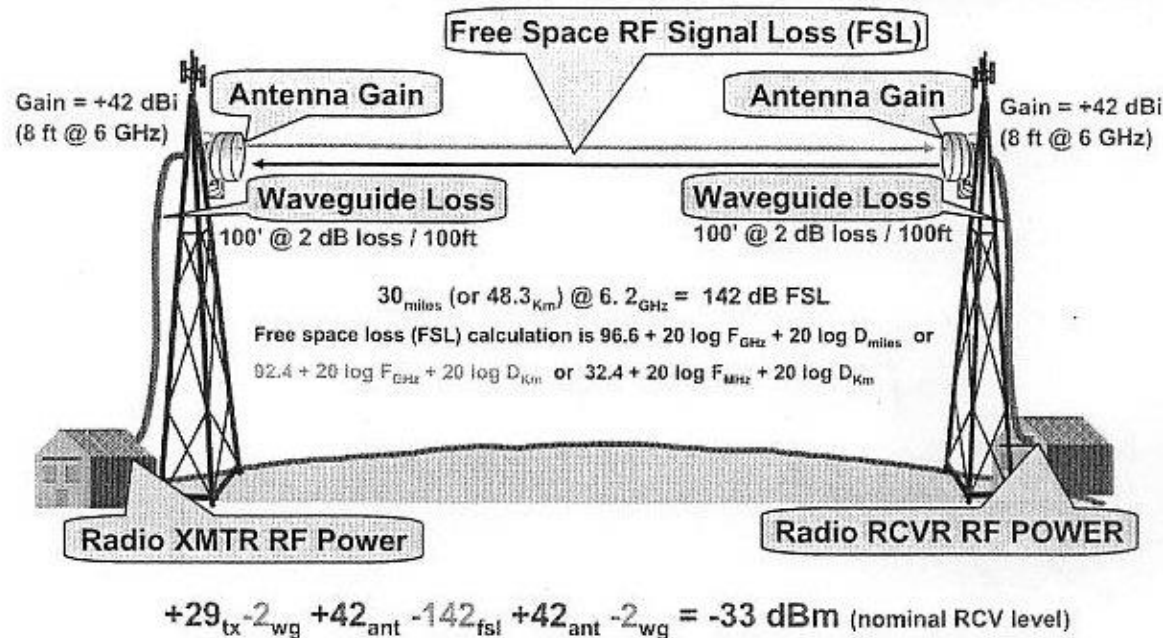
Propagação no espaço livre

Equação de Friis

O desempenho de um *link* de comunicações depende do dimensionamento do enlace, e da qualidade dos dispositivos envolvidos.



Para o dimensionamento do enlace é necessário considerar, além das **potências** e **ganhos** dos dispositivos, as **perdas** introduzidas por outros dispositivos, as perdas devidas à propagação no espaço livre (perdas no caminho de propagação, ou *path loss*), e as perdas introduzidas pelas condições do terreno, que implicam em reflexão e difração do sinal (zona de Fresnel e difração por gume de faca).



- Para quantificar o desempenho de um *link* de comunicações é utilizado o *link budget*.
- O *link budget* faz o balanço entre ganhos e perdas, avaliando a viabilidade do *link* em termos da potência que o *link* entrega ao receptor.
- Uma equação de *link budget* simplificada poderia ser assim descrita:

Potência recebida (dB) = Potência transmitida (dB) + Ganhos (dB) - Perdas (dB)

Potências e Ganhos

- Potência de transmissão,
- Ganho da antena de transmissão,
- Ganho da antena de recepção.

Perdas

- Perdas no espaço livre,
- Perdas causadas por reflexão no solo (planos horizontais),
- Perdas causadas pela presença de obstáculos verticais (difração por gume de faca),
- Perdas nos conectores, cabos, guias de onda, fibras, etc,
- Margem do *link* (folga de $\cong 10\text{dB}$, para *links* confiáveis).

- Potência recebida (dB) = Potência transmitida (dB) + Ganhos (dB) - Perdas (dB)
- Se a potência que resulta do *link budget* for maior que o nível de sinal mínimo requerido pelo receptor, o *link* é viável.
- A sensibilidade de receptores modernos de VHF e HF é da ordem de $0.15\mu\text{V}$, para uma qualidade de sinal de áudio com relação sinal/ruído+distorção (SINAD) de 12dB .

Propagação no espaço livre

Equação de Friis

- A propagação no espaço livre é a propagação realizada no vácuo ou em uma atmosfera ideal, na ausência de qualquer objeto que provoque absorção ou reflexão da onda eletromagnética.



- Neste contexto, o cálculo do enlace entre uma antena TX e uma antena RX consiste em, dada a potência que o TX entrega à antena transmissora TX, determinar a potência que a antena RX entrega à sua impedância de carga.
- A impedância de carga, na grande maioria dos casos, é a impedância de entrada do amplificador de sinal do receptor no front end de RF do receptor.

- Para o espaço livre, a relação entre a potência transmitida P_{TX} e a potência recebida P_{RX} em um link é dada pela Equação de Friis, conforme

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_{TX} G_{RX}} \quad (1)$$

Onde:

r é a distância entre o Tx e o Rx (m)

λ é o comprimento de onda (m)

P_{TX} : potência irradiada pela antena transmissora, em W

P_{RX} : potência recebida pela antena receptora, em W

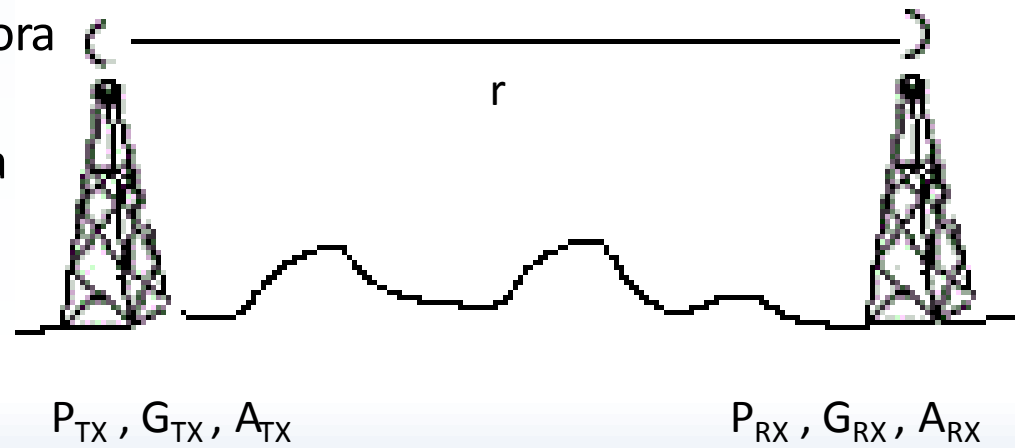
A_{TX} : área efetiva da antena transmissora

A_{RX} : área efetiva da antena receptora

$4\pi r^2$: área da esfera de raio r , m^2

G_{TX} : ganho da antena transmissora

G_{RX} : ganho da antena receptora



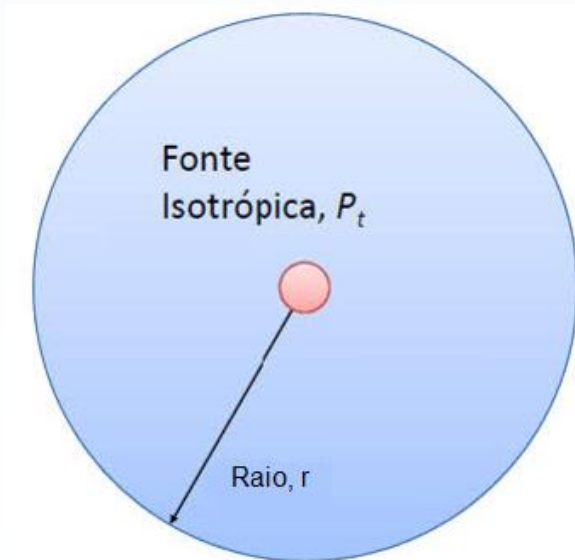
Para deduzir a Equação de Friis, partimos do fato de que qualquer antena mantém a seguinte relação entre seu ganho G_{TX} , quando ela é usada como antena TX, e sua área de recepção A_{RX} quando ela é usada como antena RX:

$$A_{RX} = G_{TX} \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

- G_{TX} expressa a capacidade da antena TX concentrar densidade de potência (vetor de Poynting) na direção de maior intensidade de radiação de seu diagrama de irradiação (*boresight*) – como se fosse uma lente óptica.
- A_{RX} expressa a área virtual através da qual a antena RX transforma o vetor de Poynting da onda que nela incide na direção do *boresight* de seu diagrama de irradiação em potência entregue à parte real de sua impedância de carga.

Uma antena isotrópica irradia um Vetor de Poynting uniforme em todas as direções do espaço R^3 , o que faz com que o ganho da antena isotrópica, quando usada como antena transmissora, seja unitário (não concentra Vetor de Poynting em qualquer direção específica).

Ou seja, o Vetor de Poynting (S_{ISO}) gerado a uma distância r de uma antena isotrópica é simplesmente a razão entre a potência entregue à antena pela área da esfera de raio r , conforme abaixo.



$$S_{ISO} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} \left[W/m^2 \right] \quad (3)$$

Como o ganho de potência da antena isotrópica é unitário, da relação (2) abaixo

$$A_{RX} = G_{TX} \frac{\lambda^2}{4\pi} \left[m^2 \right]$$

resulta que

$$A_{ISO} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left[m^2 \right] \quad (4)$$

A potência recebida pela antena receptora é dada por

$$P_{RX} = SA_{RX} \quad (5)$$

onde:

- S é o Vetor de Poynting nas vizinhanças da antena RX, gerado pela irradiação da antena TX e
- A_{RX} é a área virtual da antena RX, através da qual será extraída potência P_{RX} da frente de onda que nela incide, potência que será entregue à impedância de carga da antena RX.

Se a antena TX for isotrópica, conforme (3),

$$S_{ISO} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} \left[W/m^2 \right] \quad \text{e, portanto,} \quad P_{RX} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} A_{RX} \left[W \right] \quad (6)$$

Se a antena RX também for isotrópica, então, de (6) e (4) temos

$$P_{RX} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} A_{ISO} \quad [W], \text{ onde } A_{ISO} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad [m^2]$$

Então,

$$P_{RX} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{P_{TX} \lambda^2}{(4\pi r)^2} = \frac{P_{TX}}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} = \frac{P_{TX}}{L_P} \quad (7)$$

Note, a partir de (7), que:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX}}{L_P} \quad \text{e} \quad L_P = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

- Dado que L_P é o fator que divide a Potência P_{TX} , para definir a potência P_{RX} recebida pela antena RX , então L_P define a perda no espaço livre entre as antenas TX e RX .
- A perda L_P não é devida a perdas dielétricas ou ôhmicas no espaço de propagação da onda mas, sim, é devida ao espalhamento geométrico das frentes de ondas, as quais sofrem a redução da intensidade do vetor de Poynting à medida que as frentes de onda se afastam da antena TX .
- Note que, embora a dedução tenha sido feita para duas antenas TX e RX isotrópicas, como as propriedades de propagação do espaço não dependem das antenas, a expressão, para L_P , é válida para quaisquer tipos de antenas TX e RX .

A potência entregue à parte real da impedância de carga da antena RX é

$$P_{RX} = SA_{RX}$$

Se S for gerado por uma antena TX qualquer com ganho G_{TX} em relação à antena isotrópica, S na equação acima vale

$$S = S_{ISO}G_{TX} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} G_{TX}$$

Da mesma forma, se a antena RX for uma antena qualquer, a relação entre sua área de recepção A_{RX} e seu ganho G_{RX} caso ela fosse usada como antena transmissora é dada por

$$A_{RX} = G_{RX} \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Substituindo S e A_{RX} na expressão de P_{RX} acima temos

$$P_{RX} = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} G_{TX} G_{RX} \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_{TX} G_{RX}}$$

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = L_P \frac{1}{G_{TX} G_{RX}} \quad \leftarrow \text{Equação de Friis}$$

Determinando a potência recebida em dB_m a partir da potência transmitida em dB_m e da perda no espaço livre L_p em dB , temos

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{L_p} \quad \text{onde} \quad L_p = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

Aplicando $10\log(\cdot)$ às expressões acima, obtemos a Equação de Friis em dB :

$$P_{RX}(dB_m) = P_{TX}(dB_m) + G_{TX}(dB) + G_{RX}(dB) - L_p(dB)$$

onde

$$L_p(dB) = 20\log\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$$

Propagação no Espaço Livre - Exemplo



Um enlace entre a torre do aeroporto e uma aeronave é estabelecido, conforme figura acima.

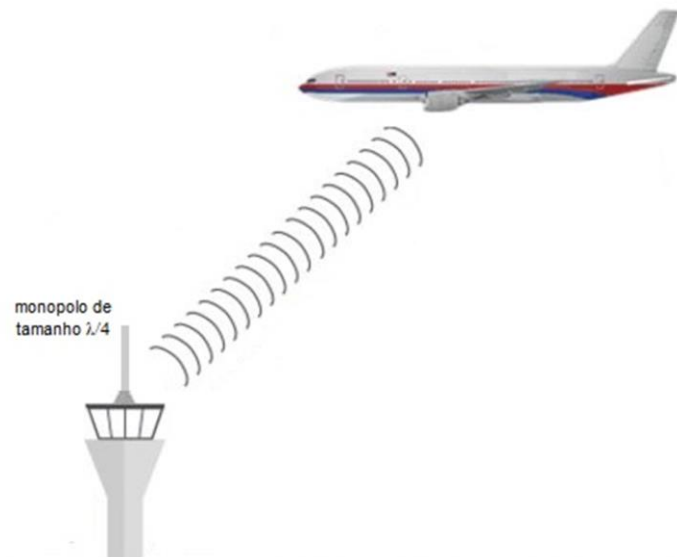
Propagação no Espaço Livre - Exemplo

O referido enlace é estabelecido na frequência de 118.1MHz. A distância entre a torre do aeroporto e a aeronave é de 150km.

A potência que o transmissor entrega para a antena transmissora da torre do aeroporto é 100W. O ganho da antena transmissora na torre do aeroporto é $5dB_i$.

O ganho da antena receptora no avião é $7dB_i$, e a impedância de carga da antena receptora no avião é 50Ω .

Determine a potência, em dB_m , entregue à parte real da impedância de carga na antena receptora do avião, bem como a tensão nos terminais da antena receptora.



Propagação no Espaço Livre - Exemplo

$$f := 118.1 \text{ MHz} \quad r := 150 \text{ km} \quad P_{Tx} := 100 \cdot \text{W}$$

$$Z_L := 50 \Omega \quad G_{Tx} := 5 \text{ dBi} \quad G_{Rx} := 7 \text{ dBi}$$

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 2.538 \text{ m} \quad L_p := 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}\right) \quad L_p = 117.415 \text{ dB}$$

$$P_{Tx\text{dbm}} := 10 \cdot \log\left(\frac{P_{Tx}}{1 \cdot 10^{-3} \cdot \text{W}}\right) \quad P_{Tx\text{dbm}} = 50 \text{ dBm}$$

$$P_{Rx\text{dbm}} := P_{Tx\text{dbm}} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_p \quad P_{Rx\text{dbm}} = -55.415 \text{ dBm}$$

Equação de Friis

$$P_{Rx} := \frac{10^{\frac{P_{Rx\text{dbm}}}{10}} \cdot \text{W}}{1000} \quad P_{Rx} = 2.874 \times 10^{-6} \text{ mW}$$

$$V_{Rx} := \sqrt{P_{Rx} \cdot Z_L} \quad V_{Rx} = 379.101 \mu\text{V}$$

