

## CONTROL DE LAS SUPERFICIES REFLECTORAS POR MÉTODO HOLOGRÁFICO

Un sistema reflector que concentra la energía en el foco tiene varios compromisos. Uno de los más importantes es conseguir la mayor concentración de energía en el menor espacio posible.

La limitación física insalvable está dada por el tamaño no nulo de la Longitud de Onda de la radiación colectada. Un sistema concentrador de radiación teóricamente perfecto se dice que está limitado por "difracción" pues ese es el nombre de la "mancha" que se produce en el foco de un sistema óptico cuando, por ejemplo, se apunta a una estrella.

En la práctica, sin embargo, errores en la construcción de los elementos usados para concentrar la radiación provocan una dispersión adicional de la energía, cuya consecuencia es aumentar el tamaño y, por lo tanto, disminuir la intensidad superficial de radiación de la mancha de difracción resultante. En caso de un telescopio (óptico o de radio) la consecuencia es un perjuicio en el poder resolutivo (poder de discernir detalles en los objetos observados) y también una disminución en el alcance, o magnitud límite (óptica).

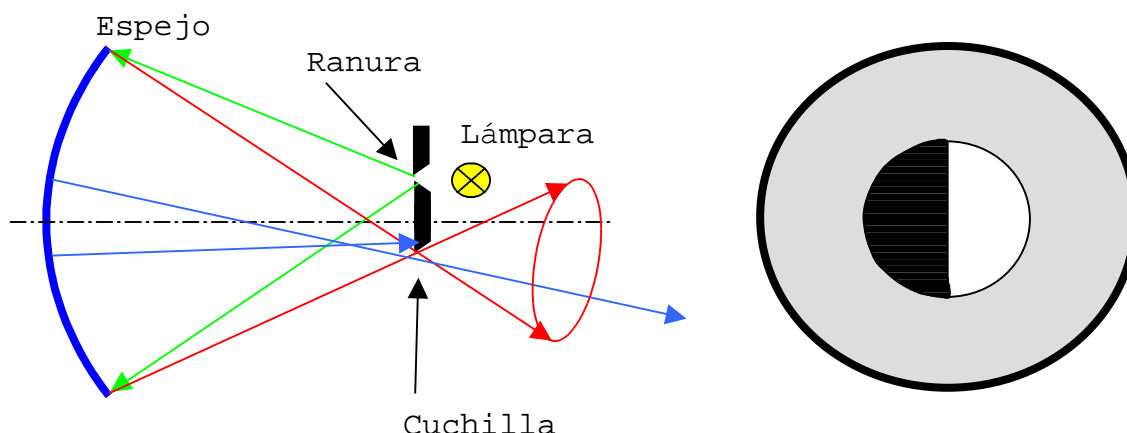
En el caso de los telescopios ópticos, por ejemplo en el sistema newtoniano, el principal elemento concentrador de la luz es un espejo parabólico. La superficie parabólica es ideal para concentrar en su foco la luz que proviene de un punto luminoso que esté situado a una distancia infinita. El caso más común es el de una estrella, pero no se limita a solo esto. También puede formar correctamente una imagen de un objeto lejano con un tamaño angular relativamente pequeño. El trabajo de la superficie parabólica es crear una *imagen puntual* por cada *punto del objeto* observado. Con esto, cada punto del objeto tendrá su contrapartida en cada punto de la imagen.

Sin embargo, debido a la limitación establecida más arriba, cada punto objeto generará una "mancha de difracción" en el Plano Focal del espejo. El tamaño angular de esta mancha está determinado por la relación existente entre la Longitud de Onda de la radiación usada y el Diámetro del espejo.

En la construcción de los espejos para sistemas ópticos debe existir un Control de Calidad que garantice que toda la

radiación que incide en el espejo desde un punto objeto caiga realmente en el foco.

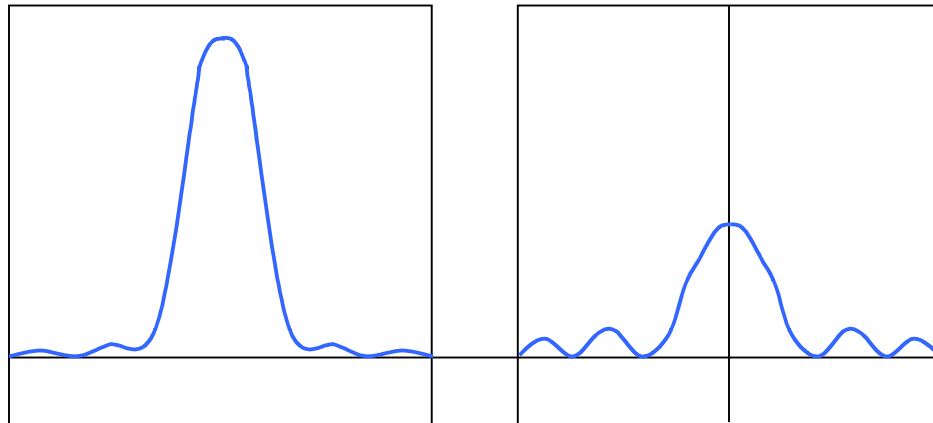
En espejos astronómicos (no fué el caso del telescopio espacial Hubble), uno de los métodos usados en el Control de Calidad es el método de Foucault. Consiste en la medición de los radios de curvatura, supuestos de revolución, de diferentes zonas del espejo, desde el centro de la superficie reflectora, hacia la periferia. Así, por ejemplo, un espejo esférico deberá presentar un radio único, que es el radio de la esfera. Para los casos de otras superficies de revolución (parábolas, hipérbolas, elipses) los radios de curvatura de las diferentes zonas están determinados perfectamente a la hora del diseño. El aparato de Foucault permite controlar esos radios con mucha precisión.



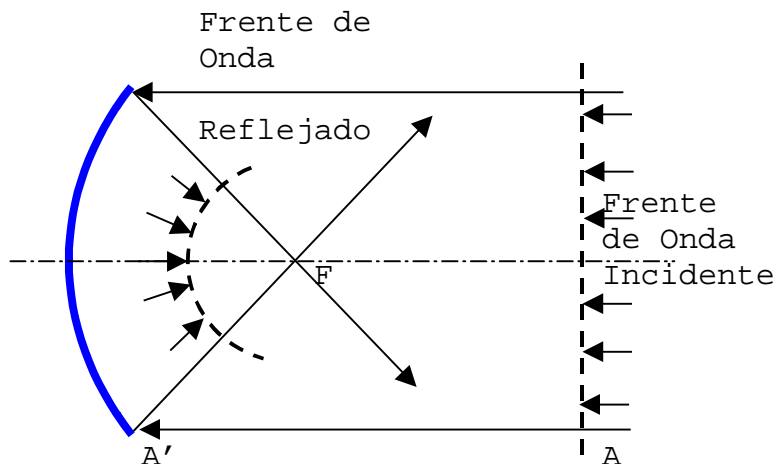
*Fig. A4-1 A la izquierda, el método de Foucault visto desde arriba. Se ilumina el espejo a través de una fina ranura, y se lo observa desde detrás de una cuchilla. La periferia de este espejo tiene su centro de curvatura en el plano de la ranura-cuchilla. La zona central lo tiene más cerca del espejo, por lo que parte de la luz reflejada queda bloqueada por la cuchilla. El observador ve la superficie del espejo como el gráfico de la derecha.*

El método de Foucault permite detectar errores en la superficie reflectora, con una precisión de pequeñas fracciones de la longitud de onda de la luz usada para controlarlo. Cualquier diferencia con la superficie parabólica perfecta hará que la luz reflejada en las zonas defectuosas llegue al foco fuera de fase respecto a la de las zonas correctas del espejo, haciendo que la luz no forme una mancha

de difracción compacta, sino que cada vez más luz termine en los anillos que la rodean, agrandando su dimensión.



*Fig. A4-2 Dos perfiles de la mancha de difracción para dos espejos diferentes. El de la izquierda concentra una gran cantidad de energía en el lóbulo principal de la mancha, mientras que el de la derecha, correspondiente a un espejo con zonas defectuosas, desparrama la energía en los anillos circundantes.*



*Fig. A4-3 El reflector parabólico tiene la propiedad de concentrar los rayos paralelos provenientes de un punto objeto situado en el "infinito", en su foco geométrico F. El Frente de Onda incidente es plano. El reflejado es una esfera perfecta.*

Los caminos de los rayos de luz  $A A' + A' F$  son iguales para todos los rayos del haz que se reflejan en la superficie. Si

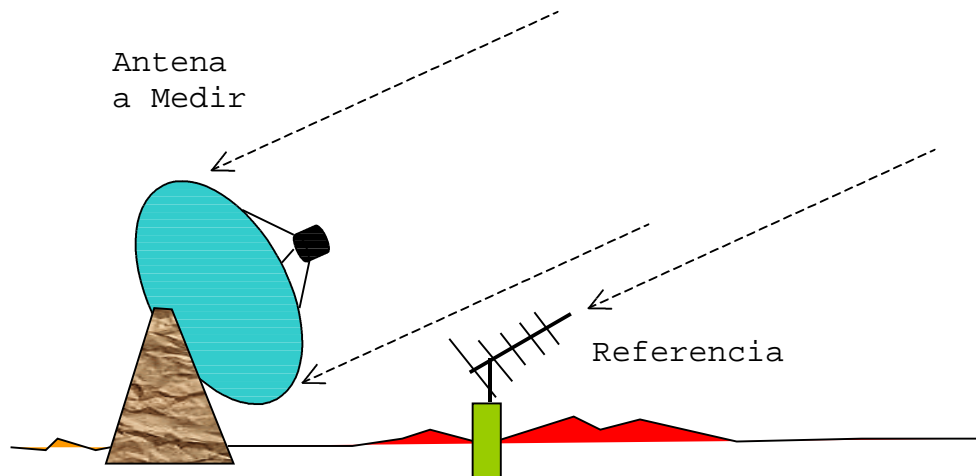
fueran distintos, aunque sea por fracciones de  $\lambda$ , se degradaría la mancha de difracción.

Al especificar el error de un espejo se lo suele hacer de dos formas. Una de ellas señala las diferencias de la superficie reflectora con la de una parábola perfecta. La otra forma pone de manifiesto las diferencias entre el Frente de Onda reflejado y una esfera perfecta. Para un mismo espejo, las diferencias en el Frente de Onda son *el doble* de las de la superficie reflectora. El error máximo tolerable en el Frente de Onda se suele especificar como de  $\lambda/4$ , pero en la práctica siempre se trata de superar esa marca, por lo menos a  $\lambda/10$ .

## CONTROL DE SUPERFICIES REFLECTORAS EN RADIOFRECUENCIAS MÉTODO HOLOGRÁFICO

Existen varias formas de controlar una superficie reflectora usada en RadioFrecuencias (RF), entre las cuales, la más común es quizás la de control por sistemas de agrimensura, con teodolito y reglas. Un eje giratorio coincidente con el eje geométrico de la superficie y un pequeño laser, pueden ser también herramientas muy valiosas para la determinación de los errores de las superficies parabólicas cóncavas. Sin embargo, cuando el sistema es un poco más complejo que una superficie reflectora simple, y comprende, por ejemplo, un sistema Cassegrain o Gregoriano o todavía más complicado como el del radiotelescopio de 300 metros de Nancay, Francia, el trabajo de mensura geométrica se complica.

Se recurre entonces a métodos, donde se usa para controlar una señal de radio. La fuente de esta señal debe estar físicamente muy lejos y debe ser potente. Muchas veces se utilizan para esto los satélites geoestacionarios.



*Fig. A4-4 Se requiere una antena adicional para hacer la correlación con la antena a medir, como si fuera un interferómetro de dos antenas. Aquí las dos antenas reciben la señal de un satélite geoestacionario, fijo en el cielo local.*

Se realiza la correlación de las señales de RF de ambas antenas al mismo tiempo que se "barre" la radiofuente (el satélite). La extensión del barrido debe superar el ancho del haz angular de la antena. En resumen, se hace un muestreo de

la "mancha de difracción" en el Plano Focal del sistema reflector (puede provenir de varias superficies reflectoras) tomando, en el receptor, datos de desplazamiento de Fase y Módulo de la señal de la antena a medir, respecto a la antena de Referencia, que está fija.

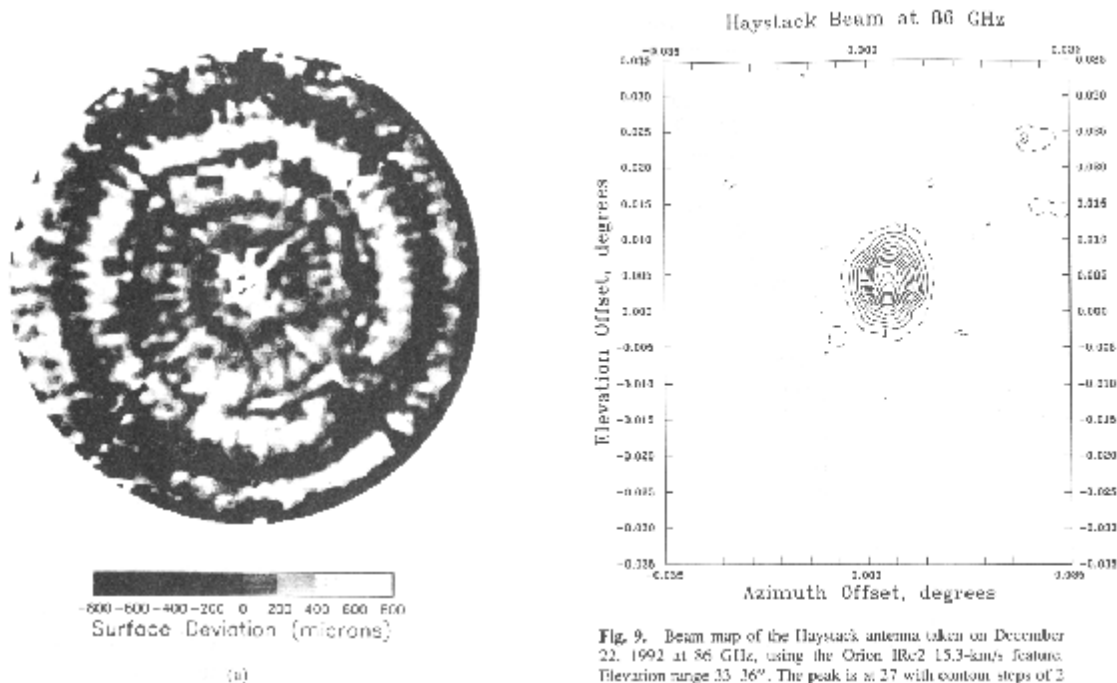


Fig. 9. Beam map of the Haystack antenna taken on December 22, 1992 at 86 GHz, using the Orion IRC2 15.3-km/s feature. Elevation range 33.36°. The peak is at 27 with contour steps of 2 in arbitrary units. Map shows well-formed beam with half-power angular size of 27 arcsec. Sidelobes are not seen at the 4% level.

Fig. A4-5 La antena del Observatorio de Haystack se utiliza hasta en 115 GHz, por lo que necesita un estricto control. Éste se realizó a 12 GHz de un satélite geoestacionario. Las desviaciones de la superficie reflectora se miden en micrones y se grafican en un mapa holográfico por niveles de grises a la izquierda. La imagen de la derecha muestra una prueba de la forma de haz que resultó, mapeando en 86 GHz la radiofuente Orion Irc2. El mapa muestra un haz bien formado, con un ancho efectivo de 27 segundos de arco y con lóbulos laterales no aparentes hasta un nivel del 4%

## Teoría Básica del Método Holográfico.

Se explicó antes que los caminos de los rayos, que son la suma del que va desde el Frente de Onda Plano hasta la superficie, más el reflejado, desde la superficie al foco deben ser iguales. También que el Frente de Onda que llega al foco debe ser esférico.

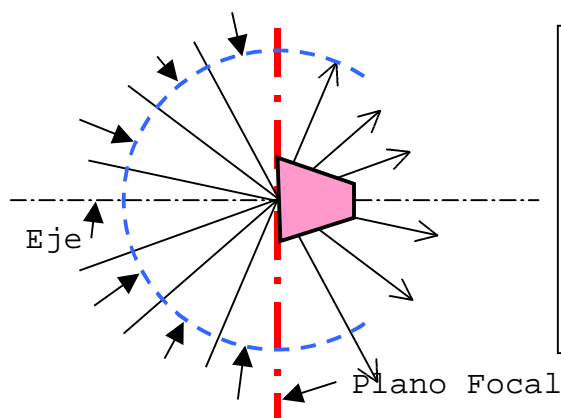


Fig. A4-6 Si el reflector está a la izquierda, los rayos reflejados formarán un Frente de Onda esférico. El receptor está ubicado en un punto del Plano Focal, que coincide con el eje geométrico del sistema reflector.

Para conocer la intensidad de las ondas que llegan hasta cada punto del Plano Focal, debemos mover un detector por la superficie del mismo Plano y calcular cual será la intensidad integrada de las ondas recibidas. Esto deberá realizarse teniendo en cuenta los desfases producidos en las ondas recibidas por el detector, por haber salido del eje geométrico del sistema reflector y explorar el Plano Focal.

Fijamos en el Plano Focal un sistema de coordenadas  $u, v$  centrado en el eje geométrico.

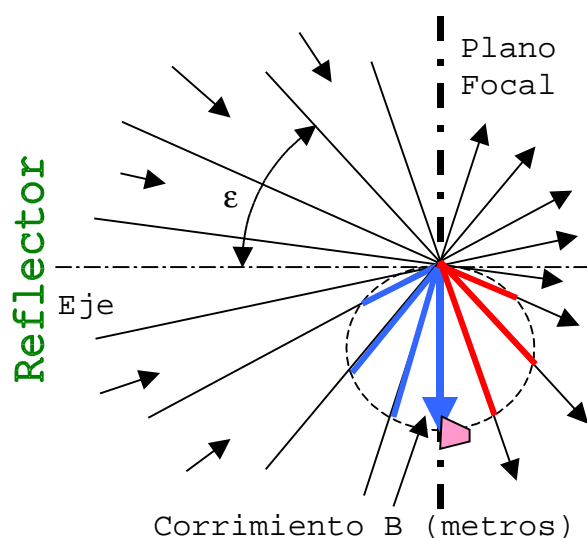


Fig. A4-7 Si desplazamos el detector hacia abajo sobre el Plano Focal, los caminos que las ondas deben hacer para alcanzarlo ya no son más iguales. En cambio sufrirán acortamientos (los que llegan desde abajo) y alargamientos (los que llegan desde arriba) que habrá que tener en cuenta para computar que intensidad tendrá la señal en ese punto del Plano Focal.

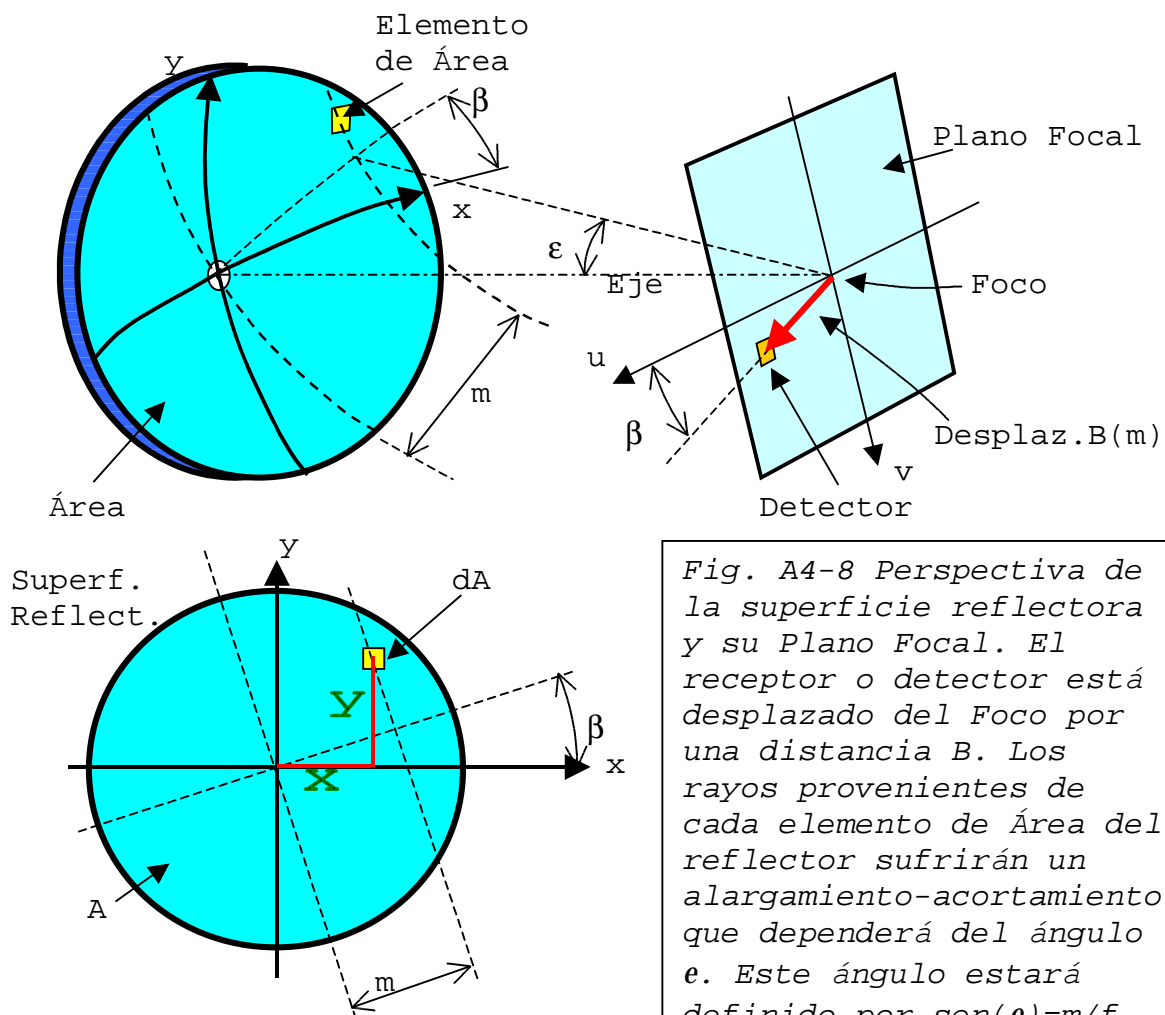
Si se llama  $\epsilon$  al ángulo entre el Eje geométrico del sistema y un rayo reflejado, el acortamiento-alargamiento que sufrirá al desplazar el detector en una cantidad  $B$  (metros) sobre el Plano Focal es

$$b(\epsilon) = B \sin(\epsilon)$$

Con el ángulo  $\epsilon$  como el dibujado,  $b(\epsilon)$  será positivo para alargamientos de 1 camino de las ondas.

La circunferencia graficada en A4-7 representa el contorno esférico de esta función.

La determinación de estas distorsiones es necesaria para calcular los desplazamientos de fase que sufrirán las ondas que provienen de la reflexión, desde cada elemento de área del reflector.





Buscamos cuánto es el alargamiento-acortamiento de los caminos de los rayos correspondientes a las ondas reflejadas de cada elemento de Área (dA) de la superficie reflectora.

Esta magnitud dependerá del ángulo  $\epsilon$ , y a su vez, el ángulo  $\epsilon$  estará definido por la distancia m (ver dibujo).

$$\text{sen } \epsilon = \frac{m}{f}$$

donde f: Distancia Focal de la superficie reflectora.

$$\text{Además} \quad \cos(\beta) = \frac{u}{B} \quad \text{sen}(\beta) = \frac{v}{B}$$

También se puede expresar la distancia m en función de las coordenadas x,y del elemento de Área.

$$m = x \cos(\beta) + y \text{sen}(\beta)$$

reemplazando las funciones trigonométricas queda

$$m = x \frac{u}{B} + y \frac{v}{B}$$

$$\text{entonces} \quad \text{sen}(\epsilon) = \frac{1}{f} \left[ \frac{u}{B} x + \frac{v}{B} y \right]$$

y los alargamientos de los caminos de los rayos

$$b(\epsilon) = \frac{B}{f} \left[ \frac{u}{B} x + \frac{v}{B} y \right]$$

$$b(\epsilon) = \frac{1}{f} [u x + v y]$$

El defasaje de las ondas a la llegada al receptor, que provienen de cada elemento de Área del reflector será proporcional al alargamiento-acortamiento calculado, más el alargamiento-acortamiento adicional provocado por errores en la superficie reflectora, los que causarán defasajes adicionales que deformarán el Frente de Onda idealmente esférico. A los errores del Frente de Onda esférico los podemos expresar como  $\alpha(x,y)$  pues dependen de la ubicación del elemento de Área distorsionante del reflector.

El defasaje total será:

$$\alpha = 2\pi \frac{b(\epsilon)}{\lambda} + \alpha(x,y)$$

Entonces para determinar la intensidad resultante de todas las ondas que llegan a cada punto del Plano Focal definido por sus coordenadas  $u,v$  se deberá sumar (integrar) la intensidad de las ondas que llegan desde cada elemento de Área del sistema colector de RF.

$$I(u,v) = \int_A h \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(ux + vy) + \alpha(x,y)\right] dx dy$$

Esta integral se extiende a toda el Área reflectora (A) y no es más que la Transformada Bidimensional de Fourier de la superficie reflectora con sus defasajes propios producidos por los errores respecto a una parábola perfecta  $[\alpha(x,y)]$ .  $h$  es un factor que da el valor de reflectividad del elemento de Área. Si ésta característica es uniforme, el valor de  $h$  será una constante.

En la práctica lo que se obtiene scaneando la fuente (satélite geoestacionario) con la antena a medir es justamente la función  $I(u,v)$  con su Módulo y Fase. La forma de la superficie del espejo, con sus desviaciones respecto a la parábola será

$$f(x,y) = h(x,y) \cos[\alpha(x,y)]$$