

# Taller de Comunicaciones Eléctricas

## Introducción Laboratorio 6

Ing. Sergio Arriola-Valverde. M.Sc  
Ing. Néstor Hernández Hostaller. M.Sc  
Ing. Alexander Barrantes Muñoz. M.Sc

Escuela de Ingeniería Electrónica  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

# Contenidos y Cronograma

- Generalidades de enlaces de radio frecuencia

# Cronograma del Curso

Semana		Tema	Lugar
1		Introducción Laboratorio 1-Búsqueda Tema Proyecto Final	Virtual
2		Medición Laboratorio 1	Virtual
3		Exposición 1, Informe 1, Quiz 1, Introducción Laboratorio 2, Exposición Teórica	Virtual
4		Medición Laboratorio 2	Virtual
5		Exposición 2, Informe 2, Quiz 2, Introducción Laboratorio 3, Anteproyecto, Exposición Teórica	Virtual
6		Medición Laboratorio 3	Virtual
7		Exposición 3, Informe 3, Quiz 3, Introducción Laboratorio 4, Exposición Teórica	Virtual
8		Medición Laboratorio 4	Virtual
9		Exposición 4, Informe 4, Quiz 4, Introducción Laboratorio 5, Avance 1, Exposición Teórica	Virtual
10		Medición Laboratorio 5	Virtual
11		Exposición 5, Informe 5, Quiz 5, Introducción Laboratorio 6, Exposición Teórica	Virtual
12		Medición Laboratorio 6	Virtual
13		Exposición 6, Informe 6, Quiz 6, Avance 2 ,Exposición Teórica	Virtual
14		Trabajo en proyecto	Virtual
15-16-17		Trabajo en proyecto, Tutorial	Virtual
18		Presentación del proyecto	Virtual

# Cronograma del Curso

Semana		Tema	Lugar
1		Introducción Laboratorio 1-Búsqueda Tema Proyecto Final	Virtual
2		Medición Laboratorio 1	Virtual
3		Exposición 1, Informe 1, Quiz 1, Introducción Laboratorio 2, Exposición Teórica	Virtual
4		Medición Laboratorio 2	Virtual
5		Exposición 2, Informe 2, Quiz 2, Introducción Laboratorio 3, Anteproyecto, Exposición Teórica	Virtual
6		Medición Laboratorio 3	Virtual
7		Exposición 3, Informe 3, Quiz 3, Introducción Laboratorio 4, Exposición Teórica	Virtual
8		Medición Laboratorio 4	Virtual
9		Exposición 4, Informe 4, Quiz 4, Introducción Laboratorio 5, Avance 1, Exposición Teórica	Virtual
10		Medición Laboratorio 5	Virtual
11		<b>Exposición 5, Informe 5, Quiz 5, Introducción Laboratorio 6, Exposición Teórica</b>	<b>Virtual</b>
12		Medición Laboratorio 6	Virtual
13		Exposición 6, Informe 6, Quiz 6, Avance 2 ,Exposición Teórica	Virtual
14		Trabajo en proyecto	Virtual
15-16-17		Trabajo en proyecto, Tutorial	Virtual
18		Presentación del proyecto	Virtual

# Enlaces de Radio Frecuencia

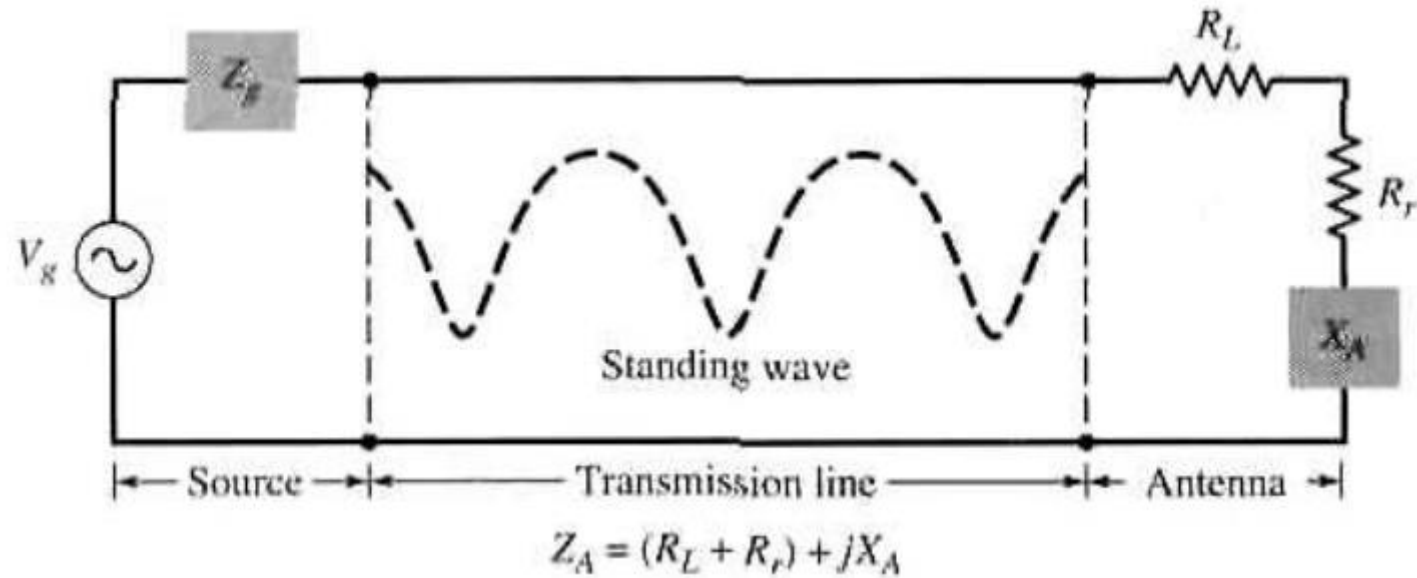
¿Que es una antena?

# Enlaces de Radio Frecuencia

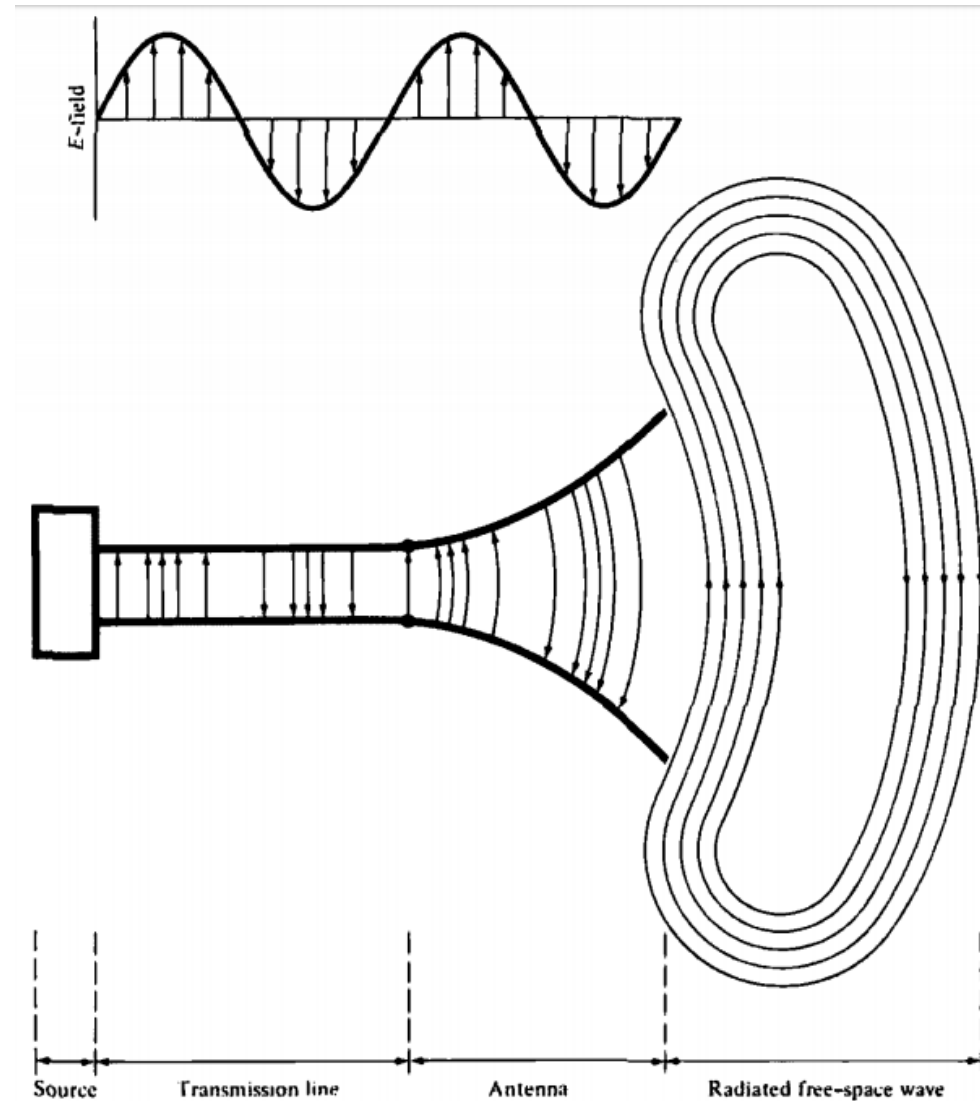
## ¿Qué es una antena?

Términos generales una antena usualmente es un elemento metálico que es utilizado para radiar o recibir ondas de radio.

# Enlaces de Radio Frecuencia



# Enlaces de Radio Frecuencia





# Enlaces de Radio Frecuencia

¿Qué tipos de antenas existen?

# Enlaces de Radio Frecuencia

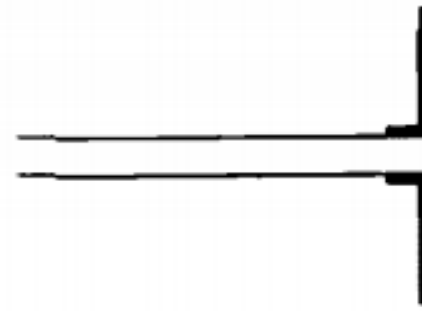
## Tipos de antenas

- Wire antenas.
- Aperture antenas.
- Microstrip.
- Array antenas.
- Reflector antenas.
- Lens antenas.

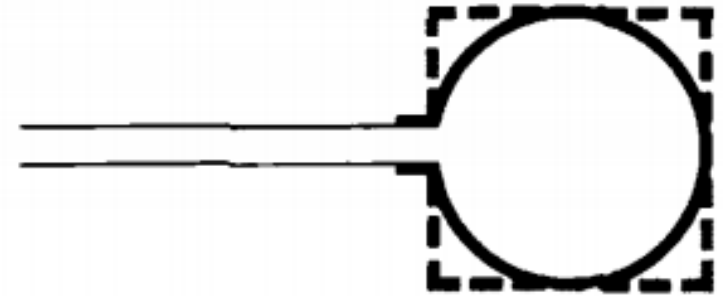
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

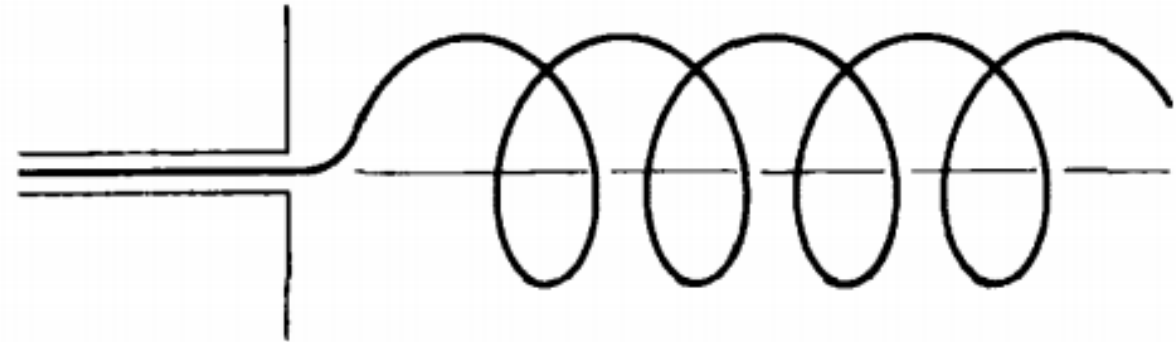
- Wire antenas.
- Aperture antennas.
- Microstrip.
- Array antennas.
- Reflector antennas.
- Lens antennas.



(a) Dipole



(b) Circular (square) loop

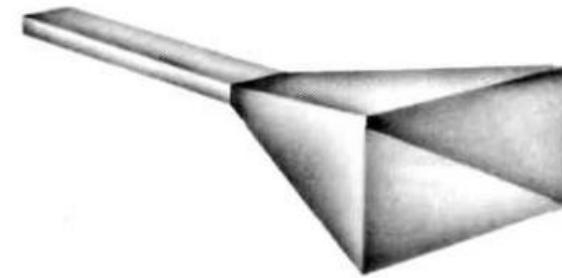


(c) Helix

# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

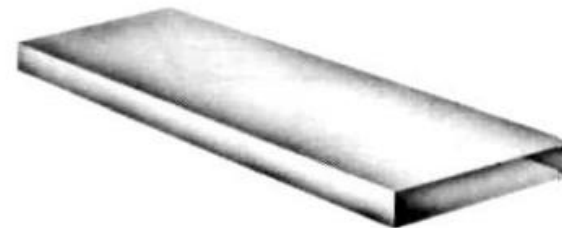
- Wire antenas.
- Aperture antennas.
- Microstrip.
- Array antennas.
- Reflector antennas.
- Lens antennas.



(a) Pyramidal horn



(b) Conical horn

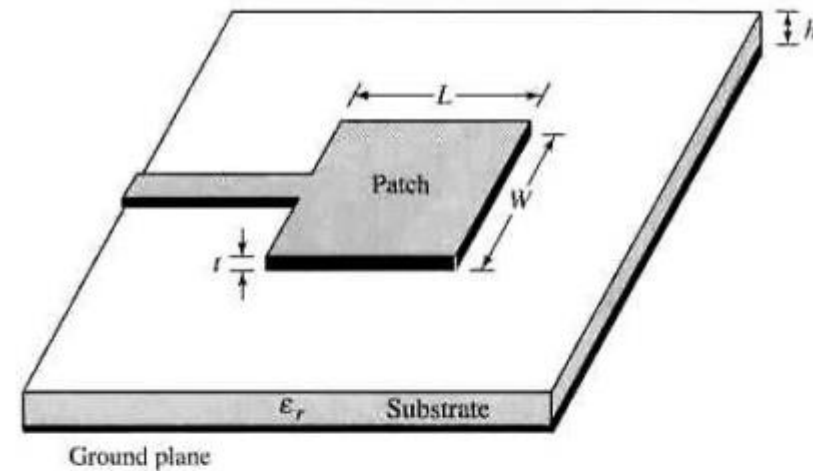


(c) Rectangular waveguide

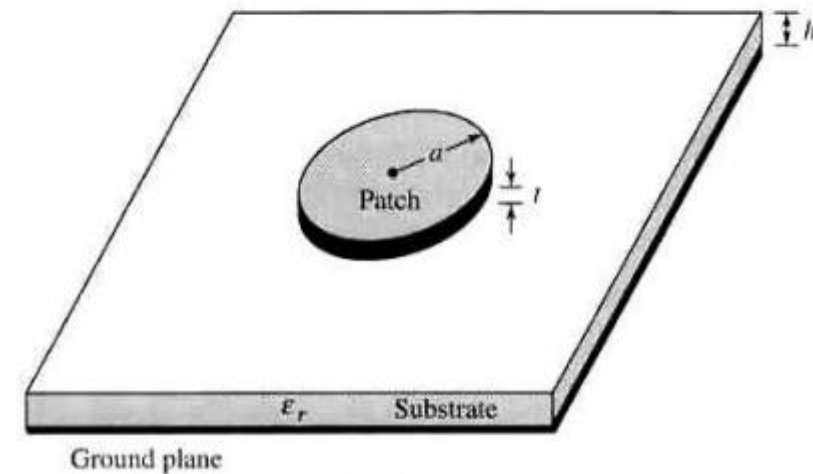
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

- Wire antenas.
- Aperture antenas.
- Microstrip.
- Array antenas.
- Reflector antenas.
- Lens antenas.



(a) Rectangular

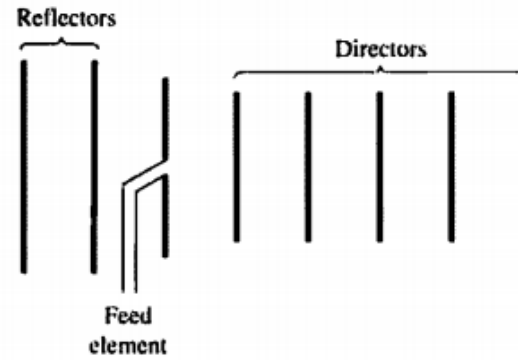


(b) Circular

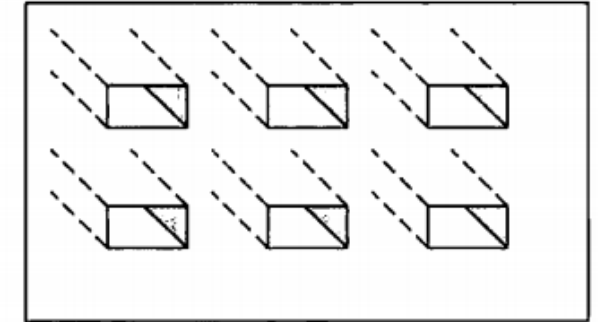
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

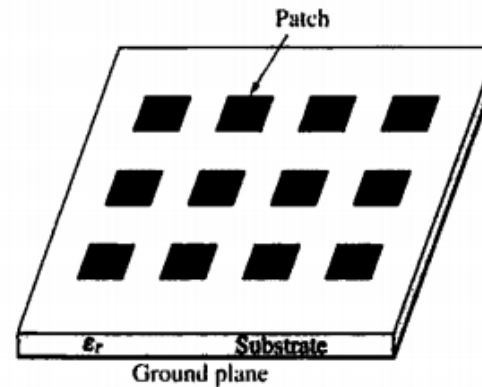
- Wire antenas.
- Aperture antennas.
- Microstrip.
- Array antennas.
- Reflector antennas.
- Lens antennas.



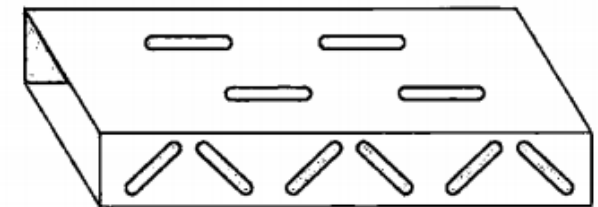
(a) Yagi-Uda array



(b) Aperture array



(c) Microstrip patch array



(d) Slotted-waveguide array

# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

- Wire antenas.
- Aperture antennas.
- Microstrip.
- Array antennas.
- Reflector antennas.
- Lens antennas.

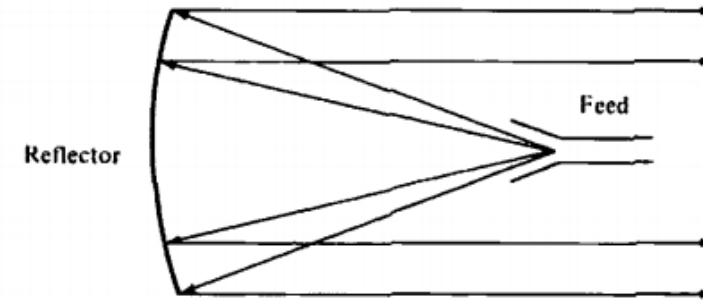


- 1) Elementos activo
- 2) Reflectores
- 3) Directores
- 4) Línea de transmisión

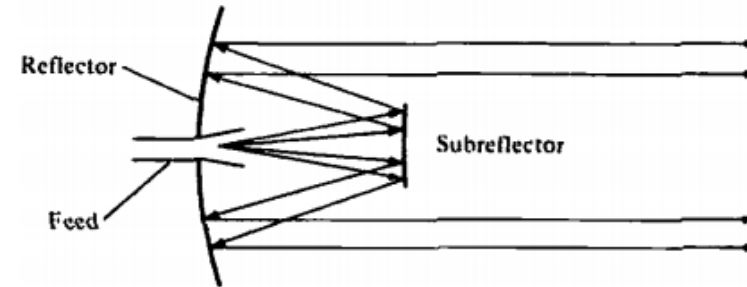
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

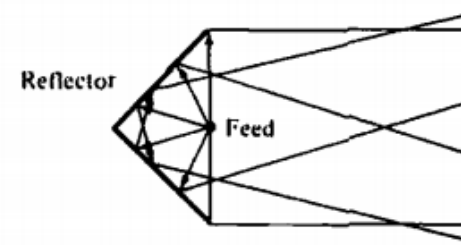
- Wire antenas.
- Aperture antennas.
- Microstrip.
- Array antennas.
- Reflector antennas.
- Lens antennas.



(a) Parabolic reflector with front feed



(b) Parabolic reflector with Cassegrain feed



(c) Corner reflector

Figure 1.7 Typical reflector configurations.



# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

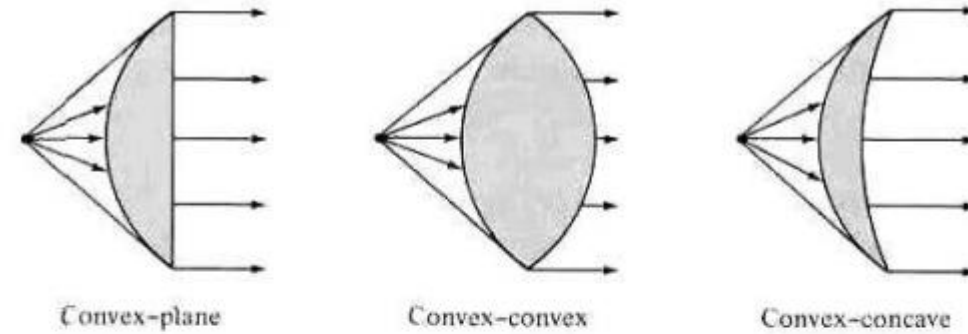
- Wire antenas.
- Aperture antenas.
- Microstrip.
- Array antenas.
- **Reflector antenas.**
- Lens antenas.



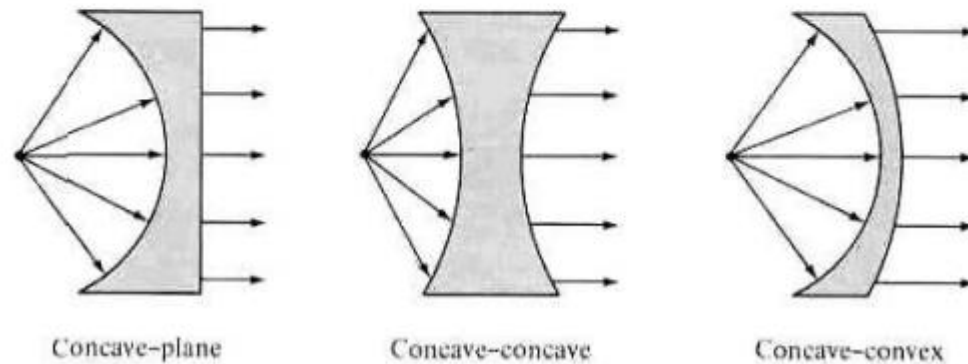
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Tipos de antenas

- Wire antenas.
- Aperture antennas.
- Microstrip.
- Array antennas.
- Reflector antennas.
- Lens antennas.



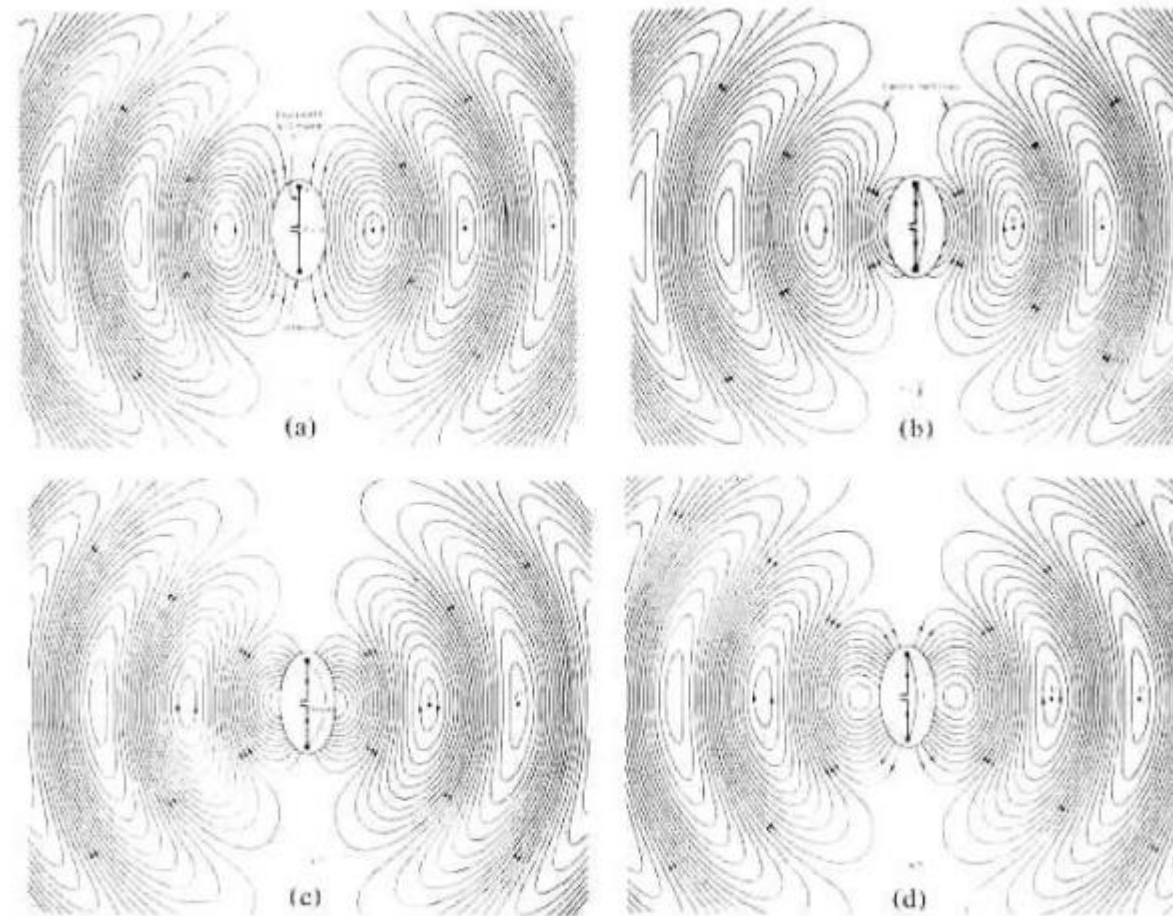
(a) Lens antennas with index of refraction  $n > 1$



(b) Lens antennas with index of refraction  $n < 1$

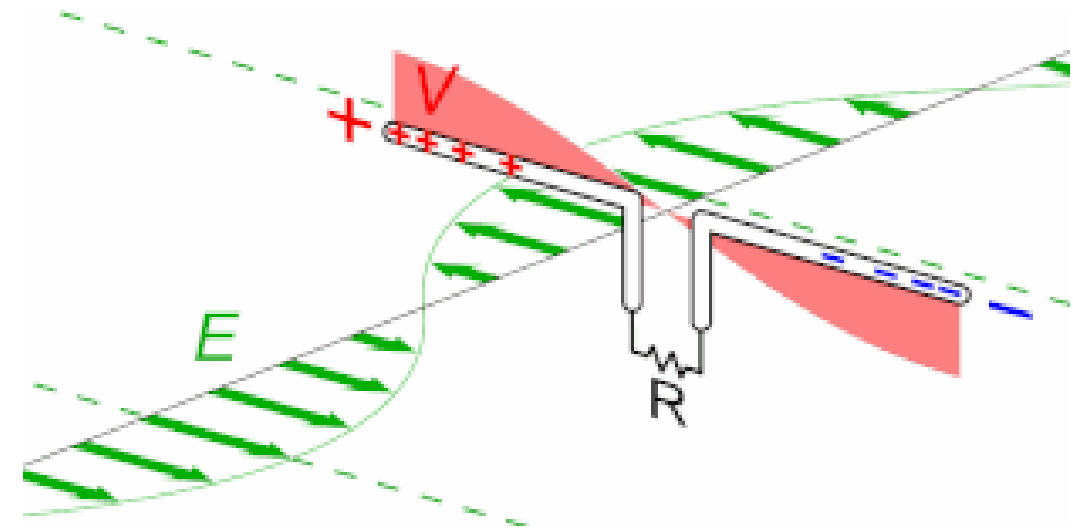
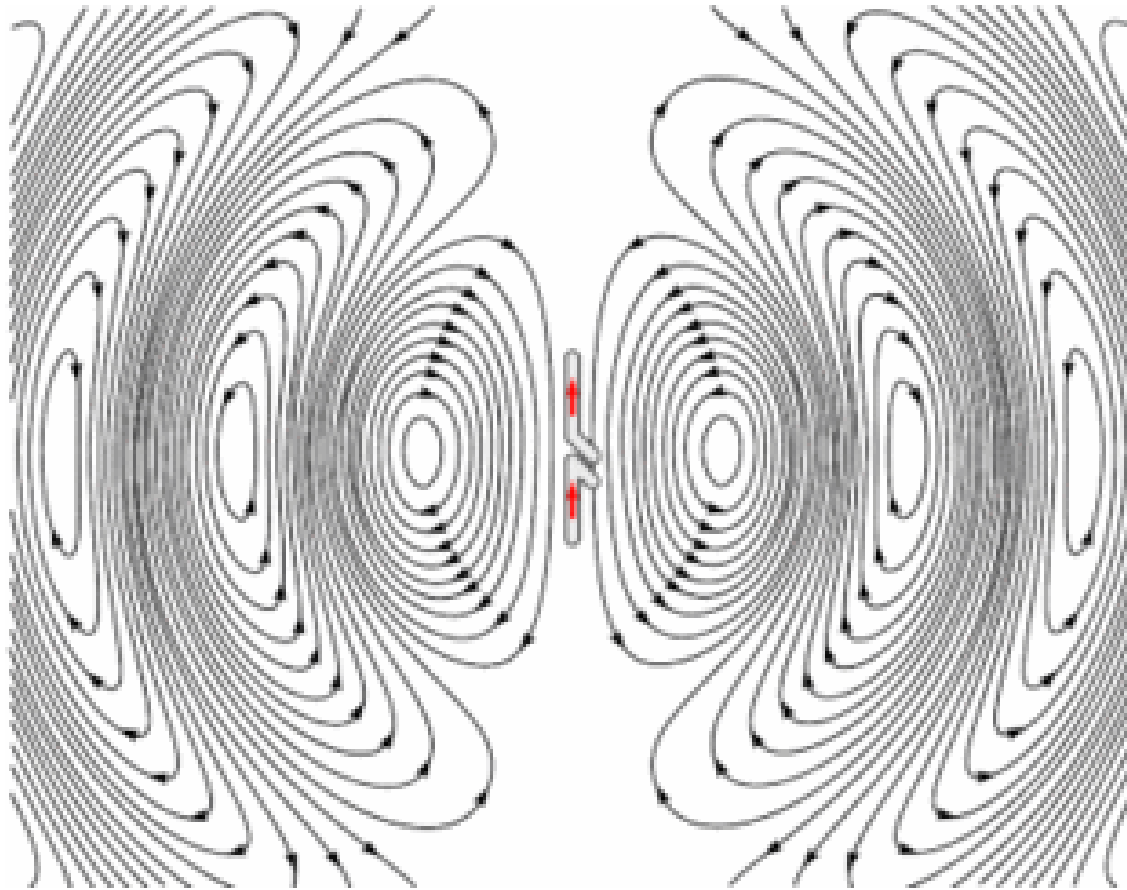


# Enlaces de Radio Frecuencia



**Figure 1.12** Electric field lines of free-space wave for a  $\lambda/2$  antenna at  $t = 0$ ,  $T/8$ ,  $T/4$ , and  $3T/8$ . (SOURCE: J. D. Kraus and K. R. Carver, *Electromagnetics*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1973. Reprinted with permission of J. D. Kraus and John D. Cowan, Jr.)

# Enlaces de Radio Frecuencia



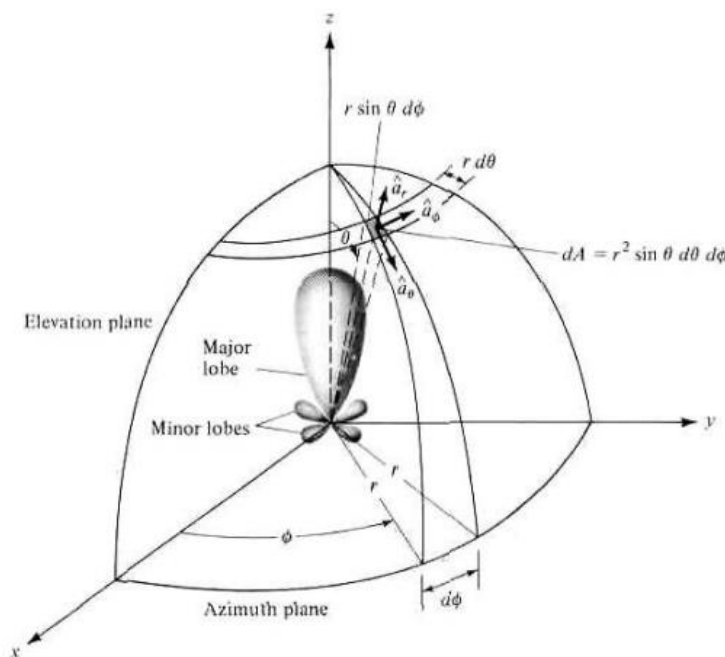
# Enlaces de Radio Frecuencia

¿Qué parámetros en cuando a rendimiento existen para analizar una antena?

# Enlaces de Radio Frecuencia

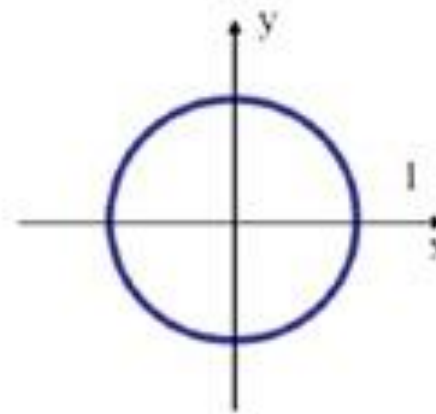
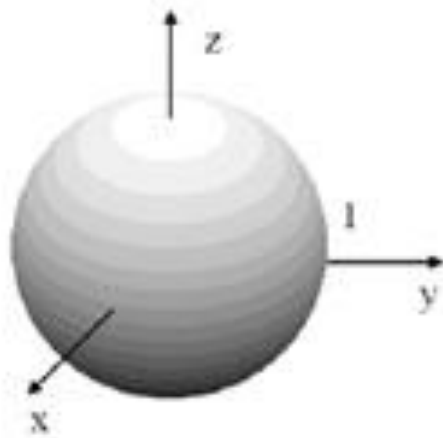
## Patrón de radiación

Es definido como una representación matemática de tipo grafica donde se visualizan las propiedades de radiación de una antena en un espacio coordenado.

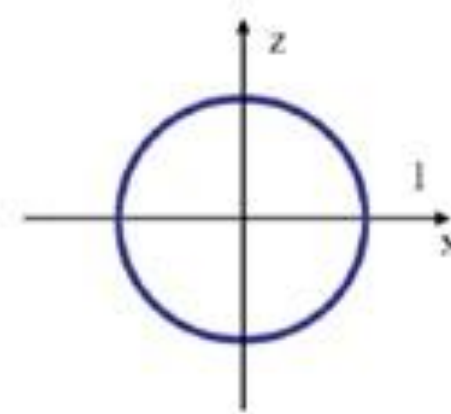


# Enlaces de Radio Frecuencia

## Patrón de radiación Isotrópico



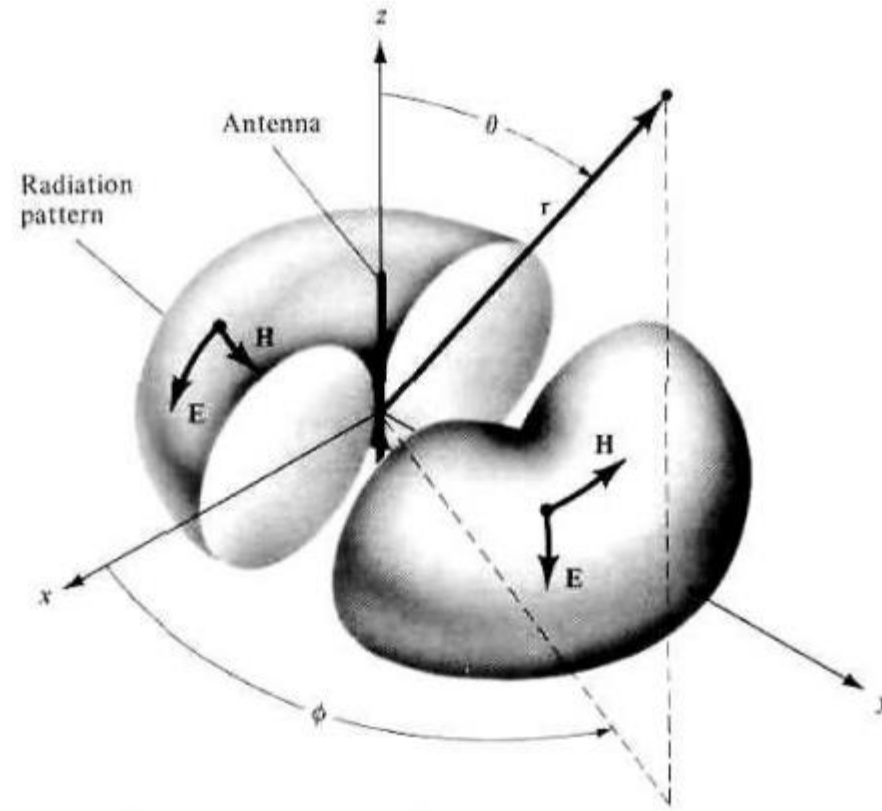
Plano H



Plano E

# Enlaces de Radio Frecuencia

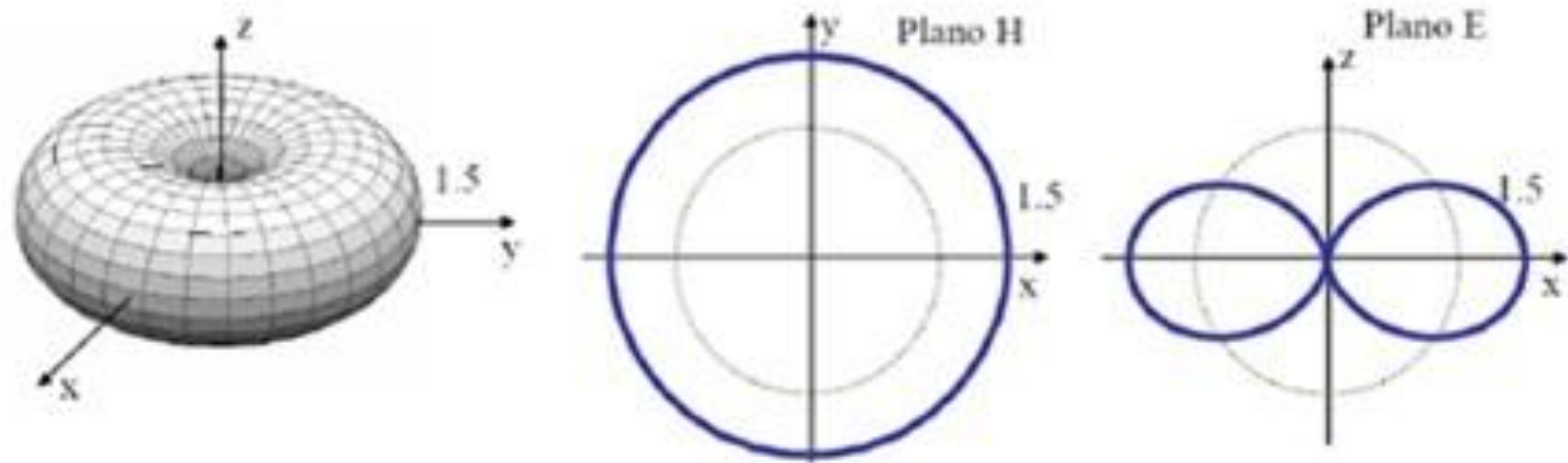
## Patrón de radiación Omnidireccional





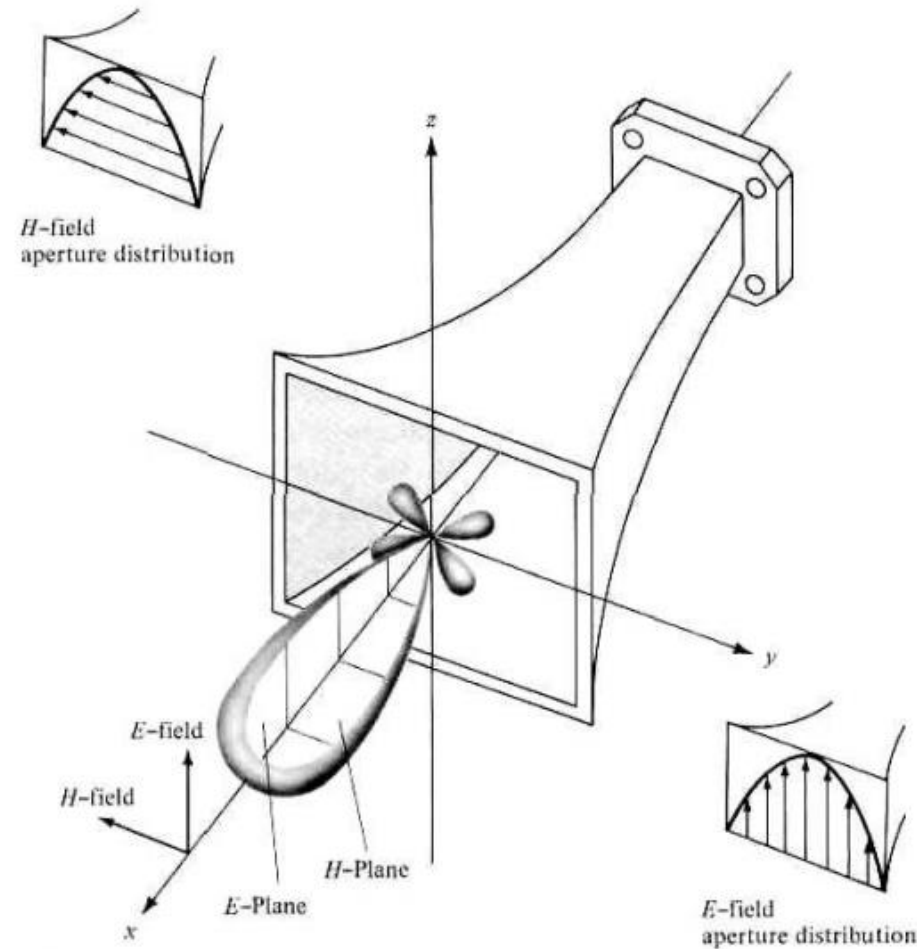
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Patrón de radiación Omnidireccional



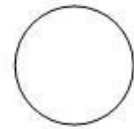
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Patrón de radiación Direccional

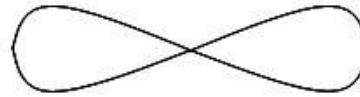


# Enlaces de Radio Frecuencia

## Patrón de radiación Direccional



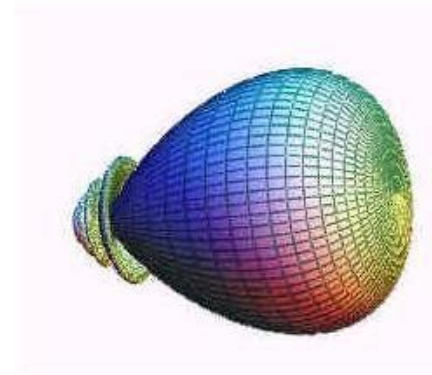
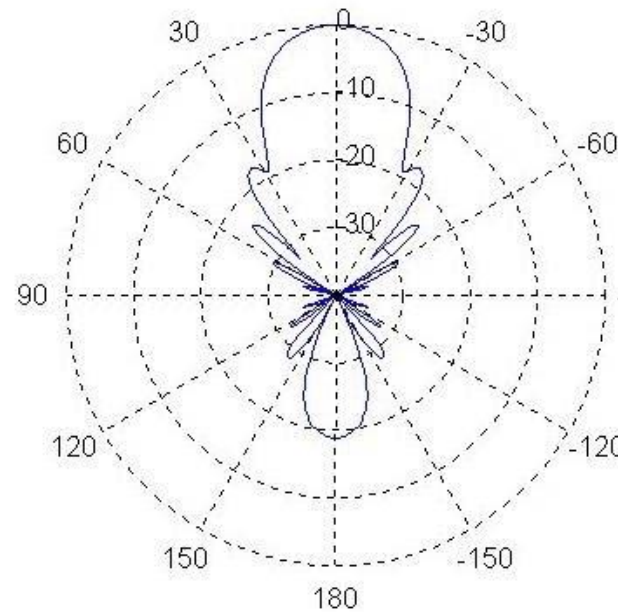
Antena omnidireccional



Antena bidireccional

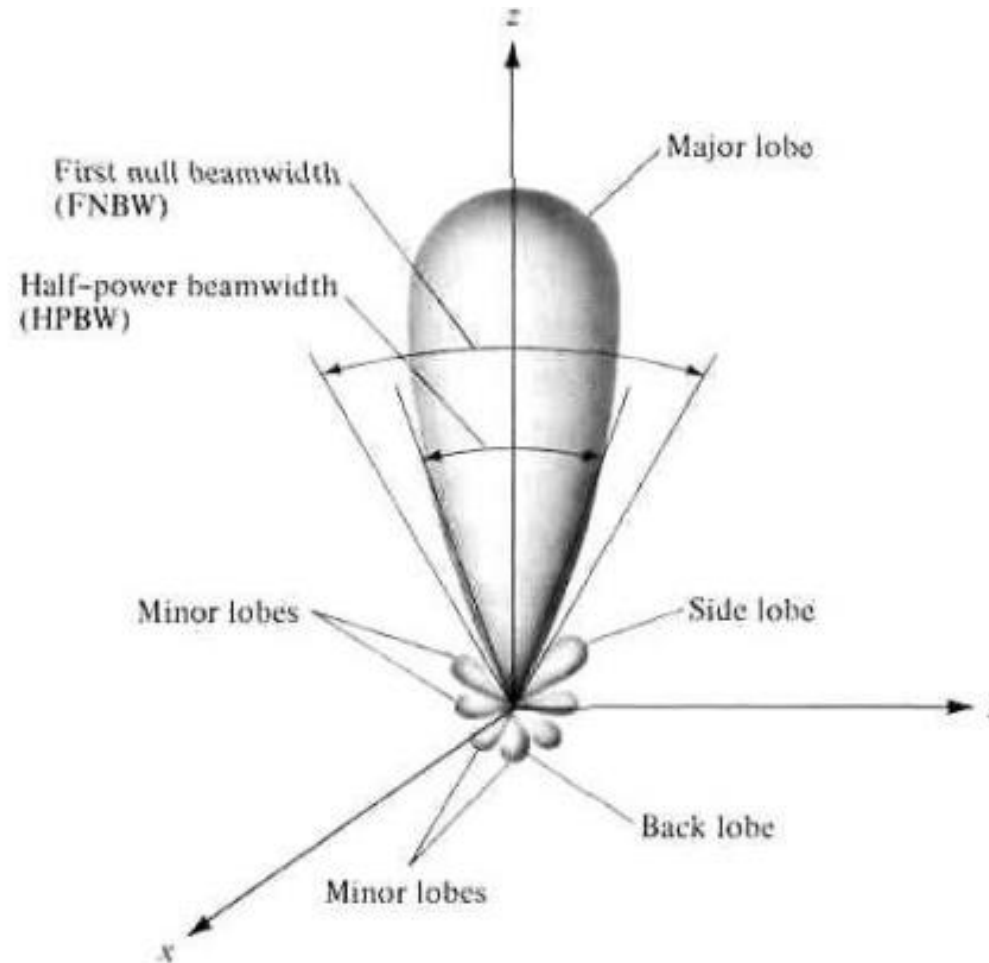


Antena direccional



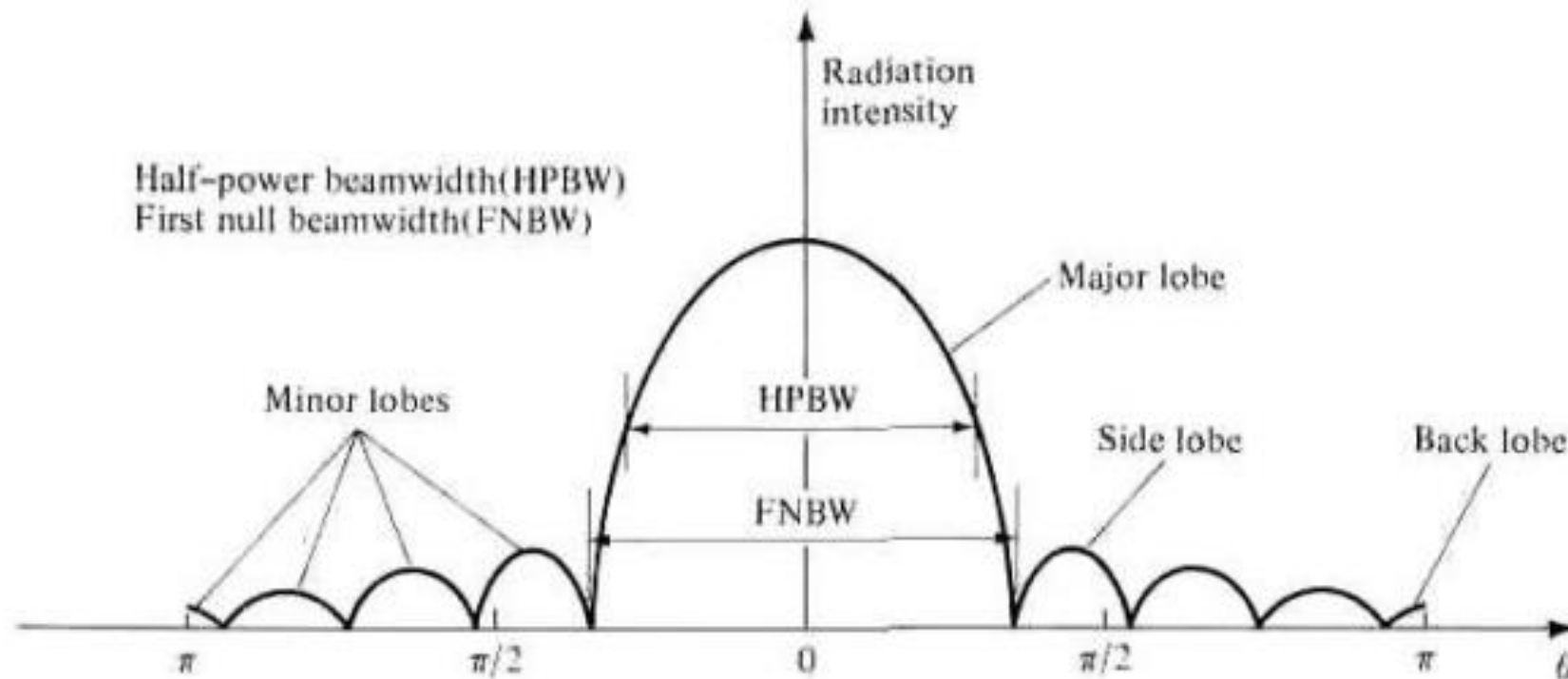
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Características de los Lóbulos



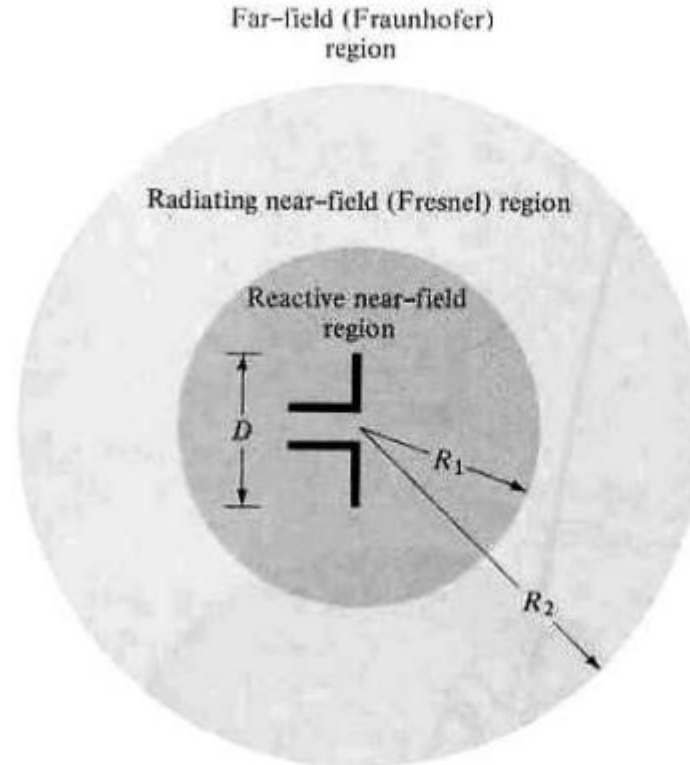
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Características de los Lóbulos



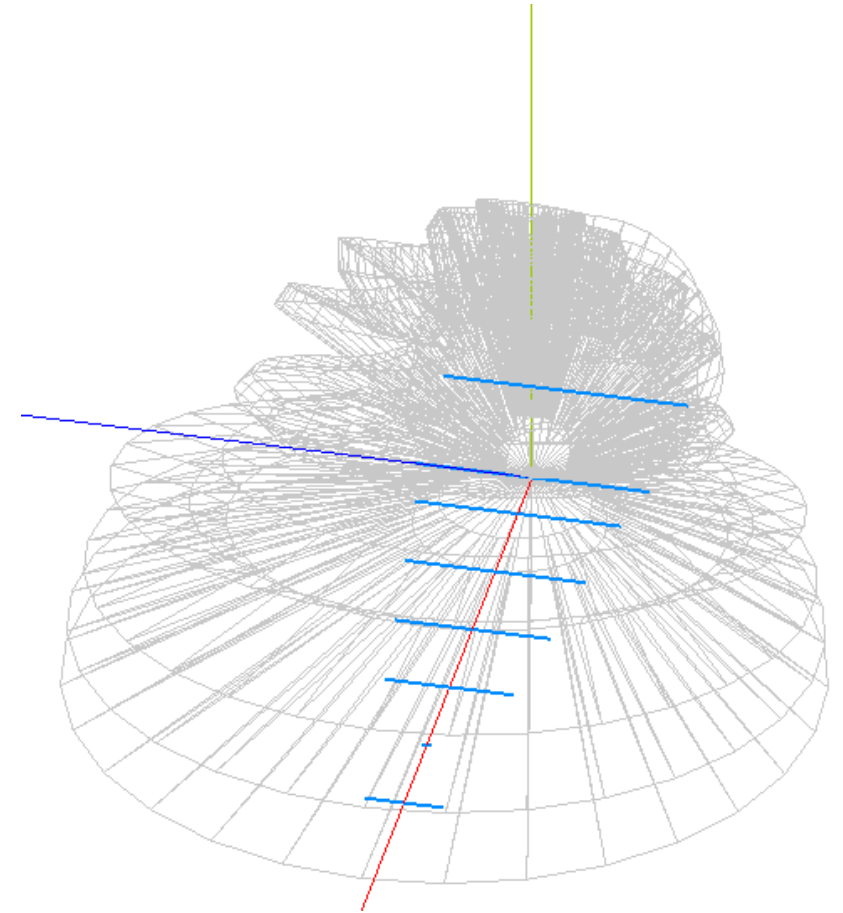
# Enlaces de Radio Frecuencia

## Regiones



$$R_1 = 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$$

$$R_2 = 2D^2 / \lambda$$



# Enlaces de Radio Frecuencia

## Densidad de potencia de radiación

La deducción de la potencia de radiación es posible demostrar a partir del vector Poynting.

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H}$$

$\mathcal{W}$  = instantaneous Poynting vector (W/m<sup>2</sup>)

$\mathcal{E}$  = instantaneous electric field intensity (V/m)

$\mathcal{H}$  = instantaneous magnetic field intensity (A/m)

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= P_{\text{av}} = \oiint_S \mathbf{W}_{\text{rad}} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_S \mathbf{W}_{\text{av}} \cdot \hat{\mathbf{n}} da \\ &= \frac{1}{2} \oiint_S \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{s} \end{aligned}$$

# Enlaces de Radio Frecuencia

## Intensidad de radiación

Es definida como la potencia radiada de una antena por unidad de ángulo sólido.

$$U = r^2 W_{rad}$$

donde

$U$  = intensidad de radiación (W/ unidad de ángulo sólido).

$W_{rad}$  = densidad de radiación.

$r^2$  = distancia.



# Enlaces de Radio Frecuencia

## Directividad

Se puede definir con la relación que hay entre la densidad de potencia radiada en una dirección y distancia contra la densidad de potencia que podría radiar en la mismas condiciones un radiador isotrópico.

# Enlaces de Radio Frecuencia

## Ganancia

Se define como la relación que existe entre la densidad de potencia radiada en una dirección en comparación a la densidad de potencia de un radiador isotrópico.

# Enlaces de Radio Frecuencia

## Eficiencia del haz

Es utilizado para cuantificar la calidad de transmisión y recepción de antenas.

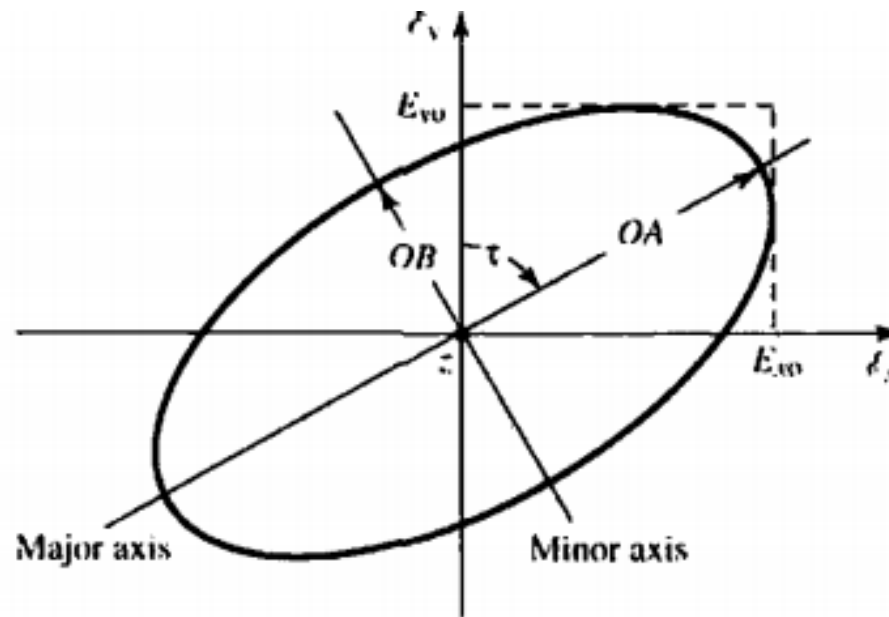
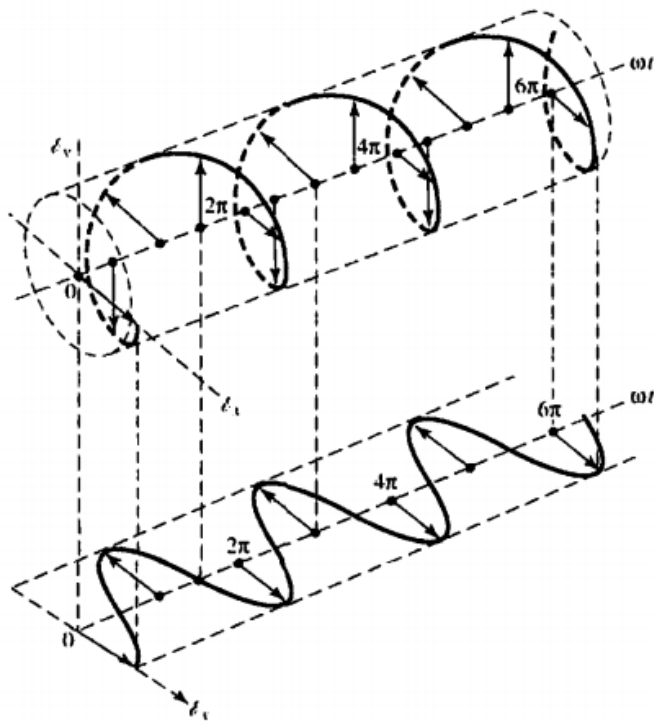
$$\text{BE} = \frac{\text{power transmitted (received) within cone angle } \theta_1}{\text{power transmitted (received) by the antenna}} \quad (\text{dimensionless})$$

$$\text{BE} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi}$$

# Enlaces de Radio Frecuencia

## BW y Polarización

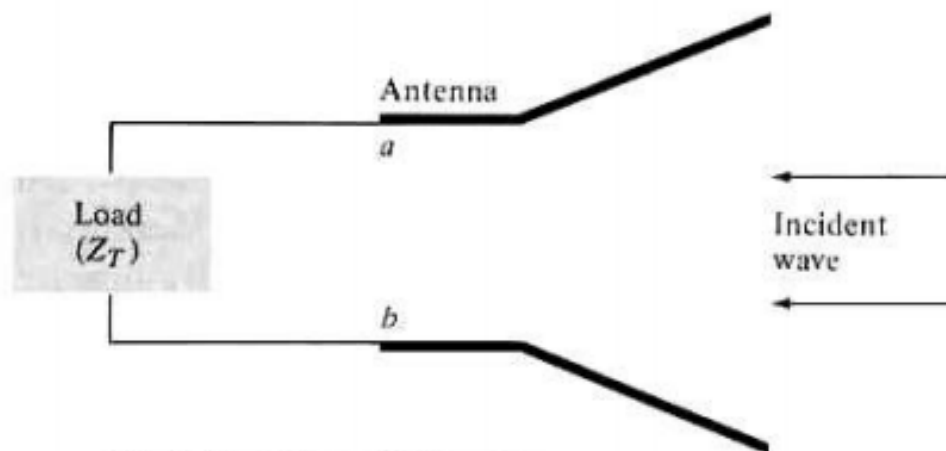
El ancho de banda define el rango de frecuencias en puede operar una antena conservando un buen acople de impedancia y eficiencia.



# Enlaces de Radio Frecuencia

## Impedancia de entrada

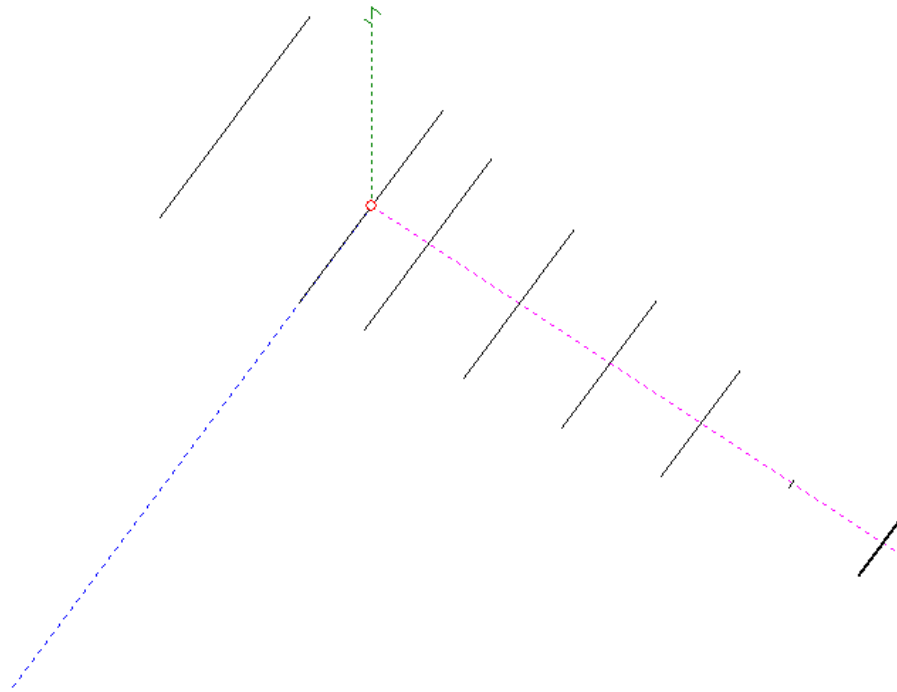
Es una característica importante en el diseño debido a que dependiendo la carga se deberá hacer un diseño que permita la reducción de reflexiones y mejor eficiencia en términos de potencia.



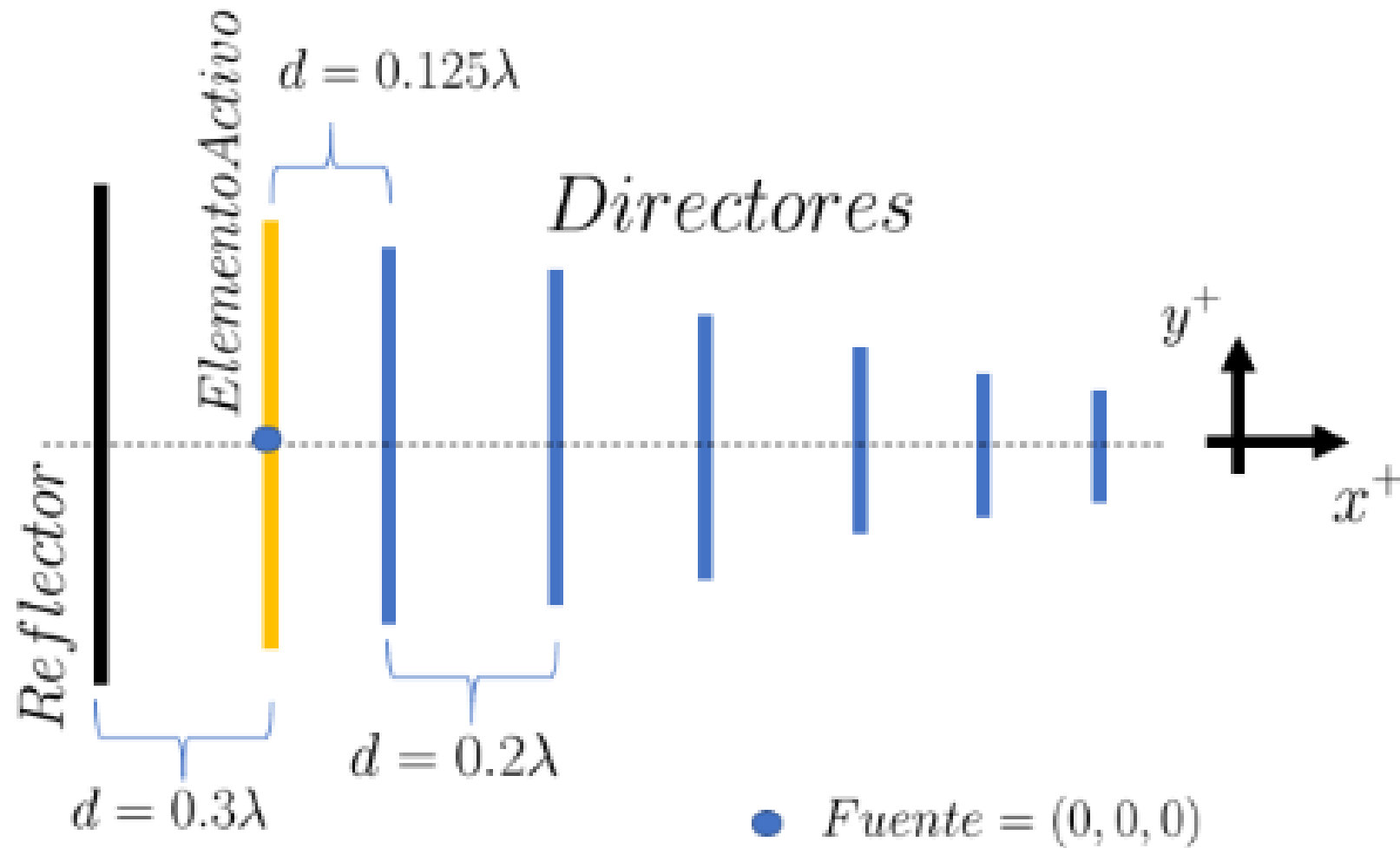
# Enlaces de Radio Frecuencia

## MMANA-GAL

Es una herramienta de software que introduce el análisis de antenas a partir del método de los momentos (MoM)



# Enlaces de Radio Frecuencia



# Enlaces de Radio Frecuencia

Geometría **Vista** Cálculo Diagrama de campo lejano

o (grados)  Frec.  MHz ☒ lambda

conductores 8 Paso grados DM1  DM2  SC  EC  ☐ Mantener conexión.

No.	X1(wl)	Y1(wl)	Z1(wl)	X2(wl)	Y2(wl)	Z2(wl)	R(wl)	Seg.
1	-0.3	0.23625	0.0	-0.3	-0.23625	0.0	0.006404	-1
2	0.0	0.225	0.0	0.0	-0.225	0.0	0.006404	-1
3	0.125	0.2	0.0	0.125	-0.2	0.0	0.006404	-1
4	0.325	0.175	0.0	0.325	-0.175	0.0	0.006404	-1
5	0.525	0.15	0.0	0.525	-0.15	0.0	0.006404	-1
6	0.725	0.125	0.0	0.725	-0.125	0.0	0.006404	-1
7	0.925	0.01	0.0	0.925	-0.01	0.0	0.006404	-1
8	1.125	0.075	0.0	1.125	-0.075	0.0	0.006404	-1
siguiente								



# Enlaces de Radio Frecuencia

Geometría
Vista
Cálculo
Diagrama de campo lejano

Frec.  MHz

Tierra

- ☐ Espacio libre
- ☒ Perfecta
- ☐ Real

Agregar altura  m

Material

LONGITUD DE ONDA = 0.125 (m)  
NUMERO TOTAL PULSOS = 182  
THE LOWEST POINT OF ANTENNA = 3.000 M  
LLENADO DE LA MATRIZ...  
Matriz de factores...  

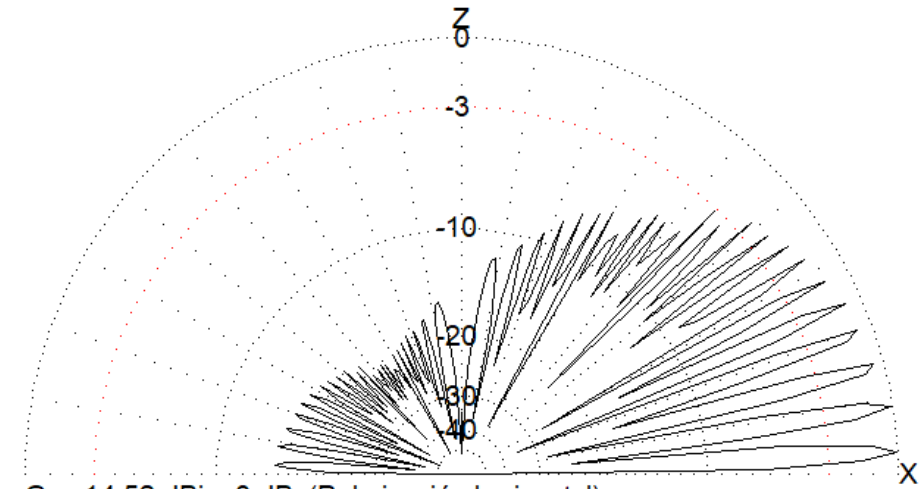
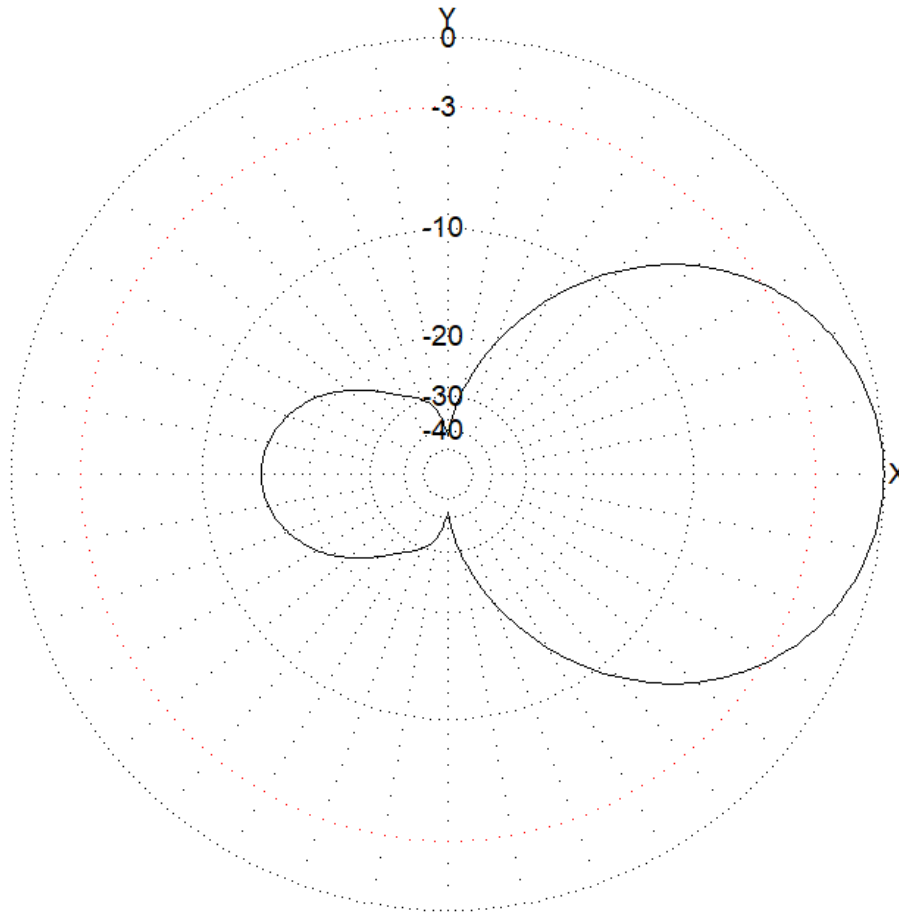
PULSO	U (V)	I (mA)	Z (Ohm)	SWR
w2c	1.00+j0.00	16.97+j7.01	50.34-j20.81	1.51

DATOS DE LA CORRIENTE / DATOS ACTUALES (Ambigüedad del original)...  
CAMPO LEJANO...  
NINGUN ERROR FATAL.  
0.14 sec

No.	F (MHz)	R (Ohm)	jX (Ohm)	ROE 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Tierra	Add H.	Polar.
2	2400.0	50.34	-20.81	1.51	---	14.52	14.67	3.0	Perfecto	3.0	hor.
1	2400.0	50.96	-20.52	1.5	---	14.6	14.32	3.0	Perfecto	3.0	hor.

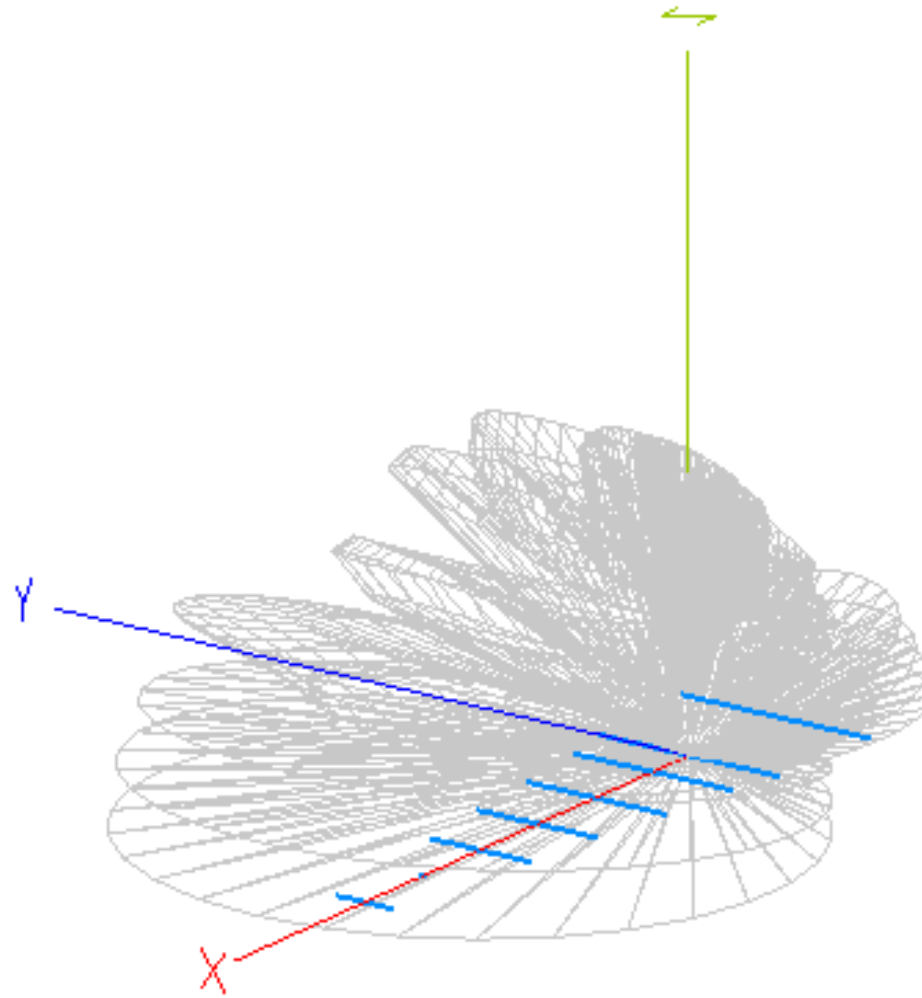
# Enlaces de Radio Frecuencia

□ +90 da



Ga : 14.52 dBi = 0 dB (Polarización horizontal)  
F/B: 14.67 dB; Posterior: Azimut 120 grados, Elevación 60 grados  
Frec: 2400.000 MHz  
Z: 50.339 - j20.807 Ohm  
ROE: 1.5 (50.0 Ohm),  
Elev: 3.0 grados (Tierra perfecta :3.00 m Altura)

# Enlaces de Radio Frecuencia



# Enlaces de Radio Frecuencia



# Enlaces de Radio Frecuencia

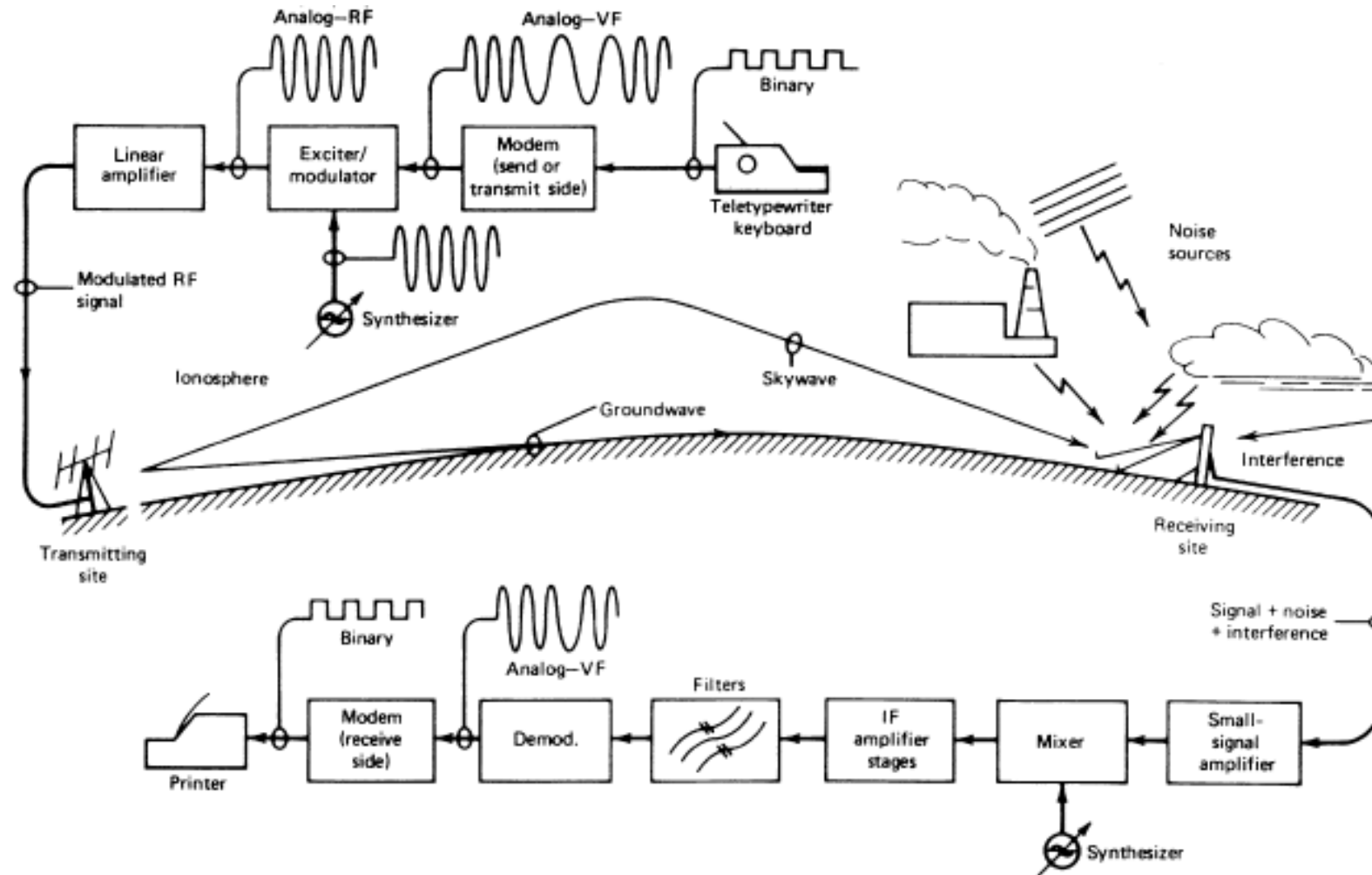


Figure 12.1. A typical HF radiolink providing teletypewriter service. (Courtesy of Radio General Company.)

# Pérdidas por Propagación

$$\text{Free-space loss (FSL)}_{\text{dB}} = 20 \log(4\pi d / \lambda)$$

$$\text{FSL}_{\text{dB}} = 32.45 + 20 \log D_{\text{km}} + 20 \log F_{\text{MHz}}$$

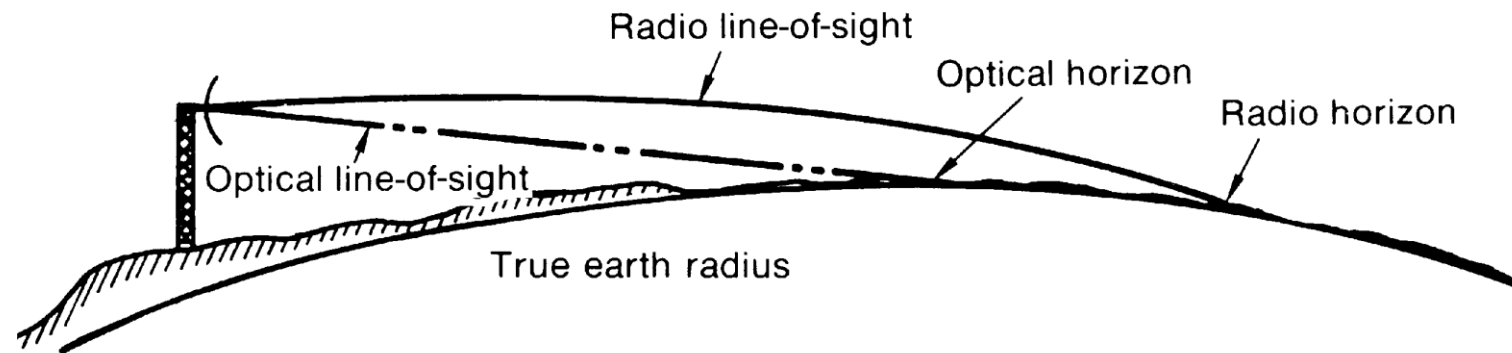
Distance:	2 miles	4 miles	6 miles	10 miles	20 miles
2.4 GHz FSL:	110 dB	116 dB	119 dB	124 dB	130 dB
5.8 GHz FSL:	118 dB	124 dB	127 dB	132 dB	138 dB

Rule of Thumb: Double/halve the distance -> Add/subtract 6 dB.

Pero se deben considerar otros efectos atmosféricos y obstáculos, así como interferencia de otros canales de comunicación.

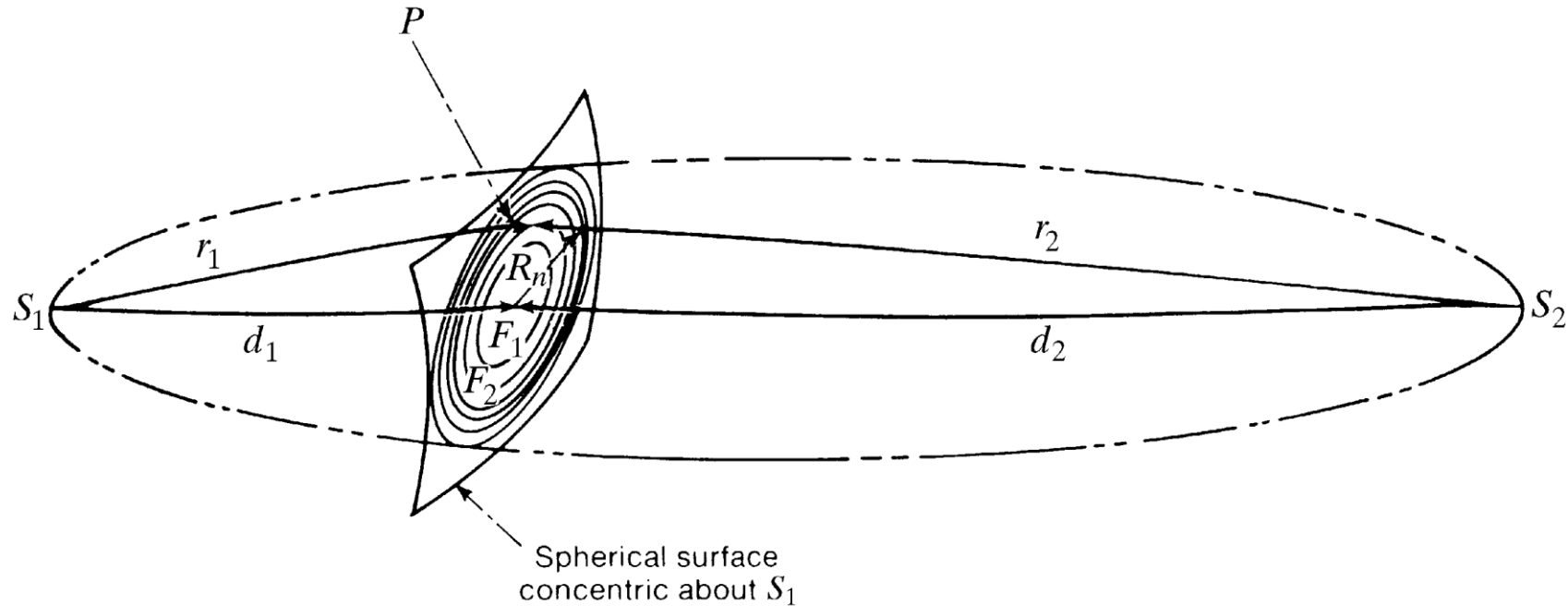
# Pérdidas por Propagación

Pero se deben considerar otros efectos atmosféricos y obstáculos, así como interferencia de otros canales de comunicación.



Tomado de: M. F. Young, Planning a Microwave Radio Link, YDI Wireless.  
R. L. Freeman, Radio system design for telecommunications, IEEE 2007.

# Zona de Fresnel



Atenuación puede ser introducida por obstáculos de tamaño comparable a la longitud de onda si se ubica en la zona de radiación de la antenna.

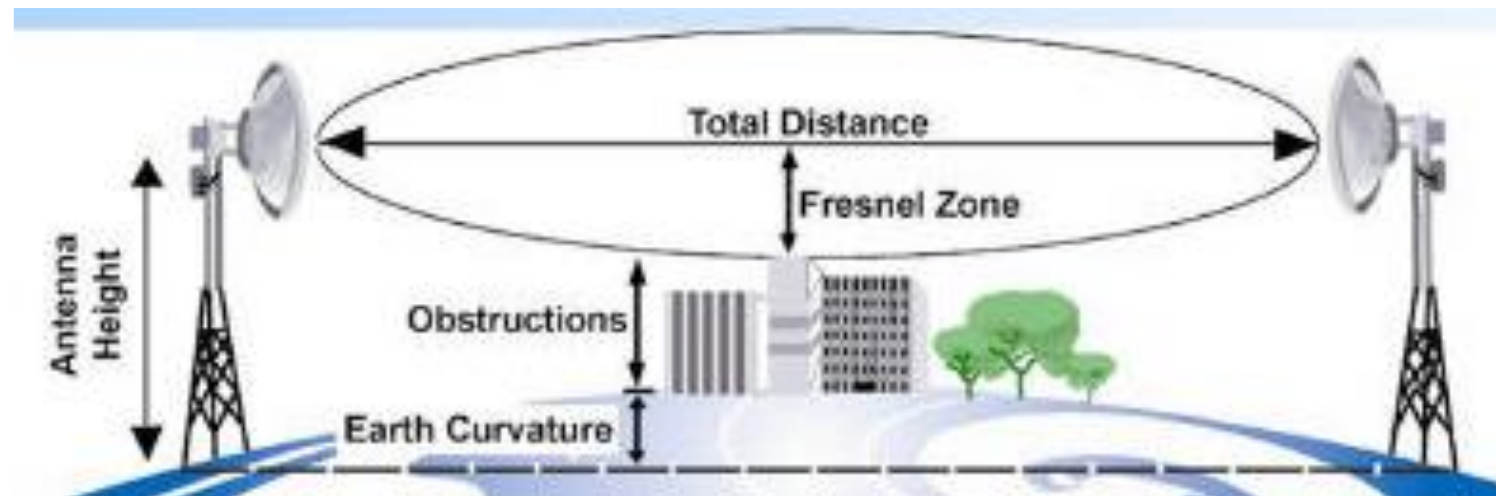
El radio depende del tipo de antena y frecuencia, a mayor frecuencia menor es la zona de Fresnel.



# Desvanecimiento (Fading)

Distorsiones ocasionadas por variaciones en fase, polarización, nivel, etc. de una señal.

En enlaces de radio existe el problema de propagación multicamino (multipath interference)



Tomado de: M. F. Young, Planning a Microwave Radio Link, YDI Wireless.  
R. L. Freeman, Radio system design for telecommunications, IEEE 2007.

# Características del Receptor, Transmisor y Antenas

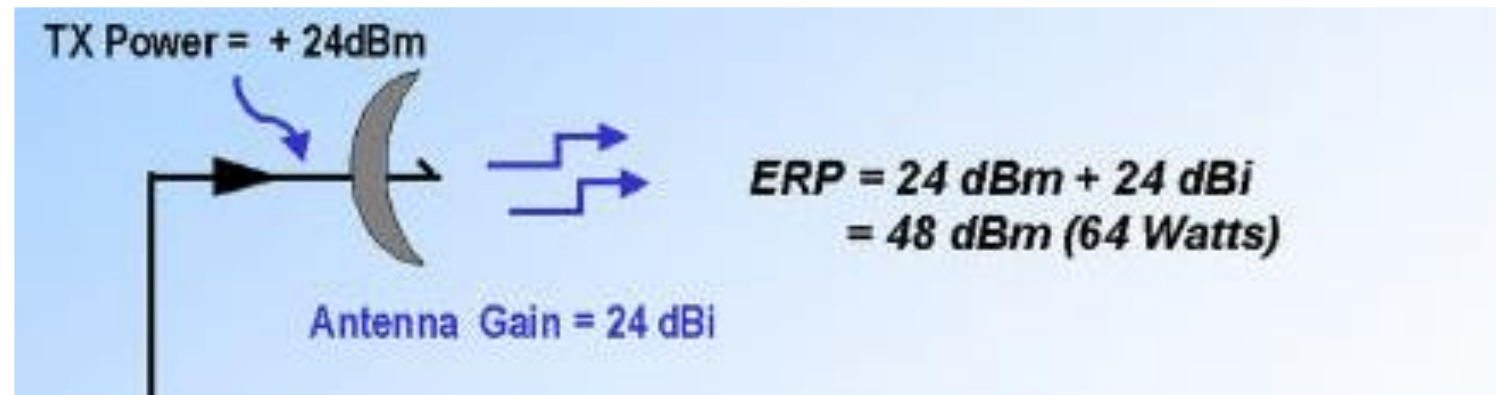
**Nivel de señal en Rx:** nivel detectado en la antena de recepción

**Sensitividad de Rx:** valor mínimo de señal que es detectable

**Ganancia de la Antena:** capacidad de la antena de enfocar energía en cierta dirección (es)

**Potencia de Tx:** potencia que coloca el transmisor en la antena Tx

**Potencia radiada efectiva (Effective Isotropic radiated power: EIRP) :** potencia transmitida por la antena.

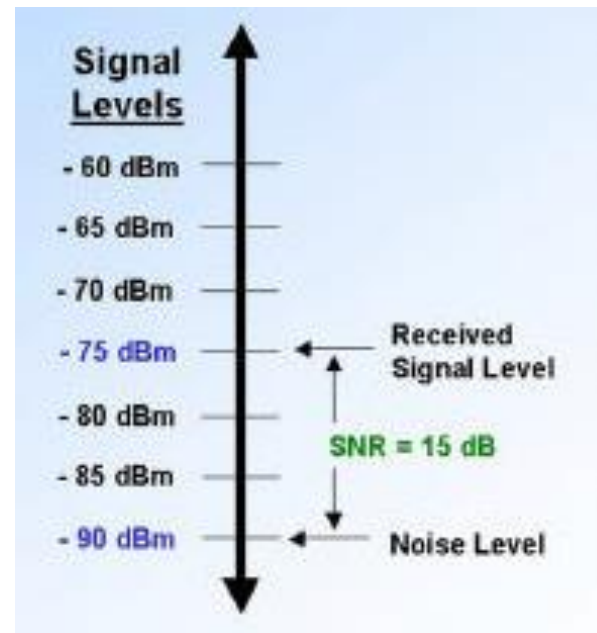


# Margen de Operación

**System operating margin (SOM):** diferencia entre el nivel requerido en Rx y el recibido.

$$\text{SOM} = \text{RX signal (dBm)} - \text{RX sensitivity (dBm)}$$

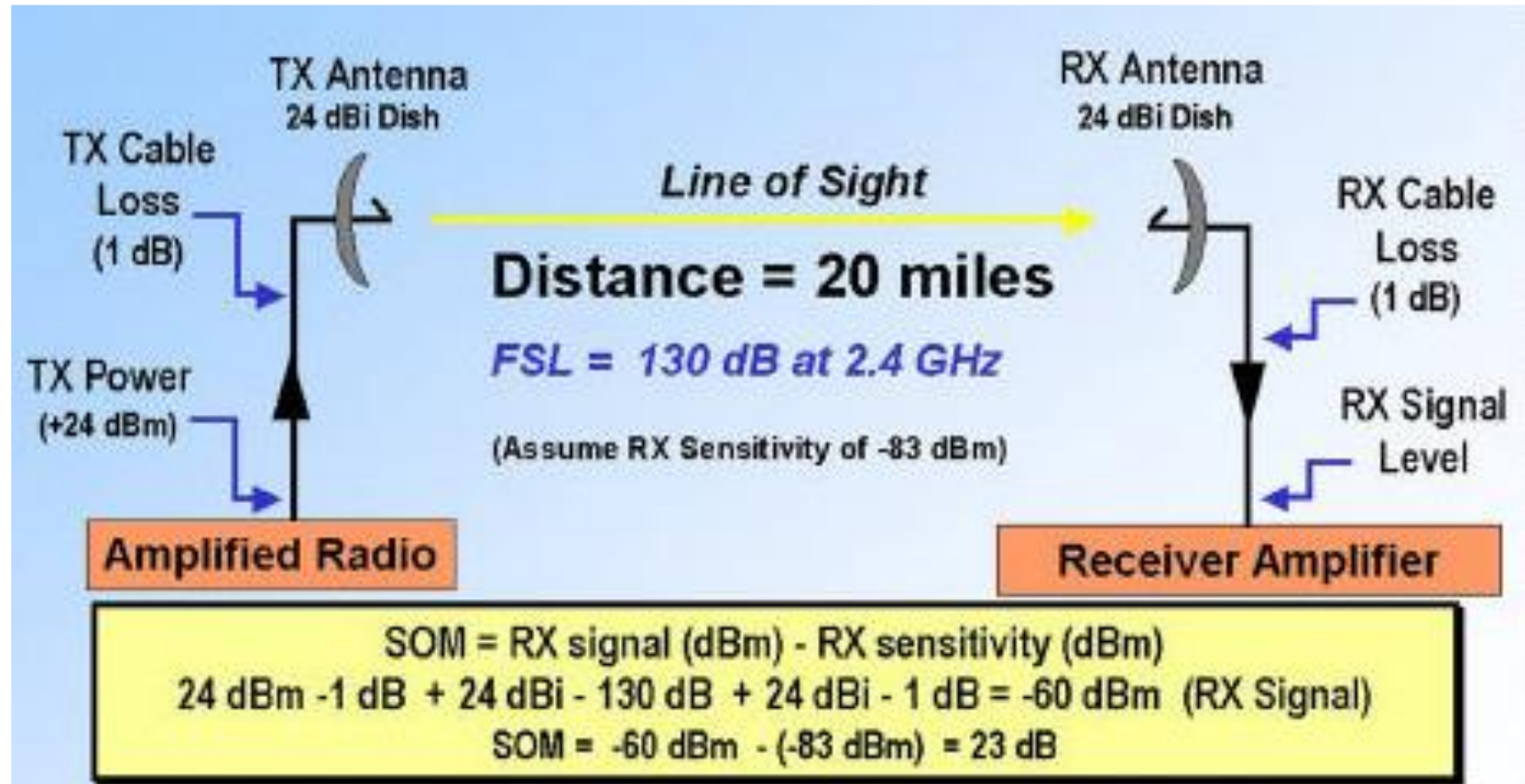
**Razón señal a ruido (SNR):** Diferencia entre la señal recibida y el nivel de ruido.



Tomado de: M. F. Young, Planning a Microwave Radio Link, YDI Wireless.  
R. L. Freeman, Radio system design for telecommunications, IEEE 2007.

# Estimación del Enlace

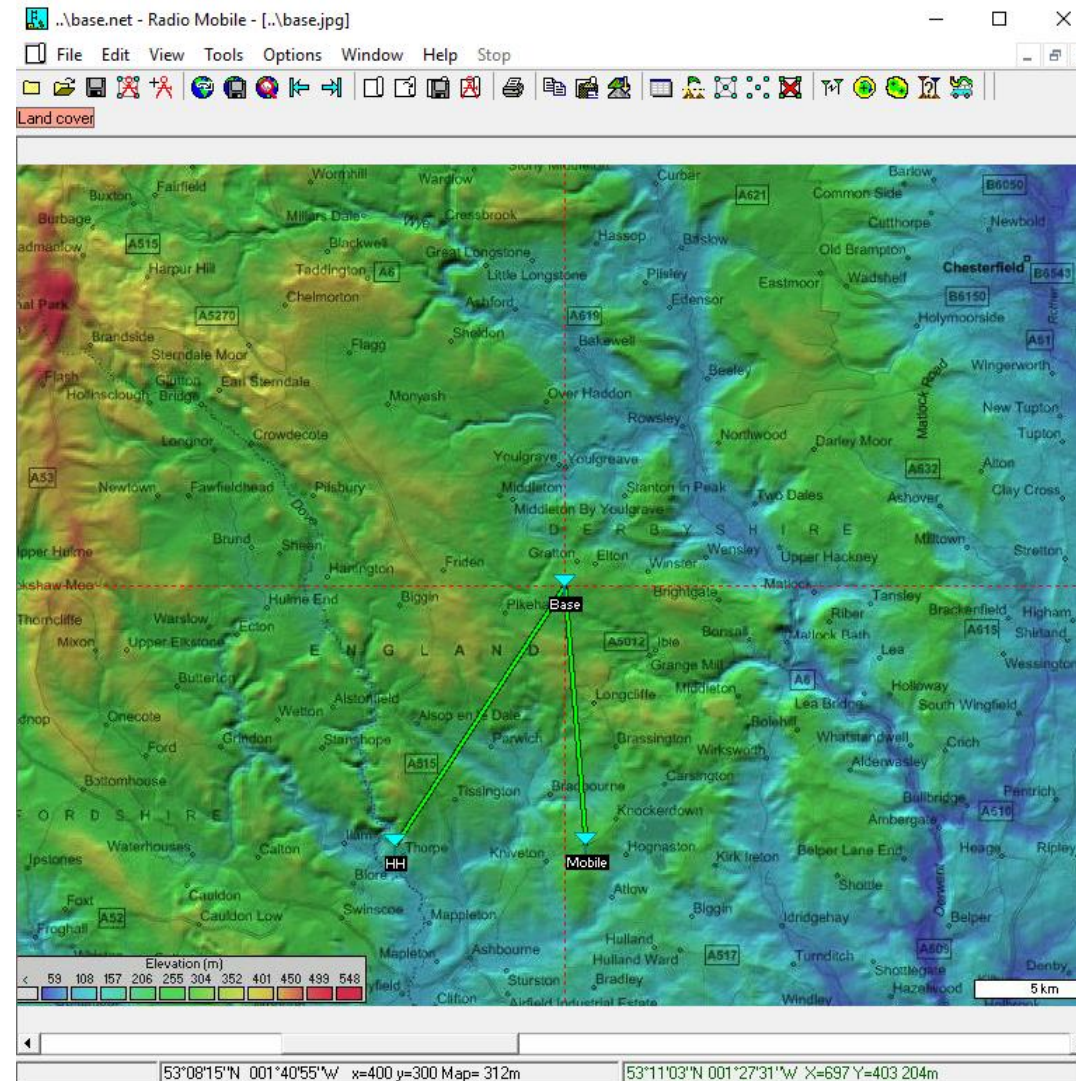
E.g.: línea-vista, LOS, 60% zona de Fresnel libre.





# Radio Mobile

## Simulación de enlaces de comunicación.



Descarga: [http://www.g3tvu.co.uk/Radio\\_Mobile.htm](http://www.g3tvu.co.uk/Radio_Mobile.htm)

Creador: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>

# Radio Mobile

Simulación de enlaces de comunicación.

Propiedades de ..\default.map

Centro  
09°51'17,8"N 083°54'25,7"O  
EJ89BU  
Latitud: 9,854957 Longitud: -83,90715  
Usar posición del cursor  
Mapa del mundo  
Seleccionar un nombre de ciudad  
Ingresar LAT LON o QRA  
Seleccionar una unidad

Tamaño (píxel)  
Ancho(píxeles): 1000 Alto (píxeles): 750  
Tamaño (km)  
Ancho(km): 66,67 Alto (km): 50,00

Fuente de datos de altitud

	Disco o ubicación	Capa superior
Ninguno	c	Buscar...
Ninguno	c	Buscar...
Ninguno	c	Buscar...
Ninguno	c	Buscar...
SRTM	c	Buscar...

☐ Ignorar archivos perdidos  
Inicializar la matriz con altitud (m) d

Capa inferior

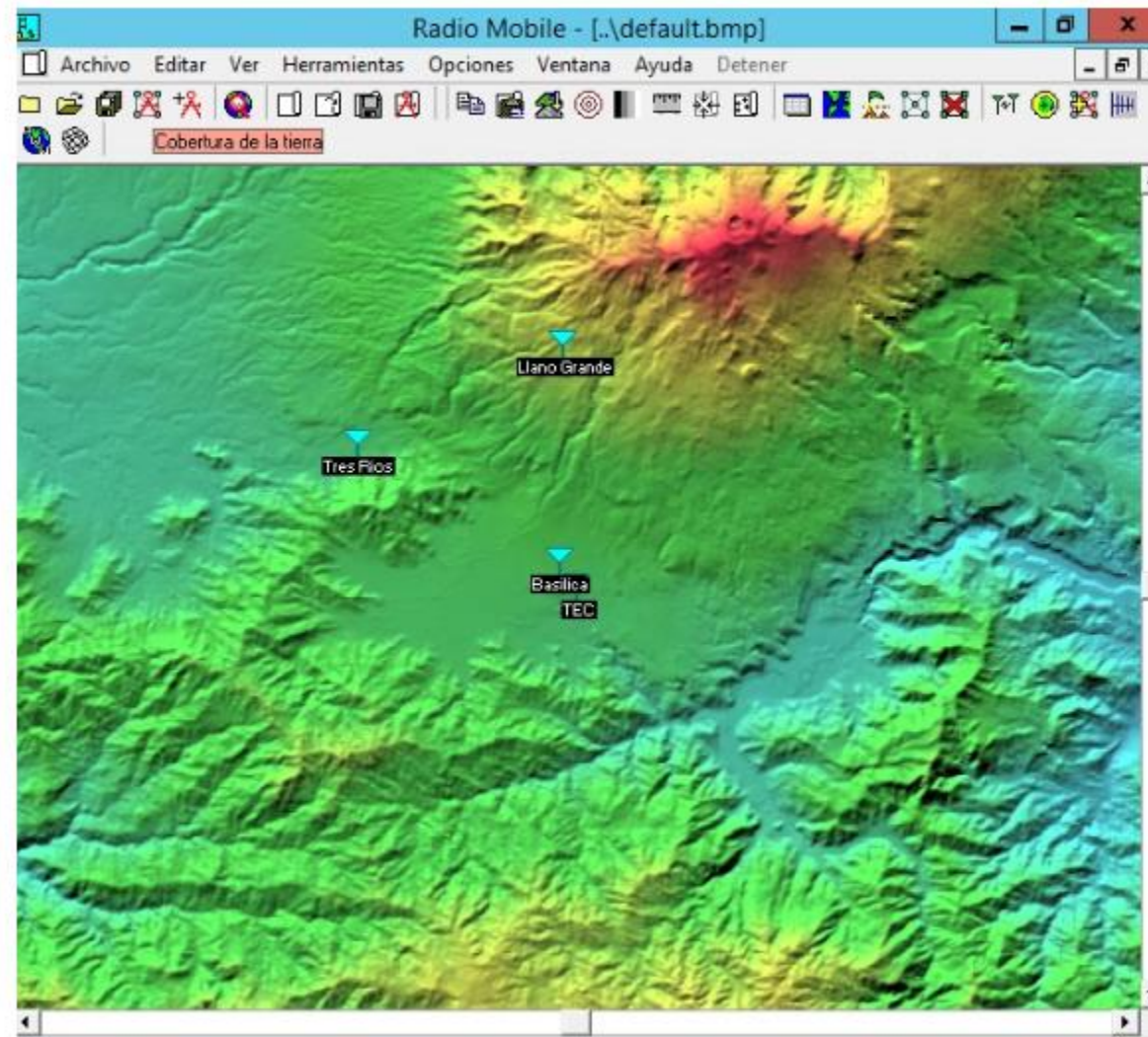
Extraer  
Cancelar

Superior izquierda  
10°04'48"N  
084°12'42"O  
Superior derecha  
10°04'48"N  
083°36'10"O  
Inferior izquierda  
09°37'48"N  
084°12'42"O  
Inferior derecha  
09°37'48"N  
083°36'10"O  
Resolución  
66,7 m/píxel  
2,16 arcsecond

☒ Ajustar altitud de las unidades  
☐ Combinar imágenes  
☐ Forzar a escala de grises

# Radio Mobile

Establecimiento de unidades.





# Radio Mobile

## Perfil de enlace





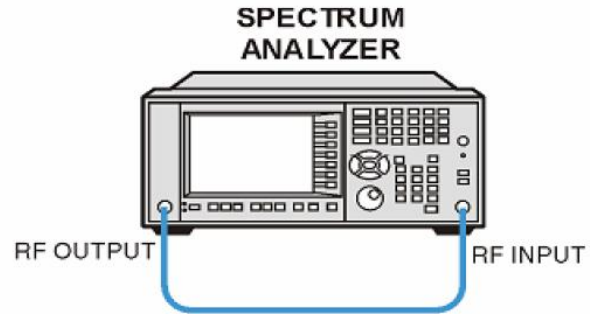
# Radio Mobile

Inserción de repetidores

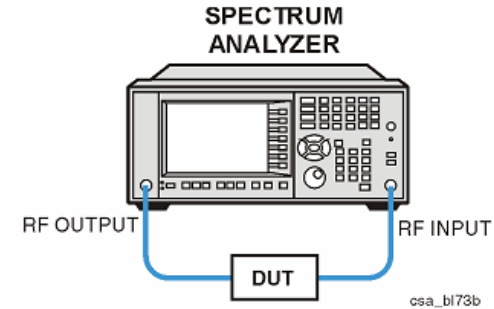


# Caracterización Física de Antenas

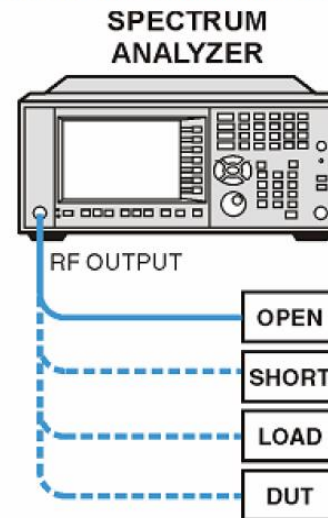
**Two Port Insertion Loss Normalization Test Setup**



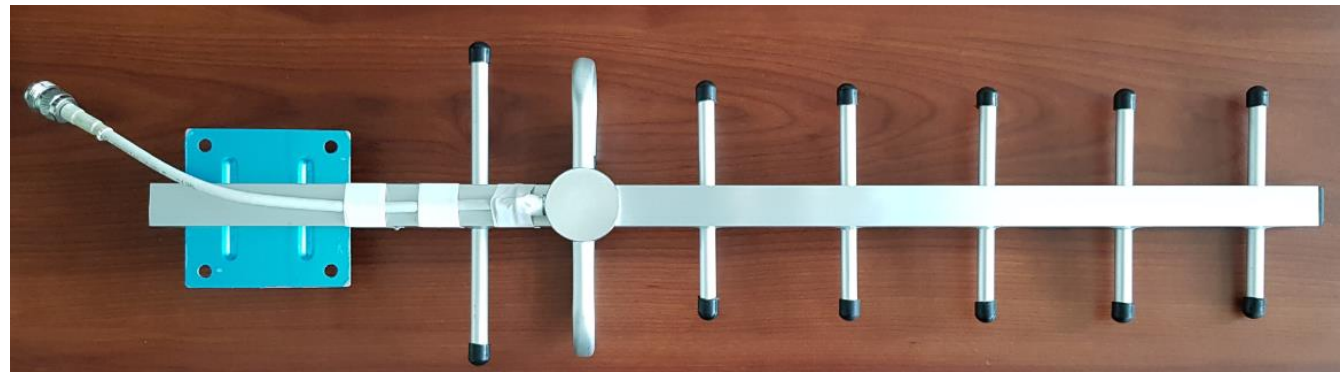
**Two Port Insertion Loss Measurement Test Setup**



**One Port Insertion Loss Measurement**



# Caracterización Física de Antenas



# Caracterización Física de Antenas



# Bibliografía

- [1] Hayt, W. *Teoría Electromagnética*, Mc Graw-Hill, Octava Edición, 2013.
- [2] Sadiku M. *Elementos de Electromagnetismo*, Alfaomega, Traducción de la tercera edición en inglés, México, 2004.
- [3] Pozar, D.M., *Microwave Engineering*, 3 Ed. Wiley. 2005
- [4] Caspers, F, *Basic Concepts: The Smith Chart*, 2010.

Para más información pueden ingresar a: tec-digital ó <http://www.ie.tec.ac.cr/sarriola/>

Esta presentación se ha basado parcialmente en compilación para semestre anteriores de cursos de Laboratorio de Teoría Electromagnética II y Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas por Aníbal Coto-Cortés, Renato Rimolo-Donadio, Sergio Arriola-Valverde y Luis Carlos Rosales.

# Referencias

- [1] R. L. Freeman, Radio System Design for Telecommunications, IEEE 2007.
- [2] Radio Mobile: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>
- [3] XCTU: <https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu>

