

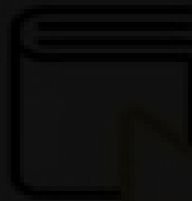
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



UNIVERSITAS
Miguel Hernández



Biblioteca
UNIVERSITAS Miguel Hernández

ESTUDIO DE VALIDACIÓN DE LA
ANTENA DSS-65 PARA SU USO EN
RADIOASTRONOMÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre
2020

AUTOR: Álvaro Mas Ortiz

DIRECTOR/ES: Dr. Pablo Corral González
D. Juan Ángel Vaquerizo Gallego

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor y tutor, el Dr. Pablo Corral González, por haberme ofrecido la oportunidad de participar en este proyecto y haber sido paciente conmigo, que no es fácil.

A D. Juan Ángel Vaquerizo Gallego, por haberme ofrecido ayuda incondicional para la realización de este proyecto.

A mi familia, por apoyarme en todas mis decisiones y ser lo más valioso que tengo.

A mis amigos, por estar ahí en las buenas y en las malas, por ser la familia que he elegido.

A todo el profesorado del grado de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación, por haberme aportado su experiencia y conocimientos a lo largo de este camino.

A mis compañeros de clase, por formar parte de la experiencia de aprendizaje y haber sido compañeros.

Gràcies per tot papa, se que estaries molt orgullós de mí.

A mi madre, por ser el pilar de mi vida y un ejemplo de cómo vivirla. Por ser y dejarme ser.





RESUMEN

Este trabajo consiste en la realización de un estudio de validación para la conversión circuital de la antena DSS-65 en un radiotelescopio, para que pueda ser utilizada en el ámbito de la radioastronomía.

Para ello, tras introducir diferentes conceptos basados en las telecomunicaciones, al analizar en detalle los diferentes componentes que conforman esta antena, he podido confirmar que esta antena localizada en el MDSCC (Robledo de Chavela) puede ser utilizada como un radiotelescopio tras el cambio de la eliminación de ciertos componentes de transmisión y la rectificación de ciertas vías del circuito interno de la misma.

Además del propio estudio, he analizado también otro posible funcionamiento de la misma al diseñar una bocina encargada de recibir señales en la línea de Hidrógeno, así como una comparación con otras estructuras para analizar el rendimiento de estas estructuras con respecto a nuestra antena.

PALABRAS CLAVE

Radiotelescopio; Antena de Tracking; Espectro Electromagnético; Fuentes de Emisión; Sistema de Coordenadas; Bocina; Antena Yagi-Uda; Antena Parabólica; Interferometría



ABSTRACT

This final project consists of producing a validation study for the DSS-65 antenna in a radiotelescope, putting this antenna into the usage of radioastronomy.

To accomplish this, after introducing some concepts based on telecommunications, I have realized that this antenna, located in the MDSCC (Robledo de Chavela), can be used as a radiotelescope. This could be possible due to some changes of the antenna circuit, removing some transmission components and rectifying the circuit paths.

Apart from this study, I have also analyzed another performance of this antenna by the design of a new feedhorn which receive Hydrogen Line signals and, I have made a comparison between different structures for a radiotelescope.

KEY WORDS

Radiotelescope; Tracking Antenna; Electromagnetic Spectrum; Emission Sources; Sistema de Coordinate System; Feed Horn; Yagi-Uda Antenna; Parabolic Antenna; Interferometry



ÍNDICES

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS | 1 |
| 1.2 MOTIVACIONES | 1 |
| 1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO..... | 1 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO..... | 3 |
| 2.1.1 DIVISIÓN DEL ESPECTRO..... | 5 |
| 2.1.1.1 TELEVISIÓN DIGITAL | 9 |
| 2.1.2 BANDA DE MICROONDAS..... | 10 |
| 2.1.3 RAYOS INFRARROJOS | 11 |
| 2.1.4 ONDAS ULTRAVIOLETA..... | 11 |
| 2.1.5 RAYOS X..... | 11 |
| 2.2 ATMÓSFERA | 12 |
| 2.2.1 MECANISMOS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA..... | 13 |
| 2.2.1.1 MECANISMOS TÉRMICOS | 13 |
| 2.2.1.2 MECANISMOS NO TÉRMICOS | 15 |
| 2.2.1.3 CLASIFICACIÓN DE MECANISMOS POR EMISIÓN | 17 |
| 2.3 FUENTES DE EMISIÓN ESPACIALES | 17 |
| 2.3.1 GALAXIA | 17 |
| 2.3.2 PLANETA | 20 |
| 2.3.2.1 ÓRBITA PLANETARIA..... | 20 |
| 2.3.2.2 FORMACIÓN PLANETARIA..... | 21 |
| 2.3.2.3 CLASIFICACIÓN DE PLANETAS..... | 21 |
| 2.3.3 MATERIA INTERESTELAR..... | 22 |
| 2.3.4 ESTRELLAS | 23 |
| 2.3.4.1 CICLO DE VIDA | 24 |
| 2.3.4.2 PULSAR | 25 |
| 2.3.4.3 NEBULOSA INTERPLANETARIA..... | 25 |

| | |
|--|----|
| 2.3.4.4 SUPERNOVA..... | 26 |
| 2.3.4.5 AGUJERO NEGRO..... | 28 |
| 2.3.4.6 CUÁSAR..... | 29 |
| 2.4 EL PLANETA TIERRA | 30 |
| 2.4.1 SISTEMAS DE COORDENADAS | 32 |
| 2.4.1.1 SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRES | 32 |
| 2.4.1.2 SISTEMA ALTACIMUTAL..... | 33 |
| 2.4.1.3 SISTEMA DE COORDENADAS HORARIAS..... | 34 |
| 2.4.1.4 SISTEMA DE COORDENADAS ECUATORIALES..... | 34 |
| 2.4.1.5 SISTEMA DE COORDENADAS ECLÍPTICAS | 35 |
| 2.4.1.6 SISTEMA DE COORDENADAS GALÁCTICAS..... | 36 |
| 2.5 RADIOASTRONOMÍA | 36 |
| 2.5.1 HISTORIA..... | 37 |
| 2.5.2 RADIOTELESCOPIO..... | 37 |
| 2.5.3 INTERFEROMETRÍA..... | 39 |
| 3. ESTUDIO DE LA ANTENA DSS-65 | 41 |
| 3.1 ANTENA DSS-65..... | 41 |
| 3.1.1 INTRODUCCIÓN | 41 |
| 3.1.2 COMPONENTES..... | 42 |
| 3.1.2.1 ESTRUCTURA PRINCIPAL..... | 43 |
| 3.1.2.2 COMPONENTES INTERNOS | 46 |
| 3.1.3 FUNCIONAMIENTO | 49 |
| 3.1.4 PARÁMETROS DE LA ANTENA DSS-65..... | 51 |
| 3.1.4.1 RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE APERTURA | 51 |
| 3.1.4.2 TEMPERATURA DE RUIDO DEL SISTEMA | 52 |
| 3.1.5 CÁLCULOS Y AJUSTES DE LA ANTENA..... | 55 |
| 3.2 RADIOTELESCOPIO | 57 |
| 3.2.1 INTRODUCCIÓN | 57 |
| 3.2.2 COMPONENTES..... | 57 |
| 3.2.2.1 COLECTOR DE ONDAS..... | 57 |

| | |
|---|----|
| 3.2.2.2 ALIMENTADOR | 58 |
| 3.2.2.3 EQUIPO DE TRANSPORTE Y TRATAMIENTO DE SEÑALES | 60 |
| 3.2.2.4 ORDENADOR..... | 60 |
| 3.2.3 FUNCIONAMIENTO | 60 |
| 3.2.3.1 RECEPCIÓN Y TRATAMIENTO DE ONDAS..... | 61 |
| 3.2.3.2 TRANSPORTE Y ANÁLISIS DE DATOS | 62 |
| 3.2.4 PÉRDIDAS EN UN RADIOTELESCOPIO..... | 62 |
| 3.2.5 PARÁMETROS DE UN RADIOTELESCOPIO..... | 63 |
| 3.2.6 CONCLUSIÓN | 64 |
| 3.3 ESTUDIO DE VALIDACIÓN | 65 |
| 3.3.1 INTRODUCCIÓN..... | 65 |
| 3.3.2 VALIDACIÓN DEL RADIOTELESCOPIO..... | 65 |
| 3.3.2.1 ANÁLISIS DE COMPONENTES..... | 69 |
| 3.3.2.2 RENDIMIENTO DEL RADIOTELESCOPIO..... | 71 |
| 3.3.3 RADIOTELESCOPIO DE LÍNEA DE HIDRÓGENO | 72 |
| 3.3.3.1 ANTENA YAGI-UDA | 73 |
| 3.3.3.2 ANTENA PARABÓLICA DE FOCO CENTRADO..... | 75 |
| 3.3.3.3 RADIOTELESCOPIO DSS-65 CON BOCINA CÓNICA CORRUGADA HI | 75 |
| 3.3.3.4 INTERFEROMETRÍA | 84 |
| 3.3.3.5 COMPARATIVA FINAL..... | 84 |
| 4. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO | 86 |
| 5. ANEXOS..... | 87 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 99 |

ÍNDICE DE FIGURAS

2. MARCO TEÓRICO

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Espectro electromagnético normalizado | 3 |
| Figura 2.2. Tipos de polarización | 4 |
| Figura 2.3. Ventanas atmosféricas..... | 12 |
| Figura 2.4. Gráfica de caracterización de radiación de un cuerpo negro | 13 |
| Figura 2.5. Radiación sincrotrón | 16 |
| Figura 2.6. Tipos de emisión | 16 |
| Figura 2.7. Secuencia de Hubble | 18 |
| Figura 2.8. NGC 1300 (galaxia espiral barrada) | 18 |
| Figura 2.9. Partes de una galaxia espiral regular | 19 |
| Figura 2.10. Nebulosa del Anillo (NGC 7200) | 26 |
| Figura 2.11. Tipos de Supernovas | 27 |
| Figura 2.12. Representación de un agujero negro | 28 |
| Figura 2.13. Ilustración de la translación de la Tierra | 31 |
| Figura 2.14. Precesión y nutación de la Tierra | 32 |
| Figura 2.15. Paralelos y meridianos de la Tierra | 33 |
| Figura 2.16. Sistema altacimutal | 34 |
| Figura 2.17. Coordenadas horarias | 34 |
| Figura 2.18. Sistema ecuatorial | 35 |
| Figura 2.19. Sistema de coordenadas eclípticas | 35 |
| Figura 2.20. Coordenadas galácticas | 36 |
| Figura 2.21. RADAN 600 | 39 |
| Figura 2.22. Radiotelescopio FAST | 39 |
| Figura 2.23. Very Large Array (VLA) | 40 |
| 3. ESTUDIO DE LA ANTENA DSS-65 | |
| Figura 3.1. Antena DSS-65 | 43 |
| Figura 3.2. Método de caracterización con teodolito | 45 |
| Figura 3.3. Diagrama de bloques de la DSS-65 | 46 |
| Figura 3.4. Sistema coordinado en EL y XEL..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.5. Temperaturas del sistema de recepción en banda S y X respectivamente | 55 |
| Figura 3.6. Esquema óptico de la antena DSS-65 | 57 |
| Figura 3.7. Tipos de antena parabólica..... | 58 |
| Figura 3.8. Esquema de bocina Potter | 59 |
| Figura 3.9. Esquema de bocina cónica corrugada | 59 |
| Figura 3.10. Interfaz del software HERA (Proyecto PARTNeR) | 60 |
| Figura 3.11. Estructura interna base del nuevo radiotelescopio | 67 |
| Figura 3.12. Diagrama de bloques del radiotelescopio (simplificado)..... | 69 |
| Figura 3.13. Ganancias de las bandas S y X respectivamente..... | 72 |
| Figura 3.14. Simulación Antena YAGI-UDA | 74 |
| Figura 3.15. Radio de una guía corrugada en función del ángulo de radiación | 77 |
| Figura 3.16. Esquema del convertor de modos con profundidad de ranura variable..... | 79 |
| Figura 3.17. Convertor de modos de ranura con anillo cargado | 79 |
| Figura 3.18. Convertor de modos con δ variable | 80 |
| 5. ANEXOS | |
| Figura 5.1. Esquema de un radiotelescopio Cassegrain | 88 |
| Figura 5.2. Esquema de una hipérbola | 89 |
| Figura 5.3. Esquema del radiotelescopio con condiciones..... | 90 |
| Figura 5.4. Esquema de un Radiotelescopio Gregorian | 91 |
| Figura 5.5. Esquema de una elipse | 91 |
| Figura 5.6. Esquema de un Radiotelescopio Gregorian con datos | 92 |
| Figura 5.7. Zoom de la figura 3.16. | 92 |
| Figura 5.8. Montura altacimutal y ecuatorial | 94 |
| Figura 5.9. Pantalla de inicio | 95 |
| Figura 5.10. Cambio de idioma | 95 |
| Figura 5.11. Opción File..... | 96 |
| Figura 5.12. Menú Options..... | 97 |
| Figura 5.13. Menú Help..... | 97 |
| Figura 5.14. Menús rápidos | 98 |

ÍNDICE DE TABLAS

2. MARCO TEÓRICO

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1. Clasificación de las ondas según su banda de trabajo | 5 |
| Tabla 2.2. Principales líneas espectrales en el visible | 7 |
| Tabla 2.3. Bandas de radiofrecuencia..... | 8 |
| Tabla 2.4. Bandas de TV | 9 |
| Tabla 2.5. Bandas de microondas | 10 |
| Tabla 2.6. Bandas del infrarrojo | 11 |
| Tabla 2.7. Bandas de ultravioleta | 11 |
| Tabla 2.8. Bandas de rayos X..... | 11 |

3. ESTUDIO DE LA ANTENA DSS-65

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1. Coordenadas de la antena DSS-65 | 41 |
| Tabla 3.2. Frecuencias de funcionamiento de la antena DSS-65 | 42 |
| Tabla 3.3. Parámetros de transmisión y recepción de la antena DSS-65 | 42 |
| Tabla 3.4. Coeficientes de la temperatura de la antena | 54 |
| Tabla 3.5. Distribuciones acumulativas..... | 54 |
| Tabla 3.6. Atenuación atmosférica del zenit en función de la distribución acumulativa | 55 |
| Tabla 3.7. Parámetros de ganancia en vacío..... | 56 |
| Tabla 3.8. Dimensiones de la antena DSS-65 | 71 |
| Tabla 3.9. Parámetros del nuevo radiotelescopio | 72 |
| Tabla 3.10. Dimensiones generales de una antena Yagi-Uda | 73 |
| Tabla 3.11. Dimensiones de los componentes de la antena Yagi-Uda..... | 74 |
| Tabla 3.12. Dimensiones de las separaciones entre los componentes de la antena Yagi-Uda | 74 |
| Tabla 3.13. Parámetros de la antena Yagi-Uda | 74 |
| Tabla 3.14. Parámetros de una antena parabólica con foco centrado y una antena Cassegrain..... | 75 |
| Tabla 3.15. Parámetros de la bocina corrugada..... | 82 |
| Tabla 3.16. Profundidades de ranura según su posición..... | 83 |
| Tabla 3.17. Parámetros de VLBI..... | 84 |
| Tabla 3.18. Parámetros de las diferentes estructuras..... | 84 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio para poder reutilizar la antena DSS-65, localizada en el MDSCC (Madrid Deep Space Communications Complex), como un radiotelescopio funcional con una resolución adecuada de cara a poder ser utilizada en el ámbito de la radioastronomía. Otros objetivos a nivel personal es la capacidad de poder realizar un proyecto de tal envergadura con el fin de adquirir nuevos conocimientos acerca de la astronomía, desconocidos hasta la fecha.

1.2 MOTIVACIONES

A lo largo de mi vida, he ido tropezándome con diversos baches, que, de mejor o peor manera, he ido resolviendo a lo largo del tiempo. Gracias a este hecho, siempre he buscado nuevos retos a los que enfrentarme ya que la superación personal es lo que más me motiva, así como el hecho de aprender nuevos conceptos. Por esta razón, emprendí uno de los mayores retos al que me he enfrentado, realizar el Grado de Tecnologías de Telecomunicación.

Una vez dentro, he ido aprendiendo conceptos, muchos de los cuales eran desconocidos para mí. El hecho de aplicar estos conceptos sobre situaciones reales es lo que más me ha motivado en este grado, por lo que me ha hecho decidir que mi Trabajo de Fin de Grado debería de estar relacionado con una aplicación real.

Cuando Pablo Corral González propuso el estudio de validación de una antena para poder transformarla en un radiotelescopio como un posible TFG, me di cuenta instantáneamente que ambos objetivos que debía tener mi TFG estaban contemplados en este tema. Por una parte, el aprendizaje de conceptos nuevos puesto que nunca había estudiado nada relacionado con la radioastronomía y, por otra parte, la aplicación real de este proyecto, puesto que sería una herramienta para un futuro proyecto de mayor envergadura.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

En este estudio, he expuesto las posibles soluciones más eficaces para la conversión de la antena DSS-65 para su uso como radiotelescopio.

Para ello, he realizado una introducción previa de diversos conceptos teóricos necesarios a la hora de realizar este estudio de manera precisa, como son el espectro electromagnético, los tipos de radiación existentes, los diferentes sistemas de coordenadas utilizados hoy en día y matices de la radioastronomía general.

En el siguiente punto, he expuesto las características y funcionamiento de nuestra antena inicial, una antena de tracking perteneciente a la DSN (Deep Space Network) y, nuestra antena final, un radiotelescopio. Después de exponer estas dos antenas en profundidad, he realizado el estudio de validación priorizando la utilización de los componentes actuales que conforman la antena DSS-65.

Además, he realizado un estudio alternativo para elaborar un radiotelescopio funcional en la línea de Hidrógeno (1420 MHz) a partir de las principales estructuras conocidas, incluyendo la estructura Cassegrain que compone la antena de partida.

Por último, he escrito las conclusiones a las que he llegado realizando este trabajo, así como las posibles futuras líneas de trabajo que se puede llegar a producir mediante este estudio.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias, a través de las cuales se transmite radiación electromagnética comprendiendo este último término como el flujo saliente de energía de una fuente mediante ondas electromagnéticas (propagación de campo electromagnético).

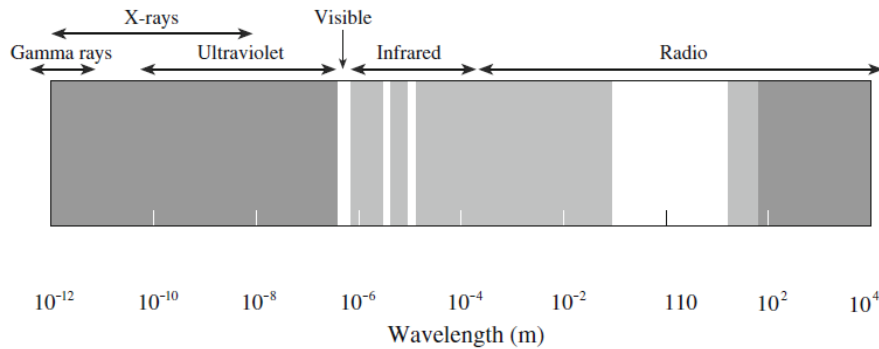


Figura 2.1. Espectro electromagnético normalizado

Las ondas electromagnéticas son ondas emitidas o absorbidas por objetos celestes y tienen la capacidad de moverse por todo el espacio a la velocidad de luz c (299792458 km/s). Estas ondas se pueden caracterizar, principalmente, mediante dos parámetros:

- Frecuencia: Número de veces que se repite un suceso por unidad de tiempo. En términos electromagnéticos, es el número de ciclos que comprende una onda en un segundo, entendiendo como número de ciclos, el número de veces que caracteriza el mismo valor de amplitud.
- Longitud de onda: La distancia recorrida por parte de una onda en un ciclo. Se suele medir en metros, pero también podemos utilizar los Ångstrom (\AA) para las ondas más cortas puesto que $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$. Este parámetro se puede calcular mediante la frecuencia (f) de la onda y la velocidad de propagación del medio (v), de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

El espectro electromagnético se dice que no tiene límite superior teórico, es decir, se considera infinito. Este comprende desde la frecuencia 0 Hz hasta el infinito; de esa manera, podemos afirmar que todas las ondas electromagnéticas, sea cual sea su frecuencia de propagación, estarán localizadas dentro del espectro electromagnético [1].

Sin embargo, caracterizando la radiación mediante la longitud de onda, podemos aproximar la longitud de onda mínima (frecuencia máxima) mediante la longitud por debajo de la cual se espera que el espacio deje de tener una geometría clásica.

Esta longitud recibe el nombre de Longitud de Planck definida de la siguiente manera:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \quad (2.2)$$

Siendo \hbar la Constante de Planck reducida cuyo valor aproximado es $1.055 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, siendo G la constante de Gravitación Universal igual a $6.674 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$, y, siendo c la velocidad de la luz en el vacío cuyo valor es de $3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sustituyendo los valores previamente descritos en la ecuación 2.2, el valor de la longitud de Planck es de aproximadamente $1.615 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ [2].

Una vez definida la longitud de onda más pequeña, falta definir el otro extremo del espectro electromagnético que, hoy en día, se considera el tamaño del universo como la mayor longitud de onda posible. Con respecto al tamaño de este, cabe destacar que es un tema polémico ya que diferentes artículos han dado diferentes medidas sobre este parámetro. Hoy en día, no se sabe con certeza el tamaño del universo, pero se toma como base las observaciones realizadas por la NASA con su sonda espacial WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) que dicen que, a parte del hecho de que el Universo es plano con un margen de error del 0.4%, el volumen del Universo es cercano al infinito además de estar en expansión continua. Por tanto, el límite superior del espectro electromagnético es indefinido [3].

Estas ondas electromagnéticas generan campos electromagnéticos polarizados cuya oscilación y dirección de propagación son perpendiculares entre sí además de que se alimentan entre sí, es decir, el cambio del campo magnético crea un campo eléctrico y viceversa.

Decimos que la radiación electromagnética se polariza cuando las direcciones de los campos radiados no se distribuyen uniformemente. Hay diferentes tipos de radiación electromagnética:

- Polarización lineal: Los campos oscilan en una sola dirección.
- Polarización circular: Los campos giran sobre el eje de propagación mediante un movimiento circular sobre el mismo.
- Polarización elíptica: Los campos giran sobre el eje de dirección mediante un movimiento elíptico sobre el mismo.

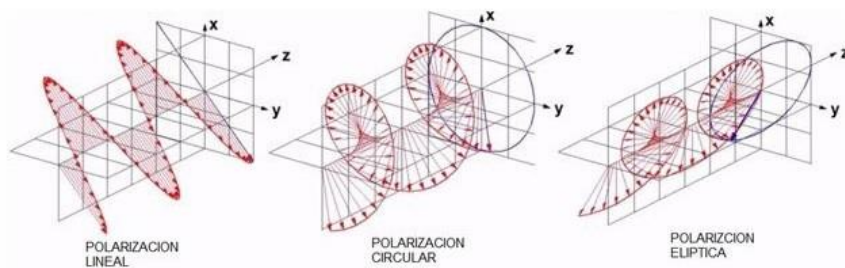


Figura 2.2. Tipos de polarización

El proceso de dispersión consiste en un proceso de absorción seguido de una emisión espontánea en otra dirección, pero, en la misma longitud de onda. La luz que pasa por este proceso está polarizada con un mayor ángulo de polarización en la dirección perpendicular a la dirección original de propagación. Este proceso puede crear radiación mediante un proceso de dispersión de ondas llamado dispersión de Rayleigh.

Esta radiación surge cuando la longitud de onda de las ondas radiadas es mucho mayor que el tamaño de la partícula que conforma la radiación. Esta radiación sufre una atenuación proporcional a $\frac{1}{\lambda^4}$, de manera que cuando mayor sea la frecuencia de trabajo, mayor atenuación obtendremos por parte de la dispersión de Rayleigh [4].

Además, cabe resaltar que todos estos procesos electromagnéticos son modelados por las ecuaciones de Maxwell, datadas del 1865.

2.1.1 DIVISIÓN DEL ESPECTRO

El espectro electromagnético se puede dividir en intervalos de frecuencias adyacentes entre sí. Estos reciben el nombre de bandas de frecuencias.

Según las bandas de actuación del espectro electromagnético, las ondas se pueden clasificar según su frecuencia en los siguientes tipos:

| Banda | frec. mínima (Hz) | frec. máxima (Hz) |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| Ondas de radio | $30 * 10^3$ | $3 * 10^8$ |
| Microondas | $3 * 10^8$ | $300 * 10^9$ |
| Rayos infrarrojos | $300 * 10^9$ | $3.84 * 10^{14}$ |
| Luz Visible | $3.84 * 10^{14}$ | $7.89 * 10^{14}$ |
| Rayos Ultravioletas | $7.89 * 10^{14}$ | $30 * 10^{15}$ |
| Rayos X | $30 * 10^{15}$ | $30 * 10^{18}$ |
| Rayos Gamma | $30 * 10^{18}$ | - |

Tabla 2.1. Clasificación de las ondas según su banda de trabajo

Ondas de radio (radiofrecuencia): Ondas, que se caracterizan, entre otras cosas, por ser las ondas con mayor longitud de onda del espectro electromagnético y, ser capaces de atravesar la atmósfera fácilmente ya que no se excitan fácilmente con los átomos atmosféricos, de manera que nos permite interactuar con satélites artificiales (radiocomunicaciones) así como recibir este mismo tipo de ondas formadas a partir de fenómenos espaciales (estrellas, gases ionizados...). Para frecuencias menores que las dispuestas en la tabla 2.1, la radiación se refleja en función de la ionosfera [5].

Estas ondas se observan mediante radiotelescopios dispuestos en sitios deshabitados para aislarse de transmisiones de radio y televisión externas, para así, poder evitar interferencias no deseadas.

Microondas: Ondas localizadas en la parte de UHF, así como en todo el espectro ocupado por SHF y EHF. Utilizadas para la transmisión de datos mediante satélites, radares...

Rayos Infrarrojos: Este tipo de rayos son emitidos por todo cuerpo cuya temperatura exceda el cero absoluto (-273,15 °C), es decir, este tipo de rayos están directamente relacionados con la temperatura de los cuerpos [6].

Son rayos que se transmiten mediante mecanismos térmicos que más adelante explicaré. Como la temperatura es inversamente proporcional a la longitud de onda de emisión, la

mayoría de los objetos cotidianos emiten en este rango del espectro electromagnético. Este tipo de radiación no puede penetrar ni la atmósfera terrestre ni en las paredes. Radiación no ionizante empleada en múltiples disciplinas tales como [6]:

- Comunicaciones mediante la utilización de fibra óptica y radiocomunicaciones de muy corto alcance.
- Espectrometría: Espectrometría de absorción utilizada para la investigación de la composición de la materia.
- Visión nocturna mediante la detección de cuerpos por la luminosidad que estos radian sobre imágenes en el infrarrojo.
- Guiado de misiles.
- Meteorología, climatología y astronomía.

A la hora de captar estos rayos para su posterior análisis, se debe tener en cuenta que estamos captando la radiación del objeto celeste a analizar, la radiación de fondo y la radiación del telescopio utilizado para captar los rayos infrarrojos. Sacando la diferencia entre la radiación de la fuente (radiación total) y la radiación de fondo, obtenemos la radiación del objeto [7].

Las observaciones del infrarrojo se realizan en zonas altas debido a que los átomos de agua atmosféricos a grandes alturas de la superficie terrestre son bajos. Los satélites ayudan a la captación y estudio de las ondas infrarrojas de manera que, estos estudios han servido para mapear el resplandor crepuscular del Big Bang.

Luz visible: Ondas visibles al ojo humano debido a su adaptación evolutiva. Radiación no ionizante, es decir, no afecta a las estructuras moleculares. Este tipo de radiación se atenúa debido a las moléculas y el polvo contenido en la atmósfera. Los límites de esta banda no son fijos debido a que dependen de la capacidad de visión de cada persona, así como de las condiciones de observación, pero los seres humanos tenemos un rango de visión aproximado desde los 400 y 700 nm. Los intervalos adyacentemente inferiores y superiores son absorbidos por átomos atmosféricos como son el oxígeno o el nitrógeno, por ejemplo [8].

La observación óptima en este rango de frecuencias sobre objetos celestes se realiza con cielo oscuro y atmósfera lo más transparente posible (poca humedad y pocas neves). De ahí que los observatorios de astronomía se localizan sobre montañas altas, lejos de la contaminación lumínica producida por la ciudad.

A la hora de realizar observaciones en este rango de frecuencias, se debe tener en cuenta los procesos de dispersión y de absorción de luz visible a causa de los diferentes factores posibles. Entre ellos, los más importantes son causados por el medio de transmisión, en nuestro caso, los efectos causados por la atmósfera terrestre debido a sus diversas características según las diferentes capas de esta.

Las diferentes longitudes de onda que se encuentran en esta banda producen el efecto de los colores. Los tres colores primarios (azul, amarillo y rojo) son los únicos colores que se captan a partir de una banda propia de longitud de onda, mientras que los otros colores perceptibles por el ojo humano se captan a partir de la unión de estos tres colores primarios.

Las líneas más importantes del espectro visible son las se visualizan en la siguiente tabla:

| Color | Longitud de onda (*10 ⁻⁹ metros) |
|----------|--|
| Violeta | 420 |
| Azul | 470 |
| Verde | 530 |
| Amarillo | 580 |
| Naranja | 610 |
| Rojo | 660 |

Tabla 2.2. Principales líneas espectrales en el visible

Sus usos más importantes son para comunicaciones, como es el caso de VLC (Visible Light Communications) y FSO (Free Space Optical). Estas tecnologías permiten la transmisión de información mediante la propagación de luz visible. Concretamente, VLC se utiliza para espacios más reducidos porque su rendimiento es muy limitado a grandes distancias (utilización de ancho de banda). En el caso de FSO, se utiliza en espacios más grandes en el espacio libre. Esta tecnología está libre de interferencias electromagnéticas [9].

Rayos Ultravioletas: Radiación muy energética que pueden llegar a arrancar electrones que componen los átomos de la atmósfera terrestre. Las ondas con longitudes por debajo de 300 nm son bloqueadas por la atmósfera. La mayor parte de la radiación producida por las estrellas son rayos ultravioletas.

Las aplicaciones más destacadas de estos rayos son la esterilización (junto con los rayos infrarrojos), lámparas fluorescentes para la autenticación de documentos oficiales, billetes... Esta radiación no es utilizada para comunicaciones porque puede ser perjudicial para el ser humano ya que es una radiación muy energética.

Rayos X: Radiación producida por la desaceleración brusca de un haz de electrones a alta velocidad, a raíz de un obstáculo. Radiación ionizante ya que ioniza los átomos de la materia al interactuar con la misma. Este tipo de radiación tiene el tamaño de un átomo propio (10^{-11} m).

No se utiliza en comunicaciones por ser ondas muy energéticas, así como de alta frecuencia, las cuales acusan de gran nivel de atenuación con respecto a comunicaciones de frecuencias más bajas. Sin embargo, al ser capaz de atravesar objetos opacos, se utiliza para realizar radiografías y para crear fuentes de ionización. Otros usos de estas ondas son los siguientes:

- **Cristalografía:** Estudio de estructuras cristalinas mediante la difracción de este tipo de rayos sobre ellas por tener una longitud de onda similar a la distancia entre los átomos que componen este tipo de estructuras.
- **Astronomía** mediante la ayuda de satélites puesto que la radiación X no sobrepasa la atmósfera terrestre.
- **Escaneado** de mercancías en fronteras, aeropuertos, estaciones de tren...

Rayos Gamma: Energía procedente de fuentes y procesos nucleares. Estos rayos, los cuales son los más energéticos de todo el espectro electromagnético, sirven para el estudio

de regiones de alta energía con ayuda de satélites ya que esta radiación no puede traspasar la atmósfera. Radiación ionizante. Otras utilidades de este tipo de ondas es la esterilización de material médico e incluso para microcirugía.

La diferencia con respecto a los rayos X es el origen de radiación y, el nivel de energía emitido. De hecho, la frontera de esta ventana con respecto a la ventana de rayos X no es fija.

Estos rayos tienen el tamaño proporcional al núcleo de un átomo, que es de aproximadamente 10^{-15} metros y sus ondas son tan energéticas que pueden atravesar una placa de hierro grueso [10].

Este tipo de radiación se puede percibir mediante el uso de detectores de centelleo, los cuales, transforman la radiación gamma en luz visible mediante efecto fotoeléctrico. Cabe destacar que la resolución de estas ondas es muy baja con respecto al resto de ondas de las diferentes ventanas del espectro.[11]

Pese a que estas no traspasan la atmósfera terrestre, sus efectos se pueden detectar en la superficie terráquea puesto que, al incidir sobre la atmósfera, las partículas se mueven a mayor velocidad que la velocidad de la luz en la Tierra, generando radiación Cherenkov, radiación visible.

Una vez distribuido el espectro, se pueden realizar subdivisiones de las mismas bandas en otras más pequeñas y específicas para diferentes funciones. En el rango de las ondas de radio, se utiliza esta distinción de bandas [5]:

| Banda | Denominación | frec. mínima (Hz) | frec. máxima (Hz) |
|-------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| ELF | Extremely Low Frequency | - | $3 * 10^3$ |
| VLF | Very Low Frequency | $3 * 10^3$ | $30 * 10^3$ |
| LF | Low Frequency | $30 * 10^3$ | $300 * 10^3$ |
| MF | Medium Frequency | $300 * 10^3$ | $3 * 10^6$ |
| HF | High Frequency | $3 * 10^6$ | $30 * 10^6$ |
| VHF | Very High Frequency | $30 * 10^6$ | $300 * 10^6$ |
| UHF | Ultra High Frequency | $300 * 10^6$ | $3 * 10^9$ |
| SHF | Super High Frequency | $3 * 10^9$ | $30 * 10^9$ |
| EHF | Extremely High Frequency | $30 * 10^9$ | $300 * 10^9$ |

Tabla 2.3. Bandas de radiofrecuencia

ELF: Señales de sonido más graves perceptibles por el oído humano.

VLF: Ondas de superficie caracterizadas por una baja tasa binaria, así como de bajos niveles de atenuación. Se utiliza en radioenlaces con largas distancias y en aplicaciones de radionavegación.

LF: Ondas de superficie con baja atenuación. Su uso principal es el de transmitir frecuencias patrón, señales con un alto grado de estabilidad en su propagación. Otras aplicaciones que se utilizan en esta banda son la navegación marítima y espacial, sistemas de radiodifusión analógica (AM) y comunicaciones entre radioaficionados.

MF: Se puede propagar mediante onda de superficie o por onda ionosférica, teniendo en cuenta que las ondas de superficie recorren una menor distancia de propagación con respecto a las ondas ionosféricas. Por el contrario, las ondas de superficie se pueden utilizar a todas horas mientras que la onda ionosférica en este rango solo se puede utilizar

por la noche. Sus usos principales son para comunicaciones marítimas, espaciales, radiotelefónicas y sistemas de radiodifusión analógica, más concretamente en AM.

HF: Onda ionosférica con un alcance dependiente de la hora de la transmisión y la época del año, pudiendo también propagarse por onda de superficie si las condiciones de la ionosfera son insuficientes para su utilización. Esta banda es muy utilizada por radioaficionados.

Se puede dividir esta parte de espectro mediante la siguiente subdivisión:

- *Bandas bajas* (3 – 10 MHz): Bandas nocturnas
- *Bandas intermedias* (10 – 14 MHz): Rango de frecuencias que comparten propiedades de bandas bajas y altas de HF.
- *Bandas altas* (14 – 30 MHz): Bandas diurnas

VHF: Comunicaciones con visión directa entre pequeñas distancias. Sus usos principales son la radiodifusión en FM, el control del tráfico aéreo, las comunicaciones entre radioaficionados, parte de la TV digital actual además de radiotelefonía.

UHF: Onda troposférica con visión directa y dispersión ionosférica que comprende distancias de 600 km. Esta banda se utiliza principalmente en telefonía y para televisión digital (TDT).

SHF: Transmisión de ondas troposféricas con visión directa. Se utiliza en radares y comunicaciones satélite, más concretamente, en radiodifusión satélite.

EHF: Muy sensible al medio. Utilizada en radioastronomía y para comunicaciones satélite.

2.1.1.1 TELEVISIÓN DIGITAL

Dentro de la transmisión de ondas de radio, se localizan las bandas distribuidas para la TV digital, las cuales se localizan dentro de las bandas VHF y UHF principalmente siguiendo el siguiente desarrollo [5]:

| Banda | frec. mínima (Hz) | frec. máxima (Hz) |
|-------|-------------------|-------------------|
| I | $47 * 10^6$ | $68 * 10^6$ |
| II | $87.5 * 10^6$ | $108 * 10^6$ |
| III | $174 * 10^6$ | $230 * 10^6$ |
| IV | $470 * 10^6$ | $606 * 10^6$ |
| V | $606 * 10^6$ | $862 * 10^6$ |
| VI | - | $12 * 10^{12}$ |

Tabla 2.4. Bandas de TV

Dentro de estas diferentes bandas, se localizan los canales de TV digital terrestre (TDT) repartidos entre las bandas I y V mientras que la banda VI nos permite analizarla de diferente manera con respecto a las demás ya que se propaga en unas frecuencias muy superiores. Esto es debido a que en esta banda se propagan los canales por satélite.

2.1.2 BANDA DE MICROONDAS

En el ámbito de las microondas, tenemos la siguiente distribución de bandas de trabajo [5]:

| Banda | frec. mínima (GHz) | frec. máxima (GHz) |
|-------|--------------------|--------------------|
| L | 1 | 2 |
| S | 2 | 4 |
| C | 4 | 8 |
| X | 8 | 12.4 |
| Ku | 12.4 | 18 |
| K | 18 | 26.5 |
| Ka | 26.5 | 40 |
| mm | 40 | 300 |

Tabla 2.5. Bandas de microondas

Más concretamente, esta nomenclatura está relacionada con las comunicaciones satélites ya que estos, entre otras funciones, se encargan de captar señales de aquellas bandas que no pueden traspasar la atmósfera terrestre. Una vez que captan estas señales, se encargan de procesarlas para después transmitir las hacia la superficie terrestre mediante las diferentes bandas de microondas especificadas en la tabla 2.5.

Banda L: Onda larga. La principal aplicación localizada en la banda L es la telefonía móvil, más concretamente, para 4G. Otras aplicaciones de esta banda son la navegación por satélite, radiodifusión digital y para la radioastronomía, ya que esta banda contiene la línea de Hidrógeno.

Banda S: Onda corta. Utilizada principalmente para comunicaciones por satélite y radares meteorológicos.

Banda C: Compromiso entre S y X. Los aceleradores de partículas utilizan alimentadores que trabajan en esta banda.

Banda X: Usada en la Segunda Guerra Mundial por los sistemas de control de fuego, sistemas diseñados para controlar, apuntar y disparar contra diferentes blancos en función de sus características. Los usos principales en la actualidad de esta banda son las comunicaciones por satélite y radares de banda estrecha.

Banda Ku (Kurz-unten): Utilizada para la TV satélite.

Banda K (Kurz): Puede ser absorbida por agua, por tanto, se debe utilizar en aplicaciones espaciales ya que la atmósfera es un escenario poco aprovechable para este tipo de ondas.

Banda Ka (Kurz-above): Transmisión de gran cantidad de datos, requiriendo una gran potencia de transmisión. Se utilizan principalmente sobre transmisiones satélite y radares.

2.1.3 RAYOS INFRARROJOS

Dentro de la radiación infrarroja, existe la siguiente subdivisión según sus frecuencias límite [7]:

| Banda | frec. mínima (Hz) | frec. máxima (Hz) |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| Infrarrojo lejano | $3 * 10^{11}$ | $6 * 10^{12}$ |
| Infrarrojo medio | $6 * 10^{12}$ | $1.2 * 10^{14}$ |
| Infrarrojo cercano | $1.2 * 10^{14}$ | $3.75 * 10^{14}$ |

Tabla 2.6. Bandas del infrarrojo

Infrarrojo lejano: Emisión de cuerpos muy fríos. Se utiliza para el estudio de los gases fríos.

Infrarrojo medio: También recibe el nombre de infrarrojo térmico ya que la mayoría de los objetos en la Tierra transmite en estas frecuencias por radiación de cuerpo negro.

Infrarrojo cercano: Utilizado para el estudio de objetos celestes como las estrellas o las nubes moleculares entre otros. En este rango, se pueden observar las transiciones rotacionales y vibracionales de diferentes tipos de moléculas, de manera que ofrecen información espectral de los objetos a estudiar.

2.1.4 ONDAS ULTRAVIOLETA

Con respecto a la radiación ultravioleta, obtenemos las siguientes subdivisiones de esta banda en función de la frecuencia [12]:

| Banda | frec. mínima (Hz) | frec. máxima (Hz) |
|-------|-------------------|-------------------|
| UVA1 | $7.5 * 10^{14}$ | $8.82 * 10^{14}$ |
| UVA2 | $8.82 * 10^{14}$ | $9.52 * 10^{14}$ |
| UVB | $9.52 * 10^{14}$ | $1.07 * 10^{15}$ |
| UVC | $1.07 * 10^{15}$ | $3 * 10^{15}$ |

Tabla 2.7. Bandas de ultravioleta

UVA1: No es absorbida por la atmósfera.

UVA2: No es absorbida por la atmósfera.

UVB: Alrededor del 90% de la misma es absorbida por la atmósfera.

UVC: Absorbidas por la capa de ozono.

2.1.5 RAYOS X

Los rayos X se pueden clasificar según las frecuencias de sus ondas de la siguiente manera:

| Banda | frec. mínima (Hz) | frec. máxima (Hz) |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| Rayos X duros | $3 * 10^{16}$ | $3 * 10^{18}$ |
| Rayos X blandos | $3 * 10^{18}$ | $3 * 10^{19}$ |

Tabla 2.8. Bandas de rayos X

Estos rayos se captan a través de contadores Geiger-Müller, cajas llenas de gas que, al entrar las ondas sobre estas cajas, el gas se ioniza y, la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, que también se encuentran en el interior de estas cajas, origina una corriente de electrones e iones [13].

2.2 ATMÓSFERA

La atmósfera está dividida en diversas capas, las cuales hacen posible que ciertos tipos de ondas se puedan observar desde la Tierra y, caracterizar el tipo de propagación de los tipos de ondas según su frecuencia.

Según el tipo de propagación en la Tierra, las ondas se pueden clasificar de la siguiente manera [5]:

Onda de superficie: Frecuencias inferiores a 30 MHz. Tiene un largo alcance, así como una gran estabilidad en su propagación por el globo terráqueo. Su única debilidad es que tiene una gran dependencia con respecto a las características del suelo.

Onda ionosférica: Frecuencias entre 3 y 30 MHz. Se propaga mediante la reflexión de las ondas en la ionosfera (80 – 150 Km). Proporciona grandes alcances, pero con inestabilidad debido al comportamiento de la propia subcapa mencionada.

Onda espacial: Frecuencias superiores a 30 MHz. Se propaga gracias a la troposfera y por el suelo. Estabilidad de propagación con bajos alcances de transmisión. Se pueden propagar con visión directa o mediante reflexión con la troposfera.

Onda de dispersión troposférica: Propagación por reflexiones debidas a la inestabilidad de las características, como el índice de refracción, de la troposfera. Esto conlleva, en líneas generales, a pérdidas elevadas en su propagación.

La propagación de las ondas a través del Universo se ve afectada debido a sus propias características, así como del medio de transmisión. Los diversos factores más importantes a tener en cuenta para la transmisión en el medio son la atenuación, los obstáculos, pero, en nuestro caso, el factor más importante de propagación de estas ondas para su estudio y visionado es la atmósfera terráquea.

Con respecto al estudio de las ondas espaciales, la atmósfera terrestre solo deja pasar, principalmente las ondas de radio y, el espectro visible, las cuales debemos tener en cuenta que, al pasar a través de la atmósfera, cambian de amplitud de fase con respecto al tiempo; absorbiendo todas las demás bandas de frecuencias. El cambio de amplitud de estas ondas produce centelleo mientras que el cambio de fase difumina la imagen. Además de estas, se pueden percibir pequeñas bandas de infrarrojos desde la cima de las montañas más altas de la Tierra [14].

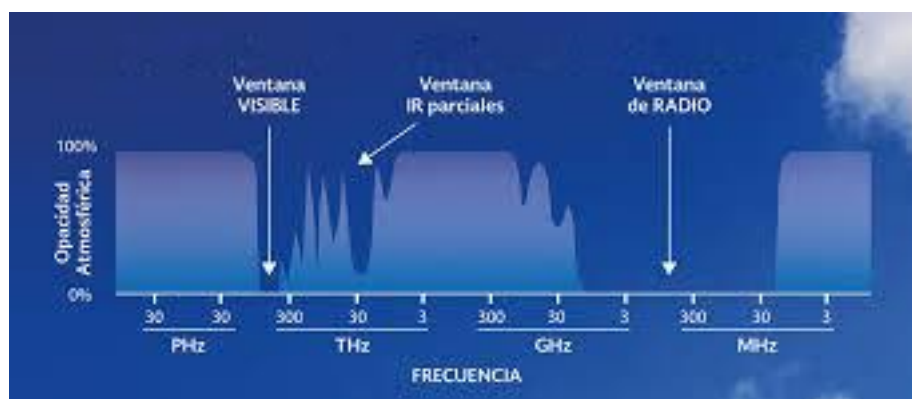


Figura 2.3. Ventanas atmosféricas

En el caso de las ondas de radio, se utiliza la radioastronomía con la ayuda de radiotelescopios; en el caso del espectro visible, hablamos de astronomía visible, la cual se desarrolla con la ayuda de telescopios. Para el resto de las bandas, las ondas deben ser tratadas anteriormente mediante la intervención de satélites artificiales para que estos, puedan transmitir su información a través de señales de radio y/o señales en el visible a la superficie de la Tierra.

Con respecto a la radiación interior, la atmósfera bloquea la radiación de calor procedente de la superficie terrestre producida, en gran medida, por gases nocivos. Este bloqueo recibe el nombre de efecto invernadero.

2.2.1 MECANISMOS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las ondas electromagnéticas se pueden radiar de diferentes formas en función de diferentes parámetros a tener en cuenta (longitud de onda, medio...) pero la forma más característica de catalogar las emisiones de estas ondas es teniendo en cuenta si este proceso se realiza mediante efectos térmicos producidos en la fuente.

Por tanto, se pueden clasificar la emisión de ondas en mecanismos térmicos para aquellos procesos de transmisión de ondas que dependen de la temperatura de la fuente y, mecanismos no térmicos para aquellos donde dependen de otros parámetros diferentes a la temperatura de la fuente de emisión. En los mecanismos térmicos, la energía es mayor cuando mayor es la frecuencia mientras que en los mecanismos no térmicos, la energía de radiación aumenta a medida que disminuye la frecuencia de radiación.

2.2.1.1 MECANISMOS TÉRMICOS

Los mecanismos térmicos de radiación más importantes son:

Radiación de cuerpo negro [15]: Este tipo de radiación es emitida por toda aquella materia que radia energía cuando se calienta por encima del cero absoluto puesto que está en equilibrio termodinámico, con lo que, al absorber cualquier tipo de radiación, la vuelve a radiar (proceso de re-radiación) sin pérdidas de absorción ni emisión. Esta re-radiación se caracteriza según las propiedades del cuerpo material, no del tipo de radiación incidente.

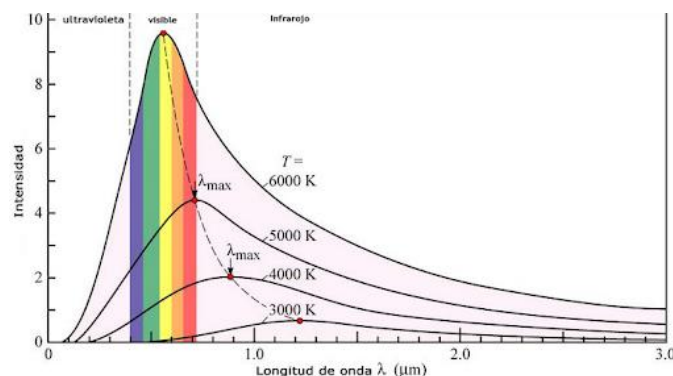


Figura 2.4. Gráfica de caracterización de radiación de un cuerpo negro

La intensidad de radiación y la distribución de frecuencias radiadas dependerá directamente de la siguiente expresión:

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)} \quad (2.3)$$

Siendo B_ν la intensidad de radiación, ν la frecuencia de transmisión, h la constante de Planck cuyo valor es de $6.63 * 10^{-34} \text{ kgm}^2\text{s}^{-1}$ y, k la constante de Boltzmann cuyo valor es de $1.38 * 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ y, T como la temperatura del objeto [16].

También podemos obtener una relación entre la luminosidad y la temperatura de un cuerpo celeste gracias a la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T_e^4 \quad (2.4)$$

Siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de $5.67 * 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ y, T_e la temperatura efectiva del cuerpo [17].

A mayor temperatura o menor longitud de onda de emisión, mayor energía de radiación emitirá el cuerpo, es decir, los cuerpos más fríos radian en longitudes de onda grandes mientras que los cuerpos más calientes radian en longitudes de onda más pequeñas. Además de esto, estos cuerpos emiten mayor energía cuando más rápidas se mueven sus partículas (si un cuerpo está a 0 K, quiere decir que sus partículas no se mueven).

Este tipo de radiación es continua si el radiador es suficientemente grande con respecto a las longitudes de onda transmitidas.

Toda la materia se puede tomar como un cuerpo negro ya que todo cuerpo es capaz de absorber energía al calentarla, así como tiene la capacidad de radiar energía debido a la temperatura del mismo.

Radiación en gases ionizados: Plasma que se genera dentro de la atmósfera por los cinturones de Van Allen, dos zonas que rodean la Tierra compuestas por partículas cargadas energéticamente, caracterizadas por tener una gran velocidad de movimiento, y el viento solar, partículas cargadas con mucha energía producidas por el Sol. El primer cinturón de Van Allen se encuentra entre los 1000 y 5000 km con respecto al nivel del mar mientras que el segundo se encuentra entre los 15000 y 20000 km.

El ion se encarga de generar la energía electromagnética ya que es el que sufre las aceleraciones y las deceleraciones producidas por el campo magnético. Este tipo de radiación mediante el cambio de dirección y velocidad de los iones recibe el nombre de radiación de frenado. Este plasma contiene un conjunto de átomos ionizados (buenos conductores) y un conjunto de átomos neutros generados por la colisión entre átomos debido al cambio de velocidades de los iones. Esta colisión hace posible que este proceso sea continuo indefinidamente y, por tanto, pueda generar los campos magnéticos. La frecuencia de plasma se define como:

$$\nu_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}} = 8.98 \sqrt{N_e} \quad (2.5)$$

Siendo N_e la densidad de electrones (m^{-3}) [5].

Radiación por líneas espectrales: Emisión debida a la excitación de átomos o moléculas. La excitación de átomos produce fotones como resultado, los cuales se transmiten a frecuencias discretas dentro del espectro electromagnético. Este tipo de radiación recibe su nombre debido a que los fotones se transmiten sobre líneas espectrales específicas. [15]

Las frecuencias de emisión dependen de la diferencia de niveles energéticos antes y después de la excitación del átomo. Si el átomo salta a un nivel energético inferior, emite radiación (fotón) mientras que, si salta a un nivel energético mayor (excitación), se absorbe radiación. La diferencia de energía emitida/absorbida se caracteriza mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (2.6)$$

Siendo ν la frecuencia del fotón emitido/absorbido y c la velocidad de la luz. Como los niveles energéticos de un átomo están cuantificados en función de los electrones que componen el átomo, la energía emitida/absorbida también está cuantificada, es decir, solo pueden tener una serie de valores.

La línea más estudiada a lo largo de la historia en el campo de la radioastronomía es la llamada Línea de Hidrógeno (Línea HI) cuya emisión sucede debido a la excitación de átomos de hidrógeno que, no son más que átomos compuestos de un electrón y un protón orbitando circularmente alrededor de este, ofreciendo como resultado la emisión de fotones a una longitud de onda igual a 21.11 cm, el equivalente a 1421.13 MHz [15].

Si tenemos en cuenta la excitación de moléculas, debemos diferenciar dos tipos de estados de excitación cuantizados. Por una parte, la excitación rotacional se produce cuando existe una rotación de las moléculas alrededor de un eje y, por otra parte, la excitación vibracional se sucede cuando los átomos que componen las moléculas se encuentran en estado de vibración [18].

2.2.1.2 MECANISMOS NO TÉRMICOS

Los mecanismos no térmicos más importantes son los siguientes:

Radiación sincrotrón: Mayor parte de la radiación espacial. Radiación electromagnética de partículas cargadas, tales como electrones y positrones, con velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Esta radiación se genera cuando estas partículas se adentran en el interior de un campo magnético. Dentro de este campo, estas partículas sufren un movimiento en forma de espiral (figura 2.5) de manera que, se genera una aceleración centrípeta que causa la emisión de la radiación sincrotrón. Estas partículas radian en la dirección del vector velocidad. La intensidad generada por esta radiación depende de la velocidad de las partículas en la espiral.

Según las velocidades de las partículas, se pueden diferenciar dos tipos de radiación:

- Radiación ciclotrón: Velocidades no relativistas (lejanas a la velocidad de la luz).

- Radiación sincrotrón: Velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz (velocidades relativistas).

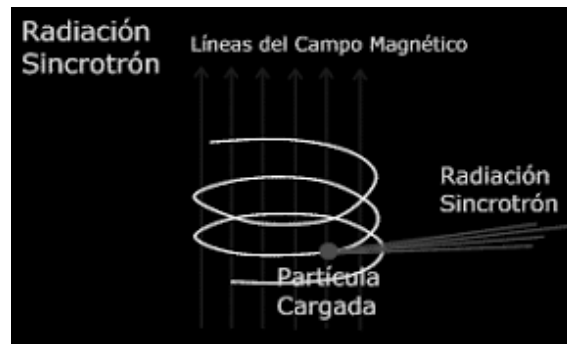


Figura 2.5. Radiación sincrotrón

Radiación máser: Señales muy débiles que sufren una gran amplificación. Consiste en la excitación de partículas neutras que, si durante este proceso incide un fotón sobre estas partículas se genera un fotón extra, produciendo una inversión de población [15].

Un fotón es una cantidad de energía, sin carga eléctrica, asociada a una radiación electromagnética. Se crean en la emisión de radiación y se consumen en la absorción de radiación. Cada átomo, ion o molécula puede emitir/absorber un número de fotones determinados.

Los principales tipos de emisiones son los siguientes:

- Emisión espontánea: Electrón salta a un nivel energético menor, produciendo la emisión de un fotón a una frecuencia ν .
- Emisión estimulada: Electrón salta a un nivel energético menor inducido por la acción de un fotón. En este proceso, se emiten dos fotones a una frecuencia con la misma dirección y fase que el fotón excitador.
- Inversión de población: Obtención de un mayor número de electrones en un nivel de energía superior con respecto al nivel inferior más inmediato.

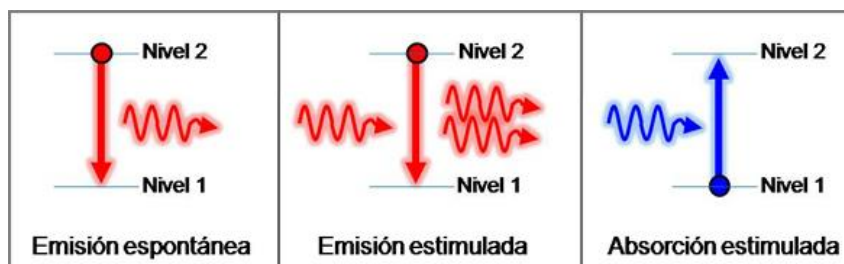


Figura 2.6. Tipos de emisión

Si los átomos excitados se iluminan por fotones con la misma energía que los propios átomos (energía de excitación), esta nueva radiación induce transiciones hacia niveles energéticos más bajos. La cantidad de fotones emitidos es superior al número de fotones absorbidos, por tanto, la radiación se amplifica. La radiación resultante es coherente y monocromática.

Esta generación de fotones continua hace posible la amplificación de las señales de emisión. Como resultado, se obtiene un haz, creado a partir de los fotones, que radia a una frecuencia determinada.

Para generar este tipo de radiación, se deben cumplir que haya suficiente gas para generar la amplificación gracias a los fotones libres (se encuentran generalmente en nubes interestelares) y, debe haber una gran fuente de energía para poder realizar la inversión de población [19].

Este tipo de radiación es muy difícil de detectar debido a que los máseres están compuestos por muy pocas moléculas, además de generar muy poca resolución, por tanto, se requiere de radiotelescopios potentes para su captación y estudio. Existen los llamados amplificadores máser que se pueden instalar en radiotelescopios para amplificar la señal recibida por la antena.

2.2.1.3 CLASIFICACIÓN DE MECANISMOS POR EMISIÓN

Estos mecanismos también se pueden clasificar según la *forma de emisión*. Según esta clasificación, podemos diferenciar entre mecanismos de emisión continua y mecanismos de líneas de emisión [15].

Se denominan mecanismos de emisión continua a aquellos sistemas que emiten en un rango del espectro continuo, es decir, es la emisión de un conjunto de líneas espectrales tan unidas que parece que formen un espectro continuo, sin gaps en toda la ventana de emisión. Cuando aumenta la presión en un gas, las líneas espectrales se empiezan a ensanchar hasta poder llegar a solaparse si la presión es suficientemente alta.

Se denominan mecanismos de líneas de emisión a aquellos cuerpos que emiten en un conjunto de longitudes de onda a lo largo de un rango espectral.

Si tenemos en cuenta los principales mecanismos de radiación ya mencionados, cabe destacar que la radiación de cuerpo negro, la radiación en gases ionizados y la radiación sincrotrón son tipos de mecanismos de emisión continua mientras que la radiación de líneas espectrales y la radiación máser son tipos de mecanismos de líneas de emisión.

2.3 FUENTES DE EMISIÓN ESPACIALES

Haciendo un barrido por todo el Universo, podemos diferenciar diferentes cuerpos que emiten radiación en forma de ondas de radio. Estas fuentes de emisión radio son conocidas también como radiofuentes. Las radiofuentes conocidas más importantes son las siguientes:

2.3.1 GALAXIA

Conjunto de todo tipo de materia interestelar, como gases y polvo, cuerpos celestes y estrellas. Esta se mantiene unida gracias a la fuerza gravitatoria ejercida por un agujero negro. Si el radio ocupado por la misma es lo suficientemente grande, la galaxia podría desaparecer con la luz de fondo del espacio y, si este radio es muy corto, se puede confundir con una estrella.

A día de hoy, no se sabe con exactitud el número de galaxias existentes en el Universo. Esta, junto con el hecho de que las galaxias están en continuo movimiento, son otras dos

razones para poder afirmar que el Universo es infinito. El movimiento continuo de las galaxias puede ocasionar la colisión entre ellas. Los diferentes tipos de galaxias se definen según su estructura. Esta clasificación recibe el nombre de Secuencia de Hubble.

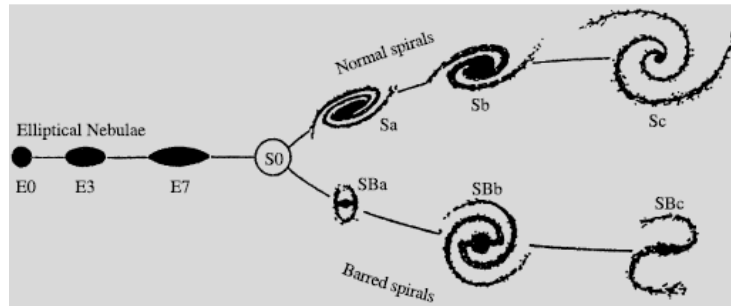


Figura 2.7. Secuencia de Hubble

Mediante esta clasificación, los principales tipos de galaxias ubicadas en el Universo son [20]:

Galaxia espiral: Formada por varios brazos y se dividen en [21]:

- Regulares: Los brazos de la galaxia salen del centro de la galaxia. En el Universo, el 70% de galaxias son de este tipo, haciéndolas las galaxias más comunes.
- Barradas (SB): Los brazos de la galaxia salen del final de una “barra central” que forma el núcleo de la galaxia. Se pueden clasificar según la fuerza de unión de sus brazos con la barra central. La fuerza de unión está directamente relacionada con el grosor de la barra central. Se clasifican de la siguiente manera:
 - SBa: Brazos de la espiral unidos con gran fuerza a la barra central.
 - SBb: Brazos unidos con una fuerza media.
 - SBc: Brazos unidos con muy poca consistencia. La Vía Láctea está clasificada entre este tipo de galaxia y la anterior.
 - SBd: Brazos unidos con casi nada de consistencia.
 - SBm: Brazos irregulares



Figura 2.8. NGC 1300 (galaxia espiral barrada)

Debido a que la Tierra forma parte de un sistema planetario que, a su vez, forma parte de la Vía Láctea, conocemos una mayor información de este tipo de galaxias que las demás galaxias. Por tanto, podemos diferenciar las partes más importantes de una galaxia espiral regular, que son las siguientes [22]:

- Halo: Estructura, en forma de esfera, que envuelve la galaxia. En esta parte de la galaxia, no se encuentran una gran cantidad de estrellas ni de nubes de gas, ni polvo interestelar. Por esta razón, en esta porción de una galaxia no se forman estrellas.

Sin embargo, en el halo se encuentran la mayoría de los cúmulos globulares, concentración esférica de estrellas que orbitan alrededor de un agujero negro (núcleo de la galaxia) y una alta concentración de materia oscura, materia que no emite radiación electromagnética.

- Disco: Formado por estrellas jóvenes contenidas en los discos espirales. Parte de la galaxia donde más formación estelar sucede, así como mayor cantidad de gas hay.
- Bulbo: Parte central de la galaxia donde se encuentran un mayor número de estrellas. Tiene forma plana y esférica. En esta parte, también se encuentra el agujero negro que mantiene el equilibrio de la galaxia.

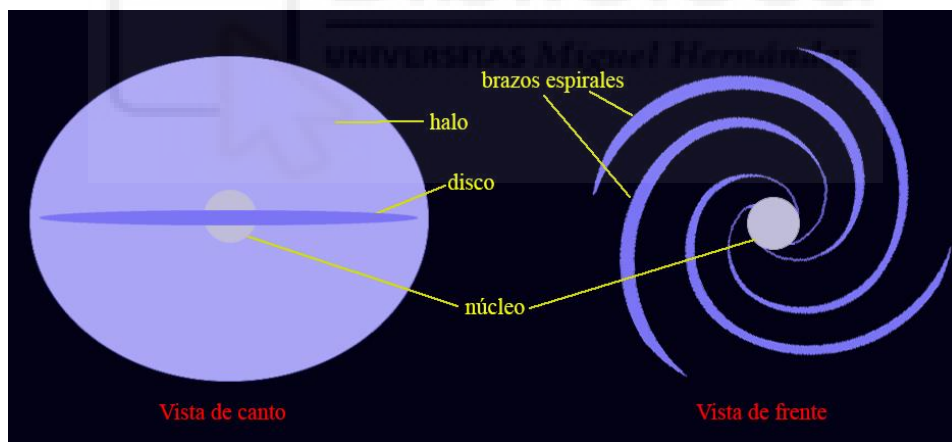


Figura 2.9. Partes de una galaxia espiral regular

Galaxia elíptica: Galaxias lisas con forma de elipse cuya densidad va descendiendo a medida que nos alejamos del centro de la misma. Se puede clasificar mediante un código alfanumérico según su grado de excentricidad. Esta clasificación va desde E0 hasta E7 siendo nula la excentricidad de las galaxias E0 (galaxias esféricas) y obteniendo la excentricidad máxima con las galaxias E7. Si son muy grandes, reciben el nombre de cD (galaxia elíptica gigante).

Galaxias que no contienen gas ni polvo para la creación de nuevas estrellas (sin materia interestelar); por tanto, estas galaxias están formadas por estrellas viejas. Normalmente, estas galaxias se encuentran en medio de clústeres de galaxias [23].

Galaxia lenticular [24]: Mezcla entre una galaxia espiral y una galaxia elíptica. No tiene brazos como la galaxia espiral, pero se asocia este tipo de galaxias a las galaxias espirales porque se cree que son galaxias espirales que perdieron los brazos debido a fuerzas gravitatorias externas. Se caracterizan por tener forma de disco (disco estelar) y haber consumido casi toda su materia interestelar.

Este tipo de galaxias se definen según la barra central mediante la siguiente clasificación:

- S0: Carecen de barra central. Poseen similitudes con las galaxias elípticas.
- SB0: Poseen barra central.

Galaxia irregular: No tienen una forma totalmente definida, pero, se asemeja a la forma de manchas irregulares. Se clasifican de la siguiente manera:

- Galaxia Irr-I: Tienen una estructura poco definida, insuficiente para ser definida. Son galaxias ricas en gas y contienen una gran cantidad de estrellas jóvenes.
- Galaxia Irr-II: No tienen estructura.

También se pueden observar otras galaxias más pequeñas que las anteriores o que su densidad es mucho menor que la densidad de las galaxias previamente nombradas. Estas galaxias se denominan galaxias enanas [25].

2.3.2 PLANETA

Cuerpo celeste definido a partir de las siguientes condiciones adoptadas en el 2006 por la UAI (Unión Astronómica Internacional):

- Órbita alrededor de una estrella, no de otros cuerpos como satélites.
- Masa capaz de generar una fuerza de gravedad propia manteniendo una forma esférica.
- Tiene dominancia orbital, es decir, el espacio cercano al de un planeta requiere de ausencia de otros cuerpos de tamaños similares que puedan producir influencia gravitatoria sobre el planeta.
- No emite luz por sí mismo.

A su misma vez, se definió como planeta enano todos aquellos cuerpos que cumplieran los dos primeros puntos de las condiciones anteriores sin cumplir el tercero [26].

2.3.2.1 ÓRBITA PLANETARIA

Una órbita es la trayectoria que sigue un planeta al girar sobre un cuerpo estelar. Estas se definen mediante los siguientes parámetros [27]:

- Eje semimayor
- Excentricidad
- Inclinación: La oblicuidad del plano orbital con respecto a un plano de referencia. El plano de referencia en el Sistema Solar es el plano eclíptico. Si los planetas tienen un movimiento orbital antihorario, este parámetro va desde 0° hasta 90° . Sí, por el contrario, tienen un movimiento orbital horario, este parámetro va desde 90° hasta 180° .

- Longitud del nodo ascendente: Indica el lugar donde el objeto celeste cruza el plano eclíptico de sur a norte. Este parámetro junto con la inclinación determina la orientación del plano orbital.
- Argumento del perihelio: Dirección del perihelio medido desde el nodo ascendente en la dirección del movimiento.
- Tiempo del perihelio

2.3.2.2 FORMACIÓN PLANETARIA

Con respecto a la formación planetaria, se parte del colapso de gas y polvo interestelar, creando de esta manera una estrella rodeada de un conjunto de restos que no se han colapsado para crear esta estrella. Estos restos se encuentran alrededor de la misma estrella.

Los restos de gas y polvo se empiezan a unir gracias a la fuerza gravitatoria para la creación de los planetas. Este proceso recibe el nombre de acreción y, en función de los elementos que forman estos gases y polvo interestelar, se crean los diferentes tipos de planetas que específico en el punto 2.3.2.3.

Cabe resaltar que estos cuerpos recién creados obtienen su propia gravedad debido a la cercanía de otros cuerpos celestes de mayores dimensiones y, los efectos de esta solo son perceptibles muy cerca del propio objeto con gravedad propia [28].

Con respecto a la astronomía, podemos destacar la velocidad necesaria para sobrepasar la fuerza gravitatoria de un objeto celeste y, salir de la influencia de la acción de su gravedad. Esta velocidad se denomina velocidad de escape y se caracteriza mediante la siguiente fórmula:

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{D}} \quad (2.7)$$

Esta velocidad depende de la constante gravitatoria universal G, de la masa del cuerpo gravitacional M y, la distancia entre los centros de la masa gravitacional y de la masa que pretende escapar de la acción gravitatoria. Como se puede observar, la velocidad de escape no depende ni de la dirección del objeto ni de la masa del objeto que pretende escapar.

En el caso de la Tierra, un ejemplo bien claro de actuación de esta velocidad son los átomos de hidrógeno en zonas altas de la superficie terrestre. Los átomos de hidrógeno, debido a sus altas velocidades, superiores a la velocidad de escape, se calientan a altas temperaturas hasta que se evaporan en el espacio exterior, fuera de la acción gravitatoria de la Tierra [29].

2.3.2.3 CLASIFICACIÓN DE PLANETAS

Los planetas se pueden clasificar según su composición en [30]:

- Planetas rocosos o telúricos: Superficie rocosa formada, principalmente por magnesio, silicio, oxígeno y hierro.

- Planetas gaseosos o jovianos: Son planetas de grandes dimensiones formados principalmente por hidrógeno y helio. Su atmósfera es muy densa, la cual concentra los gases debido a su atracción. Debido a esta última, estos planetas concentran otros cuerpos dependientes como satélites.
- Planetas helados: Compuestos, principalmente, por carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno, los cuales forman agua, metano, amoníaco... en forma de hielo

Los planetas se pueden clasificar según sus *masas* de la siguiente manera:

- P1: Masa equiparable con la masa de una enana marrón (75 – 80 masas jovianas).
- P2: Masa equiparable con la masa de Júpiter (planeta joviano)
- P3: Masa equiparable con la masa de Neptuno (planeta helado)
- P4: Masa equiparable con la masa de la Tierra (planeta rocoso)
- P5: Masa equiparable con la masa de Ganímedes (satélite más grande de Júpiter con la mitad de masa que el propio planeta).

2.3.3 MATERIA INTERESTELAR

Materia difusa distribuida por toda la galaxia formada por materia ordinaria, principalmente compuesta por hidrógeno, así como de elementos como el helio y, elementos pesados como carbono, nitrógeno u oxígeno; rayos cósmicos formados por partículas cargadas y, campos magnéticos. Estas fuentes de radiación altamente energéticas están sujetas a fuerzas electromagnéticas. Los campos magnéticos y los rayos cósmicos aportan un soporte a la materia ordinaria frente a las fuerzas gravitacionales del Universo.

De forma directa, el peso de la materia ordinaria limita los campos electromagnéticos y las turbulencias de la materia ordinaria pueden deberse a la amplificación de los campos magnéticos y la aceleración de los rayos cósmicos.

Características como la temperatura o la densidad varían mucho en función del medio, cuyo estado no es permanente ya que se encuentra en una continua evolución a lo largo de su “ciclo vital”. La formación de estrellas sucede en las áreas más densas y frías de este medio.

La masa de este medio compone entre el 10 y el 15 % de la masa de la Vía Láctea concentrada, en gran medida, en el plano galáctico, así como sobre sus brazos. Esta masa ocupa entre el 1 y 2 % del medio interestelar.

Las nubes interestelares se pueden dividir en 3 tipos:

- Nubes oscuras: Formadas por gas molecular muy frío (entre 10 y 20 K). Como su nombre indica, son nubes que no dejan pasar la luz.
- Nubes difusas: Formadas por gas de 100 K. Dejan pasar gran parte de luz excepto ciertas longitudes de onda que son absorbidas por las mismas.
- Nubes translúcidas: Nubes que dejan pasar la luz producida por otros astros.

Además de estas nubes, el medio interestelar contiene zonas más calientes (temperaturas entre 10^4 y 10^6 K), pudiendo incluso tener áreas ionizadas [31].

2.3.4 ESTRELLAS

Concentración de gases, en forma de esfera, que emite radiación a partir de su generación de energía. Esta generación de energía se debe a la combustión de los componentes que la forman, los cuales, son los mismos que componen el medio interestelar ya que estas se forman a partir de zonas gravitacionalmente inestables dentro del medio interestelar. La combustión nuclear de estos elementos provoca la conversión de estos en otros elementos más pesados. Este cambio de elementos significa que las estrellas sufren cambios y, por tanto, evolucionan a lo largo de toda su vida cuya duración depende, en gran medida, de su tamaño. Pese a esto, la estimación de vida de una estrella comprende entre 10000 y 15000 millones de años [32].

La energía que emiten las estrellas hace que el interior de las mismas concentre grandes niveles de temperatura, lo que produce ciertos efectos sobre la estrella:

- Mantiene la presión del núcleo estelar para así, evitar su contracción por efecto de la fuerza de la gravedad.
- Efecto continuado de la combustión nuclear.
- Crea un flujo de energía desde el interior del astro hacia el exterior, de manera que este es capaz de radiar energía al espacio exterior.

Para realizar observaciones, cabe resaltar que se produce un pequeño desvío en la trayectoria de la luz proyectada sobre la Tierra. Este pequeño desvío se caracteriza mediante la siguiente ecuación [33]:

$$\theta = 4 \frac{GM}{R_0 c^2} \quad (2.8)$$

Esta desviación, cuyo resultado se obtiene en radianes, depende de la constante gravitatoria universal G cuyo valor es $6.674 * 10^{-11} \frac{m^3}{kg^1 s^2}$, de la velocidad de la luz en el vacío c , de la distancia de observación al centro de la estrella R_0 y de la masa de la estrella M .

El cálculo de esta distancia se puede realizar de diferentes maneras [34]:

- Paralaje: Diferencia entre las posiciones aparentes del objeto celeste en relación al fondo interestelar según el punto de observación apuntado. A mayor diferencia entre las posiciones de medición, mejor será la medida de la distancia al objeto celeste en cuestión. Con este método, se puede medir hasta varios cientos de años luz.
- Cefeidas: Cálculo de la distancia de una estrella a partir de su periodo de variación de brillo y su magnitud aparente. Un ejemplo del uso de este método sería el cálculo de la distancia que hay entre el Sol y la Tierra.
- Desplazamiento hacia el rojo: Utilización de la ley de Hubble para encontrar la distancia de las estrellas más alejadas de la galaxia. Esta ley afirma que cuando más rápido se aleja una estrella de la posición del observador, más lejos se encuentra esta.

En el caso de la radioastronomía, se ha comprobado que las ondas de radio de otros cuerpos celestes se desvían un 0.03% de su trayectoria real debido al Sol.

Con respecto a la cantidad exacta de estrellas, todavía no se ha podido estimar un número exacto debido a que es muy posible que el Universo no tiene límites superiores y, que día a día, se van descubriendo nuevas estrellas. Con todo esto dicho, cabe resaltar que, en un día normal, se pueden ver entre 1000 y 1500 estrellas simultáneamente, pero, si las condiciones ideales, el ojo, sin utilización de telescopios, puede ver entre 3000 y 6000 estrellas.

Las constelaciones formadas por numerosas estrellas son fruto de nuestra imaginación ya que estrellas a mayor o menor distancia pueden formar parte de la misma “agrupación” sin necesariamente serlo. Debido a las diferentes formas y agrupaciones que se habían adoptado a lo largo de la historia, en 1928, la IAU (International Astronomical Union) estableció la normalización de estas con un total de 88 constelaciones [35].

2.3.4.1 CICLO DE VIDA

El nacimiento de una estrella sucede ante una densificación de gas interestelar y polvo que contienen diferentes elementos, mayoritariamente hidrógeno y helio. Esta densificación provoca la creación de un cuerpo que emite radiación electromagnética con fuerza gravitatoria propia.

Tras este, el hidrógeno que forma el núcleo de la estrella sufre una combustión nuclear convirtiéndose el hidrógeno en helio. En este estado, la estrella pasa a la fase llamada Secuencia Principal. En esta fase, se encuentran la mayoría de las estrellas como es el Sol, por ejemplo. Actualmente, el Sol se encuentra en la mitad de este ciclo, teniendo en cuenta que, en 5 mil millones de años, pasará a la siguiente fase.

Esta combustión transforma el núcleo de la estrella que pasa de estar formado principalmente por hidrógeno a estar formado por helio mayoritariamente. Además de este cambio de composición, el núcleo se contrae y se calienta.

Una vez que el hidrógeno es despreciable frente al helio, la siguiente fase por la que pasa la estrella es la combustión del helio resultante de la combustión previa. Esta combustión cambia nuevamente la composición del núcleo, el cual, ahora estará compuesto de carbono y oxígeno. En esta fase, la estrella pasa a denominarse Gigante Roja puesto que al emitir más energía que en la Secuencia Principal, hace que las capas más superficiales de la estrella se expandan y se enfríen llegando incluso a aumentar hasta el diámetro de la órbita de la Tierra. Si es muy grande, se puede denominar Supergigante [36].

La siguiente fase consiste en la combustión de los componentes más pesados del núcleo de la estrella como son el carbono o el oxígeno. Esto solo se produce si la masa de la estrella es mayor a 8 veces la masa del Sol. Esta combustión sucede solo cuando no queda helio por quemar. La combustión de estos elementos pesados produce otros elementos como neón, magnesio, silicio y azufre, los cuales, al quemarse, crean otros elementos como el hierro o el níquel. Como resultado de esta última combustión, el centro de la estrella se compone de hierro.

La etapa final de la estrella depende de la cantidad de materia de la que se componía en su nacimiento:

- Menor a 8 veces la masa del Sol: Formación de nebulosas interplanetarias.
- Mayor a 8 veces la masa del Sol: Explosión que recibe el nombre de *Supernova*. La materia restante que forma la estrella recibe el nombre de *agujero negro*.

2.3.4.2 PULSAR

Estrella formada por neutrones cuyo peso se aproxima a una masa joviana (masa de Júpiter) con un radio de entre 10 y 15 km. Se caracteriza por emitir radiación electromagnética en intervalos de tiempo, efecto causado por el efecto de su campo magnético. Este efecto de emisión a intervalos está relacionado directamente con la rotación del objeto puesto que, mediante la inducción del campo magnético sobre las partículas que rodean la estrella, podemos ver la emisión de radiación más importante de este tipo de estrellas. De esta forma, estas estrellas tienen un comportamiento similar al de un faro.

Los pulsares se caracterizan por girar sobre su propio eje a velocidades tan altas hasta el punto de que se pueden extender por el Ecuador, achatándolos en relación al eje de rotación.

La combinación del campo magnético y la densidad de este tipo de estrellas hace que las partículas exteriores que se acercan a estas formen espirales estrechas hacia los polos magnéticos de los pulsares. Estas espirales emiten, principalmente, ondas de radio, rayos X y rayos gamma.

Dependiendo de la posición de estas espirales en relación con los ejes de rotación de la estrella, se puede apreciar parámetros como la velocidad y periodo de rotación. La periodicidad de rotación de algunos pulsares ha ayudado a calibrar relojes de precisión (relojes atómicos).

2.3.4.3 NEBULOSA INTERPLANETARIA

Partiendo de una gigante roja, el viento solar extrae el hidrógeno restante del núcleo de la estrella. Una vez sin hidrógeno, las capas superiores de la gigante roja empiezan a expandirse y contraerse, movimiento similar al pulso del corazón, pero, con pulsos más largos que pueden durar hasta más de un año. El material desprendido en estos pulsos forma un gas llamado nebulosa planetaria.

El núcleo de la nueva formación se compone de carbono y oxígeno, así como de una capa fina de helio que lo envuelve. La masa de este consta de entre la mitad de la masa solar hasta más de una masa solar y, tiene el mismo tamaño que la Tierra.

Una vez que se quema todo el núcleo, la estrella comienza a enfriarse para convertirse en una enana blanca.

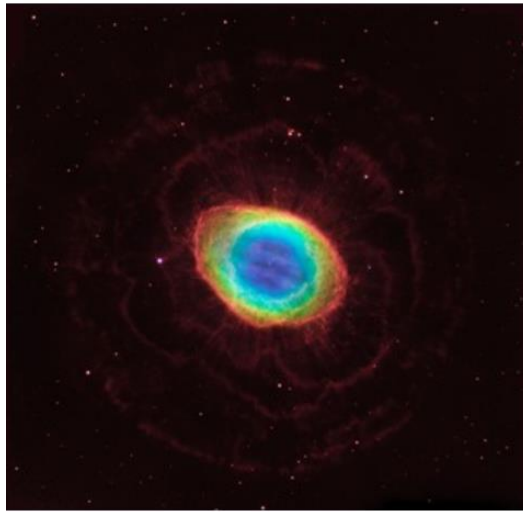


Figura 2.10. Nebulosa del Anillo (NGC 7200)

2.3.4.4 SUPERNOVA

Cuando una estrella tiene su núcleo formado por hierro, este núcleo denso solo se puede quemar con la introducción de energía exterior y esta introducción solo es posible en una explosión.

Se pueden clasificar diferentes tipos de supernova dependiendo de la presencia de la línea de hidrógeno en sus espectros, siendo denominados de Tipo I si no contienen esta línea y, de Tipo II si contienen hidrógeno. Los principales de supernova son [37]:

Tipo Ia: Propagación de una línea de absorción de Silicio. En etapas más tardías, se propagan líneas de hierro y cobalto. Supernovas más brillantes cuyo origen más probable es la explosión de enanas blancas.

Tipo Ib: Propagación de una línea de helio, más concretamente, de helio neutro. En etapas posteriores, se empiezan a ver líneas de elementos de más intermedia como el oxígeno o el calcio.

Tipo Ic – BL: Formadas por líneas muy anchas en su espectro de emisión debido a que el gas que la forman se mueve a velocidades cercanas a 20000 Km/s. Por tanto, se cree que, debido a estas velocidades, estas supernovas tienen mayor energía cinética a las supernovas de tipo Ic.

Tipo Ic – BL – GRB-SN: Supernovas de tipo Ic – BL que se desarrollan a partir de explosiones de rayos gamma.

Tipo I – SLSN: Reciben el nombre de supernovas superluminosas debido a que son supernovas 100 veces más brillantes que la gran mayoría del resto de tipos de supernovas.

Tipo IIb: Comienzan teniendo líneas de hidrógeno para, más tarde, perder la emisión de hidrógeno para comenzar a emitir líneas de helio. Supernova creada a partir de estrellas con menor contenido de hidrógeno alrededor del núcleo cuando deja de calcinarse.

Tipo IIIn: Líneas de hidrógeno muy lentas superpuestas sobre líneas más anchas cuyo origen se atribuye al hidrógeno expulsado antes de la explosión de la estrella.

Tipo IIP/IIIL: Líneas de hidrógeno muy anchas. Creadas a partir de la explosión de supergigantes rojas.

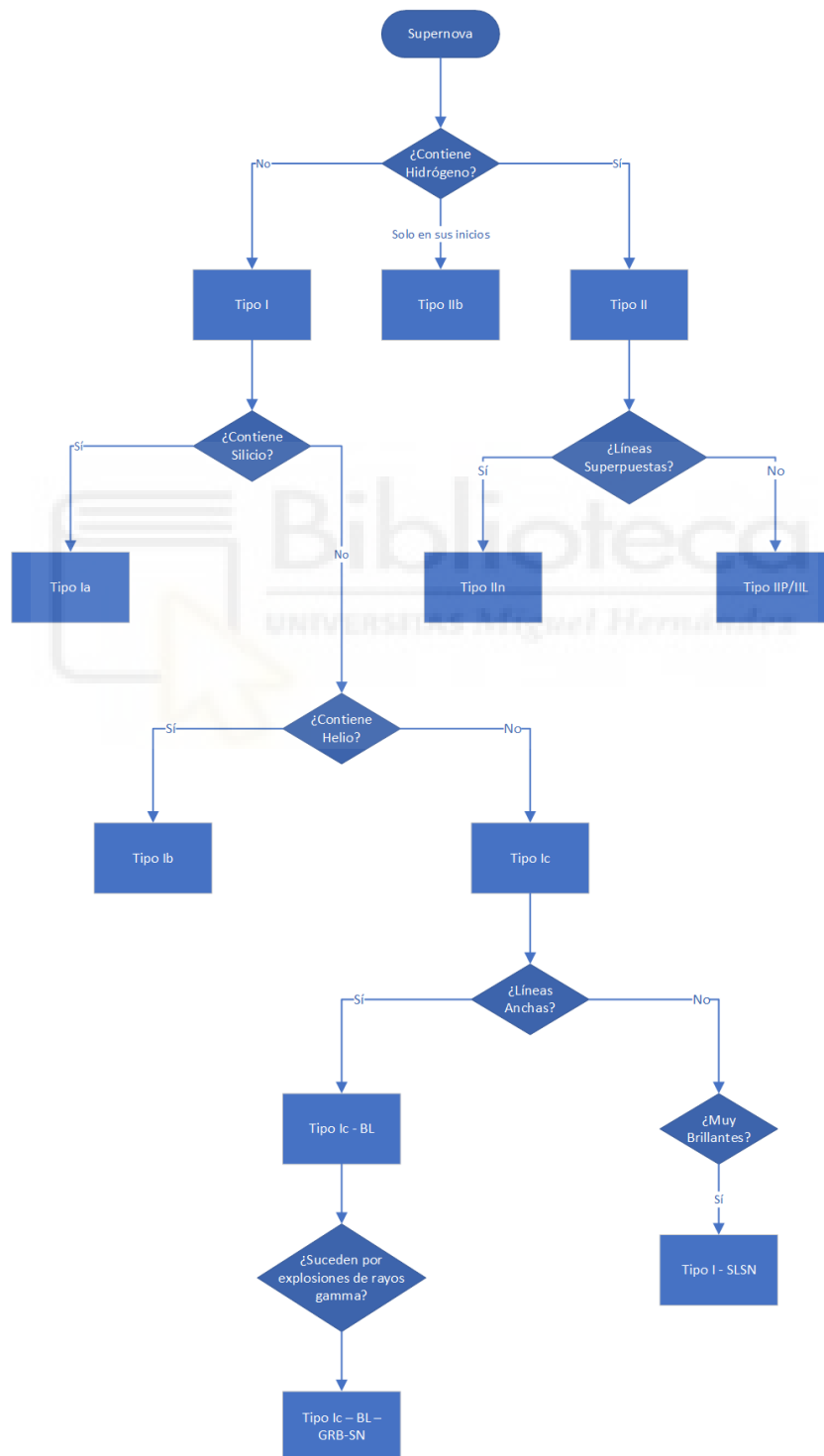


Figura 2.11. Tipos de Supernovas

La estrella, al no poder quemar su núcleo, entra en colapso cuyo resultado final es la explosión llamada supernova. Esta explosión sucede en dos fases:

1. Colapso del núcleo de hierro debido al aumento de la presión ejercida sobre este. Este colapso disminuye el tamaño del núcleo, desprendiendo una energía equivalente a la energía de 100 masas solares a lo largo de su vida.

Esta energía desprendida puede quedar en las capas que rodean al núcleo (desencadenante de la explosión) o desprendida por todo el espacio en forma de neutrinos, partículas subatómicas que se caracterizan principalmente por no tener carga positiva, ni negativo.

2. La energía de las capas crea una gran onda de choque extendiéndose hacia capas exteriores, de manera que estas se van calentando. Estas capas, a medida que se van calentando, se van iluminando más y más, posibilitando la distinción de la supernova de otras estrellas hasta llegar a la explosión. Cada año, se descubren entre 20 y 30 supernovas muy alejadas del planeta Tierra e incluso de nuestra galaxia.

Esta explosión desprende una capa de gas conocidos como restos de supernova, y el nacimiento de un agujero negro.

2.3.4.5 AGUJERO NEGRO

Área del espacio esférica cuya densidad provoca un campo gravitatorio capaz de absorber toda la materia.

Las partes principales de un agujero negro son:

- Horizonte de eventos: Límite del agujero negro con respecto al espacio exterior. También recibe el nombre de radio de Schwarzschild. Zona oscura del agujero.
- Singularidad (flecha negra): Centro del agujero negro. Parte del agujero negro por donde se absorbe la materia.
- Disco de acreción (flecha verde): Materia alrededor del agujero negro que está siendo, poco a poco, absorbida. Esta materia se caracteriza por encontrarse a altas temperaturas y, por tanto, emitir mucha radiación.
- Chorros (flecha negra): Corrientes compactas de materia que emergen del agujero negro en direcciones opuestas y normales al plano del disco de acreción. También reciben el nombre de *jets*.

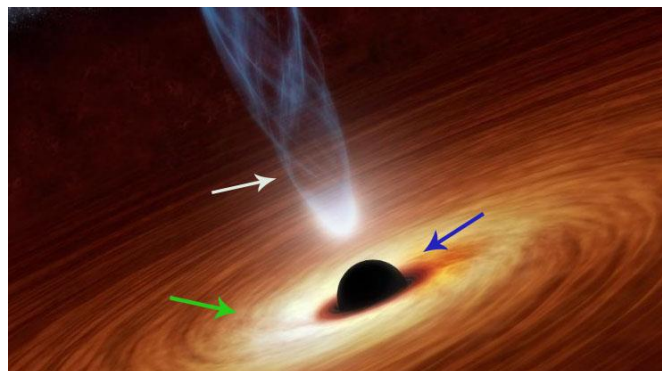


Figura 2.12. Representación de un agujero negro

Los agujeros negros se pueden definir mediante tres características [38]: su masa, su carga eléctrica y su momento angular. Según la masa, obtenemos los siguientes tipos:

Agujero negro supermasivo: Agujero negro de gran envergadura, comparable al Sistema Solar y, con una masa de más de 100 millones de masas solares. Este tipo de agujeros son de origen desconocido, a día de hoy. Se cree que forman el centro de las galaxias para dar explicación a que estas se mantengan unidas.

Agujero negro de masa intermedia: Agujero con una masa entre 100 y 1000 masas solares. Se cree que son los creadores de galaxias activas. Su origen es desconocido.

Agujero negro estelar: Producido por la explosión de una estrella (supernova). Contiene una masa de más de 3 masas solares.

Agujero negro microscópico: Teóricamente, se cree que se formaron en el Big Bang (origen del Universo) aunque esta suposición no es del todo segura. También se pueden crear al colisionar partículas entre sí dentro de aceleradores de partículas. Se componen de una densidad inmensa puesto que tienen una masa similar al Sol, pero, poseen un volumen similar al de un grano de arena.

Otra clasificación de los agujeros negros se realiza según los otros dos parámetros más importantes: su carga y su momento angular. Teniendo en cuenta estos parámetros, los agujeros negros se pueden diferenciar en:

Agujero negro de Schwarzschild: Agujero que no tiene ni movimiento angular ni carga. Está formado por un centro (singularidad) y una superficie (horizonte de sucesos). La singularidad de este tipo de agujeros se localiza en el centro del propio agujero. Agujeros muy densos.

Agujero negro de Reissner-Nordstrøm: Agujero negro cargado, pero sin movimiento de rotación. Formado por dos horizontes de sucesos con forma esférica, uno interno llamado horizonte de Gauchy, y otro externo llamado horizonte de sucesos. La singularidad se localiza en el centro de ambos horizontes de sucesos.

Agujero negro de Kerr: Conservación del momento angular con carga nula. Agujeros con una región exterior elíptica llamada Ergosfera, región donde el espacio y el tiempo son curvados o estirados debido a la rotación del agujero negro. En este caso, la singularidad se localiza en un anillo fino alrededor del centro y, el horizonte de sucesos es una esfera.

Agujero negro de Kerr-Newman: Conservación del momento angular, pero, a diferencia del anterior tipo, este agujero negro si tiene carga. Agujero negro con forma de elipsoide, está compuesto por un horizonte de Cauchy, un horizonte de sucesos y una ergosfera. Su singularidad tiene forma de anillo como en el anterior tipo de agujero.

2.3.4.6 CUÁSAR

Fenómenos astronómicos que emiten todo tipo de ondas electromagnéticas, caracterizados por ser los objetos más brillantes (emisión de una gran cantidad de energía) y distantes del Universo, de modo que, al no dejar ver otras estrellas localizadas en la misma galaxia que estos. Con respecto al tamaño de estos, pueden llegar a ser más grandes que el Sistema Solar.

Se cree que su origen pertenece al agujero negro central de la galaxia donde se localizan y que ofrecen información de las primeras etapas del Universo ya que su energía tarda en alcanzarnos miles de millones de años. Esto también es apoyado por la teoría de que algunos cuásares se localizan a 12000 millones de años luz de la Tierra, el equivalente a la edad del Universo. Otras teorías dictan que son agujeros negros que emiten radiación al absorber materia o que son núcleos de galaxias muy jóvenes.

Los cuásares emiten distintos niveles de radiación en periodos, es decir, la luminosidad que emiten es variante en el tiempo. Este concepto permite postular que el foco de radiación de los cuásares es pequeño.

2.4 EL PLANETA TIERRA

Planeta perteneciente al Sistema Solar, sistema planetario perteneciente a La Vía Láctea. La Tierra es el tercer planeta más cercano a su estrella, el Sol, a la cual, todos los planetas que forman este sistema giran alrededor de la misma mediante su propia órbita. Los diferentes tamaños y formas de las órbitas permiten que los planetas que conforman el Sistema Solar no colisionen entre sí. Además de planetas, el sistema solar contiene otros objetos celestes como planetoides. Ejemplos de estos cuerpos son el planeta enano Plutón, asteroides o satélites.

La Tierra tiene un satélite natural, La Luna, localizado a unos 384.000 km de distancia, el cual, proporciona diversos efectos en la Tierra como son las mareas o la estabilidad de la rotación de esta.

La Tierra gira alrededor del Sol a una velocidad media aproximada de 29,8 km/s, el equivalente a más de 107.000 km/h en una órbita elíptica cuyo perímetro es de alrededor de 930 millones de km con una distancia promedio entre el Sol y la Tierra de alrededor de 150 millones de km, de manera que tarda alrededor de 365,25 días en dar una vuelta completa sobre esta órbita. Este periodo de tiempo, equivalente a 8766 horas, se denomina Año Juliano.

Además de este movimiento, la Tierra sufre otros movimientos propios. Estos movimientos propios son los siguientes [39]:

Movimiento de rotación: Rotación de la Tierra sobre su propio eje. Este movimiento posibilita el transcurso del día, de manera que una rotación completa tarda 23 horas, 56 minutos y 3.5 segundos. Este periodo de rotación recibe el nombre de día sidéreo ó sidereal.

Pese a ello, a la hora de cuantificar la duración de un día como el tiempo que el Sol necesita para pasar por el mismo punto con respecto a un observador. Este periodo recibe el nombre de día solar. Este día es 3 minutos y 56.56 segundos más largo que el día sidéreo.

Teniendo en cuenta la duración de ambos días, se pueden caracterizar la duración de un año sidéreo y un año solar, de manera que, un año sidereal está formado por 365.2422 días formados por días de 24 horas y, un año solar se compone de 365.2564 días formados teniendo en cuenta que la duración de un día es de 24 horas.

Por tanto, la hora solar es la base del tiempo universal (Universal Time, UT), parámetro estable pese a las diversas variaciones de rotación de la Tierra.

Todos los relojes del mundo están coordinados con respecto al tiempo universal coordinado (Coordinated Universal Time, UTC), el cual, está corregido con respecto a las variaciones de rotación de la Tierra y el alargamiento de su periodo de rotación. La unidad fundamental de UTC es el segundo.

Con respecto a las observaciones astronómicas, cabe destacar a la hora terrestre (Terrestrial Time, TT) cuya fórmula es la siguiente:

$$TT = TAL + 32.184 \text{ segundos} \quad (2.9)$$

Siendo TAL la hora atómica deducida a partir de astros como los púlsares, anteriormente explicada.

Cabe destacar que este movimiento de rotación se está ralentizando una millonésima de segundo al día debido al efecto de atracción producido por la Luna. Este efecto de atracción también hace que la Tierra no sea completamente esférica, sino que los polos están achatados. Debido a esto, la Tierra tiene forma de esferoide achatado.

Este achatamiento produce diferentes radios terrestres en función del punto de referencia. Como resultado, obtenemos que el radio ecuatorial (a) es de 6378.137 km mientras que el radio polar (b) es de 6356.752 km. Mediante estos dos radios, se puede calcular la excentricidad de la “esfera” terrestre mediante la siguiente expresión:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (2.10)$$

Movimiento de traslación: Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Este movimiento tarda exactamente 365 días, 5 horas, 45 minutos y 46 segundos. Este tiempo es definido como año sidéreo. Para combatir este periodo de casi 6 horas anuales, cada cuatro años, se añade un día extra al año. Este año recibe el nombre de año bisiesto.

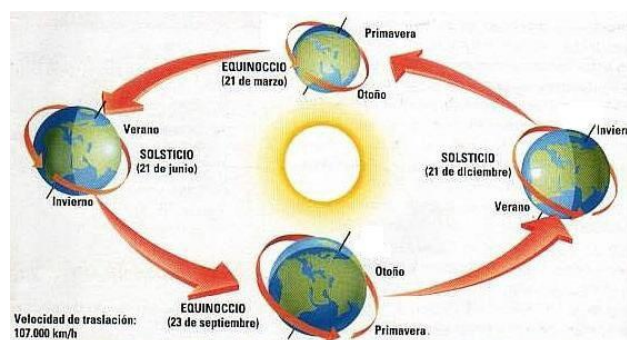


Figura 2.13. Ilustración de la traslación de la Tierra

Una vez explicado estos dos movimientos, cabe destacar que, para obtener las 24 horas de un día, el cual recibe el nombre de día solar, se debe tener en cuenta que la Tierra gira

3 minutos y 56.5 segundos extra al día puesto que este periodo de tiempo es el que requiere la Tierra para realizar su movimiento de translación alrededor del Sol.

Movimiento de precesión: Desplazamiento del eje de la Tierra en forma de cono. El ciclo de precesión es de alrededor de 26000 años. Este movimiento se debe a las fuerzas gravitatorias tanto del Sol como de la Luna, así como de la forma de la Tierra ya que, al estar abombada en el Ecuador, presenta mayor peso en el Ecuador que en los polos.

Movimiento de nutación: Oscilación del eje de la Tierra debido a la atracción de la Luna sobre la Tierra. El ciclo de nutación es de alrededor de 18 años y medio, por lo que, en un ciclo de precesión, suceden algo más de 1400 ciclos de nutación.

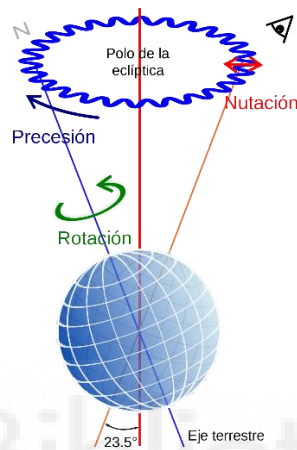


Figura 2.14. Precesión y nutación de la Tierra

Bamboleo de Chandler: Fenómeno que produce la ilusión de que el eje de rotación de la Tierra y su eje geográfico no estén en el mismo sitio. Este movimiento, cuyas causas no están totalmente justificadas científicamente, se cree que es debido al deshielo de los polos.

Movimiento de precesión del perihelio: Movimiento debido a que uno de los focos de la órbita que describe el movimiento de translación no es fijo, sino que va girando alrededor de 3.84 arcosegundos por siglo. Sabiendo este dato, este movimiento tiene un ciclo de más de 34 millones de años.

2.4.1 SISTEMAS DE COORDENADAS

Los sistemas de coordenadas utilizados para la exploración espacial son los siguientes [40]:

2.4.1.1 SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRES

Divide la Tierra en líneas imaginarias horizontales llamadas paralelos y líneas verticales llamadas meridianos.

Los paralelos cortan la Tierra perpendicularmente con respecto a su eje de rotación. El paralelo más importante es el Ecuador, que no es más que el paralelo que divide la Tierra justo por la mitad, dividiéndola en dos hemisferios (hemisferios norte y sur). Además, este paralelo forma el plano ecuatorial, plano de referencia para este sistema de coordenadas.

Los meridianos son líneas distribuidas por toda la Tierra que cortan al Ecuador perpendicularmente, realizando una trayectoria entre polos. El meridiano más importante es el Meridiano de Greenwich.

A la hora de la medición de objetos espaciales, se toma como referencia la posición de este objeto sobre la superficie terrestre llamándose punto objeto. Las coordenadas de este sistema reciben el nombre de latitud y longitud y, dependen del Ecuador y del Meridiano de Greenwich.

La latitud (δ) es el ángulo formado entre el punto objeto y el Ecuador, por tanto, la latitud obtendrá parámetros angulares hasta 90° con notación norte o sur, dependiendo del hemisferio donde se localiza el punto objeto.

Debido a que la Tierra no es completamente esférica, como ya he mencionado anteriormente, la latitud real, también llamada latitud geocéntrica, es un poco menor que la latitud geográfica (latitud utilizada). La variación máxima entre ambas latitudes se localiza a una latitud geográfica de 45° , siendo esta variación de $11.5'$ de arco.

La longitud es el ángulo formado por el punto objeto y el Meridiano de Greenwich, por lo tanto, este parámetro obtendrá valores de hasta 180° con notación este u oeste. En algunos países, la nomenclatura de los valores de las longitudes va desde -90° hasta 90° siendo los grados negativos aquellas longitudes al oeste del Meridiano de Greenwich y, siendo los grados positivos aquellas longitudes al este del Meridiano de Greenwich.

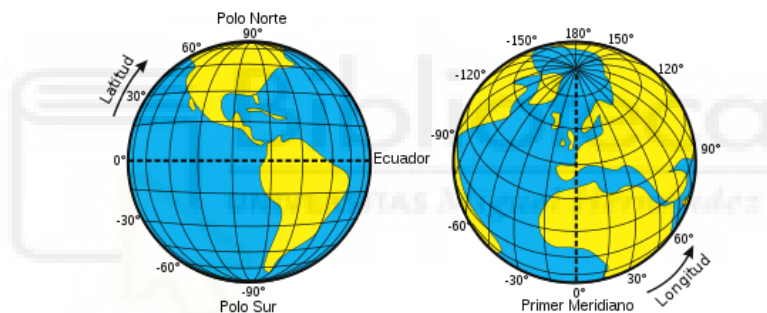


Figura 2.15. Paralelos y meridianos de la Tierra

2.4.1.2 SISTEMA ALTACIMUTAL

Sistema celeste y local, es decir, que el origen de coordenadas es el propio observador y el punto de referencia, en este caso, es el horizonte. Los sistemas locales son generalmente sistemas poco útiles ya que los parámetros de este varían según la posición del observador. Los parámetros de este sistema son:

- Altura (h): Ángulo que forman el punto objeto y el plano de referencia, que, en este caso, es el horizonte.
- Acimut (Z): Ángulo que forman el punto objeto y el punto de referencia (propio observador).

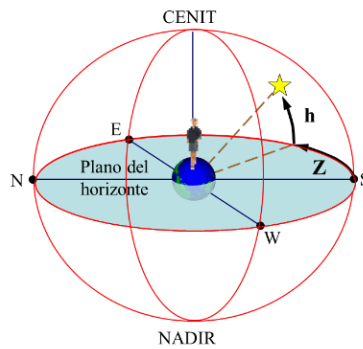


Figura 2.16. Sistema altacimutal

2.4.1.3 SISTEMA DE COORDENADAS HORARIAS

Este sistema es semilocal porque una de sus coordenadas es local mientras que la otra coordenada es universal (independiente del observador). Los parámetros de este sistema son:

- Declinación: Ángulo formado desde el Ecuador hasta el punto objeto pasando a través del meridiano donde está localizado el punto objeto.
- Ángulo horario: Ángulo formado por el meridiano donde se localiza el punto objeto y, el círculo ecuatorial.

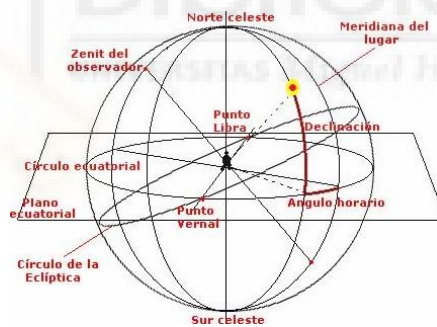


Figura 2.17. Coordenadas horarias

2.4.1.4 SISTEMA DE COORDEANDAS ECUATORIALES

Sistema cuyas coordenadas son independientes del observador (referencias fijas). Los parámetros de este sistema son los siguientes:

- Plano ecuatorial: Plano formado por el movimiento de translación de la Tierra. Recibe el nombre de plano ecuatorial puesto que coincide con el Ecuador.
- Plano eclíptico: Plano formado por la trayectoria imaginaria que realiza el Sol alrededor de la Tierra. Es el responsable de que sepamos que la Tierra esta inclinada con respecto al plano ecuatorial. Esta inclinación de la Tierra con respecto al Sol provoca las diferentes estaciones con respecto a los hemisferios.

La intersección de ambos planos, los cuales forman un ángulo de $23^{\circ} 26' 21.406''$, da lugar a dos puntos imaginarios: el equinoccio autumnal y el equinoccio vernal (γ). Reciben también el nombre de primer punto de Libra y primer punto de Aries

respectivamente. Si tenemos en cuenta el equinoccio vernal, podemos caracterizar los parámetros que definen este sistema de coordenadas:

- Declinación (δ): Ángulo formado por el Ecuador y el punto objeto.
- Ascensión recta (α): Ángulo que va desde el equinoccio vernal hasta el meridiano por donde pasa el punto objeto. Este parámetro se puede pasar a unidades temporales mediante la siguiente equivalencia: 1 hora en tiempo es el equivalente a 15° de arco, es decir, 1 minuto de arco (60 minutos de arco equivalen a 1°) son 4 segundos temporales.

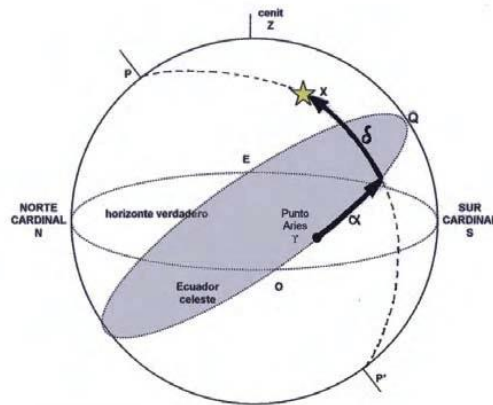


Figura 2.18. Sistema ecuatorial

2.4.1.5 SISTEMA DE COORDENADAS ECLÍPTICAS

Se utiliza el plano eclíptico anteriormente explicado como principal referencia. Los parámetros de este sistema de coordenadas son:

- Longitud eclíptica: Ángulo que va desde cualquier equinoccio hasta el meridiano que pasa por el punto objeto en dirección del círculo eclíptico.
- Latitud eclíptica: Ángulo que va desde el plano eclíptico hasta el objeto celeste cuyo recorrido contiene el meridiano que pasa por el objeto celeste.

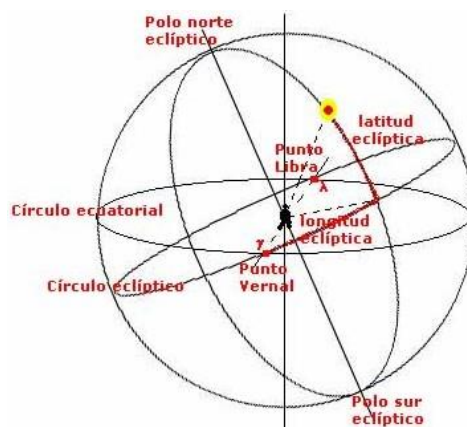


Figura 2.19. Sistema de coordenadas eclípticas

2.4.1.6 SISTEMA DE COORDENADAS GALÁCTICAS

Se toma como punto de referencia el centro de la Vía Láctea y como plano de referencia se toma el plano que forma la Vía Láctea. Sus parámetros son:

- Longitud galáctica: Ángulo formado por la línea que une el Sol con el centro de la Vía Láctea y el objeto celeste.
- Latitud galáctica: Ángulo que forma el objeto celeste con el plano de la Vía Láctea. Para que se pueda realizar una buena observación, este parámetro no debe ser bajo debido a que hay mayor medio interestelar cuando más baja la latitud galáctica, reduciendo la capacidad de observación en el medio.

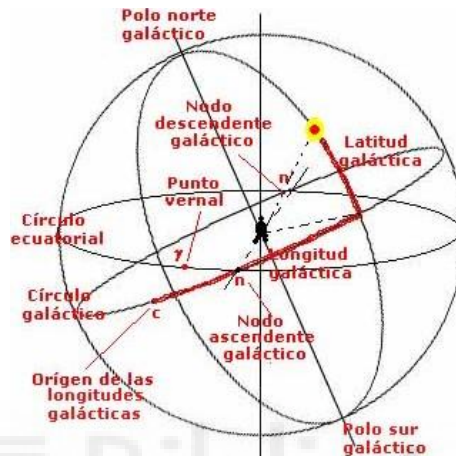


Figura 2.20. Coordenadas galácticas

2.5 RADIOASTRONOMÍA

La radioastronomía consiste en el estudio del Universo a través de la medición de radiación electromagnética que generan los diferentes cuerpos que lo componen como pueden ser las estrellas, las galaxias... Al contrario que la astronomía visible, en la radioastronomía, las ondas de recepción a estudiar son aquellas que emiten en la banda de radio. Estas ondas, se caracterizan por ser las ondas con las mayores longitudes de onda de todo el espectro, así como poder ser visibles desde la superficie terrestre de tal manera que pueden realizar estudios a través de ellas hasta en días nublados.

Además del tipo de ondas, otra diferencia a resaltar es el registro de señales ya que la astronomía visible se basa en la recepción de imágenes mientras que la radioastronomía está más enfocada a percibir información transmitida por los cuerpos celestes, sin priorizar la imagen final del objeto.

Con respecto a las observaciones, podemos observar tanto las ondas de radio como tal, así como el rango de las microondas, es decir, desde los 30 kHz hasta los 300 GHz, tal y como se indica en la tabla 2.1. Estos límites no son fijos ya que las condiciones de absorción atmosférica varían en el tiempo. Los motivos de estos límites son los siguientes: el límite inferior de este rango se produce por la opacidad de la ionosfera al interactuar con ondas cuyas longitudes son muy largas, mientras que, por otra parte, el límite superior de este rango se debe a la absorción causada por bandas de la atmósfera terrestre con altos componentes de vapor de agua.

2.5.1 HISTORIA

Como todas las ciencias conocidas, la radioastronomía está en constante evolución y los descubrimientos se van sucediendo día a día gracias a las observaciones en radio. Estas observaciones han ido evolucionando desde principios del siglo XX hasta el día de hoy.

Todo comienza en el año 1931 cuando un ingeniero en radio, llamado Karl Jansky, estudiaba las interferencias en el rango de las ondas de radio durante las tormentas eléctricas. Para poder realizar su estudio, diseñó y fabricó una estructura capaz de detectar radiación cuya longitud de onda fuera de 14,6 metros (el equivalente a 20,55 MHz). Con este artefacto comprobó que una parte del ruido interferente en este rango se debía a las tormentas, pero había una parte importante del mismo que procedía de una fuente desconocida.

Tras realizar diversas medidas, denotó que la fuente de este ruido desconocido cambiaba de manera que esta formaba un círculo completo, con respecto a la “antena”, en 24 horas, teniendo en cuenta que, cada día que pasaba, la fuente del ruido aparecía 4 minutos antes cada día. Este hecho confirmaba que el Sol no podía ser el origen de estas interferencias ya que la distancia de la fuente estaría más lejos que el Sol.

Tras muchas investigaciones, el propio Jansky concluyó, en 1933, que el origen de esta fuente desconocida era la propia Vía Láctea.

Estas investigaciones fueron recogidas en 1937 por el ingeniero de radio Grote Reber, el cual fabricó el primer radiotelescopio casero en su casa. Con esta nueva estructura, su objetivo era el de detectar ondas de radio más fácilmente de manera que consiguió detectar gran cantidad de radiación radio dentro de nuestra Galaxia. En 1944, Reber publicó los primeros planos espaciales en radiofrecuencia.

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, operadores de radar británicos publicaron la detección de ondas de radio procedentes del Sol [41].

2.5.2 RADIOTELESCOPIO

Para la recepción de estas señales, que se caracterizan por trabajar en longitudes de onda “largas”, se requieren de antenas de grandes dimensiones que reciben el nombre de radiotelescopios o radio antenas.

El radiotelescopio convencional suele tener un colector parabólico y un alimentador para el tratamiento de las ondas recibidas, pero, si trabajamos en frecuencias lo suficientemente bajas, los radiotelescopios pueden ser arrays de antenas, caracterizadas por ser muy directivas gracias a la capacidad de transformar su patrón de radiación gracias a los niveles de potencia de las antenas que las forman, entre otros parámetros.

El funcionamiento básico de un radiotelescopio consiste en la recepción de señales radio por parte de un colector principal que transmite las ondas hacia un bocina o alimentador que convierte la intensidad de estas radiaciones en una señal eléctrica, la cual es amplificada para que, finalmente se convierta en una serie de números finales, a partir de sus parámetros, transmitidos por un ordenador.

Para la recepción de este tipo de ondas, se necesitan inmensas superficies para poder obtener una buena resolución angular, comparable a las resoluciones de los telescopios que trabajan en el visible.

La resolución del estudio mediante el uso de un radiotelescopio depende, principalmente, de dos factores: el diámetro de la antena y la frecuencia de las señales de recepción (frecuencia de trabajo), de manera que, cuando mayor sea el diámetro de la antena, mayor resolución obtendremos. El poder de resolución de un radiotelescopio se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_{res} = \frac{2.063 * 10^{-5} \lambda}{D} \quad (2.11)$$

Siendo D el diámetro del colector principal del radiotelescopio. Comparando con un telescopio, al ser el poder de resolución dependiente de la longitud de trabajo, el diámetro necesario para los radiotelescopios debe ser mucho mayor puesto que las longitudes de onda recibidas en radio son varios miles de centenares mayores que las ondas del espectro visible para poder obtener el mismo poder de resolución. Más concretamente, una onda de radio promedio tiene una longitud de 10^6 veces mayor que una onda visible.

Dependiendo del tamaño de las longitudes de trabajo, los colectores pueden ser “de rejilla” para aquellas longitudes de onda más altas puesto que estas ondas no detectan los agujeros de estas superficies. Si, por el contrario, trabajamos con ondas cuyas longitudes son más cortas pero que se necesitan colectores parabólicos para su captación, las superficies de estos colectores deben ser lisas.

Estas superficies lisas deben ser lo más pulidas y perfectas posibles ya que, para una correcta recepción de las señales, estas solo pueden admitir irregularidades menores al 10% de las longitudes de onda de trabajo para poder ofrecer una amplificación coherente de la señal.

Si las longitudes de onda son lo suficientemente cortas, se pueden utilizar arrays de antenas directivas, como bien he mencionado o, también se pueden utilizar telescopios de grandes dimensiones con radiómetros conectados [42].

En el ámbito de los récords, cabe recalcar los radiotelescopios más grandes del mundo en la actualidad. Dentro de estos, se pueden diferenciar entre aquellos cuyo colector principal es fijo y, aquellos cuyo colector forma parte de una estructura móvil [43].

Si el colector principal está fijo, tenemos el RADAN 600, un radiotelescopio localizado en Zelenchúkskaia, Rusia, con un diámetro superficial de 576 metros. Este radiotelescopio no es un radiotelescopio común puesto que solo esté compuesto de un conjunto de placas metálicas a lo largo del perímetro que forma el colector y de unos espejos centrales que actúan de subreflectores.



Figura 2.21. RADAN 600

Teniendo en cuenta que este es un radiotelescopio bastante particular, podemos particularizar otro radiotelescopio llamado FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope), el cual sí que está formado por un colector principal completamente liso. Este colector, localizado en Guizhou, China, tiene un diámetro de 500 metros, realizó sus primeras observaciones a principios del año 2020.



Figura 2.22. Radiotelescopio FAST

Si tenemos en cuenta el movimiento del colector principal, el radiotelescopio móvil más grande del mundo se encuentra en Green Bank (Virginia, US). El colector de este radiotelescopio es una semiesfera asimétrica cuyo diámetro mínimo es de 100 metros y su diámetro máximo es de 110 metros.

2.5.3 INTERFEROMETRÍA

La interferometría se utiliza con el fin de poder aumentar la resolución de recepción de las señales radio, usando diversos radiotelescopios conectados entre sí, para que, de manera sincronizada y trabajando en paralelo, se pueda obtener mayor poder de resolución en las observaciones. Esta técnica se basa en cómo las ondas detectadas por los diferentes radiotelescopios se interfieren cuando se juntan, las cuales pueden crear una imagen radio mediante su procesado gracias a un ordenador.

En el caso de la interferometría, el poder de resolución depende de la distancia que están dispuestas las antenas mientras que la sensibilidad que proporciona la interferometría depende del área de captación de todos los radiotelescopios, es decir, tiene una gran

dependencia con el número de radio antenas que forman el interferómetro. Estas antenas, las cuales pueden ser fijas o móviles, producen imágenes del cielo que reciben el nombre de radio fotografías.

Los radiotelescopios móviles reciben el nombre de telescopios de síntesis de apertura, los cuales, están formados por un radiotelescopio fijo y un conjunto de radiotelescopios móviles ubicados alrededor de este último, formando diferentes figuras en función del tipo de observaciones a realizar [44].

Un ejemplo de telescopio de síntesis de apertura es el VLA, localizado en Nuevo México (USA). Formado por 27 radiotelescopios con un diámetro de 25 metros cada uno. Su distancia máxima permite obtener un diámetro efectivo de 35 km. Con este diámetro, y trabajando a 23 GHz, su poder de resolución es de 0.1 segundos de arco.



Figura 2.23. Very Large Array (VLA)

Si consideramos otras técnicas para mejorar la resolución, se utiliza la técnica VLBI (Very Long Baseline Interferometry) donde el mayor diámetro depende de las dimensiones de la Tierra puesto que utiliza antenas a lo largo del globo terráqueo con la posibilidad de utilizar satélites. Mediante esta técnica, se pueden obtener resoluciones de 10 microsegundos de arco cuando uno de los radiotelescopios es parte de un satélite. Algunos usos que se le dan a este método son el estudio de la deriva continental y el movimiento de los ejes de rotación de la Tierra (ejes polares) a lo largo del tiempo.

3. ESTUDIO DE LA ANTENA DSS-65

Este proyecto consistirá en el estudio de validación de la antena DSS-65, antena construida en el año 1987, la cual está situada en el complejo “Madrid Deep Space Communications Complex” localizado en el municipio de Robledo de Chavela (Madrid), para poder convertirla en un radiotelescopio funcional. Este estudio se realizará con el fin de poder realizar una conversión final de esta antena de tracking a un radiotelescopio de uso académico (PARTNER 2.0), tras el cese de su actividad.

Para la adaptación de esta antena, debemos tener en cuenta los componentes actuales que la forman para poder adaptarla a nuestras futuras necesidades. Partiremos de estos componentes, para que, a partir de un estudio exhaustivo de los mismos, poder definir los componentes necesarios, así como posibles mejoras para dotar de las mejores características para el adecuado funcionamiento del futuro radiotelescopio. Para hacer esta adaptación, debemos analizar su funcionamiento actual, así como el funcionamiento de un radiotelescopio partiendo de las mismas características físicas de la antena DSS-65.

3.1 ANTENA DSS-65

3.1.1 INTRODUCCIÓN

Esta antena de tracking, que ha servido de soporte para diferentes misiones espaciales, tiene como objetivo principal, encargarse del tracking de diferentes aeronaves mediante la recepción de señales transmitidas por las mismas aeronaves a largas distancias, lo cual produce que la recepción de estas señales sea difícil de manejar debido a las atenuaciones espaciales. Estas señales pueden ser de espacio cercano a la Tierra (Near-Earth) o de espacio profundo (Deep Space).

Esta antena, como bien ya he comentado, se construyó en el “Madrid Deep Space Communications Complex”, más concretamente en las siguientes coordenadas:

| Antena DSS-65 | |
|------------------------|--------------------|
| Latitud | 40° 25' 37.94'' N |
| Longitud | 355° 44' 57.48'' E |
| Altura (metros) | 833.85 |

Tabla 3.1. Coordenadas de la antena DSS-65 [45]

Esta es una antena parabólica de tipo Cassegrain, es decir, su estructura principal consiste en un reflector cóncavo parabólico principal con un subreflector hiperbólico convexo fijo localizado justo enfrente del centro del reflector principal, a una distancia apropiada para obtener un funcionamiento eficiente de la antena.

Esta estructura está montada sobre un soporte de tipo altacimutal, una alidada que gira por una pista de azimut circular, construida en base a dos motores que mueven esta antena, los cuales, están sincronizados mediante ordenador para poder moverse 360° por todo el azimut y, 90° para poder obtener la altura deseada de observación. Estos motores permiten mover a la antena con una velocidad máxima de 0.8°/s [46].

Entrando un poco más en detalle sobre esta estructura, la base de soporte de la antena está formada por un marco de acero, nivelado para este tipo de mecanismos, que gira sobre el eje acimutal. Sobre este marco, se sitúan cuatro ruedas autoalineables para poder obtener

el movimiento azimutal de la antena. Este marco está enganchado a un pedestal de hormigón armado en 16 puntos.

Además, tanto el reflector principal como el subreflector de la antena están montados sobre una rueda dentada encargada de controlar el ángulo de elevación [47].

A nivel de funcionamiento, esta antena, como toda antena de tracking, funciona tanto con canales de subida como con canales de bajada. Concretamente, esta es capaz de trabajar en la banda S como en la banda X, siendo las frecuencias de funcionamiento de esta antena para ambos canales las siguientes:

| Banda | Banda S | Banda X |
|------------------------------|----------------|----------------|
| Canal de subida (MHz) | 2025 – 2110 | 7145 – 7190 |
| Canal de bajada (MHz) | 2200 – 2300 | 8400 – 8500 |

Tabla 3.2. Frecuencias de funcionamiento de la antena DSS-65 [49]

Esta antena se caracteriza, entre otras cosas, por la utilización de alimentadores de doble frecuencia, lo que permite operar en dos frecuencias simultáneamente sin utilización de una estructura dicróica para separarlas. Además, se obtiene una mejor eficiencia de apertura gracias a la utilización del doble reflector característico de las antenas Cassegrain. Pese a esto, la eficiencia de esta antena es similar al resto de antenas DSN del mismo diámetro (34 metros). Esta eficiencia es de aproximadamente el 70% [50].

Dicho esto, cabe destacar que la estructura general de la antena, teniendo en cuenta, además del reflector parabólico, el subreflector hiperbólico, los motores, el soporte altacimutal y los componentes internos tales como guías dieléctricas, amplificadores de bajo ruido, transmisores... hace que pese el peso total de la antena sea de 400 toneladas aproximadamente [46].

En cuanto a sus características de emisión y recepción, esta antena trabaja con las siguientes potencias y ganancias en la apertura de la bocina:

| Banda | Banda S | Banda X |
|-----------------------|----------------|----------------|
| EIRP (dBW) | 71.8 – 78.8 | 89.8 – 109.8 |
| Ganancia (dBi) | 56 | 68.3 |
| G/T (dB/K) | 39.4 | 53.2 |

Tabla 3.3. Parámetros de transmisión y recepción de la antena DSS-65 [49]

La precisión con la que esta antena trabaja a la hora de realizar las medidas es de 0.01° [46].

Además de antena de tracking, esta antena, junto a las otras antenas de 34 metros de diámetro forman una subred dedicada a la interferometría (VLBI) y al mantenimiento de fuentes radio catalogadas [60].

3.1.2 COMPONENTES

Los componentes de esta antena se pueden dividir de varias maneras (funcionalidad, tamaño, localización...) pero, para su explicación, estos se dividirán en estructura principal, para aquellos componentes expuestos a las condiciones meteorológicas y, en componentes internos, que son aquellos componentes que forman parte de la estructura interna de la antena.



Figura 3.1. Antena DSS-65

3.1.2.1 ESTRUCTURA PRINCIPAL

La estructura principal está compuesta por el colector principal y el subreflector. El reflector principal tiene forma de paraboloide de revolución y el subreflector convexo tiene forma de hiperboloide de revolución.

La estructura de esta antena es la misma que la de una antena Cassegrain habitual. Sin embargo, para el diseño de la misma, se realizaron diversos cálculos y estudios para obtener el mejor rendimiento posible.

Para poder obtener los mejores resultados, el subreflector hiperbólico debía poseer pequeñas distorsiones para que el patrón de radiación del alimentador de bocina pudiese iluminar uniformemente el reflector principal, destruyendo el patrón de fase característico que tendría con un hiperboloide de revolución ideal. Este patrón se recuperaría a través de modificaciones en el reflector principal.

Mediante estas modificaciones, se obtiene una distribución de amplitud y fase uniforme, consiguiendo la máxima eficiencia de iluminación posible para una antena Cassegrain de 34 metros de diámetro. Para ello, se debe tener en cuenta que ambos diagramas, los diagramas de radiación del campo eléctrico y del campo magnético deben ser lo más similares posible para obtener la máxima eficiencia de la antena posible.

Estos cambios en los reflectores provocan que el patrón de radiación sea diferente con respecto al patrón ideal. Este nuevo patrón de radiación se calcularía a partir de óptica geométrica, es decir, la frecuencia de trabajo no influye en la obtención del nuevo diagrama de radiación [48].

La independencia del patrón de radiación con respecto a la frecuencia es una clara ventaja al trabajar con un alimentador de doble frecuencia, ya que estas frecuencias de trabajo están separadas en dos bandas diferentes del espectro electromagnético.

A la hora de caracterizar la superficie del reflector principal, primero se debe realizar una holografía de microondas, para después medir la ganancia y con ello la eficiencia de este reflector:

Holografía de Microondas [51]

Esta técnica se encarga de caracterizar el rendimiento mecánico de la antena. Se basa en la transformada de Fourier entre el diagrama de radiación de campo lejano, y la distribución del campo de apertura. Se obtiene la amplitud y la fase de apertura que servirá para caracterizar parámetros de la antena, tales como la forma y la posición del reflector principal, la posición del subreflector, la iluminación de apertura de la antena y los posibles efectos de deformación causados por la gravedad.

Mediante esta técnica, se obtiene el diagrama de radiación de campo lejano complejo. Para ello, se necesita un objeto para tener una referencia de fase, como pueden ser los satélites geostacionarios, para la realización de los cálculos. Además de para este cometido, este objeto de referencia permite mantener bloqueado en fase al receptor con respecto a la portadora.

La exactitud del mapa holográfico creado varía con respecto a la amplitud de la iluminación en la apertura, siendo mejor cuando más cerca está del centro del reflector principal. Para conseguir una iluminación uniforme (objetivo de diseño), la exactitud del mapa holográfico debe ser relativamente constante.

Tras una serie de correcciones, la función de apertura final se define mediante el mapa holográfico efectivo, ya que incluye todos los efectos de fase que influyen al rendimiento de la antena. Estos efectos son la dispersión producida por el subreflector, la fase del alimentador y los posibles efectos de difracción producidos por riostras.

Para poder eliminar los efectos de la fase del alimentador y los efectos de difracción, se necesita realizar un mapeado holográfico independiente llamado “mapa mecánico”, mapa que nos ofrece la información de configuración del reflector principal.

Medidas de Teodolito [51]

Una de las principales comprobaciones tras la construcción del reflector principal son las medidas realizadas mediante teodolito. Este instrumento, que se atornilla en el centro del reflector para poder realizar las medidas angulares necesarias, sirve para poder obtener, de esta forma, la mejor superficie posible, una vez ya construida. Mediante esta técnica, se estudian los diferentes cambios posibles con el fin de mejorar el rendimiento del paraboloide obteniendo la eficiencia de la antena.

Este se dispone en el centro del plato para medir los ángulos con respecto a 12 vértices de referencia. Sobre estos vértices, se colocan una serie de paneles perforados donde se localizan los objetivos de medición cuyas perforaciones se encuentran a 11,15 mm por encima del borde del reflector. Estas mediciones se realizan tanto a nivel angular (desviación angular) como a nivel radial (desviación longitudinal).

Una vez realizada la medida sobre los 12 objetivos, estas se guardan como medidas de referencia para las siguientes medidas. Estas medidas se comparan con las medidas ideales, realizadas previamente mediante software, para que se puedan obtener los errores de la superficie parabólica.

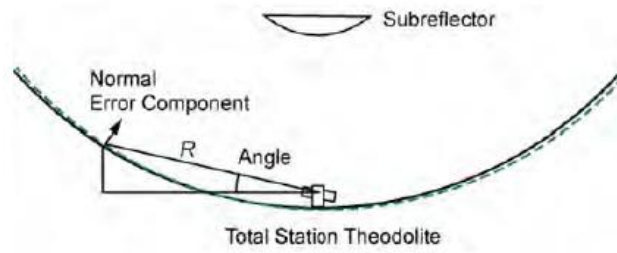


Figura 3.2. Método de caracterización con teodolito

En el caso de un paraboloides de revolución de 34 m de diámetro, un error angular de $0,001^\circ$ equivale a un error de 0,2 mm con respecto a la superficie del reflector. A nivel radial, un error de 1 mm de distancia radial equivale a un error de 0,26 mm con respecto a la superficie del reflector.



3.1.2.2 COMPONENTES INTERNOS

Los componentes internos son aquellos que están localizados en el interior de la estructura o en lugares imperceptibles a simple vista. Estos se desarrollan en el siguiente diagrama de bloques:

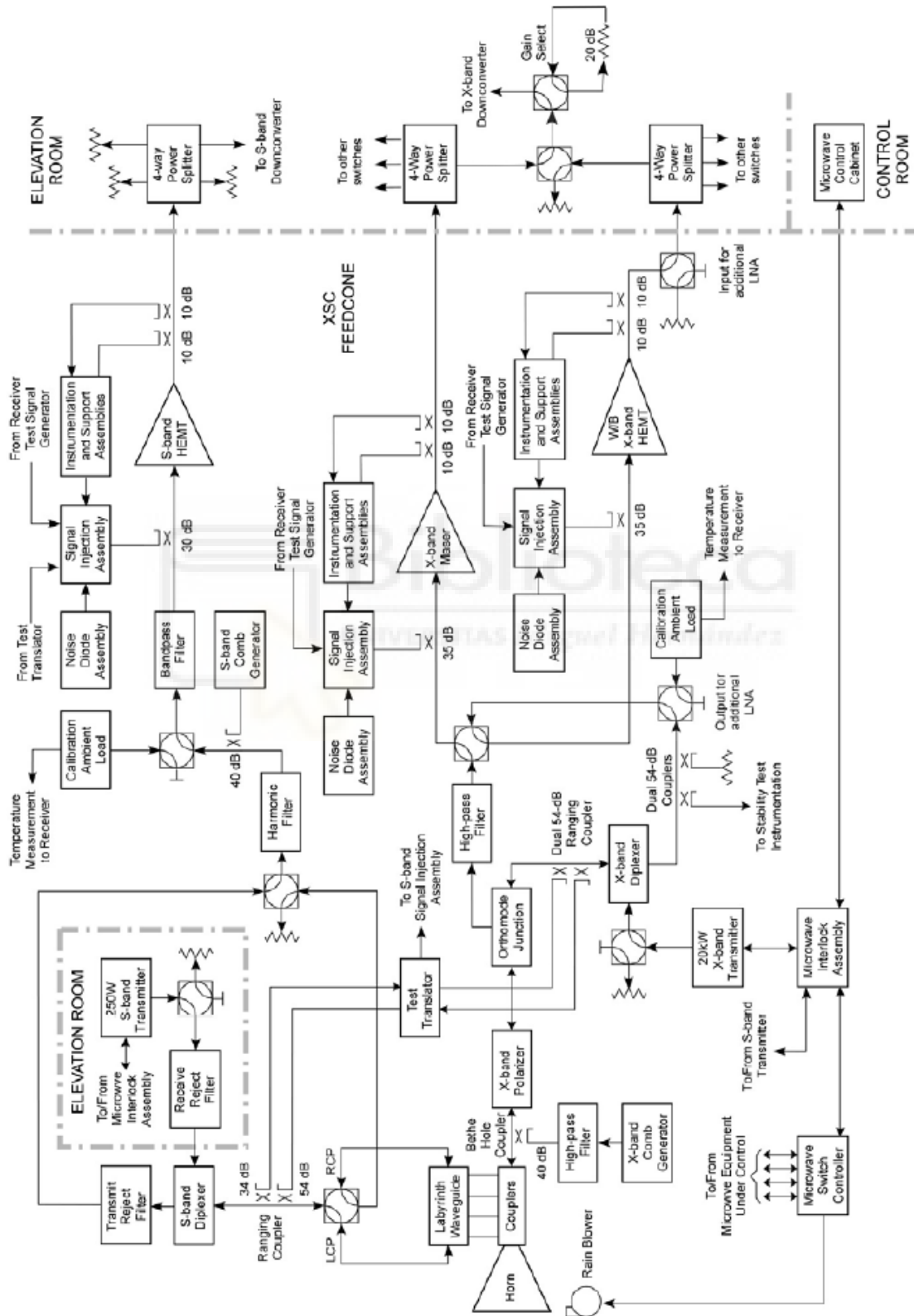


Figura 3.3. Diagrama de bloques de la DSS-65 [52]

Los componentes más importantes son los siguientes:

Alimentador

El alimentador de la antena está formado por una bocina cónica corrugada, cuyas hendiduras del interior tienen una profundidad de entre $\frac{\lambda}{4}$ y $\frac{\lambda}{2}$ con respecto a la longitud de onda de trabajo, para que, de esta forma, se pueda transmitir el modo híbrido HE₁₁ de forma apropiada (pérdidas mínimas). Además, a parte de estos dos valores de profundidad, estas hendiduras también pueden tener valores de múltiplos impares de los valores anteriores para trabajar en otras frecuencias (valores escalados).

En nuestro caso, las profundidades de la bocina corrugada de la antena DSS-65 son mayores de $\frac{\lambda}{4}$ y menores que $\frac{\lambda}{2}$ para la banda S y, mayores que $\frac{5\lambda}{4}$ y menores que $\frac{3\lambda}{2}$ para la banda X, teniendo en cuenta las longitudes de onda de trabajo de ambas bandas.

Para desarrollar el funcionamiento de este particular alimentador, se debe tener en cuenta que trabaja con la banda S (tanto transmisión como recepción) a partir de la alimentación de la bocina en una región suficientemente grande de la bocina desde una línea radial alrededor de la misma. Esta señal se inyecta sobre esta línea radial desde cuatro puntos de alimentación excitados en una progresión de fase de 90°, con el fin de crear una señal con polarización circular.

Esta línea radial lleva cuatro estranguladores radiales para evitar que las señales de la banda X se propague dentro del combinador de la banda X/S (inyector de señales en banda S) [47].

Este sistema es idóneo para señales en banda X, puesto que no inyecta un aumento de la temperatura de ruido por sí mismo. Este suceso se descubrió tras comparar este alimentador de doble frecuencia con un alimentador estándar de banda X de DSN.

Este alimentador es el primer alimentador utilizado en la DSN que trabaja con dos bandas de frecuencias simultáneamente, tanto en transmisión como en recepción y cumple con dos condiciones básicas con respecto al patrón de radiación:

1. El patrón de radiación del campo eléctrico es similar al patrón del campo magnético (iguales bajo condiciones ideales).
2. Los patrones de ambas frecuencias de trabajo son similares.

Además, cabe resaltar que es un alimentador compatible con todas las antenas de la DSN, mejorando, así la flexibilidad entre antenas DSN.

Las pérdidas de potencia en el alimentador aumentan considerablemente la temperatura de ruido. Concretamente, aumenta 7 K por cada 0.1 dB de pérdida de potencia recibida a temperatura ambiente. Para minimizar estas pérdidas, debemos minimizar las pérdidas por spillover y las pérdidas por iluminación. [53]

Otro tipo de pérdidas de potencia a tener en cuenta son las pérdidas producidas por las irregularidades del reflector principal, que se pueden obtener mediante el estudio realizado con la ayuda del teodolito mencionado anteriormente.

Combinador S/X de Segunda Generación

A mediados de 1976, la NASA inició un programa encargado de diseñar una bocina de doble frecuencia sin necesidad de la utilización de un diroico para su funcionamiento. En este programa, además de obtener el alimentador de la antena DSS-65 explicado anteriormente, otro de los principales objetivos fue la implementación de un combinador de señales compatible con este nuevo alimentador.

Tras una serie de pruebas con diferentes combinadores conocidos hasta la fecha, los encargados del proyecto decidieron que el combinador de señales de esta antena fuera un combinador de segunda generación que permite transmitir en banda S con una potencia hasta de 20 kW.

También plantearon la idea de utilizar un combinador de tercera generación, con el que poder transmitir señales hasta de 400 kW en banda S, pero, debido a su pobre desarrollo en el momento de fabricación de esta antena, esta idea se desechó [47].

Este combinador se encarga de extraer las señales en banda S recibidas por la bocina aportando el mínimo nivel de pérdidas posibles. El aislamiento que este realiza sobre las señales en banda X produce que las posibles contribuciones de ruido no afecten a las señales en banda S. Esta se realiza a través de cuatro estranguladores en la línea radial.

Para obtener un buen nivel de potencia para señales en banda S, se deben insertar iris de sintonización dentro del área de la línea radial. Estos iris son bloques de metal introducidos en porciones de los estranguladores anteriormente mencionados con el fin de ajustar la frecuencia de las señales. De esta manera, se mejora el funcionamiento del combinador.

En este combinador, la altura de la sección radial es de 12,7 mm para obtener un ancho de banda que va desde 2,1 GHz hasta 2,3 GHz.

Pese a estas medidas, estas no son compatibles con una guía estándar de banda S. Para que el sistema sea compatible, se debe utilizar un transformador-sintonizador que transforme los 12,7 mm de la sección en 54,6 mm de una sección estándar de una guía en banda S.

El combinador final se diseñó para transmitir potencias hasta de 20 kW o 5 kW desde cada punto de alimentación, transmitiendo señales polarizadas circularmente. Estas potencias se calcularon para seguridad de las transmisiones, pero, el sistema empieza a fallar al trabajar con potencias de transmisión mayores a 100 kW [54].

Transmisores

Se encargan de crear las señales que transmite la antena DSS-65. Al trabajar en dos bandas de frecuencias diferentes, se necesitan dos transmisores y su potencia de transmisión es un parámetro esencial para la comunicación con las aeronaves.

Amplificador de Bajo Ruido (LNA)

Los amplificadores empleados en esta antena son amplificadores criogénicos con el objetivo principal de amplificar la señal recibida minimizando la temperatura de ruido obtenida en la recepción de esta.

Esta antena tiene dos amplificadores HEMT y un amplificador máser. Los amplificadores HEMT son transistores de efecto campo basados en heterouniones, mientras que el amplificador máser de banda X es un amplificador basado en emisión estimulada de radiación. [55][56]

Conversor Descendente

Encargado de disminuir la frecuencia de las señales recibidas para poder ser transportadas con un menor nivel de pérdidas. Este conversor es uno de los componentes más importantes debido a que, mediante esta disminución de frecuencia, disminuimos la atenuación en el transporte de estas señales hacia el ordenador que las interpretará.

La antena DSS-65 consta de dos conversores descendentes, uno para cada banda de recepción.

Componentes de tratamiento y filtrado

Estos componentes, los cuales serán descritos más detalladamente en próximos puntos de la memoria, sirven para el control y optimización de las señales transmitidas y recibidas por la antena. Básicamente, son componentes tales como filtros, generadores, elementos de calibración y control de temperatura...

3.1.3 FUNCIONAMIENTO

Esta antena puede trabajar en dos tipos de modo de recepción, con la principal diferencia del nivel máximo de señal recibida que el sistema puede soportar según el modo en el que se trabaje, diferenciando entre el modo de alta ganancia y el de baja ganancia. En modo de alta ganancia, puede alcanzar un nivel máximo de -90 dBm o 1 pW y, en modo de baja ganancia, se puede acomodar para obtener un nivel máximo de señal de -70 dBm o 100 pW [57].

Si trabajamos entre estos valores, se debe avisar a la DSN para que se puedan realizar las configuraciones apropiadas al sistema.

En cuanto al tipo de tracking utilizado, la antena DSS-65 puede funcionar en dos modos de tracking diferentes [58]:

Tracking Coherente: Este modo consiste en la recepción de datos obtenidos a partir de una señal previa, trabajando, de esta manera, con frecuencias de referencia.

Se conocen como comunicaciones bidireccionales (cuando se utilizan las mismas estaciones para la transmisión y recepción y, comunicaciones a tres bandas cuando las estaciones para la transmisión y recepción son diferentes).

La mayor desventaja de este tipo de tracking es que las comunicaciones se pueden ver afectadas por los efectos atenuantes producidos debidos al medio de transmisión.

Tracking No Coherente: Al contrario que el anterior modelo de tracking, este consiste en la recepción de datos que no están basados en una señal de subida transmitida por la estación terrena anteriormente.

El error más común cuando se trabaja con tracking no coherente es que no tenemos una frecuencia de referencia y, por tanto, es más difícil trabajar en la recepción de señales con

este modo, pese a que la estación tiene la misma capacidad de medición de la fase de las señales recibidas que con el uso de tracking coherente.

El funcionamiento general de la antena también se puede dividir en diferentes “modos”, en función del tipo de señal con el que estemos trabajando. Esta clasificación se define de la siguiente manera:

Transmisión en banda S: Se transmiten las señales a partir del transmisor en banda S cuya potencia es de 250 W con el objetivo principal de dar soporte a las aeronaves cercanas a la Tierra. Estas señales, controladas por el sistema de control de la propia antena, pasan por el diplexor para que las señales de transmisión y de recepción no puedan causar interferencias entre sí.

Después de pasar por el diplexor, la señal pasa por un dispositivo llamado Test Translator. Este componente desplaza las señales a la frecuencia de transmisión correspondiente antes de volver a inyectarlas de nuevo para que puedan continuar su recorrido hacia la bocina. Este dispositivo trabaja tanto para las señales de transmisión en banda S como para las señales de transmisión en banda X.

Tras el proceso creado por el Test Translator, la señal pasa a través de un conmutador conectado a través de dos puertos hacia una guía de ondas en forma de laberinto. La conexión mediante dos puertos se realizó para poder transmitir señales con ambas polarizaciones circulares (levógira y dextrógira). De esta manera, es posible trabajar con dos tipos de polarizaciones a la vez en el sentido de la transmisión, pero, al tener solo un LNA de banda S, este conmutador, junto con el conmutador situado al lado del filtro armónico, servirán para poder seleccionar el tipo de polarización deseada de recepción.

Tras la guía de ondas, las señales son dirigidas al combinador del alimentador, para que estas puedan ser transmitidas hacia el exterior.

Transmisión en banda X: Se transmiten las señales a partir del transmisor en banda X cuya potencia es de 20 kW. Estas señales, controladas por el sistema de control de la propia antena, pasan por un diplexor que se encarga de no mezclar las señales de entrada y de salida que trabajan en la misma banda de frecuencias (mismo funcionamiento que en la transmisión en banda S).

Después, tras pasar por el Test Translator, el cual tiene la misma función que en la transmisión en banda S, y el transductor ortomodal, las señales pasan por un polarizador antes de llegar al combinador para que estas puedan ser transmitidas con polarización circular.

Tras llegar al combinador, las señales en banda X se transmiten gracias a la bocina.

Cabe resaltar que el combinador se encarga de no mezclar las señales en banda S y en banda X que se transmiten simultáneamente, evitando posibles ruidos en la transmisión.

Recepción en banda S: La señal captada por la bocina es guiada, a través de la guía de ondas en forma de laberinto, por diferentes vías en función del modo de funcionamiento de la antena en banda S. Para el modo diplexado, la señal debe recorrer la vía donde se sitúa el diplexor mencionado con anterioridad antes de llegar al filtro armónico, por lo que esta vía será el camino con mayor temperatura de ruido de los dos. Para el modo no

diplexado, la señal pasa directamente al filtro armónico, por lo que se obtiene una menor temperatura de ruido (camino inferior).

Una vez filtradas, las señales resultantes pasan por un HEMT (High Electron Mobility Transistor) de banda S para, finalmente, entrar al conversor descendente de banda S. En este caso, la temperatura de ruido es menor que en la transmisión en banda S puesto que, al trabajar con frecuencias mayores, las señales son más sensibles a ruidos.

Recepción en banda X: La señal recibida pasa por los acopladores directamente al polarizador de banda X, para poder llegar al transductor ortomodal, encargado de separar las señales según su polarización circular (levógira o dextrógira). De esta manera, las señales se podrán tratar simultáneamente ya que el sistema esta compuesta de dos LNAs.

En este punto del sistema, dependiendo del modo de funcionamiento en recepción, las señales en banda X sufren los siguientes efectos:

Por un lado, en el modo diplexado, la señal pasa por el diplexor, por lo que puede conllevar un aumento de ruido que se debe tener en cuenta con respecto al modo no diplexado. Esto significa que en este modo se esperan mayores temperaturas de ruido. Para el modo no diplexado, la señal entra directamente al filtro paso banda. En este modo, las señales tienen una temperatura de ruido inferior.

Teniendo en cuenta las temperaturas de ruido, las señales, tras ser filtradas, pueden pasar por el sistema antiguo de amplificación de señales formados por el máser, o bien, pasar por el nuevo sistema formado por el HEMT.

Tras ser amplificada, la señal final, dependiendo de la localización de su transmisión, la señal recibida puede pasar previamente por un modo de baja ganancia para la recepción de altos niveles de señales emitidas por las aeronaves cercanas a la Tierra.

En ambos modos de funcionamiento (diplexado y no diplexado), la señal finaliza en el mismo conversor descente de banda X.

3.1.4 PARÁMETROS DE LA ANTENA DSS-65

3.1.4.1 RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE APERTURA

El rendimiento de este tipo de antenas se calcula a partir de los patrones de radiación de la bocina en ambas bandas de trabajo con la ayuda de software basado en óptica física. Para este estudio, se deben conocer los inconvenientes a los que se enfrenta una antena Cassegrain de tracking como esta. Los principales inconvenientes son:

- Radiación de cuerpo negro
- Efectos de bloqueo (eficiencia de bloqueo)
- Temperatura de ruido del sistema

La *radiación de cuerpo negro* procedente de la superficie terrestre se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R (K) = 240 * \eta_s \quad (3.1)$$

Siendo η_s la eficiencia de spillover.

Para el cálculo de la eficiencia de bloqueo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de bloqueo} = [1 - 1.2(Ap)]^2 \quad (3.2)$$

Siendo A_p el porcentaje de sombreado del reflector principal (subreflector, soportes...).

El incremento de la temperatura de ruido del sistema a partir de una fuente conocida es una medida de rendimiento, teniendo en cuenta los efectos que produce la atmósfera terrestre (atenuación atmosférica).

Estos efectos atenuantes se aproximan a partir de las condiciones climáticas de la superficie terrestre, que se obtienen midiendo la temperatura de la superficie, la presión atmosférica y la humedad relativa cada media hora.

La eficiencia de la antena es la ganancia de la antena relativa a una antena de apertura circular iluminada uniformemente. Este parámetro se registra a la entrada del amplificador de bajo ruido, incluyendo así las pérdidas del sistema de alimentación.

En el caso de la antena DSS-65, la eficiencia de la antena es del 0.75 para la banda X y 0.67 para la banda S [59].

3.1.4.2 TEMPERATURA DE RUIDO DEL SISTEMA

Para obtener este parámetro, se pueden utilizar algunos instrumentos, tales como son radiómetros (medidas reales) o, por el contrario, también se utilizan estándares de ruido térmico (medidas aproximadas) para obtener de forma más directa la temperatura de ruido.

Los radiómetros son instrumentos que se calibran inyectando una fuente de ruido conocida en su entrada, para que después, la SNR obtenida sirva para calcular la temperatura de ruido. Esta calibración se puede realizar tomando el ruido inyectado y las pérdidas por separado o tomar la temperatura de ruido de exceso directamente desde la entrada al receptor.

Los métodos prácticos más utilizados en el cálculo de la temperatura del sistema son los siguientes [51]:

- **Seven-point Boresight:** Esta técnica consiste en realizar 7 barridos sobre una fuente de referencia, moviendo la antena en la dirección de elevación (EL) y elevación transversal (XEL) secuencialmente. A partir de estos barridos, se calcula el valor máximo de la curva creada al realizar cada barrido de manera independiente.

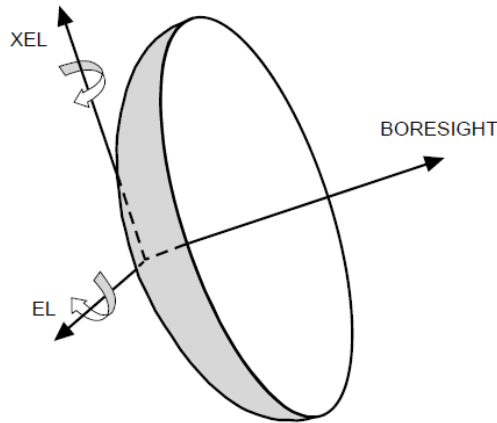


Figura 3.4. Sistema coordinado en EL y XEL

Estos 7 barridos se realizan periódicamente y, se comparan con los 7 barridos anteriores para poder realizar correcciones de apuntado. De esta manera, se obtiene la temperatura de ruido de manera precisa.

- **Técnica de terminación ambiental:** Técnica más utilizada para la obtención de la temperatura del sistema. Mediante esta técnica, las calibraciones se realizan conectando el amplificador de bajo ruido (LNA) a un guía de onda, que actúa como un switch para alternar medidas entre la antena y la terminación ambiental. De este modo, la temperatura de ruido queda como la suma de la temperatura de la antena y la temperatura de ruido recibida (medición de la terminación ambiental).

El método de cálculo teórico [57] de este parámetro es el siguiente:

La temperatura de ruido depende del ángulo de elevación debido a cambios de la longitud del camino a través de la atmósfera y, al ruido del suelo recibido por el lóbulo lateral del patrón de radiación. La siguiente ecuación se ha sintetizado a partir de un modelo de Tierra Plana:

$$T_{op}(\theta) = T_{AMW} + T_{sky} = [T_1 + T_2 e^{-a\theta}] + [T_{atm}(\theta) + T'_{CMB}(\theta)] \quad (3.3)$$

Esta ecuación, que depende de la temperatura de la antena y la temperatura del cielo, se puede descomponer en las siguientes ecuaciones:

Temperatura de la Antena:

$$T_{AMW} = [T_1 + T_2 e^{-a\theta}] \quad (3.4)$$

Donde T_1 , T_2 y a son coeficientes definidos en la siguiente tabla:

| Banda de trabajo | Configuración | T_1 (K) | T_2 (K) | a |
|--------------------------|---|-----------|-----------|-------|
| S | LNA-1, HEMT, No Diplexado | 31.80 | 7.1 | 0.013 |
| | LNA-1, HEMT, Diplexado | 39.40 | 7.6 | |
| X (ambas polarizaciones) | LNA-1, Alta Ganancia, Máser, No Diplexado | 15.43 | 5.0 | 0.010 |
| | LNA-1, Alta Ganancia, Máser, Diplexado | 24.83 | 6.1 | |

| | | |
|---|-------|-----|
| LNA-2, Alta Ganancia, HEMT, No Diplexado | 32.16 | 5.5 |
| LNA-2, Alta Ganancia, HEMT, Diplexado | 41.56 | 6.6 |
| LNA-1, Baja Ganancia, Máser, No Diplexado | 20.52 | 5.0 |
| LNA-1, Baja Ganancia, Máser, Diplexado | 29.92 | 6.1 |
| LNA-2, Baja Ganancia, HEMT, No Diplexado | 43.16 | 5.5 |
| LNA-2, Baja Ganancia, HEMT, Diplexado | 52.56 | 6.6 |

Tabla 3.4. Coeficientes de la temperatura de la antena

Temperatura del Cielo:

$$T_{sky} = T_{atm}(\theta) + T'_{CMB}(\theta) = T_M \left[1 - \frac{1}{L(\theta)} \right] + \frac{T_{CMB}}{L(\theta)} \quad (3.5)$$

Esta temperatura depende de los siguientes parámetros:

T_{atm} : Contribución de temperatura atmosférica (K).

T'_{CMB} : Contribución de temperatura de ruido cósmico (K).

T_{CMB} : Temperatura cósmica para todas las frecuencias de DSN = 2.725 K

T_M : Temperatura de radiación media efectiva (K):

$$T_M = 255 + 25 * CD \quad (3.6)$$

El parámetro CD representa la distribución acumulativa respecto a las condiciones meteorológicas, siendo un valor CD = 0.00 el mínimo efecto meteorológico en el 100% del tiempo) mientras que un valor de 0.9 equivale a que las condiciones meteorológicas solo son favorables el 10% del tiempo.

Se pueden clasificar estas distribuciones acumulativas en diferentes tipos de condiciones atmosféricas, quedando de la siguiente manera:

| CD | Condición meteorológica |
|------|-------------------------------|
| 0.00 | Atmósfera Seca |
| 0.25 | Media de Tiempo Despejado |
| 0.5 | Atmósfera Húmeda |
| 0.9 | Nubes Abundantes (sin lluvia) |

Tabla 3.5. Distribuciones acumulativas

L: Factor de pérdidas atmosféricas:

$$L(\theta) = 10^{\frac{A(\theta)}{10}} \quad (3.7)$$

A: Pérdidas atmosféricas (dB):

$$A(\theta) = A_{zen} * AM = \frac{A_{zen}}{\sin \theta} \quad (3.8)$$

A_{ZEN} : Atenuación atmosférica del zenit (dB):

| Distribución Acumulativa | Banda S | Banda X |
|--------------------------|---------|---------|
| Condición de vacío | 0.000 | 0.000 |
| 0.00 | 0.035 | 0.038 |
| 0.5 | 0.035 | 0.044 |
| 0.9 | 0.036 | 0.057 |

Tabla 3.6. Atenuación atmosférica del zenit en función de la distribución acumulativa

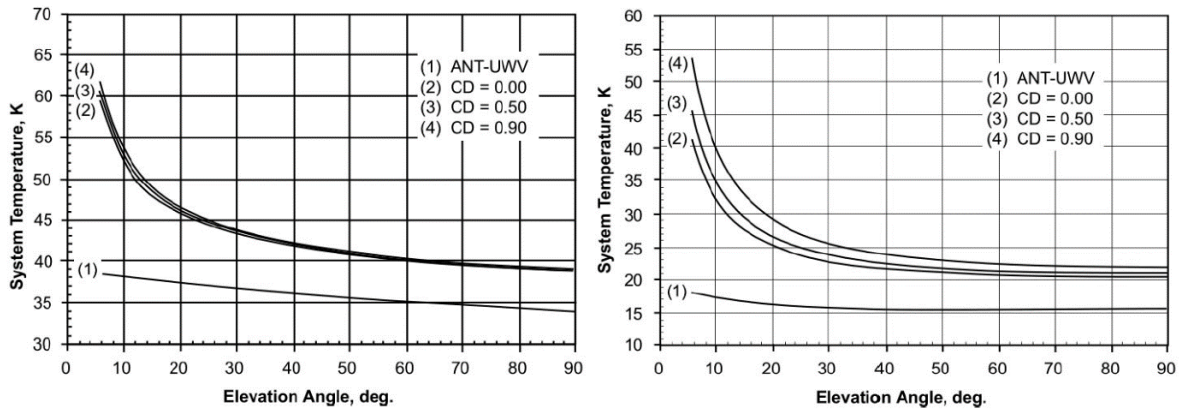


Figura 3.5. Temperaturas del sistema de recepción en banda S y X respectivamente

Otras pérdidas por considerar en el sistema son las pérdidas debidas a las deformaciones estructurales. Estas deformaciones causan una reducción de ganancia cuando la antena trabaja con un ángulo de elevación diferente al ángulo en el que se alinearon los reflectores.

3.1.5 CÁLCULOS Y AJUSTES DE LA ANTENA

Una vez realizados los cálculos y modificaciones de ambos reflectores, se obtuvo la máxima eficiencia de iluminación posible gracias a una distribución de amplitud y fase uniforme, generando una ganancia en las distribuciones de amplitud y de fase cercanas a 1dB.

El proceso para obtener esta conclusión fue el siguiente [48]:

Primero, el patrón de radiación del alimentador se obtuvo teóricamente aplicando óptica geométrica. Cualquier patrón de radiación a cualquier frecuencia de funcionamiento y con un patrón de fase uniforme, se transforma en un patrón de iluminación distorsionado por la similitud del patrón de radiación final con respecto al patrón de radiación calculado.

Cabe resaltar que, para el correcto funcionamiento del alimentador de doble frecuencia utilizado, los patrones de radiación de ambas frecuencias de trabajo deben ser muy similares (iguales bajo condiciones ideales).

Como resultado final, la iluminación final obtenida de esta antena de tracking es la misma iluminación que la de una antena parabólica cuyo alimentador se encuentra en el foco del reflector, pero, con una mayor distancia focal.

A partir de este estudio previo, se realizaron los siguientes *cambios de diseño*:

- Se eliminó la iluminación de la región central, reduciendo el bloqueo del subreflector y mejorando la eficiencia de bloqueo gracias a la sintetización de la placa de coincidencia de vértices, sin tener en cuenta la distorsión de fase que este proceso le acompaña.
- La distancia del plano de apertura al vértice del reflector principal se convirtió en un parámetro de diseño. Esta distancia se fijó a 4.915 metros.
- El rayo que se refleja en el vértice del subreflector no acaba reflejándose sobre el vértice del reflector principal, sino que se refleja a 16.383 metros del eje simétrico de ambos reflectores debido a que, en el vértice del reflector principal, la energía decae abruptamente a 0. Por tanto, si trabajáramos con estas medidas, la contribución del ruido por spillover aumentaría considerablemente.

Estos cambios producen una pequeña disminución en la eficiencia de iluminación, pero se produce una disminución considerable de ruido debido al “spillover”, mejorando este tipo de eficiencia. Además, estos cambios de diseño generan una G/T (ratio ganancia de antena a temperatura del sistema) óptima para las dimensiones de trabajo.

Para el cálculo de la ganancia (dBi), debemos recurrir a la siguiente ecuación en función del ángulo de elevación de la antena [57]:

$$G(\theta) = G_0 - G_1(\theta - \gamma)^2 - \frac{A_{ZEN}}{\sin \theta} \quad (3.9)$$

Siendo los parámetros G_0 , G_1 , y γ coeficientes definidos por la siguiente tabla:

| Banda de trabajo | G_0 en transmisión | G_0 en recepción | G_1 (*10 ⁻⁶) | γ |
|------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|----------|
| Banda S | 55.4 ± 0.5 | 56.1 ± 0.5 | 6 | 42 |
| Banda X | 67.1 ± 0.5 | 68.4 ± 0.5 | 80 | 42 |

Tabla 3.7. Parámetros de ganancia en vacío

Una vez que tenemos las ganancias de la antena para las frecuencias de trabajo f_0 , podemos calcular las ganancias de la antena para frecuencias dentro de la misma banda. Esto es que, si trabajamos a frecuencias superiores a f_0 , la ganancia se incrementa en un factor $20 \log(f/f_0)$ y, si, por el contrario, queremos trabajar a frecuencias más bajas dentro de la misma banda de frecuencias, la ganancia se decrementa el mismo factor ($20 \log(f/f_0)$) [60].

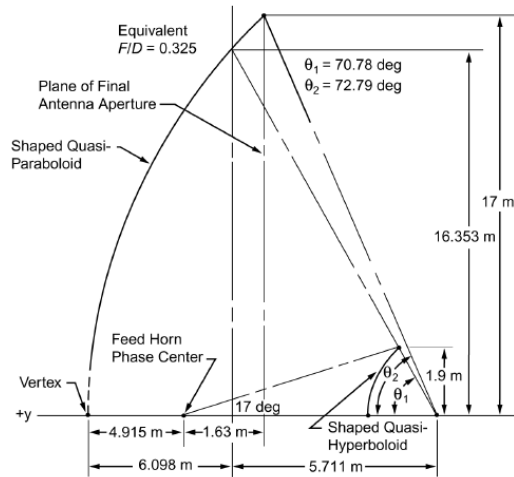


Figura 3.6. Esquema óptico de la antena DSS-65

El hecho de situar el alimentador de bocina en esta posición hace que el ángulo de radiación del alimentador con respecto al subreflector sea de 34° , con lo que se obtienen unas pérdidas por spillover del 2% en la banda X y unas pérdidas cercanas al 9% en la banda S.

3.2 RADIOTELESCOPIO

3.2.1 INTRODUCCIÓN

Para el análisis del nuevo radiotelescopio, debemos conocer, al igual que la antena anterior, su funcionamiento general, así como el funcionamiento y descripción de todos sus componentes, para así, poder elegir las características más apropiadas para la nueva antena.

Para el análisis del radiotelescopio, tenemos en cuenta que la mayoría de los radiotelescopios profesionales son antenas parabólicas.

3.2.2 COMPONENTES

3.2.2.1 COLECTOR DE ONDAS

Siendo la parte más importante de un radiotelescopio, los colectores son los encargados de captar las señales deseadas a partir de una serie de características.

El principal componente de un radiotelescopio, así como el más voluminoso, es el colector principal. Este se caracteriza por tener forma de paraboloides de revolución, de manera que, gracias a su geometría es capaz de reflejar las ondas captadas sobre su foco real.

Después, en función del diseño de la estructura del radiotelescopio, sobre el foco del colector principal se instala el alimentador del radiotelescopio, o bien, un segundo reflector, llamado subreflector que se encarga de reflejar de nuevo las ondas sobre el centro del colector principal, donde se localiza el alimentador. Este es el caso ideal, las posiciones de los componentes pueden variar en función de las necesidades y rendimientos requeridos.

En función del tipo de estructura del radiotelescopio, se puede clasificar en:

- Antena parabólica de foco centrado: Antenas formadas por un colector de ondas cuya superficie forma un paraboloides de revolución. Su función es la de redirigir las ondas captadas hacia un alimentador situado en el foco de la parabólica.
- Antena parabólica de foco desplazado: Antenas parabólicas con el alimentador desplazado con respecto al foco para así, de esta manera, las sombras creadas por el foco centrado por efecto bloqueo disminuirían en gran medida si el alimentador no se encuentra dentro del rango perteneciente a la superficie de captación de ondas (apertura principal).
- Antena Cassegrain: El alimentador de la antena se sitúa en el centro del colector de ondas puesto que este tipo de antenas están formadas por un subreflector hiperbólico convexo que redirige las ondas, captadas por el colector principal, hacia el alimentador localizado en el centro del colector principal (foco virtual del subreflector). Esta estructura establece grandes ventajas con respecto a las anteriores en la recepción de señales.
- Antena Gregoriana: Mismos componentes que la antena Cassegrain cuya diferencia principal con respecto a esta es que el subreflector es cóncavo.

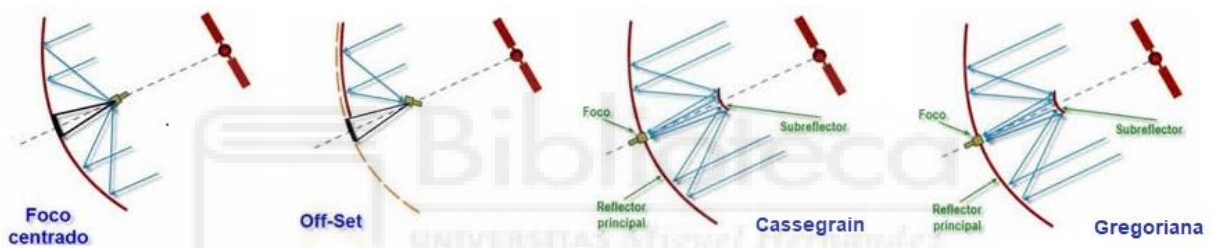


Figura 3.7. Tipos de antena parabólica [61]

Normalmente, las antenas Cassegrain y Gregoriana son las antenas con las que se obtiene un mayor rendimiento y, por tanto, son las más utilizadas en la construcción de un radiotelescopio.

3.2.2.2 ALIMENTADOR

Este alimentador consiste en una guía de onda capaz de captar señales a las longitudes de onda necesarias. Para la elección del tipo de alimentador, debemos tener en cuenta que solo nos interesa las señales de radio que emanan del objeto celeste a analizar.

Por tanto, esta guía de onda tiene una doble funcionalidad:

Por una parte, debe dejar pasar las ondas que trabajan a nuestra longitud de onda de trabajo, discriminando el resto de las posibles ondas captadas. Y, por otra parte, se deben obtener los mismos planos de radiación para los campos eléctricos y para los campos magnéticos.

Suponiendo que la longitud del alimentador no afecta a los patrones de radiación, siempre y cuando las frecuencias de trabajo no cambien, podemos emplear dos tipos de alimentadores:

Bocina Cónica de Modo Dual

Esta bocina, que también recibe el nombre de bocina de Potter, está formada por una guía circular monomodo conectada a otra guía circular de un tamaño ligeramente superior, lo que permitirá la recepción de ondas hasta el modo transversal TM_{11} , mediante una transición escalonada entre las dos guías.

Esta transición se puede elegir para obtener la cantidad deseada de modo TM_{11} a partir del modo fundamental de una guía circular (TE_{11}). Al viajar los dos modos por la guía, los planos de radiación de los campos eléctricos y magnéticos se igualan.

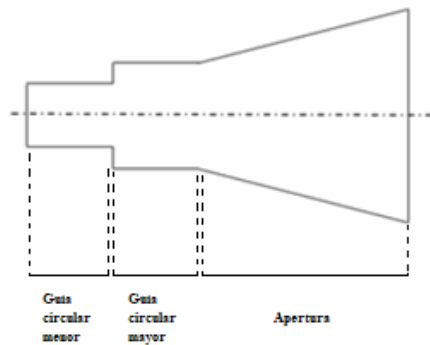


Figura 3.8. Esquema de bocina Potter

El principal inconveniente de este tipo de bocinas es que el ancho de banda es limitado ya que los dos modos tienen que estar en fase al final de la apertura y sus velocidades de fase varían mucho con respecto a la frecuencia de trabajo.

Bocina Corrugada

Esta bocina está formada por una guía lisa conectada a una guía corrugada, la cual, solo deja pasar el modo híbrido HE_{11} . Para ello, se hace coincidir las guías cambiando gradualmente la profundidad de ranura en función de la longitud de onda en un corto espacio de transición.

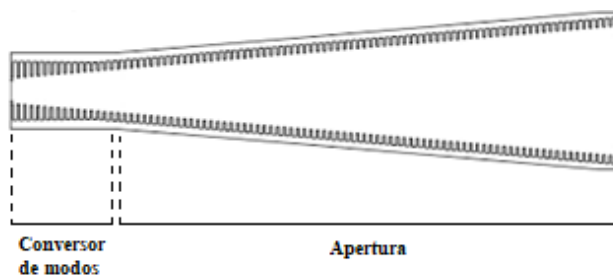


Figura 3.9. Esquema de bocina cónica corrugada

En la antena DSS-65, la cual utiliza este tipo de bocina en su estructura, la profundidad de ranura cambia de $\frac{\lambda}{2}$ a $\frac{\lambda}{4}$, haciendo de esta bocina una posible candidata para el futuro radiotelescopio, puesto que la transmisión de este modo híbrido provoca la obtención de los mismos planos radiación para ambos campos (eléctrico y magnético) cuando la profundidad de ranura sea de $\frac{\lambda}{4}$.

Esta bocina tiene un mayor ancho de banda que la bocina cónica de modo dual, ya que el patrón de radiación es poco sensible a cambios, siempre y cuando la profundidad de ranura sea de $\frac{\lambda}{4}$.

3.2.2.3 EQUIPO DE TRANSPORTE Y TRATAMIENTO DE SEÑALES

Estos componentes son necesarios para el transporte de las señales recibidas hacia un ordenador final, para que, de esta manera, puedan ser analizadas correctamente.

Debemos tener en cuenta que los cables deben proporcionar una atenuación mínima sobre las señales para perder la mínima información posible. Para ello, tendremos que elegir cables optimizados a nuestra longitud de onda de trabajo. La elección más adecuada sería el cable coaxial debido a que nuestra frecuencia de trabajo es lo suficientemente baja como para trabajar con este tipo de tecnología, además de que obtenemos un menor nivel de dificultad en la manipulación e instalación con respecto a otras tecnologías como pueden ser fibra óptica, por ejemplo.

3.2.2.4 ORDENADOR

El último componente principal que forma un radiotelescopio es el ordenador del mismo. En este, se localiza el software necesario para controlar al radiotelescopio de forma remota, así como su mantenimiento y solución de posibles problemas de forma telemática.

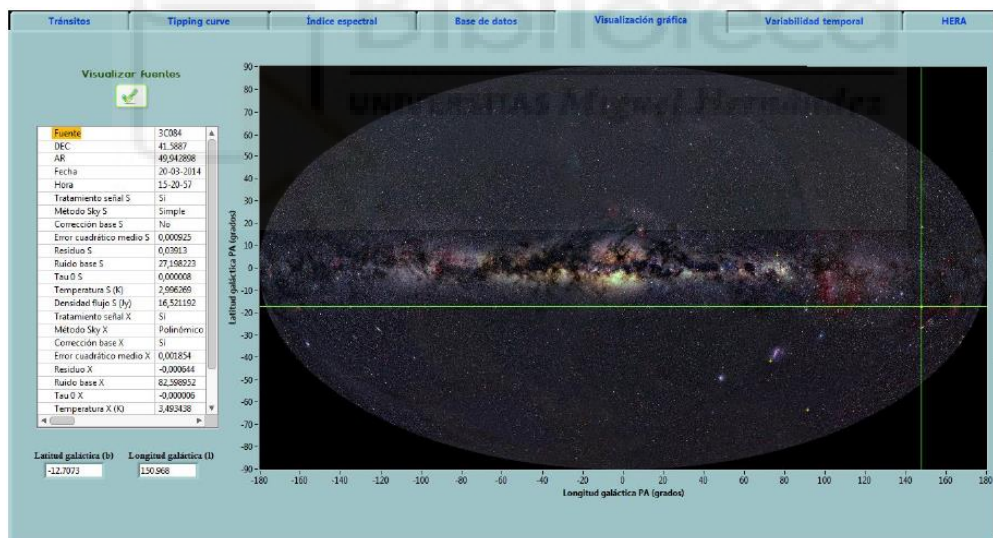


Figura 3.10. Interfaz del software HERA (Proyecto PARTNeR)

También se encarga de la interpretación de las señales recibidas para así, poder analizarlas cómodamente para su uso posterior en estudios de investigación, uso educativo, creación de mapas en radio...

3.2.3 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un radiotelescopio se basa en la recepción y tratamiento de ondas de radio procedentes de objetos celestes para poder desarrollar investigaciones en el ámbito de la radioastronomía.

Esta recepción se realiza a partir de un sistema formado por una superficie parabólica, llamada colector de ondas, superficie donde estas rebotan hacia otro subreflector, o bien hacia una guía de ondas (receptor de la antena). Una vez, las ondas de radio se encuentran en el receptor, estas deben pasar por un proceso de tratamiento, de manera que al final de este proceso, se pueda observar la señal radio obtenida de un objetivo a través de un monitor, así como sus características principales (temperatura, tamaño...).

Las distintas fases del funcionamiento de un radiotelescopio son las siguientes [62]:

3.2.3.1 RECEPCIÓN Y TRATAMIENTO DE ONDAS

La recepción de ondas de radio se debe realizar teniendo en cuenta una serie de parámetros, así como las características del tipo de ondas que queremos estudiar. Como ya he comentado anteriormente en este proyecto, el Universo está compuesto de diferentes tipos de elementos y diferentes tipos de radiaciones.

Si analizamos las diferentes radiaciones estudiadas hasta el momento, podemos observar como la radiación por líneas espectrales podría ser útil debido a que es un tipo de radiación en el que solo se propaga una longitud de onda y, por tanto, no se obtienen posibles interferencias procedentes de otros elementos. De igual manera, mediante este tipo de radiación, se ha comprobado que se puede traspasar objetos opacos a la luz visible, tales como nubes interestelares.

En nuestro caso, en un primer estudio, se diseñará el radiotelescopio para que se trabaje a las frecuencias del canal de bajada con las que trabaja actualmente la antena DSS-65 que son las siguientes:

Para la banda S, el radiotelescopio deberá permitir la recepción de ondas desde los 2,2 GHz hasta los 2,3 GHz y, para la banda X, este podrá recibir señales desde los 8,4 GHz hasta los 8,5 GHz.

Para la recepción de este tipo de ondas, la selección de la estructura de recepción es muy importante puesto que facilitará, en gran medida, la calidad de recepción de las señales. Al estar trabajando con ondas de radio, debemos tener en cuenta que las longitudes de onda de estas señales son las más grandes de todo el espectro electromagnético, de manera que, para su correcta recepción, se debe utilizar captadores formados por grandes aperturas para obtener una buena resolución de las señales recibidas.

También cabe destacar que este tipo de ondas son recibidas a niveles de potencia muy bajos, por lo que pequeños ruidos en otras bandas pueden alterar las observaciones, haciéndolas inservibles.

Teniendo en cuenta estos dos factores, las antenas más eficaces para la recepción de ondas de radio son aquellas cuya abertura se apoya en un subreflector puesto que ofrecen diferentes ventajas [63]:

- Reducción de ruido procedente de otras ondas captadas por el colector principal.
- El subreflector permite variar el patrón de radiación para obtener un mayor rendimiento, permitiendo la disminución de lóbulos secundarios. Este tipo de antenas ofrecen alrededor de un 70% de eficiencia mientras que las antenas sin subreflector pueden llegar a unos niveles de rendimientos máximos del 60%.

Pero, este tipo de antenas también ofrecen ciertas desventajas como:

- Bloqueo que ofrece el subreflector en la recepción de señales. La solución de este problema es utilizar antenas con foco desplazado (poco comunes).
- La anchura de haz del alimentador debe ser más pequeña puesto que el haz de ondas que se obtiene en el subreflector es menor que el que se obtendría en el colector principal.

3.2.3.2 TRANSPORTE Y ANÁLISIS DE DATOS

Una vez obtenemos las señales eléctricas procedentes del alimentador, el siguiente paso es el traslado de estas señales hasta el ordenador que caracterizará los parámetros dependiendo de su configuración.

Para la correcta elección del cableado, cabe tener en cuenta que este será elegido en función de la frecuencia de trabajo. Para ello, debemos considerar las diferentes posibilidades que nos ofrece el mercado en la actualidad.

En nuestro caso, el diseño de nuestro futuro radiotelescopio debe disminuir la frecuencia de la señal hasta una nueva frecuencia intermedia gracias a un convertidor descendente encargado de obtener señales de frecuencia intermedia (FI).

Debido a la frecuencia de trabajo, se utilizan diferentes tipos de cables. En concreto, para conectar los componentes previos al convertidor descendente son cables de fibra óptica mientras que los cables que conectan los componentes tras este convertidor son cables coaxiales debido a sus bajos niveles de atenuación, así como su calidad-precio actual.

Una vez la señal es transportada por todo el circuito, el destino de esta es el ordenador con el software específico para la interpretación de los parámetros de la señal con los que, finalmente, poder interpretar la observación realizada para así trabajar con ella.

3.2.4 PÉRDIDAS EN UN RADIOTELESCOPIO

Las principales pérdidas más importantes a las que debe de hacer frente en la recepción de señales radio son las siguientes [64]:

- **Pérdidas por iluminación:** Iluminación no uniforme de la apertura. El nivel de estas pérdidas depende del diagrama de radiación del alimentador.
- **Pérdidas por desbordamiento:** Radiación fuera de la superficie del reflector principal. Estas pérdidas producen una reducción de la ganancia de las señales recibidas y una mayor aparición de lóbulos “spillover”.
Estas pérdidas están relacionadas con las pérdidas por iluminación debido a la iluminación en el borde de la apertura, de manera que, si la iluminación en el borde aumenta, disminuyen las pérdidas de iluminación, pero aumentan las pérdidas por desbordamiento.
- **Pérdidas por bloqueo:** Disminuye la directividad del radiotelescopio, así como el aumento del lóbulo secundario adyacente al lóbulo principal. Estas pérdidas se pueden disminuir aumentando el diámetro del reflector principal.
Además, estas pueden generar posibles problemas de adaptación por reflexión de potencia sobre el alimentador.

- **Pérdidas en la fase de distribución:** Estas se producen por desalineaciones del alimentador y deformaciones del reflector. En el primer caso, las desalineaciones se pueden solventar con un ordenador que mande órdenes a los diferentes motores que controlan la estructura del radiotelescopio. El segundo problema es más crítico ya que solo se podría solventar en la fase del diseño del radiotelescopio.
- **Pérdidas por desplazamiento axial:** Pérdidas debidas a la variación de la posición del alimentador en el eje de simetría de la antena.
- **Pérdidas por desplazamiento lateral:** Pérdidas que provocan disminución de la ganancia de recepción y un gran incremento en el nivel de los lóbulos secundarios.

3.2.5 PARÁMETROS DE UN RADIOTELESCOPIO

La validez del proceso de captación de señales depende, directamente, de varias características del radiotelescopio. Las más importantes son las siguientes [67]:

Patrón de radiación de la antena: Radiación que la antena puede detectar. La antena puede detectar radiación producida por otros cuerpos celestes debida a la difracción que se produce en los bordes de la antena. Esta difracción produce radiación no deseada en otras longitudes de onda, así como ondas de radio producidas por otros objetos celestes. Por tanto, esta radiación se interpreta como ruido frente a nuestra línea espectral objetivo.

Por tanto, se debe hacer un estudio del ancho de haz de la antena para poder distinguir tanto nuestra radiación objetivo de la radiación en otras bandas de frecuencia y de radiación procedente de otros cuerpos.

Para realizar los cálculos con respecto al patrón de radiación obtenido, caracterizamos el ancho de haz a media potencia (HPBW), también conocido como ancho de haz a 3 dB, mediante la siguiente ecuación:

$$HPBW = 1000 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 1.1 \cdot \tan^{-1} \frac{\lambda_c}{d} \quad (3.10)$$

El factor $1000 \cdot \frac{180}{\pi}$ es el factor de conversión integrado que se utiliza en esta ecuación para pasar de radianes a mdeg (miligrados).

Esta ecuación caracteriza el ancho de haz que tiene la antena, de forma proporcional, en función de la longitud de onda de corte (λ_c , longitud de onda de trabajo) e, inversamente proporcional al diámetro del reflector principal o colector de ondas (d).

El ancho de haz objetivo es aquel con los menores lóbulos secundarios posibles ya que, estos producen un efecto negativo en el rendimiento del radiotelescopio. Otros efectos que alteran el rendimiento del radiotelescopio son [68]:

- Exactitud de la superficie reflectora con respecto a la longitud de onda de trabajo. Cuando menor es la longitud de onda de las señales de captación, más exacta debe ser la superficie reflectora para poder captar las ondas objetivo correctamente.
- Diferencias térmicas de la estructura pueden provocar expansiones y contracciones en esta, de manera que la captación de ondas sea ineficiente.
- Deflexiones en los cambios de las cargas gravitatorias cuando se mueve la antena.

Eficiencia (η): La eficiencia de un radiotelescopio, que depende directamente de la concentración del haz, se puede caracterizar a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta = \cos^2 \Delta\Phi = \cos^2 \frac{4\pi\delta}{\lambda} \quad (3.11)$$

La eficiencia es proporcional al error de fase ($\Delta\Phi$) y al tamaño de la irregularidad del reflector principal (δ) e inversamente proporcional a la longitud de onda de trabajo. En el caso de los radiotelescopios con una estructura Cassegrain, las eficiencias de haz suelen estar entre el 60% (los más ineficientes) hasta el 70% de los más eficientes.

Directividad (D): En este caso, la directividad del radiotelescopio depende, como se puede apreciar en la ecuación 3.12 en gran medida del ángulo sólido de la esfera (Ω_e) y del ángulo sólido de la antena (Ω_h), de manera que, cuando menor sean estos parámetros, mayor directividad obtendremos. La directividad se caracteriza mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_e\Omega_h} = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \quad (3.12)$$

Ganancia (G): La ganancia de un radiotelescopio se caracteriza mediante la siguiente ecuación:

$$G = \eta D = \frac{\eta 4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \quad (3.13)$$

Siendo A_{eff} la abertura efectiva de la antena y η la eficiencia de la antena.

Abertura efectiva: Este parámetro define el área que tendría una antena perfecta ($\eta = 1$), es decir, un área que no tuviera lóbulos secundarios en su patrón espectral, que recibiese la misma radiación que una antena real cuyas eficiencias se encuentran entre el 0,6 y el 0,7. Esta área siempre será menor que la superficie de la antena real.

Se puede determinar la eficiencia de abertura como el cociente entre el área de la abertura efectiva y el área física del colector principal de la antena.

3.2.6 CONCLUSIÓN

Teniendo en cuenta todos los parámetros anteriores, podemos afirmar que las características más importantes para realizar un análisis del rendimiento general de un radiotelescopio son la longitud de onda de trabajo, las dimensiones de la estructura que forma el propio radiotelescopio, más concretamente, el diámetro del colector de ondas (superficie reflectora principal) y la exactitud de esta misma superficie puesto que las posibles imperfecciones en esta afectan gravemente al rendimiento de la captación de las ondas de radio.

Además de estos parámetros fundamentales, tanto el alimentador del radiotelescopio como los elementos de tratamiento posteriores deben cumplir una serie de características básicas para el correcto tratado de este tipo de señales ya que son señales muy sensibles

a diferentes tipos de interferencias, así como el hecho de que son señales cuyos niveles de potencia de recepción son muy débiles.

3.3 ESTUDIO DE VALIDACIÓN

3.3.1 INTRODUCCIÓN

Una vez introducidas tanto la antena de tracking inicial como el radiotelescopio final, el objetivo de este punto del trabajo es comprobar si existe la posibilidad del cambio de la antena DSS-65 en un radiotelescopio Cassegrain es realizable.

Para ello, teniendo en cuenta los elementos conocidos que componen la antena de tracking, el primer estudio a realizar será la adaptación de estos elementos sobre el funcionamiento de un radiotelescopio estándar para validar la realización de un futuro proyecto de modelación y construcción de un radiotelescopio en base a la antena DSS-65.

3.3.2 VALIDACIÓN DEL RADIOTELESCOPIO

Este estudio consistirá en validar si esta antena puede realizar el funcionamiento de un radiotelescopio. Para ello, se debe partir de la información contenida en el punto 3.2.3. de este proyecto. En este apartado, se explica detalladamente el funcionamiento básico de un radiotelescopio, así como los principales componentes que lo conforman.

En este apartado, se distinguen los componentes que todo radiotelescopio debe tener:

Colectores o Reflectores: Estos se encargan de focalizar las señales emitidas por el cuerpo a observar en el alimentador. Se debe tener en cuenta el rendimiento de los colectores en función de la distancia y frecuencia de trabajo para poder caracterizarlo correctamente.

Bocina/Alimentador: El componente más importante de un radiotelescopio. Mediante este componente, las señales podrán ser captadas para poder ser posteriormente tratadas y estudiadas por el resto de los componentes que forman el radiotelescopio.

En este caso, las dimensiones y características de este componente se basan en torno a las longitudes de onda de trabajo.

Equipo de tratamiento y transporte de señales: Conjunto de componentes que tratan la señal para poder ser interpretada por un software específico. Principalmente, estos se componen de filtros y componentes de control para poder tratar y controlar las señales recibidas.

Ordenador: Componente final de radiotelescopio. Este nos permite la interpretación de las señales recibidas mediante un software específico. Las señales entrantes al ordenador deben estar filtradas previamente de posibles ruidos e interferencias, puesto que tratamos con señales muy sensibles al ruido.

Teniendo en cuenta los componentes base de un radiotelescopio, para la realización del estudio de validación, adaptaré los componentes de la antena DSS-65 para poder transformarlo en un radiotelescopio.

Para ello, hay que tener en cuenta lo siguiente:

La antena DSS-65 transmite y recibe señales procedentes de aeronaves cuyas frecuencias de trabajo son bien conocidas en dos bandas diferentes. Mientras que las señales de banda S se utilizan habitualmente para realizar el seguimiento de aeronaves cercanas a la Tierra, las señales en banda X se utilizan para tracking de aeronaves más lejanas.

Este hecho se debe a que, como los transmisores de estas antenas trabajan con potencias totalmente distintas, es decir, el transmisor de señales en banda S trabaja con potencias muy inferiores al transmisor de banda X (250 W frente a 20 kW), las señales transmitidas solo podrán ser recibidas a distancias diferentes.

Aunque sean los transmisores la principal baza frente a las distancias con la que trabajan esta antena, estos no causarán problemas a la hora de trabajar con diferentes distancias en la conversión a un radiotelescopio, ya que los transmisores no son necesarios para recibir señales exteriores.



Dicho esto, la adaptación de nuestra antena de trabajo se basará en la eliminación de los transmisores y componentes necesarios para transmitir señales. Esta primera adaptación interna de la antena sería la mostrada en la figura 3.3:

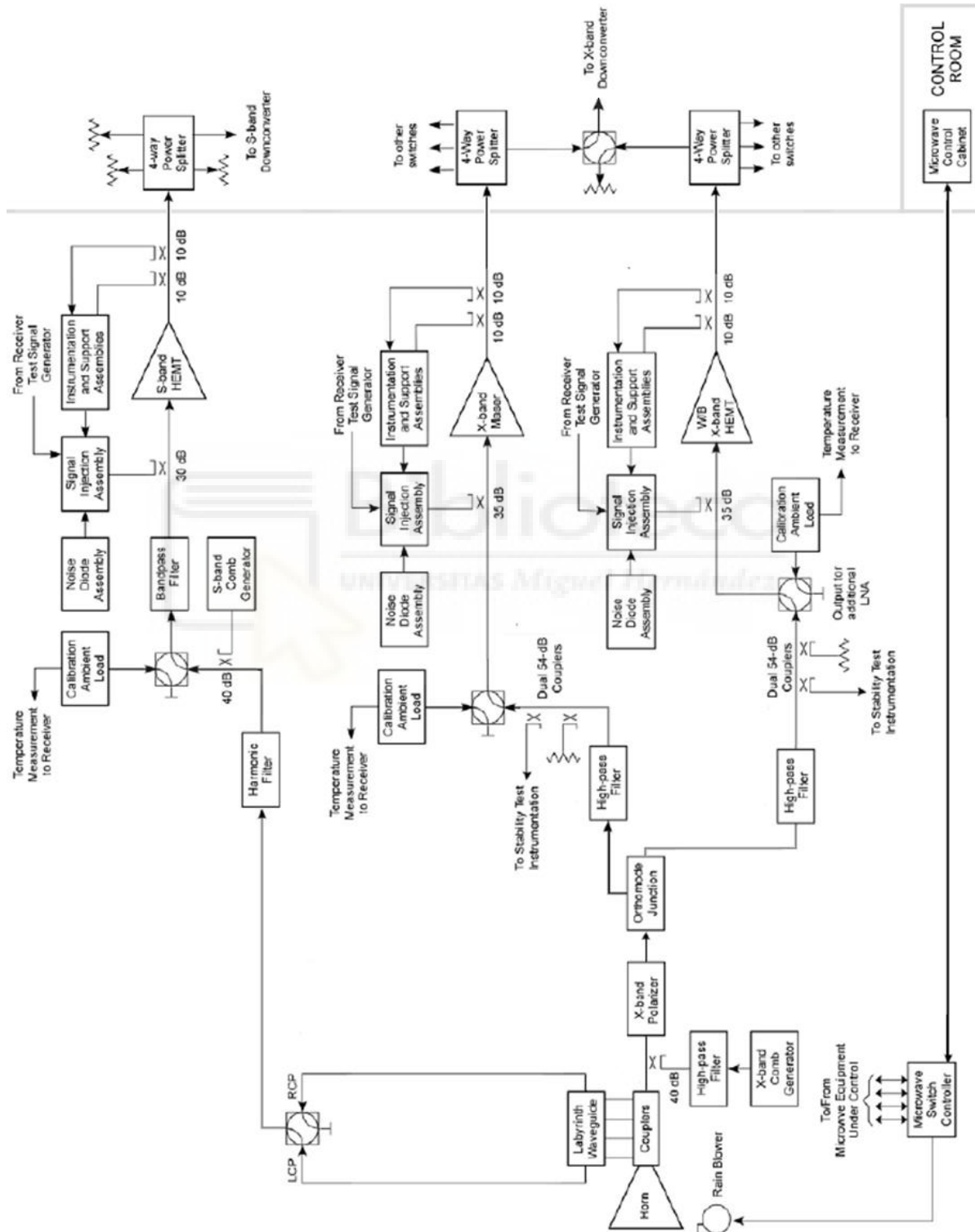


Figura 3.11. Estructura interna base del nuevo radiotelescopio

En esta estructura, se puede observar que he eliminado los transmisores en banda S y en banda X, además, de eliminar componentes que solo servían para dirigir y separar las señales de entrada y salida al circuito, así como otros elementos de control innecesarios para el nuevo funcionamiento de la antena. Estos componentes son los siguientes:

“Test Translator”: Acoplado a las rutas de transmisión de ambos tipos de señales, el Test Translator se encargaba de sustraer la señal de salida al espacio para poder aumentar su frecuencia a la frecuencia de recepción. Además, de esta manera, se obtiene una señal de referencia utilizada en etapas de recepción [69].

Al ser un elemento dependiente totalmente del proceso de transmisión, este elemento debe ser eliminado.

Diplexores: He eliminado los diplexores debido a que solamente separan las señales de entrada de las señales de salida. Como en este nuevo circuito, solo se pueden recibir señales, los diplexores de ambas bandas no son necesarios.

Sin embargo, a pesar de prescindir de algunos elementos, he mantenido las rutas existentes para poder utilizar el resto de los componentes que la antena DSS-65 tiene actualmente.

Modo de baja ganancia: Al ser un radiotelescopio, los niveles de potencia serán lo suficientemente bajos como para prescindir de este sistema

Para el nuevo funcionamiento de esta antena, aparte de eliminar los elementos innecesarios, he añadido una carga ambiental para controlar la temperatura del sistema cuando las señales recibidas trabajan con el máser de banda X.

Con esta primera sintetización de la antena, ahora debemos comprobar que todos los componentes no sufran cambios en su comportamiento, ya que, como bien he mencionado con anterioridad, los transmisores eran una parte fundamental e influyente de la antena DSS-65.

Para ello, se debe analizar componente por componente, estudiando el papel realizado en la anterior antena y, comprobando la compatibilidad con el nuevo circuito.

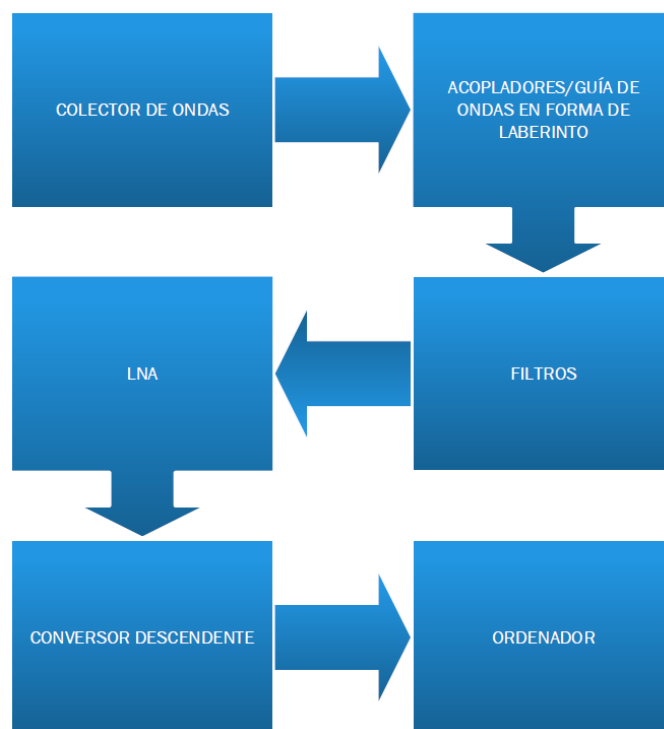


Figura 3.12. Diagrama de bloques del radiotelescopio (simplificado)

3.3.2.1 ANÁLISIS DE COMPONENTES

Alimentador y acopladores: En este caso, el alimentador se debe analizar con detenimiento puesto que este se construyó específicamente para transmitir y recibir señales en banda S y X simultáneamente. Al eliminar los equipos de transmisión del sistema, el alimentador solo podrá recibir señales.

Debido a las dimensiones del alimentador, este podrá obtener señales en las bandas de trabajo de los canales de subida. Sin embargo, al mantener los diferentes filtros antes de los calibradores de temperatura, estos filtrarán las señales para evitar posibles ruidos debido a señales con frecuencias no deseadas, así como medidas incorrectas en el sistema.

Si, por el contrario, los filtros estuviesen tras los calibradores de temperatura, las medidas de la temperatura del sistema se verían afectadas por los posibles ruidos de entrada que el alimentador pudiese obtener.

Con respecto al combinador, este funcionará como alimentador para la recepción de señales, por lo que se debe mantener en este nuevo circuito.

Con respecto a los acopladores, estos se encargan de dirigir las señales sobre las diferentes rutas del circuito en función de su frecuencia de trabajo. Por tanto, estos también se verán afectados por posibles ruidos obtenidos por el alimentador.

A pesar de ello, las señales recibidas pasan por los acopladores antes que por los filtros, por lo que estos últimos podrán eliminar frecuencias y ruidos no deseados.

Guía de ondas en forma de laberinto: En el anterior funcionamiento, esta guía acoplaba las diferentes señales de entrada y salida en banda S en el interior del alimentador, obteniendo señales no distorsionadas al trabajar con otras señales en dirección contraria.

Estas guías también están capacitadas de distribuir por separado señales con polarización circular levógira y dextrógira [60].

Sin embargo, en el nuevo circuito, al trabajar en una sola dirección de transmisión, su función principal será la de distribuir las señales por rutas distintas en función del sentido de polarización circular de las señales.

Filtros: Su objetivo principal es el de “limpiar” las señales, es decir, se encargan de eliminar los ruidos y señales indeseadas de las señales de entrada. Cabe destacar el filtro armónico y el filtro paso banda para el tratamiento de las señales en banda S y, los filtros paso-alto para las señales en banda X.

En cuanto a su compatibilidad, estos no causan ningún problema ya que, reciben una señal de entrada y la filtran para obtener una señal de salida. La característica a tener más en cuenta de estos componentes son las frecuencias de corte con las que trabajan, ya que este factor será trascendental para el tratamiento de las señales en las siguientes etapas del circuito.

Generador de peine: Este tipo de generador inyecta armónicos sobre las señales de entrada al circuito con el fin de estabilizar la fase de las señales entrantes al circuito. De esta manera, las señales podrán ser tratadas eficazmente.

Polarizador en banda X: Este elemento, junto con el transductor ortomodal son esenciales para trabajar con dos tipos de señales recibidas con polarización circulares distintas simultáneamente.

Este se encarga de polarizar las señales en banda X recibidas en función de la polarización circular que se desee puesto que tratamos con un polarizador conmutable.

Transductor ortomodal: Este elemento se encargará de separar, en este nuevo circuito, las señales polarizadas ortogonalmente entre sí, es decir, se encargará de separar las señales con polarización levógira de las señales con polarización dextrógira [70].

Estas señales saldrán del transductor mediante sus dos salidas, una dirigida hacia la configuración antigua formada por el máser y otra dirigida hacia el HEMT.

Carga de calibración ambiente: Su objetivo es el de medir la temperatura de ruido de funcionamiento del sistema de recepción. Esta medición se realiza realizando una conmutación de la entrada al amplificador de bajo ruido entre esta carga de temperatura ambiente y la señal recibida ya filtrada.

Ensamblado de señal de inyección: Conjunto de componentes encargados de introducir una señal de referencia de poca potencia en el LNA para poder monitorizar el correcto funcionamiento de los siguientes componentes del circuito, así como de monitorizar los parámetros de las señales recibidas.

Los amplificadores de bajo ruido (**LNAs**) utilizados en este circuito, con el fin de amplificar las señales débiles recibidas son:

Por un lado, tenemos un amplificador **HEMT** en cada banda de funcionamiento y, por otro lado, tenemos un amplificador **máser** de banda X que se utiliza cuando el modo de funcionamiento no diplexado.

Según el modo de funcionamiento, las potencias de entrada a los LNA, para su correcto funcionamiento, deben ser:

Para evitar posibles incompatibilidades con los LNA reutilizados por el nuevo radiotelescopio, el nivel máximo de potencia en la entrada de los tres LNAs del sistema será de -90 dBm.

Convertidor Digital Descendente: Elementos imprescindibles para trabajar con este tipo de señales, puesto que son los encargados de disminuir la frecuencia de las señales entrantes a frecuencia intermedia para poder ser transportadas con un menor nivel de pérdidas.

Ordenador: Este componente junto con el alimentador de bocina, son los dos elementos más importantes de un radiotelescopio.

Este debe tener, por una parte, un software específico encargado de controlar la antena para el apuntado y análisis de los objetos celestes a analizar. Por otra parte, este ordenador, con la ayuda de detectores, debe ser capaz de actuar en caso de incidente para que la eficiencia de los análisis no sea inferior cuando el posible incidente suceda.

Su adaptación reside en el cambio de software especializado en radiotelescopio, puesto que este elemento ya controla los movimientos de la estructura.

3.3.2.2 RENDIMIENTO DEL RADIOTELESCOPIO

Comprobado su funcionamiento, el siguiente paso lógico en el diseño del futuro radiotelescopio es el de obtener los principales parámetros del mismo. Para ello, tendremos en cuenta las dimensiones actuales de la antena DSS-65.

Siguiendo las fórmulas desarrolladas en el punto 2.2.5, las dimensiones de esta antena son las siguientes [71]:

| Parámetro | Valor |
|--|--------|
| diámetro del reflector cóncavo quasiparabólico (m) | 34 |
| Distancia focal del reflector principal (m) | 11.809 |
| F/D | 0.347 |
| Diámetro del subreflector convexo quasihiperbólico (m) | 56.07 |
| Distancia focal del subreflector (m) | 3.447 |
| Excentricidad | 1.499 |

Tabla 3.8. Dimensiones de la antena DSS-65

Una vez definidos estos parámetros, ahora pasamos a calcular los que serán los parámetros principales del nuevo radiotelescopio. Estos son los siguientes [72]:

| Parámetro | Banda S | Banda X |
|-------------------------------------|---------|---------|
| HPBW (mdeg) | 242.31 | 66.05 |
| Eficiencia (valor aproximado) | 0.67 | 0.75 |
| Directividad (dBi) | 57.81 | 69.66 |
| Ganancia (dBi) | 56.07 | 68.41 |
| Apertura efectiva (m ²) | 716.32 | 716.32 |

Tabla 3.9. Parámetros del nuevo radiotelescopio

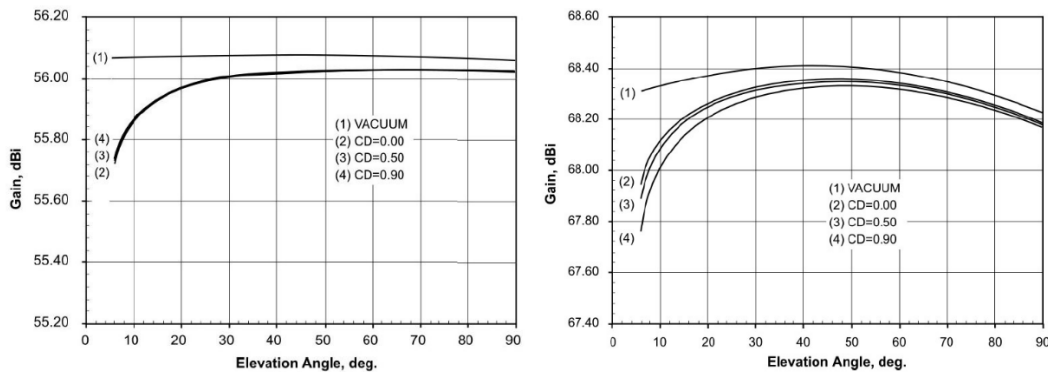


Figura 3.13. Ganancias de las bandas S y X respectivamente [73]

3.3.3 RADIOTELESCOPIO DE LÍNEA DE HIDRÓGENO

El elemento más abundante que forma el Universo es el Hidrógeno, primer elemento de la tabla periódica por esta misma razón. Por esta regla, debemos buscar una radiación que se caracterice por emitir en el rango de las ondas de radio y que se obtenga a partir del hidrógeno.

Para conseguir la radiación procedente de los átomos de hidrógeno que forman los cuerpos celestes del Universo, en este punto resolveré como poder recibir señales a partir de este elemento.

El Hidrógeno transmite señales cuyas longitudes de onda son próximas a 21 cm, el equivalente a 1420 MHz. Por tanto, para poder captar estas señales, se debe proporcionar un circuito adecuado a esta frecuencia.

A continuación, se compararán los principales tipos de antenas que puedan funcionar como radiotelescopios. Estas antenas tienen que trabajar en la línea de Hidrógeno.

Los radiotelescopios se caracterizan por sus receptores, los cuales son muy directivos, por lo tanto, además de trabajar a 1420 MHz, nuestras antenas deberán ser lo más directivas posible.

Teniendo en cuenta la nueva frecuencia de funcionamiento y la directividad necesaria para la construcción de un radiotelescopio, las antenas más eficaces para realizar un radiotelescopio de línea de Hidrógeno son las siguientes:

- Antena Yagi-Uda
- Antena Parabólica de Foco Centrado

- Bocina corrugada
- Interferometría

A continuación, realizaré el análisis detallado de cada una de estas antenas:

3.3.3.1 ANTENA YAGI-UDA

La primera solución a analizar consiste en la construcción desde el inicio de una antena utilizada sobre todo para la recepción de señales de TV, la antena Yagi-Uda. Este tipo de antenas consiguen unos niveles de directividad máximos de alrededor de 15 dBi [74].

Estas antenas se basan en la disposición de un conjunto de dipolos con diferentes dimensiones, de manera que, mediante la alimentación de uno de ellos, se consigue unos niveles de directividad óptimos para la transmisión y recepción a larga distancia. Cabe destacar que las dimensiones de los elementos se eligen en función de la longitud de onda de trabajo y que, cuantos más elementos directores haya, mayor es la directividad de la antena.

El diseño de estas se basa en la elección de los diferentes dipolos que la componen, en función de su operatividad. Dependiendo de la longitud de onda de trabajo, esta antena tiene las siguientes dimensiones:

| Nombre | Nº Elementos | Longitud | Operatividad |
|--------------------|--------------|-----------------------|--|
| Director/es | 11 | $[0.45-(i-1)]\lambda$ | Controla la dirección de las señales transmitidas/recibidas |
| Reflector | 1 | 0.55λ | Reduce la intensidad de las señales en su dirección |
| Activo | 1 | 0.5λ | Elemento conectado a la línea de transmisión (alimentación de la antena) |

Tabla 3.10. Dimensiones generales de una antena Yagi-Uda [75]

Basándonos en esta tabla, la antena se compondría de las siguientes dimensiones:

| Nombre | Longitud (cm) |
|-------------------------------|---------------|
| Reflector | 11.12 |
| Activo | 10.56 |
| 1^r Director | 9.51 |
| 2^o Director | 9.3 |
| 3^r Director | 9.08 |
| 4^o Director | 8.87 |
| 5^o Director | 8.66 |
| 6^o Director | 8.45 |
| 7^o Director | 8.24 |
| 8^o Director | 8.03 |

| | |
|---------------------|------|
| 9° Director | 7.82 |
| 10° Director | 7.61 |
| 11° Director | 7.39 |

Tabla 3.11. Dimensiones de los componentes de la antena Yagi-Uda

| Tipo de Separación | Longitud (mm) |
|--|----------------------|
| Reflector – Activo | 38.03 |
| Activo – 1^r Director | 19.01 |
| Separación entre Directores | 38.03 |

Tabla 3.12. Dimensiones de las separaciones entre los componentes de la antena Yagi-Uda

La elección del número de directores no es trivial. Mediante el software CST, comprobé, director por director, el número de directores necesarios para obtener el mejor rendimiento de esta antena para una frecuencia de trabajo de 1420 MHz.

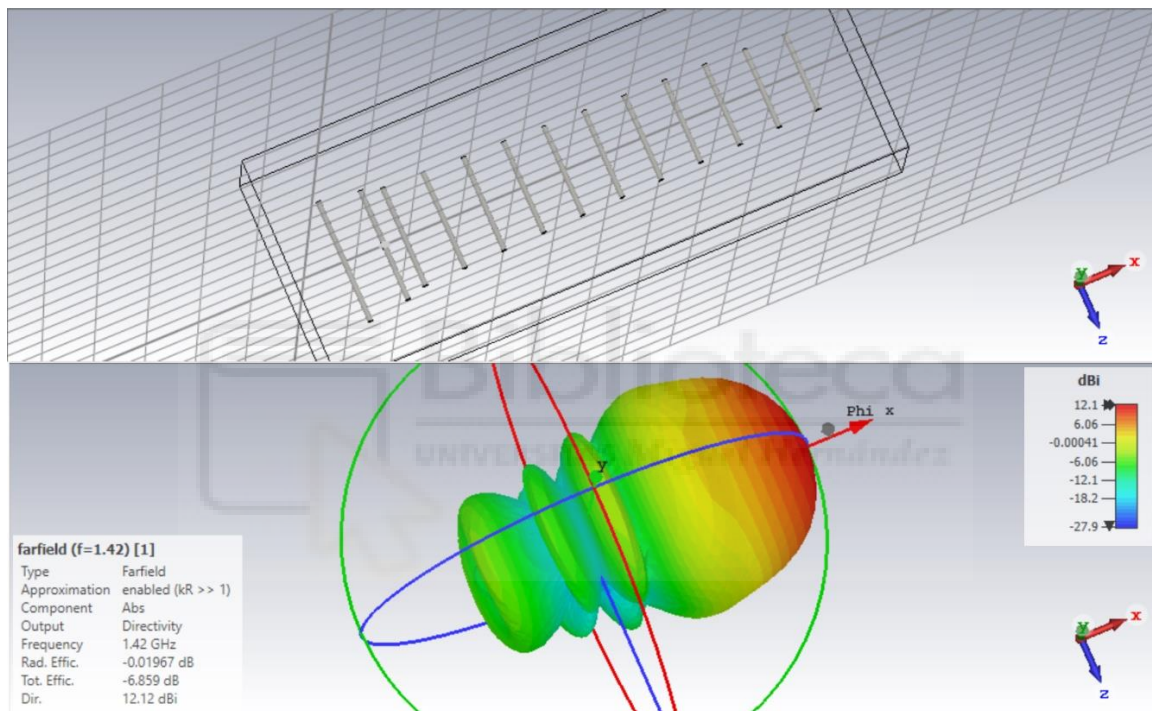


Figura 3.14. Simulación Antena YAGI-UDA

Los resultados finales de la antena YAGI-UDA, bajo condiciones ideales, son los siguientes:

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|--------------|
| HPBW (deg) | 24.7 |
| Directividad (dBi) | 12.12 |
| Ganancia (dBi) | 12.10 |
| Eficiencia | 0.996 |

Tabla 3.13. Parámetros de la antena Yagi-Uda

Realizada la simulación, podemos observar que la directividad de la misma no es lo suficientemente óptima como para poder desarrollar un radiotelescopio eficiente. De la misma manera, observando el HPBW también podemos determinar que esta antena puede obtener ruidos procedentes de otros cuerpos con mayor facilidad que las antenas que a continuación desarrollaré.

3.3.3.2 ANTENA PARABÓLICA DE FOCO CENTRADO

Una de las antenas más directivas conocidas hasta la fecha es la antena parabólica. Este tipo de antenas engloban una serie de subtipos de antenas, dependiendo de su estructura principal. Sin ir más lejos, la antena que comprende este estudio de validación pertenece a este tipo de antenas.

Sin embargo, este apartado nos mostrará una de las posibles opciones a futuro radiotelescopio en la línea de Hidrógeno, basada en la eliminación del subreflector característico de una antena Cassegrain/Gregorian.

Para ello, realizaré una comparación entre los principales parámetros de la antena actual y los parámetros de la misma antena sin subreflector, ambas trabajando en la línea de Hidrógeno. A continuación, adaptaré la antena parabólica de foco centrado para que funcione óptimamente a 1420 MHz.

Comparando los principales parámetros de la nueva antena, en relación con los parámetros de la antena anterior, nos queda la siguiente tabla:

| Parámetro | Antena Cassegrain | Antena con foco centrado |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|
| HPBW (mdeg) | 372.82 | 434.96 |
| Eficiencia (valor asumido) | 0.7 | 0.6 |
| Directividad (dBi) | 53.04 | 54.08 |
| Ganancia (dBi) | 51.49 | 51.86 |
| Apertura efectiva (m ²) | 716.32 | 907.92 |

Tabla 3.14. Parámetros de una antena parabólica con foco centrado y una antena Cassegrain

3.3.3.3 RADIOTELESCOPIO DSS-65 CON BOCINA CÓNICA CORRUGADA HI

Para poder obtener los resultados de la tabla 3.14, la bocina y los componentes internos que forman el radiotelescopio DSS-65 se deben cambiar para poder trabajar en la línea del Hidrógeno. En este punto, diseñaré desde cero la bocina adecuada puesto que las dimensiones del alimentador anteriormente utilizado provocan que solo se pudiese utilizar para señales concretas en las bandas 2.2 – 2.3 GHz y 8.4 y 8.5 GHz.

Al trabajar con señales cuyas frecuencias son menores a las empleadas anteriormente, las longitudes de onda serán mayores y, por tanto, las dimensiones de esta nueva bocina serán mayores.

Al no cambiar el tipo de estructura Cassegrain, no cambiaremos el tipo de bocina, puesto que la bocina cónica corrugada es la mejor opción para este tipo de antenas.

El diseño de la nueva bocina consiste en la elección de una serie de parámetros necesarios para que pueda ser parametrizada.

Los parámetros principales de la bocina corrugada son los siguientes [76]:

Frecuencias: Las frecuencias de trabajo que se deben definir para poder diseñar una bocina cónica corrugada son las siguientes:

- Frecuencia mínima y frecuencia máxima: Estas frecuencias sirven para definir el ancho de banda de trabajo de la bocina. Hay dos tipos de funcionamientos para estas bocinas en función de estas frecuencias.

Por un lado, funcionamiento en banda estrecha donde la frecuencia máxima debe ser menor o igual a 1.4 veces la frecuencia mínima. Por otro lado, estos elementos pueden funcionar en banda ancha, donde la frecuencia máxima debe ser mayor o igual a 1.4 veces la frecuencia mínima y, menor o igual a 2.4 veces esta misma frecuencia.

- Frecuencia de corte: Esta cumple la siguiente ecuación:

$$f_c = \sqrt{f_{min}f_{max}} \quad (3.14)$$

- Frecuencia de salida: Frecuencia de las señales externas al alimentador. En nuestro caso, esta será la frecuencia de excitación de los átomos de hidrógeno (1420 MHz). Esta frecuencia debe cumplir diferentes condiciones según el tipo de funcionamiento elegido.

Para aplicaciones de banda estrecha, debe cumplir la siguiente inecuación:

$$f_c \leq f_0 \leq 1.05f_c \quad (3.15)$$

En cambio, para aplicaciones de banda ancha, esta frecuencia debe cumplir la siguiente inecuación:

$$1.05f_c \leq f_0 \leq 1.15f_c \quad (3.16)$$

Radios de la bocina: Distingamos entre el radio de entrada y el radio de salida, siendo los radios que deben tener la entrada y la apertura de la bocina respectivamente.

En el caso del radio de entrada a_i , el cual afecta directamente a las pérdidas de retorno, debe propagarse el modo TE₁₁ correspondiente al modo fundamental de la guía circular conectada a la entrada de la bocina. El número de onda de propagación debe cumplir lo siguiente:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{1.841}{\text{radio de la guía circular}} \quad (3.17)$$

Siendo el radio de la guía circular la longitud correspondiente con el radio de entrada de la bocina corrugada a_i . El factor 1.841 corresponde con el coeficiente correspondiente con el cero de la derivada de la función de Bessel para el modo TE₁₁, modo fundamental de una guía circular.

Desarrollando esta última ecuación, el radio de entrada debe cumplir la siguiente inecuación:

$$\frac{2\pi f_c}{c} a_i \geq 1.841 \quad (3.18)$$

Normalmente, para el diseño de una bocina corrugada se elige el siguiente radio de entrada:

$$\frac{2\pi}{\lambda_c} a_i = 3 \rightarrow a_i = \frac{3\lambda_c}{2\pi} \quad (3.19)$$

En cuanto al radio de la abertura a_0 , este depende del edge taper de diseño de la bocina, que no es más que la diferencia de potencia entre la potencia recibida en el centro del reflector y la potencia recibida en los bordes. Este parámetro se define en función del ángulo de medio cono y, del edge taper deseado, mediante la siguiente gráfica:

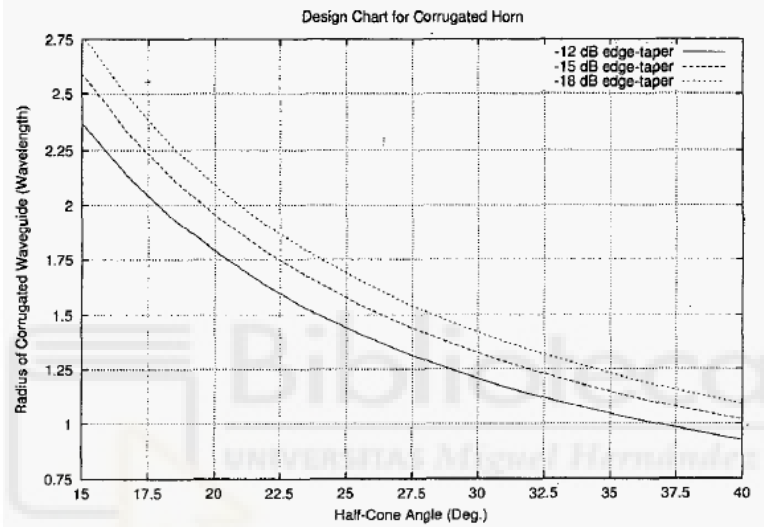


Figura 3.15. Radio de una guía corrugada en función del ángulo de radiación

Como podemos observar, esta gráfica solo proporciona datos del radio de la bocina corrugada para ángulos de cono de entre 30 y 80°.

Longitud L: Parámetro que influye en las características de los lóbulos secundarios, así como la estabilidad del centro de fase de la bocina. Este parámetro se suele establecer según la aplicación de la bocina. Por esta razón, este parámetro requiere de experimentación previa para poder obtener los resultados convenientes en función de nuestros objetivos.

Número de ranuras N: Al igual que la longitud, el número de ranuras que conforman la bocina es un parámetro experimental, puesto que depende de la longitud de la propia bocina.

Conversor de modos: La bocina corrugada es capaz de propagar el modo híbrido HE_{11} , un modo de propagación que obtiene los mismos niveles en ambos planos electromagnéticos, requisito indispensable para el funcionamiento óptimo de un radiotelescopio.

Este modo se forma a partir de dos modos transversales. Concretamente, este modo es un 15% de modo TM_{11} y un 85% del modo TE_{11} . Con lo cual, debemos de realizar una

primera conversión del modo TM_{11} al modo TE_{11} (modo fundamental de una guía circular) para poder realizar la conversión final del modo TE_{11} al modo HE_{11} .

Esta última conversión se puede realizar en el mismo interior de la bocina mediante la creación de un pequeño tramo dedicado para este fin. Este tramo recibe el nombre de conversor de modo.

Existen diferentes tipos de modos de conversión, en función de sus características físicas. Estos son los siguientes:

- Conversor de modo con profundidad de ranura variable: Conversor más utilizado en el diseño y fabricación de una bocina corrugada. Se puede utilizar, siempre y cuando $f_{min} \leq 1.8f_{max}$.
- Conversor de modo de ranura con anillo cargado: Este se puede utilizar, siempre y cuando $f_{min} \leq 2.4f_{max}$. El número de ranuras N_{MC} de estos dos tipos de conversores están entre los 5 y 7.
- Conversor de modo con factor pitch-to-width variable: Se puede utilizar, siempre y cuando $f_{min} \leq 2.05f_{max}$. El número de ranuras N_{MC} de este tipo de conversor está entre los 7 y 12.

Pitch p: El pitch es la longitud formada por una ranura y un diente. La longitud de este parámetro debe ser la división entre la longitud de la bocina y el número de ranuras que la forman.

Este parámetro debe ser mayor que $\frac{\lambda_c}{10}$ y menor que $\frac{\lambda_c}{5}$. Si trabajamos con banda ancha, este parámetro debe aproximarse a $\frac{\lambda_c}{10}$ y, si trabajamos con banda estrecha, el pitch tiende a ser $\frac{\lambda_c}{5}$.

Factor pitch-to-width δ : Este factor representa la división entre el ancho de la ranura y el pitch. Utilizado mayormente para calcular el ancho de las ranuras que formará la bocina.

Profundidad de ranura d: La profundidad de cada ranura que forma el interior de la bocina depende del tipo de conversor de la siguiente forma:

- Conversor de modos con profundidad de ranura variable: Debemos tener en cuenta que la profundidad de ranura depende de la posición de la ranura en el interior de la propia bocina, siendo determinante el número de ranuras del modo conversor.

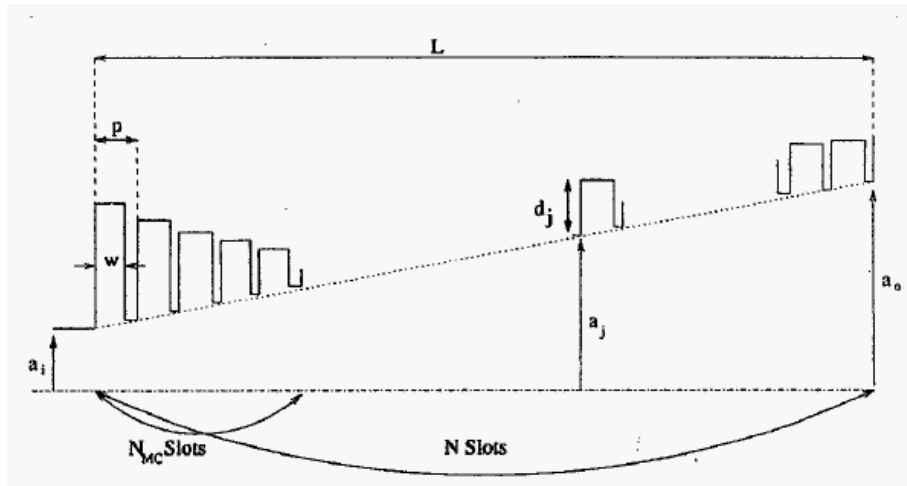


Figura 3.16. Esquema del conversor de modos con profundidad de ranura variable

En función de este último, tenemos dos tipos de profundidades:

$$d_j = \left\{ \sigma - \frac{j-1}{N_{MC}} \left(\sigma - \frac{1}{4} e^{\frac{1}{2.114(k_c a_j)^{1.134}}} \right) \right\}, 1 \leq j \leq N_{MC} + 1 \quad (3.20)$$

$$d_j = \frac{\lambda_c}{4} e^{\frac{1}{2.114(k_c a_j)^{1.134}}} - \frac{(j - N_{MC} - 1)}{(N - N_{MC} - 1)} \left\{ \frac{\lambda_c}{4} e^{\frac{1}{2.114(k_c a_0)^{1.134}}} - \frac{\lambda_0}{4} e^{\frac{1}{2.114(k_0 a_0)^{1.134}}} \right\}, N_{MC} + 2 \leq j \leq N \quad (3.21)$$

Siendo σ un factor para determinar la profundidad de la primera ranura del conversor de modos. Su valor oscila entre 0.4 y 0.5.

- Conversor de modos de ranura con anillo cargado: En este caso, debido a la complejidad de las ranuras en el conversor de modos, también debemos calcular las dimensiones que se muestran en la siguiente figura:

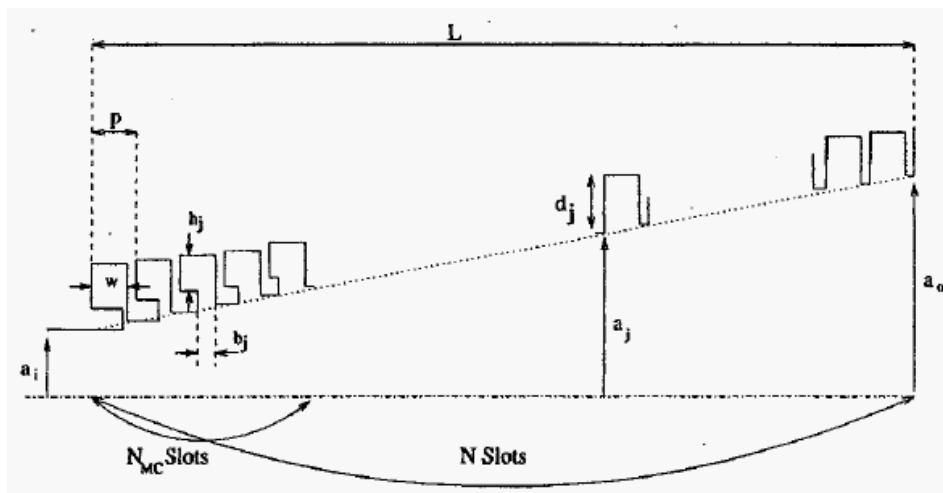


Figura 3.17. Conversor de modos de ranura con anillo cargado

Las dimensiones adicionales de este tipo de convertor se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$b_j = \left[0.1 + (j + 1) \frac{\delta - 0.1}{N_{MC}} \right], 1 \leq j \leq N_{MC} \quad (3.22)$$

$$h_j = \frac{2}{3} d_j, 1 \leq j \leq N_{MC} + 1 \quad (3.23)$$

- **Convertor de modos con factor pitch-to-width variable:** En este caso, además de calcular cada profundidad de ranura, también hay que calcular el ancho de cada ranura. Las profundidades de ranura tienen el mismo valor que en los otros dos tipos de convertor mientras que el ancho de ranura viene dado por la siguiente ecuación:

$$w_j = \delta_{min} + \frac{j - 1}{N_{MC} - 1} (\delta_{max} - \delta_{min}), 1 \leq j \leq N_{MC} \quad (3.24)$$

Siendo δ_{min} un coeficiente cuyo valor oscila entre 0.125 y δ y, δ_{max} es igual a δ .

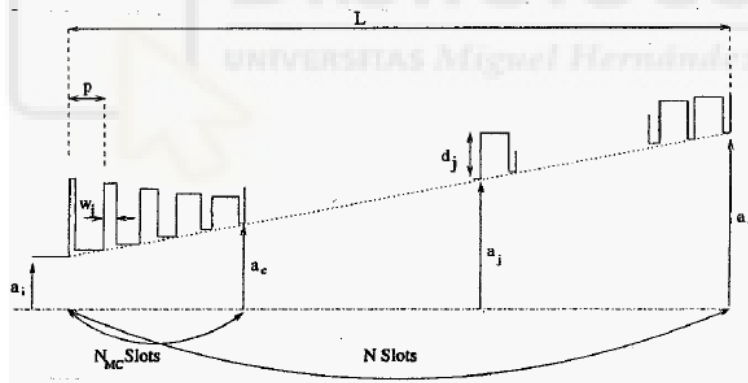


Figura 3.18. Convertor de modos con δ variable

Posición central de fase: La posición central de la fase, midiéndose desde la apertura hasta la entrada de la bocina, viene dada por la expresión αL , donde α es un factor mayor a 0 y menor a 1 y, que se define mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = 1 - e^{-4.8 \left(\frac{k_c a_0}{4\pi L} \right)^2} \quad (3.25)$$

Perfil de superficie corrugada: Parámetro que define el perfil de superficie de la bocina, en función de nuestra aplicación. Este perfil determina el radio de la bocina en función de la posición donde midamos el mismo.

Este es un parámetro experimental con una gran influencia en los resultados finales de radiación.

Los perfiles más importantes son los siguientes:

- Perfil lineal:

$$a(z) = a_i + (a_0 - a_i) \frac{z}{L} \quad (3.26)$$

- Perfil sinusoidal:

$$a(z) = a_i + (a_0 - a_i) \left[(1 - A) \frac{z}{L} + A \sin^2 \left(\frac{\pi z}{2L} \right) \right] \quad (3.27)$$

Siendo A un factor entre 0 y 1.

- Perfil exponencial

$$a(z) = a_i e^{\ln \left(\frac{a_0}{a_i} \right) \frac{z}{L}} \quad (3.28)$$

- Perfil xp:

$$a(z) = a_i + (a_0 - a_i) \left[(1 - A) \frac{z}{L} + A \left(\frac{z}{L} \right)^\rho \right] \quad (3.29)$$

Donde A el mismo factor que en el caso del perfil sinusoidal y, ρ es un factor mayor a 0.5 y menor a 5.

- Perfil hiperbólico:

$$a(z) = \sqrt{a_i^2 + \frac{z^2 (a_0^2 - a_i^2)}{L^2}} \quad (3.30)$$

Diseño de la bocina

Una vez definidos todos los parámetros para poder realizar el diseño de una bocina cónica corrugada, pasamos a diseñar nuestra bocina. Este diseño se realizó en varias partes, de manera que pudiera ser implementado tantas veces como fuera necesario para poder conseguir los resultados necesarios para nuestro futuro radiotelescopio.

La primera parte del diseño fue la implementación de los cálculos teóricos analizados en el apartado anterior en un programa de cálculo. Elegí el programa Matlab puesto que es

un programa muy potente para realizar cálculos, además de ser el programa más cómodo de utilizar puesto que lo he utilizado a lo largo del grado.

Los resultados de esta bocina deben corresponder con una bocina cuyo ancho de haz debe ser lo más cercano a 34° , puesto que debe captar todos los rayos reflejados por el subreflector. En este caso, realizaré una bocina con un convertor de modos con profundidad de ranura variable y perfil de superficie lineal.

Tras implementar los datos correspondientes en el programa Matlab, los resultados son los siguientes:

| Parámetro | Unidades | Valor |
|---|----------|---------|
| Frecuencia mínima (f_{\min}) | MHz | 1200 |
| Frecuencia máxima (f_{\max}) | MHz | 1600 |
| Frecuencia de corte (f_c) | MHz | 1385.64 |
| Frecuencia de salida (f_0) | MHz | 1420 |
| Radio de entrada (a_i) | mm | 103.37 |
| Radio de salida (a_0) | mm | 497.96 |
| Longitud (L) | m | 2.38 |
| Número de ranuras (N) | - | 60 |
| Número de ranuras en el convertor de modos (N_{MC}) | - | 6 |
| Pitch (p) | mm | 39.67 |
| Ancho de ranura (w) | mm | 31.75 |
| Ratio pitch-to-width (δ) | - | 0.8 |

Tabla 3.15. Parámetros de la bocina corrugada

| Posición | Profundidad (mm) |
|----------|------------------|
| 1 | 90.933 |
| 2 | 86.017 |
| 3 | 80.935 |
| 4 | 75.716 |
| 5 | 70.383 |
| 6 | 64.957 |
| 7 | 59.451 |
| 8 | 59.145 |
| 9 | 58.865 |
| 10 | 58.609 |
| 11 | 58.372 |
| 12 | 58.153 |
| 13 | 57.950 |
| 14 | 57.761 |
| 15 | 57.583 |
| 16 | 57.417 |
| 17 | 57.260 |
| 18 | 57.113 |
| 19 | 56.973 |
| 20 | 56.840 |
| 21 | 56.714 |
| 22 | 56.594 |

| | |
|-----------|--------|
| 23 | 56.480 |
| 24 | 56.371 |
| 25 | 56.266 |
| 26 | 56.165 |
| 27 | 56.069 |
| 28 | 55.976 |
| 29 | 55.886 |
| 30 | 55.800 |
| 31 | 55.716 |
| 32 | 55.635 |
| 33 | 55.557 |
| 34 | 55.481 |
| 35 | 55.407 |
| 36 | 55.335 |
| 37 | 55.265 |
| 38 | 55.197 |
| 39 | 55.131 |
| 40 | 55.066 |
| 41 | 55.003 |
| 42 | 54.942 |
| 43 | 54.881 |
| 44 | 54.822 |
| 45 | 54.764 |
| 46 | 54.707 |
| 47 | 54.652 |
| 48 | 54.597 |
| 49 | 54.543 |
| 50 | 54.491 |
| 51 | 54.439 |
| 52 | 54.388 |
| 53 | 54.338 |
| 54 | 54.288 |
| 55 | 54.239 |
| 56 | 54.191 |
| 57 | 54.144 |
| 58 | 54.097 |
| 59 | 54.051 |
| 60 | 54.006 |

Tabla 3.16. Profundidades de ranura según su posición

Con estos parámetros, garantizamos una compatibilidad total con la estructura de la actual antena DSS-65, ya que estos parámetros de diseño corresponden con una bocina corrugada cuyo ángulo de radiación es de 34° , el mismo ángulo correspondiente con la reflexión de ondas procedentes del subreflector de esta antena.

Además, también obtenemos un edge taper de -15 dB, así como de una buena simetría de ancho de haz con unos niveles de polarización cruzada bajos y una alta eficiencia de haz con lóbulos secundarios muy pequeños [86].

Gracias a esta bocina, es posible obtener los resultados de la tabla 3.14

3.3.3.4 INTERFEROMETRÍA

Como última opción, se podría utilizar la técnica conocida más eficaz para la creación de un radiotelescopio. Esta técnica consiste en la utilización de un conjunto de antenas situadas en una posición preestablecida (fija o móvil) trabajando como si fuesen un solo radiotelescopio, de manera que, mediante este proceso, se obtiene una eficiencia equivalente a la que tendría una antena cuya apertura es igual a la distancia entre las antenas que lo componen. Estos se utilizan mayoritariamente en el campo de la radioastronomía.

Para realizar un estudio del mismo, las técnicas como el VLBI mencionado anteriormente permite que se puedan conectar radiotelescopios a lo largo de todo el Planeta Tierra, por lo que la “apertura de interferometría máxima” sería el perímetro máximo de la Tierra.

Teniendo en cuenta que el perímetro de la Tierra es de aproximadamente 40075 Km y, que nuestra longitud de onda es de 21.13 cm (1420 MHz), las características principales (en condiciones ideales) ofrecidas por esta técnica son las siguientes:

| Parámetro | Valor |
|--------------------------------------|----------|
| HPBW (mdeg) | 5.27*E-6 |
| Eficiencia (valor aproximado) | 0.5 |
| Directividad (dBi) | 175.4 |
| Ganancia (dBi) | 172.49 |

Tabla 3.17. Parámetros de VLBI

3.3.3.5 COMPARATIVA FINAL

Tras haber realizado el análisis de las posibles estructuras que pueden funcionar como un radiotelescopio, podemos observar la comparativa del rendimiento de estas a partir de la siguiente tabla:

| Parámetro | YAGI | Foco Centrado | Cassegrain | VLBI |
|--------------------------------------|-------|---------------|------------|----------|
| HPBW (mdeg) | 24700 | 434.96 | 372.82 | 5.27*E-6 |
| Eficiencia (valor aproximado) | 0.996 | 0.6 | 0.7 | 0.5 |
| Directividad (dBi) | 12.12 | 54.08 | 53.04 | 175.4 |
| Ganancia (dBi) | 12.10 | 51.86 | 51.49 | 172.49 |

Tabla 3.18. Parámetros de las diferentes estructuras

Como se puede apreciar mediante en esta tabla, utilizando la interferometría (VLBI) obtenemos la mejor ganancia y HPBW posibles, pese a su rendimiento. Sin embargo, cabe resaltar que el empleo de esta técnica implica a un conjunto de antenas, aumentando de esta manera el presupuesto y la complejidad de mantenimiento y control del sistema.

La siguiente estructura con las mejores condiciones sería la estructura Cassegrain empleada en la antena DSS-65 junto con la bocina diseñada en el punto 3.3.3.3. Destacar

que, al cambiar la bocina, y con ella, la frecuencia de trabajo; también habría que cambiar los componentes del circuito de la antena a componentes compatibles con la nueva frecuencia.

También se puede apreciar en la tabla como la antena YAGI no cumple con los requisitos puesto que al ser tan poco directiva con respecto a las demás, esta opción estaría completamente descartada.



4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

Gracias a este estudio, hemos podido comprobar que es posible transformar el funcionamiento de la antena DSS-65 para su uso en radioastronomía con unos simples cambios internos en la circuitería.

A la hora de trabajar con la línea espectral más utilizada en el ámbito de la radioastronomía, la línea de Hidrógeno nos ha permitido descubrir que se pueden emplear diferentes estructuras para construir un radiotelescopio.

En nuestro caso, tras haber analizado estas estructuras, llegamos a la conclusión que la opción más factible con el mayor rendimiento posible sería el reciclaje de la antena Cassegrain actual de 34 metros de diámetro con la bocina diseñada en el punto 3.3.3.3.

Pese a no ser la mejor opción, puesto que con la técnica VLBI se obtienen unas mejores resoluciones, esta antena proporcionaría un rendimiento óptimo para su utilización en observaciones radioastronómicas en la Línea de Hidrógeno.

Como principal línea futura de trabajo, sería la implementación de la transformación de la antena para convertirla en un radiotelescopio funcional. Con ese objetivo he escrito este estudio de validación; para que los propietarios de la misma (NASA, INTA...) puedan tener una herramienta con la que poder empezar este proceso de transformación.

Otra posible línea futura sería la implementación de la bocina corrugada que trabaja en la línea de Hidrógeno sobre la estructura de la antena Cassegrain, así como los diferentes componentes internos adaptados a la nueva frecuencia de trabajo, para poder obtener este tipo de señales comunes en el Universo.

Como última posible línea de futuro, se podría realizar un nuevo estudio exhaustivo, analizando con detalle la utilización de una serie de antenas repartidas por el globo terráqueo para poder funcionar como un interferómetro, teniendo en cuenta los parámetros principales obtenidos en este proyecto.

5. ANEXOS

ANEXO 1 - CÁLCULOS FÍSICOS DEL RADIOTELESCOPIO

La diferencia principal entre las antenas Cassegrain y las antenas Gregorianas, además de la geometría del subreflector, son los cálculos de sus dimensiones obtenidos a partir de las diferentes posiciones de sus respectivos focos.

Una antena Cassegrain se basa en una estructura formada por dos espejos dispuestos sobre el mismo eje de simetría. El espejo principal, el cual es el encargado de la captación de las ondas externas, es un espejo parabólico cóncavo y el espejo secundario, también llamado subreflector es un espejo hiperbólico convexo.

El objetivo principal del espejo cóncavo es el de focalizar todos los rayos paralelos al eje de simetría recibidos sobre un mismo punto, el foco. Sin embargo, el objetivo del espejo convexo es el de focalizar estos rayos recibidos sobre un punto situado en el eje de simetría, por delante del colector principal. Esta transmisión será posible si el centro real del subreflector parabólico se localiza entre el foco del colector principal y el propio colector, es decir, dentro de la distancia focal del colector principal. De esta manera, todos los rayos podrán ser focalizados correctamente sobre un mismo punto, sin que se pierda ninguna señal.

Estos rayos llegarán al foco imaginario del subreflector, donde estará localizado el alimentador de la antena, de manera que, una vez dentro del mismo, estas señales serán tratadas en función de las características requeridas.

Para obtener los resultados de una forma más sencilla, analizaré los dos reflectores por separado. Primeramente, el colector principal es un paraboloide de revolución que tiene la siguiente forma:

Mediante las leyes de la trigonometría, se puede obtener el ángulo máximo de incidencia de los rayos reflejados sobre el foco θ_0 en función del diámetro del reflector D y de la distancia focal F mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_0 = 2 * \arctan\left(\frac{1}{\frac{4F}{D}}\right) \quad (5.1)$$

Además, cabe destacar que su área efectiva, teniendo en cuenta su análisis individual, es:

$$A_{ef} = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5.2)$$

En el caso del subreflector con forma de hiperboloide convexo, tomaremos en cuenta el colector principal para obtener los diferentes parámetros identificativos. El primer parámetro a tener en cuenta es el diámetro del subreflector, el cual será muy importante a la hora de calcular el área efectiva real, es decir, el área de captación del colector principal que no está cubierta por el área del subreflector.

Mediante esta explicación, podemos intuir que la ecuación del área efectiva real es:

$$A_{ef} = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{D_s^2}{4} \quad (5.3)$$

Siendo D_s el diámetro del subreflector.

Para obtener este diámetro, debemos tener en cuenta la condición de mínimo bloqueo del colector principal [65] que depende de la posición del foco del colector principal F , obteniendo la siguiente ecuación:

$$D_s = \sqrt{2\lambda F} \quad (5.4)$$

Otro parámetro importante que destacar es el ángulo máximo de incidencia sobre el colector principal, previa reflexión con el subreflector. Este ángulo, al igual que θ_0 también se deduce mediante leyes trigonométricas, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\gamma_0 = \arctan\left(\frac{D_s}{2d_1}\right) \quad (5.5)$$

Siendo d_1 la distancia desde el vértice que corta el eje de simetrías con el colector principal hasta el vértice que corta el eje de simetrías con la perpendicular imaginaria creada a partir de los dos extremos del subreflector.

El último parámetro que faltaría por resolver sería la excentricidad e del subreflector, parámetro que más adelante explicaré con detalle.

Con respecto al esquema general del radiotelescopio, la figura sería la siguiente:

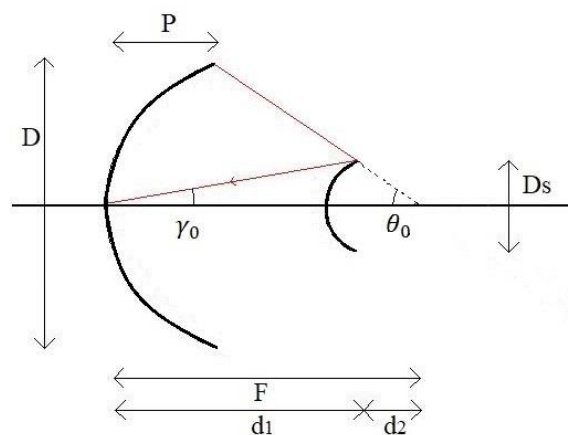


Figura 5.1. Esquema de un radiotelescopio Cassegrain

Para la resolución de la excentricidad, he definido dos distancias d_1 y d_2 previas para facilitar los cálculos, así como para la obtención de γ_0 . Este desarrollo se realizaría

mediante el siguiente sistema de ecuaciones, teniendo en cuenta que los parámetros F , θ_0 y D_S deben ser previamente conocidos:

$$F = d_1 + d_2 \quad (5.6)$$

$$\tan \theta_0 = \frac{D_S}{2d_2} \quad (5.7)$$

$$\tan \gamma_0 = \frac{D_S}{2d_1} \quad (5.8)$$

Un hiperboloide de revolución se puede simplificar de manera esquemática de la siguiente manera:

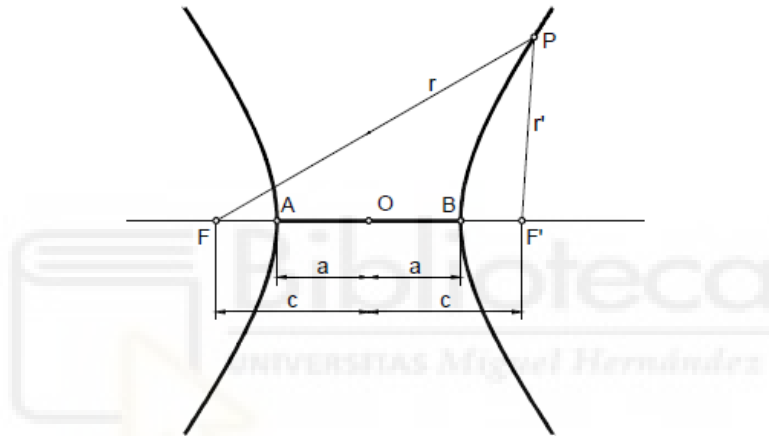


Figura 5.2. Esquema de una hipérbola

En el caso de un radiotelescopio Cassegrain, el subreflector es convexo, por tanto, nuestra hipérbola de referencia es aquella cuyo vértice con el eje de simetrías en nuestro esquema es B. Por tanto, los rayos rebotarán sobre este, focalizándolos en F.

La ecuación que cumple todo punto de la hipérbola es la siguiente:

$$r - r' = 2a \quad (5.9)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 5.9 y que, la excentricidad e es igual al cociente entre la semidistancia focal c y el semieje real a , debemos otorgar una serie de condiciones para poder obtener la excentricidad del hiperboloide de revolución en función de parámetros conocidos. Las condiciones son las siguientes:

- El punto P de la figura 5.3 corresponde con el punto donde el rayo procedente del colector principal se encuentra con el subreflector.
- El punto focal F será el vértice formado por el colector principal y el eje de simetrías.
- El punto focal F' coincidirá con el foco del colector principal.

Siguiendo estas condiciones, el esquema final del radiotelescopio se correspondería con el siguiente:

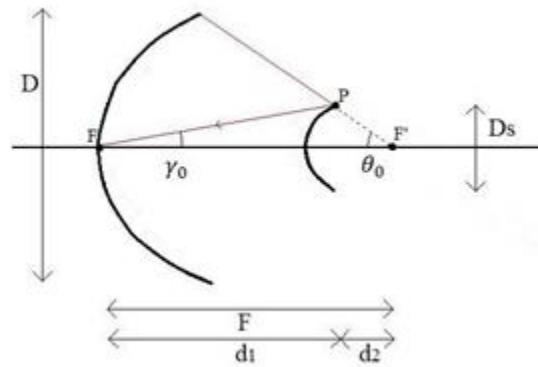


Figura 5.3. Esquema del radiotelescopio con condiciones

Mediante la figura 5.3, podemos ver como se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$F = d_1 + d_2 = 2c \quad (5.10)$$

$$\cos \theta_0 = \frac{d_2}{r'} \quad (5.11)$$

$$\cos \gamma_0 = \frac{d_1}{r} \quad (5.12)$$

Tomando como referencia las tres ecuaciones anteriores, obtenemos esta relación:

$$2a = r - r' = \frac{d_1}{\cos \gamma_0} - \frac{d_2}{\cos \theta_0} \quad (5.13)$$

Finalmente, obtenemos que la excentricidad es igual a:

$$e = \frac{c}{a} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\cos \gamma_0} - \frac{d_2}{\cos \theta_0}} = \frac{(d_1 + d_2) \cos \gamma_0 \cos \theta_0}{d_1 \cos \theta_0 - d_2 \cos \gamma_0} \quad (5.14)$$

Para una antena Gregorian, la única diferencia, a priori, es que, en lugar de utilizar un subreflector en forma de hiperboloide convexo, ahora el subreflector es un elipsoide cóncavo. El esquema de este tipo de radiotelescopios sigue la siguiente forma:

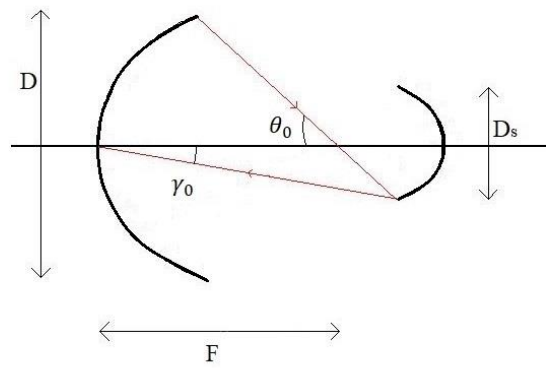


Figura 5.4. Esquema de un Radiotelescopio Gregorian

Como podemos observar, hay algunos cuyo valor no varía con respecto a la antena Cassegrain como son el ángulo máximo de incidencia de los rayos reflejados sobre el foco θ_0 , el diámetro del subreflector D_s y, el área efectiva total; pero si cambian otros parámetros como el ángulo máximo de incidencia sobre el colector principal γ_0 y la excentricidad del nuevo subreflector e .

A la hora de realizar los cálculos, al igual que con la antena Cassegrain, podemos realizar los cálculos ideales sobre el plano, en vez de realizar cálculos volumétricos. Para ello, debemos tener en cuenta que la elipse sigue el siguiente esquema:

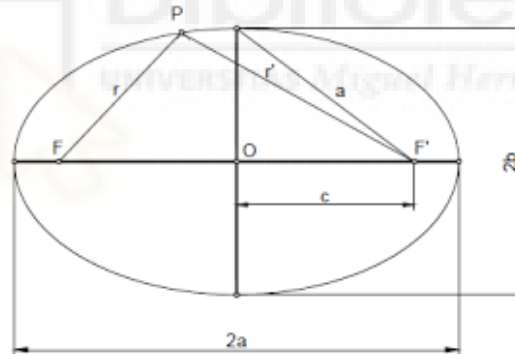


Figura 5.5. Esquema de una elipse

Teniendo en cuenta las propiedades de la elipse, debemos aplicar diferentes restricciones para obtener los cálculos de manera adecuada:

- El foco del colector principal debe ser el mismo que el foco F' de la estructura elíptica.
- El foco F de la elipse debe coincidir con el vértice formado a partir de la intersección del colector principal y del eje de simetrías.
- Tomaremos el punto del esquema donde rebota el rayo en el subreflector como punto P de la elipse.

Una vez declaradas las restricciones, el esquema del radiotelescopio quedaría de la siguiente manera:

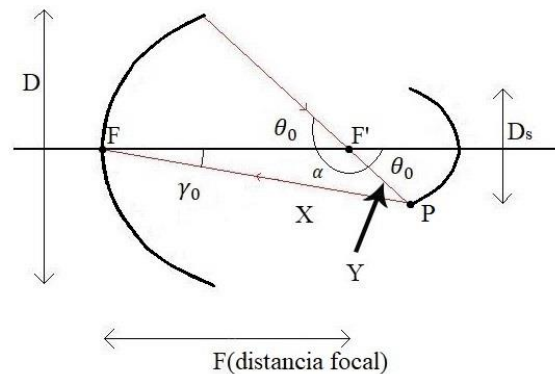


Figura 5.6. Esquema de un Radiotelescopio Gregorian con datos

Como podemos observar, a la hora de realizar el cálculo de γ_0 , tenemos dos triángulos, un triángulo rectángulo y otro obtusángulo. Esto se puede apreciar realizando un zoom sobre la figura anterior:

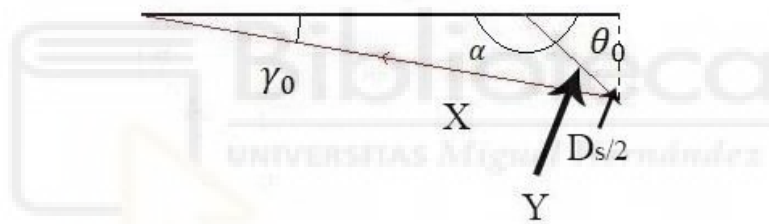


Figura 5.7. Zoom de la figura 5.6.

Como se puede apreciar en esta figura, podemos diferenciar de una manera más clara los dos triángulos previamente mencionados. Para realizar el cálculo de γ_0 , primero calcularemos los lados X e Y (que también servirán para el cálculo de la excentricidad del subreflector al ser r' y r de la figura 5.5.). Para ello, solo tenemos θ_0 , D_s y $\alpha = 180^\circ - \theta_0$

La longitud Y se obtiene mediante trigonometría básica, obtenido el siguiente resultado:

$$Y = \frac{\frac{D_s}{2}}{\sin \theta_0} \quad (5.15)$$

Una vez que tenemos Y, para el cálculo de la longitud X se utiliza el teorema de cosenos quedando el siguiente resultado:

$$X^2 = F^2 + Y^2 - 2FY \cos \alpha \rightarrow X = \sqrt{F^2 + \frac{D_s^2}{4 \sin^2 \theta_0} + \frac{FD_s}{\tan \theta_0}} \quad (5.16)$$

Una vez que tenemos X, solo falta calcular γ_0 mediante el teorema del seno, de manera que quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{X}{\sin \alpha} = \frac{Y}{\sin \gamma_0} \rightarrow \gamma_0 = \arcsin \frac{Y \sin \alpha}{X} \quad (5.17)$$

El cálculo final para caracterizar el subreflector es la excentricidad, cuya formula es la siguiente:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = \sqrt{1 - \frac{a^2 - c^2}{a^2}} = \frac{c}{a} \quad (5.18)$$

Como sabemos por las propiedades geométricas de una elipse, $2a = r+r'$, y, observando las restricciones hechas con anterioridad, $2c$ es igual a la focal del colector principal F. Dicho esto, el resultado final de la excentricidad es el siguiente:

$$e = \frac{c}{a} = \frac{F}{X+Y} \quad (5.19)$$

Estas antenas pueden estar montadas sobre diferentes monturas. Las monturas principales para este tipo de antenas son las siguientes [66]:

- **Montura altacimutal:** Estructura compuesta por dos ejes perpendiculares de movimiento. El eje horizontal se corresponde con el acimut permitiendo un movimiento de 360° mientras que, el eje vertical se corresponde con la altitud, pudiéndose mover en un rango de 90° . Esta estructura se utiliza, sobre todo, en radiotelescopios de grandes dimensiones.
- **Montura ecuatorial:** Estructura compuesta también por dos ejes perpendiculares de movimiento, los cuales se corresponde con la ascensión recta y la declinación (eje ecuatorial y su perpendicular respectivamente). Esta estructura permite un fácil seguimiento de las figuras celestes.

Estos deben tener un motor que permite ofrecer al radiotelescopio realizar una rotación cada 23 horas y 56 minutos para poder sincronizarse con respecto a la rotación de la Tierra. Los radiotelescopios montados con esta estructura son más caros y complejos que el tipo de estructura anterior.

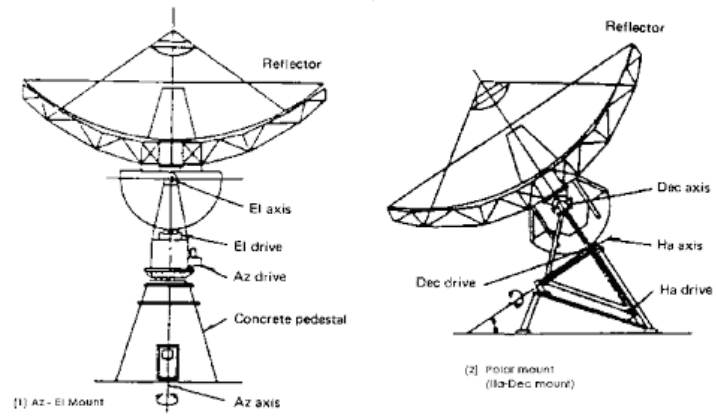


Figura 5.8. Montura altacimutal y ecuatorial



ANEXO 2 - Utilización del software OptGeo

En este anexo se desarrollará una explicación breve del software libre de simulación ópticas geométricas OptGeo. Las diferentes versiones del software OptGeo están disponibles en el siguiente enlace <http://jeanmarie.biansan.free.fr/optgeo.html>.

Este software libre, el cual está disponible en francés y en inglés, es capaz de simular todo tipo de escenarios ópticos que incluyen todo tipo de espejos, pantallas y lentes. Estos elementos se pueden intercalar entre sí para poder visualizar la trayectoria de diferentes tipos de rayos, así como su comportamiento a través de la interacción con estos objetos.

En mi caso, este software me ha servido para crear figuras con las cuales puedo fundamentar mis cálculos de los tipos de estructuras parabólicas posibles para nuestro radiotelescopio.

Además, el propio software tiene una serie de escenarios prediseñados, entre los cuales se encuentran una estructura Cassegrain y una estructura Gregorian. Estos me han ayudado a la hora de diseñar mis propios escenarios, sobre los cuales he indicado mi propia nomenclatura para la explicación posterior de los cálculos realizados.

En cuanto a su funcionamiento, es bastante intuitivo puesto que una vez que trazas el eje de simetrías, se puede empezar a trazar los diferentes elementos a partir de sus características principales (centro, foco...) así como el trazado adicional de las posibles cotas necesarias para la aclaración de las medidas identificativas de cada elemento (distancia focal, diámetro...).

Tras descargar el ejecutable adecuado para el ordenador a utilizar, lo primero que notaremos al ejecutar el programa por primera vez es que fue diseñado en francés. No obstante, el propio software te da la opción de cambiar el idioma a inglés. Esta acción se explicará a continuación.

Al abrir la aplicación, nos aparece la siguiente figura:

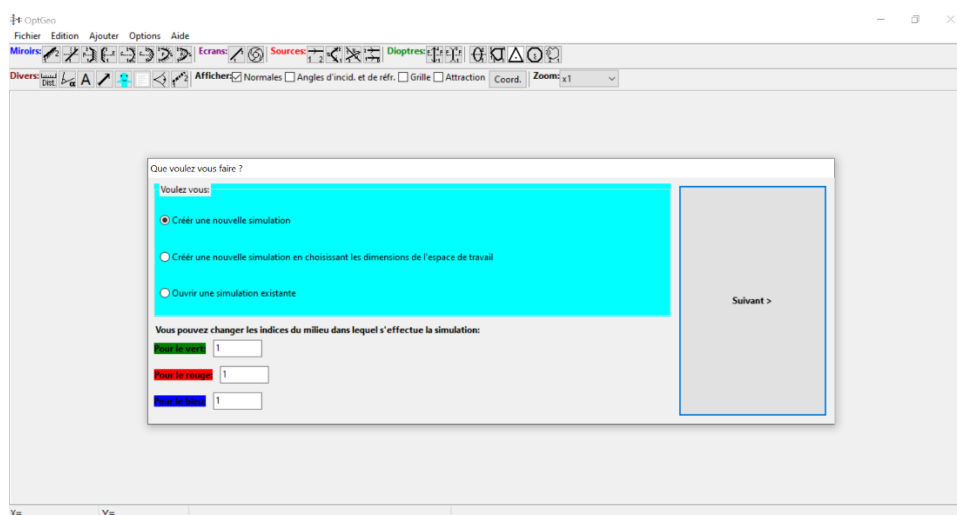


Figura 5.9. Pantalla de inicio

Básicamente, en esta pantalla nos ofrece crear una nueva simulación o abrir una simulación empezada, así como cambiar los índices de refracción del medio para los diferentes tipos de elementos, organizados por colores. Una vez dentro, podemos cambiar el idioma del programa mediante el menú de opciones, más concretamente en “Options → Langue”.

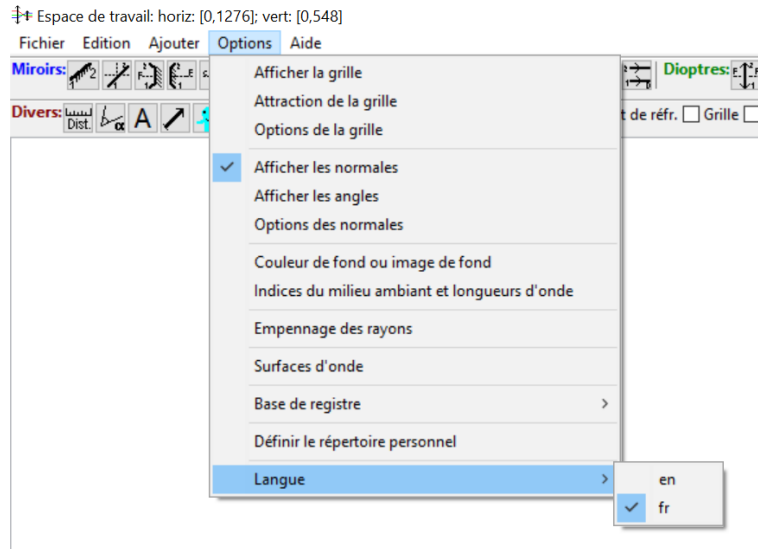


Figura 5.10. Cambio de idioma

En caso de cambiar de idioma, el programa te avisa de que te expulsará mediante un aviso de confirmación. Este aviso es, básicamente, un recordatorio de guardado en caso de que hayas avanzado en tus simulaciones. Si se desea cambiar el idioma, es recomendable realizarlo antes de empezar una nueva simulación.

Centrándonos en el menú de opciones, la primera opción que nos ofrece el programa es el menú “File”. Este nos ofrece la opción de abrir una simulación propia (realizada y guardada previamente) o abrir “simulaciones de ejemplo” con todo tipo de figuras prediseñadas. Otras opciones que nos ofrece “File” es la acción de guardado. Este programa ofrece guardar la simulación en formato .opt, formato del proyecto, de manera que se permite al usuario poder cambiar partes del proyecto al cerrarlo. También ofrece la posibilidad de exportar la simulación en otros formatos como JPG, PNG o PS.

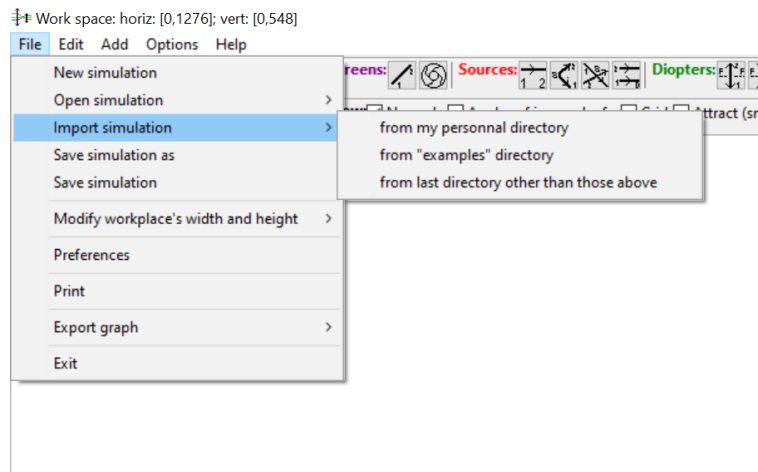


Figura 5.11. Opción File

A parte de estas opciones, “File” permite el ajuste de los parámetros básicos como las dimensiones de los objetos (Preferences) y del escenario (Modify Workplace’s width and height).

La siguiente opción que encontramos en el menú de opciones es “Edit”, la cual nos permite editar los diferentes elementos de la simulación (cortar, eliminar, propiedades del elemento...).

La tercera opción de este menú es “Add”, la cual nos permite añadir todo tipo de elementos, tanto reales como ideales, fuentes de rayos y, otros elementos de ámbito aclarativo para ayudar a entender de una forma clara al autor del proyecto (flechas, anotaciones...).

A parte de la opción de cambiar de idioma, el menú “Options” sirve también para cambiar parámetros generales de la simulación como el color del escenario y de otros parámetros más específicos como la longitud de onda de las señales o el índice de refracción del medio. Además de todo esto, sirve también para mostrar diferentes características del proyecto como pueden ser ángulos, una malla por todo el escenario...

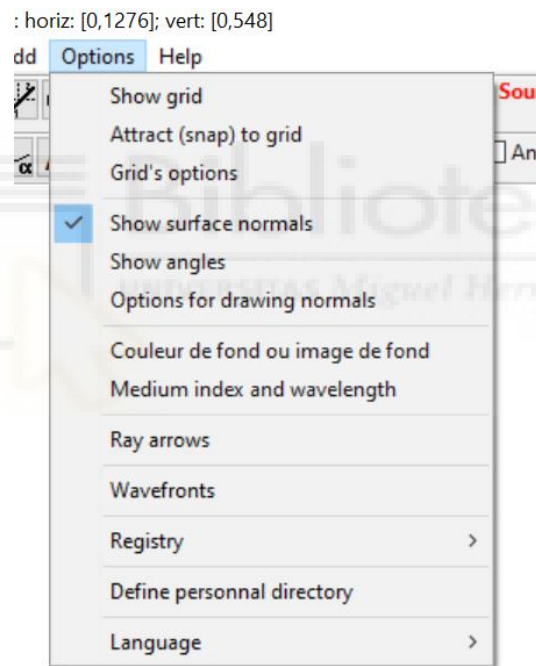


Figura 5.12. Menú Options

Como última opción por analizar de este menú, la opción “Help” nos ofrece un menú de ayuda para el manejo de OptGeo, así como ofrecernos la opción de contactar con su autor. Además de esto, también ofrece la posibilidad de volver a la página web de descargas y, los créditos de los autores del software y su traducción.

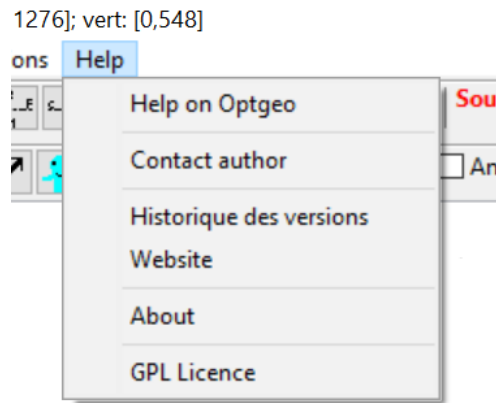


Figura 5.13. Menú Help

Con respecto a los menús rápidos, el software OptGeo tiene tres grandes áreas a destacar. Por un lado, el área de figuras, donde se pueden dibujar todo tipo de elementos (*Add* del menú de opciones). Por otro lado, el menú de la parte derecha ofrece las mismas opciones que la opción “*Edit*” del menú de opciones y la opción de imprimir la simulación o exportarla a distintos formatos como JPG, PNG o PS.

La siguiente figura ofrece un resumen de los menús rápidos:

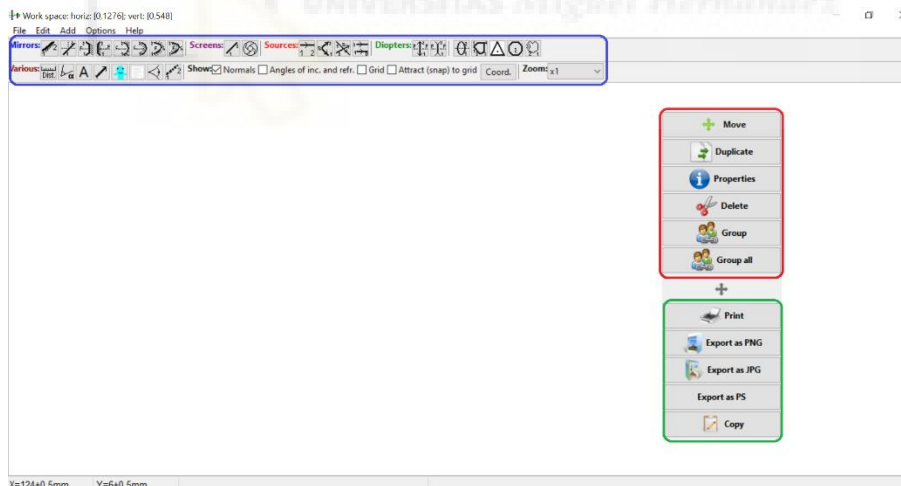


Figura 5.14. Menús rápidos

Mediante la figura anterior, podemos ver destacadas tres partes de la pantalla correspondientes a los diferentes menús rápidos. Las figuras y las fuentes, es decir, la opción *Add* del menú de opciones está rodeada de azul, junto con opciones para mostrar directamente sobre el escenario como puede ser una malla o los ángulos de incidencia y refracción. El menú correspondiente a la opción de *Edit* está rodeado en color rojo mientras que las opciones de exportar el proyecto e imprimirlo están rodeadas en color verde.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Centro de Astrobiología, CAB (CSIC-INTA). (2009). Capítulo 1. Propiedades de la radiación electromagnética. http://partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_1
- [2] Baez, John. (1999). The Plank Length. <https://math.ucr.edu/home/baez/planck/node2.html>
- [3] Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP group). (22 de diciembre, 2017). WMAP's Top Ten. <https://map.gsfc.nasa.gov/>
- [4] R Nave. (s.f.). Blue Sky. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c2>
- [5] Corral González, Pablo. (2019). Tema 1: Introducción a los Sistemas de Radiocomunicación. Sistemas de Radiocomunicación – Teoría de la Señal y Comunicaciones.
- [6] Odenwald, Sten. (s.f.). Pregúntele a un astrónomo de Spitzer – Radiación Infrarroja. <http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/ask/radiation.html>
- [7] L'Observatoire de Paris. (s.f.). Observar en el infrarrojo térmico. <https://media4.obspm.fr/public/VAU/instrumentacion/instrumento/infrarrojo/radiacion-termica/OBSERVER.html>
- [8] Pino, Fernando. (s.f.). El espectro visible de luz. <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/2011/10/02/el-espectro-visible-de-luz>
- [9] Hernandez Torres, Camilo Andrés. (2019). Análisis comparativo de las tecnologías VLC y FSO como guía para la toma de decisiones de ingenieros que planifican redes de acceso. Universidad Piloto de Colombia. Pags. 15-16.
- [10] Experientia docet. (20 de septiembre, 2016). Rayos X y gamma. <https://culturacientifica.com/2016/09/20/rayos-x-gamma/>
- [11] Connor, Nick. (1 de julio, 2020). Qué es el contador de centelleo – Detector de centelleo – Definición. <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-contador-de-centelleo-detector-de-centelleo-definicion>
- [12] Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. (20 de septiembre, 2019). Radiación UV. <https://www.cdc.gov/spanish/especialescdc/radiacionuv/index.html>
- [13] Connor, Nick. (1 de julio, 2020). Qué es el contador Geiger – Detector Geiger-Mueller – Definición. <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-contador-geiger-detector-geiger-mueller-definicion/>
- [14] Pérez Lara, Luis Esteban. (3 de marzo, 2019). A que frecuencias trabajan los satélites. <https://luisblogf.blogspot.com/2019/03/a-que-frecuencias-trabajan-los-de-la.html>

- [15] Centro de Astrobiología, CAB (CSIC-INTA). (2009). Capítulo 3. Mecanismos de emisión de la radiación electromagnética. http://partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_3
- [16] Connor, Nick. (15 de septiembre, 2019). Qué es la Ley de Planck – Hipótesis de Planck – Definición. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ley-de-planck-hipotesis-de-planck-definicion/>
- [17] Olmo, M. Nave, R. (s.f.). Ley de Stefan-Boltzmann. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/stefan.html>
- [18] Vera Pérez, Antonio. (Julio, 2014). Diseño de Software para Análisis y Reducción de Datos Radioastronómicos de la antena DSS-61 de PARTNeR. Escuela Politécnica Superior de Elche. Pags. 12-13
- [19] Maestre Vicente, Haroldo J. (2019). Tema 4. Diodos Emisores de Luz (LEDs). Sistemas de Comunicaciones Ópticas – Teoría de la Señal y Comunicaciones.
- [20] Casanova, Verónica. (25 de junio, 2010). Clasificación de las galaxias según la secuencia de Hubble. <https://www.astrofisicayfisica.com/2010/06/clasificacion-de-las-galaxias-segun-la.html>
- [21] Choatie, Mike. (s.f.). Galaxias espirales. <https://docs.kde.org/trunk5/es/extragear-edu/kstars/ai-spiralgal.html>
- [22] López, Mario F. (18 de febrero, 2020). ¿Qué es una galaxia? Tipos de Galaxias. <https://astroaficion.com/2020/02/18/que-es-galaxia-tipos-de-galaxias>
- [23] Zapata, Fanny. (s.f.). Galaxias elípticas: formación, características, tipos, ejemplos. <https://www.lifeder.com/galaxias-elipticas/>
- [24] Frommert, Hartmut. Kronberg, Christine. (3 de agosto, 2005). Lenticular (S0) Galaxies. <https://web.archive.org/web/20050803074638/http://www.seds.org/messier/lenticul.html>
- [25] Portillo, Germán. (s.f.). Galaxias irregulares. <https://www.meteorologiaenred.com/galaxias-irregulares.html>
- [26] International Astronomical Union (IAU). (24 de agosto, 2006). IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes. <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>
- [27] Asociación Larense de Astronomía. (s.f.). Elementos de órbitas planetarias. http://www.tayabeixo.org/efemerides/elem_orbitas.htm
- [28] Campos, Felipe. (24 de noviembre, 2012). ¿Cómo se forman los planetas? <https://www.cosmonoticias.org/como-se-forman-los-planetas/>
- [29] Física II ECEN - Profesorado en Física. (2020). Teoría cinética de los gases ideales. Pag. 11.
- [30] Belmonte, Ángela. (26 de marzo, 2020). Clasificación de los planetas. <https://www.unprofesor.com/ciencias-naturales/clasificacion-de-los-planetas-4050.html>

- [31] Snow, Theodore P. McCall, Benjamin P. (5 de junio, 2006) Diffuse Atomic and Molecular Clouds. The Annual Review of Astrophysics.
- [32] NASA's Observatorium. (10 de agosto, 2007). Stellar Evolution & Death. https://web.archive.org/web/20070810152544/http://observe.arc.nasa.gov/nasa/space/stellardeath/stellardeath_2a.html
- [33] López Icedo, Lander. Porro Azpiazu, José María. Torrónategui Muñoz, Erik. García Echevarría, Miguel. (mayo, 2004). Cuántica y Relatividad TOE's (Teorías del Todo). Pag. 105.
- [34] Muñoz, José Luis. (17 de diciembre, 2010). Métodos de medición de distancias astronómicas. <https://agrupacionastronomicamagalanes.wordpress.com/2010/12/17/metodos-de-medicion-de-distancias-astronomicas/>
- [35] Pino, Fernando. (s.f.). Tipos de constelaciones de estrellas. <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/3610/tipos-de-constelaciones-de-estrellas>
- [36] NASA's Observatorium. (10 de agosto, 2007). Stellar Evolution & Death. https://web.archive.org/web/20070810152544/http://observe.arc.nasa.gov/nasa/space/stellardeath/stellardeath_2a.html
- [37] Nombre de usuario: elisachisari. (8 de diciembre, 2016). Clasificando supernovas. <https://astrobitos.org/2016/12/08/clasificando-supernovas>
- [38] NASA's Observatorium. (10 de agosto, 2007). Stellar Evolution & Death. https://web.archive.org/web/20070810152544/http://observe.arc.nasa.gov/nasa/space/stellardeath/stellardeath_2a.html
- [39] Milhaud, (10 de julio, 2010). Los cinco movimientos de la Tierra. <https://naukas.com/2010/07/10/los-cinco-movimientos-de-la-tierra>
- [40] Pérez Cano, José Santiago. (julio, 2008). Diseño y Desarrollo de Software con LabVIEW para el Control de la Antena DSS-61 de PARTNeR. Escuela Politécnica Superior de Elche. Pags. 25-33.
- [41] García Escudero, Belén. Llorente Herranz, Rebeca. (s.f.). Introducción Histórica a la Radioastronomía. https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/RADIOASTRONOMIA/web/Indice/Radio/I_radio/5_2/HistR.htm
- [42] Vera Pérez, Antonio. (Julio, 2014). Diseño de Software para Análisis y Reducción de Datos Radioastronómicos de la antena DSS-61 de PARTNeR. Escuela Politécnica Superior de Elche. Pags. 36-39.
- [43] Centro de Astrobiología, CAB (CSIC-INTA). (2009). Capítulo 2. Observación de La radiación electromagnética. http://partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_2
- [44] Centro de Astrobiología, CAB (CSIC-INTA). (2009). Interferometría Radio. https://partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Interferometria_Radio

- [45] Slobin, Stephen D. (7 de septiembre, 2016). DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 301. Pag. 15
- [46] Madrid Deep Space Communications Complex (MDSCC). (2011). DSS-65. <https://www.mdsc.nasa.gov/index.php/dss-65/>
- [47] Imbriale, William A. (febrero, 2002). Large Antennas of Deep Space Network. Chapter 6. Section 6.1
- [48] Imbriale, William A. (febrero, 2002). Large Antennas of Deep Space Network. Chapter 6. Section 6.2
- [49] Cornish, Timothy. (18 de octubre, 2016). DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 205. Pag. 7.
- [50] Slobin, Stephen D. (15 de septiembre, 2015) DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 105. Pag. 21
- [51] Imbriale, William A. (febrero, 2002). Large Antennas of Deep Space Network. Chapter 1. Section 1.2
- [52] Slobin, Stephen D. (10 de julio, 2014). DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 103. Pag. 22
- [53] Imbriale, William A. (febrero, 2002). Large Antennas of Deep Space Network. Chapter 1. Pag. 4
- [54] Williams, W. Reilly, H. (septiembre y octubre, 1980). A Prototype DSN X/S-Band Feed: DSS 13 Application Status (Fourth Report). Radio Frequency and Microwave Subsystems Section. Pags. 77-79.
- [55] Bautista, J. Javier. (s.f.). HEMT Low-Noise Amplifiers. https://descanso.jpl.nasa.gov/monograph/series10/05_Reid_chapt5.pdf
- [56] Yngvesson, K. Sigfrid. (1976). 3.3. Maser Amplifiers. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0076695X08606894>
- [57] Slobin, Stephen D. (10 de julio, 2014). DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 103.
- [58] Chen, Sheng. (s.f.). Coherent and Non-coherent Receivers. School of Electronics and Computer Science (University of Southampton)
- [59] Imbriale, William A. (febrero, 2002). Large Antennas of Deep Space Network. Chapter 6. Pag. 164.
- [60] Slobin, Stephen D. (10 de julio, 2014). DSN Telecommunications Link Design Handbook. Chapter 103. Pag. 8.
- [61] ART CHIST. (s.f.). Tipos de antenas satélite | Foco centrado + Offset + Cassegrain + Gregorian + Multisatélite + Plana | Características. <https://artchist.blogspot.com/2019/09/tipos-de-antenas-satelite-foco-centrado.html>

- [62] Vera Pérez, Antonio. (Julio, 2014). Diseño de Software para Análisis y Reducción de Datos Radioastronómicos de la antena DSS-61 de PARTNeR. Escuela Politécnica Superior de Elche. Pags. 36-37
- [63] Probecom. (31 de mayo, 2017). Cassegrain Antenna. <http://www.probecom.cn/Ralated-Theories/Cassegrain-antenna.html>
- [64] Angosto Sánchez, Ramón. (julio, 2007). Análisis y diseño de una antena parabólica para un radiotelescopio en la banda de 1420 MHz. Universidad Politécnica de Cartagena. Pags. 80-87
- [65] Chuquimarca Yánez, Katherine Alexandra. (noviembre, 2014). Análisis de reflectores en Matlab. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (Madrid). Pag. 38
- [66] Vera Pérez, Antonio. (Julio, 2014). Diseño de Software para Análisis y Reducción de Datos Radioastronómicos de la antena DSS-61 de PARTNeR. Escuela Politécnica Superior de Elche. Pag. 36
- [67] Vera Pérez, Antonio. (Julio, 2014). Diseño de Software para Análisis y Reducción de Datos Radioastronómicos de la antena DSS-61 de PARTNeR. Escuela Politécnica Superior de Elche. Pags. 40-41
- [68] Moreno, Ricardo. (s.f.). Radiotelescopios Programa – guía. http://partner.cab.inta-csic.es/Upload/201309/PG_RT_13.pdf
- [69] Kinman, P. W. (29 de octubre, 2009) DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 203. Pag. 34
- [70] Slobin, Stephen D. (2 de julio, 2015). DSN Telecommunications Link Design Handbook, Jet Propulsion Laboratory. Chapter 101. Pag. 8.
- [71] Imbriale, William A. (febrero, 2002). Large Antennas of Deep Space Network. Chapter 6. Pag. 162.
- [72] Slobin, Stephen D. (10 de julio, 2014) DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 103. Pag. 15.
- [73] Slobin, Stephen D. (10 de julio, 2014) DSN Telecommunications Link Design Handbook. Jet Propulsion Laboratory. Chapter 103. Pags. 23-24.
- [74] Torregrosa Penalva, German. (2019). Chapter 5: Array Antennas. Radiación y Propagación – Teoría de la Señal y Comunicaciones.
- [75] Rojas, José Luis. et al. (s.f.). Antenas Yagi. Universidad Nacional de Chimborazo.
- [76] Granet, Christophe. James, Graeme L. James. (2 de abril, 2005). Design of Corrugated Horns: A Primer. IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol. 47.