

Introducción a la medida de antenas Laboratorio de Tecnologías de Alta Frecuencia

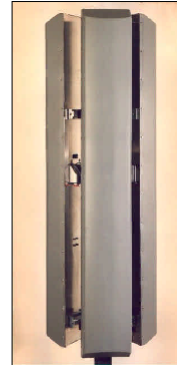
José Luis Besada Sanmartín

Índice

- **Introducción: especificaciones y propiedades de los campos radiados**
- **Zonas de Campo en torno a una Antena: Sistemas de Medida**
- **Sistemas de medida en Campo Lejano: elevado y cámaras anecoicas**
 - Diagramas: Errores debidos a reflexiones
 - Ganancia: Errores de desadaptación de impedancias y de polarización
 - Polarización: Asignación de ejes. Medidas directas CP-XP. Medidas indirectas (posibles errores). Medidas de relación axial vs frecuencia
- **Sistemas de campo próximo**
 - Sistemas planos
 - Sistemas esféricos
 - Medidas en zona de Fresnel
- **Sistemas compactos**

Especificaciones eléctricas de antena

Frequency Range	870 ÷ 960 & 1710 ÷ 2170 MHz
Gain	17.5 dBi
VSWR	< 1.3 ÷ 1 GSM900 < 1.5 ÷ 1 DCS/UMTS
Polarization	Dual Slant ± 45
Horizontal Beamwidth	60°
Vertical Beamwidth	< 8°
Donwtilt	4° Both bands independently (6° under request)
Sideloobe supression	> 15 dB
Isolation between polarizations	> 30 dB
Front Back Ratio	> 25 dB
Power rating	2 x 500 w GSM900 2 x 200 W DCS&UMTS
Impedance	50 Ω



Campos de Radiación de una Antena Propiedades

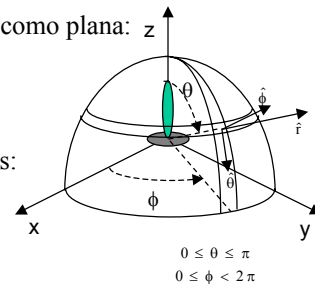
- Los campos de radiación de cualquier antena cumplen:

- La dependencia de $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ con r es la de una onda esférica $e^{-jk_0 r}/r$.
- Los campos $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ dependen de θ y ϕ puesto que la onda esférica es no homogénea.
- La onda esférica radiada se comporta localmente como plana:

$$\begin{matrix} \vec{E} \perp \hat{r} \\ \vec{H} \perp \hat{r} \end{matrix} \quad |\vec{E}| = \eta |\vec{H}|$$

- Los campos $\underline{\mathbf{E}}$ y $\underline{\mathbf{H}}$ no poseen componente radiales:

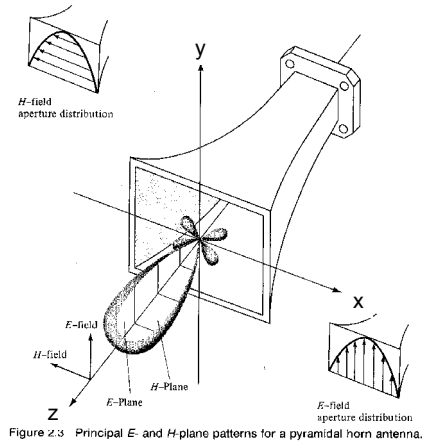
$$\vec{E} = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} (\hat{\theta} F_\theta(\theta, \phi) + \hat{\phi} F_\phi(\theta, \phi))$$



Diagramas de Radiación Planos Principales

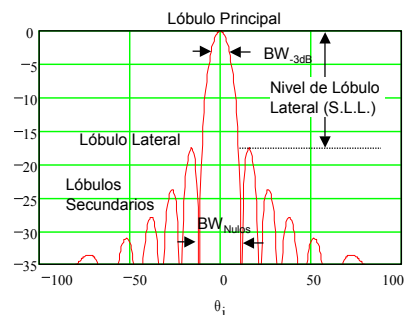
- Para antenas directivas y polarización lineal suele bastar con conocer los diagramas de los planos principales:

- Plano E: contiene el vector E y a la dirección de máxima radiación (YZ)
- Plano H: contiene el vector H y a la dirección de máxima radiación (XZ)



Parámetros del Diagrama de Radiación

- **LOBULO:** porción del diagrama delimitada por regiones de radiación más débil.
 - Lóbulo principal: contiene la dirección de máxima radiación
 - Lóbulos secundarios: los no principales.
 - Lóbulos laterales: adyacentes al lóbulo principal
- **Nivel de Lóbulos Secundarios** (del mayor lóbulo secundario respecto al principal)
- **Ancho del haz principal a -3dB** (entre puntos de potencia mitad).
- **Relación delante-atrás**, (relación entre el lóbulo principal y el posterior).



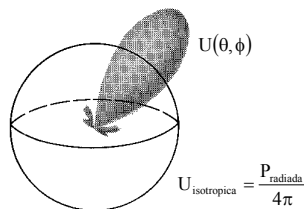
Directividad

- **Ganancia Directiva: $D(\theta, \phi)$**

- Cociente entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación de una antena isotrópica que radiase la misma potencia total.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{isotrópica}}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{radiada}}} = 4\pi r^2 \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle}{P_{\text{radiada}}}$$

$$P_{\text{rad}} = \int_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \langle S(r, \theta, \phi) \rangle \sin\theta d\theta d\phi$$



- **Directividad: D_0**

- Ganancia directa en la dirección de máxima radiación.
- Siempre mayor o igual que 1 (0 dBi).
- Expresada en dBi vale: $10 \log D_0$.

Ganancia y Eficiencia

- **Ganancia de Potencia: $G(\theta, \phi)$**

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{entregada}}} = 4\pi r^2 \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle}{P_{\text{entregada}}}$$

- **Ganancia: G_0**

- Ganancia de Potencia en la dirección de máxima radiación.
- Puede ser menor que 1
- Expresada en dBi vale: $10 \log G_0$.

- **Rendimiento de radiación**

$$\eta_R = \frac{P_{\text{radiada}}}{P_{\text{entregada}}} = \frac{G_0}{D_0}$$

$$G(\theta, \phi) = \eta_R \cdot D(\theta, \phi)$$

Polarización

- Es la “figura que traza en función del tiempo, para una dirección fija, el extremo del vector del campo radiado y su sentido de giro, visto por un observador desde la antena”.

$$\vec{E} = E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi} \quad \begin{cases} E_\theta = |E_\theta| e^{j\delta_\theta} \\ E_\phi = |E_\phi| e^{j\delta_\phi} \end{cases} \xrightarrow{\text{Tiempo}} \begin{aligned} E_{\theta i} &= |E_\theta| \cos(\omega t + \delta_\theta) \\ E_{\phi i} &= |E_\phi| \cos(\omega t + \delta_\phi) \end{aligned}$$

↓ Eliminando t

$$\left(\frac{E_{\theta i}}{|E_\theta|} \right)^2 - 2 \frac{E_{\theta i}}{|E_\theta|} \frac{E_{\phi i}}{|E_\phi|} \cos \delta + \left(\frac{E_{\phi i}}{|E_\phi|} \right)^2 = \sin^2 \delta$$

$$\delta = \delta_\phi - \delta_\theta \quad \begin{aligned} \delta < 0 & \quad (\text{derechas}) \\ \delta > 0 & \quad (\text{izquierdas}) \end{aligned}$$

Elipse de Polarización

Polarización: Diagramas Copolar y Contrapolar

$$\vec{E}(\theta, \phi) = E_\theta(\theta, \phi) \hat{\theta} + E_\phi(\theta, \phi) \hat{\phi}$$



$$\vec{E}(\theta, \phi) = E_{CP}(\theta, \phi) \hat{u}_{cp} + E_{XP}(\theta, \phi) \hat{u}_{xp}$$

Componentes CP y XP:

- Lineales:

3ª Definición de Ludwig para componentes lineales con copolar según y

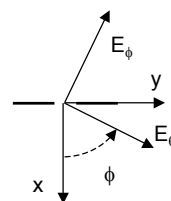
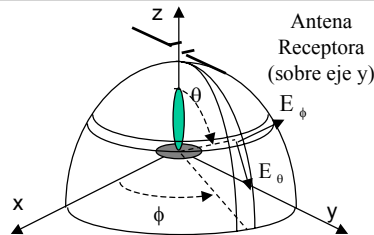
$$E_{CP}(\theta, \phi) = E_\theta(\theta, \phi) \sin \phi + E_\phi(\theta, \phi) \cos \phi$$

$$E_{XP}(\theta, \phi) = E_\theta(\theta, \phi) \cos \phi - E_\phi(\theta, \phi) \sin \phi$$

- Circulares

$$E_{RHC}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta(\theta, \phi) + j E_\phi(\theta, \phi)) e^{-j\phi}$$

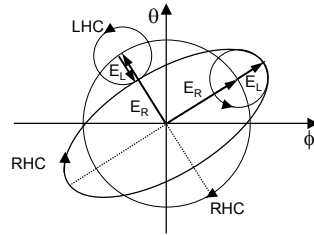
$$E_{LHC}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta(\theta, \phi) - j E_\phi(\theta, \phi)) e^{j\phi}$$



Relaciones útiles entre Polarizaciones

Relación de Polarización Circular

$$\rho = \frac{|E_{RHC}|}{|E_{LHC}|} \quad 0 \leq \rho \leq \infty \quad \begin{cases} \rho = 0 & \text{Circular Izq.} \\ \rho = 1 & \text{Lineal} \\ \rho = \infty & \text{Circular Der.} \end{cases}$$



Relación Axial

$$r = \frac{|E_{RHC}| + |E_{LHC}|}{|E_{RHC}| - |E_{LHC}|} \quad AR = |r| \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad \begin{cases} r > 0 & \text{Giro a derechas} \\ r < 0 & \text{Giro a izquierdas} \end{cases}$$

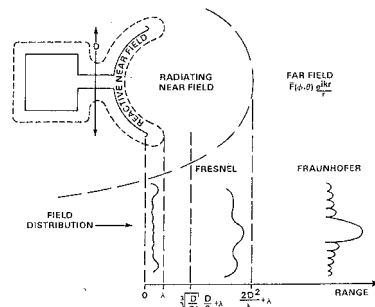
AR=1 Polarización Circular
AR=∞ Polarización Lineal

Conversiones

$$r = \frac{\rho + 1}{\rho - 1} \quad \rho = \frac{r + 1}{r - 1}$$

Zonas de Campo en torno a la Antena

- El espacio que envuelve una antena se subdivide en tres regiones:
 - Región de Campo Próximo Reactivo** ($r < \lambda$): Aquella región junto a la antena donde el campo reactivo predomina.
 - Región de Campo Próximo Radiante** (Incluye la Zona de Fresnel): Región intermedia entre la de Campo Reactivo y la de Campo Lejano. Predominan los campos de radiación pero su distribución angular es función de la distancia a la antena.
 - Región de Campo Lejano** (Zona de Radiación, Zona de Fraunhofer): La distribución angular del campo es prácticamente independiente de la distancia r a la antena.

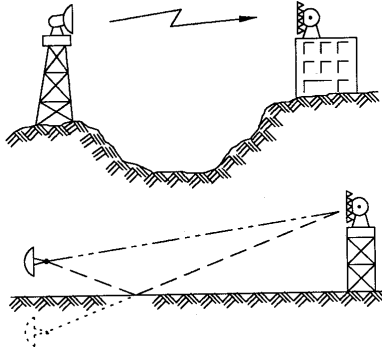


La condición de campo lejano es:

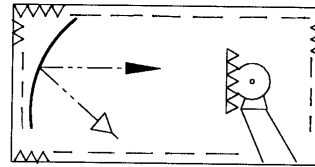
$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{y} \quad r \gg \lambda$$

D: Dimensión máxima de la Antena

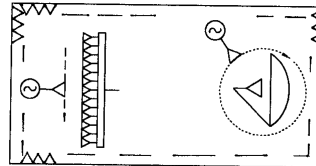
Sistemas de Medidas de Antenas



*Sistemas de Campo Lejano:
Elevado y en reflexión*



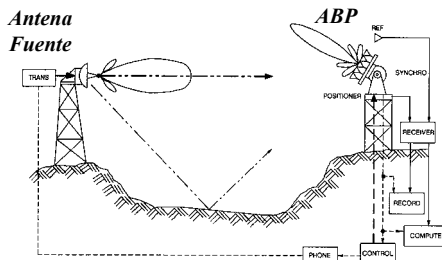
Sistema Compacto



*Sistemas de Campo Próximo:
Plano y Esférico*

Medidas Clásicas de Campo Lejano

- La **ANTENA BAJO PRUEBA** (habitualmente en recepción) se ilumina por una **ANTENA FUENTE**.
 - La antena fuente debe estar a suficiente distancia para que la onda incidente tenga características de onda plana:
 - Amplitud y fase cte. sobre un volumen que debe abarcar a toda la antena bajo medida.



NOTA:

La ABP se puede medir tanto en recepción como en transmisión (antena fuente receptora). Los diagramas y parámetros obtenidos son IGUALES tal como pone de manifiesto el Teorema de Reciprocidad.

Criterios de Diseño de Sistemas de Medida en Campo Lejano

- Estos criterios determinan las características de la antena fuente y la distancia mínima (R) entre antenas.

① **Acoplamiento reactivo**

- Sólo importante a baja frecuencia.

$$R \geq 10\lambda \Rightarrow \frac{E_{1/r^2}}{E_{1/r}} \leq -36\text{dB}$$



*Relación obtenida del
campo de un dipolo corto*

② **Reradiación entre antenas.**

- Sólo es importante con antenas muy mal adaptadas o soportes metálicos no bien cubiertos con absorbente.

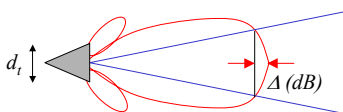
③ **Variación longitudinal de amplitud.**

- $R \geq 10 L$ (L longitud de la antena) $\Leftrightarrow$ Variación ≤ 1 dB

Criterios de Diseño de Sistemas de Medida en Campo Lejano

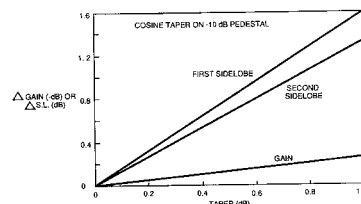
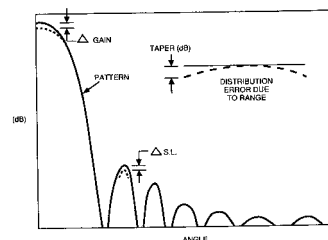
④ **Decrecimiento transversal de la amplitud de la onda incidente, asociado al lóbulo de iluminación de la antena fuente.**

- Reduce la ganancia medida y el nivel de SLL
- La iluminación coseno sobre pedestal de -10dB es representativa de un reflector parabólico
 - $\Delta = -0.5$ dB $\Rightarrow \Delta G = -0.15$ dB.



*D: Apertura
bajo Medida*

- **CRITERIO $\Delta \approx -0.25$ dB $\Rightarrow d_t$.**



Criterios de Diseño de Sistemas de Medida en Campo Lejano

④ Variación de la fase sobre la apertura de la ABP.

- Reduce algo la ganancia.
- Aumenta los lóbulos secundarios adyacentes al principal y rellena los nulos entre ellos.

$$\Delta R \approx \frac{D^2}{8R} \quad \Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \approx \frac{\pi D^2}{4\lambda R}$$

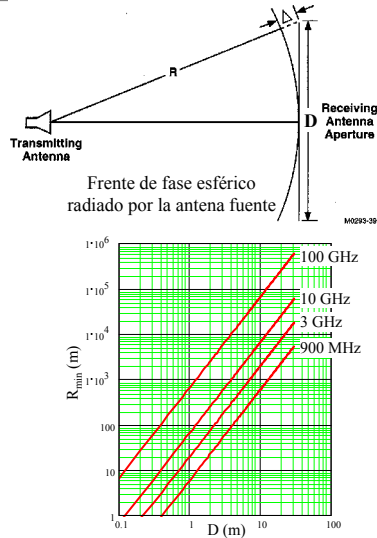
- CRITERIO DE DISTANCIA MÍNIMA

$$\Delta \Phi \leq \frac{\pi}{8}$$

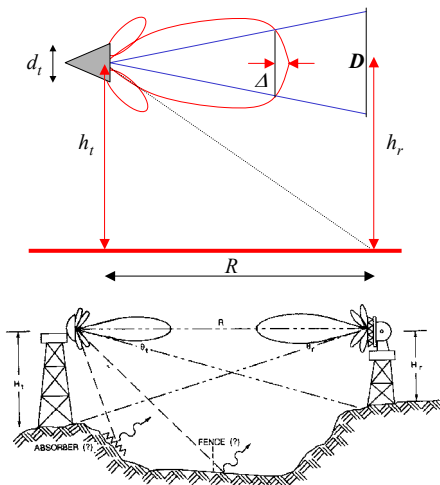
$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$



Antena fuente en zona de campo lejano de la antena bajo medida (Reciprocidad)



Diseño Típico de un Sistema Elevado



- Condición de Fase: (Error en SLL)

$$R = k \frac{D^2}{\lambda} \quad (k \geq 2)$$

- Condición de Iluminación $\Delta \leq 0,25$ dB

$$d_t \leq \frac{\lambda R}{4D}$$

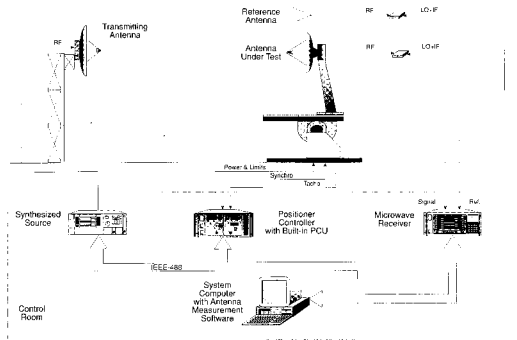
- Condición de No iluminación del suelo

Lóbulo Principal: $h_t = h_r \geq 4D$

1^{er} Lóbulo Secundario: $h_t = h_r \geq 6D$

Conviene utilizar antenas fuente con nivel de lóbulos secundarios reducido y depresiones del terreno para aumentar la altura de las posibles reflexiones.

Instrumentación Típica de un Sistema de Medida de Antenas



- Antena Fuente
- Posicionadores
- Sistema de Control de Posicionadores
- Instrumentación de RF
- Sistema y Software de Adquisición y Proceso

S/N	Error Amp.	Error Fase
20 dB	±0.9 dB	±5.7 °
30 dB	±0.28 dB	±1.8 °
40 dB	±0.09 dB	±0.57 °

Calculo de Potencias y Margen Dinámico

$$P_{Rmax} (dBm) = P_T (dBm) + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) + G_T (dBi) + G_R (dBi) \leq P_{Saturation}$$

$$P_{Rmin} (dBm) = Sensibilidad_{Rx} (dBm) + (S/N_0) (dB)$$

$$Margen\ dinámico (dB) = P_{Rmax} (dBm) - P_{Rmin} (dBm) \geq G_{ABP} (dBi) + 10 dB$$

Introducción a las Medidas de Antenas

19

Cálculo de las Cotas de Error debidas a Reflexiones Residuales

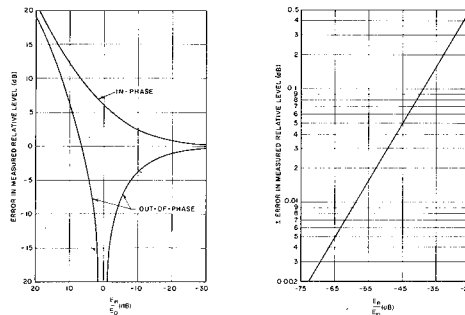
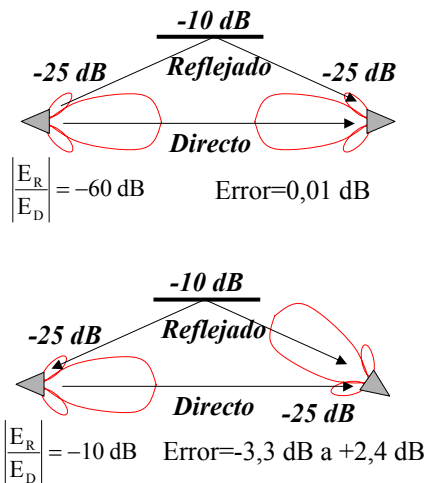
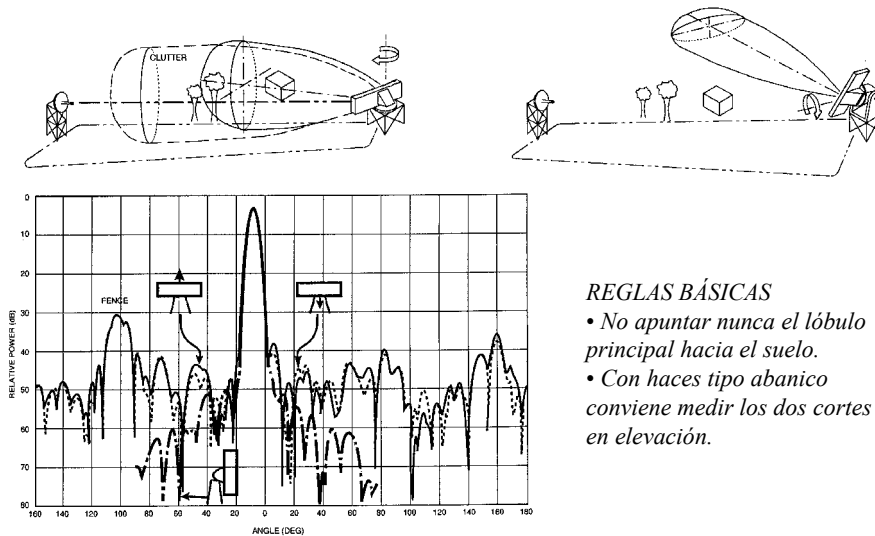


Fig 5
Possible Error in Measured Relative Pattern Level Due to Coherent Extraneous Signals
Linear Scales Are Employed for Signal Ratios of +20 to -30 dB; the Plus-or-Minus
Errors Are Essentially Equal for Ratios of -25 dB or Less, as Indicated in the
Logarithmic Plot for Ratios down to -75 dB

Introducción a las Medidas de Antenas

20

Técnicas de Medida para evitar Reflexiones



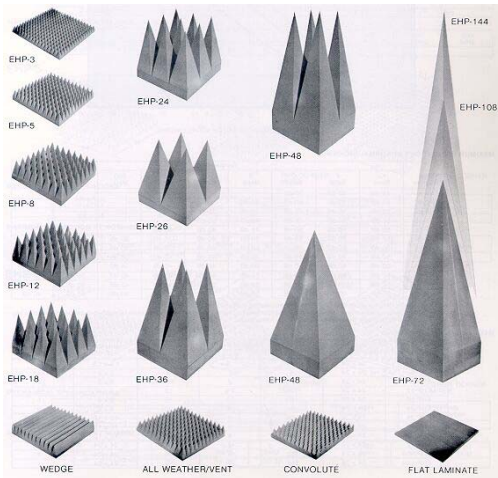
REGLAS BÁSICAS

- No apuntar nunca el lóbulo principal hacia el suelo.
- Con haces tipo abanico conviene medir los dos cortes en elevación.

Cámaras anecoicas

- Son recintos cerrados (normalmente apantallados) recubiertos de material absorbente que simulan condiciones de propagación en espacio libre, gracias a la absorción del material RAM.
- Ventajas:
 - Protección climatológica $\Rightarrow$ Aumenta tiempo disponible de medida.
 - Control ambiente de medida (temperatura, limpieza ...) $\Rightarrow$ antenas de espacio
 - Ahorran gastos de desplazamiento.
 - Eliminan problemas de seguridad.

Materiales absorbentes

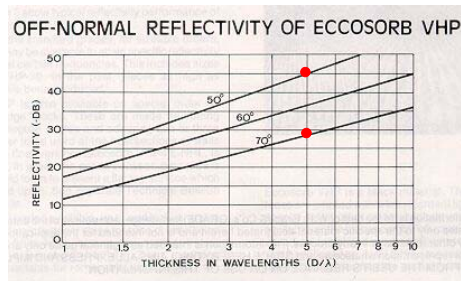
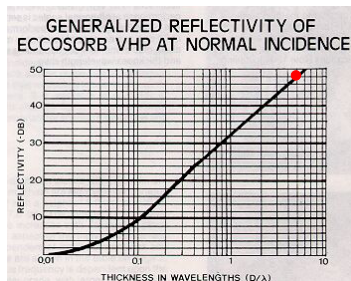


Tipos de materiales absorbentes:

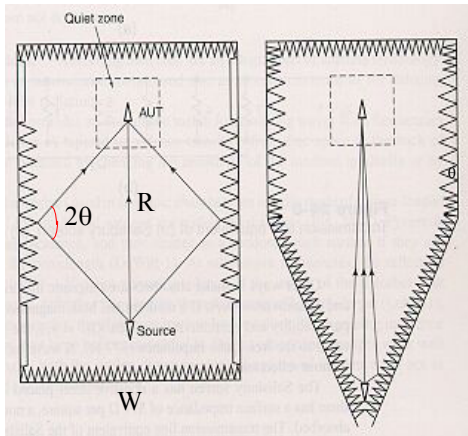
- Piramidales ($H > 5\lambda$): $\rho < -50$ dB
- Hueveras: $\rho < -50$ dB en ondas mm
- Planas: $\rho < -25$ dB (para torres...)
- Pisables: (piramidales + foam + lámina protectora)
- Ventilación, intemperie ...
- Cuñas: específicas para sistemas compactos.

Materiales absorbentes

SPECIFIED MINIMUM REFLECTIVITY OF ECCOSORB VHP GRADES IN dB FOR ANGLES NEAR NORMAL INCIDENCE										
	120 MHz	200 MHz	300 MHz	500 MHz	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz	15 GHz	24 GHz
VHP-2							30	40	45	50
VHP-4						30	40	45	50	50
VHP-8					30	40	50	50	50	50
VHP-12					35	40	50	50	50	50
VHP-18				30	40	45	50	50	50	50
VHP-26			30	35	40	50	50	50	50	50
VHP-45		30	35	40	45	50	50	50	50	50
VHP-70	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50



Tipos de cámaras



a) Rectangular

$$\theta_{\max} < 70^\circ \Rightarrow W/R > 1/2.75$$

Antena fuente (bocina) con lóbulo principal que no ilumine paredes laterales ni el suelo o el techo.

b) Abocinada

Señales interferentes constructivas para eliminar rizado en zona quieta

Usadas en VHF y en UHF

Ajuste de la fuente para cada frecuencia

Tipos de cámaras

c) Cámaras semiabiertas

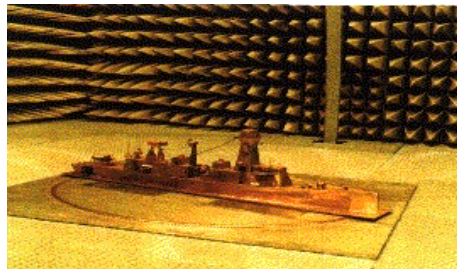
Se elimina una pared de la cámara para iluminar la ABP (protegida a inclemencias del tiempo) desde una antena fuente lejana.

Ejemplos: MBB e INTA de 12x12x12 metros y fuente a 800 metros

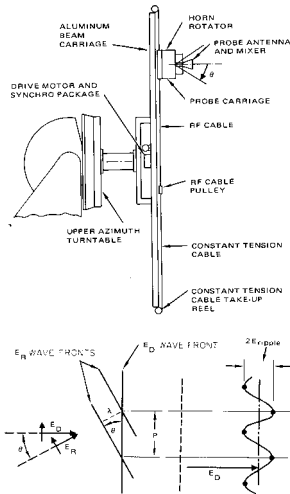
d) Sistemas con plano de masa

Buque sobre posicionador de azimuth.

Sonda de medida sobre posicionador de arco



Evaluación y Ajuste del Campo de Medida Método de la sonda deslizante



- Utilizando una sonda deslizante se debe comprobar que el máximo de radiación de la fuente (o del lóbulo interferente) apunta al centro de la apertura de medida.
- Adquiriendo el campo de iluminación es posible detectar reflexiones espúreas y obtener su nivel.

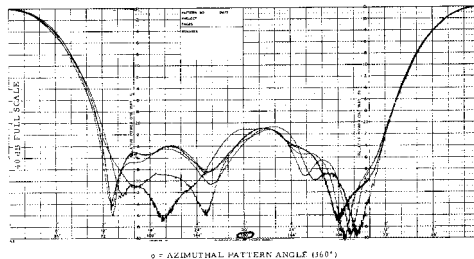
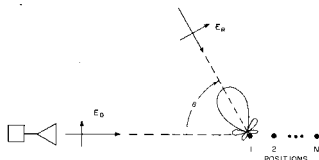
$$P = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

$$\frac{E_R}{E_D} (\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{-1 + 10^{\sigma/20}}{1 + 10^{\sigma/20}} \right)$$

σ = Rizado pico a pico en dB

Evaluación del Campo de Medida Método de Comparación de Diagramas

- Es una forma de detectar reflexiones de gran ángulo (o comprobar su ausencia y la consistencia de una buena medida).
- Consiste en medir la misma antena en distintas posiciones a lo largo del eje del campo de forma que la señal directa y las reflejadas lleguen con distintas fases relativas a la ABP.
- La diferencia de máximo-mínimo y el valor medio para cada ángulo permite obtener el nivel de la señal reflejada (Transparencia 29).

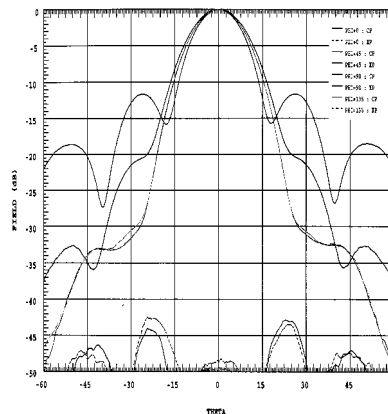


Medidas de Diagramas de Radiación

- **Directamente:**
 - Iluminando con la antena fuente polarizada de acuerdo con las componente copolares deseadas:
 - Lineales para CP-XP
 - Circulares para CPC-XPC
- **Indirectamente:**
 - Adquiriendo las componentes E_θ y E_ϕ para obtener por proceso:
 - E_{CP} - E_{XP} ,
 - E_{CPC} y E_{XPC}

Medidas directas de diagramas CP-XP

- Es una medida típica de bocinas
- Con la ABP apuntando con el eje Z hacia la antena fuente, se sitúa el plano $\phi=45^\circ$ horizontal para poder adquirir este corte con un barrido en acimut.
- Girando el plano de polarización de la antena fuente (patrón de polarización) se busca la mínima señal y se registra el diagrama XP de 45° rotando el eje de acimut.
- Se gira la antena fuente 90° y se adquiere la componente CP de 45° .
- A continuación se miden los planos CP de los cortes 0° y 90°



8. PIRAMIDAL de aliquei (sistema Corregido)
P=11.00 dB

Medidas de Ganancia

- Suelen realizarse por comparación con la de un patrón, iluminando la antena bajo medida y el patrón con la misma fuente.

– Si hay adaptación de impedancias y de polarización:

$$G_{ABP}(\text{dB}) = G_{\text{Patron}}(\text{dB}) + 10 \log \left(\frac{P_{RABP}}{P_{R\text{Patron}}} \right)$$

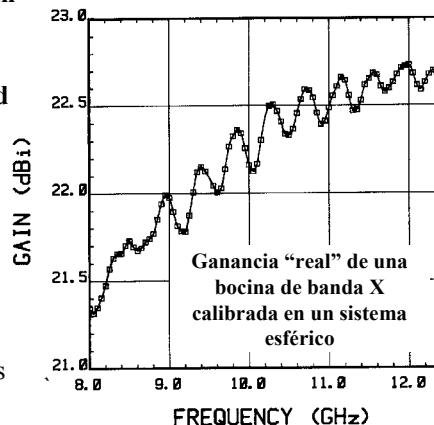
– Corrección por desadaptación de impedancias:

$$\Delta_z = -10 \log \left| \frac{(1 - |\Gamma_{ABP}|^2)(1 - |\Gamma_{Rx}|^2)}{|1 - \Gamma_{ABP} \Gamma_{Rx}|^2} \right| + 10 \log \left| \frac{(1 - |\Gamma_{\text{Patron}}|^2)(1 - |\Gamma_{Rx}|^2)}{|1 - \Gamma_{\text{Patron}} \Gamma_{Rx}|^2} \right|$$

- Un atenuador bien adaptado en el extremo del cable del receptor (justo pegado a la antena) simplifica la corrección puesto que $\Gamma_{Rx} \approx 0$.

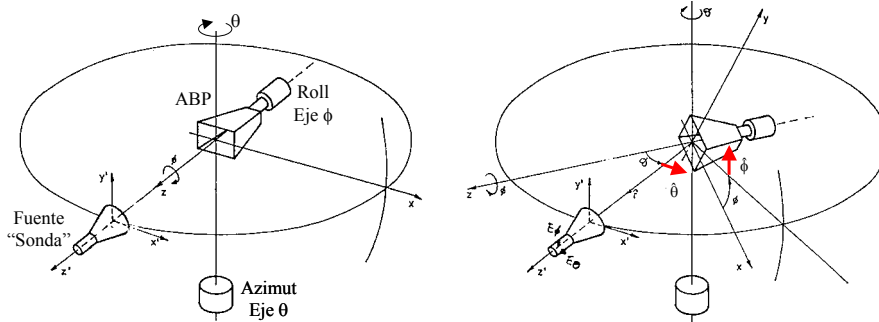
Patrones de Ganancia

- En las bandas de Microondas se utilizan como patrones bocinas piramidales.
- Como valor de ganancia se utiliza normalmente el valor de la directividad teórica que da el fabricante en una tabla.
 - El error de este valor respecto de la ganancia real no suele superarlos 0,3 dB.
- Si se requiere mejor precisión hay que calibrar la bocina patrón, empleando:
 - Método de Friis con 2 antenas iguales
 - Integrando el diagrama medido en un sistema esférico



Medidas de Polarización

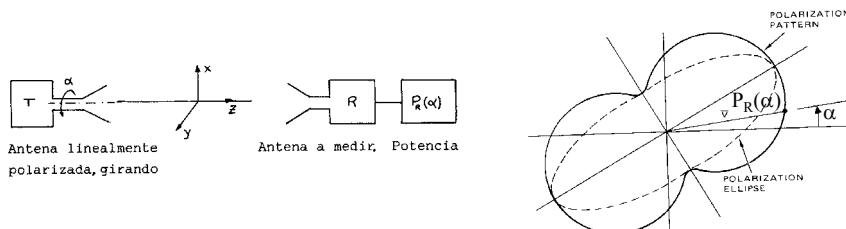
Asignación de Ejes para Roll sobre Azimut



- Con sonda doble se adquieren componentes E_θ y E_ϕ simultáneamente pero hay que calibrar los canales de recepción utilizando una bocina patrón de alta pureza de polarización.
- Con sonda simple se adquiere cada componente en un barrido girándola 90° .
- Las componentes CP-XP, CPC-XPC se obtienen a partir de E_θ y E_ϕ .

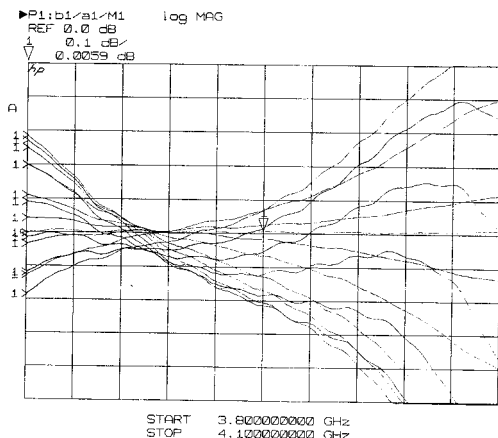
Medida de Polarización

Método de la Fuente Lineal Rotante



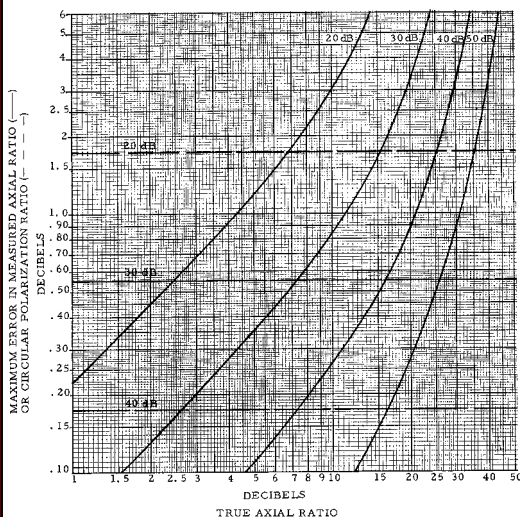
- Este procedimiento da la Relación Axial de polarización como diferencia entre el valor máximo y mínimo registrados en función de α , y el ángulo del eje mayor de la elipse.
- No da el sentido de giro, lo que suele ser intrascendente para polarizaciones lineales.
- Con polarizaciones circulares se suele conocer el sentido de giro a priori o se mide con dos hélices arrolladas a derechas e izquierdas para averiguar el sentido de giro (sentido de arrollamiento de la que reciba mas potencia).

Medidas de Relación Axial vs Frecuencia



- Si se quiere obtener información de la variación de la relación axial con la frecuencia basta con aplicar el procedimiento de la fuente lineal rotante registrando en función de la frecuencia varios valores discretos de α ($\Delta\alpha < 15^\circ$)
- La relación axial es la diferencia entre los valores límite de máximo y mínimo.
- Para RA muy bajas conviene verificar la junta rotatoria para acotar el error.

Requerimientos de Pureza de Polarización de la Antena Fuente

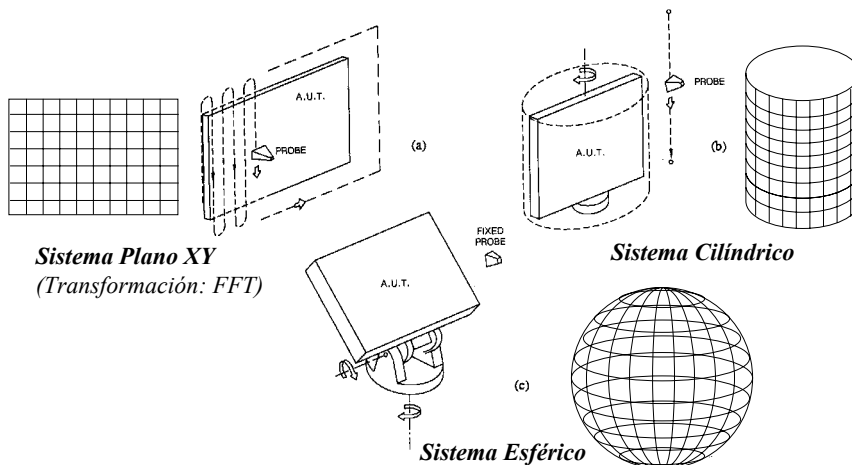


- La figura presenta en trazos continuos el error cometido en la medida de la Relación Axial de la ABP en función de la Relación Axial de la Antena Fuente.
- En trazo discontinuo presenta el error cometido en la medida de la relación de polarizaciones circulares de la ABP en función de la relación axial de la antena fuente.

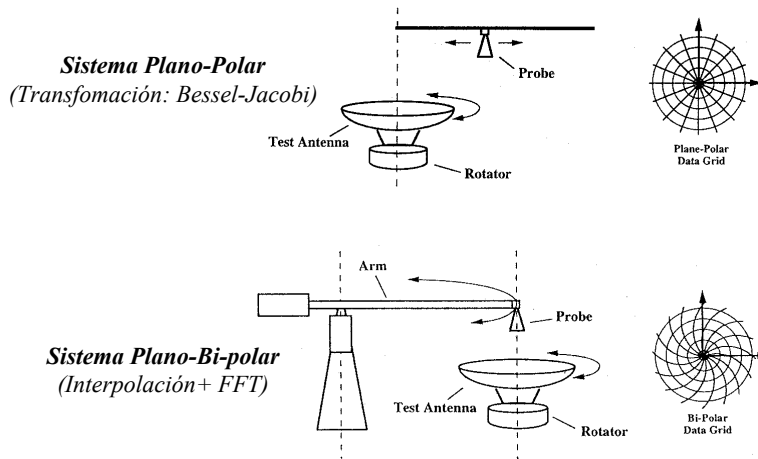
Técnicas de Medida en Campo Próximo

- Se mide el campo en amplitud y fase sobre una superficie (plana, cilíndrica o esférica) próxima a la antena
- El campo lejano se obtiene utilizando un algoritmo de transformación
- **Ventajas**
 - Requieren menor espacio físico (ahorro de material absorbente)
 - Mantienen las ventajas de las medidas en interior (seguridad, control, etc)
 - Obtención del campo lejano sin el error asociado a la distancia de medida R
 - Promedian posibles errores aleatorios de medida.
- **Inconvenientes**
 - Sistemas de exploración más precisos que los de campos lejanos
 - Desarrollo de software de transformación basado en descomposiciones espectrales del campo en ondas planas, cilíndricas o esféricas
 - Necesidad de calibración de la sonda en directividad y polarización
 - Necesidad de adquirir siempre la superficie completa.

Tipos de Campos Próximos



Tipos de Campos Próximos



Comparación entre Campos Próximos

- Sistemas Planos:
 - Cobertura cónica
 - Antenas de haz estrecho (antenas de apertura y arrays planos)
 - Diagnósis directa
 - Medida de grandes antenas de espacio
- Sistemas Cilíndricos:
 - Cobertura toroidal
 - Antenas omnidireccionales o con haz en abanico (Antenas estación base sobre su soporte)
- Sistema Esférico:
 - Cobertura total
 - Antenas de cualquier tipo
 - Apropiado para el cálculo de directividad.

Aspectos Prácticos

① Validez angular de la Medida

- Es imprescindible limitar la adquisición de muestras a un rectángulo finito en el plano de medida.
- Este truncamiento limita la validez de nuestros resultados en campo lejano a ángulos inferiores al expresado por θ_v .

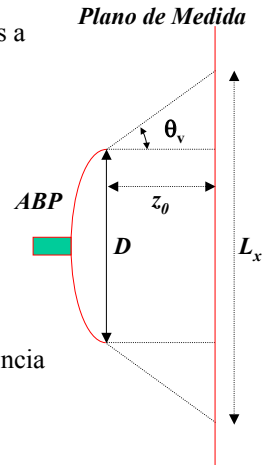
$$\theta_v = \text{atan}\left(\frac{L_x - D}{2z_0}\right)$$

- Si $E(L_x/2) < -40$ dB errores de truncamiento despreciables

② Inexistencia de reflexiones múltiples

- La teoría de la transformación se basa en la inexistencia de reflexiones múltiples entre la ABP y la sonda.
- Para ello antena y sonda, bien adaptadas, deben separarse suficientemente:

$$6\lambda < z_0 < 12\lambda$$



Aspectos Prácticos

③ Número de Muestras (Teorema de Muestreo)

- No se puede adquirir, almacenar o procesar señales continuas por lo que se sustituye la CTF por la DFT de una secuencia equiespaciada de muestras de la señal de acoplamiento.
- Separación máxima: Teorema de Muestreo

$$k_x^2 + k_y^2 < k \Rightarrow \begin{matrix} -k < k_x < k \\ -k < k_y < k \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \Delta_x \leq \frac{2\pi}{2k} = \frac{\lambda}{2} \\ \Delta_y \leq \frac{\lambda}{2} \end{matrix}$$

- Valor práctico recomendado, para adquisiciones con rango de validez $\theta_v \sim 90^\circ$:

$$\Delta_{xy} = 0.45\lambda$$

- Con θ_v menores se puede reducir Δ_{xy} a:

$$\Delta_{xy} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_v} \quad \text{OJO: !Para } \theta > \theta_v \text{ existe "aliasing" !}$$

Aspectos Prácticos

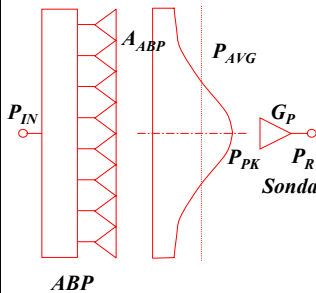
④ Requerimientos de potencia

- La Potencia máxima recibida por la sonda vale:

$$P_{RMax} = A_{eff} \frac{P_{IN}}{A_{ABP}} \frac{P_{PK}}{P_{AVG}} \quad A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_p$$

donde:

- A_{ABP} : Área de la ABP
- G_{ABP} : Ganancia de la ABP (uniformemente iluminada)
- P_{IN} : Potencia de entrada
- P_{PK} : Densidad de potencia de pico
- P_{AVG} : Densidad de potencia media
- G_p : Ganancia de la sonda



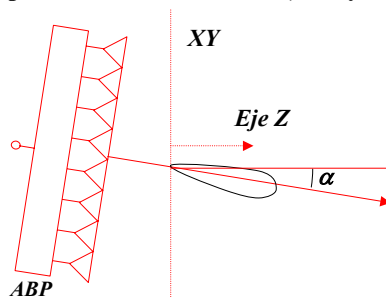
$$\frac{P_{RMAX}}{P_{IN}} = \frac{G_p}{G_{ABP}} \frac{P_{PK}}{P_{AVG}} \approx 3 \frac{G_p}{G_{ABP}} \approx 4 \frac{A_p}{A_{ABP}}$$

$$P_{RMin} \approx P_{RMax} - 40dB \geq \text{Sensibilidad}(S_0/N_0 = 1) + \left(\frac{S_0}{N_0} \right)$$

Aspectos Prácticos

⑤ Alineamiento

- El diagrama obtenido está expresado en ángulos $(\theta, \phi) \Leftrightarrow (k_x, k_y)$ referidos a los ejes XYZ propios del scanner.
- Si se requiere una referencia de antena hay que realizar el correspondiente alineamiento entre sistemas de referencia de la ABP y el XYZ del scanner.
- Ejemplo de desalineamiento: (Array Broadside)

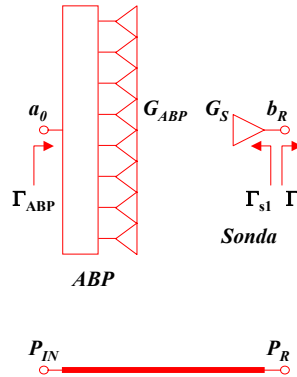


El programa PNIFT entregará el máximo situado en $\theta = \alpha$

Medida de la Ganancia de la ABP

• Método directo

- La determinación de la ganancia requiere conocer:
 - Ganancia de la sonda
 - Se puede obtener con una adquisición esférica
 - Lectura directa de las pérdidas de inserción Tx-Rx
 - unión cable ABP - cable sonda
 - Coeficientes de reflexión Γ_{ABP} , Γ_s y Γ_l
 - Una buena técnica es introducir un atenuador a la entrada del cable del receptor para hacer $\Gamma_l = 0$



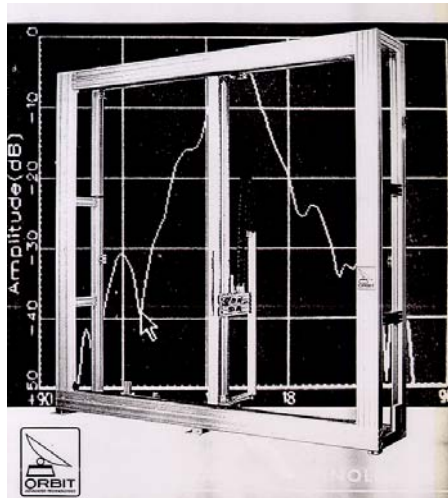
Cálculo de la Ganancia de la ABP

• Medida de Comparación de Ganancia

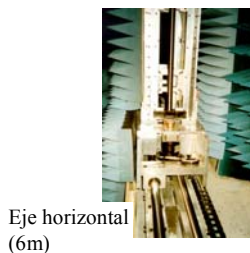
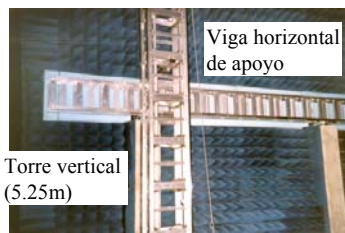
- Midiendo en el mismo sistema plano con la misma sonda y en las mismas condiciones una antena patrón de ganancia conocida $G_{patrón}(\theta=0^\circ)$:
 - G_{ABP} : Ganancia real de la ABP
 - $G'_{patrón}$: Ganancia aparente de la antena patrón (salida del PNIFT)
 - G'_{ABP} : Ganancia aparente de la ABP (salida del PNIFT)

$$G_{ABP}(\theta, \phi) = G'_{ABP}(\theta, \phi) \frac{G_{Patrón}(0,0)}{G'_{Patrón}(0,0)}$$

Sistema plano de pórtico

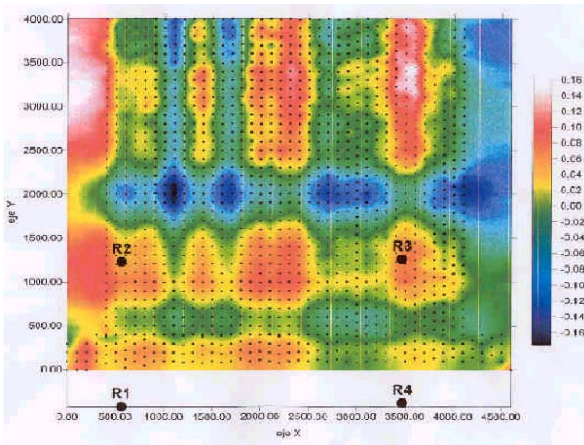


Sistema plano de GR-UPM



El sistema consta de una eje horizontal con una guía cilíndrica sobre la que se desliza (mediante un husillo) una mesa que soporta la torre vertical. Esta torre con guías de precisión y husillo para la mesa vertical se apoya por gravedad sobre otra guía horizontal superior que es paralela a la de la base, definiendo de este modo un plano, de **4,75x4.75 m**, de gran precisión.

Sistema plano de GR-UPM



Representación de los errores de planitud de la zona central del scanner, medidos con un laser tracker interferométrico

Este sistema se ha diseñado y construido para medir grandes antenas de satélites.

La excelente planitud ($<0,34\text{mm}$ pico a pico) permitirá utilizar este sistema para medir grandes reflectores y arrays hasta 40GHz.

Descomposición en Ondas Esféricas

- Campo eléctrico monocromático radiado por una antena transmisora expresado en modos esféricos.

$$E(\vec{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n T_{Mmn} \bar{M}_{mn}(\vec{r}) + T_{Nmn} \bar{N}_{mn}(\vec{r})$$

Modos TE

$$\bar{M}_{mn}(\vec{r}) = \frac{k}{\sqrt{\eta}} \left(\frac{-m}{|m|} \right)^m \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi n(n+1)}} \sqrt{\frac{(n-|m|)!}{(n+|m|)!}} \left(\begin{array}{l} h_n^{(1)}(kr) \frac{j m}{\sin \theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) \exp(jm\phi) \hat{\theta} - \\ - h_n^{(1)}(kr) \frac{dP_n^{|m|}(\cos \theta)}{d\theta} \exp(jm\phi) \hat{\phi} \end{array} \right)$$

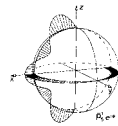
Modos TM

$$\bar{N}_{mn}(\vec{r}) = \frac{k}{\sqrt{\eta}} \left(\frac{-m}{|m|} \right)^m \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi n(n+1)}} \sqrt{\frac{(n-|m|)!}{(n+|m|)!}} \left(\begin{array}{l} \frac{n(n+1)}{kr} h_n^{(1)}(kr) P_n^{|m|}(\cos \theta) \exp(jm\phi) \hat{r} + \\ + \frac{1}{kr} \frac{d(kr h_n^{(1)}(kr))}{d(kr)} \frac{dP_n^{|m|}(\cos \theta)}{d\theta} \exp(jm\phi) \hat{\theta} + \\ + \frac{1}{kr} \frac{d(kr h_n^{(1)}(kr))}{d(kr)} \frac{j m}{\sin \theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) \exp(jm\phi) \hat{\phi} \end{array} \right)$$

Función de Hankel de 1ª especie

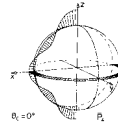
Polinomio asociado de Legendre

Ejemplos de Modos Esféricos



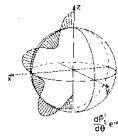
Modo $N_{1,5}$

N_r

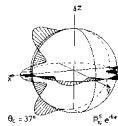


Modo $N_{0,4}$

N_r

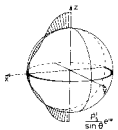


N_θ

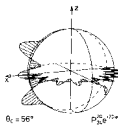


Modo $N_{6,10}$

N_r



N_ϕ



Modo $N_{20,24}$

N_r

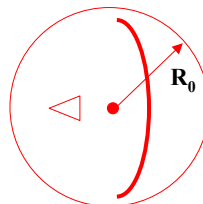
Muestreo del Campo Próximo

- El campo se adquiere en una malla regular de puntos (θ, ϕ) con una separación función del radio R_0 de la esfera mínima que contiene a la antena bajo rotación.
- Tomando $N_{\max} = kR_0 + 10 = 2\pi R_0 / \lambda + 10$ los incrementos angulares son:

$$\Delta\theta \leq 180^\circ / N_{\max} \quad \Delta\phi \leq 360^\circ / 2N_{\max}$$

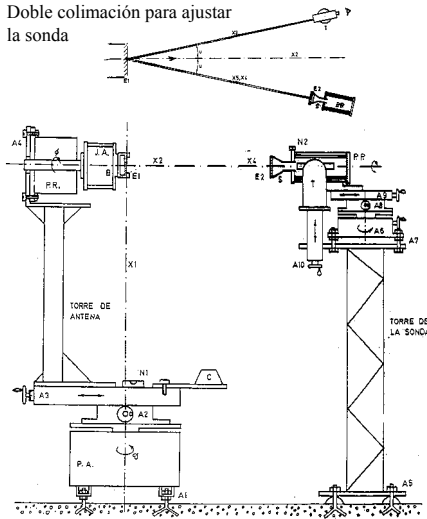
Esfera de Radio mínimo que encierra la antena cuando gira

Condición de Corte
 $N_{\max} = kR_0$



Alineamiento

Doble colimación para ajustar la sonda



Condiciones de Alineamiento

- El eje de azimut (X1) debe ser vertical.
- El eje de roll (X2) debe ser horizontal.
- X1 y X2 deben cortarse para definir el centro de la esfera medida.
- El eje de la sonda (X4) debe ser horizontal hacia el centro de la esfera.
- El offset de azimut debe ajustarse para obtener lectura $\theta=0^\circ$.
- La referencia de polarización de la sonda debe situarse horizontal.

Sistema esférico GR-UPM

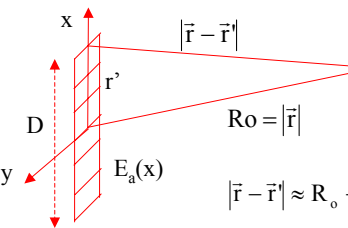


Medidas en Zona de Fresnel

- Las técnicas de medida en zona de Fresnel que se describen a continuación son aplicables sólo a antenas lineales (tiras) o aperturas o arrays rectangulares con distribuciones separables.
- Permiten reducir considerablemente el tiempo de medida respecto a las técnicas clásicas de campo próximo.
- PERO, solamente permiten obtener los diagramas de campo lejano en los planos principales, a partir de adquisiciones en zona de Fresnel en dichos planos.
- El primer programa (SFIFT), que sigue la técnica de Evans, lo desarrollamos para medir los paneles de la antena ASAR del satélite ENVISAT.

Modelo de corrección cuadrática de fase (Modelo tira)

Campo radiado:

$$E \propto \int E_a(x) \frac{e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dx$$


$$R_0 = |\vec{r}|$$

$$|\vec{r} - \vec{r}'| \approx R_0 - x \cdot \sin\theta + \frac{1}{2R_0} x^2 \cos^2\theta - \frac{1}{2R_0^2} x^3 \sin\theta \cdot \cos^2\theta$$

- Campo lejano ($R > 2D^2/\lambda$): término cuadrático del desarrollo despreciable
- Zona de Fresnel ($0.62(D^3/\lambda)^{1/2} < R < 2D^2/\lambda$): término cúbico del desarrollo despreciable

Modelo de corrección cuadrática de fase

$$E_{\text{lejano}} \propto \int_{-D/2}^{D/2} E_a(x) e^{jk_o x \sin \theta} dx = \int_{-1}^1 E_a\left(\frac{x}{D/2}\right) e^{jk_o \frac{x \cdot D/2}{D/2} \sin \theta} d\left(\frac{x}{D/2}\right) = \int_{-1}^1 E_a(X) e^{j \frac{\pi}{\lambda} X \cdot D \sin \theta} dX$$

Campo en zona de Fresnel:

$$E_{RO}(u) = \int_{-1}^1 E_a(X) e^{juX} e^{-j\alpha_{Ro} X^2} dX$$

donde: $u = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda}; \alpha_{Ro} = \frac{\pi \cos^2 \theta}{8\beta_{Ro}}; \beta_{Ro} = \frac{R_o}{2D^2/\lambda} = \frac{\text{distancia medida}}{\text{Rayleigh}}$

Campo lejano:

$$E_R(u) = \int_{-1}^1 E_a(X) e^{juX} e^{-j\alpha_{Ro} X^2} e^{j\alpha_{Ro} X^2} dX$$

$$e^{j\alpha_{Ro} X^2} = \sum_{n=-N}^N A_n e^{jn\pi X}$$

$$E_R(u) = \sum_{n=-N}^N A_n \int_{-1}^1 E_a(X) e^{j(u+n\pi)X} e^{-j\alpha_{Ro} X^2} dX$$

$$E_R(u) = \sum_{n=-N}^N A_n E_{RO}(u + n\pi)$$

Simulaciones

TRANSFORMACIÓN EN APERTURAS RECTANGULARES. RESULTADOS.

Antena rectangular: Dx = 1 m, Dy = 0.5 m

Frecuencia = 6 GHz

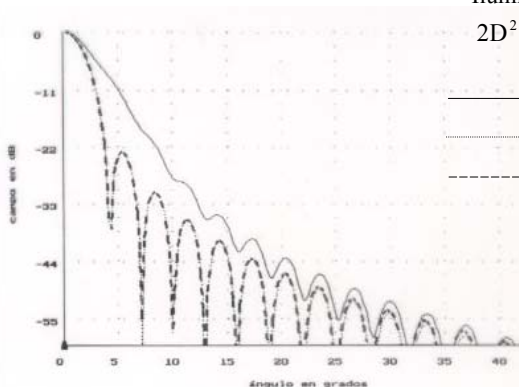
Iluminación tipo coseno

$2D^2/\lambda = 40$ metros

Distancia de medida: $R_o = 5.5$ m

Campo teórico $R = \infty$

Campo transformado $R = \infty$



Simulaciones

TRANSFORMACIÓN EN APERTURAS RECTANGULARES. RESULTADOS.

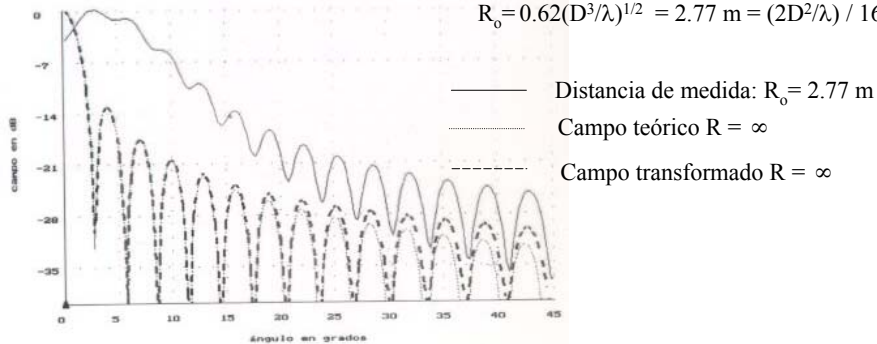
Tira: $D = 1 \text{ m}$

Frecuencia = 6 GHz

Iluminación uniforme

$2D^2 / \lambda = 40 \text{ metros}$

$$R_0 = 0.62(D^3/\lambda)^{1/2} = 2.77 \text{ m} = (2D^2/\lambda) / 16$$



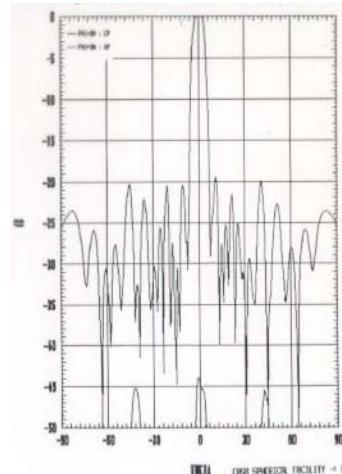
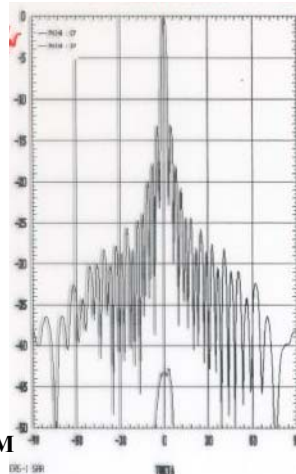
Medidas

Medidas de planos principales en zona de Fresnel, transformadas a campo lejano

Distancia de medida:

$$R_0 = 5.5 \text{ m} = (2D^2/\lambda)/8$$

Patrón calibración:
panel ERS-1 ESA
Medido en ETSIT-UPM



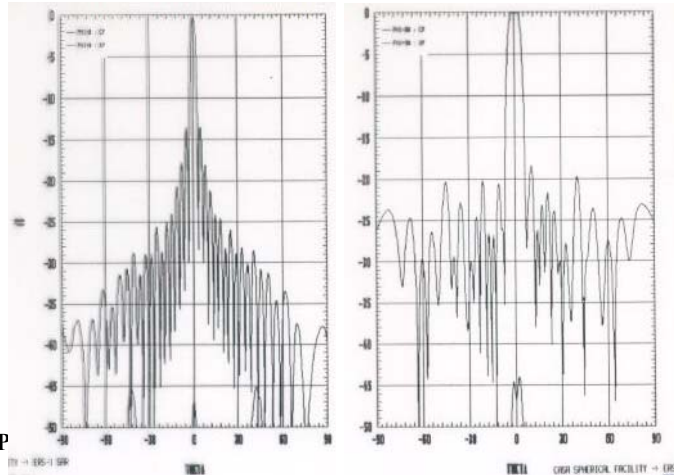
Medidas

Medidas de planos principales mediante adquisición completa esférica:

Distancia de medida:

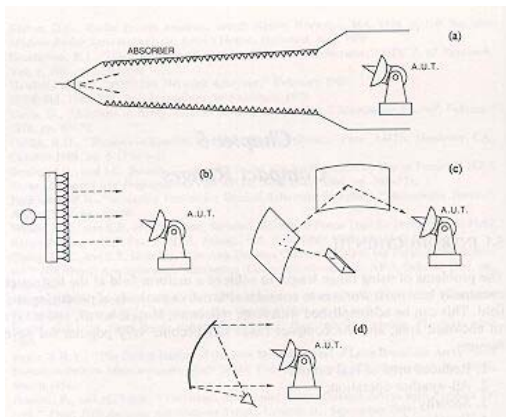
$$R_0 = 5.5 \text{ m} = (2D^2/\lambda)/8$$

Patrón calibración:
panel ERS-1 ESA
Medido en ETSIT-UP



Rangos compactos

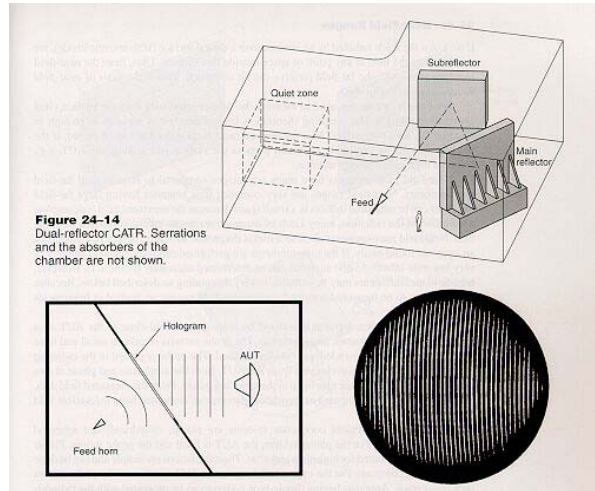
- Son sistemas de uno o más reflectores (u otros elementos) que transforman el frente de onda esférica radiado por un pequeño alimentador en un frente de onda plana que ilumina la Antena bajo prueba (ABP)



- Túnel anecoico
- Array plano uniforme
- Sistema doble reflector
- Sistema reflector offset (primer sistema utilizado por Scientific Atlanta en 1968)

Rangos compactos

Sistema CATR tipo Vokurka
de cilindros parabólicos



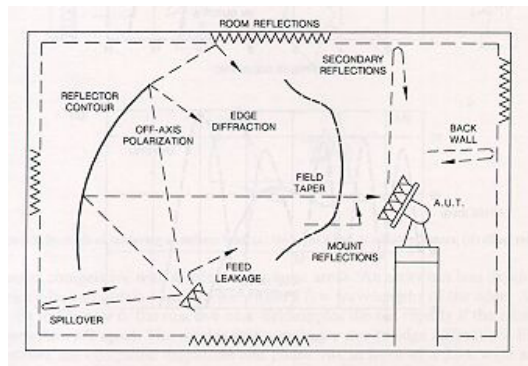
Sistema CATR por holograma
para ondas milimétricas y
submilimétricas

Especificaciones zona tranquila

Zona tranquila: volumen del espacio en el que se sitúa la ABP, en el que las condiciones de iluminación difieren de las propias de una onda plana por debajo de unos valores preestablecidos.

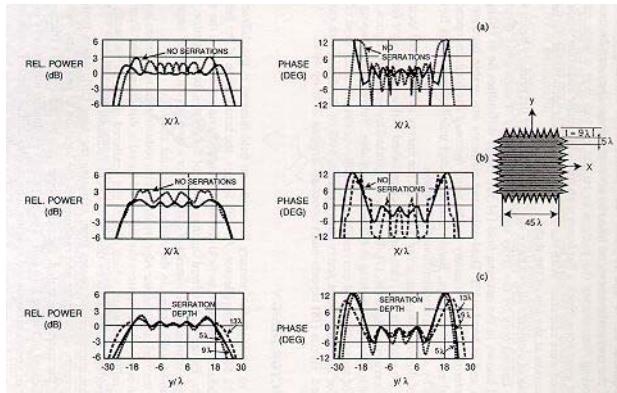
Taper (impuesto por diagrama del alimentador y por la diferencia de caminos hasta el reflector). Nivel de iluminación típico en el borde del reflector de -1.5 dB / -2 dB. Valores típicos de -0.5 dB ó -1 dB

Rizado producido por las difracciones en el borde del reflector y por las diversas reflexiones en las paredes. Valores típicos máximos de ± 0.5 dB y $\pm 10^\circ$ de fase



Especificaciones zona tranquila: Técnicas de reducción de difracción

Aserramientos en el reflector:



Reflector offset de distancia focal igual a 60λ .

Diámetro zona tranquila = $\frac{1}{2}$ diámetro del reflector

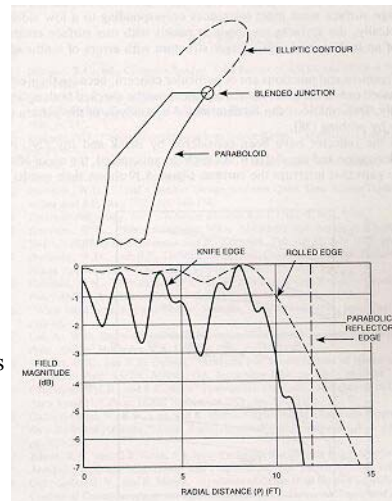
Especificaciones zona tranquila: Técnicas de reducción de difracción

Curvado (rolled) del borde del reflector:

Diámetro zona tranquila =
= 0.35 diámetro del reflector

Otras técnicas:

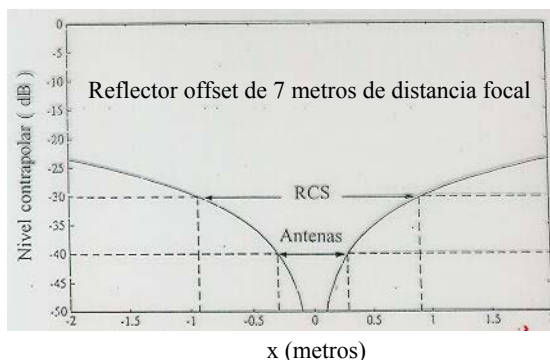
- películas resistivas de resistencia variable.
- iluminación con clusters de bocinas
- ...



Especificaciones zona tranquila

Nivel contrapolar: depende del sistema de reflectores utilizado y de la calidad del alimentador.

- Los reflectores offset introducen contrapolar intrínseca en el plano antisimétrico, y les hace poco recomendables para medida de antenas.
- Los sistemas de doble reflector se pueden diseñar para compensar esta polarización (condición de Mizouguchi)



Especificaciones zona tranquila

Margen de frecuencias:

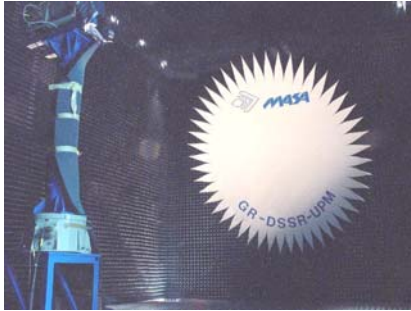
-La frecuencia mínima está limitada por la difracción asociada al tamaño de los reflectores utilizados. Para un reflector de 30λ (aserramientos incluidos) el rizado se sitúa en unos 2 dB pico a pico. A 1 GHz es necesario un reflector de 10 metros.

- La frecuencia máxima de utilización está limitada por los errores de fase asociados a la imprecisión del mecanizado de los reflectores. El requisito de precisión se sitúa en torno a $\lambda/100$ de la máxima frecuencia deseada.

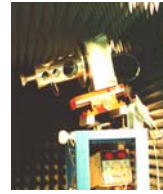
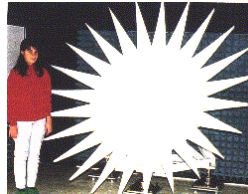
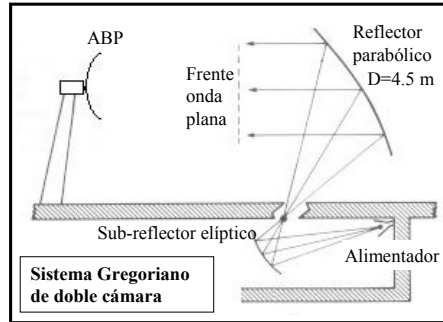
Scanning:

Posibilidad de desplazamiento lateral del alimentador (para reorientar el haz de rayos colimados de salida) sin que taper y rizado se degraden. Esta técnica permite medir respuesta de antenas de satélite sin necesidad de rotar éste.

Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara

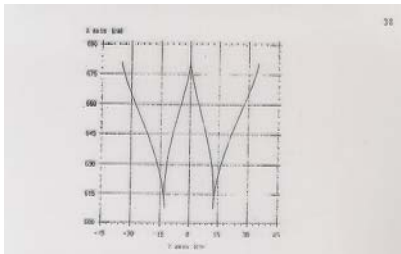


Cámara principal: 15L x 8A x 7.5H m
Banda de funcionamiento: 6 -150 GHz
Zona quieta: 3 m de diámetro
Rizado amplitud: 0.5 dB pico a pico
Rizado fase: $\pm 5^\circ$
Nivel contrapolar: < -38 dB

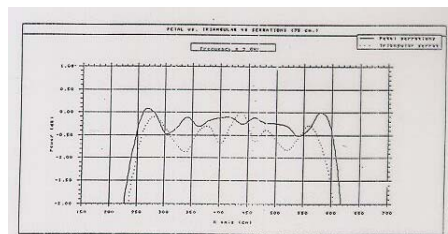


Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara

Análisis de pétalos cosenoidales



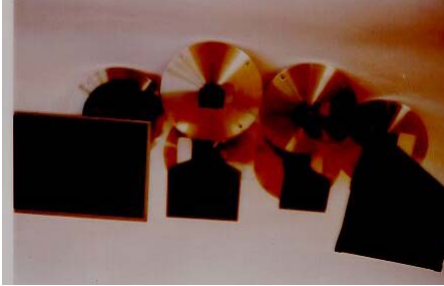
Pétalos de 75 cm



Comparación PO entre pétalos triangulares y cosenoidales

Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara

Alimentadores



Bocinas piramidales



Bocinas tipo choque

Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara

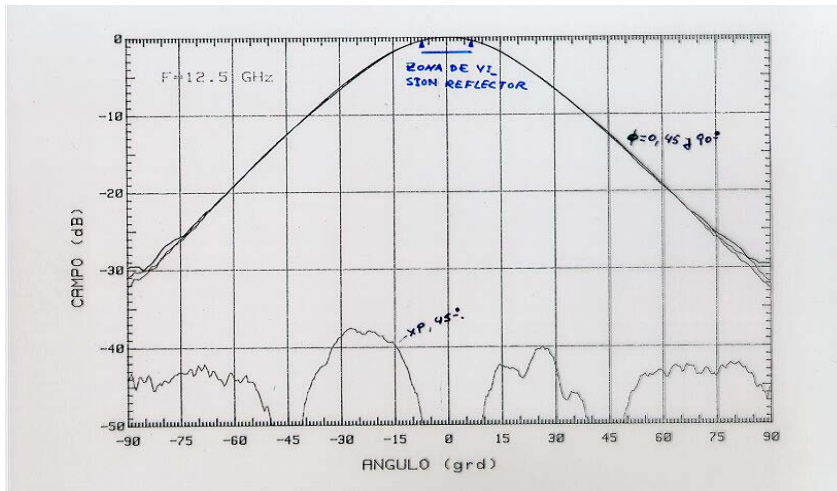


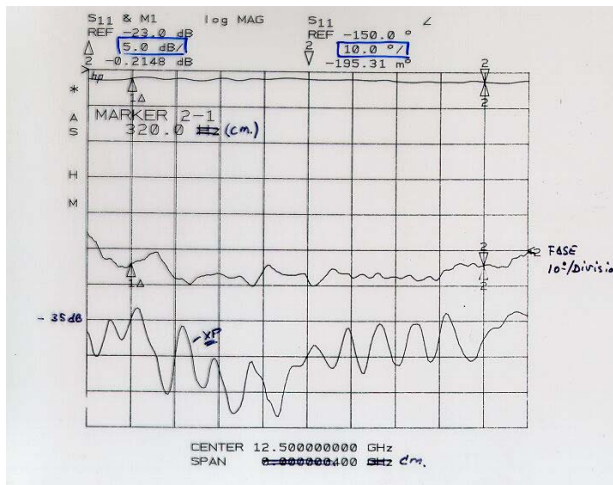
Diagrama de alimentador tipo choque

Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara



Deslizadera lineal para verificación de zona tranquila

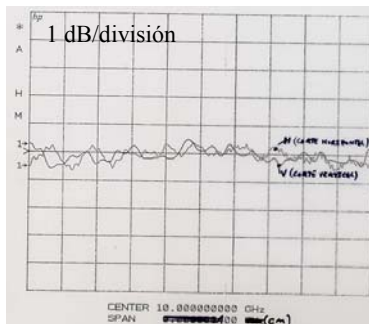
Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara



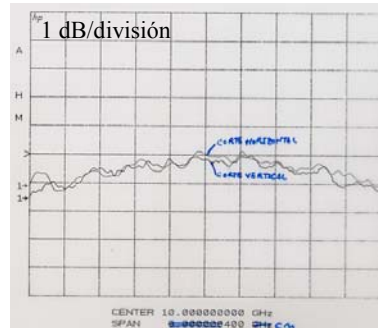
Calidad zona tranquila

Sistema GR: Gregoriano de Doble cámara

Rizado y taper zona tranquila



Con bocinas choque



Con bocinas piramidales
(de mayor ganancia)

Bibliografía

- **Microwaves Antenna Measurements** Hollis J.S., Lyon T.J. and Clayton L. Scientific Atlanta. 1970 (1983)
- **IEEE Standards Test Procedures for Antennas.** IEEE Std. 149-1979 John Wiley
- **The Handbook of Antenna Design. Chapter 8.** A.W. Rudge et al (Ed.), Appel-Hansen J, et al. Peter Pelegrinus Ltd 1982
- **Spherical Near Field Antenna Measurements** J.E. Hansen (TUD). IEE Electromagnetic Series. Peter Pelegrinus Ltd 1990.
- **Antenna Measurement Techniques** G.E. Evans. Artech House Inc. 1990.