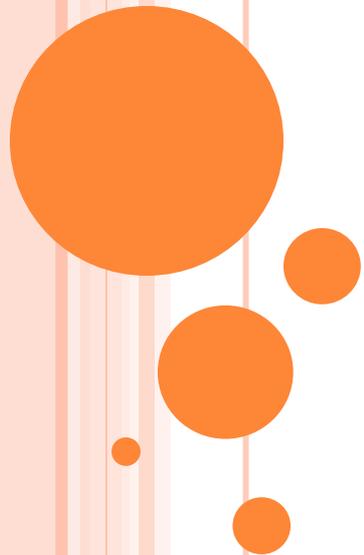


# ANTENAS

## PSI3481 - SISTEMAS ÓPTICOS E DE MICRO-ONDAS

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fatima Salete Correra



# SUMÁRIO

- Conceito de antena
- Tipos de antenas
- Parâmetros de antenas
  - Campo próximo e campo distante
  - Diagrama de radiação
  - Diretividade
  - Perdas na antena
  - Ganho
  - Figura de ruído

# ANTENAS EM SISTEMAS DE MICRO-ONDAS

- Antenas são parte essencial de sistemas sem fio
  - Comunicações terrestres e via satélite
  - Radares, radiômetros, etc.
- Propriedades das antenas
  - Afetam o desempenho do sistema
    - Potência recebida e alcance do sistema
    - Área de cobertura
- Dimensionar as antenas é parte do projeto do sistema

# CONCEITO DE ANTENA

## ○ Definição de antena

- Norma IEEE *Std 145-1983*
- *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*
- “Dispositivo para **radiação** ou **recepção** de ondas de rádio”

## ○ Bidirecionalidade

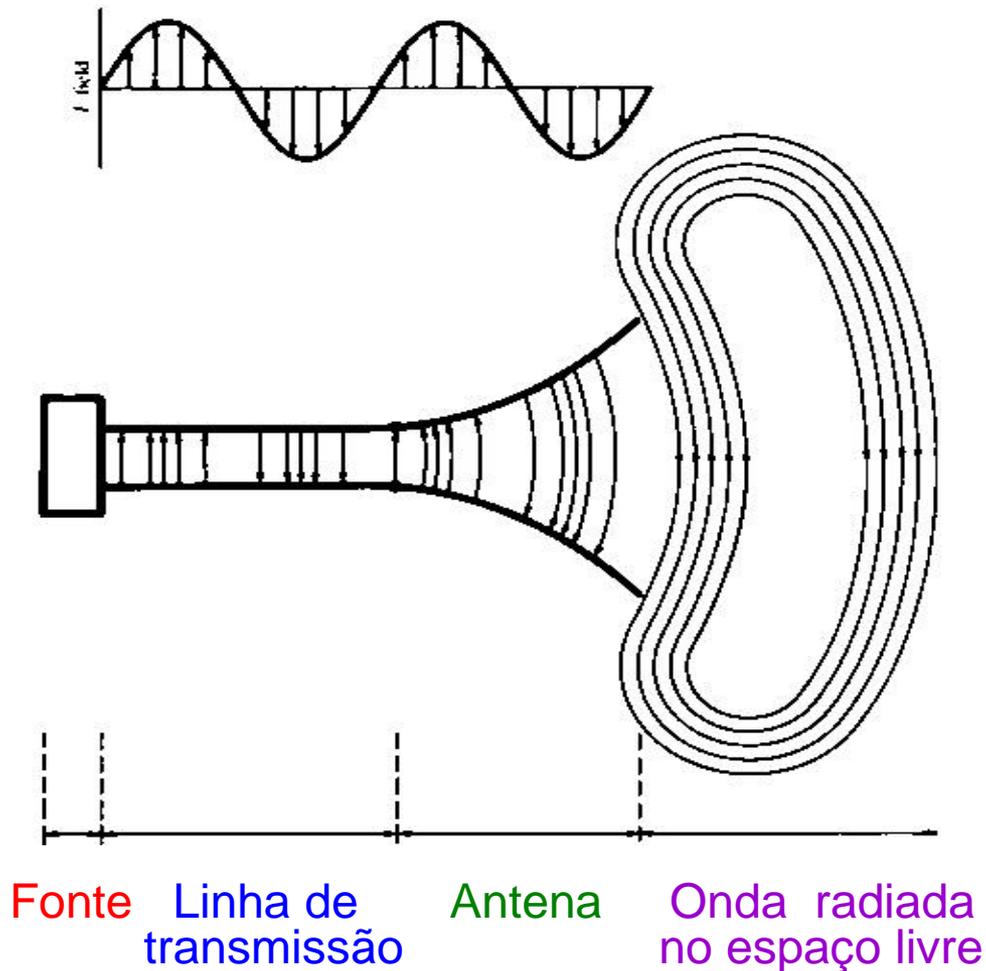
- A mesma antena atua com as mesmas propriedades, como

TRANSMISSORA e RECEPTORA

## ○ Estrutura intermediária



# CONCEITO DE ANTENA



- Dispositivo de guiamento de ondas
  - Linha de transmissão
    - Cabo coaxial
    - Linha bifilar
    - Par trançado
    - Guia de ondas
- Tipos de antena
  - Monopolo
  - Dipolo
  - Microfita
  - Parabólica
  - Corneta
  - Etc.

# TIPOS DE ANTENAS

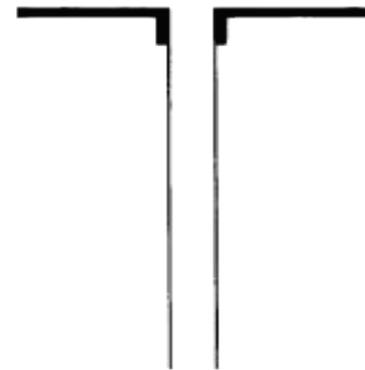
# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas
  - Geralmente são estruturas metálicas
  - Podem combinar estruturas metálicas e dielétricas
- Tipos de antenas
  - Antenas de fio ou filamento
  - Antenas de abertura
  - Antenas de microfita
  - Antenas refletoras
  - Arranjos de antenas
  - Antenas-lente

# TIPOS DE ANTENAS

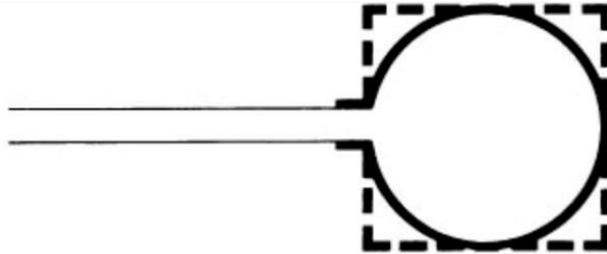
- Antenas de fio ou filamento
  - Filamento: diâmetro ( $d$ )  $\ll$  comprimento ( $l$ )
  - Usadas em carros, prédios, navios, aviões, naves espaciais, ...
- Diversos formatos de fio
  - **Fio reto:** dipolo e monopolo

dipolo →

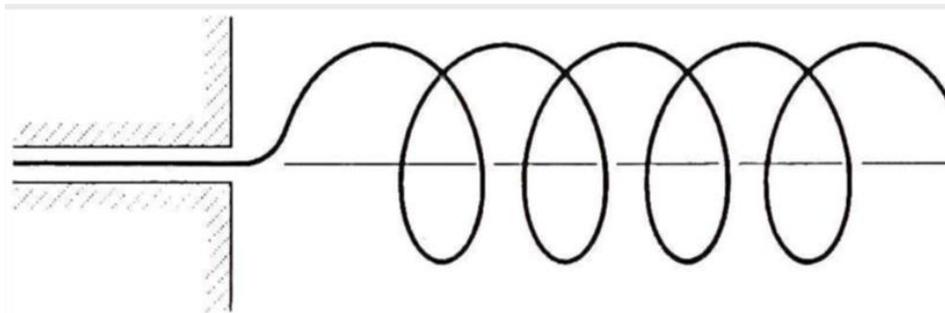


# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de fio ou filamento
  - **Fio em laço** (*loop*): antena de quadro



- **Fio helicoidal:** antena helicoidal

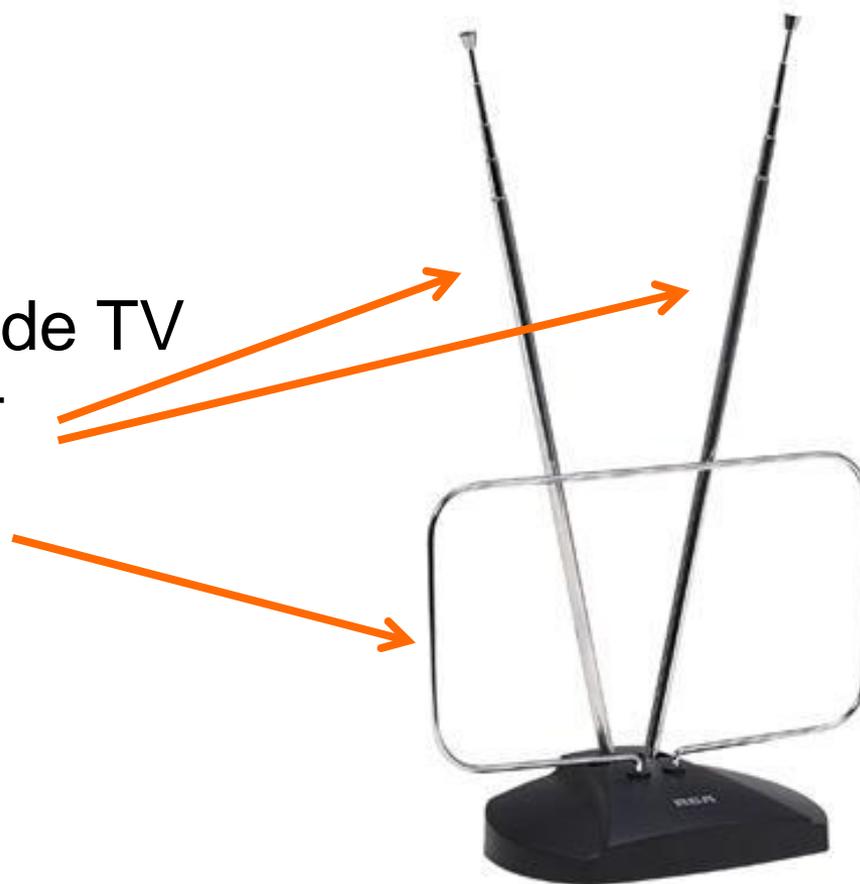


# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de fio ou filamento

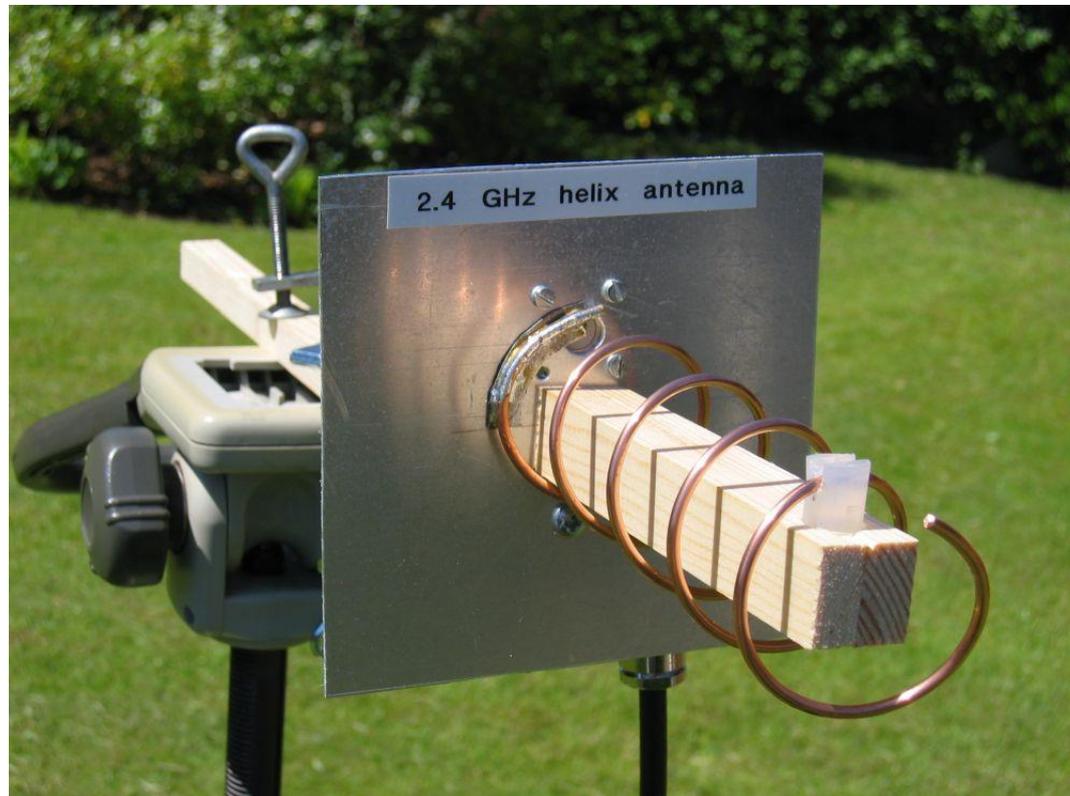
- Antena interna de TV

- Dipolo – VHF
- *Loop* – UHF



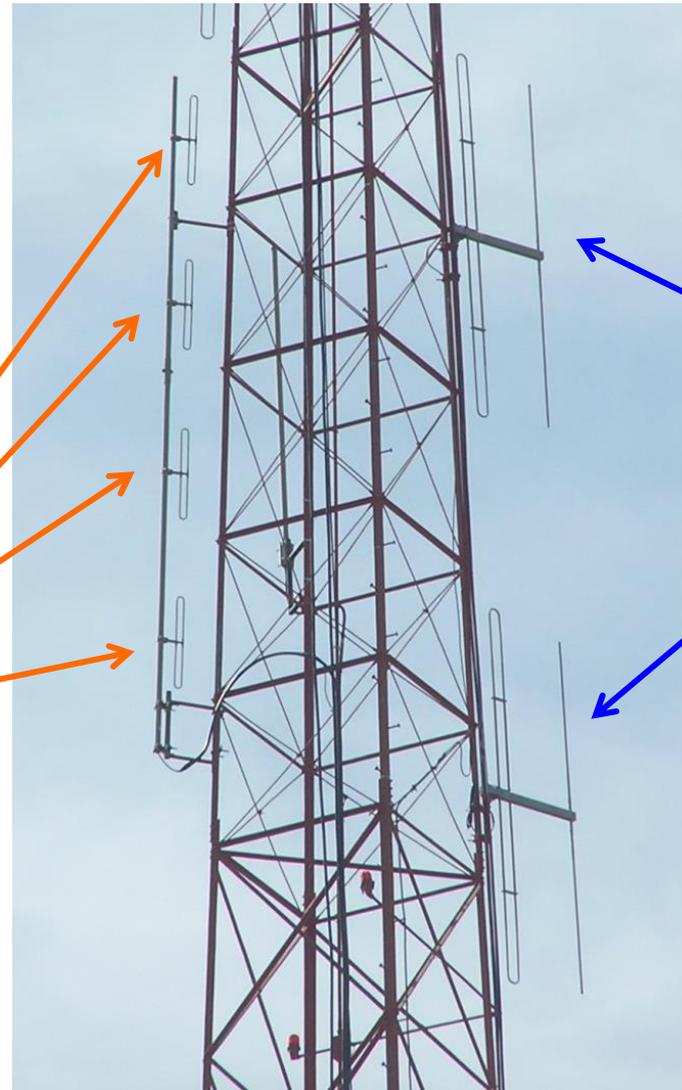
# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de fio ou filamento
  - Antena helicoidal



# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de fio ou filamento
- Torre de transmissão de sinais de rádio e TV
- Antenas de dipolo dobrado



- <http://wallybloss.com>

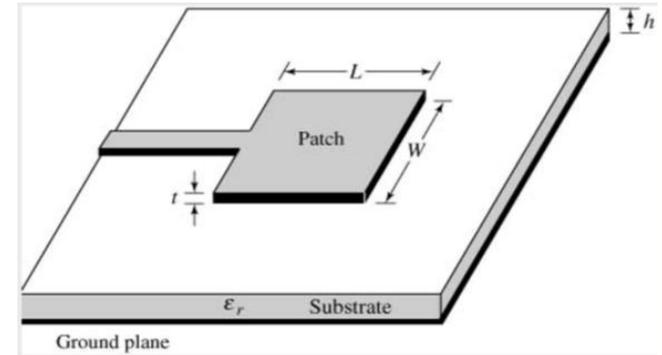
# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de microfita

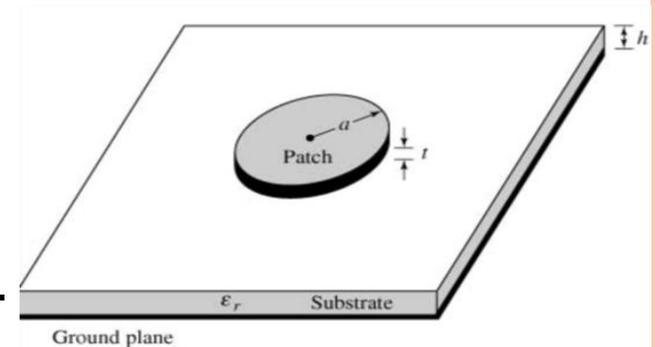
- Tornaram-se populares nos anos 70
- Usadas em naves espaciais
- Frequências de micro-ondas

- Estrutura da antena de microfita

- Substrato dielétrico
- Face superior → Elemento radiante
- Plaqueta metálica
- Retangular, circular, fractal, fenda, etc.
- Face inferior → Plano de terra



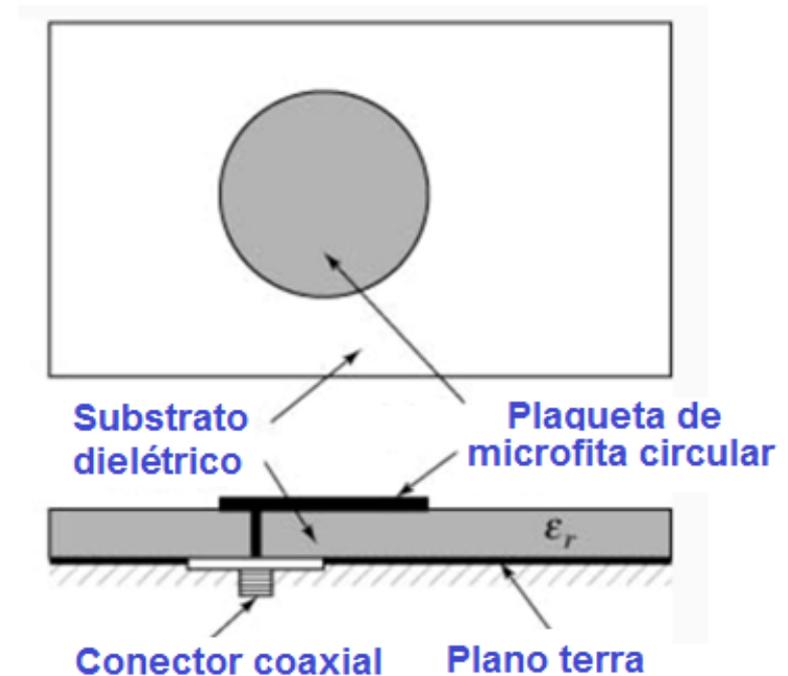
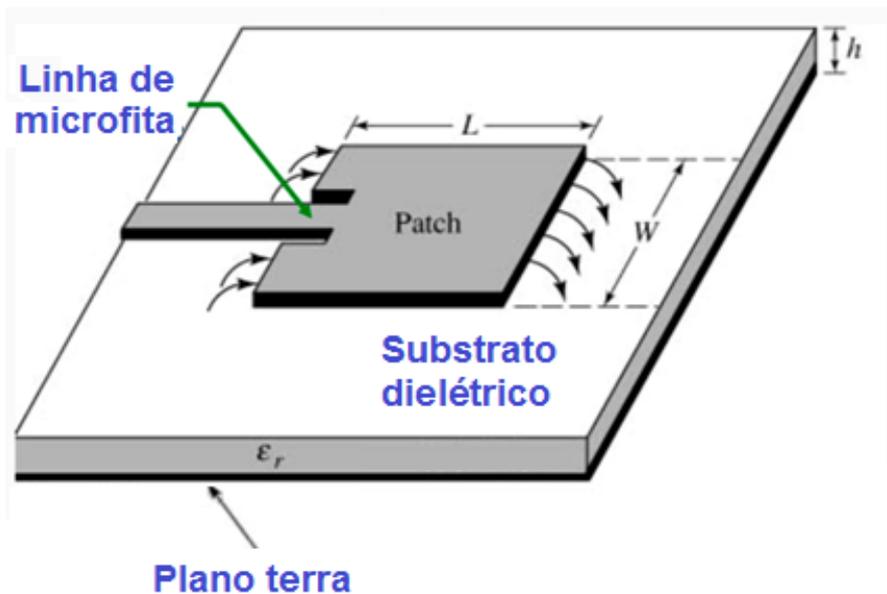
Antena de microfita retangular



Antena de microfita circular

# TIPOS DE ANTENAS

- Alimentação de antenas de microfita
  - Alimentação por linha de microfita
  - Alimentação por sonda coaxial

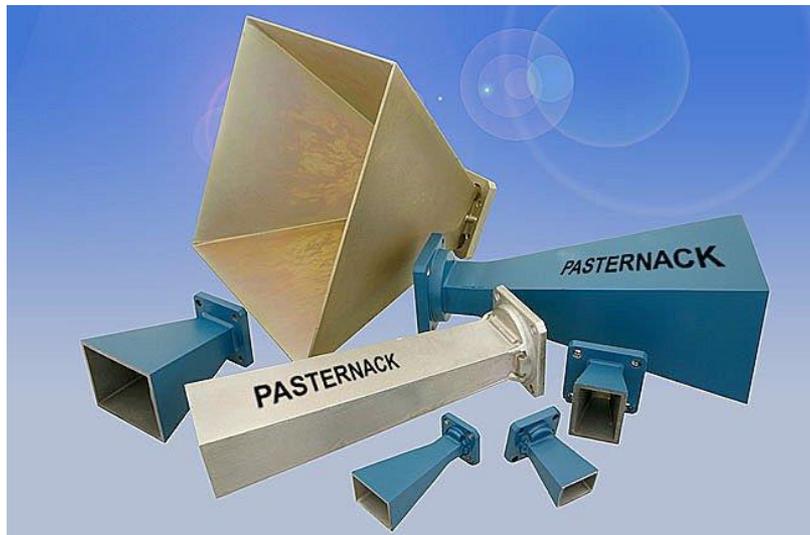


# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de abertura
  - Usadas em
    - Frequências de micro-ondas
    - Aviões e naves espaciais – montadas na fuselagem
    - Podem ter cobertura dielétrica – proteção  $\Rightarrow$  **Radome**
  - Exemplos de antenas de abertura
    - Corneta piramidal
    - Corneta cônica
    - Alimentação  $\Rightarrow$  guia de ondas

# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de abertura
  - Corneta piramidal



Corneta cônica



# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas refletoras

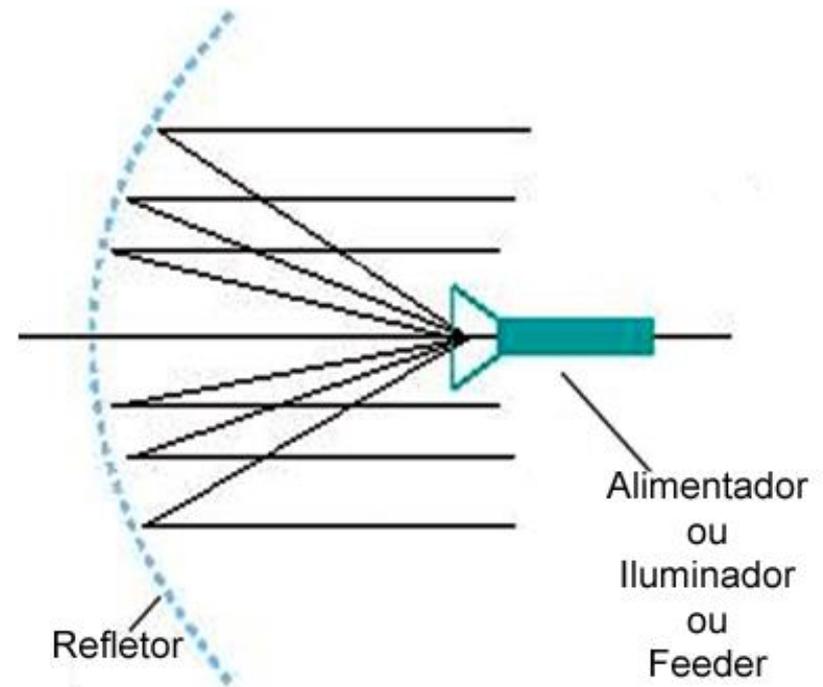
- Surgiram devido à exploração do espaço
- Sinais viajando milhões de quilômetros
- Antenas de alto ganho
  - Direcionam o feixe transmitido
  - Frequências de micro-ondas

- Estrutura básica

ALIMENTADOR

+

REFLETOR

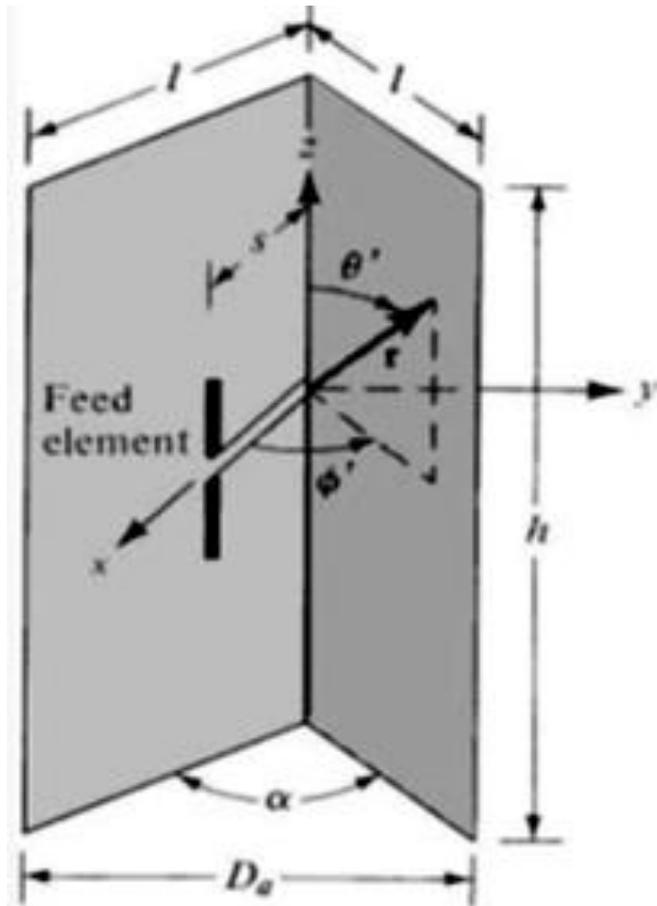


# TIPOS DE ANTENAS

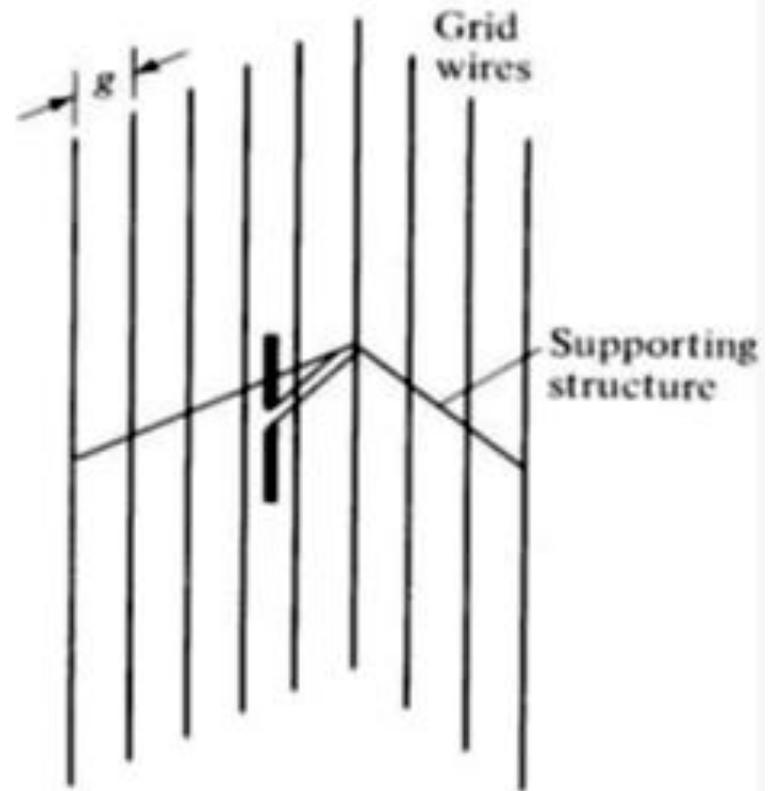
- Antenas refletoras
  - Refletor
    - Metálico – sólido, tela ou grade
    - Reflete o sinal transmitido ou recebido
    - Focaliza o feixe transmitido de sinal
  - Alimentador
    - *Feeder* ou iluminador
    - Elemento radiante
    - Antena de dipolo, *loop*, helicoidal, corneta, etc.

# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas com refletores de canto



- Refletor de metal sólido



- Refletor de fios ou tubos metálicos

# TIPOS DE ANTENAS

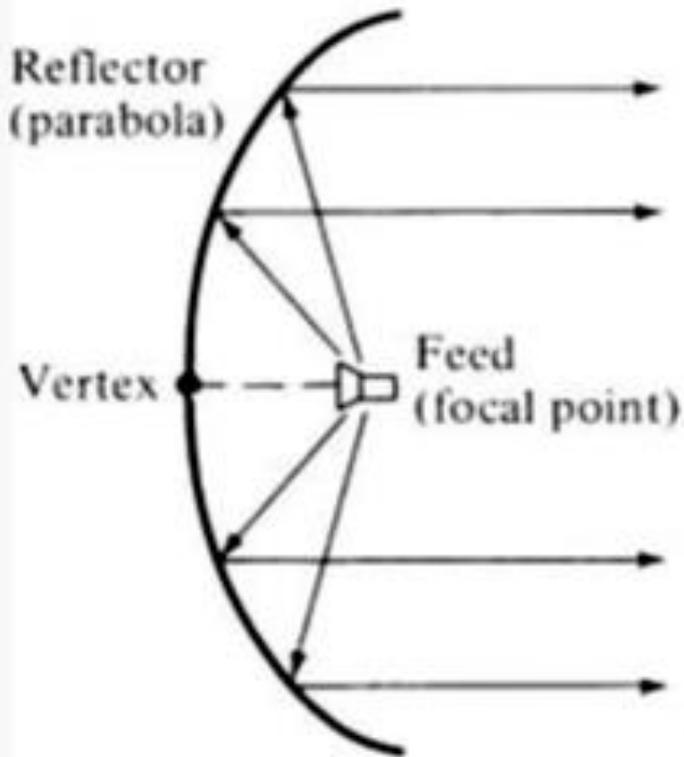
- Refletores de canto – antena de VHF



<http://www.summitsource.com/images/products/AN3023.jpg>

# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas com refletor parabólico

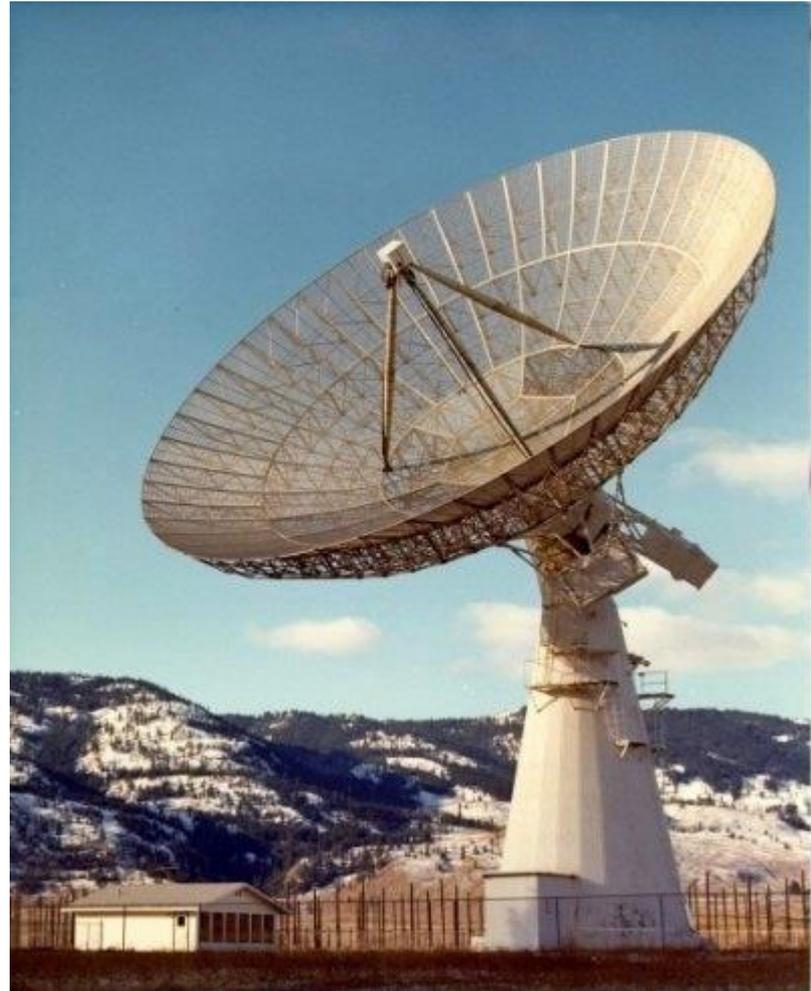


(c) Curved (front-fed)

- **Refletor parabólico**
- Alimentador no ponto focal da parábola
- Sinais do alimentador
  - Incidem no refletor
  - Refletidos na mesma direção
  - Em feixe estreito
  - Antena de alto ganho

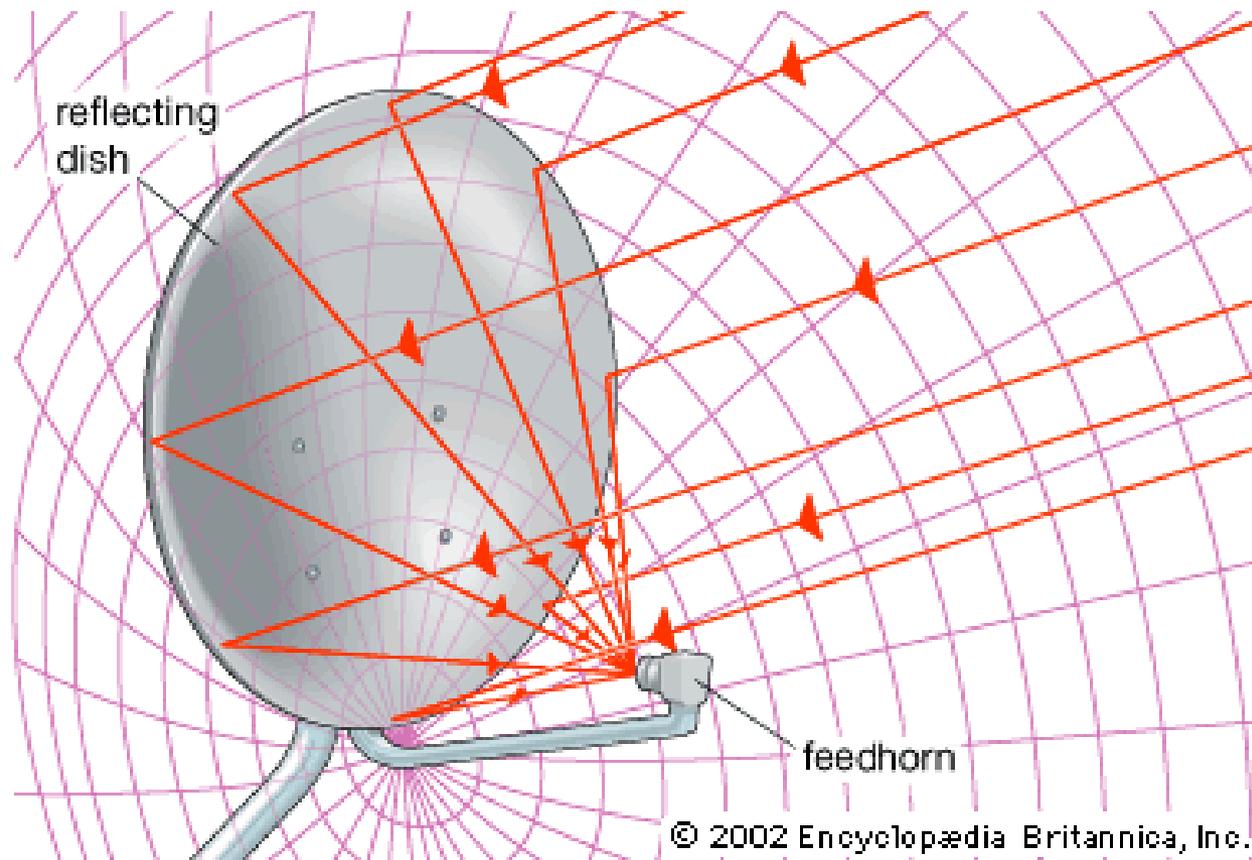
# TIPOS DE ANTENAS

- Antenas com refletor parabólico



# TIPOS DE ANTENAS

- Antena Parabólica Offset
  - Alimentador não obstrui o sinal

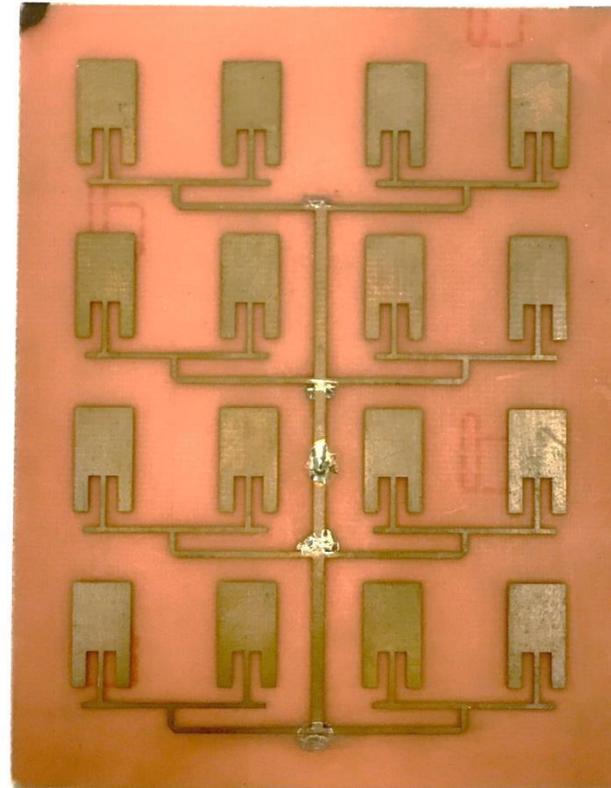
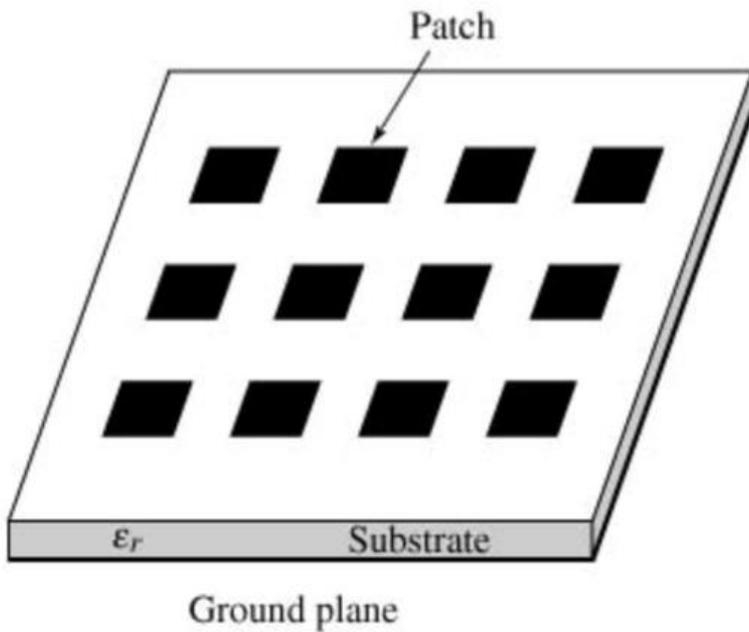


# TIPOS DE ANTENAS

- Arranjos (ou conjuntos ou redes) de antenas
  - *Antenna array*
  - Soma da radiação de vários elementos radiantes
  - Diagramas de radiação que não podem ser conseguidos com uma única antena
  - Diagrama de radiação depende de
    - Configuração geométrica e número de elementos do arranjo
    - Separação relativa entre os elementos
    - Amplitude da excitação dos elementos individuais
    - Fase da excitação dos elementos individuais
    - Diagrama de radiação dos elementos individuais

# TIPOS DE ANTENAS

- Arranjos de antenas
  - Arranjo de antenas *de* plaqueta de microfita



# RADOME

- Origem do termo

**Radome → RADAR + DOME**

- Invólucro à prova de intempéries
  - Protege antenas de micro-ondas de vento, chuva, neve, etc.
- Feito de materiais “transparentes à onda EM”
  - Ocasionam mínima atenuação da onda EM recebida ou transmitida pela antena protegida pelo radome
  - Exemplo: Kevlar™ (fibra sintética) →  $\epsilon_r$  de 3,5 a 4,5

# EXEMPLOS DE RADOME



# EXEMPLOS DE RADOME



Montagem de radome MARK II (BEL-Ghaziabad)

66 painéis de 7 m<sup>2</sup>

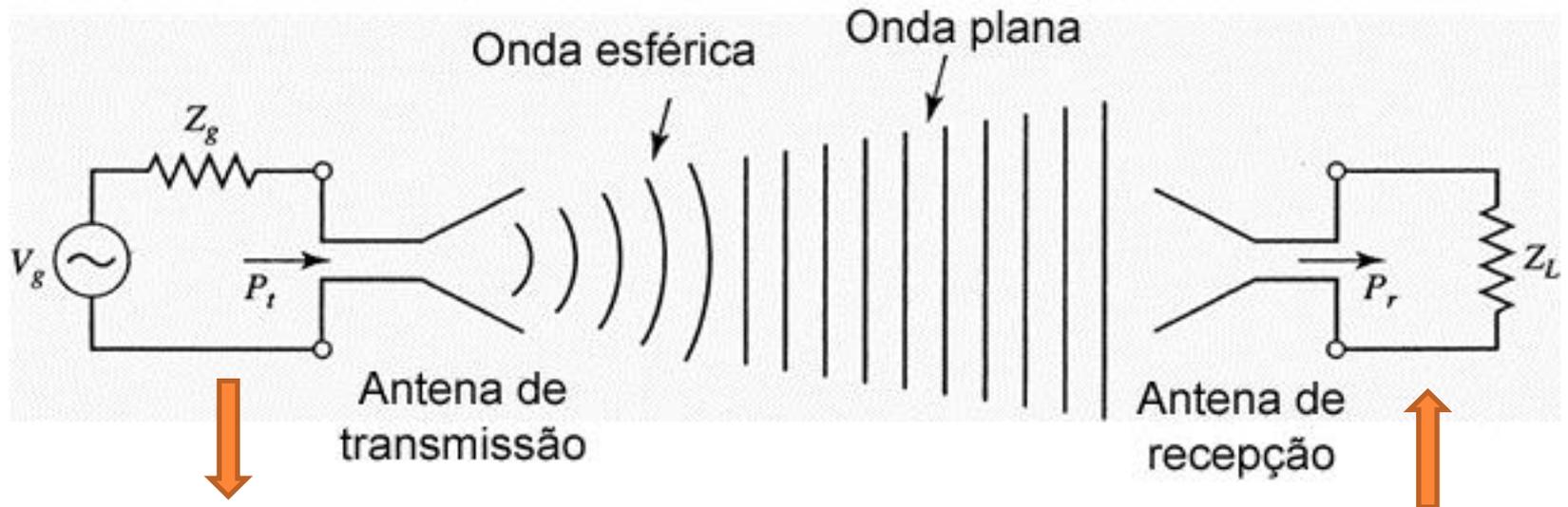
# EXEMPLOS DE RADOME



Vista de radome no nariz de um avião caça

# PARÂMETROS DE ANTENAS

# MODELO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO



## Transmissor

- Gerador de Thévenin
  - Fonte ideal de tensão  $V_g$
  - Impedância do gerador  $Z_g$
- Entrega potência  $P_t$  à antena

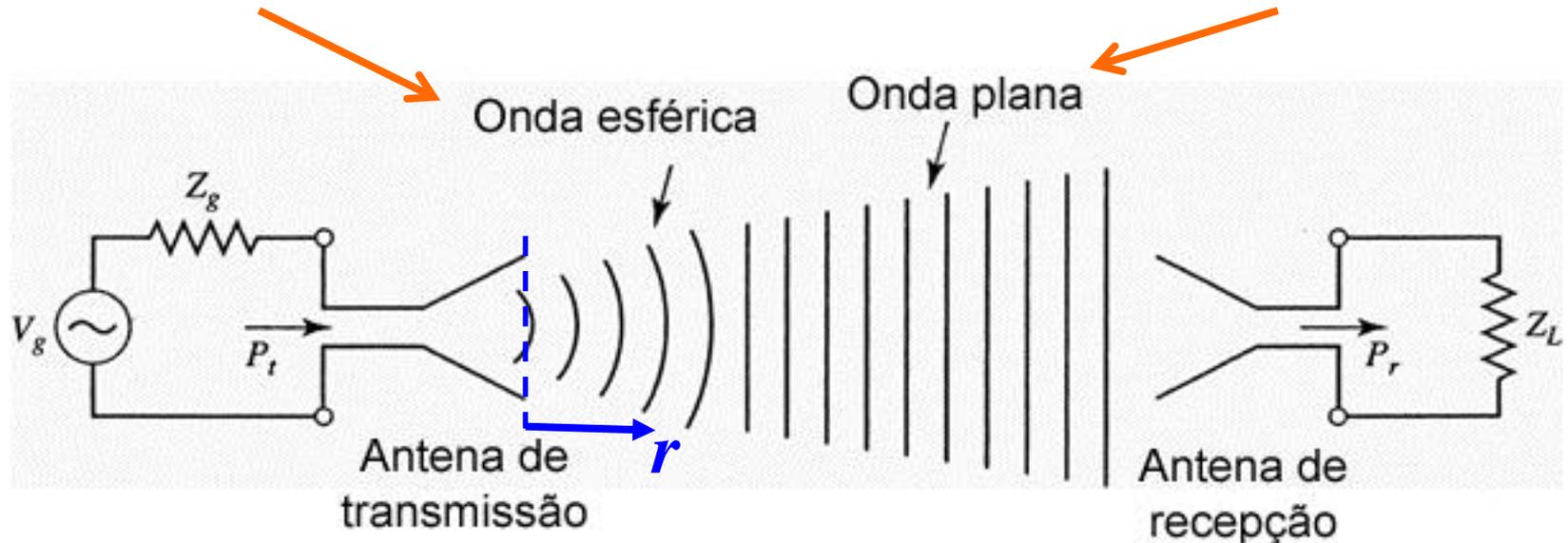
## Receptor

- Impedância de carga  $Z_L$  vista pela antena
- Recebe potência  $P_r$  da antena

# MODELO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Região de campo próximo  $|\vec{E}| \propto \frac{1}{r} e \frac{1}{r^3}$

Região de campo distante  $|\vec{E}| \propto \frac{1}{r}$



## Antena de transmissão

- Gera onda EM esférica a partir de  $P_t$
- Propagação no espaço livre
- Longe da antena  $\Rightarrow$  onda plana

## Antena de recepção

- Intercepta parte da onda radiada
- Entrega potência recebida  $P_r$  ao receptor

# REGIÕES DE CAMPO PRÓXIMO E DISTANTE

- Seja um antena cuja maior dimensão é  $D$
- Um ponto  $P$ , a distância  $R$  a distância da antena está no **campo distante** se:

$$R > R_{ff}$$

onde  $R_{ff}$  é a “distância de campo distante”

- Antenas com

$$D \approx \lambda \text{ ou } D > \lambda$$

$$R_{ff} = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$$

- Antenas pequenas, com

$$D \ll \lambda$$

$$R_{ff} = 2 \cdot \lambda$$

# REGIÕES DE CAMPO PRÓXIMO E DISTANTE

## Exemplo 1

- DBS - Sistema de transmissão direta de TV via satélite
  - Satélite a 36.000 km de altitude
  - Antena de recepção parabólica com 18" de diâmetro
  - Frequência de 12,4 GHz
- A onda recebida na Terra pela antena pode ser considerada plana?

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{12,4 \times 10^9} = 0,0242 \text{ m}$$
$$\Phi = D = 18 \times 0,0254 = 0,457 \text{ m}$$
$$D \gg \lambda$$
$$R_{ff} = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} = \frac{2 \times (0,457)^2}{0,0242} = 17,3 \text{ m}$$

- Como  $R = 36.000 \text{ km} \gg R_{ff} \Rightarrow$  campo distante e  $\therefore$  onda plana

# REGIÕES DE CAMPO PRÓXIMO E DISTANTE

## Exemplo 2

- Antena dipolo curto
  - Comprimento de  $\lambda/20$
  - Operando em 3 GHz
- A partir de que distância  $R$  da antena pode-se considerar que a onda radiada é plana?

- Maior dimensão da antena:  $D = \frac{\lambda}{20} \ll \lambda \Rightarrow R_{ff} = 2 \cdot \lambda$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0,1 \text{ m} \Rightarrow R_{ff} = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$$

- A onda pode ser considerada plana para  $R > 20 \text{ cm}$

# REGIÕES DE CAMPO PRÓXIMO E DISTANTE

## Conclusão dos exemplos 1 e 2

- Em grande parte dos sistemas
  - Distância  $R$  entre antenas transmissora e receptora é muito maior do que a distância de campo distante

$$R \gg R_{ff}$$

- Há interesse no estudo do campo distante, onde
  - Onda plana ou transversal eletromagnética (TEM)

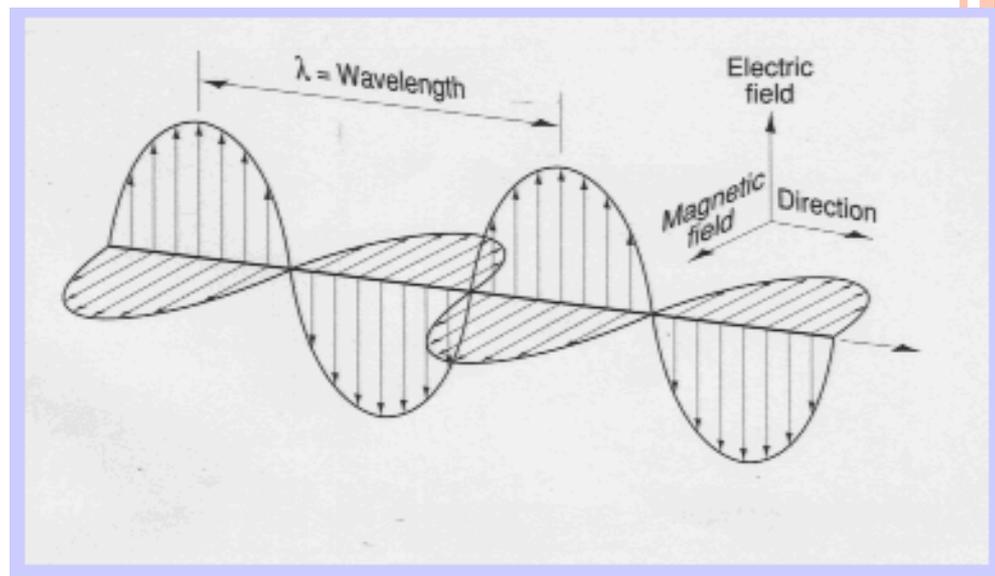
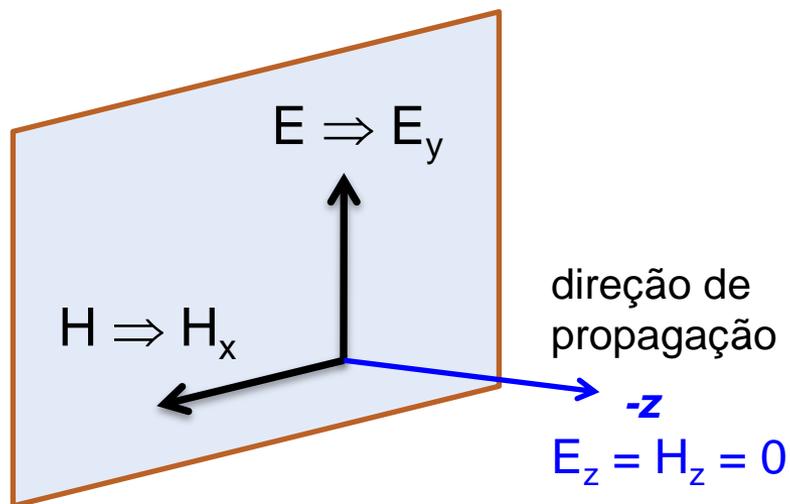
$$|\vec{E}| \text{ e } |\vec{H}| \propto \frac{1}{r} \Rightarrow \text{a potência decai com o quadrado da distância}$$

# CAMPO DISTANTE RADIADO

## Onda Plana ou Transversal Eletromagnética (TEM)

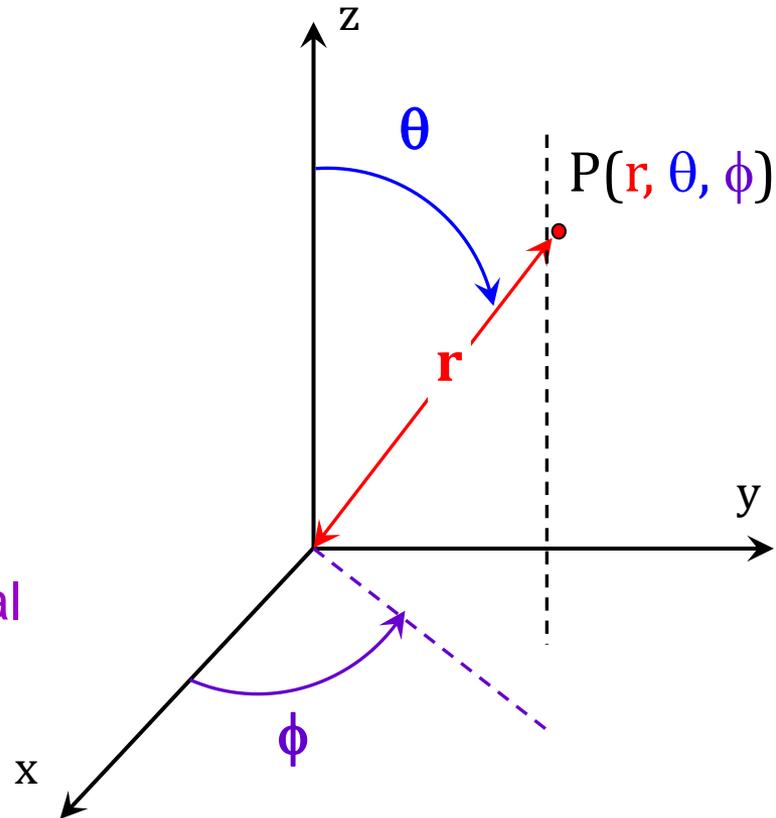
- Campo elétrico (E) e campo magnético (H)
  - Transversais entre si
  - Transversais à direção de propagação
- Exemplo
- Coordenadas cartesianas

Transversais  $\Rightarrow$   
perpendiculares



# CAMPO DISTANTE RADIADO

- Antenas → sistema de coordenadas esféricas  $(r, \theta, \phi)$
- Antena na origem
- Um ponto  $P \forall$  é especificado por:
  - $r$  : distância até a origem
  - $\theta$  : ângulo de elevação ou altitude
    - medido em relação ao eixo  $z$
    - sentido: eixo  $z \rightarrow$  plano  $xy$
  - $\phi$  : ângulo de azimute ou horizontal
    - medido em relação ao eixo  $x$
    - sentido: eixo  $x \rightarrow$  eixo  $y$



Onda TEM →

Campo elétrico:  $E_\theta$  e/ou  $E_\phi$  ( $E_r=0$ )

Campo magnético:  $H_\theta$  e/ou  $H_\phi$  ( $H_r=0$ )

# CAMPO DISTANTE RADIADO

- Onda TEM no espaço livre
  - Na direção  $r$  da propagação:  $E_r = 0$  e  $H_r = 0$
- Campo elétrico distante

$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = [E_\theta(r, \theta, \phi) \cdot \hat{\theta} + E_\phi(r, \theta, \phi) \cdot \hat{\phi}]$$

- Campo magnético distante

$$\vec{H}_\phi = \frac{E_\theta}{\eta_0} \cdot \hat{\phi}$$

e

$$\vec{H}_\theta = -\frac{E_\phi}{\eta_0} \cdot \hat{\theta}$$

sendo  $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$

# CAMPO DISTANTE RADIADO

- Zona de campo distante → onda TEM
  - Amplitude de  $E \propto 1/r$
  - Fase de  $E \propto e^{-j.k_0.r}$

$$k_0 = \frac{2.\pi}{\lambda_0}$$
$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = [E_\theta(r, \theta, \phi) \cdot \hat{\theta} + E_\phi(r, \theta, \phi) \cdot \hat{\phi}]$$



$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = [F_\theta(\theta, \phi) \cdot \hat{\theta} + F_\phi(\theta, \phi) \cdot \hat{\phi}] \cdot \frac{e^{-j.k_0.r}}{r}$$

- $F_\theta(\theta, \phi)$  } • Funções do diagrama de radiação da antena  
 $F_\phi(\theta, \phi)$  } • Só dependem de  $\theta$  e  $\phi$

# CAMPO DISTANTE RADIADO

- Densidade de potência radiada

- Potência que atravessa uma área unitária  $\Rightarrow$  W/m<sup>2</sup>
- Vetor de Poynting instantâneo
  - Densidade de potência instantânea

$$\vec{S}(t) = \vec{E}(t) \times \vec{H}(t)^*$$

- Valor médio temporal da densidade de potência  $\Rightarrow$  W/m<sup>2</sup>

$$S_{\text{médio}} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}_s \times \vec{H}_s^*]$$

$\left. \begin{array}{l} \vec{E}_s \\ \vec{H}_s \end{array} \right\}$  Fasores

•  $E_s \propto 1/r$      $H_s \propto 1/r$      $\rightarrow$      $S_{\text{médio}}$  decai com  $1/r^2$

- Como na Equação de Transmissão de Friis

# CAMPO DISTANTE RADIADO

## • INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

- Intensidade do campo EM radiado pela antena,  $U(\theta, \phi)$

$$U(\theta, \phi) = r^2 \cdot S_{\text{m\u00e9dio}} \quad (\text{Pot\u00eancia})/(\text{\u00c2ngulo s\u00f3lido}), \text{ p.e. (W/st)}$$

Densidade de pot\u00eancia  $S_{\text{m\u00e9dio}} \propto 1/r^2$

- Logo,  $U(\theta, \phi)$  n\u00e3o depende de  $r$
- Depende somente de  $\theta$  e  $\phi$
- Informa como a radia\u00e7\u00e3o se distribui ao redor da antena
- Em qualquer dire\u00e7\u00e3o  $(\theta, \phi)$
- A uma dist\u00e2ncia constante da antena

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

- Denominações
  - Diagrama de radiação da antena
  - Diagrama da antena
- Definição

“É uma **função matemática** ou **representação gráfica** das **propriedades de radiação da antena** em **função das coordenadas espaciais**”
- Propriedades de radiação da antena
  - Intensidade de radiação
  - Intensidade de campo (amplitude)
  - Diretividade, ganho
  - Fase, polarização, etc.

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

- Formato do diagrama de radiação
  - Na região de campo próximo: varia com a distância
  - Na região de campo distante: não depende da distância
- Representação do diagrama de radiação
  - Equação ou gráfico, representado
    - “Distribuição bidimensional ou tridimensional da energia radiada pela antena em função da posição de um observador ao longo de um percurso ou superfície de raio constante”

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

- Tipos de diagramas de radiação
  - Diagrama de campo (em escala linear)
    - Magnitude do campo elétrico ou magnético →  $|E|$  ou  $|H|$
    - Em função do espaço angular
  - Diagrama de potência (em escala linear)
    - Quadrado da magnitude do campo elétrico ou magnético →  $|E|^2$  ou  $|H|^2$
    - Em função do espaço angular
  - Diagrama de potência normalizado (em decibéis)
    - Magnitude do campo elétrico ou magnético em decibéis →  $10.\log|E/E_{MAX}|^2$  ou  $10.\log|H/H_{MAX}|^2$
    - Em função do espaço angular

**Em geral:** valores normalizados em relação ao máximo

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Tridimensional – 3D  
Coordenadas esféricas

Corte bidimensional – 2D  
Coordenadas polares

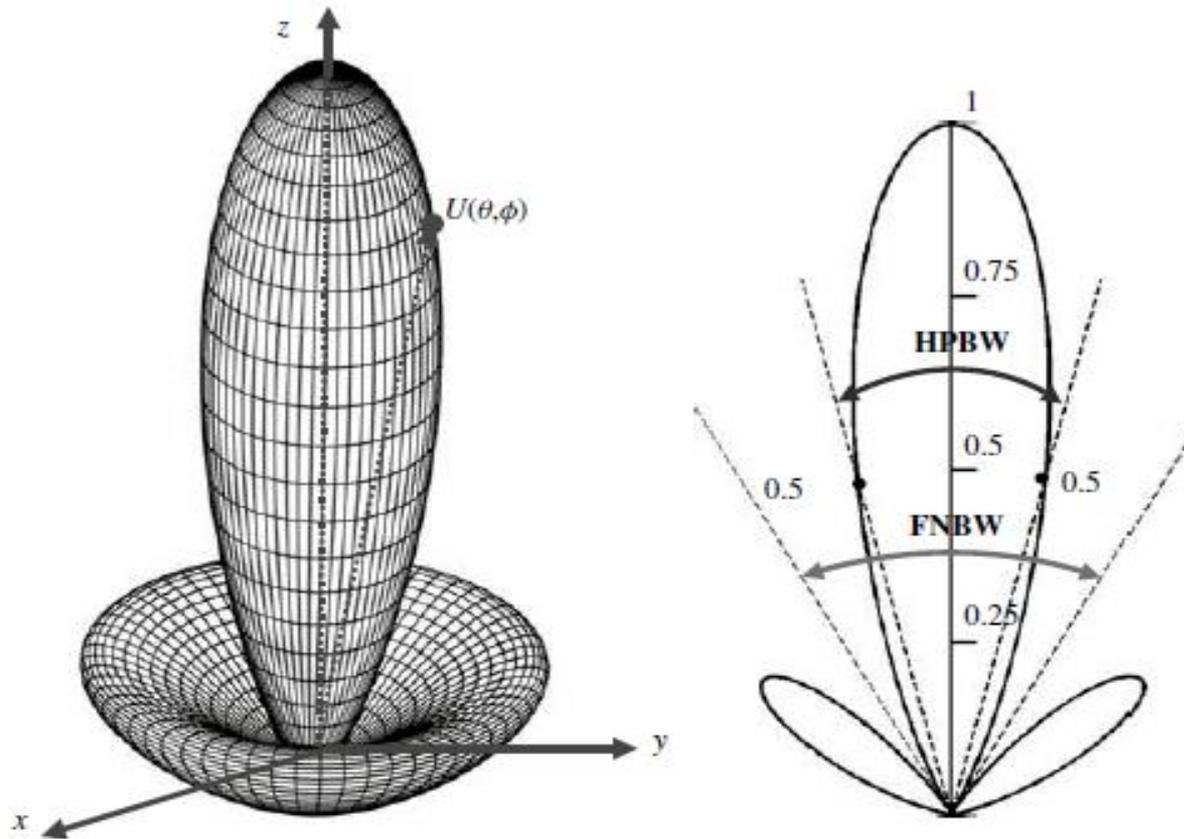
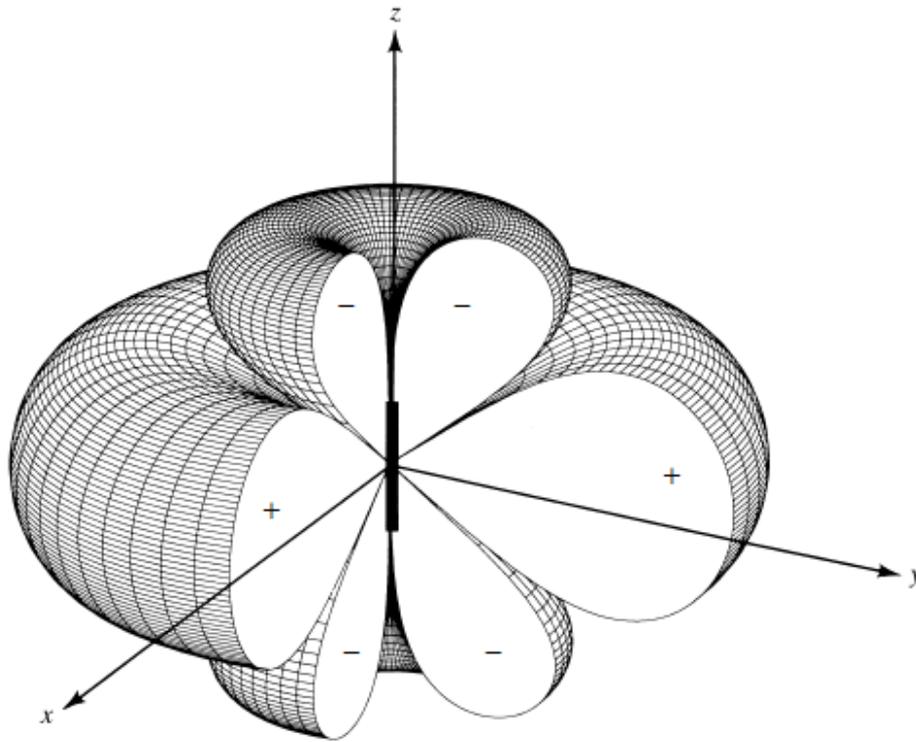


Fig 2.11 – Balanis – Arranjo de antenas

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Tridimensional – 3D  
Coordenadas esféricas



Corte bidimensional – 2D  
Coordenadas polares

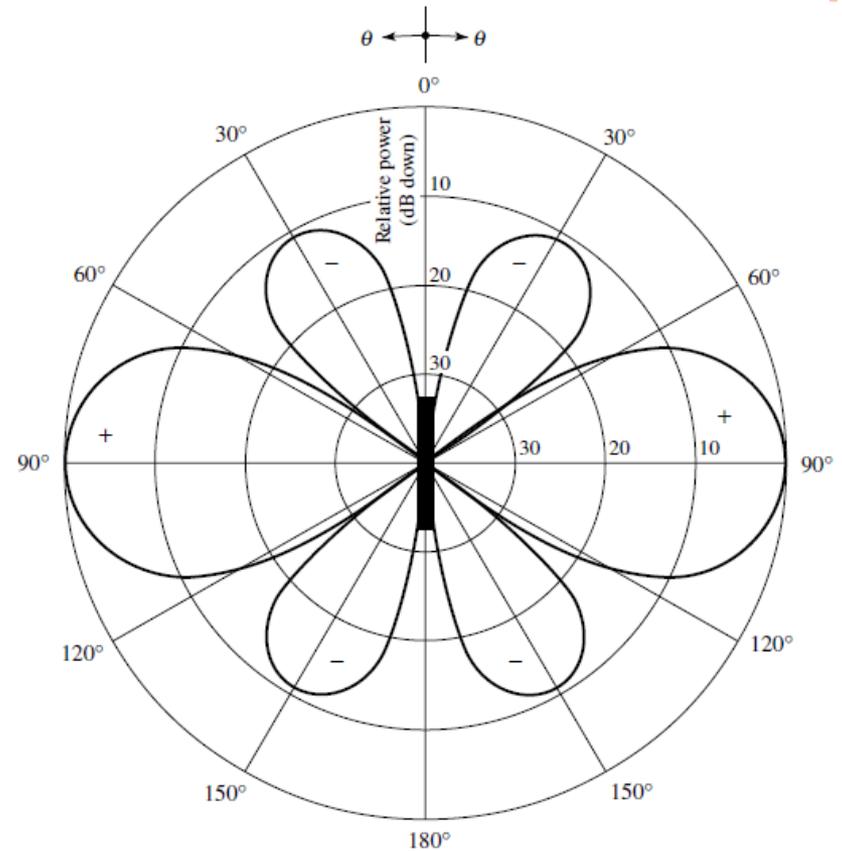


Fig 4.7 – Balanis – Dipolo com comprimento de  $1,25\lambda$

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Representações do corte bidimensional – 2D

- Intensidade de radiação *versus* ângulo

Gráfico polar

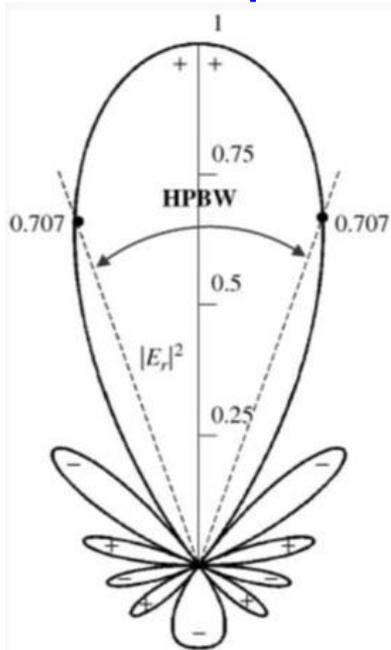


Fig 2.2a - Balanis

Gráfico cartesiano

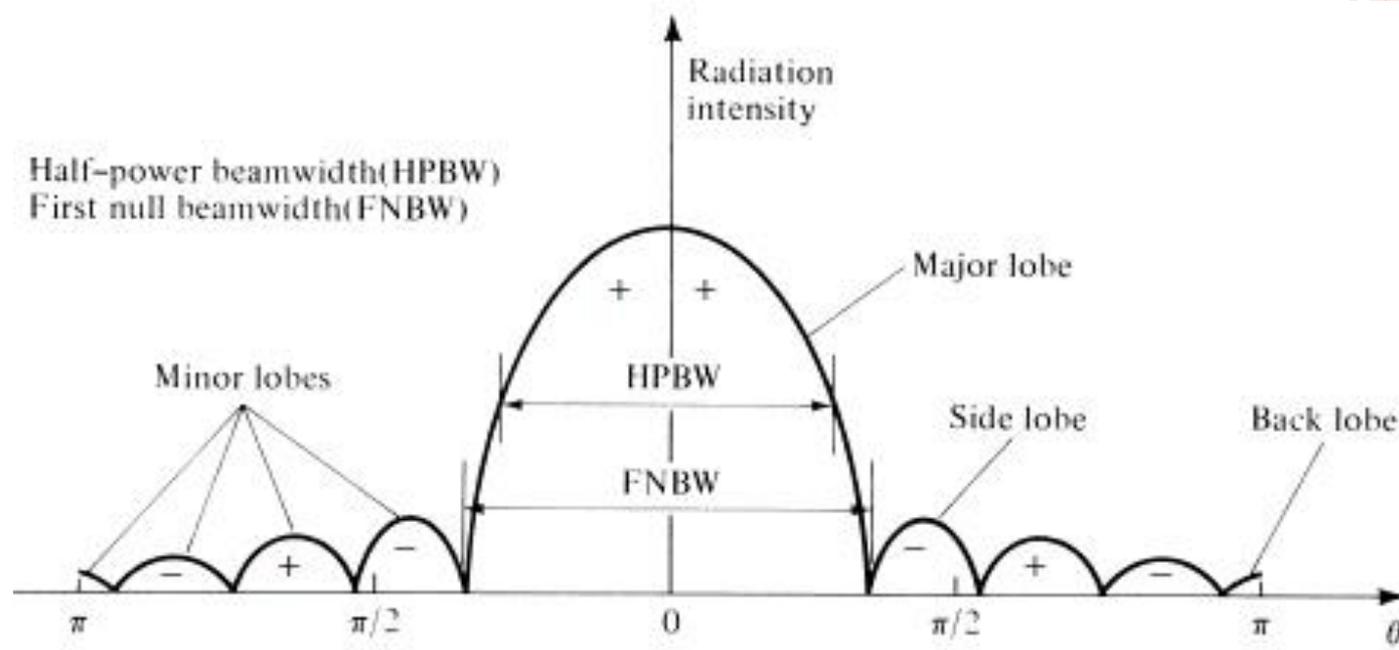


Fig 2.3b - Balanis

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Elementos do diagrama de radiação

- **Lóbulos ou lobos**
  - Porção do diagrama de radiação limitada por regiões de intensidade de radiação relativamente fraca
- **Tipos de lóbulos**
  - Principal
    - Máxima radiação
    - Largura de Feixe de Meia Potência
  - Secundário
    - Lateral
    - Posterior
- **Zeros ou nulos**
  - Pontos de mínima radiação

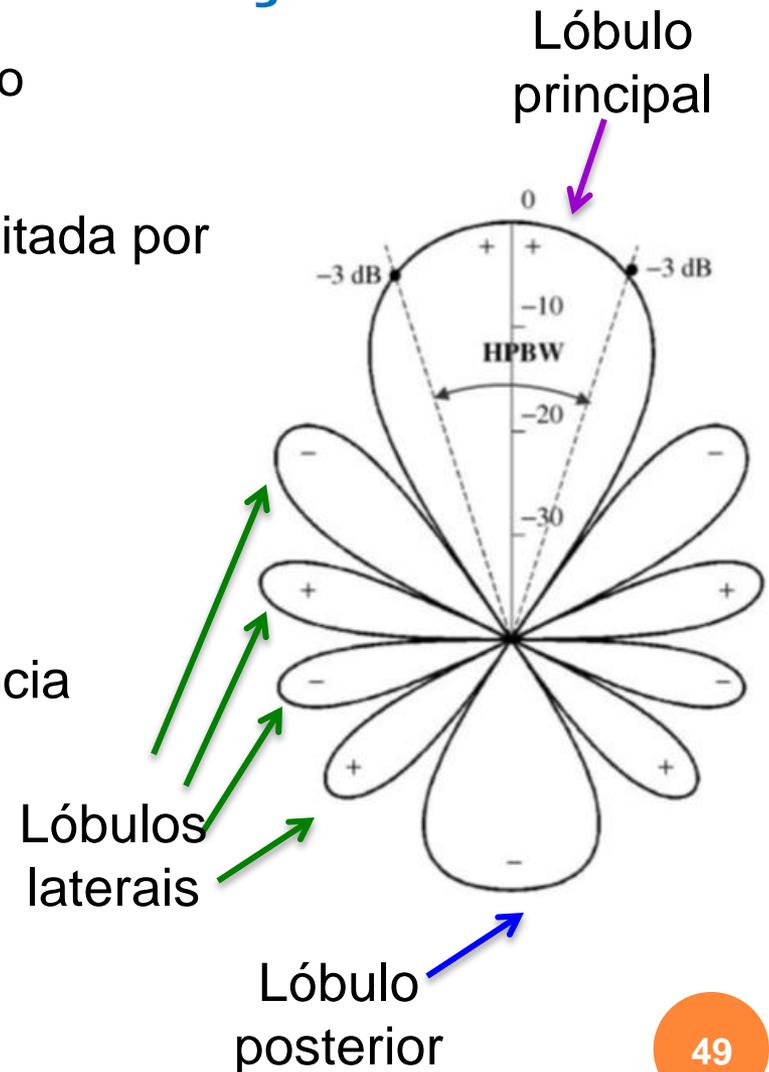


Fig 2.2c - Balanis

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Largura de Feixe de Meia Potência → LFMP

ou

Half Power Beam Width → HPBW

- Medida no lóbulo principal
- Separação angular entre pontos de amplitude de campo de  $\sqrt{2} = 0,707$  do máximo
- Separação angular entre pontos de potência ( $|E^2|$  ou  $|H^2|$ ) de 0,5 do máximo
- Separação angular entre pontos de potência normalizada em dB ( $10.\log|E/E_{MAX}|^2$  ou  $10.\log|H/H_{MAX}|^2$ ) de -3 dB
- Para uma mesma antena → o mesmo valor de LFMP

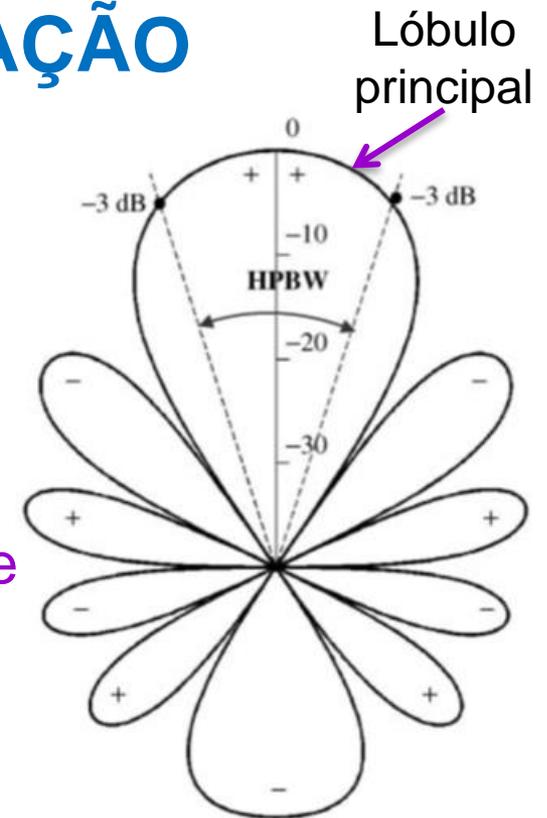


Fig 2.2c - Balanis

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

- Exemplo - Arranjo de antenas, com LFMP = **38,64°**

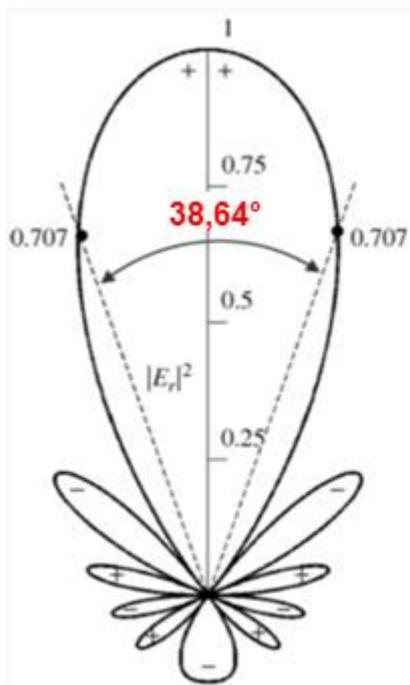


Diagrama de campo  
 $|E|$

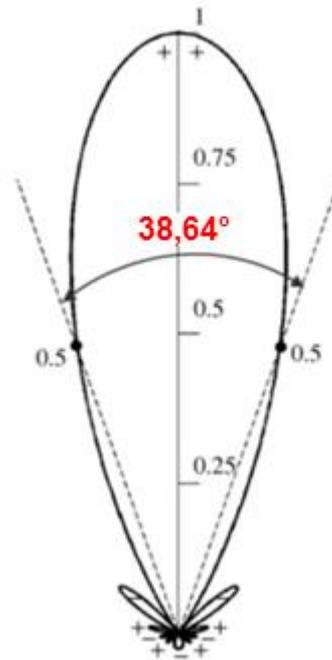


Diagrama de potência  
 $|E|^2$  (linear)

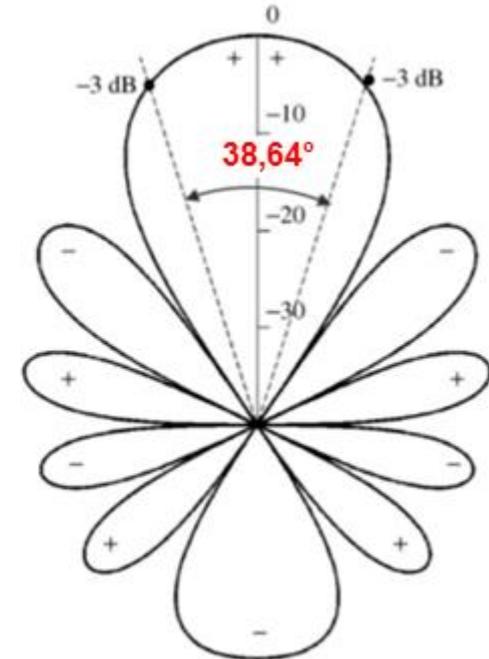


Diagrama de potência  
 $10.\log |E/E_{MAX}|^2$  (dB)

Fig 2.2 - Balanis

# DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

- **Diagramas de radiação da antena**
  - Gráfico tridimensional – 3D
    - Pode ser reduzido a cortes bidimensionais
  - Cortes bidimensionais – 2D
    - Gráficos de  $F_\theta$  para onda polarizada segundo  $\theta$  (elevação)
      - Diagrama de radiação de elevação
      - Para um dado ângulo  $\phi$  de azimute
    - Gráficos de  $F_\phi$  para onda polarizada segundo  $\phi$  (azimute)
      - Diagrama de radiação azimutal
      - Para um dado ângulo  $\theta$  de elevação

# • POTÊNCIA TOTAL RADIADA

- Calculada a partir da intensidade de radiação
- Conhecida a intensidade de radiação,  $U(\theta, \phi)$ 
  - Integra-se  $U(\theta, \phi)$
  - sobre todo o ângulo sólido da esfera que contenha a antena

$$P_{rad} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

- $U(\theta, \phi) \rightarrow$  [potência]/[ângulo sólido]  $\rightarrow W/sr$  ou  $W/rad^2$
- $P_{rad} \rightarrow$  [potência]  $\rightarrow W$

# DIRETIVIDADE DA ANTENA

- Diretividade da antena na direção de máxima radiação

- Razão entre

- Intensidade de radiação máxima  $\rightarrow U_{MAX}$

- Intensidade de radiação média  $\rightarrow U_{MEDIA}$

$$D = \frac{U_{MAX}}{U_{MEDIA}}$$

- Intensidade de radiação média

- Razão entre

- Potência total radiada pela antena  $\rightarrow P_{rad}$

- Ângulo sólido da esfera contendo a antena  $\rightarrow 4\pi$

$$U_{MEDIA} = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

# DIRETIVIDADE DA ANTENA

$$D = \frac{U_{MAX}}{U_{MEDIA}} = 4\pi \frac{U_{MAX}}{P_{rad}}$$

- Mas

$$P_{rad} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

- Logo

$$D = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi}$$

# DIRETIVIDADE DA ANTENA ISOTRÓPICA

- Antena hipotética, não realizável
- Radia igualmente em todas as direções →  $U(\theta, \phi) = U_{MAX} = \text{constante}$

$$D = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi}$$

$$\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = U_{MAX} \cdot \underbrace{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi}_{4\pi} = 4\pi \cdot U_{MAX}$$

Ângulo sólido da esfera:  $4 \cdot \pi$

$$D = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi} = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{4\pi \cdot U_{MAX}} = 1 \quad (0 \text{ dB})$$

# DIRETIVIDADE DO DIPOLO INFINITESIMAL

- Dipolo com comprimento  $< \lambda/50$

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) = V_0 \cdot \text{sen } \theta \cdot \frac{e^{-j \cdot k_0 \cdot r}}{r} \quad (\text{V/m})$$

$$E_{\phi}(r, \theta, \phi) = 0$$

- Intensidade de radiação

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta_0} \cdot [ |E_{\theta}|^2 + |E_{\phi}|^2 ] = \frac{V_0^2}{2 \cdot \eta_0} \cdot \text{sen}^2 \theta$$

*Sendo,*

$$U_{MAX} = \frac{V_0^2}{2 \cdot \eta_0} \Rightarrow U(\theta, \phi) = U_{MAX} \cdot \text{sen}^2 \theta$$

# DIRETIVIDADE DO DIPOLO INFINITESIMAL

- Diretividade

$$D = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\phi} = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U_{MAX} \cdot \text{sen}^3 \theta \cdot d\theta \cdot d\phi}$$

Denominador:  $U_{MAX} \cdot \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \text{sen}^3 \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = 2\pi \cdot U_{MAX} \cdot \int_{\theta=0}^{\pi} \text{sen}^3 \theta \cdot d\theta$

De tabelas de integrais, tem-se  $\int_{\theta=0}^{\pi} \text{sen}^3 \theta \cdot d\theta = 4/3$  .:

$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot U_{MAX}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U_{MAX} \cdot \text{sen}^3 \theta \cdot d\theta \cdot d\phi} = \frac{4\pi \cdot U_{MAX}}{8\pi \cdot U_{MAX} / 3} = 1,5$$

$$D(dB) = 10 \cdot \log(D) = 1,67 \text{ dB}$$

# LARGURA DE FEIXE DO DIPOLO INFINITESIMAL

- Largura de Feixe de Meia Potência
  - Ângulo para o qual  $U \geq 0,5.U_{MAX}$

$$U(\theta, \phi) = U_{MAX} \cdot \text{sen}^2 \theta$$

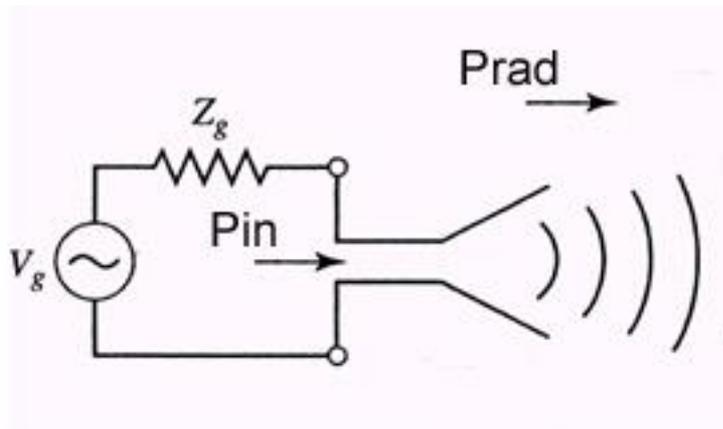
$$U(\theta, \phi) \geq 0,5.U_{MAX} \Rightarrow \text{sen}^2 \theta \geq 0,5$$

$$\text{sen}^2 \theta \geq 0,5 \Rightarrow \theta \text{ entre } 45^\circ \text{ e } 135^\circ$$

$$U(\theta, \phi) \geq 0,5.U_{MAX} \text{ para } 45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$$

$$\therefore LFMP = 135^\circ - 45^\circ = 90^\circ$$

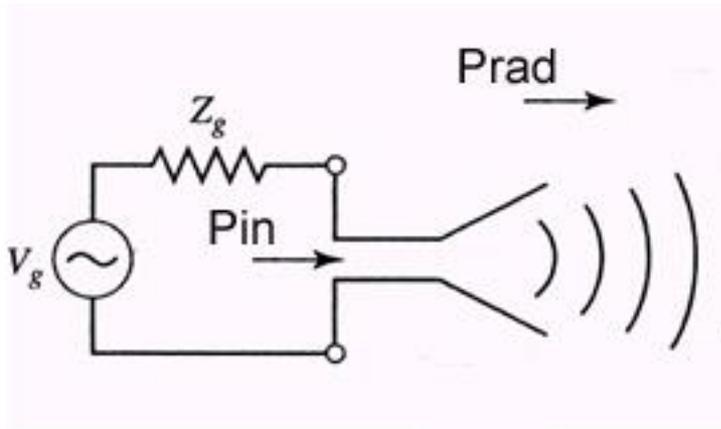
# EFICIÊNCIA DE RADIAÇÃO



- $P_{in}$ : potência na entrada da antena
- $P_{rad}$ : potência radiada pela antena

- Condição ideal  $\Rightarrow P_{rad} = P_{in}$
- Na prática  $\Rightarrow P_{rad} < P_{in}$
- Causa
  - Perdas ôhmicas ou dielétricas na estrutura da antena
  - $P_{loss}$ : potência dissipada na antena

# Eficiência de Radiação



- $P_{in}$ : potência na entrada da antena
- $P_{rad}$ : potência radiada pela antena
- $P_{loss}$ : potência dissipada na antena

- Eficiência de radiação

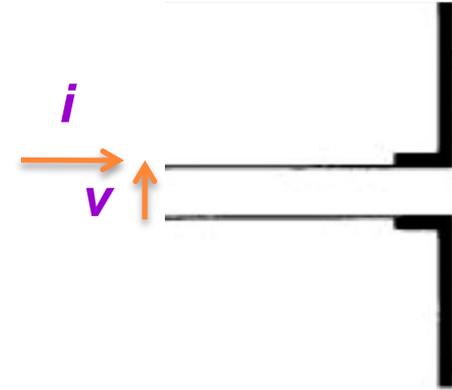
$$e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}}$$

$$0 \leq e_{rad} \leq 1 \quad \text{ou} \quad 0 \leq e_{rad} (\%) \leq 100 (\%)$$

# IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

## Impedância de entrada da antena

- Sendo
  - $i$   $\Rightarrow$  corrente na entrada da antena
  - $V$   $\Rightarrow$  tensão na entrada da antena
  - $Z_A$   $\Rightarrow$  Impedância da antena



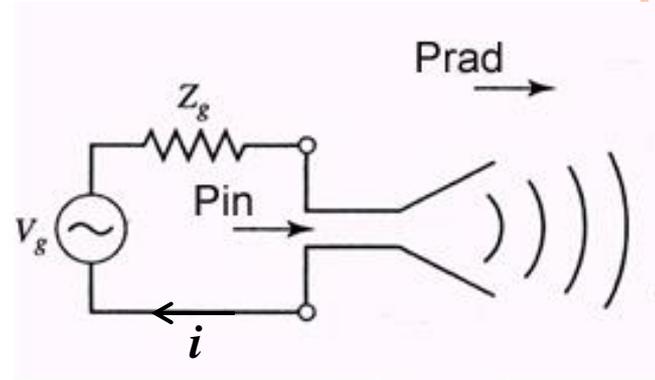
$$Z_A = \frac{v}{i} = R_A + j \cdot X_A$$

- $R_A$   $\Rightarrow$  resistência de entrada da antena
- $X_A$   $\Rightarrow$  reatância de entrada da antena

# IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

$$R_A = R_{rad} + R_{loss}$$

- $R_{rad} \Rightarrow$  resistência de radiação da antena
- $R_{loss} \Rightarrow$  resistência de perdas da antena



$$P_{rad} = R_{rad} \cdot i^2 \quad e \quad P_{loss} = R_{loss} \cdot i^2$$

- Eficiência de radiação

$$e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}}$$

# GANHO

- Ganho da antena

$$G = e_{rad} \cdot D$$

- **D** – Diretividade
  - Função da forma do campo radiado
- **e<sub>rad</sub>** – Eficiência de radiação
  - Considera perdas na estrutura da antena
- Antenas reais

$$0 \leq e_{rad} \leq 1 \quad \longrightarrow \quad G \leq D$$

# GANHO

- **Exemplo**

Qual o ganho de uma antena com  $D = 30$  dB e  $e_{\text{rad}} = 70\%$ ?

- Cálculo do **ganho linear**

- $D = 30$  dB  $\rightarrow D(\text{linear}) = 10^{30/10} = 1.000$

- $G = e_{\text{rad}} \cdot D = 0,7 \cdot 1000 = 700$

- Cálculo do **ganho em decibéis**

- $G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(e_{\text{rad}} \cdot D) = 28,45$  dB

ou

$$\begin{aligned} G(\text{dB}) &= D(\text{dB}) + 10 \cdot \log(e_{\text{rad}}) \\ &= 30 - 1,55 = 28,45 \text{ dB} \end{aligned}$$

# ÁREA EFETIVA

- **Em antenas de abertura operando como transmissoras**

- Antenas nas quais a área onde ocorre a radiação é bem definida
  - Antenas cornetas
  - Antenas com refletores parabólicos
  - Arranjos de antenas
- Nesse caso, a diretividade é

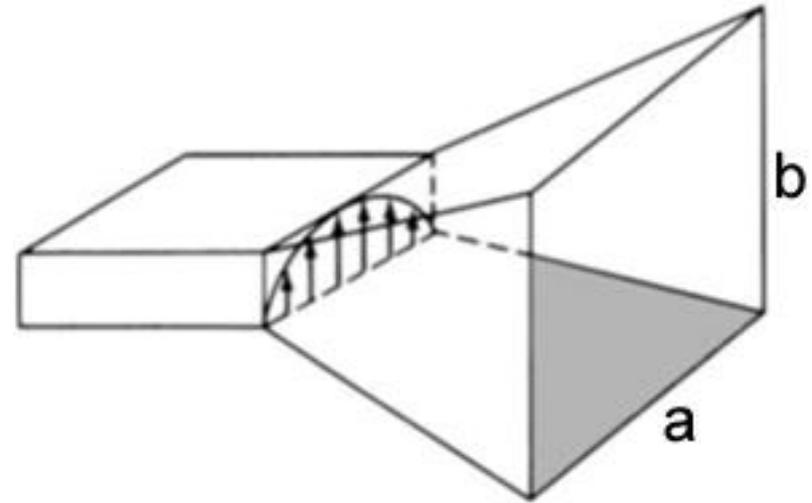
$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{\lambda^2}$$

- A: área física da abertura da antena
- $\lambda$ : comprimento de onda do sinal radiado

# ÁREA EFETIVA

- **Exemplo**

- Antena corneta
- Dimensões da abertura
- $a = 3.\lambda$  e  $b = 2.\lambda$



- Nesse caso

$$D_{MAX} = \frac{4.\pi.A}{\lambda^2} = \frac{4.\pi.(2.\lambda).(3.\lambda)}{\lambda^2} = 24.\pi$$

$$D_{MAX} = 75,4 \text{ ou } D_{MAX} (dB) = 18,77 \text{ dB}$$

# ÁREA EFETIVA

- **Definida para antena receptora**
- Área efetiva
  - Área de captura do campo EM incidente
  - Área que intercepta a densidade de potência
- Pode-se expressar a potência recebida pela antena por

$$P_r = A_e \cdot S_{MEDIA}$$

- $P_r$       potência recebida pela antena
- $S_{MEDIA}$       densidade de potência incidente
- $A_e$       área efetiva da antena

# ÁREA EFETIVA

- Dada uma antena
  - com **diretividade D**,
  - sua **área efetiva  $A_e$** 
    - equivale a área de uma antena de abertura
    - que capta a mesma potência
    - quando exposta à mesma densidade de potência

$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_e}{\lambda^2}$$



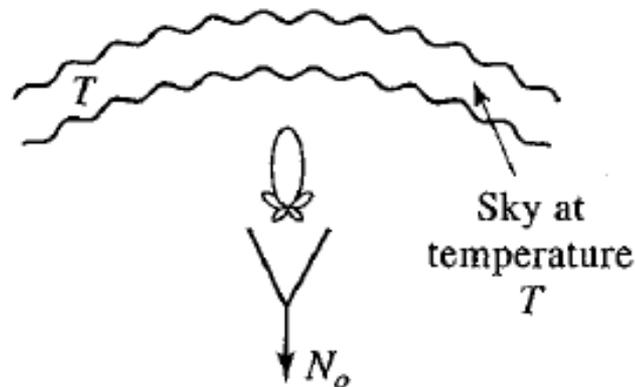
$$A_e = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot D$$

# TEMPERATURA DE RUÍDO DA ANTENA

- A potência de ruído que a antena entrega ao receptor depende

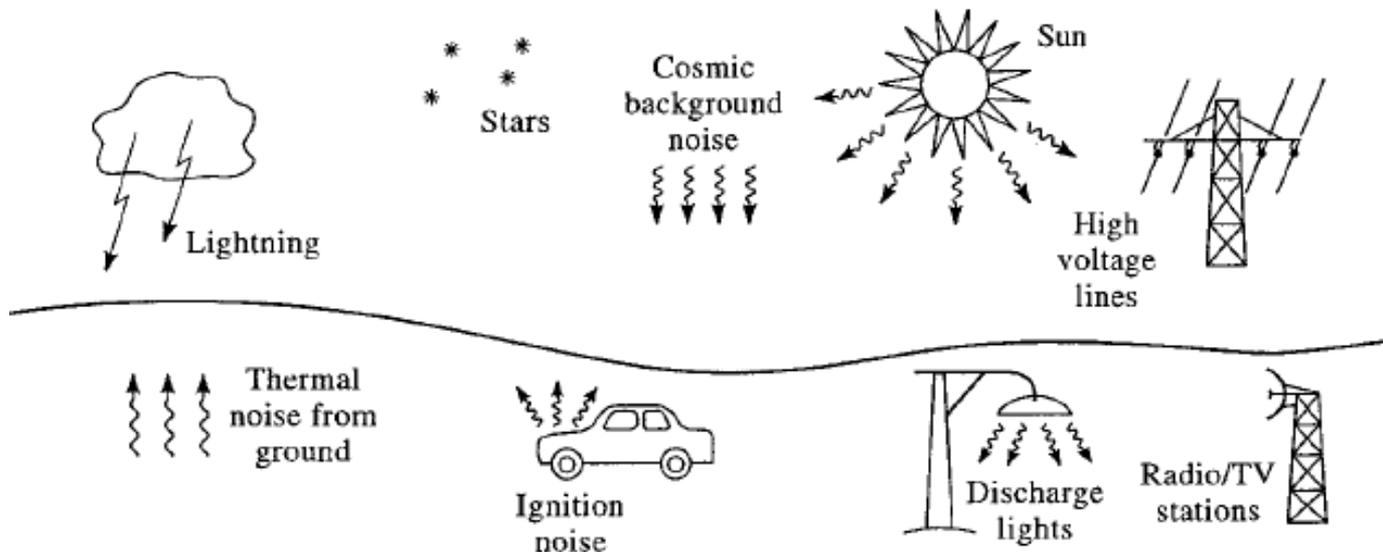
- Depende do ruído captado pela antena
- Da resistência de perdas da antena  $R_{loss}$

$R_{loss} \neq 0 \rightarrow$  eficiência de radiação da antena  $\eta_{rad} < 1$



# TEMPERATURA DE RUÍDO DA ANTENA

- Fontes de ruídos captados pela antena
  - Ruído de fundo cósmico e radiação de estrelas
  - Ruído térmico do solo
  - Descargas elétricas – raios, ignição de carros, lâmpadas
  - Sinais de estações de rádio, TV, sistemas de comunicação sem fio,...



# TEMPERATURA DE RUÍDO DA ANTENA

- Temperatura de ruído de fundo (do ambiente)
  - *Background noise temperature* –  $T_B$
  - Temperatura (Kelvin) em que a resistência de referência do sistema gera a potência de ruído de fundo  $N$  medida na banda de frequência  $B$

$$N = k \cdot T_B \cdot B \quad K: \text{constante de Boltzmann}$$

- $T_B$  depende da direção de apontamento da antena
  - Céu, direção do zênite →  $T_B = 3$  a  $5$  K
  - Céu direção ao horizonte →  $T_B = 50$  a  $100$  K
  - Solo →  $T_B = 290$  a  $300$  K

# TEMPERATURA DE RUÍDO DA ANTENA

- Temperatura de brilho –  $T_b$ 
  - *Brightness temperature*
  - Valor médio da temperatura de ruído de fundo visto pela antena
  - Função da distribuição espacial do ruído de fundo,  $T_B(\theta, \phi)$
  - Função da diretividade da antena,  $D(\theta, \phi)$

$$T_b = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} T_B(\theta, \phi) D(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} D(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi},$$

# TEMPERATURA DE RUÍDO DA ANTENA

- Temperatura de ruído da antena –  $T_A$

$$T_A = \eta_{\text{rad}} T_b + (1 - \eta_{\text{rad}}) T_p$$

- $\eta_{\text{rad}}$  – eficiência de radiação da antena
- $T_b$  – temperatura de brilho
- $T_p$  – temperatura de ruído relacionada ao ruído gerado pelas perdas ôhmicas da antena