



MODELADO DE UNA CÁMARA DE ONDA MILIMÉTRICA

Memòria del Projecte Fi de Carrera
d'Enginyeria Tècnica de Telecomunicació,
especialitat Sistemes Electrònics
realitzat per
Pau Aguilà Moliner
i dirigit per
Gary Junkin
Bellaterra, 21 de setembre de 2010

El sotasingnat, Gary Junkin

Professor/a de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva direcció per en

Pau Aguilà Moliner

I per tal que consti firma la present.

Signat:

Bellaterra, 21 de setembre de 2010

Quiero agradecer a Gary Junkin, el haberme dado la oportunidad de trabajar en unos campos tan interesantes como lo son el diseño de antenas y la formación de imágenes. Así como el apoyo de aquella gente que, de algún modo u otro, han hecho que este proyecto fuera posible.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	5
1.1	Motivación.....	5
1.2	Objetivos.....	6
1.3	Organización del proyecto.....	6
1.4	Programas utilizados en el proyecto.....	7
2.	Fundamentos de Óptica	9
2.1	Óptica Geométrica.....	9
2.2	Óptica Física.....	11
2.3	Formación de imágenes con espejos	13
2.4	Bibliografía.....	18
3.	Fundamentos de antenas.....	19
3.1	Conceptos generales	19
3.2	Antenas de bocina (<i>Horn Antennas</i>).....	21
3.2.1	Bocinas rectangulares / cónicas.....	21
3.3	Reflectores parabólicos	24
3.3.1	Geometrías.....	25
3.3.2	Ánálisis con óptica física y óptica geométrica	27
3.3.3	Eficiencias y bloqueo.....	29
3.3.4	El cálculo del “ <i>Beam Efficiency</i> ” y su relación con el contraste de la imagen	32
3.4	Bibliografía.....	34
4.	Diseño de una cámara de onda milimétrica mediante “ <i>Spinning Reflectors</i> ”	36
4.1	Configuración del sistema	36
4.1.1	Configuración de los reflectores.....	36
4.1.2	Configuración de la bocina.....	40
4.2	Elaboración del modelo de simulación electromagnético	44
4.2.1	Requisitos de muestreo en óptica física y en óptica geométrica	44
4.2.2	Consideraciones de tiempo de ejecución.....	44
4.2.3	Simulación mediante FEKO y SABOR.....	45
4.2.4	Control de FEKO mediante Excel.....	50
4.3	Bibliografía.....	52
5.	Formación de imágenes con la cámara de “ <i>Spinning Reflectors</i> ”	54
5.1	Funcionamiento del sistema	54
5.2	Formación de la imagen	57
5.2.1	Simulación de la “ <i>Point Spread Function</i> ”	57
5.2.2	Representación de un objeto arbitrario.....	60
5.2.3	Cálculo del contraste en un ambiente exterior.....	64
5.3	Implementación física del diseño	65
5.4	Bibliografía.....	67
6.	Conclusiones.....	68
7.	Anexos	70
7.1	Simulación de una antena Cassegrain mediante EDITFEKO	70
7.2	Macro WriteFile programada para el control de FEKO	71
7.3	Cálculo del campo en la apertura de la antena mediante Matlab	73
7.4	Rotación del reflector principal y del subreflector	74
7.5	Rotación del subreflector (representación tridimensional).....	75
7.6	Simulación de un “ <i>Airy Disk</i> ” y formación de una imagen.....	76
7.7	Creación de una imagen y de la PSF mediante la convolución	78

1. Introducción

1.1 Motivación

Actualmente, las cámaras de ondas milimétricas han repercutido significativamente en nuestro *modus vivendi* debido a su aplicación quizás más polémica: **los escáneres corporales de los aeropuertos**.

El funcionamiento de este tipo de cámaras es similar al de los **infrarrojos**, pues detectan la energía térmica emitida por los cuerpos, con la diferencia que producen menos atenuación en el caso de condiciones atmosféricas adversas (niebla, lluvia, etc...). Asimismo, dado que trabajan con una longitud de onda mayor (entre 300 μm y 3 cm), presentan una mayor capacidad de percepción frente a una cámara de infrarrojos y, a diferencia de los **rayos X**, no suponen riesgo alguno para la salud.

Por otro lado, en función de dicho funcionamiento, existen dos clases de cámaras de ondas milimétricas:

- **Activas:** Funcionan como un radar de corto alcance proyectando un haz de ondas milimétricas sobre el objeto y detectando los reflejados.
- **Pasivas:** Captan el ruido térmico en el rango de las ondas milimétricas que desprende cualquier material y posteriormente procesan esta información de acuerdo con la distribución de energía detectada.

Finalmente, si bien su anterior uso es el más conocido, lo cierto es que se trata de una tecnología en auge y con mucho potencial empleada en multitud de sectores diferentes, como se ilustra en la Figura 1.1.

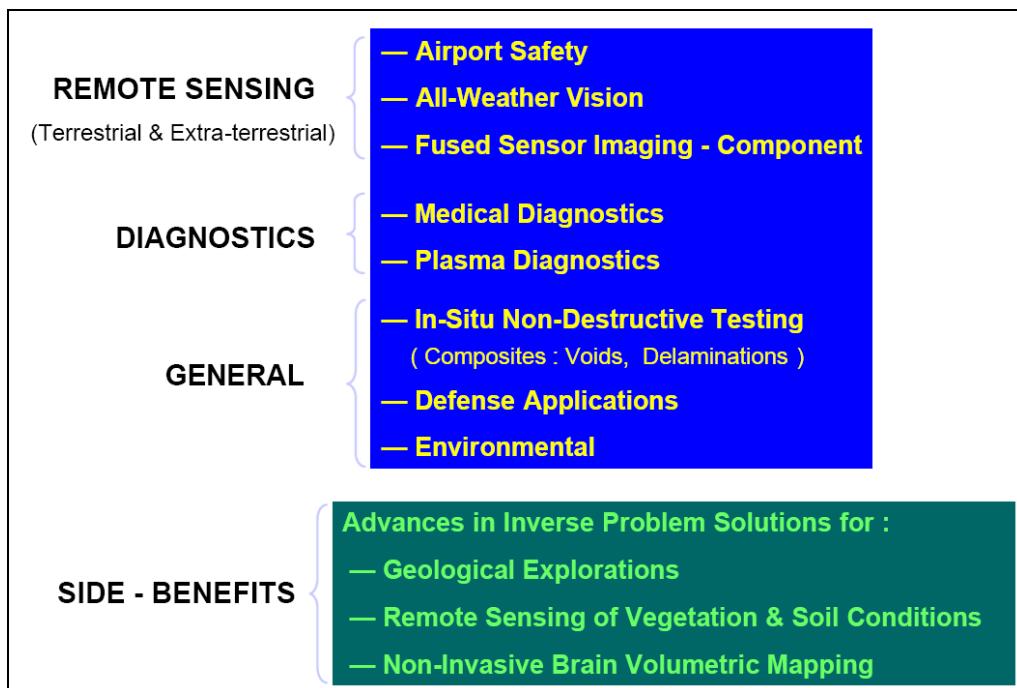


Figura 1.1 Aplicaciones de las cámaras de ondas milimétricas [1]

[1] <http://www.ima.umn.edu/talks/workshops/5-4-6.2001/blankson/blankson.pdf>

1.2 Objetivos

Este proyecto forma la primera fase en el desarrollo de una cámara de ondas milimétricas de un solo sensor y de exploración mecánica mediante la rotación de reflectores, como se puede apreciar en la Figura 1.2.

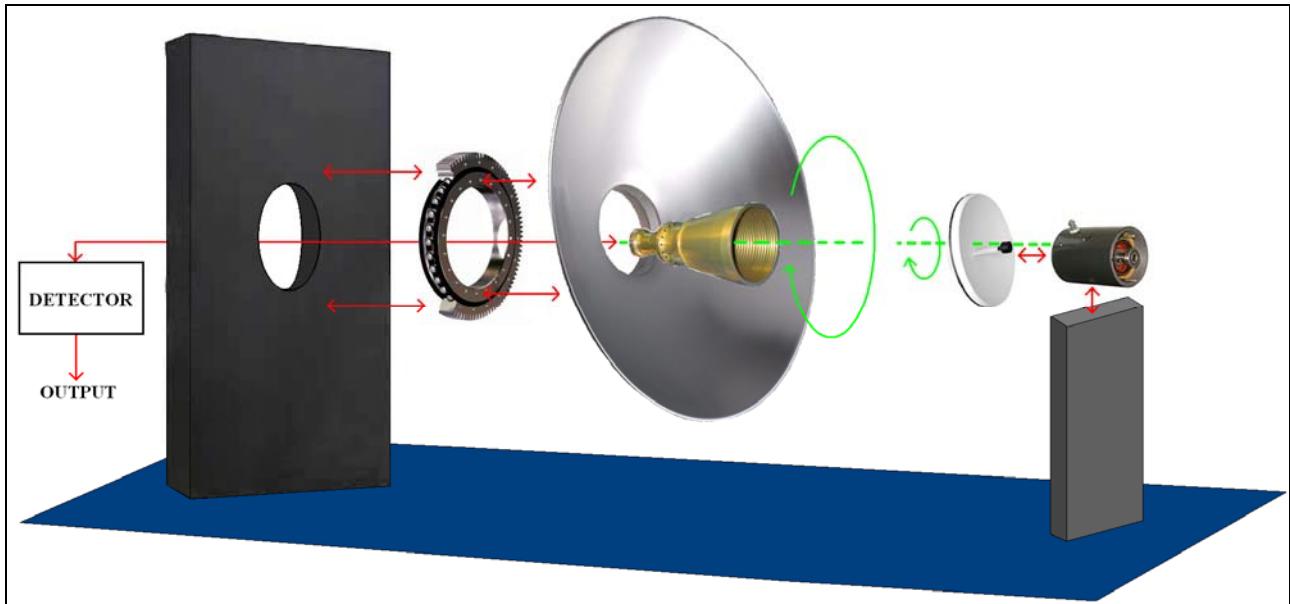


Figura 1.2 Cámara de ondas milimétricas con “Spinning Reflectors”

El funcionamiento del sistema consiste en “inclinar” previamente el vértice de ambos reflectores sobre el eje en el que están situados y en una determinada dirección (ya sea elevación o azimut). En esta disposición, el siguiente paso a realizar será la rotación de los reflectores alrededor del eje en el que se encuentran (representado mediante un línea discontinua en la Figura 1.2).

De este modo, al rotar los dos reflectores efectuaremos también la rotación del haz principal de nuestro sistema, consiguiendo así el escaneado de un área del espacio.

Dicho esto, el proyecto consistirá en modelar mediante la Óptica Geométrica en **FEKO** una configuración de reflectores (ya existente en la literatura) con varios ángulos de rotación con el objetivo de realizar posteriormente la imagen mediante **Matlab** de diferentes tipos de objetos.

La investigación se centrará en estudiar la calidad de las imágenes obtenidas, así como determinar una configuración de reflectores aceptable para nuestro sistema.

1.3 Organización del proyecto

La estructura de este proyecto está dividida en tres bloques principales:

El primer bloque lo forman los capítulos 2 y 3 e incluye todos los aspectos teóricos relacionados con el diseño de los reflectores. Esto es, los conceptos principales sobre Óptica y Antenas, respectivamente.

El segundo bloque lo forma el capítulo 4 y en él se encuentra propiamente el proceso de diseño de los reflectores, empezando por su configuración y elaborando a continuación el modelo de simulación mediante **FEKO**.

El tercer y último bloque lo compone el capítulo 5 y se corresponde con la descripción del funcionamiento de nuestra cámara de ondas milimétricas y del proceso de formación de las imágenes mediante **Matlab**. En la última parte de este bloque se detalla la implementación física de nuestra cámara, expuesta anteriormente en la Figura 1.2.

En segundo término, en cuanto a la planificación temporal del proyecto, en la Figura 1.3 se muestra el **diagrama de Gantt** simplificado de las diferentes tareas realizadas, así como las dependencias entre ellas.



Figura 1.3 Planificación temporal del proyecto

A continuación se incluye una detallada descripción de cada una de estas tareas:

- 1. Documentación:** Búsqueda inicial de información relacionada con los fundamentos de Óptica y Antenas. En esta tarea también se incluye aprender a utilizar el *software FEKO*.
- 2. Simulación Antenas (FEKO):** Realización del modelo de simulación de los reflectores mediante **FEKO**. Dentro de este proceso también se enmarca el control de **FEKO** mediante Excel y la creación de un fichero **bash**, como se verá en el capítulo 4.
- 3. Documentación II:** Esta tercera tarea tiene como finalidad la búsqueda de información sobre el proceso de formación de imágenes, así como profundizar en el funcionamiento de **Matlab**.
- 4. Formación Imágenes (Matlab):** Creación de imágenes de diferentes objetos mediante **Matlab** a partir de los resultados de las simulaciones en **FEKO**, como se explicará en el capítulo 5.
- 5. Redacción de la memoria:** Tiempo dedicado para la elaboración de la memoria, de acuerdo a lo expuesto en este subapartado.

1.4 Programas utilizados en el proyecto

En este subapartado realizaremos una breve introducción a los programas que utilizaremos a lo largo de este proyecto:

FEKO

El nombre de **FEKO** proviene de la frase en alemán ***F**eld**b**erechnung bei **K**örpern mit beliebiger **O**berfläche*, cuyo significado es “Cálculo de campos mediante cuerpos de forma arbitraria”.

Este programa permite el análisis electromagnético de multitud de situaciones distintas (diseño de antenas, estudio de los parámetros *scattering*, etc...) mediante diferentes métodos numéricos como el **MLFMM** o el **Physical Optics (PO)**, entre otros.

Asimismo, **FEKO** está formado por una *suite* de diversas aplicaciones, de las cuales destacaremos sólo las utilizadas en el proyecto:

- **CADFEKO:** Permite generar la geometría y especificar la solución a utilizar, así como los requisitos del cálculo, en un entorno **gráfico**.
- **EDITFEKO:** Utilizado para la construcción de modelos avanzados (tanto la geometría como la solución) mediante un lenguaje de programación de alto nivel que incluye bucles **FOR** y saltos condicionales **IF-ELSE**.
- **POSTFEKO:** Realiza una representación tridimensional de la geometría, además de poder mostrar los resultados en gráficos bidimensionales.

Matlab

Abreviatura de “*MATrix LABoratory*”, este *software* permite realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, así como su representación gráfica en dos o tres dimensiones. Fue creado a finales de 1970 por Cleve Moler y actualmente está disponible para diferentes plataformas, tales como Unix o Windows.

Matlab también incorpora un lenguaje de programación propio (**lenguaje M**), lo que posibilitará la implementación de funciones que realicen el procesado de los resultados obtenidos mediante **FEKO**.

Antenna Magus & SABOR

Estos dos programas se utilizarán de manera complementaria a **FEKO** en el proceso de configuración de los reflectores de la siguiente manera:

- **Antenna Magus:** *Software* dedicado exclusivamente al diseño de antenas, su tarea consistirá en modelar la bocina alimentadora de nuestro sistema.
- **SABOR:** *Software* de análisis de bocinas y reflectores, nos permitirá validar de manera sencilla los cálculos teóricos realizados en el apartado 4.1.

2. Fundamentos de Óptica

La **Óptica** es la rama de la Física encargada de estudiar el comportamiento y las propiedades de la luz, así como su interacción con la materia.

El tratamiento más completo de la luz dentro de la óptica clásica lo facilita la teoría electromagnética de la radiación, según la cual la luz es una onda electromagnética. En la práctica, sin embargo, se utilizan modelos simplificados para la descripción de determinados “escenarios”, lo que da lugar a la **Óptica Geométrica**, la **Óptica Física** y, fuera del marco electromagnético clásico, la **Óptica Cuántica**. [\[1\]](#)

Dicho esto, en este capítulo se tratará en profundidad estas dos primeras disciplinas de la **Óptica**, junto con la formación de imágenes a partir de espejos.

2.1 Óptica Geométrica

La **Óptica Geométrica** es la parte de la **Óptica** basada en un **modelo geométrico**. De acuerdo con el principio de Fermat¹, esto es: la propagación rectilínea de la luz en medios homogéneos mediante el concepto de **rayos** (trayectorias curvilíneas), que no interfieren entre sí, ni siquiera cuando se cruzan, y que se propagan tanto en un sentido como en el contrario. [\[4\]](#)

Asimismo, es importante remarcar que este tratamiento teórico engloba objetos o aperturas de tamaño macroscópico, por lo que algunos aspectos ondulatorios de la radiación (como la difracción) pueden despreciarse.

Otras características de la luz se ponen en evidencia cuando encuentra durante su propagación la superficie de separación de dos medios: una parte se refleja en esta superficie, y la otra se transmite al segundo medio. En el primer caso, ocurre una **reflexión** del rayo incidente, mientras que en el segundo caso se produce una **refracción**. [\[4\]](#)

Estos dos fenómenos pueden expresarse matemáticamente mediante las expresiones que se muestran a continuación:

- **Ley de la reflexión:** De acuerdo con la Figura 2.1, los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. Es decir: $\theta = \theta'$ (1)
- **Ley de la refracción o de Snell:** De acuerdo con la Figura 2.2, se cumple la siguiente relación entre los ángulos de incidencia y refracción y las velocidades del rayo en los dos medios. Es decir:
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2}$$
 (2)

Donde **n_1** y **n_2** son los índices de refracción de los dos medios, respectivamente, y se definen como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en otro medio, como se expone en la ecuación 3.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

¹ Principio de Fermat: La luz se propaga por el camino para recorrer el cual es mínimo el tiempo que necesite.

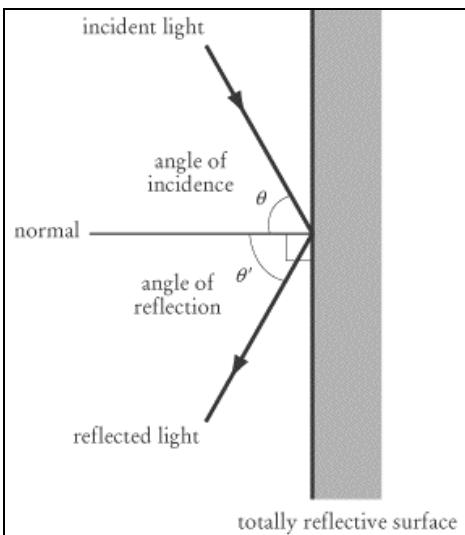


Figura 2.1 Reflexión de un rayo [1]

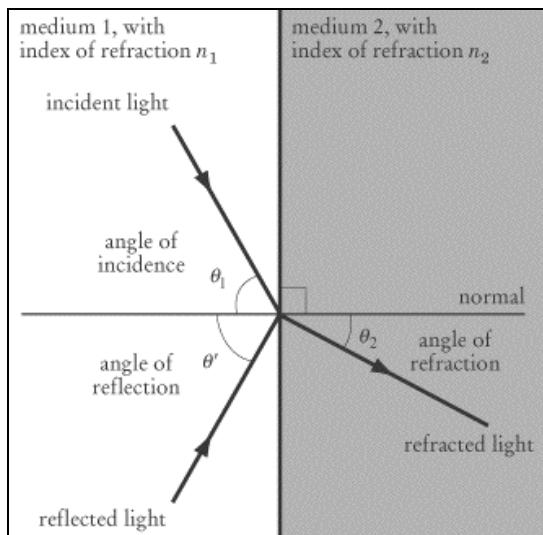


Figura 2.2 Refracción de un rayo [2]

Un hecho a destacar sucede cuando el índice de refracción en el que se encuentra el rayo incidente (n_1) es mayor que el índice del medio en el que viaja el rayo transmitido, ya que es posible que, para cierto ángulo de incidencia (denominado **ángulo crítico**), el ángulo de refracción sea 90° y, por tanto, no exista rayo refractado. [4]

Este fenómeno se conoce como **reflexión total** y puede formularse mediante la ecuación 4.

$$i_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4)$$

Por otro lado, esta propiedad tiene una aplicación tecnológica muy importante actualmente: la **fibra óptica**.

Aproximación paraxial

Cuando, a su paso por un sistema óptico², los rayos (llamados **meridionales**) forman ángulos pequeños con el eje óptico de dicho sistema, los senos, cosenos y tangentes de estos ángulos pueden sustituirse por un cierto número de términos de su expansión mediante series de Taylor. [3]

En estas circunstancias, de acuerdo con las expresiones 5, 6 y 7,

$$\sin \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \dots \quad (5)$$

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} - \dots \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \varphi + \frac{2\varphi^3}{3!} + \dots \quad (7)$$

si los objetos son tan pequeños que estas fórmulas pueden escribirse como las ecuaciones 8, 9 y 10,

² Sistema óptico: Conjunto de superficies que separan medios con distintos índices de refracción.

$$\sin \varphi \approx \varphi \quad (8)$$

$$\cos \varphi \approx 1 \quad (9)$$

$$\tan \varphi \approx \varphi \quad (10)$$

entonces se dice que el sistema trabaja en **zona paraxial** o **zona de Gauss**.

El conjunto constituido por las ecuaciones 8, 9 y 10 conforma lo que se conoce como **Óptica de primer orden** o **Paraxial** y poseen un margen de error igual o menor al 1% para ángulos iguales o más pequeños que 10° .

En función de este margen de error, para ángulos más grandes es necesario tener en cuenta un mayor número de términos de la serie de Taylor. En estos casos, por ejemplo, si es necesario tomar los dos primeros términos de las ecuaciones 5, 6 y 7, se obtiene la **Óptica de tercer orden**. [\[3\]](#)

Como se mostrará seguidamente, esta serie de métodos que abarca la Óptica Paraxial son muy utilizados para la descripción geométrica del proceso de formación de imágenes.

2.2 Óptica Física

La **Óptica Física** es la parte de la **Óptica** basada en un **modelo ondulatorio** (cuyas propiedades pueden deducirse a partir de la ecuación de ondas). Es decir: ahora el concepto de luz se enfoca desde el punto de vista de las ondas, ya que, al tratarse de fenómenos microscópicos, estos no podrían explicarse si la luz se comportase como un rayo. De acuerdo con el principio de Huygens³, estos fenómenos son:

- **Difracción:** Consiste en la distorsión que sufre una onda cuando topa con un obstáculo que le impide la transmisión y que tiene unas dimensiones comparables con la longitud de onda. [\[4\]](#)

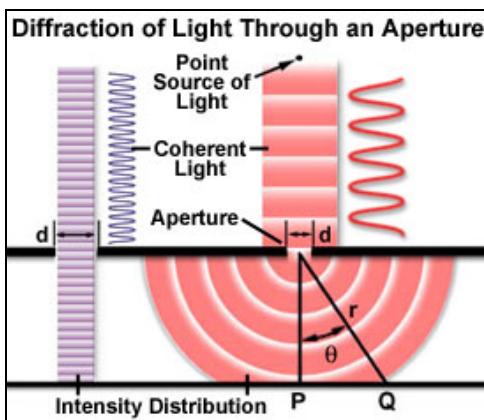


Figura 2.3 Difracción de una onda[\[III\]](#)

Como se puede comprobar en la Figura 2.3, cuando $\lambda < d$ el frente de onda casi no se desvía y, por tanto, la onda no se difracta de manera perceptible; en cambio, cuando $\lambda \geq d$, la onda plana cambia su dirección de propagación y se difracta.

³ Principio de Huygens: Los puntos que forman un frente de onda se comportan como nuevos focos emisores de ondas, los cuales se propagan en todas direcciones con la misma velocidad de fase.

- **Polarización:** Fenómeno ondulatorio únicamente observable en ondas transversales (por ejemplo, las ondas electromagnéticas), donde la velocidad de propagación es perpendicular a la dirección de oscilación. [4] Como se puede comprobar en la Figura 2.4, se pueden definir tres tipos de polarización:

- **Polarización lineal:** La onda sólo vibra en una de las posibles direcciones perpendiculares a la dirección de propagación.
- **Polarización circular:** La onda varía continuamente la dirección de vibración de manera circular, pero sin variar su amplitud.
- **Polarización elíptica:** La onda varía tanto la dirección de oscilación como la amplitud de oscilación.

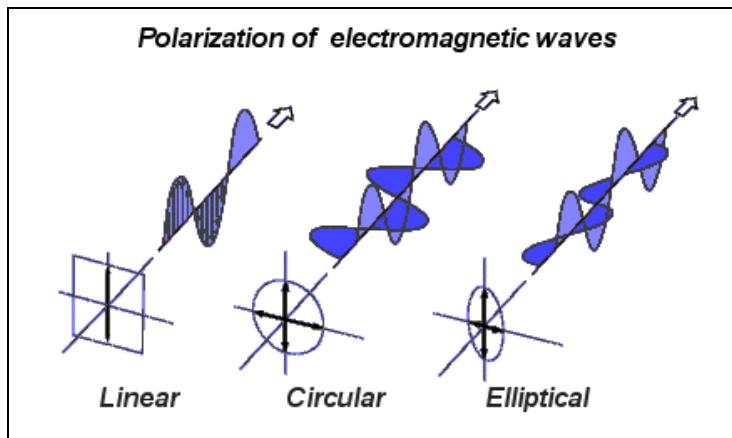


Figura 2.4 Tipos de polarización de una onda[IV]

- **Interferencias:** Fenómeno resultado de la superposición (suma algebraica) de dos o más ondas que se propagan a través de la misma región del espacio, originando así otra onda, llamada onda resultante. [4] Pueden distinguirse tres tipos diferentes de interferencias:

- **Interferencia constructiva:** Ocurre en aquellos puntos en los cuales la amplitud resultante es máxima (en valor absoluto), es decir, cuando la diferencia de caminos recorridos por las dos ondas es un múltiplo entero de longitudes de onda.
Generalmente se produce cuando las dos ondas están en **fase**.
- **Interferencia destructiva:** Ocurre en aquellos puntos en los cuales la amplitud resultante es nula, es decir, cuando la diferencia de caminos recorridos por las dos ondas es un múltiplo impar de semi-longitudes de onda.
Generalmente se produce cuando las dos ondas están en **contrafase**.
- **Interferencia parcialmente constructiva:** Término intermedio entre una interferencia constructiva y una interferencia destructiva.

Pese a que dentro del movimiento ondulatorio se enmarcan otros fenómenos como el efecto Doppler, las ondas estacionarias, la difusión, etc..., estos únicamente se mencionan aquí ya que se encuentran fuera del objeto de estudio de este proyecto.

2.3 Formación de imágenes con espejos

En este subapartado se estudiarán, aplicando los postulados de la **Óptica Geométrica Paraxial**, algunos sistemas ópticos en los cuales intervienen únicamente **espejos**, ya que las **lentes** no están dentro del marco en el que está contenido el proyecto.

Esto nos permitirá, mediante el trazado de rayos y la ley de la reflexión y refracción, la formación de imágenes gráficamente y la deducción de ecuaciones para calcular matemáticamente la posición y el tamaño de dicha imagen.

Posteriormente, se introducirá el concepto de **aberración**.

Formación de imágenes con espejos

Un **espejo** es un sistema óptico constituido por una superficie lisa y pulida que refleja prácticamente todos los rayos de luz, obteniéndose así imágenes claras de objetos. [\[4\]](#)

Los espejos planos, esféricos y parabólicos son los más comunes, aunque a continuación solamente se considerarán estos dos primeros.

- **Espejos planos:** Como se puede comprobar a partir de la propagación rectilínea de la luz y la ley de la reflexión, los rayos que provienen de un objeto divergen de tal manera que parece que provengan del mismo objeto pero situado detrás del espejo. Este segundo objeto se conoce como **imagen**. [\[4\]](#)

Dicho esto, las imágenes creadas mediante espejos planos tienen las siguientes propiedades:

- La imagen es **virtual** (está situada a la izquierda del espejo, como se aprecia en la Figura 2.5).
- La imagen tiene el mismo tamaño que el objeto (magnificación unitaria) y está situada a la misma distancia del espejo que dicho objeto.
- La imagen sufre **inversión en profundidad**, es decir, todo lo que está situado a la izquierda del objeto, en la imagen está situado a la derecha, y viceversa.

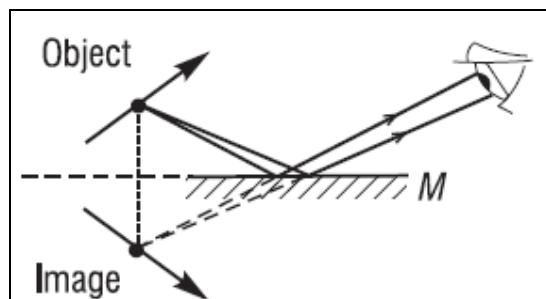


Figura 2.5 Imagen creada con un espejo plano [\[V\]](#)

- **Espejos esféricos:** En este caso, el eje óptico del espejo viene determinado por la recta que coincide con el diámetro horizontal de la superficie reflectora, su centro **C** es el centro de curvatura de esta superficie, y el vértice **V** es el punto de intersección entre el eje óptico y la superficie. [\[4\]](#)

Por otro lado, si aplicamos la ley de la reflexión a los rayos que inciden paralelamente al eje óptico, se demuestra que estos rayos reflejados coinciden

todos en un punto **F**, llamado **foco**. A partir de esta idea, se define la distancia entre **F** y **V** como **distancia focal** (**f**).

Matemáticamente, puede calcularse según la ecuación 11.

$$f = \frac{r}{2} \quad (11)$$

Donde **r** es radio de curvatura del espejo (distancia entre **C** y **V**).

Finalmente, podemos distinguir entre dos tipos de espejos esféricos [4]:

- **Espejos cóncavos:** Cuando la superficie reflectora es la superficie **interna** de la esfera definida por el espejo.
- **Espejos convexos:** Cuando la superficie reflectora es la superficie **externa** de la esfera definida por el espejo.

En ambos casos, para la formación de imágenes gráficamente suelen utilizarse tres rayos principales [4], como puede verse en las Figuras 2.6 y 2.7:

- El rayo que incide paralelo al eje óptico y se refleja pasando por el foco (**rayo paralelo**).
- El rayo que pasa por el foco y se refleja paralelamente al eje (**rayo focal**).
- El rayo que llega pasando por el centro de curvatura y sale coincidiendo consigo mismo (**rayo radial**).

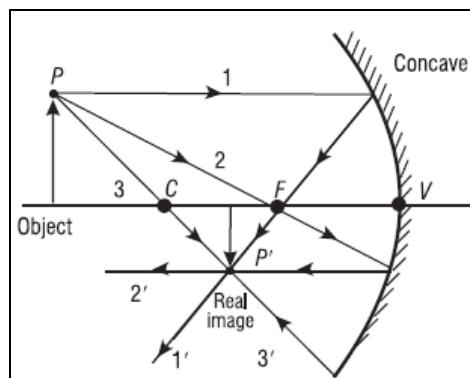


Figura 2.6 Espejo cóncavo [VII]

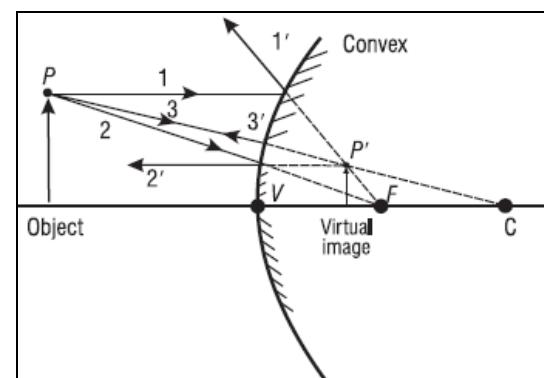


Figura 2.7 Espejo convexo [VII]

En segundo lugar, es importante destacar que, para un espejo cóncavo, podemos distinguir tres situaciones diferentes en la formación de imágenes [4]:

- Cuando la distancia del objeto al espejo es más grande que el radio del espejo, entonces se obtiene una imagen **real, invertida y más pequeña** que el objeto.
- Cuando la distancia del objeto al espejo es más pequeña que el radio del espejo (pero más grande que la distancia focal), entonces se obtiene una imagen **real, invertida y más grande** que el objeto.

- Cuando la distancia del objeto al espejo es más pequeña que la distancia focal, entonces se obtiene una imagen **virtual, no invertida y más grande** que el objeto.

En el caso de un espejo convexo, sea cual sea la distancia del objeto al espejo, siempre se obtiene una imagen **virtual, no invertida y más pequeña** que el objeto.

En segundo término, por lo que se refiere a la formulación matemática, utilizando la aproximación paraxial en el trazado y reflexión de rayos, puede obtenerse la ecuación 12 [\[5\]](#).

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = -\frac{2}{r} \quad (12)$$

Siendo **p, q y r** magnitudes representadas en la Figura 2.8.

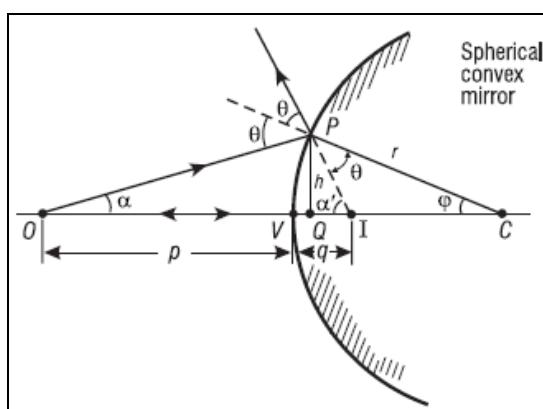


Figura 2.8 Ecuación de espejo[\[VIII\]](#)

Del mismo modo, de acuerdo con el convenio de signos, puede hallarse una expresión para la **magnificación**, expuesta en la ecuación 13.

$$m = -\frac{q}{p} \quad (13)$$

Aberraciones

Hasta ahora se ha estado hablando de sistemas ópticos ideales. Esto implica que existe una correspondencia punto a punto entre objeto e imagen, lo cual se ha traducido matemáticamente en unas ecuaciones que nos han permitido fijar la posición y el tamaño de objeto e imagen con exactitud.

Sin embargo, los sencillos métodos de la óptica paraxial tienen sus limitaciones y en sistemas ópticos reales aparecen ciertos “efectos” no deseados: lo que deberían ser planos imagen se convierten en superficies curvas, la semejanza entre objeto e imagen no se conserva, etc... Todos estos defectos se denominan **aberraciones**. [\[2\]](#)

De acuerdo con la naturaleza de la luz, las aberraciones se clasifican en **monocromáticas** (cuando se trabaja con luz compuesta por un única longitud de onda) y **cromáticas** (de ancho de banda más grande).

En el caso de la luz monocromática, podemos clasificar las distintas aberraciones de acuerdo con la teoría de Seidel en: **Aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de imagen y distorsión**. [\[2\]](#)

Las tres primeras se refieren a la calidad de la imagen de un punto y las dos últimas a su posición (en el eje o fuera de él).

Seguidamente se explica con más detalle cada una de estas aberraciones:

- **Aberración esférica:** Ocurre cuando los rayos que inciden paralelamente al eje óptico en una lente o espejo no son conducidos exactamente al foco. Puede distinguirse entre **aberración esférica longitudinal** (A.E.L.) y **longitudinal** (A.E.T.). [3] En la Figura 2.9 se muestra una representación gráfica de esta aberración.

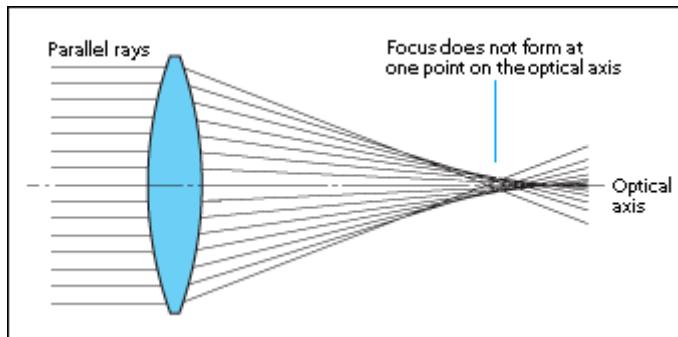


Figura 2.9 Aberración (esférica)[\[IX\]](#)

- **Coma:** Los puntos imagen correspondientes a puntos objeto fuera del eje no se cortan en el mismo plano, perdiéndose nitidez en la imagen. [1] En la Figura 2.10 se puede observar una representación gráfica de esta aberración.

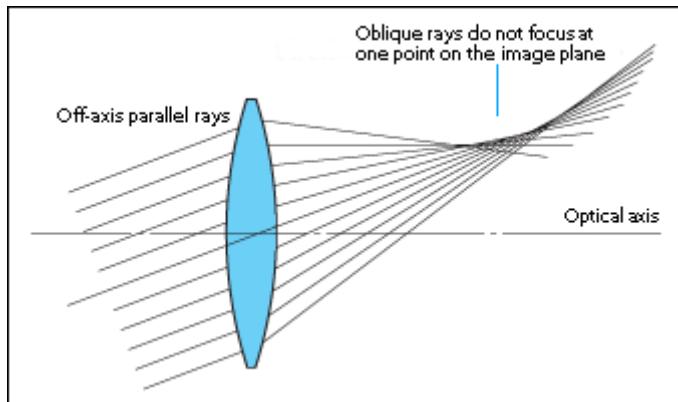
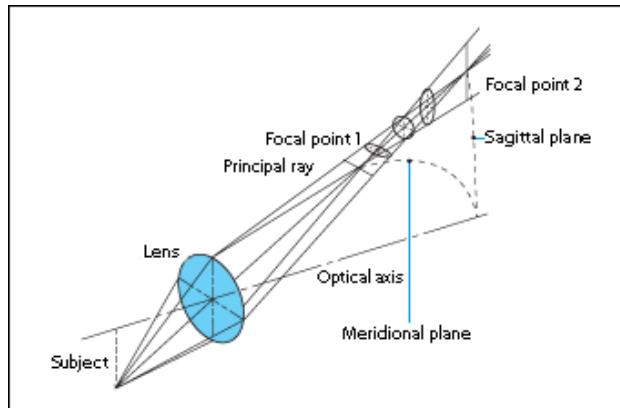
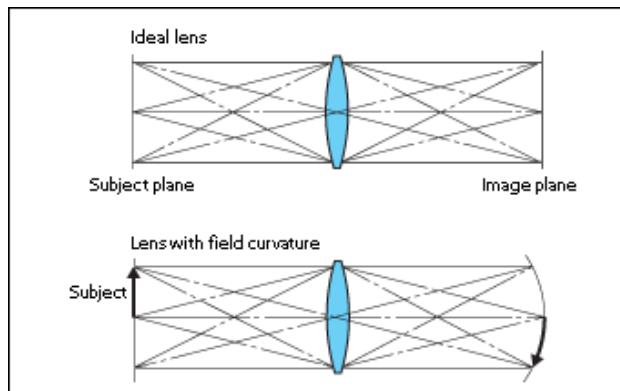


Figura 2.10 Aberración (coma)[\[X\]](#)

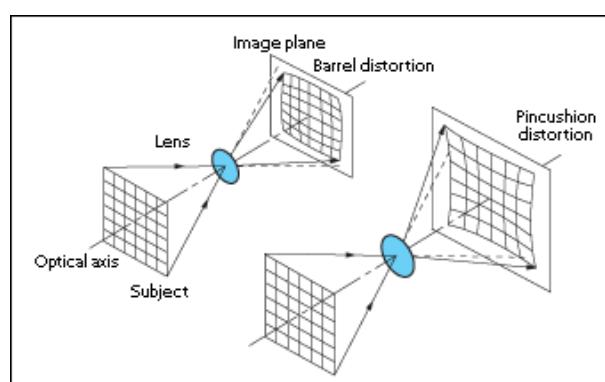
- **Astigmatismo:** Se produce cuando la distancia focal de los rayos en el plano vertical difiere de la distancia focal de los rayos en el plano horizontal. Es poco importante cuando se trabaja con grandes aperturas, sin embargo es muy perjudicial para pequeñas aperturas. [2] En la Figura 2.11 se muestra una representación gráfica de dicha aberración.

Figura 2.11 Aberración (astigmatismo)[\[XI\]](#)

- **Curvatura de imagen o de Petzval:** Si todas las demás aberraciones son nulas, la imagen geométrica de un punto será otro, pero puede ocurrir que las imágenes de los puntos del plano objeto no estén todas en el plano imagen paraxial, sino en una superficie curva, como se observa en la Figura 2.12. [\[2\]](#) El resultado es la sensación de un cierto “desenfoque” en determinadas zonas del plano imagen.

Figura 2.12 Aberración (curvatura de imagen)[\[XII\]](#)

- **Distorsión:** Aunque las cuatro aberraciones mencionadas anteriormente no existieran, puede existir en la imagen el defecto de no ser semejante al objeto, debido a una falta de constancia del aumento lateral. Si el aumento es mayor que el aumento en zona paraxial, se produce una distorsión llamada de **corsé**, y si el aumento disminuye cuando aumentan las distancias, se produce una distorsión llamada de **barril**. [\[1\]](#) En la Figura 2.13 se muestran estos dos tipos distorsiones.

Figura 2.13 Aberración (distorsión)[\[XIII\]](#)

2.4 Bibliografía

Libros y páginas web:

- [1] Pedro Mejías Arias y Rosario Martínez Herrero, “Óptica Geométrica”, Ed. SÍNTESIS S. A.
- [2] Felipe Mateos et al., “Curso de introducción a la óptica geométrica”, Universidad de Alicante, 1996
- [3] José Rodríguez García, “Fundamentos de óptica geométrica”, Universidad de Oviedo
- [4] Joan Mercadé i Capellades et al., “Física 2”, Ed. McGRAW-HILL, 2003
- [5] <http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2003.pdf>

Imágenes y tablas:

- [I] <http://www.sparknotes.com/testprep/books/sat2/physics/chapter18section2.rhtml>
- [II] <http://www.sparknotes.com/testprep/books/sat2/physics/chapter18section2.rhtml>
- [III] <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/diffraction/basicdiffraction/index.html>
- [IV] <http://www.blazelabs.com/f-g-rpress.asp>
- [V] <http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2003.pdf>
- [VI] <http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2003.pdf>
- [VII] <http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2003.pdf>
- [VIII] <http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2003.pdf>
- [IX] <http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/200801/column.html>
- [X] <http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/200801/column.html>
- [XI] <http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/200801/column.html>
- [XII] <http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/200801/column.html>
- [XIII] <http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/200801/column.html>

3. Fundamentos de antenas

Con el objetivo de comprender de manera detallada los métodos de análisis y diseño de antenas utilizados en los próximos capítulos, a continuación se introducirán los principios básicos de funcionamiento que se necesitan conocer, desde los aspectos más generales hasta los conceptos vinculados al estudio de las antenas de apertura (bocinas) y reflectores.

3.1 Conceptos generales

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, imponiendo para cada aplicación distinta unas condiciones particulares sobre la potencia que puede soportar, la frecuencia de trabajo, etc... [2]

Esta diversidad de situaciones da origen a un gran número de tipos de antenas, las cuales pueden clasificarse genéricamente en tres grandes bloques: **antenas alámbricas**, **antenas de apertura y reflectores** y **agrupaciones de antenas**.

Aunque a lo largo del proyecto nos centraremos en las antenas del segundo tipo, a continuación se expondrán los parámetros característicos de cualquier antena:

- **Parámetros de antenas en transmisión**
 - **Eficiencia de antena:** La existencia de pérdidas hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, de modo que se define el rendimiento de una antena como la relación entre dichas potencias radiada y entregada. [2]
 - **Diagrama de radiación:** Representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena (campo eléctrico o densidad de potencia), en función de las distintas direcciones del espacio. Puede representarse de forma tridimensional (normalmente mediante un sistema de coordenadas esférico) o en cortes bidimensionales (ya sea en coordenadas polares o cartesianas). [2] Algunos parámetros importantes del diagrama son:
 - **Ancho de haz a -3dB :** Separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación toma el valor mitad del máximo.
 - **Ancho de haz entre ceros:** Separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal (zona de máxima radiación) toma un valor mínimo.

Por otro lado, si un diagrama de radiación presenta simetría de revolución en torno a un eje se dice que la antena es **omnidireccional** y si radia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones de espacio se denomina **isótropa**. [2]

- **Directividad y Ganancia:** La **directividad** es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena. [2] Si además se

quiere tener en cuenta las pérdidas en la antena, se habla entonces de **ganancia** y matemáticamente se puede expresar como el producto de la directividad por la eficiencia de antena.

- **Parámetros de antenas en recepción**

- **Área efectiva:** Relación entre la potencia que entrega la antena a su impedancia de carga y la densidad de potencia de la onda incidente. [\[6\]](#)
No tiene porqué coincidir con el área física y se relaciona directamente con la directividad tal y como se representa en la ecuación 14.

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D \quad (14)$$

- **Temperatura de ruido de antena**

Todos los cuerpos a temperaturas diferentes de 0 K desprenden radiación incoherente (ruido). La antena capta esa radiación de todos los cuerpos que la rodean a través de su diagrama de radiación. [\[6\]](#)

Dicho esto, podemos expresar la temperatura de ruido de una antena (en Kelvins) como se muestra en la ecuación 15.

$$T_a = \frac{P_N}{kB} \quad (15)$$

Donde P_N es la potencia de ruido disponible en bornes de la antena, B el ancho de banda y $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann.

No obstante, en general la antena no se encuentra en un ambiente uniforme, por lo que la potencia incidente por unidad de ángulo sólido en cada dirección del espacio no es constante y se puede asociar una **temperatura de brillo** $T(\theta, \varphi)$ a la fuente o al ruido incidente en una dirección. [\[2\]](#)

En estas circunstancias, la temperatura de ruido de antena (que no tiene porqué estar relacionada con la temperatura física a la que se encuentra la antena) puede calcularse como en la ecuación 16.

$$T_a = \frac{\iint_{4\pi} T(\theta, \varphi) D(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} D(\theta, \varphi) d\Omega} = \frac{I}{4\pi} \iint_{4\pi} T(\theta, \varphi) D(\theta, \varphi) d\Omega \quad (16)$$

- **Zonas de campo de antena**

Los campos que rodean una antena se pueden dividir en tres regiones diferentes, tal y como se representa en la Figura 3.1.

Frecuentemente la **zona de Fresnel** está comprendida entre distancias mayores a $0,62\sqrt{D^3/\lambda}$ y menores a $2D^2/\lambda$, mientras que la **zona de Fraunhofer** sólo tiene lugar a distancias superiores a $2D^2/\lambda$. [\[1\]](#)

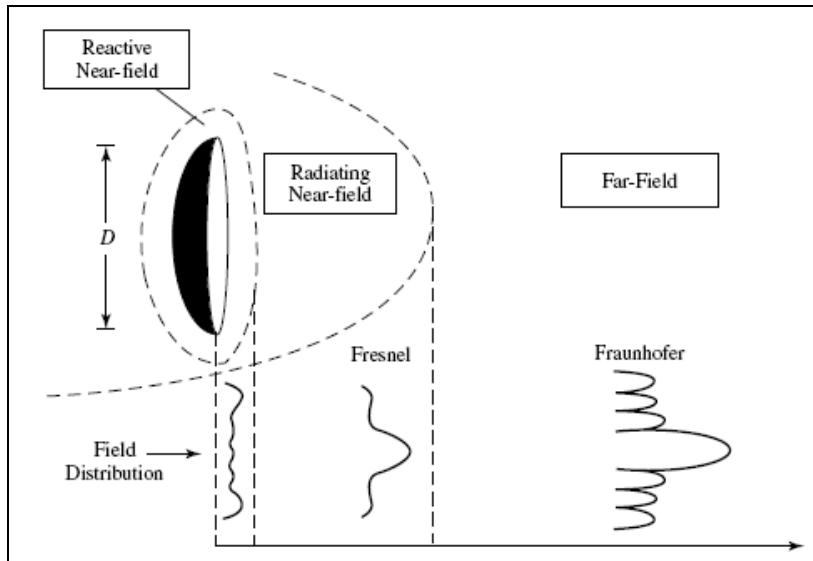


Figura 3.1 Regiones y distribución de campo [1]

3.2 Antenas de bocina (*Horn Antennas*)

Se entiende por **apertura** una región plana sobre la que existen unos campos iluminantes conocidos (p. ej., una boca de guía). En base a esto, las **antenas de bocina** se consideran de apertura ya que la generación de la onda radiada se consigue mediante una distribución de campos soportados por la antena y suelen excitarse con guías de onda. [2]

Como se podrá comprobar en los siguientes capítulos, este tipo de antenas se utilizará principalmente como alimentador primario en un sistema de reflectores **Cassegrain**.

3.2.1 Bocinas rectangulares / cónicas

La utilización de guías de onda monomodo, rectangulares o circulares como elementos radiantes permite obtener directividades moderadas, pero presentan una desadaptación en la boca de la guía. Para mejorar estos aspectos se han de aumentar sus dimensiones eléctricas de manera gradual, en forma de **bocina**. [2]

Mediante este “abocinamiento” de la guía se consigue aumentar el tamaño de la apertura y el estrechamiento del haz. La distribución sobre la apertura será aproximadamente la misma que en la boca de la guía en amplitud, pero con una fase de tipo cuadrático. [7]

En esta sección únicamente se hará mención de las principales clases de bocinas y sus principales características, mientras que en el capítulo 4 se introducirán todos los aspectos relacionados con el diseño de este tipo antenas.

- **Bocina Sectorial de Plano H**

- La guía de onda se excita con una distribución de campo del modo fundamental TE_{10}^4 [10] y en la Figura 3.2 puede verse representada la geometría de esta bocina.

⁴ Modo TE: La componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula. Para más información relacionada consultar las entradas [4] y [5] de la bibliografía.

- El campo sobre la apertura se ve afectado por un error de fase en el plano **H**, lo que produce una reducción de la eficiencia, un ensanchamiento del haz y un relleno de nulos. [\[7\]](#)
- El diagrama del plano **E** no se modifica respecto del modo **TE₁₀**.

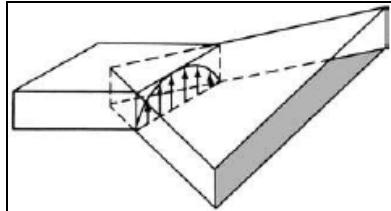


Figura 3.2 Bocina sectorial de plano H[II]

- **Bocina Sectorial de Plano E**

- La guía de onda se excita con una distribución de campo del modo fundamental **TE₁₀** [\[10\]](#) y en la Figura 3.3 se muestra la geometría de esta bocina.
- El campo sobre la apertura se ve afectado por un error de fase en el plano **E**, lo que produce una reducción de la eficiencia, un ensanchamiento del haz y un relleno de nulos. [\[7\]](#)
- El diagrama del plano **H** no se modifica respecto del modo **TE₁₀**.

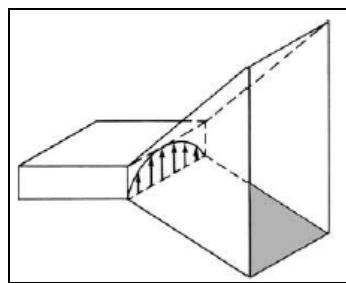


Figura 3.3 Bocina sectorial de plano E[III]

- **Bocina Piramidal Lisa**

- El campo en la apertura presenta errores de fase en ambos planos y en la Figura 3.4 se puede observar la geometría de esta bocina. [\[7\]](#)
- La directividad puede ponerse como combinación de las directividades de las bocinas sectoriales (obteniéndose fácilmente hasta 20 dB). [\[7\]](#)

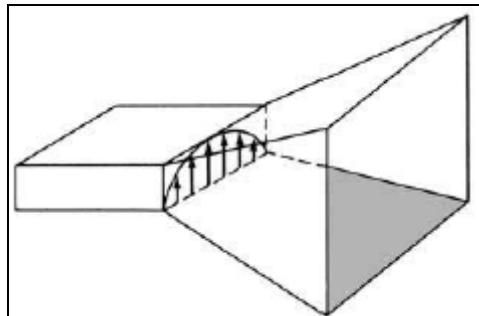


Figura 3.4 Bocina piramidal lisa[IV]

- **Bocina Piramidal Corrugada**

- Las corrugaciones en las paredes alta y baja fuerzan nulos del campo eléctrico en el borde de la apertura. [\[7\]](#) La Figura 3.5 se representa este tipo de bocina.
- La distribución de apertura beneficia la simetría de la antena y reduce los lóbulos por difracción en el borde, al reducirse el nivel del campo que incide sobre él. [\[7\]](#)

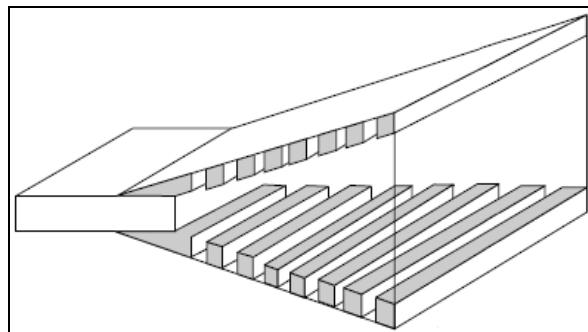


Figura 3.5 Bocina piramidal corrugada[\[V\]](#)

- **Bocina Cónica Lisa**

- El modo dominante de una guía circular es el TE_{11} , cuyo principal inconveniente es que no presenta una pureza de polarización. En la Figura 3.6 se puede observar esta clase de bocina. [\[7\]](#)

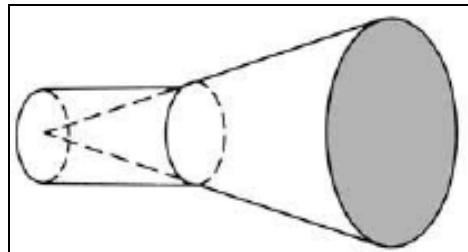


Figura 3.6 Bocina cónica lisa[\[VI\]](#)

- **Bocina Cónica Corrugada**

- Las corrugaciones en las paredes fuerzan un modo híbrido HE_{11} ($TE_{11} + TM_{11}$) como se muestra en la Figura 3.7, que permite una mejor simetría de los diagramas, una mayor pureza de polarización y menores efectos de difracción en los bordes de la bocina. [\[7\]](#)

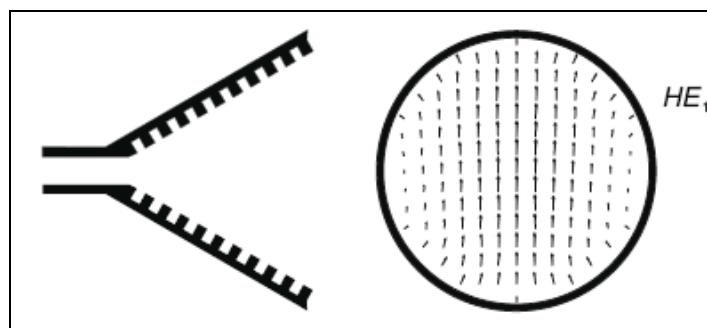


Figura 3.7 Bocina cónica corrugada[\[VII\]](#)

Del mismo modo, además de las bocinas anteriormente citadas, es importante hacer una mención aparte sobre las **bocinas multimodo** y **con dieléctricos**. Las primeras (p. ej. las bocinas *potter*) son más compactas y sencillas que las corrugadas y sus características son intermedias entre las bocinas de paredes lisas y corrugadas. En la Figura 3.8 se representa la geometría de este tipo de bocinas. [7]

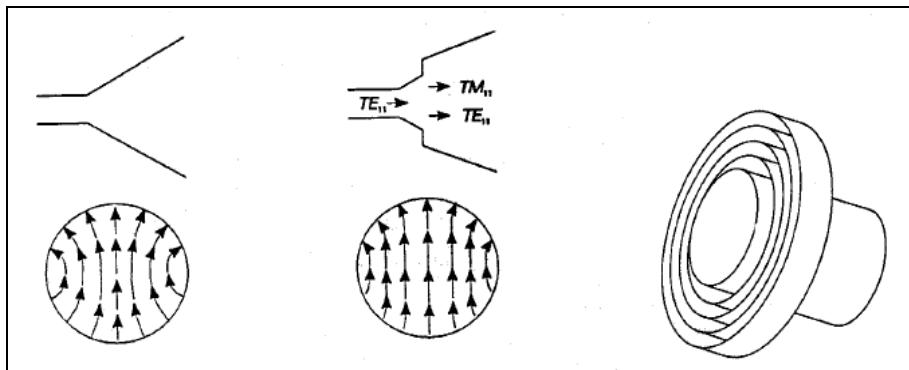


Figura 3.8 Bocina multimodo [VIII]

En cuanto a las bocinas rellenas de dieléctrico también mejoran la simetría y la polarización, pero presentan menor eficiencia y mayores problemas de reflexiones que las bocinas corrugadas. [7]

3.3 Reflectores parabólicos

Con la finalidad de concentrar la radiación de fuentes primarias (generalmente poco directivas) en una determinada dirección, se colocan **reflectores** y **lentes** en frente de un radiador primario (p. ej. una bocina) para convertir las ondas cilíndricas o esféricas generadas por dicho radiador en un frente de onda que puede considerarse localmente plano sobre la apertura del reflector (obteniéndose así directividades elevadas). [2]

Debido a sus prestaciones, a lo largo del proyecto nos centraremos solamente en los **reflectores**, como se puede comprobar en la Figura 3.9.

Concretamente, de las distintas clases de reflectores (diédricos, cilíndricos, esféricos etc...) nos ocuparemos de los **reflectores parabólicos**, ya que, por ejemplo, a diferencia de los reflectores esféricos, los parabólicos no sufren aberración esférica.

Antena	Ventajas	Desventajas
Lentes	<ul style="list-style-type: none"> • No bloqueo en la alimentación • Mejor barrido del espacio 	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes en aplicaciones de baja frecuencia • Eros en la apertura
Reflectores	<ul style="list-style-type: none"> • Simples • Ligeros • Diseño consolidado 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesario offset para evitar el bloqueo del alimentador • Pobre barrido del espacio

Figura 3.9 Lentes vs. Reflectores [IX]

3.3.1 Geometrías

Aunque existe una infinidad de posibilidades de configuraciones geométricas, los distintos tipos de reflectores parabólicos pueden agruparse en cuatro tipos diferentes.

- **Reflector parabólico centrado**

- El alimentador primario (bocina) se sitúa en el foco de la parábola, tal y como se puede comprobar en la Figura 3.10
- La relación entre la distancia focal y el diámetro de la parábola (f/D) determina el aspecto de la antena y algunas de sus características radioeléctricas. Es habitual trabajar con valores en el margen de 0,25 a 0,5 para obtener un buen compromiso entre las eficiencias de iluminación y *spillover*, como se detallará en el siguiente subapartado.

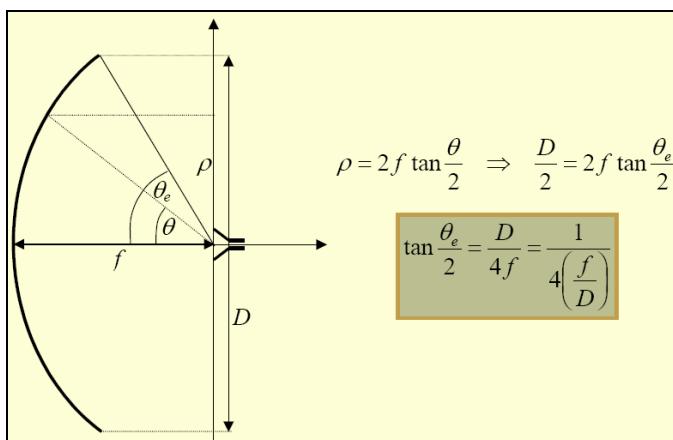


Figura 3.10 Reflector parabólico centrado [\[X\]](#)

- **Reflector Cassegrian centrado**

- Utiliza como subreflector un casquete de **hiperboloides de revolución** con un foco común al del reflector parabólico principal. Sobre el otro foco se sitúa el centro de fase del alimentador. [\[9\]](#) Esta geometría se muestra en la Figura 3.11.
- El alimentador utiliza un haz más estrecho que en los otros casos para iluminar el reflector parabólico a través del subreflector. [\[8\]](#)

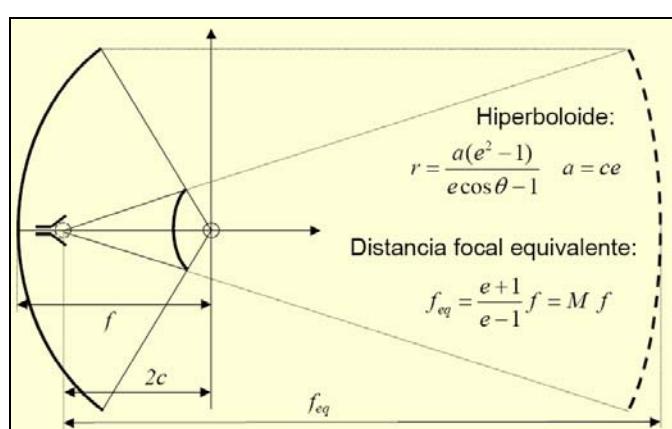


Figura 3.11 Reflector Cassegrain centrado [\[XI\]](#)

- **Reflector Gregoriano centrado**

- Distribución geométrica análoga a la del reflector Cassegrain, a excepción de utilizar ahora como subreflector un casquete de **elipsoide** de revolución, como se representa en la Figura 3.12.
- Es menos utilizado que el Cassegrain ya que necesita soportes del subreflector más largos y produce un bloqueo mayor en la apertura. [9]

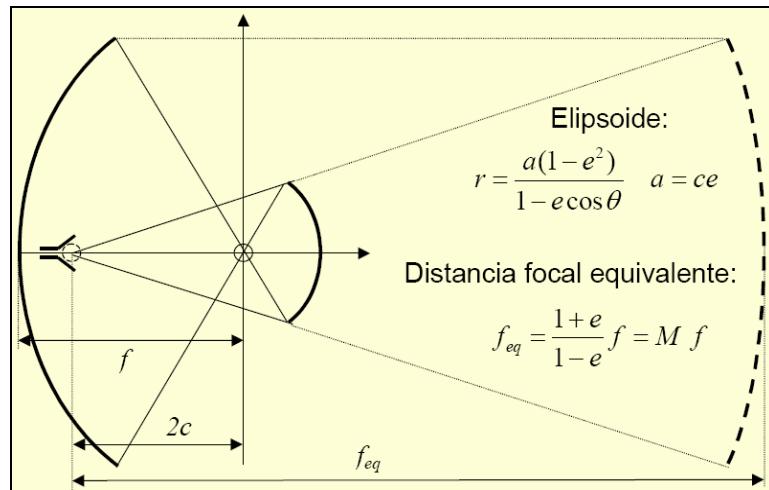


Figura 3.12 Reflector Gregoriano centrado[XII]

- **Reflector parabólico descentrado (offset)**

- El alimentador no obstruye la onda reflejada, tal y como se muestra en la Figura 3.13.
- Iluminado con polarización **lineal** genera lóbulos contrapolares en el plano antisimétrico (no se produce la cancelación típica de los reflectores centrados) y con polarización **circular**, la polarización cruzada es nula pero aparece *Squint*⁵. [9]

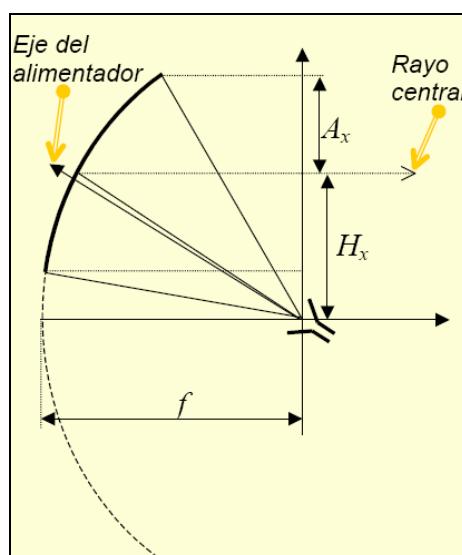


Figura 3.13 Reflector parabólico offset[XIII]

⁵ Squint: Ángulo en el que la transmisión se compensa con respecto a la normal del plano de la antena.

- **Reflectores Cassegrain y Gregorian descentrados (offset)**
 - Evita el bloqueo del alimentador, como se puede observar en la Figura 3.14.
 - Eligiendo adecuadamente el ángulo α se puede mejorar la simetría de la iluminación en la apertura (condición de Mizuguchi). [\[8\]](#)

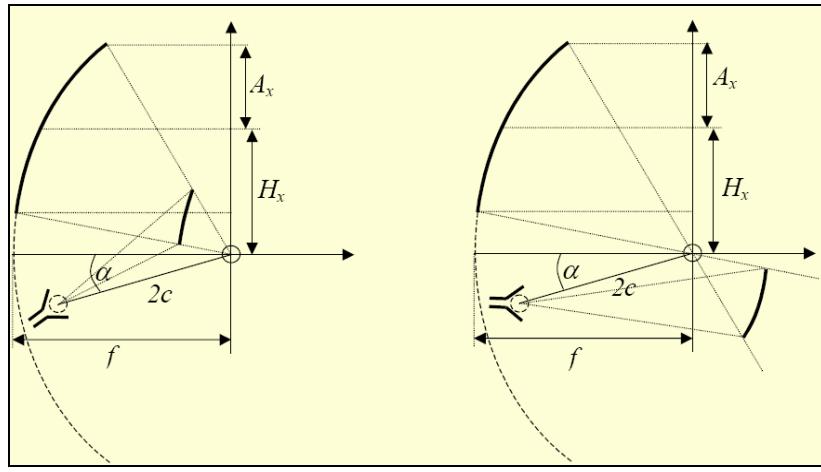


Figura 3.14 Reflectores Cassegrain y Gregorian offset [\[XIV\]](#)

3.3.2 Análisis con óptica física y óptica geométrica

Como se puede comprobar en la Figura 3.15, existen diversos métodos de análisis de antenas reflectoras. A lo largo de esta sección nos centraremos en las dos únicas técnicas de interés para el proyecto: la **Óptica Geométrica (GO)** y la **Óptica Física (PO)**.

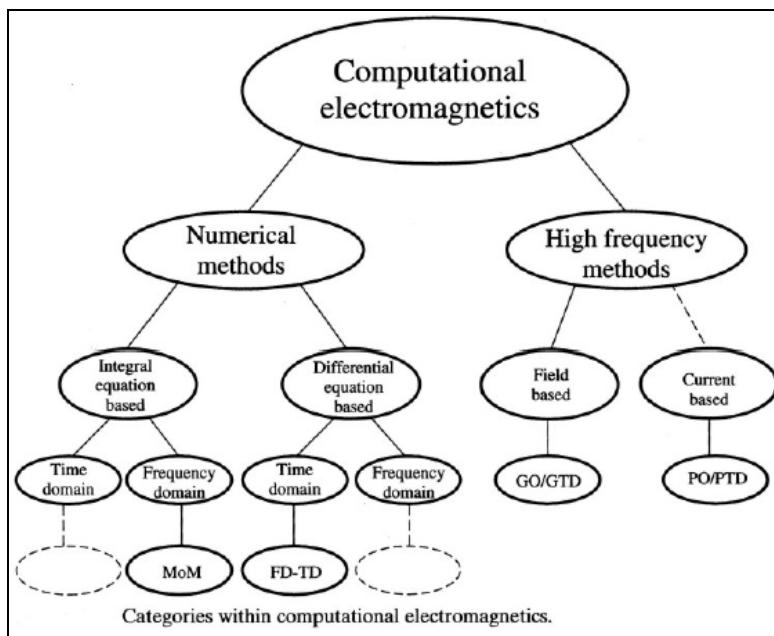


Figura 3.15 Métodos de análisis de antenas [\[XV\]](#)

• Óptica Geométrica (GO)

- Permite analizar el funcionamiento del reflector y encontrar el campo en la apertura mediante el trazado de rayos. Se puede completar con la **Teoría Geométrica de la Difracción (GO+GTD)** o con la **Teoría de Radiación de Aperturas (GO+AI)**. [\[8\]](#)
- Es una solución asintótica de las ecuaciones de Maxwell cuando la frecuencia tiende a infinito y constituye una buena y sencilla aproximación para calcular el lóbulo principal y los primeros lóbulos secundarios. [\[9\]](#)
- De acuerdo con lo expuesto en el apartado 2.1, las ondas electromagnéticas se propagan según trayectorias curvilíneas (rayos), lo que permite definir “tubos” de flujo que cumplen la **ley de conservación de energía** si el medio no tiene pérdidas. [\[9\]](#)
- Los resultados obtenidos serán tanto más precisos cuanto mayores sean los tamaños eléctricos y los radios de curvatura de los reflectores. [\[9\]](#)
- En cada punto de incidencia se aproxima la superficie reflectora por un plano tangente conductor perfecto, de modo que se cumplen las leyes de Snell y la condición de contorno $E_{\text{total}}|_{\text{tangente}} = 0$ [\[9\]](#), como se muestra en la Figura 3.16.

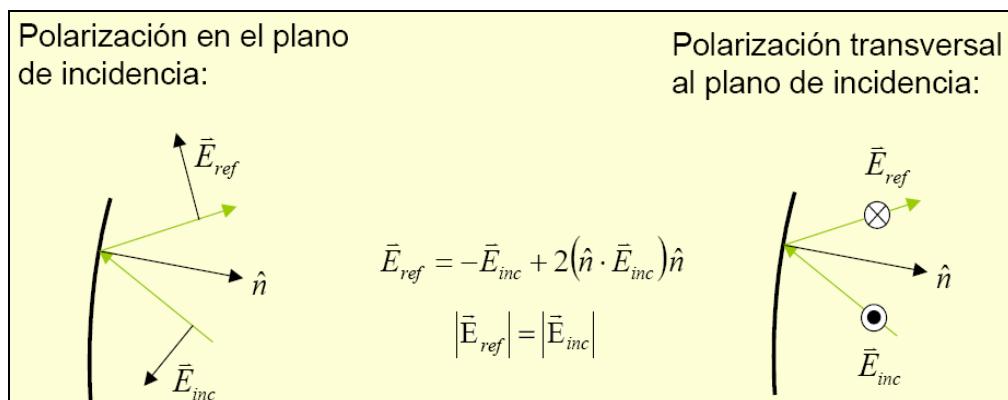


Figura 3.16 Aplicación de GO a reflectores [\[XVI\]](#)

• Óptica Física (PO)

- El campo radiado se obtiene por integración de las corrientes inducidas en la superficie reflectora bajo las condiciones de conductor perfecto y radio de curvatura infinito. Puede completarse con la **Teoría Física de la Difracción (PTD)**, que tiene en cuenta la contribución especial de los bordes de la antena. [\[8\]](#)
- Como se muestra en la Figura 3.17, la aproximación en **Óptica Física** de dichas corrientes se puede expresar como en la ecuación 17.

$$\vec{J}_{PO} = 2(\hat{n} \times \vec{H}_{inc}) \quad (17)$$

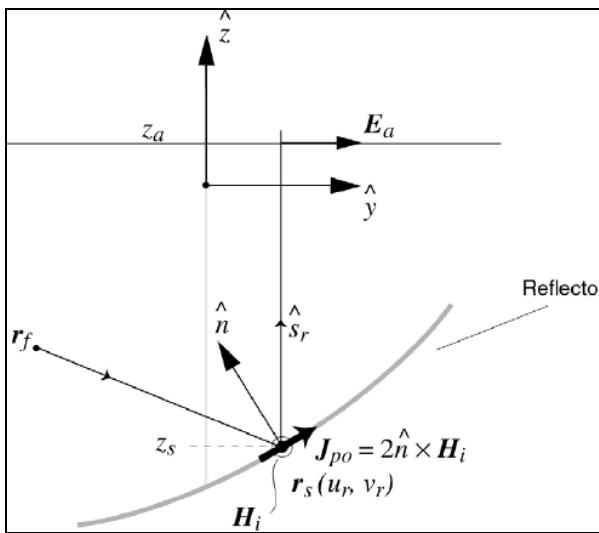


Figura 3.17 Aplicación de PO a reflectores[XVII]

- Puede combinarse **GO** en el subreflector y **PO** en el reflector principal o tratar ambas superficies con **PO**. La validez de los resultados es similar a la **Óptica Geométrica**. [\[8\]](#)
- El cálculo de los campos radiados a partir de las corrientes inducidas en el reflector, en superficies de grandes dimensiones y con polarizaciones arbitrarias puede ser muy costosa en tiempo de cálculo, por lo que es conveniente intentar simplificar la geometría y aprovechar las simetrías del problema. [\[11\]](#)

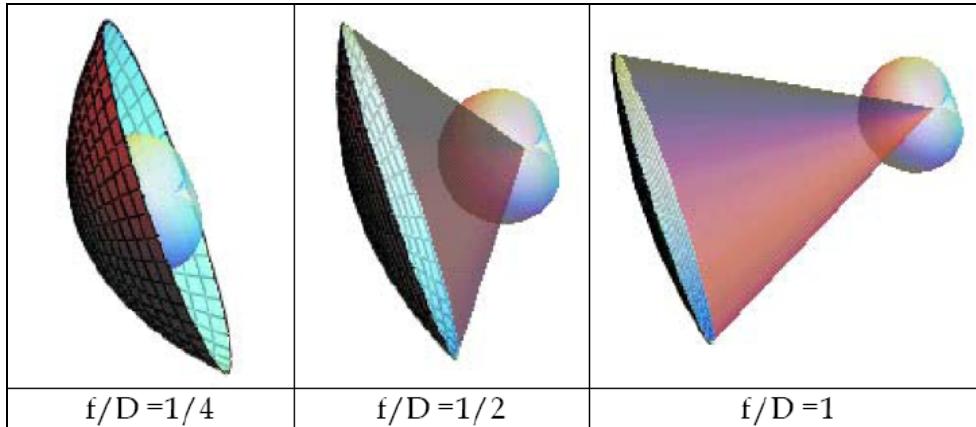
3.3.3 Eficiencias y bloqueo

La ganancia de las antenas reflectoras puede calcularse como en la ecuación 18.

$$G = 4\pi \frac{A_{\text{apertura}}}{\lambda^2} \epsilon_{\text{total}} \quad (18)$$

Donde la eficiencia total (ϵ_{total}) es el producto de varias eficiencias parciales:

- **Rendimiento de Radiación (típicamente el del alimentador)**
 - **Eficiencia de Iluminación (o de Apertura)**
 - Pérdidas de ganancia relacionadas con la iluminación no uniforme de la apertura. [\[9\]](#)
 - Juntamente con la eficiencia de *spillover*, están directamente relacionadas con la parámetro f/D del reflector. Si f/D es grande, la eficiencia de iluminación es alta pero la de *spillover* baja, mientras que en el caso contrario (f/D pequeño), la eficiencia de iluminación es baja pero la de *spillover* alta.
- En la Figura 3.18 se puede observar este efecto.

Figura 3.18 Configuraciones de f/D [\[XVIII\]](#)

- **Eficiencia de Desbordamiento o de *Spillover***

- Pérdida de ganancia debido a la radiación del alimentador fuera del ángulo que contiene el reflector. Sus efectos son una reducción de la ganancia y la aparición de lóbulos de *spillover* en el diagrama de radiación. [\[9\]](#)
- A medida que la iluminación del borde crece aumenta la eficiencia de iluminación pero disminuye la eficiencia de *spillover*. Puesto que ambos efectos se contraponen entre sí, existe un nivel óptimo de caída de iluminación en el borde o *taper* que maximiza el producto de ambas eficiencias (típicamente en torno a -10 o -12 dB). [\[9\]](#)
- Depende del diagrama de la antena situada en el foco y, matemáticamente, se define como la relación entre la potencia radiada por el alimentador situado en el foco que llega al reflector y la potencia total radiada por él mismo. [\[11\]](#)

- **Eficiencia por Error en la Superficie**

- Relacionada con las desviaciones del frente de fase en la apertura respecto de la onda plana ideal, debidas a las distorsiones de la superficie de los reflectores. [\[9\]](#)
- Producen diferentes aberraciones (ya expuestas previamente en el capítulo 2.3) según sea el carácter de la deformación superficial. Las deformaciones pueden ser defectos de fabricación o consecuencia de la operación de la antena en un entorno hostil. [\[8\]](#)

- **Eficiencia de Polarización**

- Es la medida de la pérdida de energía en la componente contrapolar radiada. [\[9\]](#)
- Matemáticamente, se define como la relación entre la potencia radiada en la polarización copolar y la potencia total radiada en las dos polarizaciones (copolar y contrapolar). [\[11\]](#)

- **Eficiencia por Bloqueo**

- Aparece a causa de la porción de apertura bloqueada por el alimentador o subreflector (efecto de sombra) o por los soportes del alimentador o del subreflector. [\[9\]](#)
- El efecto observado es la disminución de la ganancia, el aumento de algunos lóbulos secundarios y los posibles problemas de adaptación por reflexión de potencia sobre el alimentador, como se ilustra en la Figura 3.19. [\[8\]](#)

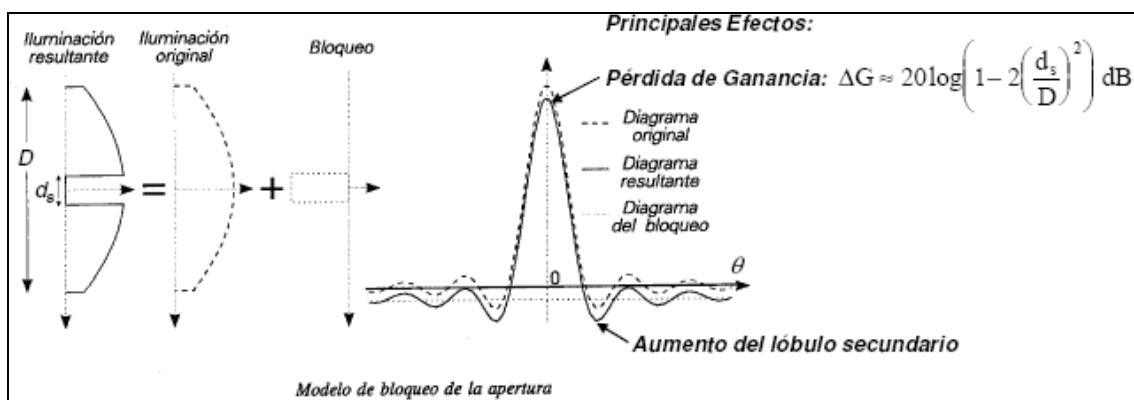


Figura 3.19 Eficiencia por bloqueo[\[XIX\]](#)

- **Pérdidas por Difracción**

- Cuando el subreflector es eléctricamente pequeño el modelo de GO pierde validez. La onda reflejada por el subreflector se aparta de una onda esférica presentando rizados en amplitud y fase, que alcanzan la apertura reduciendo ganancia, y producen *spillover* adicional fuera del reflector principal. [\[9\]](#)

- **Pérdidas por Desplazamientos del Alimentador**

- **Desplazamiento Axial**

- La variación en la posición del alimentador a lo largo del eje en el que está situado produce un error de fase de orden cuadrático en el campo de apertura que rellena los nulos del diagrama de radiación y disminuye la ganancia. [\[9\]](#)

- **Desplazamiento Lateral**

- El desplazamiento lateral del alimentador causa un apuntamiento del haz en sentido contrario del movimiento del alimentador. [\[9\]](#)
- Como resultado, se produce una exploración del haz, una caída de la ganancia y pérdida de simetría del diagrama asociada con la aberración de coma (orden cúbico). [\[8\]](#)

En último término, en la Figura 3.20 se muestra la eficiencia total típica para diferentes tipos de reflectores correctamente realizados.

- Reflector simple centrado: 60%.
- Sistema Cassegrain centrado: 65 al 70%.
- Sistema Offset: 70 al 75%.
- Sistema doble con superficies conformadas para máxima ganancia: 85 a 90%.

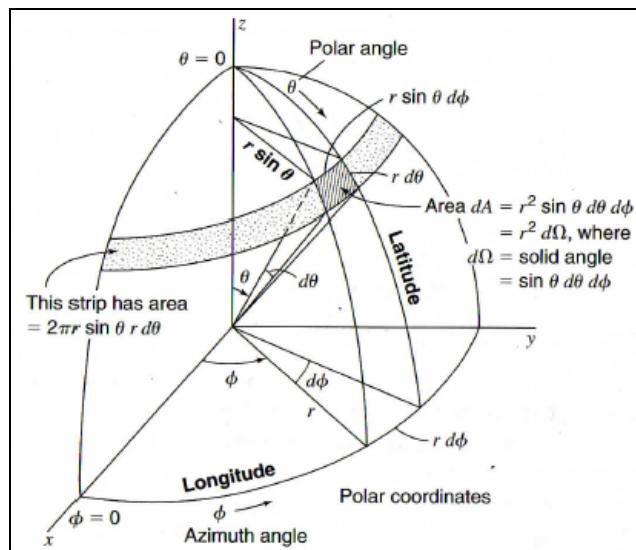
Figura 3.20 Eficiencias típicas de reflectores[\[XX\]](#)

3.3.4 El cálculo del “*Beam Efficiency*” y su relación con el contraste de la imagen

Se conoce como **ángulo sólido equivalente** o ***beam solid angle*** (Ω_A) a la integral del diagrama de radiación de potencia **normalizado** sobre una esfera (4π estereoradianes), como se muestra en la ecuación 19. [\[3\]](#)

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi = \iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega \quad (19)$$

Siendo $d\Omega$ el **ángulo sólido**, que relaciona una superficie con la distancia a la que se encuentra, tal y como se ilustra en la Figura 3.21.

Figura 3.21 Representación del ángulo sólido[\[XXI\]](#)

Dicho esto, Ω_A puede descomponerse en la suma de dos partes diferentes: el **ángulo sólido del lóbulo principal** (Ω_M) y el **ángulo sólido del lóbulo secundario** (Ω_m). [\[3\]](#)

Ω_M resulta de integrar únicamente en la dirección de dicho lóbulo principal y, en base a esto, podemos definir la **eficiencia de haz** o ***beam efficiency*** (ε_M) como se muestra en la ecuación 20.

$$\varepsilon_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A} \quad (20)$$

Por otro lado, la relación entre Ω_m y Ω_A se conoce como **factor de pérdidas** (ε_m) y la suma de ε_m con la eficiencia de haz es equivalente a 1.

ϵ_M es un parámetro usado comúnmente para estimar la calidad de transmisión y recepción de una antena y puede oscilar entre valores comprendidos dentro del rango de 0 a 1.

En cuanto al **contraste** de una imagen, se puede definir como la diferencia en intensidad de brillo entre las áreas oscuras y luminosas de una escena (concretamente entre el objeto y el fondo), y es una característica muy importante en la calidad de la imagen, así como la resolución. [\[12\]](#)

Como se puede comprobar en la Figura 3.22, la imagen de la izquierda presenta un menor contraste que la de la derecha.

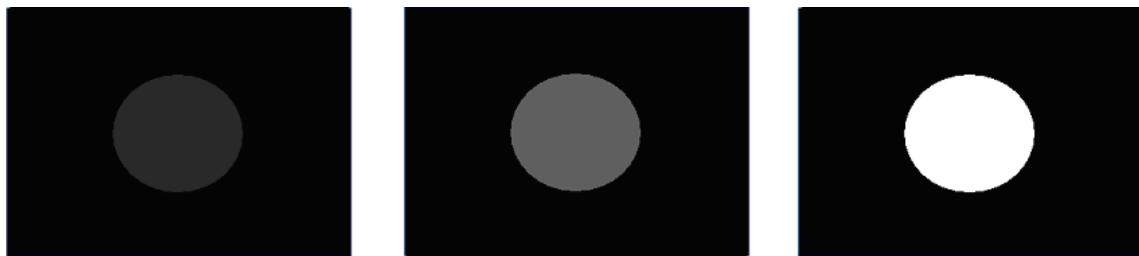


Figura 3.22 Contraste de imágenes diferentes

Matemáticamente, puede expresarse mediante **fórmula de Weber**, expuesta a continuación en la ecuación 21.

$$C_W = \frac{L_s - L_b}{L_b} \quad (21)$$

Donde L_s es la intensidad de brillo de un punto del objeto y L_b de un punto del fondo.

En el caso de una cámara de ondas milimétricas, el contraste está directamente relacionado con el *beam efficiency*, puesto que cuanto más concentrado esté el diagrama de radiación de la antena en el lóbulo principal (ϵ_M alto), habrá menos “dispersión” del haz y, en consecuencia, la distribución de la iluminación y las sombras será más uniforme, por lo que el contraste será mayor (produciendo así una imagen más visible). Por ejemplo, en una situación en la que el contraste sea muy pobre, será necesaria una antena muy directiva para generar una imagen en la que se pueda distinguir explícitamente entre el objeto y el fondo, como se ilustra en la Figura 3.23.

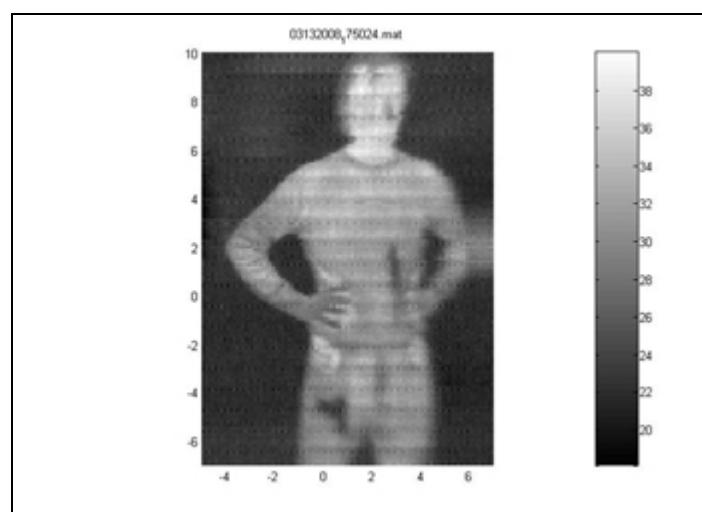


Figura 3.23 Imagen creada con un escáner de ondas milimétricas [\[XII\]](#)

3.4 Bibliografía

Libros y páginas web:

- [1] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.
- [2] Ángel Cardama Aznar et al., “*Antenas*” Edicions UPC, Barcelona, 2^a edición, 2002.
- [3] John D. Kraus and Ronald J. Marhefka, “*Antennas for all applications*”, Ed. McGRAW-HILL, 3^a edición, 2002.
- [4] Federico Dios Otín et al., “*Campos Electromagnéticos*”, Edicions UPC, Barcelona, 1998.
- [5] Pedro de Paco, “*Apuntes Radiación y Ondas Guiadas*” Departamento de Telecomunicaciones y de Ingeniería de Sistemas.
- [6] Josep Parrón, “*Apuntes Sistemas de Radiocomunicación*” Departamento de Telecomunicaciones y de Ingeniería de Sistemas.
- [7] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-2.pdf>
- [8] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [9] <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>
- [10] http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Bocinas.pdf
- [11] http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Reflectores.pdf
- [12] http://colorusage.arc.nasa.gov/luminance_cont.php

Imágenes y tablas:

- [I] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.
- [II] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.
- [III] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.
- [IV] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.
- [V] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.

- [VI] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 3^a edición, 2005.
- [VII] Ángel Cardama Aznar et al., “*Antenas*” Edicions UPC, Barcelona, 2^a edición, 2002.
- [VIII] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-2.pdf>
- [IX] http://www.upv.es/satelite/trabajos/sat_tv/tipoant.htm
- [X] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XI] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XII] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XIII] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XIV] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XV] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XVI] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XVII] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [XVIII] http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Reflectores.pdf
- [XIX] <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>
- [XX] <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>
- [XXI] John D. Kraus and Ronald J. Marhefka, “*Antennas for all applications*”, Ed. McGRAW-HILL, 3^a edición, 2002.
- [XXII] <http://www.nist.gov/eeel/optoelectronics/manufacturing/terahertz.cfm>

4. Diseño de una cámara de onda milimétrica mediante “*Spinning Reflectors*”

La cámara de ondas milimétricas de la que es objeto este proyecto consiste en un reflector doble centrado en el cual, mediante la rotación de los reflectores y la consecuente rotación del haz principal, se consigue realizar un barrido del espacio. Si bien éste es su principio básico de funcionamiento, en este capítulo nos centraremos únicamente en la configuración de nuestro sistema (reflectores y bocina) y en el diseño de un modelo de simulación.

4.1 Configuración del sistema

A lo largo de este apartado se mostrarán los principales criterios para el diseño de los reflectores y la bocina, ya sea desde un punto de vista puramente teórico o bien analizando las configuraciones existentes en el mercado actual.

4.1.1 Configuración de los reflectores

Comparación de distintas antenas reflectoras

Según lo expuesto anteriormente en el subapartado 3.3.1, podemos establecer las siguientes afirmaciones:

- Las configuraciones centradas presentan mayor simetría que las *offset*, por lo que tienen menos polarización cruzada. Por el contrario, presentan mayores problemas de bloqueo de apertura y desadaptación por la onda reflejada hacia el alimentador. [\[1\]](#)
- Los reflectores dobles frente a los sencillos utilizan alimentadores más directivos y tienen menos *spillover*. Además su temperatura de ruido suele ser menor. La alimentación es más sencilla al poder alimentarse desde la parte posterior. [\[1\]](#)

En estas circunstancias, puesto que mediante los “*Spinning Reflectors*” se pretende realizar un escaneado del espacio moviendo ambos reflectores, nos decantaremos por el **reflector doble de tipo Cassegrain**.

Esta clase de reflectores permiten ubicar el alimentador en la posición conveniente para cada configuración distinta y a menudo son utilizados en el diseño de telescopios ópticos.

Análisis teórico

En base a la Figura 4.1, podemos deducir las ecuaciones 22 a 30 (extraídas de [\[2\]](#) y [\[3\]](#)) para un primer estudio de los parámetros de diseño.

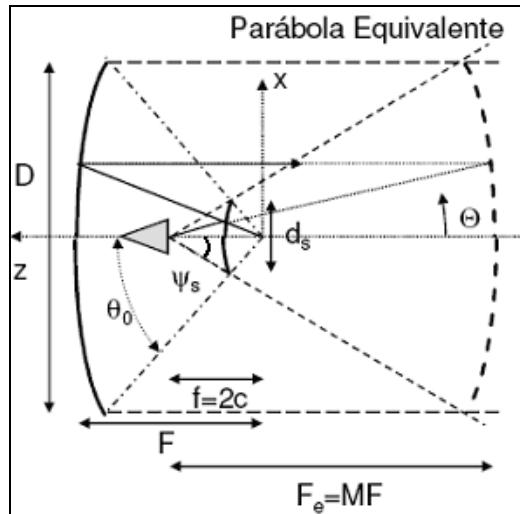


Figura 4.1 Representación gráfica reflector Cassegrain [1]

- **Diámetro del subreflector (d_s):**
$$d_s = \frac{2eP \sin(\pi - \psi_s)}{1 - e \cos(\pi - \psi_s)} \quad (22)$$

Donde:
$$P = f \frac{(e^2 - 1)}{2e^2} \quad (23)$$

- **Distancia focal del subreflector (f):**
$$f = 2c = 2ea \quad (24)$$

Donde:
$$c = ea = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (25)$$

Siendo **a** y **b** los semiejes principal y secundario de la hipérbola (subreflector), respectivamente.

- **Excentricidad del subreflector (siempre $e > 1$):**
$$e = \frac{\sin(\frac{1}{2}(\theta_0 + \psi_s))}{\sin(\frac{1}{2}(\theta_0 - \psi_s))} \quad (26)$$

- **Mitad del ángulo de apertura del reflector principal (θ_0):**

$$\theta_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{D}{4F} \right) \quad (27)$$

- **Mitad del ángulo de apertura del subreflector (ψ_s):**

$$\psi_s = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\frac{2f}{d_s} - \frac{1}{2} \left(\frac{4F}{D} - \frac{D}{4F} \right)} \right) \quad (28)$$

- **Magnificación (M):**
$$M = \frac{e+1}{e-1} \quad (29)$$

- **Distancia Focal equivalente (F_e):**
$$F_e = MF \quad (30)$$

El concepto de **parábola equivalente** es aplicable tanto para el diseño del alimentador como para la obtención de los primeros lóbulos, así como el método del **excitador virtual**⁶. [\[2\]](#)

En cuanto a las desventajas descritas anteriormente sobre este tipo de reflectores, éstas pueden optimizarse mediante las siguientes relaciones y procedimientos:

- **Condición de mínimo bloqueo:** $d_f = d_s \approx \sqrt{2\lambda F}$ (31)

Donde d_f es el diámetro del alimentador primario (bocina).

- **Desadaptación de la bocina alimentadora:** Se realiza una abertura circular en el centro del reflector principal del mismo diámetro que el subreflector.

Normalmente se utilizan alimentadores más pequeños con subreflectores de diámetro $d_s \leq 0.15D$.

Consideraciones de los reflectores comerciales

Algunas de las empresas que actualmente ofrecen reflectores y otros productos para aplicaciones dentro del marco de las ondas milimétricas son **Millitech**[\[5\]](#), **ELVA-1**[\[6\]](#) y **Cernex**[\[7\]](#). A continuación destacaremos las dos primeras:

- **Millitech:** El diámetro del reflector principal suele estar comprendido entre 15 y 120 cm y el ancho de haz a -3 dB puede llegar a estrecharse de manera significativa (hasta 0.1°), como se ilustra en la Tabla 4.1.

Performance Parameter	Range Available	Remarks
Frequency range	18 to 220 GHz	Practical range for waveguide feeds.
Standard reflector diameters	6, 10, 12, 18, 24, 36, 48 inches	Custom diameters available.
Beamwidth, HPBW	0.1° to 8.0° (nom)	Beamwidth depends on frequency and diameter selected.
Gain	26 to 62 dBi (nom)	Depending upon the frequency and diameter selected.
Sidelobes	18 dB (typ)	Typical value for standard product. Blockage by subreflector determines sidelobe level.
VSWR	1.5:1 (typ)	Return loss 14 dB typical.

Tabla 4.1 Especificaciones reflector Cassegrain Millitech[\[1\]](#)

- **ELVA-1:** El diámetro del reflector principal suele estar comprendido entre 10 y 30 cm y la ganancia en todos los casos es bastante elevada, como se muestra en la Tabla 4.2.

⁶ Excitador virtual: Principio de equivalencia según el cual el alimentador y el subreflector se sustituyen por un excitador virtual situado en el foco del reflector principal. [\[4\]](#)

W band. 75-110 GHz				
Part No	Diameter of main reflector (mm)	Gain dB, (typ)	Beamwidth in deg. at 3dB level (typ)	VSWR (typ)
ECA-W-X-100	100	35.7	2.1	1.25
ECA-W-X-200	200	41.7	1.0	1.25
ECA-W-X-300	300	45.0	0.7	1.25
Losses in a Protected cover is 0,7 dB (max) Feed waveguide is circular or rectangular				

Tabla 4.2 Especificaciones reflector Cassegrain ELVA-1^[III]

Del mismo modo, además de lo ya expuesto, la elección de uno de estos reflectores estándar para la elaboración de una cámara de ondas milimétricas estará sujeta a las siguientes condiciones de diseño:

- El diámetro del subreflector tiene que ser bastante pequeño (aproximadamente la décima parte del diámetro del reflector principal o menor).
- El alimentador primario ha de estar situado lo más cerca posible del reflector principal (posibilitando la utilización de guías de ondas).

Implementación del modelo de simulación

A partir de las ecuaciones y posibles configuraciones mostradas previamente, seleccionaremos los parámetros de diseño (diámetros y distancias focales de ambos reflectores) de acuerdo con las especificaciones de los modelos de **Millitech**.

En estas circunstancias, como se puede ver en la Tabla 4.3:

Diámetro del reflector principal	30.5 cm
Distancia focal del reflector principal	13.7 cm
Diámetro del subreflector	5.1 cm
Distancia focal del subreflector	13.5 cm

Tabla 4.3 Parámetros de diseño del reflector Cassegrain

De dichas características, cabe destacar que el diámetro del reflector principal es, aproximadamente, 100λ y el diámetro del subreflector es, aproximadamente, 16λ (una sexta parte del diámetro del reflector principal), lo que proporciona al sistema las adecuadas propiedades de radiación (*beam efficiency, taper, etc...*)

Sin embargo, como se puede deducir de las ecuaciones 27 y 28, esta primera configuración implica que $\theta_0 = 58.2^\circ$ y $\psi_s = 12.08^\circ$, lo que, en consecuencia, repercute en una excentricidad pequeña ($e = 1.47$) y en una magnificación grande ($M = 5.26$), como se deriva de las ecuaciones 26 y 29, respectivamente.

Tal y como se explicará detalladamente en el siguiente capítulo, una magnificación elevada está relacionada con unos ángulos de inclinación de los reflectores grandes, lo cual no es deseable para nuestra cámara de onda milimétricas.

Por tanto, tendremos que escoger otra configuración distinta, de tal manera que la magnificación sea menor (del orden de 1 ó 2).

En estas circunstancias, a partir de las ecuaciones 22 a 30 podemos obtener un segundo modelo, tal y como puede verse en la Tabla 4.4:

Diámetro del reflector principal	30 cm
Distancia focal del reflector principal	37.5 cm
Diámetro del subreflector	11.5 cm
Distancia focal del subreflector	35 cm

Tabla 4.4 Parámetros de diseño del reflector Cassegrain II

En este caso, el principal inconveniente consiste en que no es posible satisfacer todas las condiciones de diseño. Si agrupamos las ecuaciones 22 y 23 en una única expresión

$$d_s = f \frac{(e^2 - 1) \sin(\pi - \psi_s)}{e(1 - e \cos(\pi - \psi_s))} \quad (32)$$

puede demostrarse que el diámetro del subreflector es **directamente proporcional** a la distancia focal del subreflector. Por tanto, si de acuerdo con las especificaciones, la magnificación ha de ser **pequeña** y la bocina ha de estar situada prácticamente en el vértice del reflector principal (distancia focal del subreflector **grande**), entonces el diámetro del subreflector también deberá ser bastante **grande** comparado con el reflector principal.

Concretamente, si bien ahora la magnificación es 1.5 (y la excentricidad 5), el diámetro del subreflector es, aproximadamente, sólo la tercera parte del diámetro del reflector principal, lo que introduce demasiado bloqueo y provoca que, por ejemplo, el diagrama de radiación de la antena Cassegrain presente unos lóbulos secundarios demasiado elevados.

4.1.2 Configuración de la bocina

Comparación de distintas antenas de bocina

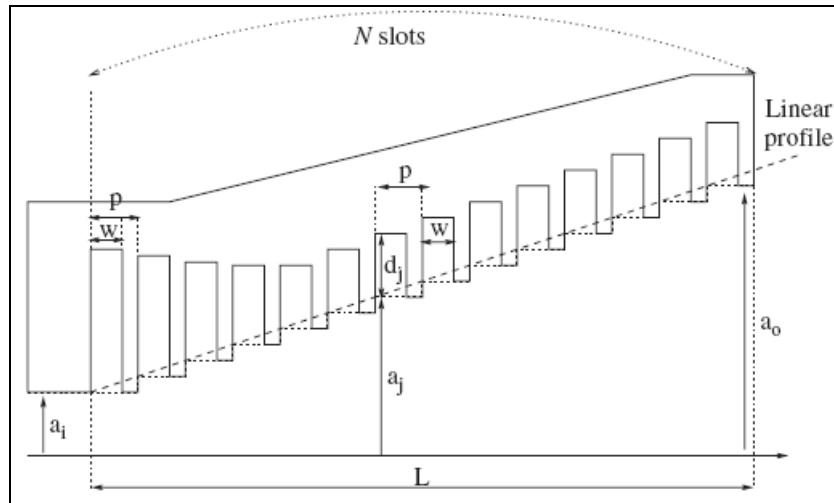
Según lo expuesto anteriormente en el subapartado 3.2.1, para el diseño de nuestro alimentador primario utilizaremos una **bocina cónica con corrugaciones** (ya que presenta las mejores características de radiación), como se puede comprobar en la Figura 4.2.

Tipo de bocina	Bocina de abertura circular			Bocina de abertura rectangular		
	Bocina cónica convencional	Bocina de modo doble (tipo escalón)	Bocina cónica ondulada	Piramidal	Bocina diagonal	Bocina de abertura múltiple
Forma						
Forma del campo de abertura						
Características de frecuencia	Ancha	Menor del 5%	Aproximadamente 1 octava	Ancha	Ancha	Aproximadamente el 20%
Axisimetría del haz	Deficiente	Buena	Excelente	Deficiente	Regular	Buena
Lóbulos laterales	Deficiente	Buena	Excelente	Deficiente	Regular	Buena
Nivel de polarización cruzada	Deficiente (-18 a 20 dB)	Buena (menos de -25 dB)	Excelente (menos de -30 dB)	—	—	Buena
Potencia en el haz	Deficiente	Buena	Excelente	Deficiente	Deficiente	Buena
Observaciones				Únicamente se usa con polarización lineal	Únicamente se usa con polarización lineal	

Figura 4.2 Propiedades de diferentes bocinas^[IV]

Análisis teórico

Para el caso de una bocina cónica con corrugaciones, representada en la Figura 4.3, podemos utilizar las ecuaciones 33 a 40 (extraídas de [\[8\]](#)) para un primer estudio de los parámetros de diseño.

Figura 4.3 Representación gráfica bocina cónica corrugada^[V]

- **Radio de la guía de onda (a_i):**

$$a_i = \frac{3\lambda}{2\pi} \quad (33)$$

Donde a₀ es el radio de la boca de la bocina.

- **Radio de la superficie corrugada de la j-ésima ranura (a_j):**

$$a_j = a_i + (j-1) \frac{(a_0 - a_i)}{(N_{slots} - 1)} \quad (34)$$

Para $1 \leq j \leq N_{slots}$.

- **Distancia entre los puntos correspondientes en ranuras adyacentes (p):**

$$p = \frac{\lambda}{8} \quad (35)$$

- **Anchura de una ranura (w):** $w = 0.8p$ (36)

- **Profundidad de la j-ésima ranura (d_j):** $d_j \approx \frac{\lambda}{4} e^{\left(\frac{2}{5ka_j}\right)}$ (37)

Siendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

- **Número de ranuras (N_{slots}):** Entero más próximo a $\frac{4a_0}{p}$ (38)

- **Longitud de la bocina (L):** $L = N_{slots} p$ (39)

- **Desfasaje máximo en número de vueltas debido al abocinamiento (s):**

$$s = \frac{(2a_0)^2}{8\lambda L} \quad (40)$$

Consideraciones de las bocinas comerciales

De manera análoga a los reflectores, **Millitech** también proporciona componentes dentro del campo de las bocinas. Éstas pueden clasificarse en tres tipos diferentes (aunque sólo haremos hincapié en las dos primeras): **Scalar Feed Horn (SFH)**, **Conical Horn Antenna (CHA)** y **Standard Gain Horn (SGH)**.

Las bocinas **SFH** proporcionan unos diagramas de radiación simétricos en los planos **E** y **H** (debido a las corrugaciones) y presentan unos lóbulos secundarios más pequeños comparados con los de las bocinas **CHA**. Aún así, en ambos casos las características eléctricas son bastante parecidas, tal y como se ilustra en la Tabla 4.5:

Performance Parameter	SFH Range Available
Frequency range	18 to 220 GHz
Beam angles, HPBW	25° dB (nom)
Gain	5 to 23 dBi (nom)
Sidelobes	-30 dB (typ)
VSWR	1.5:1 (typ)
Cross polarization isolation	>30 dB

Tabla 4.5 Especificaciones bocinas SFH & CHA[VI]

Siguiendo el mismo razonamiento, dado que la cámara de ondas milimétricas trabaja a una frecuencia de 94 GHz (**banda W**), el diámetro de la guía de onda de la bocina deberá ser de, aproximadamente, **2.39 mm** y el ancho de haz de **25°**.

Implementación del modelo de simulación

Para agilizar el proceso de modelado de nuestra bocina alimentadora, de acuerdo con las ecuaciones y especificaciones de los modelos de **Millitech**, utilizaremos el *software* de diseño de antenas **Antenna Magus**. [\[9\]](#)

En primer lugar, seleccionaremos la bocina que queremos configurar entre los diferentes tipos que ofrece el programa (*Find Mode* → *Waveguide-fed corrugated*) y, mediante la opción *Design Mode* → *Design Objectives*, situaremos la frecuencia de trabajo a 94 GHz (*Centre frequency*) y el ancho de haz a 10 dB a 47° (*Design for: 10 dB E- and H-plane beamwidth*), a fin que el ancho de haz a -3 dB sea de 25°.

Del mismo modo, el resto de parámetros de diseño (*Depth of first slot*, *Corrugation slot width*, etc...) se mantendrán con el valor que tienen por defecto, como se ilustra en la Figura 4.4.

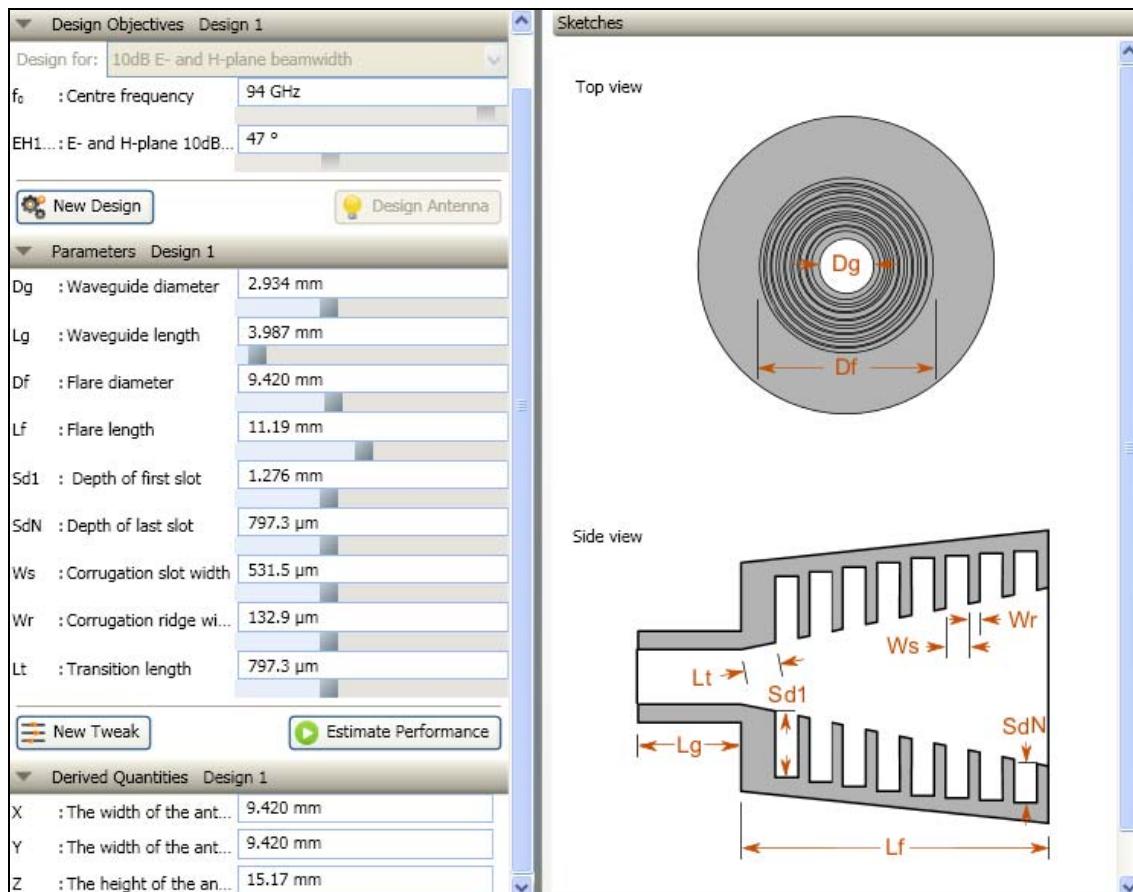


Figura 4.4 Configuración de la bocina mediante Antenna Magus

En último término, exportaremos este modelo a **FEKO** para un posterior análisis mediante simulaciones (como se verá en el subapartado 4.2.3) con la opción *Export Mode* → *Export Model*.

4.2 Elaboración del modelo de simulación electromagnético

Una vez configurados los reflectores y la bocina, el próximo paso consistirá en diseñar un modelo para poder realizar simulaciones mediante el *software FEKO*.

Dicho esto, en este apartado se expondrá todo este proceso de creación, desde los principales requerimientos del modelo hasta la utilización de **Excel** para realizar el barrido en espacio.

4.2.1 Requisitos de muestreo en óptica física y en óptica geométrica

Ya sea creándolo directamente (**EDITFEKO**) o bien importándolo de objetos geométricos previamente definidos (**CADFEKO**), para el análisis electromagnético **FEKO** utiliza un concepto conocido como **mesh**.

El **mesh** consiste en una “captura” de los distintos elementos del modelo en el momento de su creación y es dónde se precisa el tipo de solución a utilizar (**Method of Moments (MoM)**, **Finite Element Method (FEM)**, **Geometrical Optics (GO)**, etc...).

Además, se constituye mediante la división de las superficies conductoras en triángulos (tetraedros si se aplica **FEM** a materiales dieléctricos) y los cables en segmentos, consiguiendo así la “discretización” de la geometría.

Sin embargo, dependiendo de la solución empleada, el tamaño de estos triángulos puede ser variable, por lo que en el caso de **Óptica Física** y **Óptica Geométrica** el **mesh** estará sujeto a las siguientes normas:

- Cuando la solución usada sea **Óptica Física (PO)**, el área de cada triángulo deberá ser menor que $\frac{\lambda^2}{70}$. Para triángulos prácticamente equiláteros esto implica que la longitud de los lados deberá ser inferior a $\frac{\lambda}{(5..6)}$. Dependiendo de la geometría y la precisión requerida, se necesitarán más o menos triángulos (aunque es preferible una longitud de arista igual a $\frac{\lambda}{(7..8)}$). [\[10\]](#)
- Cuando la solución usada sea **Óptica Geométrica (GO)**, el tamaño máximo de los triángulos tendrá que elegirse de tal manera que la geometría esté bien representada. Para este método, el tamaño del **mesh** debe escogerse independientemente de la frecuencia y sólo en función de la precisión del modelo representado. [\[10\]](#)

En estas circunstancias, si la frecuencia de trabajo es bastante elevada, esto provocará que en **Óptica Física** el **mesh** esté formado por una cantidad significativa de triángulos (afectando de manera considerable al tiempo de ejecución), mientras que en **Óptica Geométrica** esto no será estrictamente necesario.

Concretamente, en las simulaciones en las que utilicemos **Óptica Geométrica**, el muestreo para el **mesh** estará entre λ y $\lambda/2$ puesto que, si bien habrá ciertas irregularidades tolerables en la segmentación entre triángulos, nos permitirá realizar dichas simulaciones dentro de un margen de ejecución razonable.

4.2.2 Consideraciones de tiempo de ejecución

En la Figura 4.5 se representa el diagrama de radiación de una antena Cassegrain a una frecuencia de 12.5 GHz, obtenido mediante dos métodos diferentes: **PO** y **GO**.

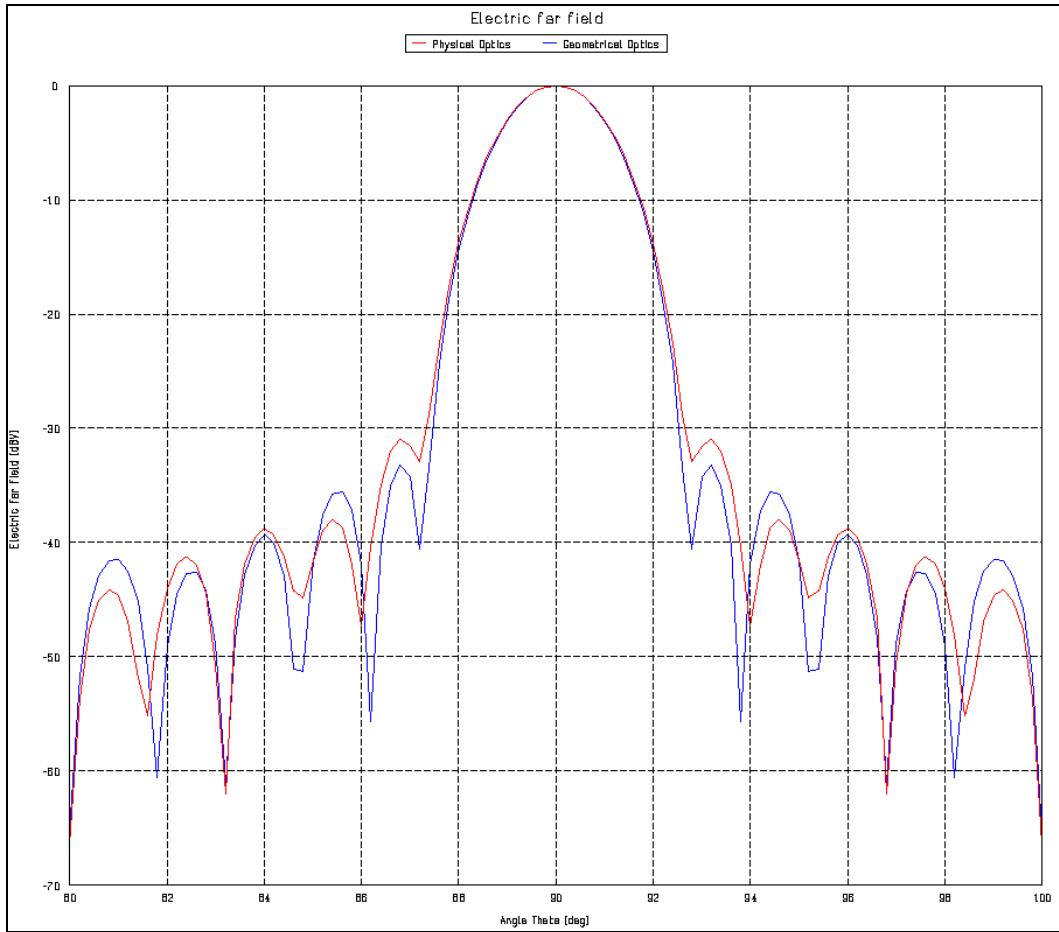


Figura 4.5 Diagrama de radiación obtenido mediante PO & GO

Como se puede observar, los resultados son prácticamente idénticos en ambos casos (a excepción de ligeras variaciones en los lóbulos secundarios).

No obstante, el tiempo de ejecución cuando se trabaja con **Óptica Física** es mucho mayor que con **Óptica Geométrica**, como se ilustra en la Tabla 4.6:

Método	Tiempo de ejecución
Óptica Geométrica	137.513 segundos (0.038 horas)
Óptica Física	3310.470 segundos (0.920 horas)

Tabla 4.6 Comparación de tiempos de ejecución con PO & GO

Por tanto, si bien es cierto que estos tiempos de ejecución pueden reducirse mediante posibles simplificaciones (utilizar *PO – only illuminate from front* en lugar de *PO – always illuminated*, aprovechar algunas simetrías de la geometría, etc...), esta evidente diferencia de tiempos propiciará que en posteriores simulaciones (a 94 GHz) nos decantemos por la **Óptica Geométrica**.

4.2.3 Simulación mediante FEKO y SABOR

Simulación mediante SABOR

Para validar los diseños elaborados en el apartado 4.1, realizaremos una primera aproximación de nuestro modelo mediante el *software* de análisis de bocinas y reflectores **SABOR** [11], ya que con **FEKO** este proceso es bastante más complejo.

Aunque actualmente existen otros programas más completos (como **GRASP9** [12] o **ICARA** [13]), la sencillez de **SABOR** nos permitirá efectuar los cálculos de manera precisa y rigurosa.

En primer lugar, para configurar el alimentador primario, seleccionaremos el tipo de bocina que necesitamos (*Horn* → *Corrugated* → *Circular*), situaremos la frecuencia a 94 GHz (*Options* → *Frequency*) y especificaremos los parámetros de dicha bocina (*Dimensions*) según lo expuesto en la Figura 4.4.

Finalmente, podremos obtener su diagrama de radiación mediante la opción *Pattern*, como se muestra en la Figura 4.6:

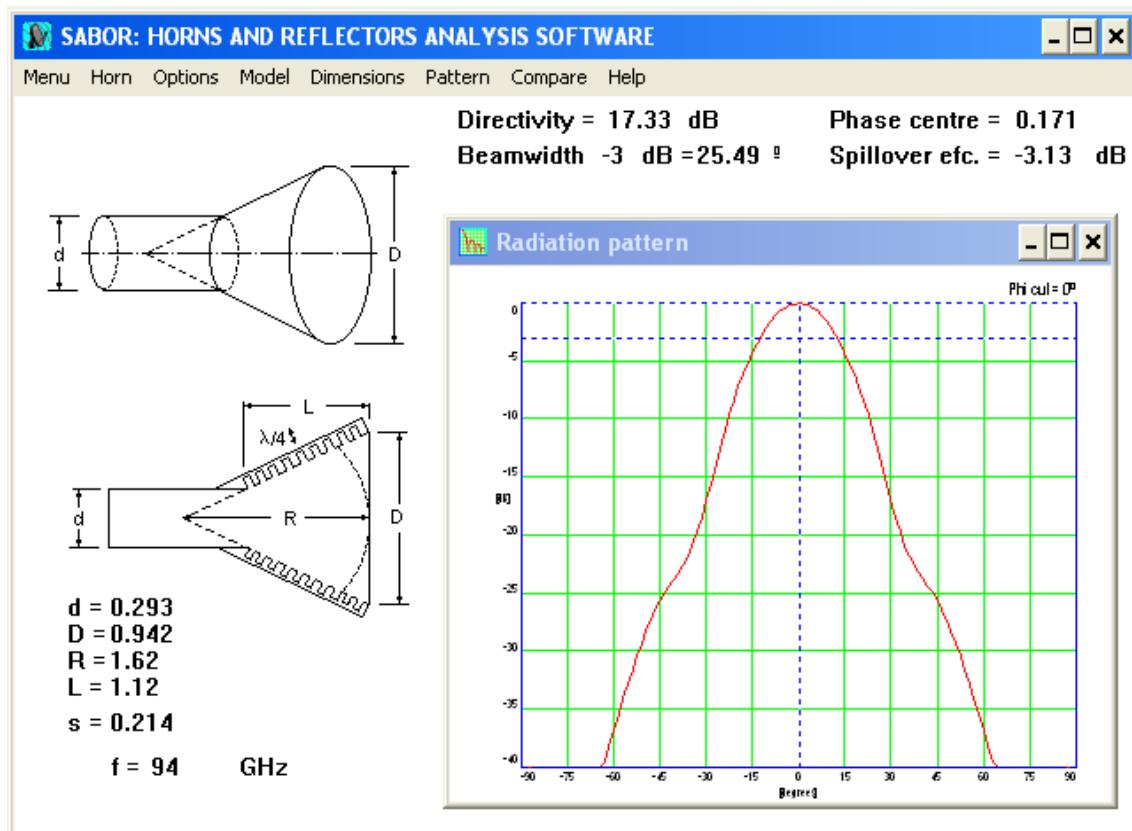


Figura 4.6 Bocina Cónica Corrugada simulada con SABOR

Como se puede observar, el ancho de haz de esta bocina es prácticamente 25° , tal y como se especificó anteriormente en las condiciones de diseño.

A continuación, para configurar los reflectores (*Menu* → *Reflector* → *Designed Horn*), seleccionaremos la clase de reflector que necesitamos (*Reflector* → *Cassegrain*) e introduciremos los parámetros de los reflectores (*Dimensions*) de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 4.4.

En último término, podremos obtener su diagrama de radiación mediante la opción *Pattern*, como se ilustra en la Figura 4.7:

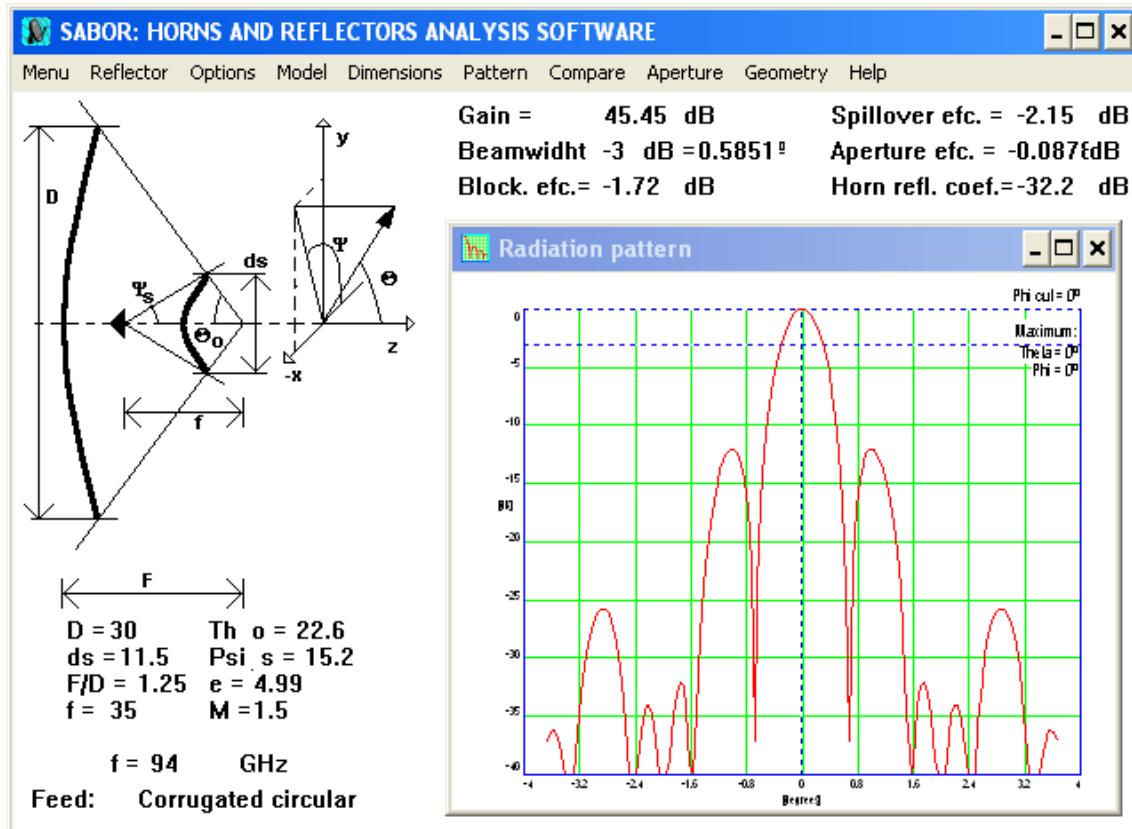


Figura 4.7 Antena Cassegrain simulada con SABOR

En comparación con la primera configuración (expuesta en la Tabla 4.3), el considerable tamaño del subreflector en el actual modelo provoca un bloqueo hasta siete veces mayor, causando que la iluminación en los bordes del subreflector o *taper* sea de -5 dB y el nivel de los lóbulos secundarios de aproximadamente -13 dB.

No obstante, el diagrama de radiación obtenido es simétrico (por lo que no habrá radiación contrapolar en el plano principal) y el ancho de haz a -3 dB del lóbulo principal es bastante estrecho (casi 0.6°).

Por tanto, como se ha podido comprobar, los resultados obtenidos mediante estas simulaciones concuerdan con los esperados, por lo que seguidamente se procederá a implementar estas configuraciones con el *software* FEKO.

Simulación mediante FEKO

A fin de elaborar los anteriores modelos mediante FEKO [14], haremos uso de dos de sus diversos componentes: CADFEKO para el diseño de la bocina y EDITFEKO para el diseño de la antena Cassegrain.

En primer lugar, en relación con el alimentador primario, partiremos de la configuración exportada previamente mediante **Antenna Magus**.

Una vez generado el **mesh** de la bocina (*Mesh* → *Create Mesh*), únicamente deberemos seleccionar *Export Fields to ASCII file (*.efe)* mediante la opción *Solution* → *Request far fields* → *Advanced*, para poder utilizar el diagrama de radiación de esta bocina en las siguientes simulaciones. Finalmente, mediante un tercer componente (**POSTFEKO**) visualizaremos gráficamente los resultados.

En estas circunstancias, en la Figura 4.8 se ilustra una representación tridimensional de nuestra bocina y en la Figura 4.9 el campo lejano generado.

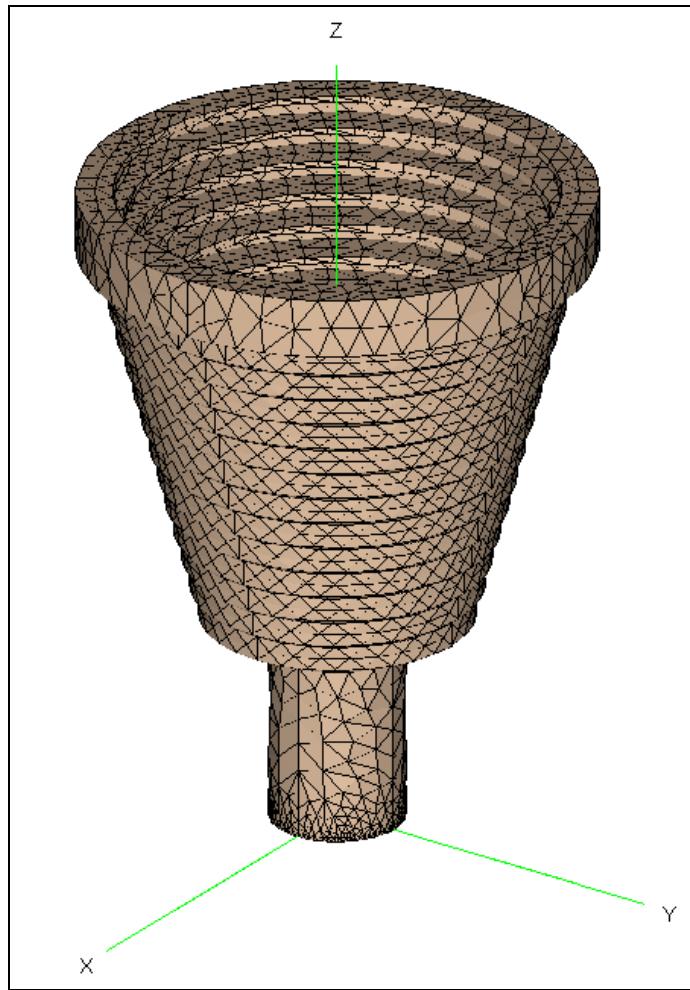


Figura 4.8 Bocina Cónica Corrugada simulada con FEKO

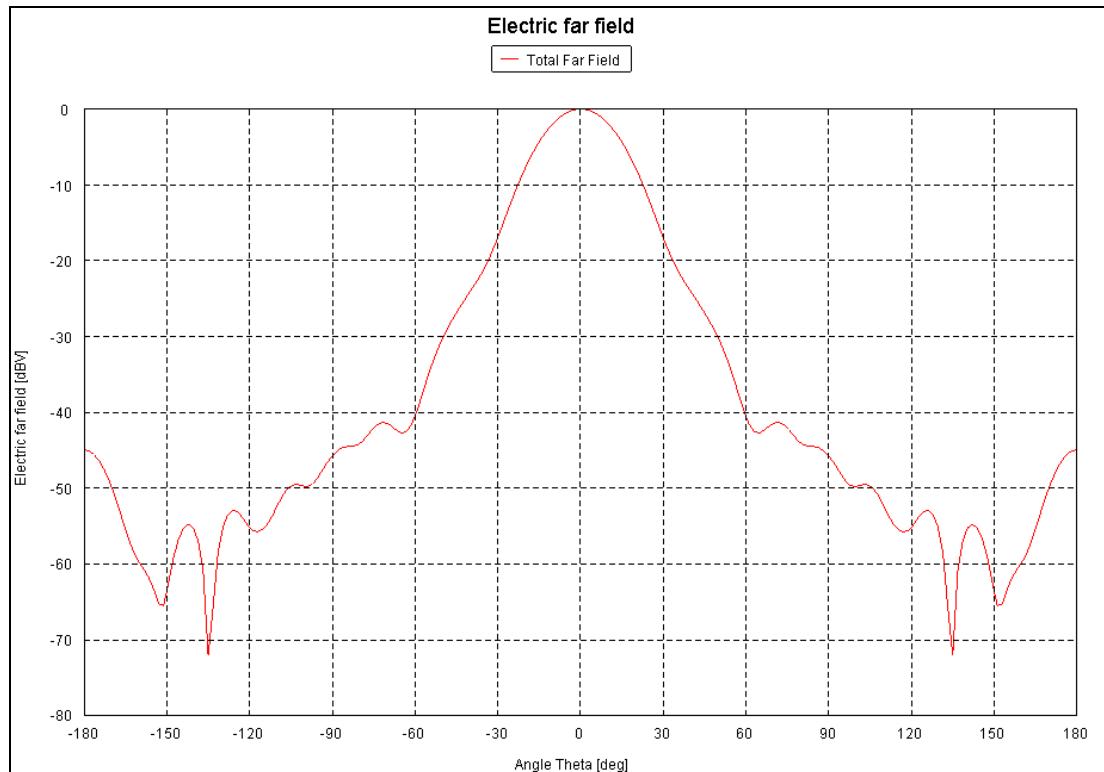


Figura 4.9 Corte transversal (azimut = 0°) del campo de la bocina

Seguidamente, por lo que se refiere a la antena Cassegrain, el código realizado mediante **EDITFEKO** se estructura en comandos (*cards*), cada uno con una finalidad diferente: modelar la geometría (p.ej. **PB**, **HY** o **TG**), especificar la clase de solución o excitación (p.ej. **UT**, **AR** o **FF**), etc...

De todos modos, este código se halla en los anexos, ya que en este subapartado únicamente se mostrarán los resultados a través de **POSTFEKO**.

Dicho esto, en la Figura 4.10 se expone una representación tridimensional de nuestro sistema y en la Figura 4.11 su diagrama de radiación.

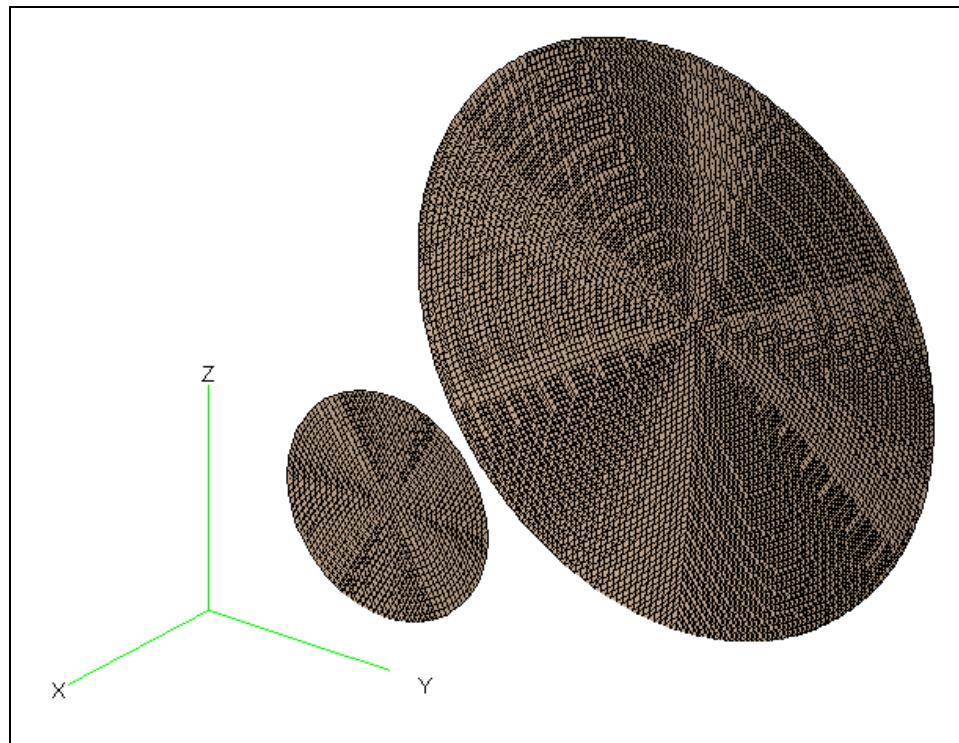


Figura 4.10 Antena Cassegrain simulada con FEKO

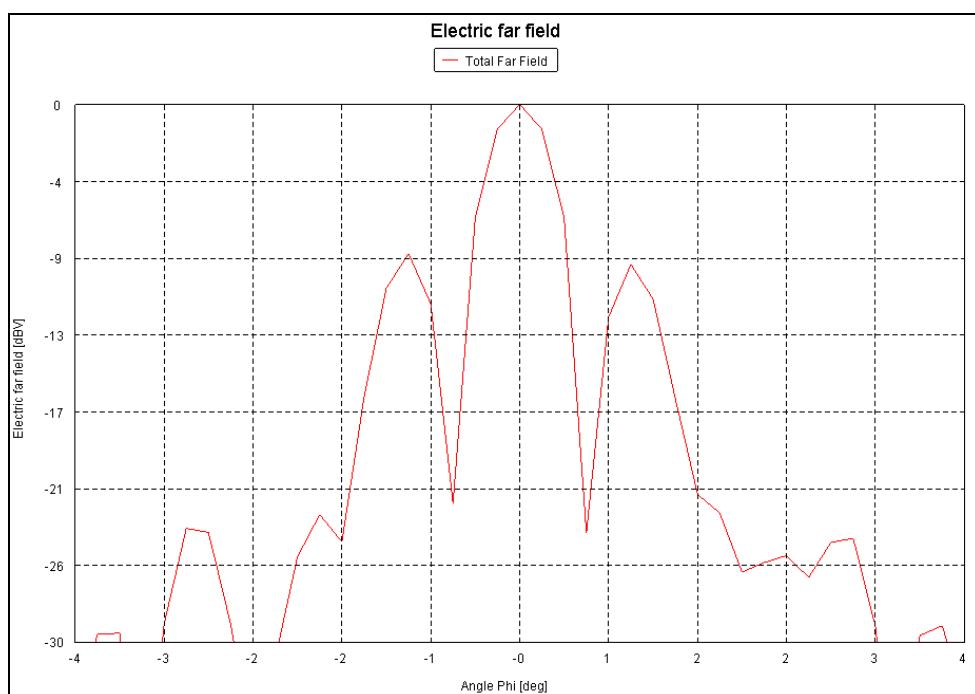


Figura 4.11 Corte transversal (elevación = 90°) del campo de la antena

Posteriormente, mediante el procesado de dichos resultados en **Matlab**, podremos obtener los campos en la apertura de la antena reflectora a partir de la **Transformada de Fourier** de este diagrama de radiación [15], tal y como se ilustra en la Figura 4.12.

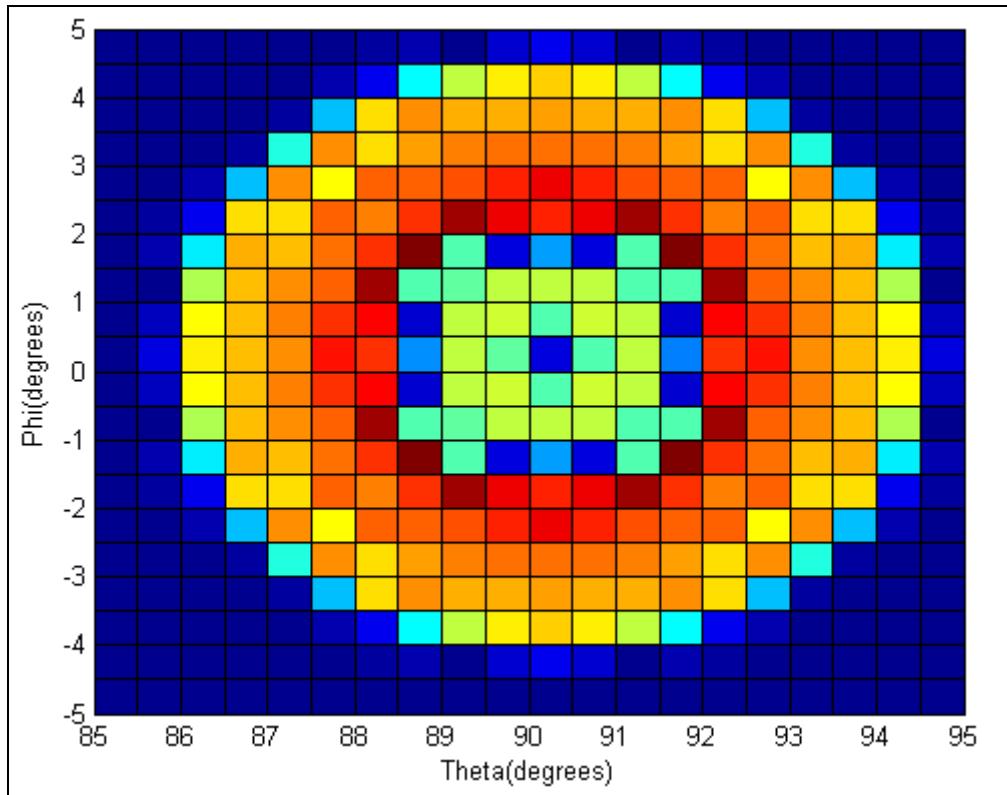


Figura 4.12 Campo en la apertura de la antena (módulo)

Como se puede comprobar, el bloqueo del subreflector provoca la aparición de una abertura circular en el centro de la imagen.

Asimismo, como el muestreo utilizado para el cálculo del diagrama de radiación (*Far Fields*) de nuestra antena Cassegrain en este caso ha sido de aproximadamente $\frac{\lambda}{2D}$ (lo que equivale a 20 puntos de campo tanto en elevación como azimut, respectivamente), esto causa que los puntos estén espaciados en intervalos que cumplen el **Teorema de muestreo de Nyquist**.

Por ejemplo, un muestreo más pequeño provocaría la reducción de tamaño de la imagen expuesta en la Figura 4.12.

4.2.4 Control de FEKO mediante Excel

Una vez elaborado el modelo de una antena Cassegrain mediante **FEKO**, el siguiente paso consistirá en realizar la rotación de los reflectores. Desafortunadamente, este proceso no es posible ejecutarlo directamente en **FEKO**, por lo que el escaneado del espacio consistirá en diversas simulaciones en las que se introducirán manualmente los ángulos de rotación correspondientes.

En estas circunstancias, con el objetivo de automatizar dicha tarea, procederemos a utilizar el programa **Excel** tal y como se muestra a continuación.

Excel contiene una aplicación conocida como **macro** y consiste en una serie de procedimientos agrupados en una sola instrucción que se realiza cada vez que se solicita la ejecución de dicha **macro**. [\[16\]](#)

Dicho esto, en primer lugar deberemos copiar el código **EDITFEKO** desarrollado anteriormente en una hoja de cálculo y crear una **macro** a partir de las opciones *Herramientas → Macro → Grabar nueva macro*. Finalmente, mediante el editor de **Visual Basic** generaremos, en esta **macro**, una función programada para reproducir el mismo código **EDITFEKO** en todas las simulaciones, pero modificando en cada una de ellas los ángulos de rotación correspondientes.

De este modo, conseguiremos realizar de manera automática las diferentes rotaciones de los reflectores (que constituyen un barrido “discreto” del espacio).

Por otro lado, puesto que la duración de cada una de estas simulaciones es de aproximadamente 15 minutos, los ángulos de rotación de los reflectores se efectuarán en intervalos de 10° (lo que equivale a 1369 simulaciones) para conseguir así la precisión adecuada en los resultados dentro de un tiempo de ejecución aceptable.

Asimismo, en los anexos se adjunta el código descrito a lo largo de este subapartado.

Posteriormente, para la ejecución de todas estas las simulaciones, utilizaremos un fichero **bash** [\[17\]](#) a fin de automatizar también este otro proceso.

En la Figura 4.13 se expone el cuerpo de dicho programa.

```
#!/bin/bash

for i in $(seq 1 1 1369)
do
runfeko Rotation$i.pre -np 4
done
```

Figura 4.13 Fichero bash

4.3 Bibliografía

Libros y páginas web:

- [1] <http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/Especializ/3-4.pdf>
- [2] <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>
- [3] <http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/telescope/pointing/optics.html>
- [4] http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/libros03._antena_cassegrain_515320de.pdf
- [5] <http://www.millitech.com/index.htm>
- [6] <http://www.elva-1.com/>
- [7] <http://www.cernex.com/index.html>
- [8] Constantine A. Balanis, “*Modern Antenna Handbook*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008.
- [9] <http://www.antennamagus.com/>
- [10] EM Software & Systems-S.A., “*FEKO User’s Manual*”, Julio 2009.
- [11] <http://www.gr.ssr.upm.es/sabor.htm>
- [12] <http://www.ticra.com/free-downloads/grasp9-se/>
- [13] <http://www.com.uvigo.es/ant/icara.htm>
- [14] <http://www.feko.info/>
- [15] <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch17.pdf>
- [16] <http://www.excel-vba.com/>
- [17] <http://www.tldp.org/LDP/abs/html/>

Imágenes y tablas:

- [I] <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>
- [II] <http://www.millitech.com/pdfs/specsheets/IS000019-CRA.pdf>
- [III] http://www.elva-1.com/products/microwave/dual_reflect.html
- [IV] <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>
- [V] Constantine A. Balanis, “*Modern Antenna Handbook*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008.
- [VI] <http://www.millitech.com/pdfs/specsheets/IS000018-SFH-CHA.pdf>

5. Formación de imágenes con la cámara de “*Spinning Reflectors*”

Una vez realizadas las simulaciones del modelo diseñado mediante **FEKO** en el anterior capítulo, seguidamente deberemos procesar los diagramas de radiación obtenidos mediante el *software* de análisis matemático **Matlab**. [1]

Dicho esto, en el presente capítulo se tratará este proceso con el objetivo de representar la imagen de un objeto, así como el funcionamiento de nuestro sistema y las especificaciones mecánicas de su implementación física.

Asimismo, los códigos utilizados a continuación se incluirán en los anexos.

5.1 Funcionamiento del sistema

Para realizar el escaneado del espacio mencionado en el anterior capítulo, inicialmente deberemos colocar los reflectores en una determinada **configuración**.

Dicha configuración consistirá en **inclinar** el vértice de los reflectores sobre el eje en el que están situados (es decir, sobre su **eje axial**). Esta **inclinación** deberá efectuarse en la misma dirección y sentido para ambos reflectores, ya sea en **azimut** (ϕ) o en **elevación** (θ), como se ilustra en la Figura 5.1.

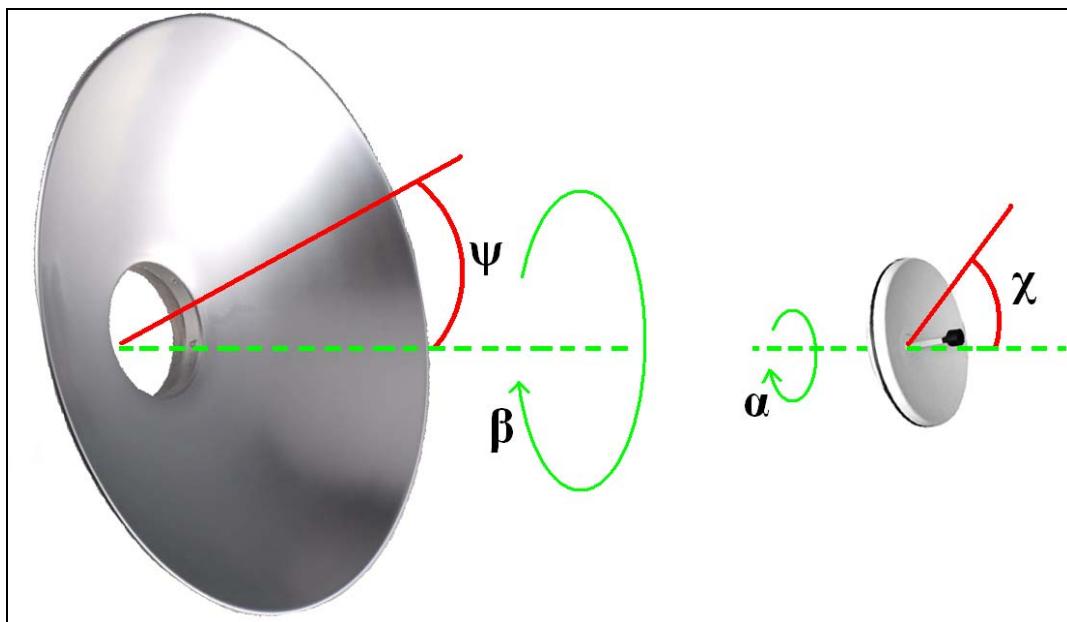


Figura 5.1 Configuración inicial de los reflectores

En estas circunstancias, fijando previamente un número **racional** σ arbitrario, el ángulo de inclinación del **subreflector** (χ) deberá ser equivalente a $\sigma \cdot M$ (lo que provocará una rotación del haz principal en la misma dirección en la que se ha realizado la inclinación), mientras que el ángulo del **reflector principal** (ψ) tendrá que ser igual a $\frac{\sigma}{1.23 \cdot M}$. De este modo, ambas inclinaciones se compensarán y el haz principal volverá a situarse en el centro de nuestro sistema ($\theta = 90^\circ$ y $\phi = 0^\circ$).

El factor de corrección **1.23** presente en la inclinación del reflector principal es una **variable** que depende de la **magnificación** (p.ej si $M = 5$, entonces este factor deberá ser de **0.26**) y su finalidad es que el haz principal no se desvíe de dicho centro.

Puesto que el ángulo de inclinación del **subreflector** ha de ser un **múltiplo de la magnificación**, por este motivo el sistema ha sido diseñado con una magnificación bastante **reducida**. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 4, en caso contrario al realizar inclinaciones con χ solamente del orden de 4 ó 5 veces la magnificación se producen unos lóbulos secundarios muy elevados.

Una vez configurada la inclinación de los reflectores, el siguiente paso consistirá en realizar la **rotación** de estos reflectores alrededor de su **eje axial**. Si únicamente rotamos el **subreflector**, se producirá una **rotación** del haz principal en la misma dirección en la que se ha realizado la **inclinación** del subreflector y, por cada ángulo del subreflector rotado (α), obtendremos el valor máximo de dicho haz (que representará la **intensidad de campo** recibida).

Dicho esto, en la Figura 5.2 se representa una rotación **completa** (en intervalos de 25°) del **subreflector** alrededor de su **eje axial** para el caso de una **inclinación en azimut** de ambos reflectores de $\chi = 2 \cdot M$ y $\psi = \frac{2}{1.23 \cdot M}$.

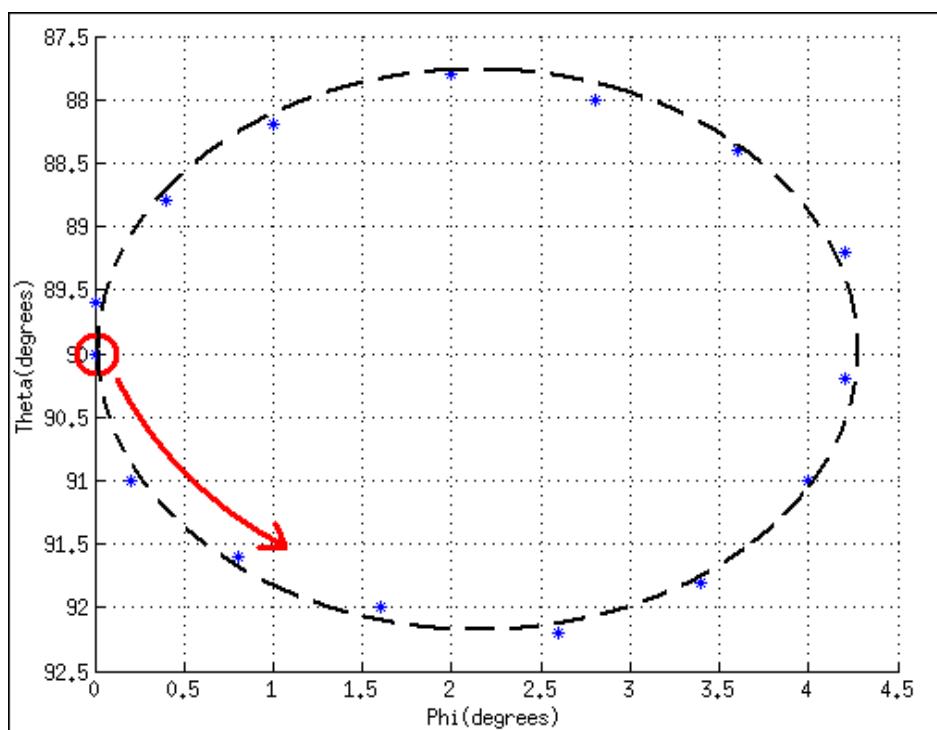


Figura 5.2 Rotación del subreflector (azimut)

Como se puede comprobar, la **rotación** se inicia y finaliza en la posición central $\theta = 90^\circ$ y $\phi = 0^\circ$ y se realiza en sentido **antihorario**.

La distancia χ' que rota en **azimut** el haz principal respecto del centro del sistema al realizar la inclinación de los reflectores corresponde con el centro de este círculo. Matemáticamente, χ' puede expresarse mediante la combinación de χ y ψ , como se muestra en la ecuación 41.

$$\chi' = \frac{\chi}{1.23M^2} + \psi \quad (41)$$

Asimismo, la distancia de los diferentes máximos de haz al centro de la circunferencia será directamente proporcional a la relación entre la inclinación del **subreflector** y la magnificación, esto es, $\frac{\chi}{M}$.

A continuación, a fin de obtener la **posición** en θ y ϕ de dichos máximos, deberemos realizar un *mapping* entre los ángulos de **rotación** del **subreflector** (α) y del **reflector principal** (β), tal y como se expone en la ecuación 42.

$$[\theta, \phi] = \mathbf{V} \cdot \mathbf{R} = \left(\chi' - \frac{\chi}{M} \cos \alpha, \frac{\chi}{M} \sin \alpha \right) \cdot \begin{pmatrix} -\sin \beta & \cos \beta \\ \cos \beta & \sin \beta \end{pmatrix} \quad (42)$$

Siendo **V** las coordenadas cartesianas del **máximo** de campo (en función del ángulo de rotación del subreflector α) y **R** la matriz de rotación de nuestro haz principal a través del ángulo β .

Paralelamente, también se puede observar que los puntos (**máximos de campo**) que forman el círculo de la Figura 5.2 presentan ligeras discrepancias respecto de un círculo ideal (representado mediante una línea discontinua). Esto es debido a que la rotación desvía el haz en una trayectoria circular cuyos puntos no coinciden con los del *grid* rectangular (realizado con un muestreo ligeramente inferior a $\frac{\lambda}{2D}$) utilizado en **FEKO** para el cálculo del *FarField*.

Finalmente, en la Figura 5.3 se expone la representación tridimensional de la Figura 5.2, es decir, la rotación del haz principal al realizar una rotación completa del **subreflector**.

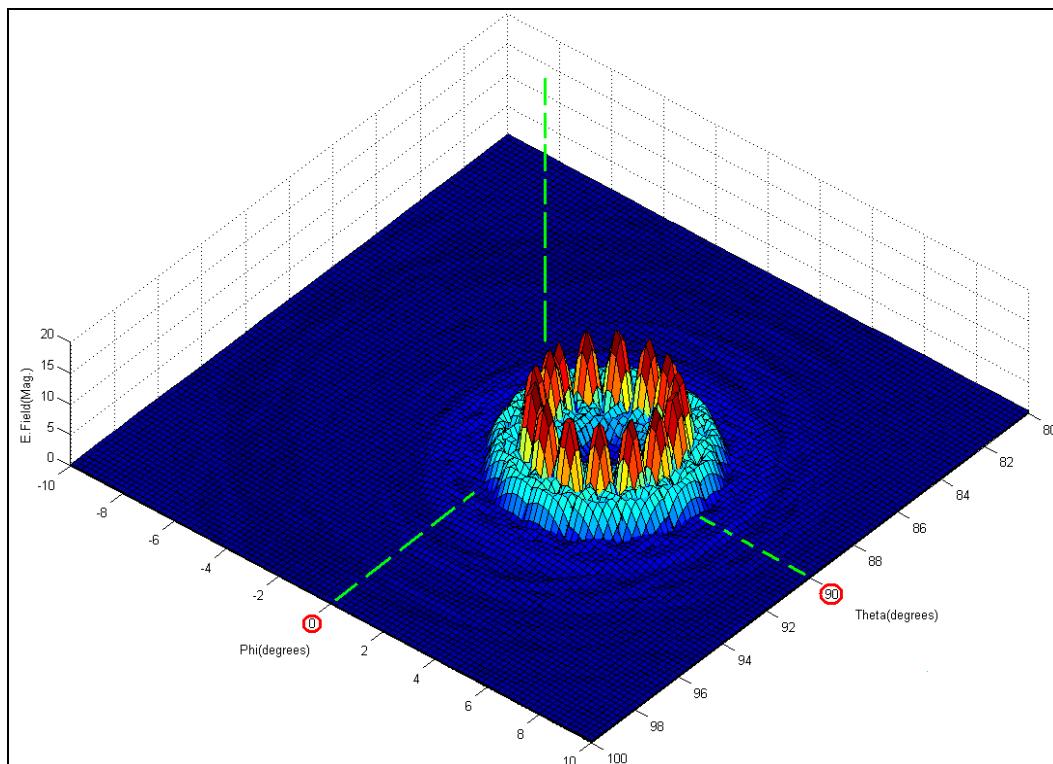


Figura 5.3 Rotación del subreflector (3D)

En segundo término, si simultáneamente se gira el **reflector principal** alrededor de su **eje axial**, el efecto logrado será una **rotación** alrededor del centro del sistema de la circunferencia originada al girar el **subreflector**, como se ilustra en la Figura 5.4 (realizada con los mismos ángulos de inclinación χ y ψ que la Figura 5.2 y los ángulos de rotación del reflector principal y del subreflector espaciados en intervalos de 25°).

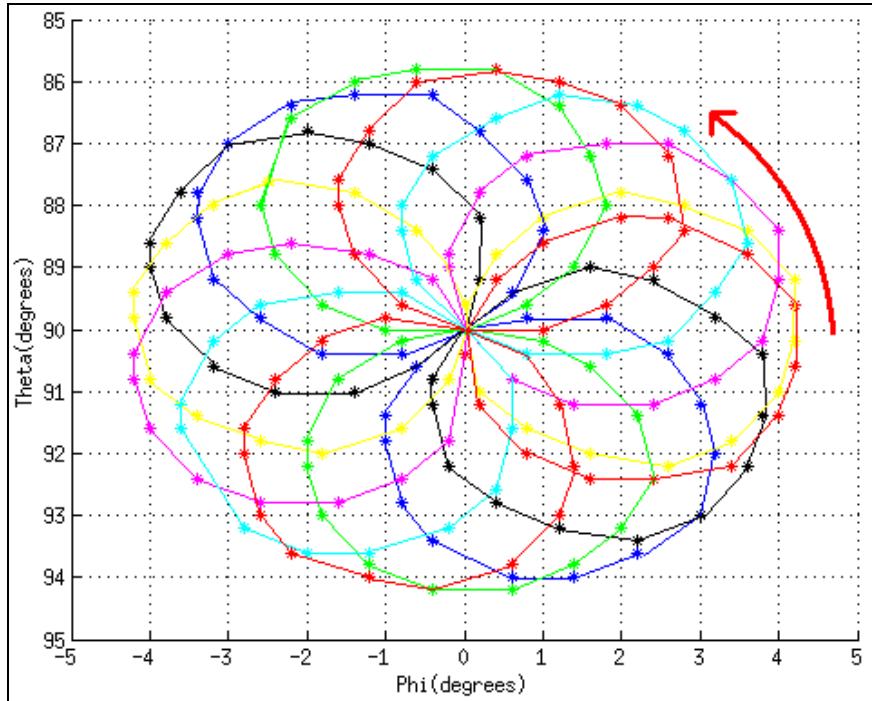


Figura 5.4 Rotación del reflector principal y del subreflector (azimut)

Como se puede observar, por cada ángulo que rota el **reflector principal** (β), el subreflector realiza un giro completo de 360° (representado en la Figura 5.4 mediante círculos de diferentes colores). Por otro lado, de acuerdo con la ecuación 42, en este caso el **rango máximo** que se podrá abarcar será de -4.2° hasta $+4.2^\circ$ en **azimut** y de 85.8° hasta 94.2° en **elevación**.

Finalmente, es importante remarcar que este proceso acabado de exponer es válido para ángulos χ comprendidos entre aproximadamente -30° y $+30^\circ$, tanto en θ como en ϕ . Esto es debido a que, para ángulos mayores, la rotación del **subreflector** alrededor de su **eje axial** provoca unos lóbulos secundarios muy elevados.

En estas circunstancias, este hecho limitará el **rango máximo** de escaneado aproximadamente de -40° hasta $+40^\circ$ en **azimut** y de 50° hasta 130° en **elevación**.

5.2 Formación de la imagen

En base al principio de funcionamiento de los “*Spinning Reflectors*”, a lo largo de este apartado se expondrán los principales conceptos (p.ej. el contraste) y técnicas utilizadas en el proceso de creación de las imágenes.

5.2.1 Simulación de la “*Point Spread Function*”

En un sistema **lineal** e **incoherente** (se cumple el **principio de superposición**), la imagen de un cierto objeto puede expresarse matemáticamente como en la ecuación 43.

$$g(\theta, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) h(\theta - \alpha, \varphi - \beta) d\alpha d\beta + \eta(\theta, \varphi) \quad (43)$$

Donde $\eta(\theta, \varphi)$ es el **ruido aditivo** (en nuestro caso no se tendrá en consideración), $f(\alpha, \beta)$ el **objeto**, $g(\theta, \varphi)$ la **imagen** y $h(\theta - \alpha, \varphi - \beta)$ la **Point Spread Function (PSF)**. [2]

La **PSF** describe la respuesta de un sistema (*imaging system*) a una fuente puntual y es análoga a su **respuesta impulsional**. En nuestro caso, no se considera **invariante** (respecto de los ángulos de rotación) y el grado de dispersión en la imagen de este objeto puntual es una medida de la calidad del sistema. [\[2\]](#)

El resultado de la **convolución** expuesta en la ecuación 43 es una imagen **borrosa** del objeto, como se ilustra en la Figura 5.5.

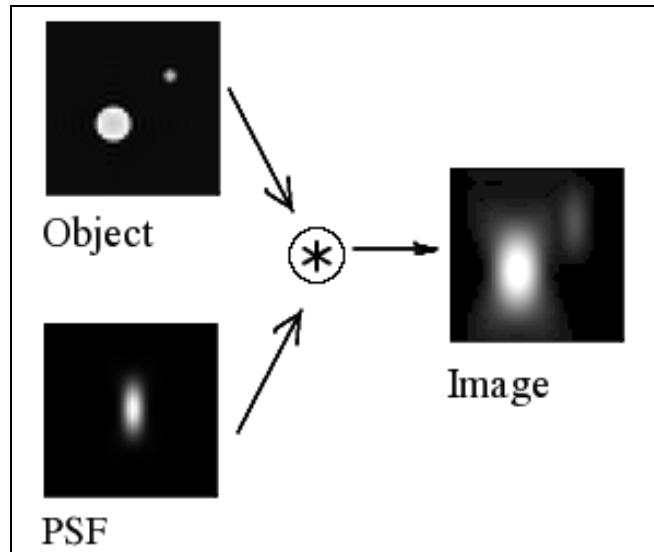


Figura 5.5 Formación de una imagen mediante la PSF[\[1\]](#)

Por otro lado, mientras que la **PSF** expresa el rendimiento del sistema en el dominio espacial, la *Modulation Transfer Function* (**MTF**) lo realiza en el dominio frecuencial. Matemáticamente, se puede formular como la **Transformada de Fourier** de la **PSF** o bien como el módulo de la *Optical Transfer Function* (respuesta frecuencial del sistema **normalizada**). [\[3\]](#)

Habitualmente, la **PSF** es muy utilizada en el proceso de **restauración** de una imagen (mediante la **convolución inversa**) que ha sido degradada debido a limitaciones del sistema, posibles distorsiones, etc...

En segundo término, puesto que nuestro sistema está limitado por la **difracción** (su capacidad de detalle es finita), la **PSF** de nuestro sistema se podrá describir aproximadamente como un *Airy Disk*.

Este concepto se deriva de la difracción (denominada **de Fraunhofer** o **de campo lejano**) de una onda plana a través de una **abertura circular** y puede expresarse matemáticamente según la **Transformada de Fourier** del campo en dicha abertura, tal y como se muestra en la ecuación 44. [\[4\]](#)

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin\theta} \right)^2 \quad (44)$$

Siendo $J_1(x)$ la función de Bessel de primera especie y primer orden, λ la longitud de onda y $a = D/2$ el radio de la abertura. Dicho esto, en la Figura 5.6 se ilustra un *Airy Disk* (en **dB's**) realizado a partir de la ecuación 44.

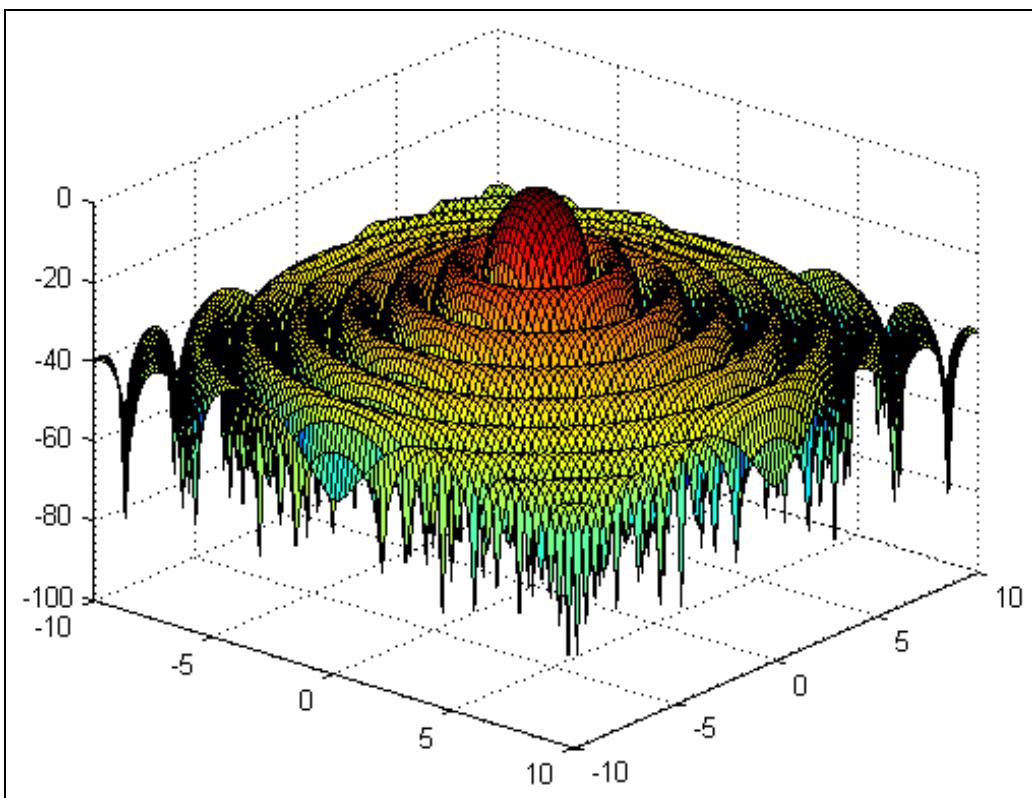


Figura 5.6 Airy Disk (normalizado)

Dependiendo de la **apertura numérica**⁷ del sistema, el tamaño del *Airy Disk* será variable (siendo más estrecho para aperturas numéricas más elevadas).

Por otro lado, de acuerdo con el **criterio de Rayleigh**, la expresión para los primeros nulos puede formularse como se expone en la ecuación 45. [5]

$$\boxed{\text{sen}\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \text{ rad}} \quad (45)$$

Es importante destacar que esta ecuación está directamente relacionada con la **resolución** de una imagen.

Asimismo, siguiendo el procedimiento expuesto en la ecuación 43, si utilizamos el anterior *Airy Disk* como **PSF**, el resultado expuesto en la Figura 5.8 es la imagen **borrosa** del objeto representado en la Figura 5.7.

⁷ Apertura numérica: Producto entre el índice de refracción **n** del medio que separa un objeto y un espejo y el seno del ángulo mitad **γ** de aceptación máximo. Su cuadrado es directamente proporcional al brillo de una imagen.

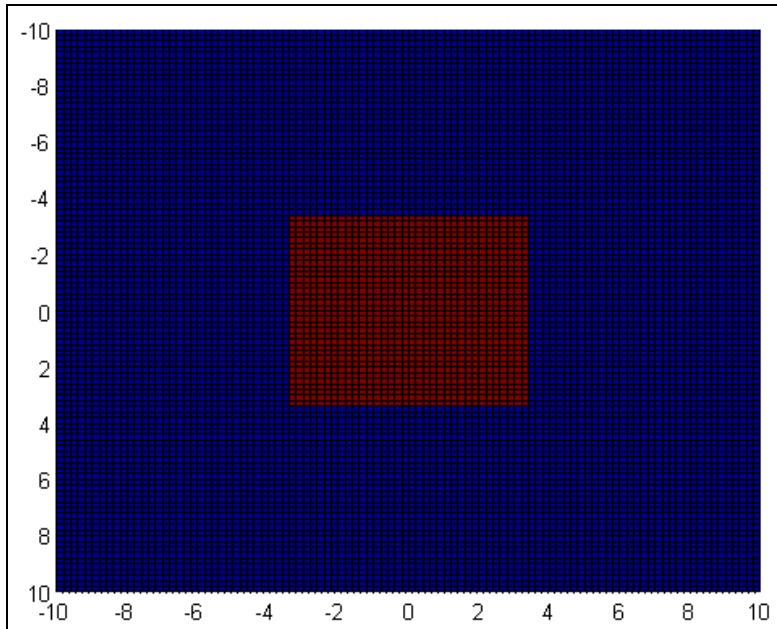


Figura 5.7 Objeto (rectángulo)

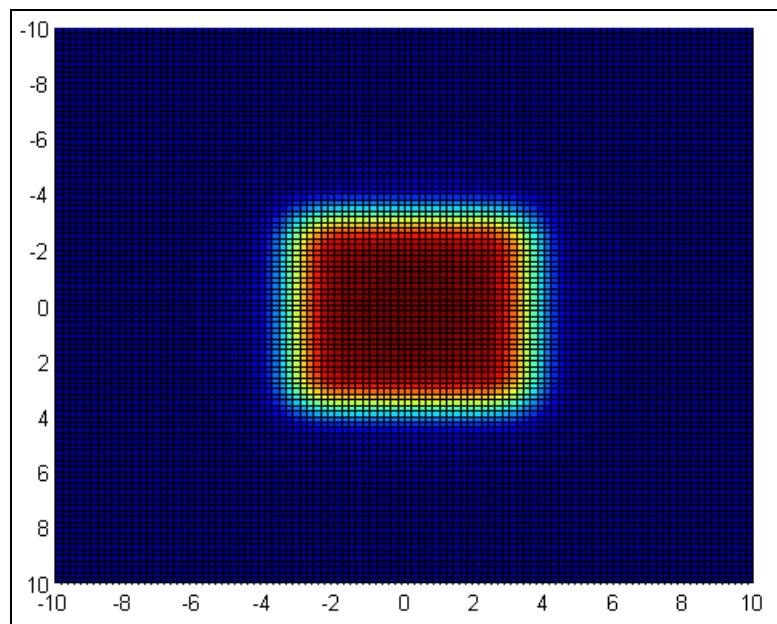


Figura 5.8 Imagen creada mediante la convolución del objeto y la PSF

5.2.2 Representación de un objeto arbitrario

A fin de obtener la **imagen** de un determinado objeto, deberemos convolucionar el objeto (temperatura en nuestro caso) con el módulo al cuadrado del **campo electromagnético** que corresponda a unos determinados ángulos de **rotación** de ambos reflectores. Matemáticamente, se puede expresar como en la ecuación 46.

$$D(\alpha, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |P_{\alpha, \beta}(\theta, \varphi)|^2 \cdot T(\theta, \varphi) d\theta d\varphi \quad (46)$$

Donde $D(\alpha, \beta)$ es la **intensidad** recibida a la salida del **detector** de nuestro sistema en función de los ángulos de rotación α y β .

A continuación, a fin de obtener la representación de la imagen a partir de $D(\alpha, \beta)$, deberemos realizar el *mapping* entre los ángulos de **rotación** de los reflectores α y β y los ángulos θ y ϕ descrito en la ecuación 42.

Dicho esto, al efectuar una rotación completa del **subreflector** (realizada con una inclinación inicial de los **reflectores** de $\chi = 2 \cdot M$ y $\psi = \frac{2}{1.23 \cdot M}$ en **azimut** y un ángulo α espaciado en intervalos de 10°) sobre una distribución de temperatura rectangular (objeto), como se muestra en la Figura 5.9

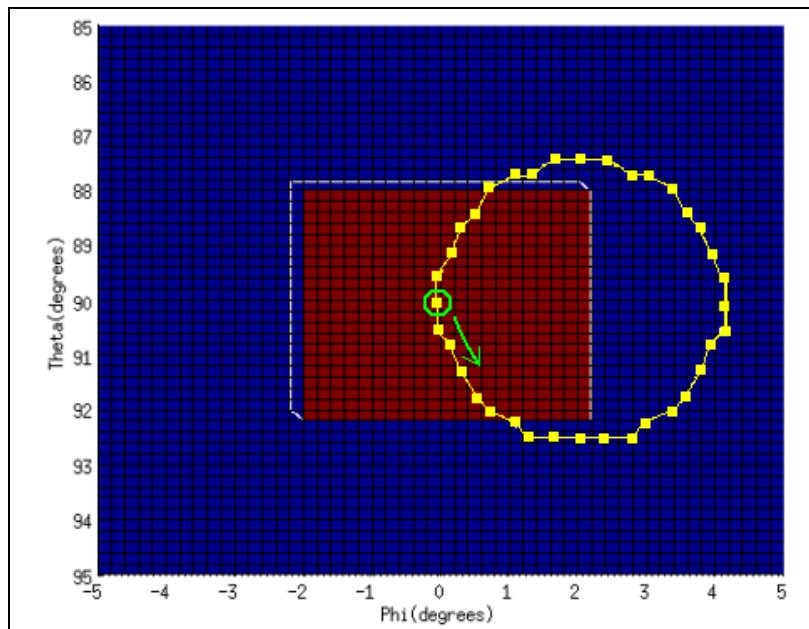


Figura 5.9 Objeto (rectángulo) II

obtendremos, de acuerdo con la ecuación 46, una sucesión de distintos valores de $D(\alpha, \beta)$ por cada ángulo de rotación, tal y como se ilustra en la representación “temporal” de la Figura 5.10.

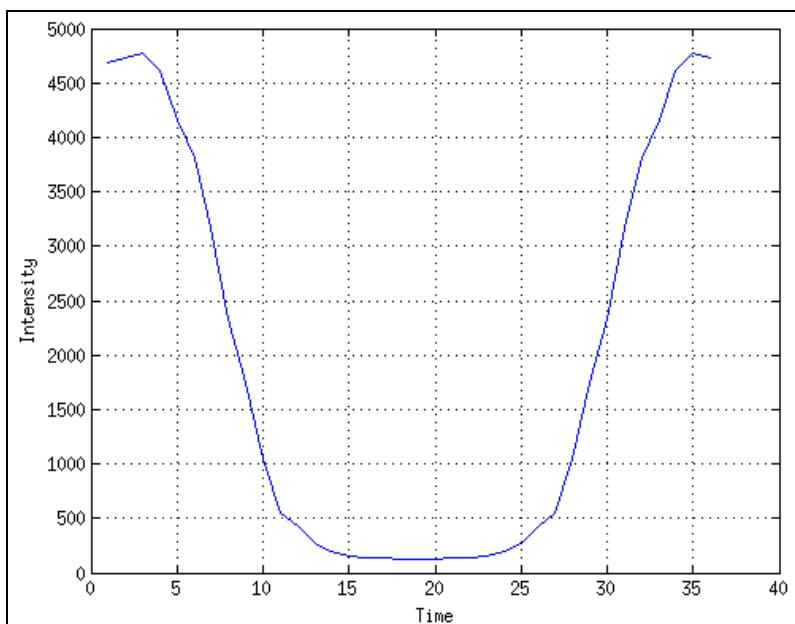


Figura 5.10 Intensidad recibida con una rotación completa del subreflector

Como se puede comprobar, el ángulo de rotación α se incrementa sucesivamente en 10° por cada “instante de tiempo” (estando cada uno de estos instantes asociado con la intensidad de un punto de la imagen).

En este caso, debido a que el objeto está situado en el centro del sistema y difiere claramente del fondo, al realizar la rotación del subreflector alrededor de su **eje axial**, para ángulos α próximos a 0° la intensidad de los píxeles es **elevada**, mientras que para el resto la intensidad de los píxeles es **menor**.

Finalmente, si realizamos una rotación completa de ambos reflectores y posteriormente el *mapping* descrito por la ecuación 42, podremos obtener la imagen correspondiente al anterior objeto, tal y como se ilustra en la Figura 5.11.

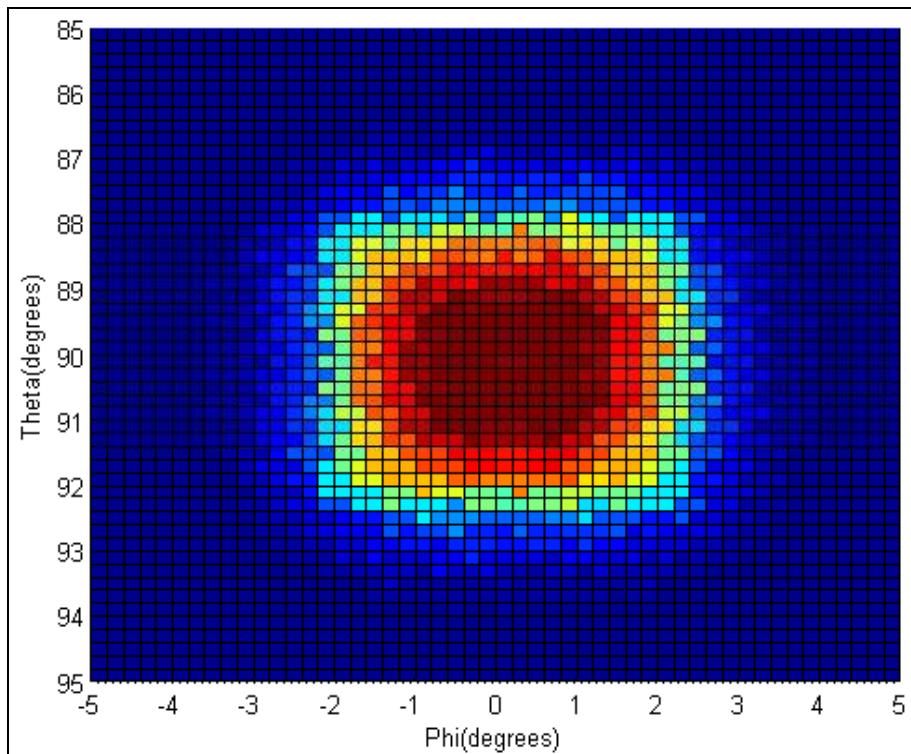


Figura 5.11 Imagen creada mediante la convolución

En nuestro caso, al realizar la rotación de ambos reflectores con los ángulos α y β a intervalos **uniformemente** espaciados, no podremos calcular todos los diagramas de radiación necesarios, por lo que tendremos que aproximar el resto a partir de los ya calculados a fin de hallar los puntos de la imagen de los que carecemos.

Este hecho repercutirá en la imagen creada con una leve distorsión, como se puede comprobar en la Figura 5.11.

Por otro lado, esta imagen presenta un **contraste** bastante elevado y, como según la ecuación 45, la **resolución** de nuestro sistema es de **0.744°/píxel**, su tamaño resultante será de **11 x 11 píxeles**.

En último término, a fin de estudiar la calidad de nuestro sistema, realizaremos la imagen utilizando esta misma metodología cuando el objeto es prácticamente una **función impulsional**, como se muestra en la Figura 5.12.

De este modo, obtendremos la **PSF** de nuestro sistema, tal y como se ilustra en la Figura 5.13.

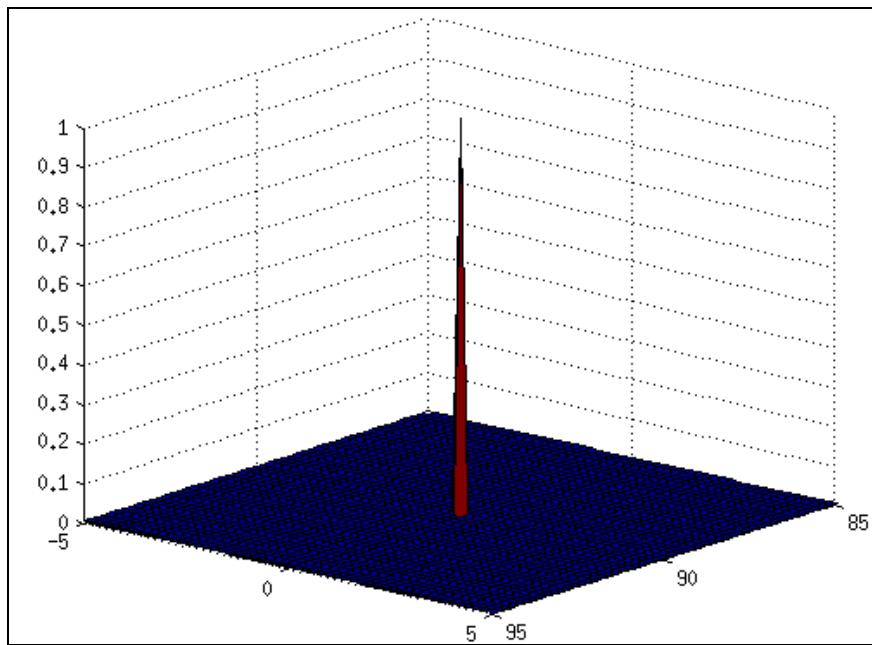


Figura 5.12 Función impulsional (normalizada)

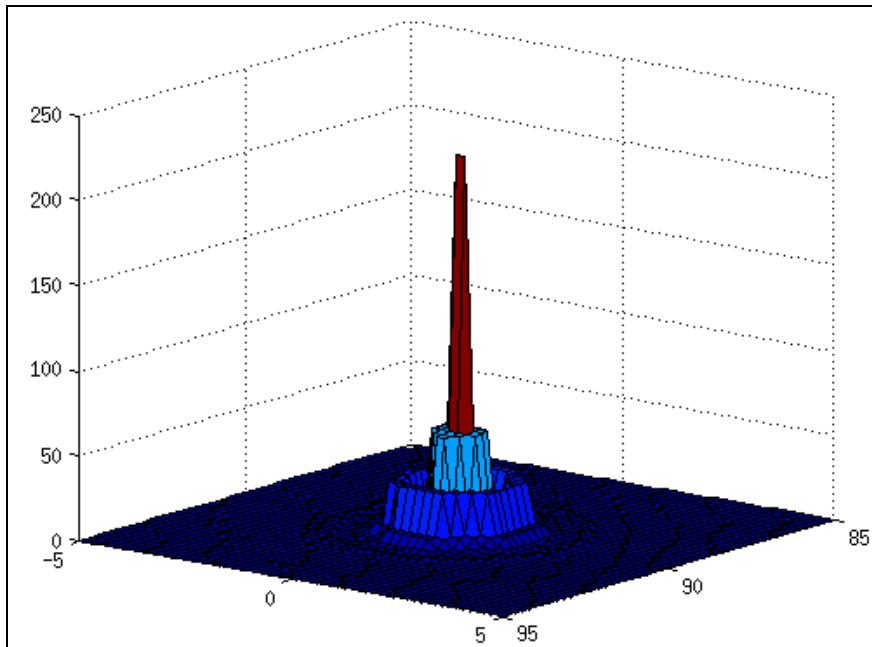


Figura 5.13 Point Spread Function (PSF)

Como se puede comprobar, la **PSF** es bastante estrecha, lo que significa que nuestro sistema es capaz de hacer corresponder casi exactamente un punto del objeto con un punto de la imagen.

5.2.3 Cálculo del contraste en un ambiente exterior

Como ya se ha explicado en el subapartado 3.3.4, el **contraste** es la diferencia entre la iluminación máxima y mínima de una imagen y, dependiendo de la situación, puede calcularse de diferentes maneras.

Para el caso de escenarios en los que las zonas oscuras y luminosas ocupan áreas similares, el contraste se denomina **de Michelson** y puede expresarse como en la ecuación 47. [\[6\]](#)

$$C_M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (47)$$

Donde L_{\max} y L_{\min} son las intensidades de brillo (**luminancia**) máxima y mínima, respectivamente.

Del mismo modo, gráficamente también podemos determinar dicho contraste mediante el **espectro** de la intensidad de la imagen. [\[4\]](#)

Sin embargo, en algunas situaciones utilizar esta definición puede ser inapropiado, ya que uno o dos puntos extremadamente brillantes u oscuros pueden establecer el contraste de toda la imagen [\[6\]](#). Por este motivo, la manera más usual de medir el contraste de una imagen es mediante el cálculo del contraste **Root Mean Square (RMS)**, tal y como se muestra en la ecuación 48.

$$C_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M (L_{ij} - \bar{L})^2} \quad (48)$$

Siendo L_{ij} la **luminancia** del elemento **(i,j)** de una imagen de tamaño **M x N** y \bar{L} la **luminancia promedio** de todos los píxeles de dicha imagen.

En último término, puesto que en un ambiente **exterior** la luminancia del objeto será suficientemente más elevada que la del fondo, el contraste será **elevado** (a diferencia de un ambiente **interior**) y, en nuestro caso, al realizar imágenes de un objeto de luminancia uniforme sobre un fondo también uniforme, el contraste podrá formularse a partir de la **fórmula de Weber** expuesta previamente en la ecuación 21. [\[6\]](#)

5.3 Implementación física del diseño

En la Figura 5.14 se muestra la representación esquemática de un modelo real de nuestra cámara de ondas milimétricas.

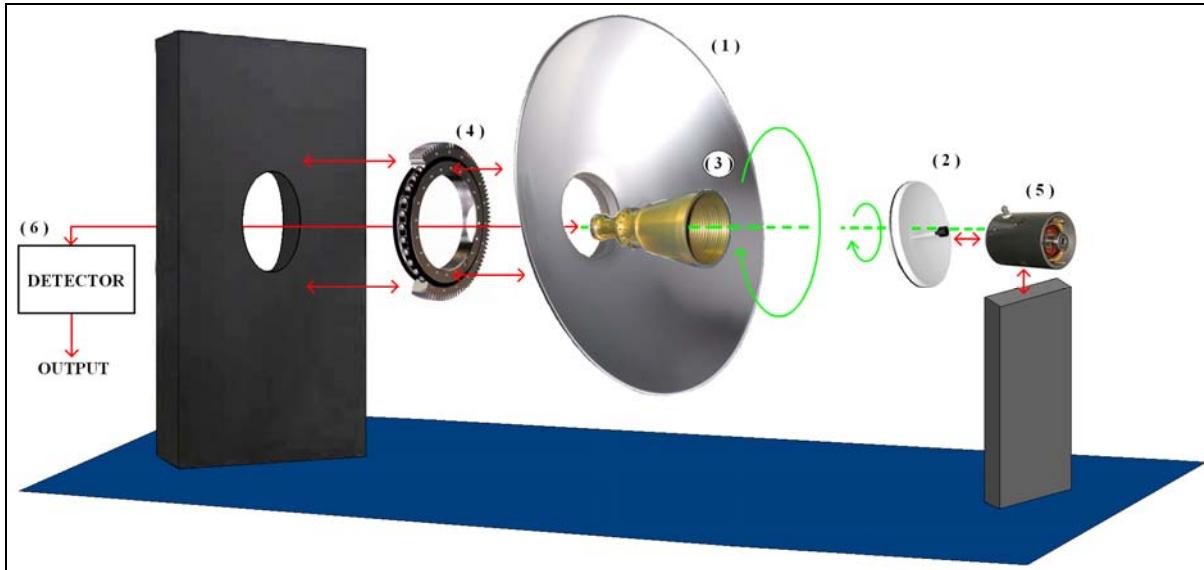


Figura 5.14 Implementación física del diseño

Donde cada uno de los diferentes componentes es:

- (1) & (2) **Reflector Principal y Subreflector:** Reflectores de la antena Cassegrain. Normalmente se construyen con fibra de vidrio (1) o aluminio (2) y su coste de fabricación puede reducirse debido a que las condiciones de trabajo de nuestro sistema no son muy severas.
- (3) **Antena de bocina:** Antena cónica con corrugaciones. De acuerdo con el subapartado 4.1.2, está diseñada para ejercer la función de alimentador primario de la antena Cassegrain.
- (4) **“Ring Bearings”:** Este dispositivo consta de dos anillos concéntricos giratorios. El anillo exterior realiza la sujeción del propio dispositivo en el soporte posterior, mientras que el anillo interior (fijado al reflector principal) se encarga de su rotación girando sobre el otro anillo. [\[7\]](#)
- (5) **Motor giratorio:** Efectúa la rotación del subreflector, al que está conectado [\[8\]](#). La relación entre la velocidad de rotación del reflector principal y la del subreflector se expone en la ecuación 49.

$$\omega_{\text{MR}} = \frac{\omega_{\text{SR}}}{n} \quad (49)$$

Donde ω_{MR} es la velocidad de giro del **reflector principal**, ω_{SR} es la velocidad de giro del **subreflector** y n es un número **natural** y representa el número de rotaciones de 360° que realiza el subreflector por cada vuelta **completa** del reflector principal.

(6) **Detector:** Bloque formado por un *Low-Noise Amplifier (LNA)*, un detector, un amplificador y un integrador, como se muestra en la Figura 5.15. El resultado obtenido a la salida se corresponde con el de la Figura 5.10.

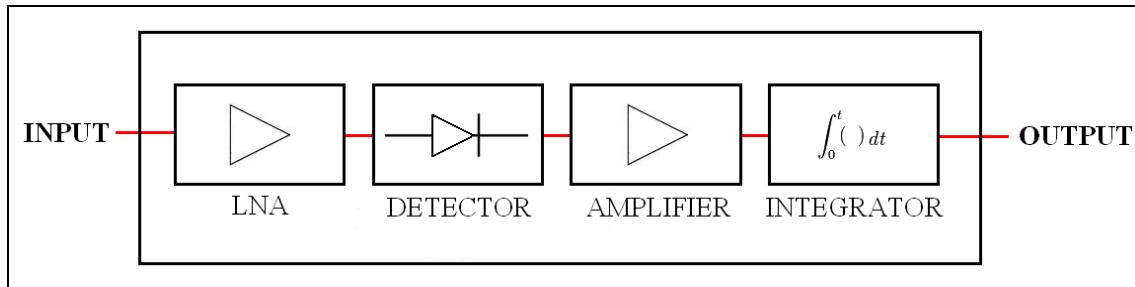


Figura 5.15 Diagrama de bloques del detector

5.4 Bibliografía

Libros y páginas web:

- [1] <http://www.mathworks.com/>
- [2] <http://medim.sth.kth.se/6l2872/F/F9.pdf>
- [3] http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CLASS_573/Kumar_2007/decon_lecture.ppt
- [4] Joseph W. Goodman, “*Introduction to Fourier Optics*”, Ed. McGraw-Hill, 1996.
- [5] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp2.html>
- [6] <http://www.eri.harvard.edu/faculty/peli/papers/ContrastJOSA.pdf>
- [7] http://www.c-wing.cn/product_list.aspx?channelid=3&classid=2
- [8] <http://www.kaffenbarger.com/index.php?categoryID=94>

Imágenes y tablas:

- [I] http://www.rpgroup.caltech.edu/courses/aph162/2010/files/handouts/2010/Point_Spread_Function_Workshop.pdf

6. Conclusiones

El objetivo de este proyecto ha sido, como indica su propio título, modelar una cámara de ondas milimétricas. Para ello, inicialmente se ha diseñado una antena Cassegrain con alimentador primario mediante el programa **FEKO** y posteriormente, de acuerdo con las técnicas de formación de imágenes, se han procesado los diagramas de radiación simulados mediante el *software Matlab* a fin de crear la imagen de diferentes objetos.

En primer término, en cuanto a la configuración de nuestra antena, las propiedades de radiación de nuestro modelo diseñado en **FEKO** no son totalmente adecuadas para nuestros propósitos (p. ej. un *taper* de hasta -5 dB o unos lóbulos secundarios demasiado elevados), hecho que repercutirá en las imágenes obtenidas con una reducción de su **contarse**.

En segundo término, por lo que se refiere a la creación de imágenes, la **PSF** no es muy ancha, lo que indica que nuestra cámara es capaz de representar con bastante exactitud un objeto **puntual**.

Del mismo modo, la imagen obtenida de un objeto rectangular, aunque está ligeramente difuminada debido a que el **ancho de haz a -3 dB** de nuestra antena reflectora es prácticamente del mismo orden que la **resolución** del sistema, se corresponde correctamente con dicho objeto (en tamaño y forma).

Asimismo, puesto que nuestra cámara está limitada a un rango de barrido máximo de **80°** tanto en elevación como en azimut, con la resolución que posee el sistema el tamaño de las imágenes podrá ser, como máximo, de **108 x 108 píxeles**.

Por otro lado, al realizar los ángulos de rotación de ambos reflectores en intervalos **uniformes**, las imágenes obtenidas estarán sujetas a un cierto grado de **distorsión** al tener que aproximar algunos puntos de la imagen que no se poseen.

Puesto que al reducir el intervalo de separación entre ángulos de rotación aumentará el número de simulaciones a ejecutar en **FEKO**, cuanto mayor sea el **detalle** de las imágenes, más se incrementará la duración de dichas simulaciones.

Finalmente, en base a estos resultados, podemos concluir que es **viable** realizar una cámara de ondas milimétricas mediante “*Spinning Reflectors*”, pero a falta de más información sobre otros aspectos del sistema (p. ej. su capacidad de representar diferentes objetos superpuestos) todavía no podemos realizar afirmaciones acerca de la calidad de la imagen o sobre la configuración adecuada para nuestra cámara.

A nivel general, cabe destacar que estas simulaciones nos han permitido efectuar la configuración de nuestra cámara de manera dinámica y flexible. No obstante, hay que tener presente que pueden existir pequeñas discrepancias con respecto a modelos reales debido a que no todos los posibles aspectos del diseño son tomados en consideración.

Dicho esto, a fin de realizar un estudio más exhaustivo, podemos establecer claramente una línea futura de desarrollo y mejora de este proyecto.

Algunas propuestas a considerar incluyen simular un reflector doble *offset* con mejores características eléctricas en **FEKO**, realizar imágenes de diferentes objetos para determinar su calidad o introducir pequeñas imperfecciones en la superficie del reflector para conseguir un modelo más realista.

Esta última idea puede efectuarse mediante el *software* **GiD** [1] de procesado y generación de la geometría y el **mesh**, respectivamente.

Análogamente, también se puede profundizar en la implementación física de nuestro sistema, cuyo esquema básico ya se mostró anteriormente en el apartado 5.3.

A nivel personal, la principal dificultad que se ha presentado a lo largo de este proyecto ha sido familiarizarse con los programas utilizados y entender con exactitud los conceptos relacionados con el diseño de antenas y formación de imágenes. En ambos casos, únicamente ha sido necesario dedicarle suficiente tiempo a estas cuestiones.

Asimismo, esto me ha permitido adquirir una importante experiencia en estos campos, así como profundizar y aprender a desenvolverme con dichos programas.

[1] <http://gid.cimne.upc.es/>

7. Anexos

En este capítulo se expondrán los principales códigos utilizados a lo largo de este proyecto.

7.1 Simulación de una antena Cassegrain mediante EDITFEKO

```

** Common definitions
**
** Frequency, wavelength and segmentation
#freq = 94E9                      ** Frequency in Hertz
#lam = (#c0/#freq)                 ** Wavelength in m
#seg_1 = #lam/12                    ** Maximum wire segment length
#tri_1 = #lam/8                     ** Maximum triangle edge length
#seg_rad = 0.01                     ** Segment radius
#ref_tri = #lam                      ** Allow coarser meshing on the subreflector/reflector
**

** Reflector parameters
#ref_rad = 0.3/2                    ** Radius of the parabolic reflector
#focal = 0.375                      ** Focal distance
#ref_h = (#ref_rad^2) / (4*#focal)  ** Height of the parabolic reflector
**

** Sub-Reflector parameters
#sub_rad = 0.115/2                  ** Radius of the hyperbolic subreflector
#subfocal = 0.175                   ** Focal distance / 2
#depth = 0.002                      ** Depth of the hyperbola
#e = 5                             ** Eccentricity of the hyperbola
#a = #subfocal / #e                 ** Semi-major axis of the hyperbola
#M = (#e + 1) / (#e - 1)           ** Magnification of the hyperbola
**

** Derived parameters
#ref_rim = #focal - #ref_h          ** x-coordinate of the front rim of the reflector
#pole = #subfocal - #a              ** The pole of the hyperbolic border
#border = #pole - #depth           ** Outer border of the hyperboloid section
**

** Create a quarter of the reflector
** First set the reflector/subreflector meshing (keep the segment settings)
IP          #seg_rad #ref_tri #seg_1
** Use label 1 in order to specify the reflector for GO
LA 1
** Define the points -- the reflector face in the negative x-direction
DP R1      -#focal  0  0
DP R2      -#focal/2 0  0
DP R3      -#focal  0  -#ref_rad
DP R4      -#ref_rim 0  -#ref_rad
PB R1 R2 R3 R4  360  #ref_tri
**
** Use label 2 in order to specify the subreflector for GO
LA 2
** Define the points -- the subreflector face in the negative x-direction

```

```

DP A          -#subfocal  0.0  0.0
DP B          -#pole      0.0  0.0
DP C          -#border   -#sub_rad 0.0
HY A B C      360  #ref_tri
**
** Reflector's Axial Translation & Rotation (in this case, 2/(#M*1.23) & 125 respectively)
TG 0 1 1 0 0 0 0 0 #focal
TG: 0 : 1 : 1 : 0 : 0 : 0 : 0 : 2/(#M*1.23)
TG 0 1 1 0 0 0 0 0 -#focal
TG 0 1 1 0 0 125 0 0
** Sub-reflector's Axial Translation & Rotation (in this case, 2/#M & 150 respectively)
TG 0 2 2 0 0 0 0 0 #pole
TG 0 2 2 0 0 0 0 2*#M
TG 0 2 2 0 0 0 0 0 -#pole
TG 0 2 2 0 0 150 0 0
**
** Apply GO to the reflector
UT 2 3 0 0 1 0 1 0.25 0.25
**
** Apply GO to the subreflector
UT 2 3 0 0 1 0 2 0.25 0.25
**
** End of the geometric input
EG 1 0 0 1e-06 1 1 0 0 0 1
**
** The excitation
FR 1 0 #freq
**
** Use the calculated radiation pattern excitation
** Sources
**
AR: 0 : 1 : 1 : 181 : 181 : 1 : 0 : -#subfocal*2 : 0 : 0 : 0 : 90 : 0 : "SFH.ffe"
**
** Calculate the Far field
DA 0 0
OF: 1 : 0 : : : -#subfocal*2 : 0 : 0
FF 1 101 101 0 80 -10 0.2 0.2
**
** End
EN

```

7.2 Macro *WriteFile* programada para el control de FEKO

Sub WriteFile()

```

Dim strFileName As String
Dim i As Integer, k As Integer, r As Integer, m As Integer
Dim mainreft As Integer, subreft As Integer
Dim mainrefr As Integer, subrefr As Integer
strFileName = "C:\Rotation"      'Nombre "raíz" de todas las simulaciones

```



```

Print #1, ActiveCell.Text & CStr(CDbl(Cells(k, 2).Text * subrefr)) & _
CStr("      ") & CStr(CDbl(Cells(k, 3).Text * 0)) & CStr("      ") & _
CStr(CDbl(Cells(k, 4).Text * 0))
Else
    Print #1, ActiveCell.Text
End If
i = i + 1
Wend
Close #1
r = r + 1
Next subrefr
Next mainrefr

End Sub

```

7.3 Cálculo del campo en la apertura de la antena mediante Matlab

```

clear all;
close all;
nRow=441;    %Número de filas del fichero *.out de FEKO
nCol=11;      %Número de columnas del fichero *.out de FEKO
%En la matriz F almacenaremos los datos del fichero *.out de FEKO
F=zeros(nRow,nCol);
%En la matriz R guardaremos los valores del diagrama de radiación
R=zeros(sqrt(nRow),sqrt(nRow));
%Cabecera de inicio de los datos en el fichero *.out de FEKO
strSearchText='VALUES OF THE SCATTERED ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE
FAR FIELD in V';

%Abrimos el fichero 'Rotation1.out' en el directorio correspondiente
fid = fopen('/home/paguila/FEKO1/CASSEGRAIN2/APERTURE/Rotation1.out','r');
    inputText=fgets(fid);
%Leemos las filas del fichero *.out hasta hallar
%la frase de 'strSearchText'
    while (isempty(findstr(inputText,strSearchText)))
        inputText=fgets(fid);
    end
%Nos situamos en el inicio de la tabla de datos del fichero *.out
    for p=0:7
        inputText=fgets(fid);
    end
    p=0;
    InputText=fgets(fid);
%Leemos la tabla hasta que se acaba y almacenamos
%los datos en la matriz F
    while (length(InputText)>113 && ~feof(fid))
        C = textscan(InputText, '%f%f%f%f%f%f%f%f%f');
        for j=1:nCol
            F(p+1,j)=C{1,j};
        end
        p=p+1;
        InputText=fgets(fid);
    end
fclose(fid);    %Cerramos el fichero *.out

```

```

%85 < theta < 95 & -5 < phi < 5
[x,y]=meshgrid(85:0.5:95,-5:0.5:5);
u=1;
  for m=1:sqrt(nRow)
    for p=1:sqrt(nRow)
%Copiamos el diagrama de radiación (complejo) en la matriz R
    R(m,p)=F(u,5)*(cos(F(u,6)*(pi/180))+i*sin(F(u,6)*(pi/180)));
    u=u+1;
  end
end
%Realizamos la Transformada de Fourier del diagrama de radiación
%de la matriz R
aux2=fftshift(R);
aux=fft2(aux2);
aux=fftshift(aux);
%Representamos el módulo del campo en la apertura
surf(x,y,abs(aux));
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(0,90);
%Representamos la fase del campo en la apertura
figure;
surf(x,y,angle(aux));
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(0,90);

```

7.4 Rotación del reflector principal y del subreflector

```

clear all;
close all;
nRow=10201; %Número de filas del fichero *.out de FEKO
nCol=11; %Número de columnas del fichero *.out de FEKO
%Formato de los ficheros de FEKO
farfield = dir('*.*out');
%En la matriz F almacenaremos los datos del fichero *.out de FEKO
F=zeros(nRow,nCol);
%En la matriz stored guardaremos los máximos
%de los diagramas de radiación
stored = zeros(length(farfield),nCol);
%Directorio en el que se halla el fichero *.out de FEKO
strDir='/home/paguila/FEKO1/CASSEGRAIN2/2M';
%Nombre 'raíz' de los ficheros *.out de FEKO
strFilename='Rotation';
%Cabecera de inicio de los datos en el fichero *.out de FEKO
strSearchText='VALUES OF THE SCATTERED ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE
FAR FIELD in V';

%Abrimos los ficheros *.out en el directorio correspondiente
for n = 1 : length(farfield)
  number = num2str(n);
  fid = fopen(strcat(strDir , '/' , strFilename , number , '.out'), 'r');
  inputText=fgets(fid);
%Leemos las filas del fichero *.out hasta hallar
%la frase de 'strSearchText'
  while (isempty(findstr(inputText,strSearchText)))
    inputText=fgets(fid);
  end
%Nos situamos en el inicio de la tabla de datos del fichero *.out

```

```

for i = 0 : 84
    inputText=fgets(fid);
end
i = 0;
InputText=fgets(fid);
%Leemos la tabla hasta que se acaba y almacenamos
%los datos en la matriz F
while (length(InputText)>113 && ~feof(fid))
    C = textscan(InputText, '%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f');
    for j = 1 : nCol
        F(i+1,j)=C{1,j};
    end
    i = i + 1;
    InputText=fgets(fid);
end
%Calculamos el máximo de cada diagrama de radiación
%y buscamos en que posición se halla
aux=max(F,[],1);
for j = 1 : nRow
    if F(j,5) == aux(1,5)
        for i = 1 : nCol
            stored(n,i)=F(j,i);
        end
    end
end
fclose(fid); %Cerramos el fichero *.out
end
%Representamos los máximos de los diferentes diagramas de radiación
for m = 1 : length(farfield)
    plot3(stored(m,1),stored(m,2),stored(m,5),'*')
    hold on;
end
grid on;
view(90,90);
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
zlabel('E.Field(Mag)');

```

7.5 Rotación del subreflector (representación tridimensional)

```

clear all;
close all;
nRow=10201; %Número de filas del fichero *.out de FEKO
nCol=11; %Número de columnas del fichero *.out de FEKO
%Formato de los ficheros de FEKO
farfield = dir('*.out');
%En la matriz F almacenaremos los datos de los ficheros *.out de FEKO
F=zeros(nRow,nCol,length(farfield));
%En la matriz stored almacenaremos el resultado
%de la suma de los diagramas
stored = zeros(nRow,nCol);
%Directorio en el que se halla el fichero *.out de FEKO
strDir='/home/paguila/FEKO1/CASSEGRAIN2/2M';
%Nombre 'raiz' de los ficheros *.out de FEKO
strFilename='Rotation';
%Cabecera de inicio de los datos en el fichero *.out de FEKO
strSearchText='VALUES OF THE SCATTERED ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE
FAR FIELD in V';
%Abrimos los ficheros *.out en el directorio correspondiente
for n = 1 : length(farfield)
    number = num2str(n);

```

```

fid = fopen(strcat(strDir , '/' , strFilename , number , '.out'), 'r');
    inputText=fgets(fid);
%Leemos las filas del fichero *.out hasta hallar
%la frase de 'strSearchText'
    while (isempty(findstr(inputText,strSearchText)))
        inputText=fgets(fid);
    end
%Nos situamos en el inicio de la tabla de datos del fichero *.out
    for i = 0 : 84
        inputText=fgets(fid);
    end
    i = 0;
    InputText=fgets(fid);
%Leemos la tabla hasta que se acaba y almacenamos
%los datos en la matriz F
    while (length(InputText)>113 && ~feof(fid))
        C = textscan(InputText, '%f%f%f%f%f%f%f%f%f');
        for j = 1 : nCol
            F(i+1,j,n)=C{1,j};
        end
        i = i + 1;
        InputText=fgets(fid);
    end
    fclose(fid); %Cerramos el fichero *.out
end
%Sumamos los diferentes diagramas
%y almacenamos los ejes de representación
for n = 1 : length(farfield)
    for j = 3 : nCol
        for m = 1 : nRow
            stored(m,1)=F(m,1,1);
            stored(m,2)=F(m,2,1);
            stored(m,j)=F(m,j,n);
        end
    end
%Copiamos el diagrama 'n' y los ejes
%en las matrices cuadradas H, x e y respectivamente
    u=1;
    for m=1:sqrt(nRow)
        for p=1:sqrt(nRow)
            H(m,p)=stored(u,5);
            x(m,p)=stored(u,1);
            y(m,p)=stored(u,2);
            u=u+1;
        end
    end
%Representamos el diagrama 'n'
    surf(x,y,H);
    grid on;
    xlabel('Theta(degrees)');
    ylabel('Phi(degrees)');
    zlabel('E.Field(Mag.)');
    view(90,90);
end

```

7.6 Simulación de un “Airy Disk” y formación de una imagen

```

clear all;
close all;
D=0.3; %Diámetro de la abertura
x=150; %Distancia entre el objeto y la abertura

```

```

Io=1; %'Airy Disk' normalizado
f=94e9; %Frecuencia de trabajo
c=299792458.0;
wl=c/f; %Longitud de onda
N=101; %Número de muestras
M=2*N-1;
AD = zeros(N,N); %En esta matriz generaremos nuestro 'Airy Disk'
%En esta matriz generaremos nuestro objeto (rectángulo)
RECT = zeros(N,N);

%-10 < theta < 10 & -10 < phi < 10
[phi,theta] = meshgrid(-10:.2:10,-10:.2:10);
%Realizamos el 'Airy Disk' a partir de la ecuación 45 del capítulo 5
aux1=1;
for z = -10 : .2 : 10
    aux2=1;
    for y = -10 : .2 : 10
        if (z == 0) && (y == 0) %Evitamos la indeterminación 0/0
            AD(aux1,aux2) = 1;
        else
            AD(aux1,aux2) = (2*besselj(1,((pi*D*sqrt((z)^2+(y)^2)))/(wl*x)))/
            (((pi*D*sqrt((z)^2+(y)^2))/(wl*x)));
        end
        AD(aux1,aux2) = Io*(AD(aux1,aux2)^2);
        aux2=aux2+1;
    end
    aux1=aux1+1;
end
%Representamos el 'Airy Disk' tridimensionalmente
surf(theta,phi,10*log10(AD));
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(40,30);
%Realizamos el objeto (rectángulo)
for i = 1 : N
    for j = 1 : N
        if (i>N/3 && i<(2*N/3)) && (j>N/3 && j<(2*N/3))
            RECT(i,j)=1;
        end
    end
end
%Representamos el objeto (rectángulo)
figure;
surf(theta,phi,RECT);
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(90,90);
%Formamos la imagen convolucionando el 'Airy Disk' (PSF) con el objeto
C=conv2(AD,RECT);
C2=C((M-N)/2:3*(M-N)/2, (M-N)/2:3*(M-N)/2);
%Representamos la imagen
figure;
surf(theta,phi,C2);
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(90,90);

```

7.7 Creación de una imagen y de la PSF mediante la convolución

```

clear all;
close all;
%Diretorio en el que se halla el fichero *.out de FEKO
strDir='/home/paguila/FEKO1/CASSEGRAIN2/ROT_ALL';
%Nombre 'raíz' de los ficheros *.out de FEKO
strFilename = 'Rotation';
%Formato de los ficheros de FEKO
farfield = dir('*.out');
nRow=10201; %Número de filas del fichero *.out de FEKO
nCol=11; %Número de columnas del fichero *.out de FEKO
var = 0;
aux= 0;
aug = 0;
N =(sqrt(nRow)+1)/2; %N = 51
%En la matriz F almacenaremos los datos de los ficheros *.out de FEKO
F = zeros(nRow,nCol,length(farfield));
%En la matriz H guardaremos los valores de los diagramas de radiación
H = zeros(sqrt(nRow),sqrt(nRow),length(farfield));
x=zeros(N,N); %Eje x
y=zeros(N,N); %Eje y
%En la matriz RECT almacenaremos el objeto (rectángulo)
RECT=zeros(nRow,nCol);
%Matriz de índices (referencia para hallar
%los diagramas que nos faltan)
KEY = zeros(N,N);
%En la matriz stored guardaremos los máximos
%de los diagramas de radiación
stored = zeros(length(farfield),nCol);
%Almacenamos el objeto en la matriz cuadrada W
W=zeros(sqrt(nRow),sqrt(nRow));
%En la matriz I almacenaremos la imagen
I=zeros(N,N);
%Posición (x,y) de los máximos de los diagramas de radiación
PHASE = zeros(length(farfield),2);
%Cabecera de inicio de los datos en el fichero *.out de FEKO
strSearchText = 'VALUES OF THE SCATTERED ELECTRIC FIELD STRENGTH IN
THE FAR FIELD in V';
%Abrimos los ficheros *.out en el directorio correspondiente
for n = 1 : length(farfield)
    number = num2str(n);
    fid = fopen(strcat(strDir , '/' , strFilename , number , '.out'), 'r');
    inputText=fgets(fid);
    %Leemos las filas del fichero *.out hasta hallar
    %la frase de 'strSearchText'
    while (isempty(findstr(inputText,strSearchText)))
        inputText=fgets(fid);
    end
    %Nos situamos en el inicio de la tabla de datos del fichero *.out
    for m = 0 : 84
        inputText=fgets(fid);
    end
    m = 0;
    InputText=fgets(fid);
    %Leemos la tabla hasta que se acaba y almacenamos
    %los datos en la matriz F
    while (length(InputText)>113 & ~feof(fid))
        C = textscan(InputText, '%f%f%f%f%f%f%f%f%f');
        for j = 1 : nCol
            F(m+1,j,n)=C{1,j};
        end
    end
end

```

```

        end
        m = m + 1;
        InputText=fgets(fid);
    end
    fclose(fid);      %Cerramos el fichero *.out
end
%Calculamos el máximo de cada diagrama de radiación
%y buscamos en que posición se halla
aux=max(F,[],1);
for n = 1 : length(farfield)
    for j = 1 : nRow
        if F(j,5,n) == aux(1,5,n)
            for m = 1 : nCol
                stored(n,m)=F(j,m,n);
            end
        end
    end
end
%Copiamos el diagrama de radiación (complejo) en la matriz H y los
%ejes en las matrices cuadradas x e y respectivamente
for n = 1 : length(farfield)
u=1;
    for m=1:sqrt(nRow)
        for p=1:sqrt(nRow)
H(m,p,n)=(abs(F(u,5,n)*(cos(F(u,6,n)*(pi/180))+i*sin(F(u,6,n)*(pi/180)))))^2;
            u=u+1;
        end
    end
end
theta = (85:.2:95); %85 < theta < 95
phi = (-5:.2:5);    %-5 < phi < 5
%Mapping ángulos theta/phi - posiciones x/y
for n = 1 : length(farfield)
    for m = 1 : N
        if abs(stored(n,1)-theta(1,m))<(10^(-14))
            PHASE(n,1)=m;
        end
        if abs(stored(n,2)-phi(1,m))<(10^(-14))
            PHASE(n,2)=m;
        end
    end
end
%Almacenamos en la matriz de índices KEY los máximos de los diagramas
%de radiación que ya poseemos (sin repeticiones)
for n = 1 : length(farfield)
    if n>1
        for h = 1 : n-1
            if (PHASE(h,1) == PHASE(n,1)) && (PHASE(h,2) == PHASE(n,2))
                var = 1;
            end
        end
    end
    if var == 0
        KEY(PHASE(n,1),PHASE(n,2))=n;
        aug = aug + 1;
    end
    var = 0;
end
%Para 'llenar' la matriz KEY utilizaremos el siguiente algoritmo
%(basado en "distancias"). Calcularemos la distancia de una posición
%concreta de la matriz KEY con los diagramas que ya poseemos.

```

```

%El índice que corresponderá a dicha posición será el del diagrama con
%el que tenga la menor distancia
u=1;
A=zeros(1,aug);
B=zeros(1,aug);
C=zeros(1,aug);
for s = 1 : N
    for j = 1 : N
        if KEY(s,j) ~=0
            A(1,u)=KEY(s,j);      %Índice correspondiente matriz KEY
            B(1,u)=s;            %Componente x del índice de la KEY
            C(1,u)=j;            %Componente y del índice de la KEY
            u=u+1;
        end
    end
end

DIST = zeros(1,aug);
for s = 1 : N
    for j = 1 : N
        if KEY(s,j) == 0
            for n = 1 : length(A)
                DIST(1,n)=sqrt((B(1,n)-s)^2+(C(1,n)-j)^2);
            end
            aux = min(DIST);
            k = 1;
            while (DIST(1,k) ~= aux)
                k = k + 1;
            end
            KEY(s,j) = A(1,k);
        end
    end
end
%Generamos el objeto (rectángulo)
for m = 1 : nRow
    RECT(m,1)=F(m,1,1);
    RECT(m,2)=F(m,2,1);
    if RECT(m,2)>=-2 && RECT(m,2)<=2 % -2° < RECT < 2° (φ)
        if RECT(m,1)>=88 && RECT(m,1)<=92 % 88° < RECT < 92° (θ)
            RECT(m,3)=1;
        end
    end
end
%Copiamos el objeto en la matriz cuadrada W
u=1;
for m=1:sqrt(nRow)
    for p=1:sqrt(nRow)
        W(m,p)=RECT(u,3);
        u=u+1;
    end
end
%85 < theta < 95 & -5 < phi < 5
[x,y]=meshgrid(85:0.2:95,-5:0.2:5);
W2=W(((N-1)/2)+1:(3*(N-1)/2)+1,((N-1)/2)+1:(3*(N-1)/2)+1);
%Representamos el objeto
surf(x,y,W2);
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(90,90);

```

```

%Generamos la imagen mediante la convolución "manual" del objeto y el
%diagrama de radiación correspondiente
for s = 1 : N
    for j = 1 : N
        c=KEY(s,j);
        aux2=W.*H(:,:,c);
        I(s,j)=sum(sum(aux2));
    end
end
%Representamos la imagen
figure;
surf(x,y,I);
grid on;
xlabel('Theta(degrees)');
ylabel('Phi(degrees)');
view(90,90);
%Almacenamos en el vector T la salida del detector
T=zeros(1,length(farfield));
for n = 1 : length(farfield)
    DET=W.*H(:,:,n);
    T(1,n)=sum(sum(DET));
end
%Representamos la salida del detector
R = (1:1:length(farfield));
figure;
plot(R,T);
grid on;
xlabel('Time');
ylabel('Intensity');

```

Este código realiza la imagen de un objeto, concretamente de un rectángulo. Para formar la imagen de la **PSF** deberemos cambiar el objeto por una **función impulsional**, tal y como se expone a continuación:

```

IMF=zeros(nRow,nCol);
%Formación de la Función Impulsional (normalizada)
for m = 1 : nRow
    IMF(m,1)=F(m,1,1);
    IMF(m,2)=F(m,2,1);
    if IMF(m,2)==0 && IMF(m,1)==90      %Centro del sistema
        IMF(m,3)=1;
    end
end

```

Resum:

En aquest projecte s'ha dissenyat i simulat una càmera d'ones mil·limètriques mitjançant "Spinning Reflectors" amb l'objectiu d'estudiar la qualitat de les imatges obtingudes, així com determinar la configuració de reflectors acceptable per a la nostra càmera.

Per al seu disseny, s'ha realitzat el model d'una antena Cassegrain amb botzina alimentadora a **FEKO** i s'han simulat els diagrames de radiació corresponents als diferents angles de rotació d'ambdós reflectors al voltant de l'eix en el qual estan situats.

Finalment, a partir del principi de funcionament de la nostra càmera, s'ha exposat la seva implementació física i s'ha representat en **Matlab** la seva **PSF** (Point Spread Function) i la imatge d'un objecte arbitrari d'acord amb les tècniques de formació d'imatges.

Resumen:

En este proyecto se ha diseñado y simulado una cámara de ondas milimétricas mediante "Spinning Reflectors" con el objetivo de estudiar la calidad de las imágenes obtenidas, así como determinar la configuración de reflectores aceptable para nuestra cámara.

Para su diseño, se ha realizado el modelo de una antena Cassegrain con bocina alimentadora en **FEKO** y se han simulado los diagramas de radiación correspondientes a los diferentes ángulos de rotación de ambos reflectores alrededor del eje en el que están situados.

Finalmente, a partir del principio de funcionamiento de nuestra cámara, se ha expuesto su implementación física y se ha representado en **Matlab** su **PSF** (Point Spread Function) y la imagen de un objeto arbitrario de acuerdo con las técnicas de formación de imágenes.

Summary:

In this project we have designed and simulated a millimeter wave camera using "Spinning Reflectors" in order to study the quality of the images and to determine the acceptable configuration of reflectors to our camera.

For his design, we have performed a model of a Cassegrain antenna with horn feed in **FEKO**, and we have simulated the radiation patterns corresponding to the different angles of rotation of the two reflectors around the axis on which they are located.

Finally, agree with the operating principle of our camera, we have exposed her physical implementation and we have represented in **Matlab** her **PSF** (Point Spread Function) and the image of an arbitrary object in accordance with the imaging techniques.