

**DIMENSIONAMIENTO DE LOS ESPEJOS M3  
Y M4 DEL RADIOTELESCOPIO DE 40  
METROS DEL CAY**

INFORME TECNICO DEL CAY N° 2001-5

José Antonio López Fernández, Félix Tercero Martínez

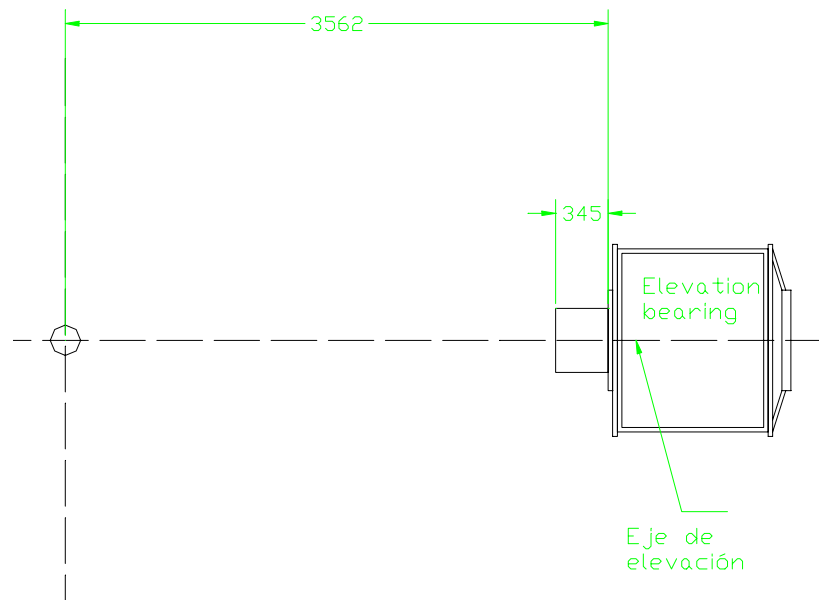
Se realiza un análisis centrado en los espejos Nasmyth M3 y M4 del radiotelescopio de 40 metros con la idea de definir sus dimensiones. En este análisis entran en juego los siguientes criterios:

- Dimensiones de la cabina.
- Despejamiento de los haces de la cabina de receptores (nivel de truncamiento).
- Máximo número de elementos para multihaz.

### I.- Dimensiones de la cabina de receptores.

En principio, el diseño irá encaminado a realizar espejos con las mayores dimensiones permitidas. Esto permitirá el máximo despejamiento (nivel de truncamiento mínimo) para los haces que vienen de la parte interior de la cabina y el máximo número de elementos del sistema multihaz.

En las figuras 1 y 2 se presenta la mitad del eje de elevación, donde se situarán los espejos. De la figura 1 se obtiene que la semi-longitud axial total para los tres espejos es de 3217 mm. Esta longitud corresponde a la distancia entre la caja de protección del codificador de elevación y el eje óptico. Para evitar solapamiento entre espejos y permitir el giro de M3 (90°), el límite máximo en el diámetro de los espejos correspondería a dividir por 1.5 dicha distancia. Esto da como resultado un diámetro máximo de 2144 milímetros para cada espejo.



*Figura 1: Vista en planta del eje de elevación.*

En la figura 2 se observa que el eje óptico se encuentra a 1325 mm del suelo de la plataforma de los espejos. Esto permitiría un diámetro total para los espejos de 2650 mm. Lo cual quiere decir que la limitación en el diámetro de los espejos vendrá dada por la distancia axial y no la vertical.

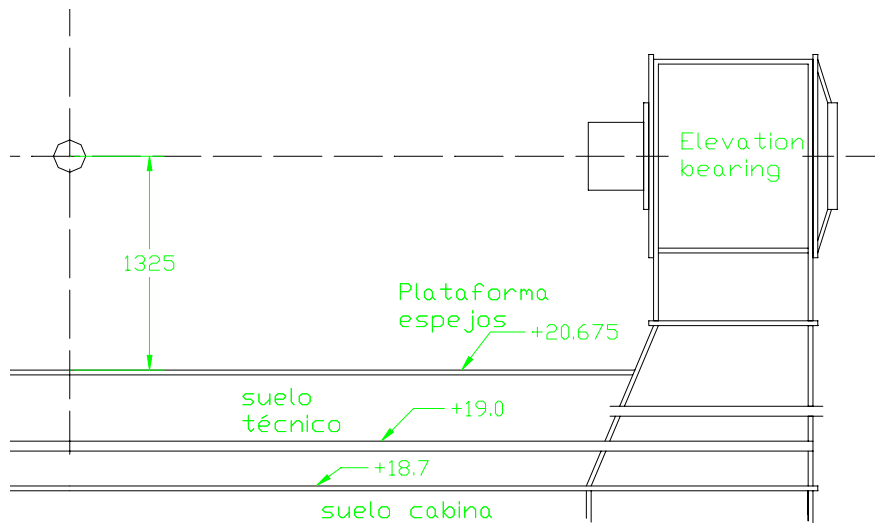


Figura 2: Vista en alzado del eje de elevación.

El espejo M3 goza de un movimiento complejo. Además de compensar el movimiento en elevación del reflector principal, debe girar  $90^\circ$ . Con este último movimiento puede elegirse entre la rama óptica de M4 ó de M4'. Esto implica un soporte especial cuyo diseño básico ha sido elaborado por MAN.

El soporte de M3 se observa en las figuras 3 y 4. La longitud axial mínima para esta estructura es de 400 milímetros. Esto reduce substancialmente las dimensiones de los espejos. La longitud axial útil, en la rama donde se encuentra el soporte de M3, para la colocación de espejos es ahora de 2817 milímetros. Como quiera que en esa longitud debe caber un espejo completo y la mitad de otro, para dos espejos iguales el máximo diámetro permitido es de 1878 milímetros.

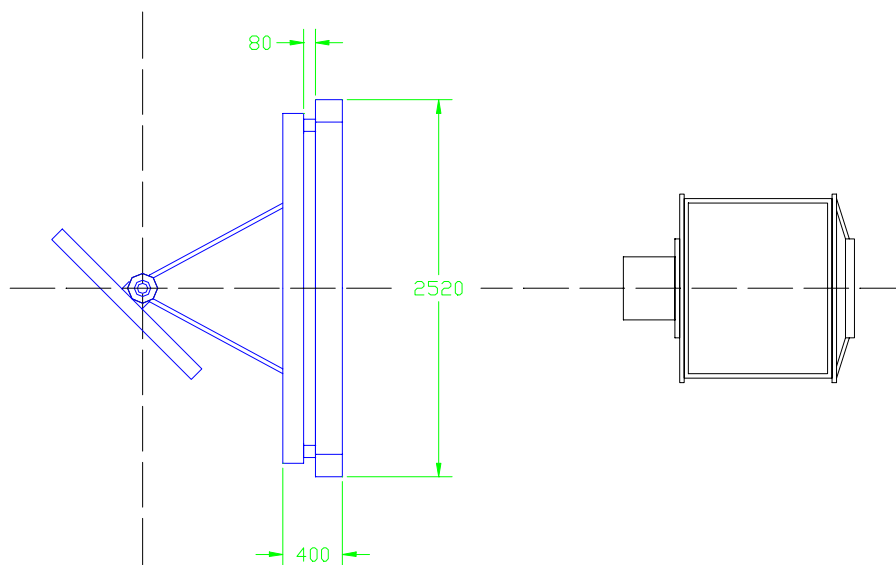


Figura 3: Localización del soporte de M3. Vista horizontal.

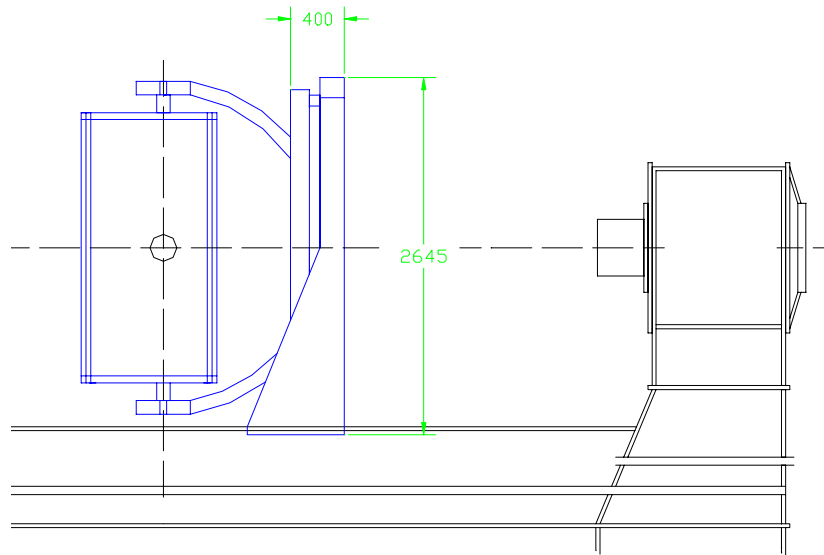


Figura 4: Localización del soporte de M3. Vista vertical.

El soporte de M3 sólo se encuentra en una de las ramas y tan sólo limita el diámetro de M3 y M4'. El diámetro del otro espejo, M4, podría ser mayor. No obstante, es conveniente mantener el mismo diámetro para los tres espejos. Esto les permitiría ser intercambiados entre sí en caso de necesidad y además porque un posible único repuesto sería válido para los tres.

La posición del espejo M4' viene fijada por el diámetro que hemos elegido. Para un diámetro de 1875 mm el espejo debe situarse a 2275 mm de M3. Existe una cierta libertad en la elección de la posición de M4. Para el diámetro elegido basta con que la distancia M3-M4 sea mayor que 1875 mm. Un cierto margen de guarda de 10 cm nos da una distancia de 1975 mm. Con este valor disponemos de un cierto espacio para permitir el paso de una persona por la izquierda de M4.

Nuestro sistema tiene pues una cierta asimetría. Con dos ramas, una donde la separación entre los espejos M3 y M4' es 2275 mm y otra donde la distancia entre M3 y M4 es 1975 mm. Esta opción parece ligeramente ventajosa, ya que permite disponer de un foco nasmyth cercano (a 4325 del espejo M4' o rama corta) y otro lejano (a 4625 mm del espejo M4 o rama larga). La configuración propuesta se muestra en las figuras 5 y 6.

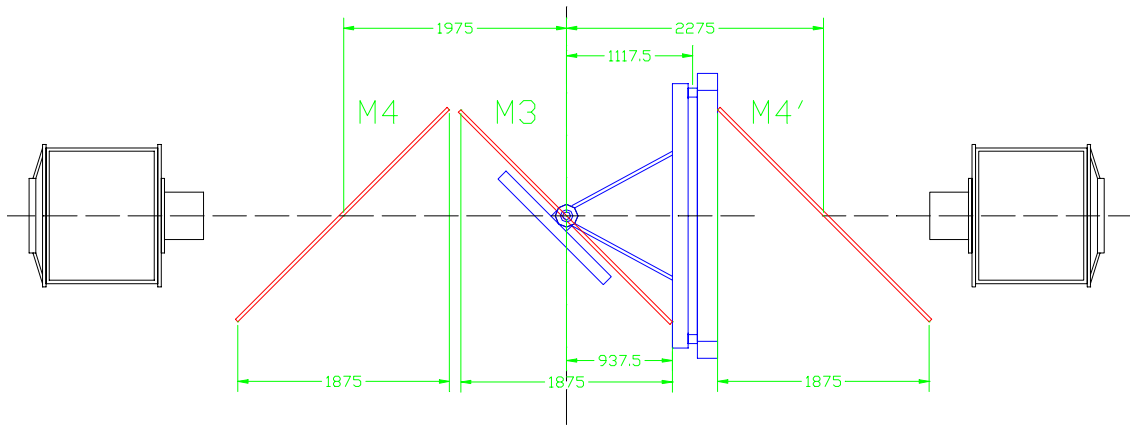


Figura 5: Configuración propuesta. Vista horizontal.

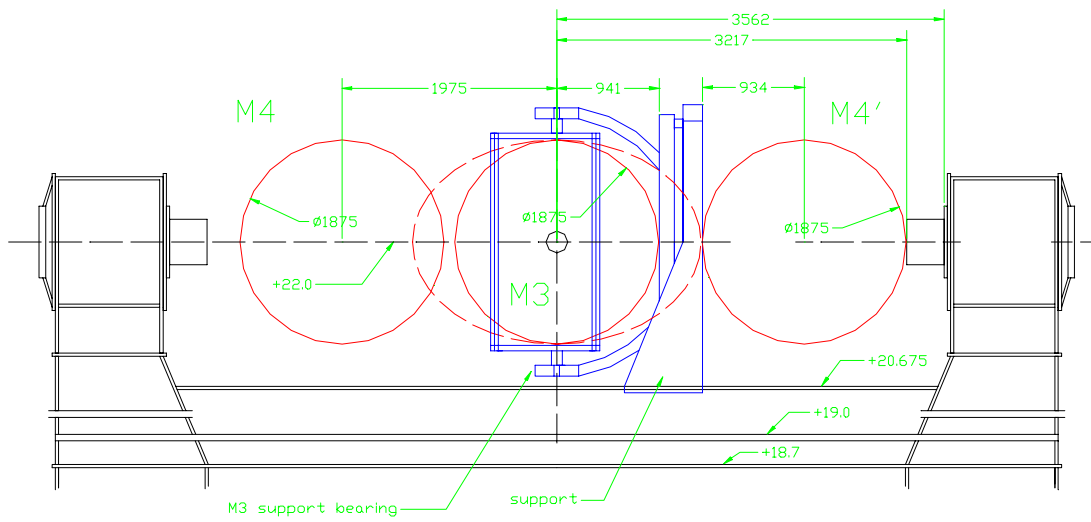


Figura 6: Configuración propuesta. Vista vertical.

**II.- Despejamiento de los haces.**

En la tabla I se calculan los diámetros de los espejos M3, M4, M4' y del vértice de la parábola para las bandas de trabajo del radiotelescopio. La estimación se realiza para un despejamiento de 4 veces el waist de cada haz (nivel de truncamiento de  $-34.7$  dB) y para un taper de 12 dB. Todo ello se calcula mediante el fichero de Mathcad 7.0, *40mconc.mcd*, en el apéndice. Las distancias entre espejos son las que corresponden a la configuración propuesta en el apartado anterior.

Frecuencia, GHz	DM3,mm	DM4,mm	DM4',mm	Dvértice,mm
2.3 GHz	2709	2691	2695	3008
6 GHz	1824	1513	1471	2579
8.4 GHz	1728	1368	1316	2540
12.5 GHz	1672	1277	1219	2517
22 GHz	1639	1224	1162	2504
30 GHz	1632	1212	1149	2501
45 GHz	1627	1204	1140	2500
80 GHz	1624	1200	1135	2499
120 GHz	1624	1199	1134	2498

Tabla I: Diámetro de los espejos y vértice para un truncamiento de  $-35$  dB.

Como se observa, salvo en el caso de 2.3 GHz (banda S) los diámetros de los espejos son inferiores al elegido (1875 milímetros). El diámetro del vértice es siempre mayor que el necesario para truncamiento a  $-34.7$  dB.

Para esta configuración, el nivel de truncamiento en M3 a 2.3 GHz es  $-16.6$  dB. El nivel de truncamiento en M4 es  $-16.8$  dB y en M4 es de  $-16.9$  dB. Estos valores se obtienen para un taper de subreflector de 12 dB. En la tabla siguiente se presentan los niveles de truncamiento para distintos taper a 2.3 GHz. Se observa que el nivel óptimo de taper para mínimo truncamiento es 10 dB. Para este taper los niveles de truncamiento son de  $-18.6$  dB para M4,  $-18.7$  dB para M4' y de  $-17.2$  para M3.

Taper, dB	Nivel en M3	Nivel en M4	Nivel en M4'	Nivel en vértice
5	-14.7 dB	-20.8 dB	-21.9 dB	-21.6 dB
6	-16.0 dB	-21.1 dB	-21.9 dB	-25.1 dB
7	-16.8 dB	-20.9 dB	-21.4 dB	-28.3 dB
8	-17.2 dB	-20.3 dB	-20.6 dB	-31.1 dB
9	-17.3 dB	-19.5 dB	-19.7 dB	-33.5 dB
10	-17.2 dB	-18.6 dB	-18.7 dB	-35.5 dB
11	-17.0 dB	-17.7 dB	-17.7 dB	-37.2 dB
12	-16.6 dB	-16.9 dB	-16.8 dB	-38.6 dB
13	-16.2 dB	-16.0 dB	-15.9 dB	-39.6 dB
14	-15.7 dB	-15.2 dB	-15.1 dB	-40.5 dB
15	-15.3 dB	-14.5 dB	-14.3 dB	-41.0 dB

Tabla II: Niveles de truncamiento para los diámetros de espejos elegidos a 2.3GHz para diferentes niveles de taper.

En la tabla siguiente se presentan los niveles de truncamiento en toda la banda de funcionamiento del radiotelescopio para la configuración elegida:

Frecuencia, GHz	Nivel en DM3, 1875 mm	Nivel en DM4, 1875 mm	Nivel en DM4', 1875 mm	Nivel en vértice, 3170 mm
2.3 GHz *	-17.2 dB	-18.6 dB	-18.7 dB	-35.5 dB
6 GHz	-36.7 dB	-53.4 dB	-56.4 dB	-52.5 dB
8.4 GHz	-40.9 dB	-65.3 dB	-70.5 dB	-54.1 dB
12.5 GHz	-43.7 dB	-74.8 dB	-82.1 dB	-55.1 dB
22 GHz	-45.4 dB	-81.5 dB	-90.5 dB	-55.6 dB
30 GHz	-45.8 dB	-83.1 dB	-92.5 dB	-55.8 dB
45 GHz	-46.1 dB	-84.2 dB	-93.9 dB	-55.8 dB
80 GHz	-46.3 dB	-84.8 dB	-94.7 dB	-55.9 dB
120 GHz	-46.3 dB	-85.0 dB	-95.0 dB	-55.9 dB

\* Estos niveles se obtienen para un taper en el subreflector de 10 dB.

*Tabla III: Niveles de truncamiento para los diámetros de espejos elegidos.*

### III.- Multibeam.

#### III.1.- Introducción.

El interés de un array de receptores en un radiotelescopio está en la disminución del tiempo necesario para realizar un mapa de una zona del cielo. Esta no es la única ventaja. Además permiten esquemas de autocalibración, conmutación de posición y puntería. Los diámetros de los espejos y de los alimentadores limitarán el número de haces que pueden ser utilizados. Para situar un array de receptores en el foco de un radiotelescopio es preciso disponer de un cierto despejamiento en la propagación de los haces. Es decir, los espejos y diafragmas (túnel del paraboloide) deben permitir el paso de varios haces simultáneamente y por lo tanto deben diseñarse con un cierto sobredimensionamiento.

Cuando un telescopio se dirige a una fuente puntual, la distribución de potencia en el foco forma un disco de Airy. El diámetro de este disco en el plano focal (medido hasta el primer nulo) es:

$$D_{discoAiry} = 2.44 \cdot \lambda \cdot \frac{F_e}{D}$$

Un telescopio puede resolver dos fuentes puntuales que se encuentren separadas una distancia angular igual al ancho de haz a 3 dB del radiotelescopio

$$BW_{-3dB} = 1.2 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Las imágenes de ambas fuentes en el plano focal estarán separadas  $\delta_{-3dB} = 1.2 \cdot \lambda \cdot \frac{F_e}{D}$

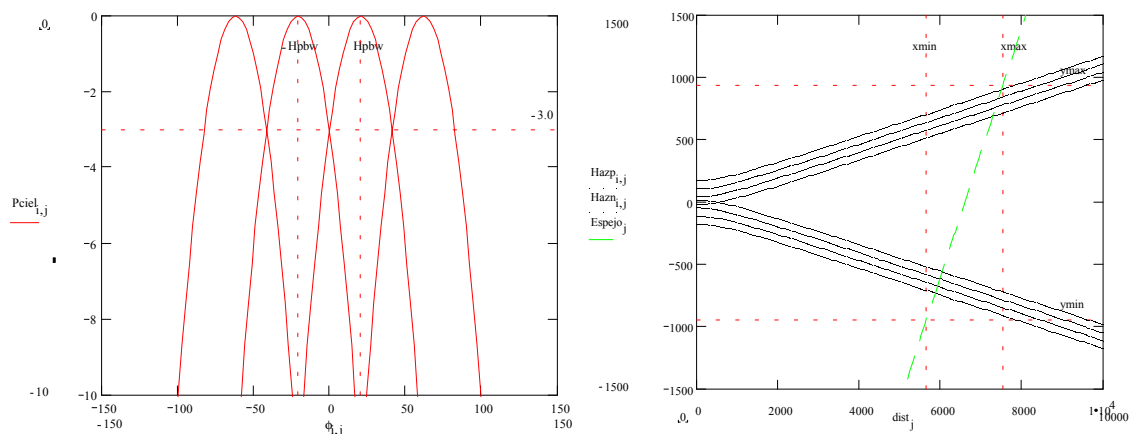


Figura 7: Haces del radiotelescopio de 40 metros a 30 GHz, separados  $BW_{-3dB}$  en el cielo y  $\delta_{-3dB}$  en el plano focal.

El radiotelescopio actúa pues como un sistema lineal que relaciona los puntos del campo objeto (cielo) con los del campo imagen (el foco).

Una comprensión mayor de su funcionamiento puede obtenerse analizando el contenido de frecuencias espaciales de la distribución de potencia en el plano focal. El radiotelescopio actúa como un filtro paso bajo, con una frecuencia de corte espacial



relacionada con el diámetro del radiotelescopio (el radiotelescopio sólo recibe la señal que capta el diagrama de radiación). La imagen en el plano focal es pues, una función limitada en banda, con frecuencia de corte espacial  $\delta_{-3dB}$ , que puede ser reproducida muestreándola a una frecuencia doble de su ancho de banda, teorema de Nyquist. Como cada alimentador representa una muestra, recuperaremos la imagen en el plano focal situando alimentadores separados la mitad de la distancia entre las imágenes de las fuentes puntuales. La distancia entre cada alimentador debe ser:

$$\delta = \frac{\delta_{-3dB}}{2}$$

En la práctica no puede conseguirse esta densidad de alimentadores. Un sistema multihaz debe por lo tanto sub-muestrear la imagen. Y se puede definir un factor de submuestreo, U

$$U = \frac{\text{Diámetro bocina}}{\delta}$$

### III.2.- Cálculo del número de elementos

El cálculo del número de elementos del sistema multihaz comienza con la determinación del número de haces que pueden propagarse en la cabina de receptores para los diámetros elegidos para los espejos.

Lo primero es determinar la desviación del haz  $\xi$ , definida como los segundos en el cielo que equivalen a un desplazamiento de 1 mm en el foco.

$$\xi = \frac{K_e}{F_e}$$

donde  $K_e$  es el factor de desviación del haz, que para sistemas con  $F/D > 2$  es muy cercano a la unidad.

Si para un espejo determinado se impone un despejamiento de cuatro veces el waist, la máxima separación entre alimentadores en el plano focal para que sus haces sigan reflejándose en el espejo es:

$$\Delta = \text{Despejo} - 4 \cdot \omega(z)$$

Para un factor de submuestreo  $U=2$ , la distancia entre bocinas es  $\delta_{-3dB}$ , el número de haces que pueden propagarse sin truncamiento es,

$$Nhaces = Ent \left[ \frac{\xi \cdot \Delta}{BW_{-3dB}} \right] + 1$$

Este número de haces viene determinado por el compromiso de truncar el haz de la bocina más exterior a  $-34.7$  dB. Relajando este criterio el número de haces aumentaría. De la misma manera, siendo más estrictos tendríamos de un menor número de haces.

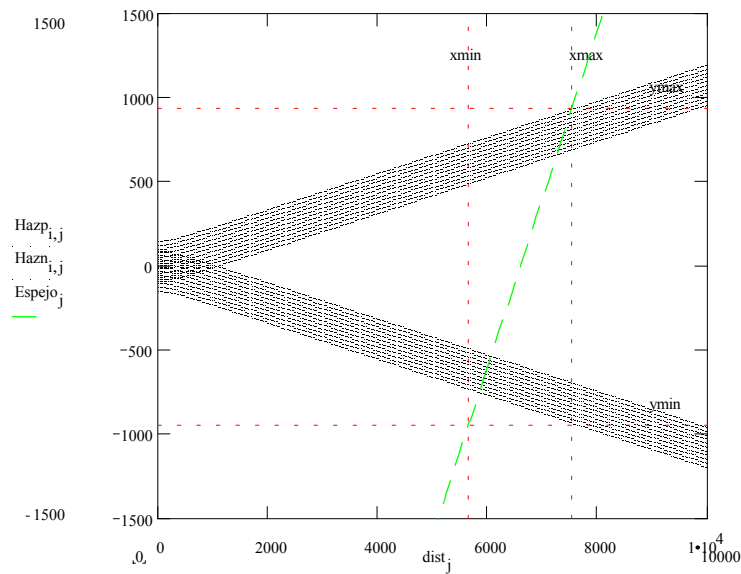


Figura 8: Haces del radiotelescopio de 40 metros a 120 GHz, separados  $\delta_{3dB}$  y pueden propagarse con un truncamiento máximo de  $-35$  dB.

Este número coincidiría con el número de alimentadores en una fila del sistema multihaz si el diámetro de cada alimentador fuese inferior a  $\delta_{3dB}$ . La tecnología del alimentador definirá pues el factor de submuestreo definitivo y por lo tanto, el número de alimentadores. Definimos un factor de compactación,

$$\gamma = Ent \left[ \frac{D_{alimentador}}{\delta_{-3dB}} \right] + 1$$

que coincide con la distancia en número de haces entre dos alimentadores consecutivos.

El factor de submuestreo puede expresarse como:  $U = 2 \cdot \gamma$

Para un alimentador del tipo bocina corrugada se obtiene un diámetro mínimo en milímetros,

$$D_{boc} = 3.03 \cdot \omega_0 + 2 \cdot \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2}$$

donde el primer término es el diámetro de la apertura, el segundo corresponde a las corrugaciones y el tercero es una estimación de la pared de la bocina. Lo que para nuestro radiotelescopio implica  $\gamma=2$ . Y por lo tanto,  $U=4$ .

Por lo tanto el número de alimentadores en una fila viene dado por,

$$N_{fila} = 2 \cdot Ent \left[ \frac{Nhaces - 1}{2 \cdot \gamma} \right] + 1$$

Y en definitiva, el número máximo de alimentadores será para un array cuadrado

$$N_{alim} = N_{fila}^2$$

Con los valores seleccionados de espejos se obtienen los siguientes resultados:

Frecuencia, GHz	Número máximo de elementos del multibeam
2.3 GHz *	1
6 GHz	1
8.4 GHz	1
12.5 GHz	1
22 GHz	1
30 GHz	4
45 GHz	4
80 GHz	16
120 GHz	36

Tabla IV: Número de elementos del multibeam para los diámetros de espejos elegidos.

Como se observa en la tabla, sólo es posible realizar un sistema multihaz para frecuencias superiores a 30 GHz. El factor que limita el número de elementos del array es el diámetro del espejo M3

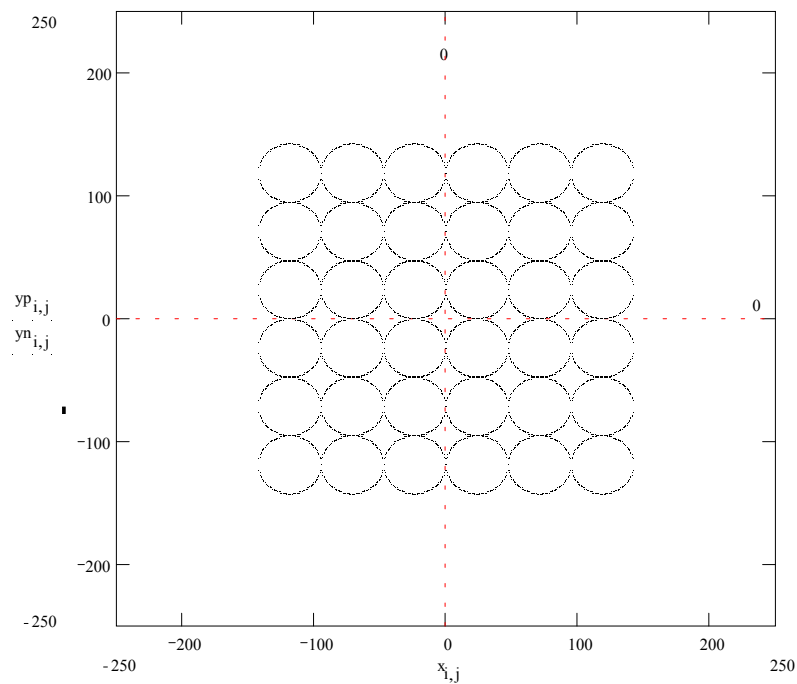


Figura 9: Configuración del multibeam a 120 GHz.

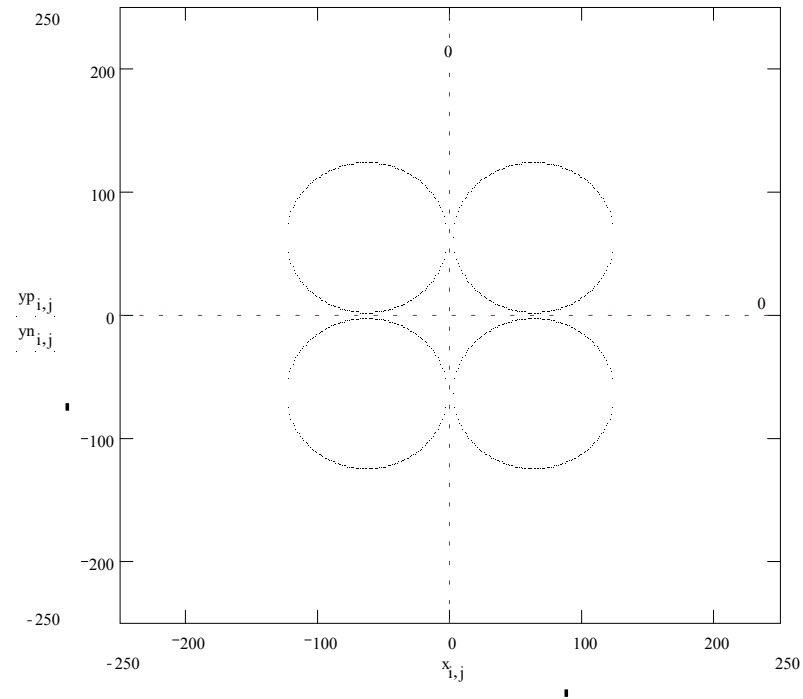


Figura 10: Configuración del multibeam a 30 GHz.

El diámetro de M3 sí afecta al número de elementos del array. En la tabla se presentan los resultados para diferentes diámetros.

Diámetro M3, mm	30 GHz	45 GHz	80 GHz	120 GHz
1900	4	9	16	36
1875	4	4	16	36
1850	4	4	16	25
1800	1	4	9	16
1750	1	4	4	9

Tabla V: Número de elementos del multibeam para diferentes diámetros de M3.

En conclusión y desde el punto de vista multihaz, se necesita un diámetro de 1.875 metros para M3 y superior a 1.42 metros para M4 y M4’

#### **IV.- Conclusión.**

En las figuras 5 y 6 se muestra la configuración propuesta para los espejos del eje de elevación.

Los espejos son idénticos, planos y de sección elíptica. El eje menor mide 1875 mm, el eje mayor mide 2652 mm. El espejo M4 se encuentra a 1975 mm de M3. El espejo M4' se encuentra a 2275 mm de M3.

La rama de M4 es la que llamamos rama larga. El foco cassegrain se encuentra a 4625 mm de su centro. La rama M4' es la que llamamos rama corta. El foco cassegrain se encuentra a 4325 mm de su centro.

Los niveles de truncamiento de los haces se encuentran resumidos en la tabla III. Para frecuencias por encima de 2.3 GHz, el nivel de truncamiento es siempre inferior a -35 dB. En todas ellas el taper elegido para el diseño es 12 dB. A 2.3 GHz el nivel de truncamiento máximo ocurre en M3 y es -17.2 dB. Esto se logra para un taper de 10 dB.

El número de alimentadores permitidos en un "multibeam" se muestra en la tabla IV. Es posible realizar un sistema de este tipo por encima de 30 GHz (4 elementos). A 120 GHz, el número de alimentadores asciende a 36. El factor de submuestreo de nuestro radiotelescopio es 4.