

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ANTENA FIJA PARA EL ENLACE CON  
EL SATELITE HEALTHSAT II EN EL  
PROGRAMA EHAS  
(Enlace Hispano Americano de Salud)**

Arturo Fernández de Velasco Rodrigo.

MADRID, abril de 2001

**Título:** ANTENA FIJA PARA EL ENLACE CON EL SATELITE HEALTHSAT II EN EL PROGRAMA EHAS (Enlace Hispano Americano de Salud)

**Autor:** D. Arturo Fernández de Velasco Rodrigo.

**Tutor:** Dr. Manuel Sierra Castañer.

**Ponente:** Dr. José Luis Fernández Jambrina.

**Departamento:** Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

## **MIEMBROS DEL TRIBUNAL CALIFICADOR:**

**PRESIDENTE:** Dr. Francisco del Pozo Guerrero

**VOCAL:** Dr. Manuel Sierra Pérez.

**SECRETARIO :** Dr. José Luis Fernández Jambrina.

**SUPLENTE:** Dra. Belén Garocha Iragüen.

**Fecha de lectura:**

**Calificación:**

**Resumen del proyecto:**

Diseño, construcción, medidas y prueba de dos antenas de voluta (QHA) en vuelta y media que permiten la comunicación con satélites de baja órbita. La característica fundamental de las antenas construidas es que no precisan un apuntamiento dinámico en la dirección del satélite en su órbita, esto redundando en una simplificación de la estación terrena al no ser precisos los sistemas mecánicos de seguimiento.

Para el diseño se ha estudiado en primer lugar el comportamiento de las antenas de voluta a través de la realización de simulaciones en ordenador utilizando el programa PDMPH2, basado en el método de los momentos. Elegido el diseño óptimo se han construido y probado los prototipos que permiten evaluar la viabilidad de su uso en las comunicaciones con satélites LEO.

También se presentan los resultados del cálculo de balances de potencia así como el estudio de los sistemas de comunicaciones por satélites de baja órbita. Todo esto permite un análisis del conjunto y la presentación de conclusiones favorables acerca de la utilización de antenas de este tipo en un entorno de comunicaciones de bajo coste.

**Palabras clave:**

Comunicaciones por Satélite, Antena de Voluta, QHA, LEO, Polarización Circular  
Comunicaciones de Bajo Coste, Microsat

*A Elena, a mis padres y a mis hermanos.*

# INDICE

<b>CAPÍTULO 1.- PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....</b>	<b>8</b>
1.1.- EL PROGRAMA ENLACE HISPANO AMERICANO DE SALUD. EHAS.....	8
1.2.- TOPOLOGÍA DE LA RED EHAS.....	9
1.2.1.- <i>Soluciones tecnológicas</i> .....	11
1.3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO FIN DE CARRERA.....	12
1.4.- ALCANCE DEL PROYECTO DE FIN DE CARRERA.....	13
1.5.- INTERACCIÓN CON OTROS PROYECTOS.....	14
1.6.- FASES DEL PROYECTO.....	16
<b>CAPÍTULO 2.- COMUNICACIONES POR SATÉLITES DE BAJA ÓRBITA (LEO).....</b>	<b>18</b>
2.1.- SATÉLITES DIGITALES DE BAJA ÓRBITA.....	18
2.2.- ÓRBITA DEL SATÉLITE.....	20
2.3.- PARÁMETROS KEPLERIANOS.....	23
2.4.- DESCRIPCIÓN DEL SATÉLITE UoSAT - 5 (UoSAT- OSCAR 22).....	26
2.5.- GEOMETRÍA DEL RADIOENLACE. ....	27
2.6.- PÉRDIDAS DE ESPACIO LIBRE.....	31
2.7.- LA ESTACIÓN TERRENA DEL GBT.....	32
2.7.1.- <i>Ordenador de la estación LEO</i> .....	32
2.7.2.- <i>TNC 2 Plus</i> . ....	33
2.7.3.- <i>Sistema de antenas</i> .....	33
2.7.4.- <i>Transceptor VHF/UHF para el satélite</i> .....	33
2.7.5.- <i>Controlador de Rotores</i> .....	34
2.8.- CONFIGURACIÓN FUTURA DE LA ESTACIÓN LEO EHAS.....	35
2.9.- EFECTO DOPPLER.....	37
2.10.- PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES.....	40
2.10.1.- <i>Protocolo AX.25</i> .....	40
2.10.2.- <i>PACSAT Broadcast Protocol</i> .....	41
2.10.3.- <i>PACSAT FTLO (File Transfer Level 0)</i> .....	42
<b>CAPÍTULO 3.- CÁLCULO DEL RADIOENLACE.....</b>	<b>45</b>
3.1.- BALANCE DEL RADIOENLACE.....	45
3.1.1.- <i>Cálculo del Ancho de banda</i> .....	46
3.1.2.- <i>Relación Señal Ruido y Factor de Ruido del Receptor</i> .....	47
3.1.3.- <i>Cálculo del factor de ruido de la estación terrena</i> .....	49
3.1.4.- <i>Potencia de la Señal Recibida</i> .....	50
3.1.5.- <i>Potencia de ruido</i> .....	52
3.2.- DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA REQUERIDA.....	54
<b>ANEXOS.....</b>	<b>61</b>





# 1 Planteamiento del Proyecto.

# Capítulo 1.- Planteamiento del Proyecto.

## 1.1.- El Programa Enlace Hispano Americano de Salud. EHAS.

---

El programa EHAS<sup>1</sup> tiene los objetivos específicos de mejorar el acceso a la información médica en zonas rurales de los países de América Latina y fortalecer las infraestructuras de telecomunicaciones en torno a los centros de salud.

Dentro del programa están abiertas tres líneas principales de trabajo:

- Investigación en tecnologías de comunicación de bajo coste.
- Desarrollo de servicios de información para el personal sanitario.
- Implantación de la red EHAS en países de América Latina y África.

La elección de las soluciones de red a implantar está condicionada por el uso de tecnologías de bajo coste y la adaptabilidad a los lugares donde se han de implantar. Estas condiciones apuntan hacia los sistemas de transmisión por radio.

Se plantea un modelo de comunicaciones basado en servicios de correo electrónico, desarrollando contenidos y aplicaciones que puedan ser soportados por redes de transmisión por radio de bajo ancho de banda.

### Fases del programa EHAS.

El programa EHAS pretende extenderse en países en vías de desarrollo que requieran una mejora de las condiciones de acceso a los servicios de información sanitaria.

Para la implantación del programa EHAS en cada país se establecen cuatro fases:

- Identificación, constitución y capacitación de las contrapartes. Es necesaria la existencia de dos contrapartes, una médica y otra tecnológica. La primera será responsable de posibilitar el acceso a la información médica, mientras que la contraparte técnica asumirá la gestión de las comunicaciones a nivel telemático y de radiocomunicaciones.
- Estudio de las necesidades de comunicación y acceso a sistemas de información del personal sanitario rural.
- Desarrollo de una experiencia piloto.
- Implantación masiva de tecnología EHAS en el resto del país.

---

<sup>1</sup> Andrés Martínez; Valentín Villarroel; Alberto Escudero; Francisco del Pozo y M.T. Arredondo. "Tecnologías Apropriadas para el Sector Salud de Países en Desarrollo. El Programa EHAS. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. Documento inteno del departamento. 1999.



## 1.2.- Topología de la Red EHAS.

El programa EHAS ha diseñado una topología genérica de red que permita las comunicaciones entre los puestos de salud.

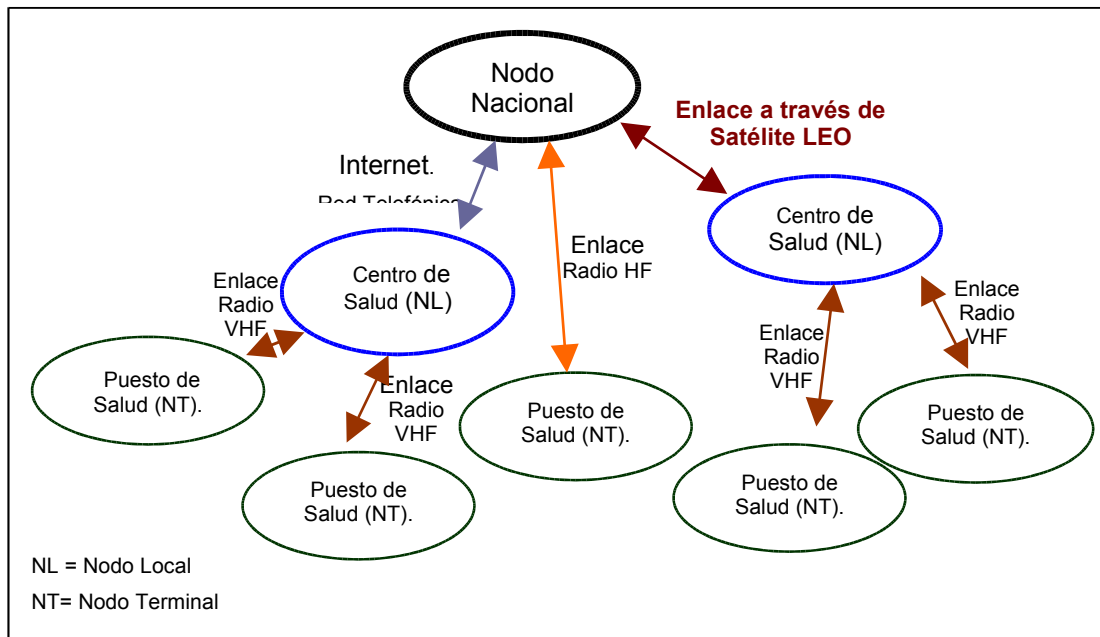


Fig. 2.2-1.2.1 Diagrama básico de la topología de red en el programa EHAS.

Esta topología se compone de tres tipos de nodos y sus interconexiones:

- **Nodo Terminal.** Es el emplazamiento del usuario final. Puede comunicarse con el Nodo Local o en alguna ocasión hacer de puente entre un nodo local y otro terminal. Habitualmente se encontrarán instalados en **puestos de salud** y realizarán la comunicación a través de enlaces de radio en VHF. También se ha previsto la posibilidad de que algún puesto de salud que carezca de visión directa con su centro de salud pueda realizar la comunicación a través de enlaces HF.

El Nodo Terminal dispone de la configuración llamada cliente VHF consistente en un hardware compuesto por un ordenador (PC) con los programas gestores de correo electrónico, este ordenador será equipado con una TNC (módem de radio) que permitirá la conexión a la red a través de un transceptor de radio VHF.

- **Nodo Local.** Centraliza las comunicaciones por radio con los Nodos Terminales dependientes de él. Realizando la función de servidor de correo hacia los nodos



### 1.2.1.- Soluciones tecnológicas.

Para poder implementar redes con la topología descrita anteriormente, se dispone de un laboratorio de investigación en tecnologías de bajo coste donde el Programa EHAS desarrolla las soluciones tecnológicas para los diferentes sistemas de comunicaciones:

- **Radioenlaces UHF/ VHF.**
- **Radioenlaces HF**
- **Radioenlaces vía satélites LEO.**
- **Sistemas de microondas con técnicas de espectro ensanchado.**

### **1.3.- Objetivos del Proyecto Fin de Carrera.**

---

El presente proyecto se centra en las comunicaciones a través de satélite. Como se ha explicado anteriormente el recurso al satélite solamente será necesario para proporcionar comunicaciones a los Nodos Locales (Centros de Salud) que no tengan acceso a la red telefónica conmutada.

En estas ubicaciones se establecerá la comunicación con el exterior a través del Satélite LEO HealthSat II. Este satélite es del tipo Minisat, utilizan una órbita baja, en torno a los 780 kilómetros de altura sobre la tierra.

El GBT dispone actualmente de una estación LEO que se está utilizando como laboratorio de comunicaciones. Esta estación está configurada para la comunicación con satélites de radioaficionados, que funcionan con los mismos protocolos que el HealthSat y con características similares. Una de las mayores dificultades que se observan a la hora de instalar una estación LEO es el elevado precio y la complejidad del sistema de antenas. Dado que los satélites LEO no están en una órbita geoestacionaria cuando se dota a las antenas de la estación terrena de una ganancia directiva de valor medio (10 dBi en el caso de las antenas yagi que se han montado actualmente), se requiere un continuo apuntamiento hacia el satélite durante el tiempo que está visible.

El sistema de seguimiento se compone de dos motores que mueven la antena en acimut y elevación, y un sistema software que requiere una actualización periódica un conjunto de parámetros que permiten la determinación de la posición del satélite.

El objetivo del proyecto es el diseño de un sistema de antenas que permita la comunicación permaneciendo inmóvil. Con esto se obtendrán las siguientes ventajas:

- Simplificación de la estación de tierra ya que no se necesitará el sistema de rotores y el software de seguimiento.
- Mayor estabilidad del sistema al carecer de equipos que requieran ajustes y reparaciones.
- Abaratamiento del conjunto de la estación, tanto en la fase de instalación como en la fase de explotación al reducirse los costes de mantenimiento.

## **1.4.- Alcance del Proyecto de Fin de Carrera.**

---

El alcance de este proyecto es el diseño, la construcción y medidas de un juego de antenas (receptora y transmisora) para satélites LEO de radioaficionados (en concreto trabajando con el satélite UO-22). Desde un primer momento se ha pensado en la construcción de antenas de voluta, que a lo largo de esta memoria también se referencian como antenas helicoidales cuadrafilares, ya que ésta parece la traducción más correcta del término inglés "*Quadrafilar Helix Antenna*" que responde a las siglas QHA. De la experiencia del desarrollo de las antenas para los satélites de radioaficionados posteriormente se podrá construir con facilidad las antenas para el satélite Healthsat II.

El alcance de este Proyecto de Fin de Carrera es el **diseño, la construcción y medidas** de dos antenas (transmisora y receptora) para el satélite UO-22, que sea aplicable a la construcción de antenas para el satélite Healthsat II,

Aparte del diseño y construcción de las antenas, en el contexto del presente proyecto se han realizado otras labores:

- **Pruebas de transmisión y recepción con satélites y medidas de la eficiencia.**

Una vez construidas las antenas es necesario probar su funcionamiento para la aplicación que se han diseñado, por lo que se montarán las antenas en la estación para comprobar su correcto funcionamiento.

- **Puesta a punto de la estación terrena del GBT.**

Es por tanto importante el disponer de una estación terrena dotada de antenas de seguimiento en perfecto estado de funcionamiento que permita comparar los sistemas fijo y móvil. Un objetivo adicional del proyecto de fin de carrera ha sido precisamente éste, colaborar en la puesta a punto la estación terrena con antenas móviles.

- **Colaboración con el grupo EHAS.**

Dado que este proyecto se engloba dentro de un programa más amplio, no se puede considerar el presente PFC aislado del resto del trabajo del Grupo EHAS, para lo cual se requiere coordinación a dos niveles, por una parte con el resto de proyectos que se están desarrollando para los sistemas LEO, por otra parte se trata de conocer y apoyar el resto de proyectos en marcha. Este mecanismo de colaboración potencia la generación de conocimiento en las diferentes áreas que abarca el Programa.

## 1.5.- Interacción Con Otros Proyectos.

Dentro del sistema de comunicaciones por satélite en el programa EHAS se está desarrollando la tecnología que permita el intercambio de mensajes de correo electrónico entre el Centro Coordinador Internacional y el Centro de Salud Rural.

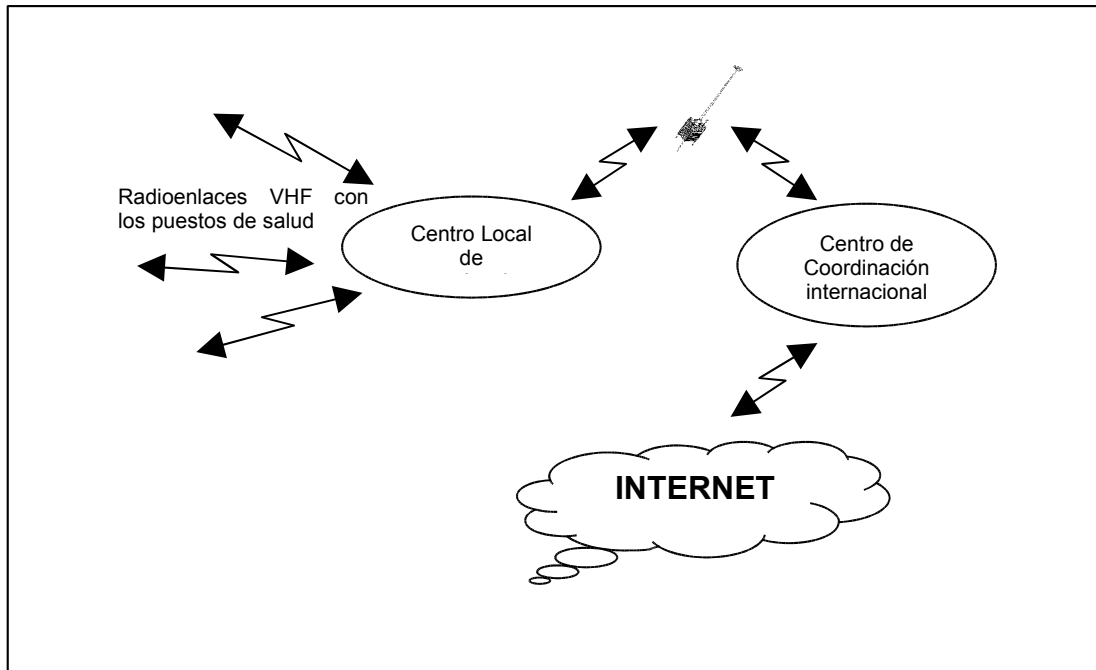


Fig. 2.5-1.5.1 Sistema de comunicaciones LEO.

Cuando un usuario en un puesto de salud necesita enviar un correo hacia un usuario remoto B (no dependiente del mismo Centro de Salud) en primer lugar será transmitido por el enlace VHF con su Centro de Salud. Posteriormente el Servidor de correo (Fig. 2.5-1.5.1) del Centro de Salud reconocerá que este mensaje es para el exterior de la red y lo pondrá en la cola para ser enviado en el primer pase del satélite.

Una vez en el satélite, cuando éste atraviese la zona de cobertura de la estación internacional se procederá a la descarga del fichero que contenga el mensaje que podrá ser enrutado a través de Internet al centro de salud del usuario B.

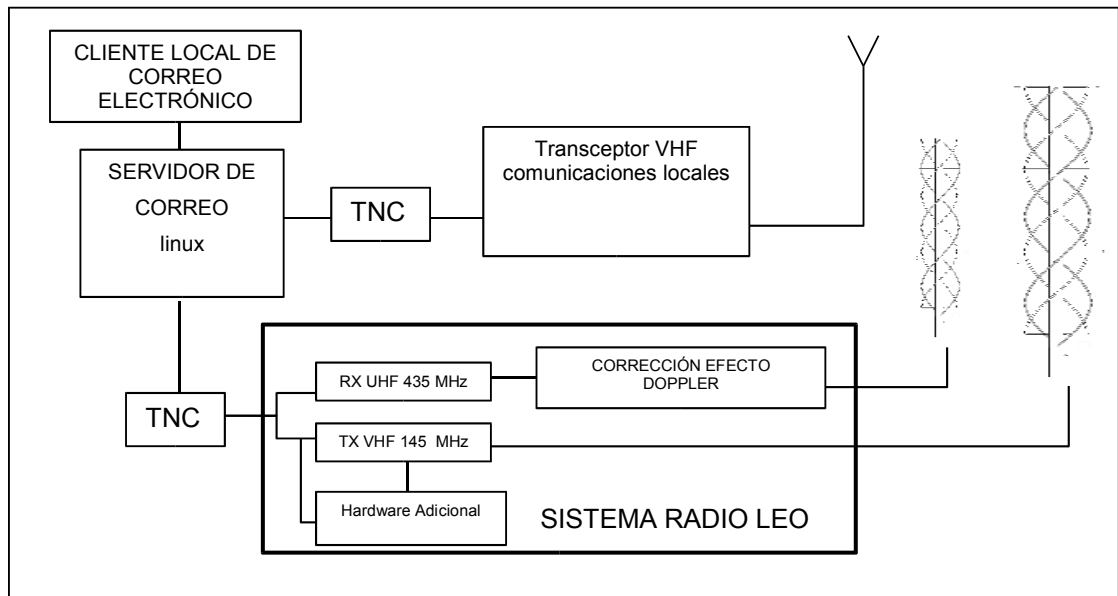


Fig. 2.5-1.5.2 Equipamiento del Centro de Salud con sistema LEO.

Para el desarrollo de la solución tecnológica LEO se requiere por tanto disponer de los siguientes elementos:

- En el Centro de Salud.
  - 🕒 **Desarrollo Software** del gateway LEO, formado por el conjunto de programas que realicen la gestión de correo electrónico, manteniendo las colas de mensajes para enrutar hacia el satélite así como implementar los protocolos de comunicaciones con el satélite.  
**Estado actual.** Está finalizada toda la parte del enrutamiento a través de los sistemas locales de VHF/UHF. Se han realizado los programas de acceso al satélite y gestión de ficheros, que han sido elaborados en un entorno Linux. Aún se requiere una integración de todo este software.
  - 🕒 **Desarrollo hardware** de los transceptores de bajo coste que realicen la modulación FSK a 9600 bps y corrijan el efecto Doppler.  
**Estado Actual.** Se han realizado con éxito las modificaciones necesarias en un transceptor de radio Yaesu para poder trabajar en comunicaciones por satélite.
  - 🕒 **Desarrollo de antenas fijas** es el objeto de este proyecto.
- En el Centro Coordinador Internacional.
  - 🕒 **Desarrollo Software.** En principio el gateway a utilizar será el mismo que se instalará en el Centro de Salud.

- ① **Desarrollo hardware.** Puesta a punto de la estación terrena que esté operativa permanentemente para establecer las comunicaciones con el satélite y poder recoger y enviar los correos de los centros de salud.

## **1.6.- Fases Del Proyecto.**

---

El proyecto se ha planteado en las siguientes fases.

- **Estudio de antenas cuadrafilares helicoidales.**

El objetivo es alcanzar un alto grado de conocimiento del funcionamiento de estas antenas que permita optimizar el diseño para la aplicación concreta en la que se va a utilizar.

- **Diseño y construcción de una antena receptora en UHF que sirva como prototipo para pruebas con satélites de radioaficionados.**

En el momento del inicio del proyecto en el GBT ya existe una estación de radio para comunicación con satélites. Se decidió comenzar las pruebas con satélites de radioaficionados (AMSAT) ya que se podía aprovechar la experiencia acumulada y extendida entre los grupos de radioaficionados en todo el mundo. El hecho de que la estación se encontrase en funcionamiento permite probar la primera antena nada más construirla. Este primer prototipo marca un punto de decisión para evaluación de la viabilidad del proyecto.

- **Puesta en marcha de la estación terrena.**

Con el objetivo de realizar pruebas de sustitución de antenas fijas y móviles se precisa documentar y probar los procedimientos para la puesta en marcha, aprovechando los trabajos anteriores.

- **Construcción de la antena transmisora en VHF.** La experiencia adquirida en el diseño y construcción de la antena receptora facilita la labor de construcción de la antena transmisora. Con las dos antenas construidas ya se pueden realizar pruebas de la viabilidad de las comunicaciones con el satélite y antenas fijas.

- **Pruebas de las antenas en la estación.** Se comprobará el correcto funcionamiento de la estación con las antenas de voluta.



## **2Comunicaciones por Satélites de Baja Órbita (LEO).**

## Capítulo 2.- Comunicaciones por Satélites de Baja Órbita (LEO).

### 2.1.- Satélites Digitales de Baja Órbita.

---

Del conjunto de órbitas elípticas posibles que puede ocupar un satélite se distinguen tres tipos:

- **Órbita Geoestacionaria**, se sitúan a una distancia de 36.000 Km, ocupando una órbita que acompaña el giro terrestre. Esto hace que vistos desde la superficie terrestre los satélites geoestacionarios siempre se sitúan en el mismo punto del cielo.
- **Órbita MEO.**
- **Los satélites de tipo LEO** (Low Earth Orbit) se sitúan en órbitas más cercanas a la tierra que las geoestacionarias, la velocidad de giro alrededor de la tierra ha de ser mayor que en el caso de los geoestacionarios por lo que estos satélites dan varias vueltas a la tierra cada día. La mayor proximidad a la tierra hace que se puedan simplificar los sistemas de comunicaciones en transmisión y recepción. Por otro lado los satélites LEO tienen la desventaja frente a los satélites geoestacionarios de no ser visibles de manera permanente.

La misión que tendrán los satélites LEO dentro de la red del programa EHAS es la de poder realizar el intercambio de ficheros entre el centro de salud y el resto de la red, para ello se precisa el uso de **satélites digitales**.

El sistema de comunicación empleado por los satélites digitales LEO, se basa en la transmisión en diferido de ficheros. Cuando un usuario de una estación terrena **(A)** quiere enviar un documento (Fig. 3.1-2.1.1) hacia otra estación **(B)**, en primer lugar la estación emisora codificará el mensaje y lo guarda en un fichero del ordenador a la espera de que el satélite cruce por la zona de visibilidad y se pueda establecer una comunicación. Durante el tiempo de la comunicación la estación terrena enviará el fichero al satélite, éste almacenará el mensaje en su sistema de memoria. El satélite continúa su trayectoria y cuando se encuentre sobre la zona de visibilidad de la estación receptora **(B)** se establece la comunicación que permite a la estación descargar el fichero del satélite en su ordenador.

Los enlaces ascendente y descendente se realizan en VHF y UHF respectivamente, utilizando una modulación FSK a 9.600 baudios.

Desde el año 1961 la asociación AMSAT (Amateur Satellite) reúne a radioaficionados que han venido desarrollando un programa espacial, desde entonces se han puesto en órbita 39 satélites, 17 de ellos están en funcionamiento.

Como ya se ha comentado anteriormente dentro del Programa EHAS existe una línea de investigación sobre los sistemas de comunicaciones de bajo coste a través de satélites LEO. Para ello se dispone de una estación terrena que permite la comunicación con algunos de los satélites digitales de radioaficionados. El objetivo es utilizar estos satélites en una primera fase de experimentación y desarrollo para posteriormente poder trasladar los resultados a las comunicaciones a través del satélite Healthsat II.

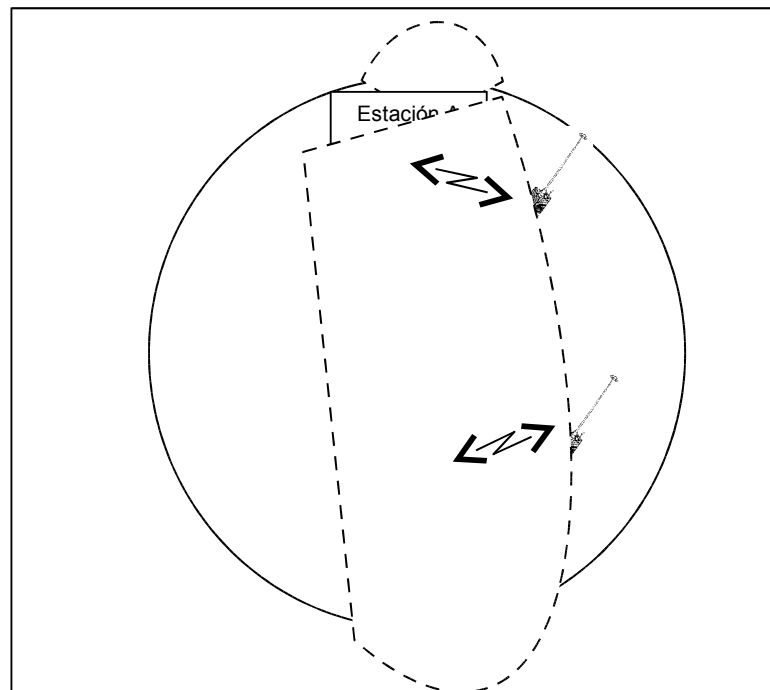


Fig. 3.1-2.1.1 Comunicaciones a través de satélites LEO

En la estación disponible para pruebas en el GBT se están utilizando tres satélites de AMSAT, el UO-22, el KO-25 y el TO-31. Todos ellos son de la serie microsats, de características similares. No obstante la mayoría de las pruebas de comunicación con satélites se han realizado para el satélite UoSAT-22 ya que éste es el que mejores resultados proporciona<sup>2</sup>. Más adelante se ofrece una descripción detallada de éste satélite.

<sup>2</sup> David Eliot, "Projet EHAS Connection a Internet Via Satellites LEO". 1999.

## 2.2.- Órbita del Satélite.

Tratando de la órbita del satélite nos planteamos el problema de determinar su posición en función del tiempo para encontrar su ubicación en el espacio en cualquier instante. Este problema es esencialmente el mismo que se plantea cuando estudiamos el movimiento de los planetas alrededor del sol, el movimiento de la luna alrededor de la tierra y en general cualquier objeto en movimiento en el espacio. La similitud radica en que todos los ejemplos citados son cuerpos celestes carentes de sistemas de propulsión y se ven afectados por el mismo tipo de fuerzas.

Kepler, en la formulación de sus leyes a principios del siglo XVII, estableció que las órbitas de los planetas en su movimiento giratorio describen elipses en uno de cuyos focos se encuentra el sol. Sin realizar un análisis en profundidad de los tipos de órbitas posibles, se puede simplemente decir que el conjunto de trayectorias posibles de los satélites es una cónica. La forma concreta de la órbita de un satélite de comunicaciones dependerá de la situación y la velocidad con la que se deposite en el espacio en el momento del lanzamiento. Destacan las órbitas de baja altura e inclinadas (LEO), y las geoestacionarias.

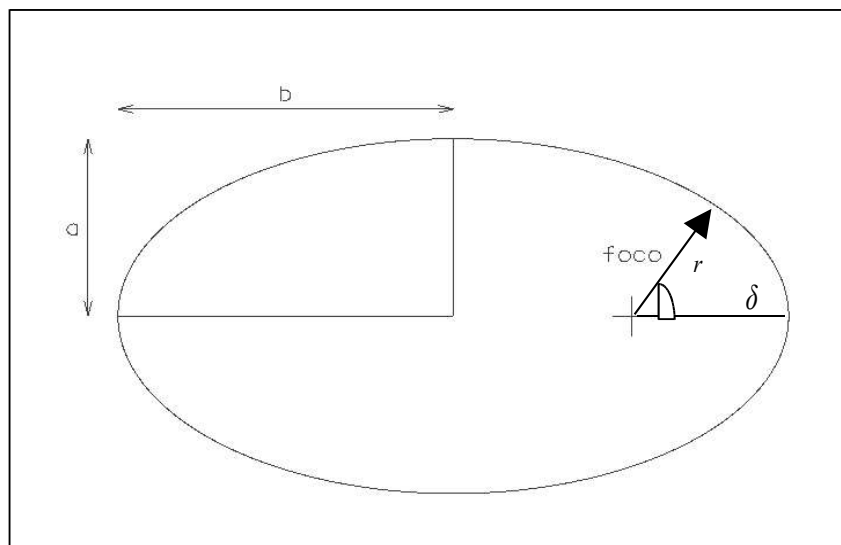


Fig. 3.2-2.2.1 Geometría de la elipse.

**1ª Ley de Kepler**

*“La órbita del satélite es plana y describe una elipse con un foco en el centro de masas de la tierra”*

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \delta}$$

donde,

$a$  radio mayor de la elipse

$e$  excentricidad de la elipse

$\delta$  ángulo del vector de posición del satélite respecto al centro de la tierra.

**2ª Ley de Kepler**

*“El radiovector que une el centro de la tierra con la posición del satélite barre áreas iguales en tiempos iguales”.*

Esto quiere decir que la velocidad del satélite no será constante en toda la órbita.

**3ª Ley de Kepler**

*“Los cuadrados de los períodos orbitales de dos satélites tienen la misma relación que los cubos de sus distancias medias al centro de la Tierra”.*

La siguiente ecuación define la relación entre el periodo de rotación y el eje mayor de la elipse:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{a^3}{K}}$$

siendo  $K$  la Constante de Kepler:

$$K = 3,99 \cdot 10^{14} \left( \frac{m}{s} \right)^3$$

De las leyes anteriores también se puede deducir la velocidad del satélite:

$$v = \sqrt{K \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

Además de las Leyes de Kepler para describir el movimiento de los cuerpos celestes son de aplicación las leyes de gravitación universal, producto de las cuales se puede calcular el periodo de rotación del satélite como:

$$T^2 = \frac{4 \cdot \pi^2}{GM} \cdot a^3$$

Donde  $M$  es la masa de la tierra,  $G$  la Constante de Gravitación Universal,  $a$  es el eje mayor de la elipse (Fig. 3.2-2.2.1).

## 2.3.- Parámetros Keplerianos

---

Las ecuaciones que determinan la posición de un satélite requieren la definición de un conjunto de parámetros que hacen posible su resolución. Para ello se han definido los Elementos Keplerianos. Estos elementos<sup>3</sup> nos van a permitir definir la elipse de la órbita, posteriormente podremos colocar la órbita sobre la tierra y por último el satélite dentro de la órbita.

### Época (TO) Epoch Time

El conjunto de elementos keplerianos se definen en un instante determinado. El elemento época es un número que identifica este instante.

### Inclinación Orbital (IO)

La elipse de la órbita se encuentra en un plano conocido como plano orbital que contiene el centro de la tierra. La Inclinación Orbital es el ángulo (entre 0° y 180°) que existe entre el plano orbital y el plano que contiene al ecuador, la intersección de ambos se llama línea de nodos. De manera que aquellas órbitas con inclinaciones cercanas a los 0° son las llamadas ecuatoriales y las que tiene una inclinación próxima a los 90° se llaman polares.

### RAAN. (Right Ascension of Ascending Node).

A veces se llama a este parámetro Longitud del Nodo Ascendente, dado que este parámetro determina por qué punto del ecuador cruza el satélite en la dirección Sur-Norte. Como la tierra gira alrededor de su eje, no se puede especificar este parámetro con respecto al sistema de coordenadas longitud-latitud, se utiliza en su lugar un sistema astronómico, y el parámetro RAAN se define como el ángulo (entre 0° y 360°) medido en el ecuador entre el plano orbital y el punto de corte del ecuador con la recta que une el centro de la Tierra con el centro del sol en el equinoccio vernal. El equinoccio vernal es el momento en el que el sol atraviesa el ecuador (sobre el 21 de Marzo).

### Ángulo del Perigeo. (ARGP)

Una vez situado el plano de la órbita es necesario colocar la elipse dentro de este plano, para ello se utiliza el ángulo del perigeo, que es el formado por la

---

<sup>3</sup> Franklin Antonio y otros. "Keplerian Elements Tutorial". Julio de 2000. Publicado en internet <http://www.amsat.org>

línea de nodos, que como vimos antes también pasa por el centro de la tierra y la línea que une el centro de la tierra y el punto donde el satélite se encuentra más cerca de la tierra.

### **Excentricidad.**

Como ya se ha comentado la órbita del satélite recorre una elipse. La excentricidad (  $e$  ) de la órbita, se define como:

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

siendo  $a$  y  $b$  los ejes mayor y menor de la elipse de la figura (Fig. 3.4-2.4.1).

### **Velocidad Orbital. (NO Mean Motion)**

Este parámetro se utiliza para definir la lejanía del satélite con respecto de la tierra, ya que existe una precisa relación ente la velocidad de la tierra y la distancia del satélite a la tierra. En el caso de las órbitas circulares la velocidad es constante. La velocidad orbital usualmente se expresa en el número de vueltas al día que el satélite da a la tierra, y suele estar ente 1 y 16.

### **Ángulo de Posición (Mean Anomay M0 o MA)**

Una vez que tenemos perfectamente definida la órbita del satélite lo único que falta es especificar en que punto de la misma se encuentra el satélite en un momento determinado. Este parámetro define el ángulo del satélite en el instante definido por el primer parámetro definido (Epoch time). Para tenerla referencia de este ángulo se define como  $0^\circ$  cuando el satélite se encuentra en el perigeo.



A modo de ejemplo se facilitan los parámetros keplerianos que permiten la determinación del satélite UO-22 obtenidos de la web de AMSAT ([www.amsat.org](http://www.amsat.org)).

```
SB KEPS @ AMSAT $ORB01053.O
Orbital Elements 01053.OSCAR

HR AMSAT ORBITAL ELEMENTS FOR OSCAR SATELLITES
FROM WA5QGD FORT WORTH, TX February 22, 2001
SEND SUBSCRIBE/UNSUBSCRIBE TO majordomo@amsat.org ONLY
BID: ORB01053.O
TO ALL RADIO AMATEURS BT
(..)

Satellite: UO-22
Catalog number: 21575
Epoch time: 01052.96860784
Element set: 0143
Inclination: 098.1335 deg
RA of node: 073.3811 deg
Eccentricity: 0.0007632
Arg of perigee: 159.7219 deg
Mean anomaly: 200.4274 deg
Mean motion: 14.38027750 rev/day
Decay rate: 3.62e-06 rev/day^2
```

Fig. 3.3-2.3.1 Elementos Keplerianos del UO-22 para el día 22 febrero de 2001

## 2.4.- Descripción del Satélite UoSAT - 5 (UoSAT- OSCAR 22)

---

El UO-22 es un satélite de 46 Kg de peso de la serie microsat (satélites de 10 a 100 Kg de peso). Este satélite fue lanzado al espacio desde el 17 de Julio de 1991. Se encuentra en una órbita casi circular a 780Km. (763.7 x 773.5 km - 98.42° de inclinación). En la siguiente figura (Fig. 3.4-2.4.1) se puede observar una fotografía del satélite antes de ser puesto en órbita.

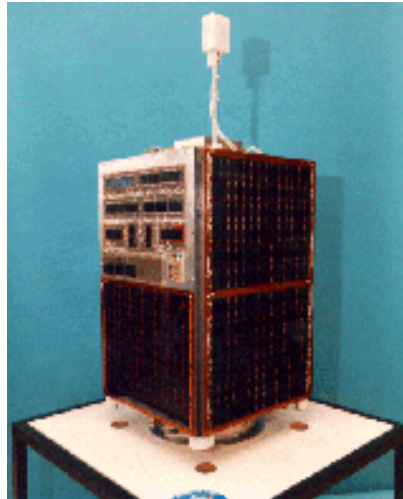


Fig. 3.4-2.4.1 Fotografía del Satélite UoSAT - OSCAR 22

El UO-22 tiene una potencia de emisión que puede ser conmutada entre 1,5 y 4 vatios, dispone de dos sistemas de antenas diferenciados para el transmisor y receptor:

- La transmisión se realiza en UHF a 435,120 MHz. Para lo que se utiliza un monopolo (antena superior de la Fig. 3.4-2.4.2). Al que se le puede asignar una ganancia de 3dB.
- Para la recepción en VHF a 145.900 MHz se utiliza un conjunto de 4 monopolos (en la parte inferior de la Fig. 3.4-2.4.2) de  $3\lambda/4$  con una impedancia de radiación de  $28\Omega$  cada uno de ellos.

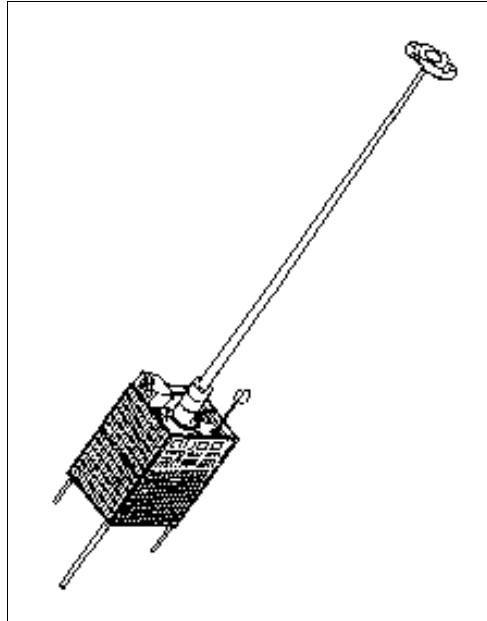


Fig. 3.4-2.4.2 Dibujo del Satélite UoSAT - OSCAR 22

El siguiente esquema nos da una idea de los diferentes componentes del satélite,

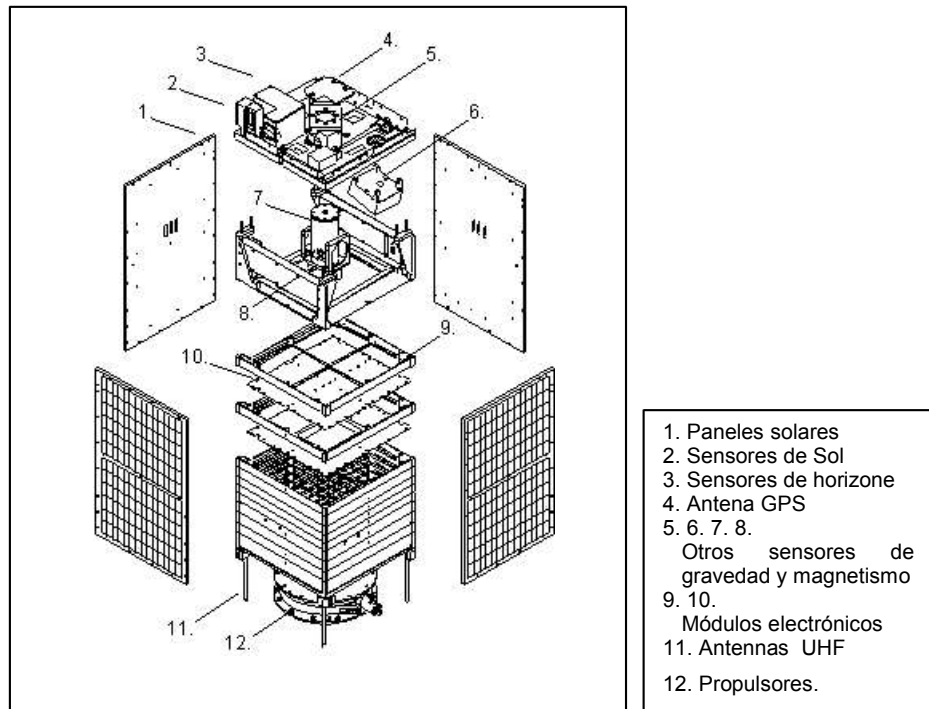


Fig. 3.4-2.4.3 Módulos del satélite.

## 2.5.- Geometría del Radioenlace.

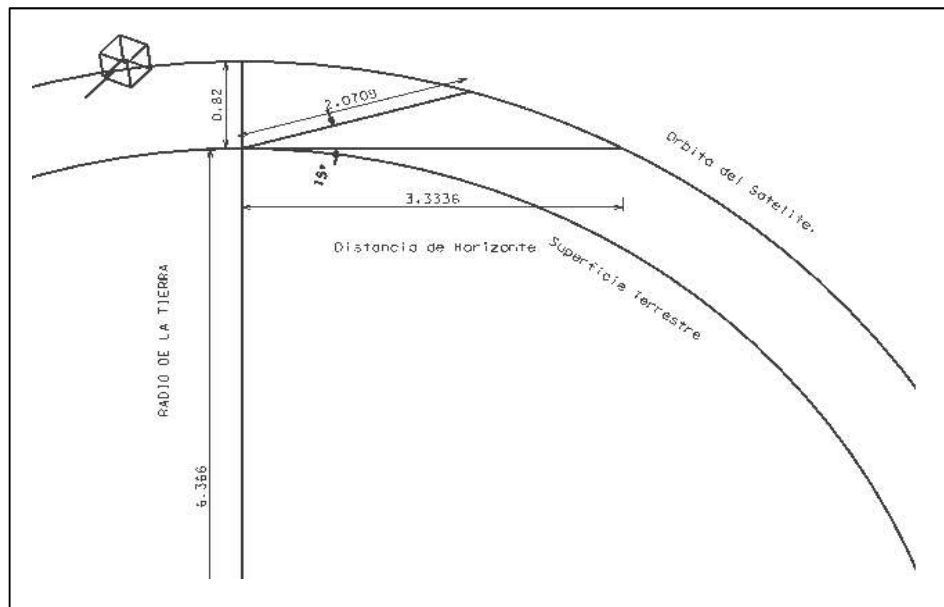
Denominamos **pase del satélite** cada una de las ocurrencias del avistamiento radioeléctrico del satélite desde la estación terrena. Dado que como se ha comentado anteriormente la órbita que describe el satélite es inclinada, muy pocos pases del satélite pasarán exactamente por la vertical de la estación terrena. Estos pases de máxima elevación son los que resultarán mejores ya que por un lado las pérdidas del enlace por distancia se harán menores y por otro lado disfrutaremos de un mayor tiempo hábil para la comunicación.

Fig. 3.5-2.5.1 Geometría del radioenlace de un satélite a 820 Km (distancias en miles de Km).

Suponiendo un pase del radioenlace en el que el momento de mayor aproximación sea sobre la vertical de la antena, podemos tener el escenario representado (Fig. 3.5-2.5.1)

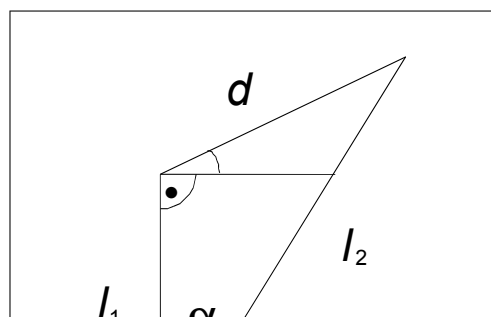
Como se aprecia en la figura la distancia al satélite aumenta considerablemente al alejarnos de la vertical. Variando desde los 820 Km a los 3.333 Km cuando el satélite se encuentra sobre la horizontal.

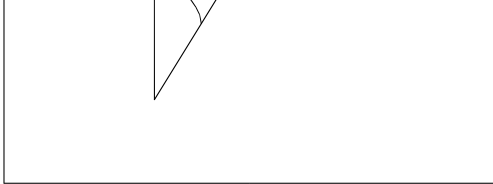
Definimos la **elevación del satélite** como el ángulo de apuntamiento hacia el mismo medido desde la dirección horizontal. Aunque teóricamente se podría considerar el satélite "visible" para valores superiores a 0°, la realidad es que la visibilidad radioeléctrica comienza



cuando el satélite ha superado una elevación de unos 15°, mayor aún cuando nos encontramos con cadenas montañosas en el horizonte.

Suponiendo una órbita circular podemos calcular fácilmente la distancia al satélite en función del ángulo de elevación. Para ello basta con trazar el triángulo formado por el satélite, el centro de la tierra y el punto de observación (Fig. 3.5-2.5.2)





es por Satélites de Baja Órbita (LEO).

A partir de esta construcción geométrica se puede calcular la distancia al satélite en función del ángulo  $\alpha$  como:

$$d = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha}$$

Siendo  $l_1$  el radio de la tierra,  $l_2$  el radio de la órbita y  $d$  la distancia al satélite desde el punto de observación.

Realizando las transformaciones pertinentes se puede calcular la distancia al punto de observación en función de la elevación como se aprecia en la Tabla 3.5-2.5.1, donde se ha tomado la distancia del UO-22 sobre la tierra, esto es 780 Km.

Ángulo de Elevación (°)	Distancia al satélite (Km)
0	3246
5	2745
10	2304
15	1979
20	1715
25	1510
30	1362
40	1134
45	1052
50	977
55	927
60	888
65	849
75	804
80	791
85	783
90	780

*Tabla 3.5-2.5.1 Distancia al satélite en función del ángulo de elevación.*

## 2.6.- Pérdidas de Espacio Libre

Podemos calcular la diferencia entre las pérdidas de espacio libre para ángulos diferentes. Esto nos permitiría caracterizar el diagrama de radiación necesario para compensar las diferentes pérdidas por distancia que obtenemos en elevaciones diferentes.

Como las pérdidas en espacio ( $L$ ) libre se pueden expresar como:

$$l_{bf} = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2$$

Que expresado en unidades logarítmicas es:

$$L = 32,4 + 20 \cdot \log f + 20 \log r$$

Siendo  $r$  la distancia en kilómetros y  $f$  la frecuencia en MHz. Podemos realizar la siguiente tabla de los valores de las pérdidas de espacio libre.

Ángulo de Elevación (°)	Distancia al satélite (Km)	Pérdidas de espacio libre a 435 MHz	Pérdidas de espacio libre a 147 MHz
0	3246	155,4	146,0
5	2745	153,9	144,5
10	2304	152,4	143,0
15	1979	151,1	141,7
20	1715	149,9	140,4
25	1510	148,7	139,3
30	1362	147,9	138,4
40	1134	146,3	136,8
45	1052	145,6	136,2
50	977	145,0	135,5
55	927	144,5	135,1
60	888	144,1	134,7
65	849	143,7	134,3
75	804	143,3	133,8
80	791	143,1	133,7
85	783	143,0	133,6
90	780	143,0	133,6

Tabla 3.6-2.6.1 Pérdidas de espacio libre en función de la elevación.

Esta diferencia de pérdidas se intentará compensar dotando a la antena con un diagrama de radiación que proporcione una mayor ganancia para elevaciones de 30 o 40 grados.

## 2.7.- La Estación Terrena del GBT.

---

La actual estación disponible en el Grupo de Bioingeniería y Telemedicina (GBT) se compone de los elementos mostrados en el diagrama (Fig. 3.7-2.7.1).

### 2.7.1.- Ordenador de la estación LEO

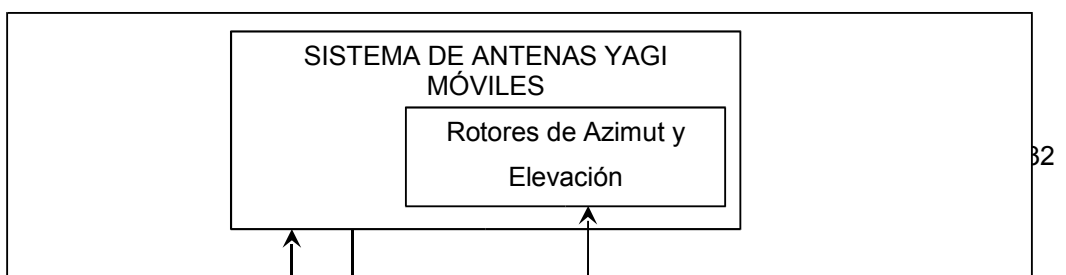
El funcionamiento de toda la estación se controla mediante un ordenador tipo PC. En este ordenador reside una aplicación en entorno Windows conocida como WISP, este programa tiene tres tareas fundamentales:

- Seguimiento del Satélite. Dispone de un programa de cálculo que le permite determinar la posición de varios satélites. Y genera las órdenes para el movimiento de los rotores de seguimiento.
- Manejo de ficheros. Se dispone de una aplicación que controla el intercambio de ficheros entre la estación y el satélite. Para ello se mantiene información del sistema de ficheros a bordo del satélite, así como el estado de aquellos que se ha iniciado la descarga pero no se ha podido completar y será necesario hacerlo en el siguiente pase.
- Control del transceptor radio. Cuando se va a iniciar un pase del satélite pone en funcionamiento el transceptor de radio, informando de las frecuencias de subida y bajada así como corrigiendo el desplazamiento doppler.

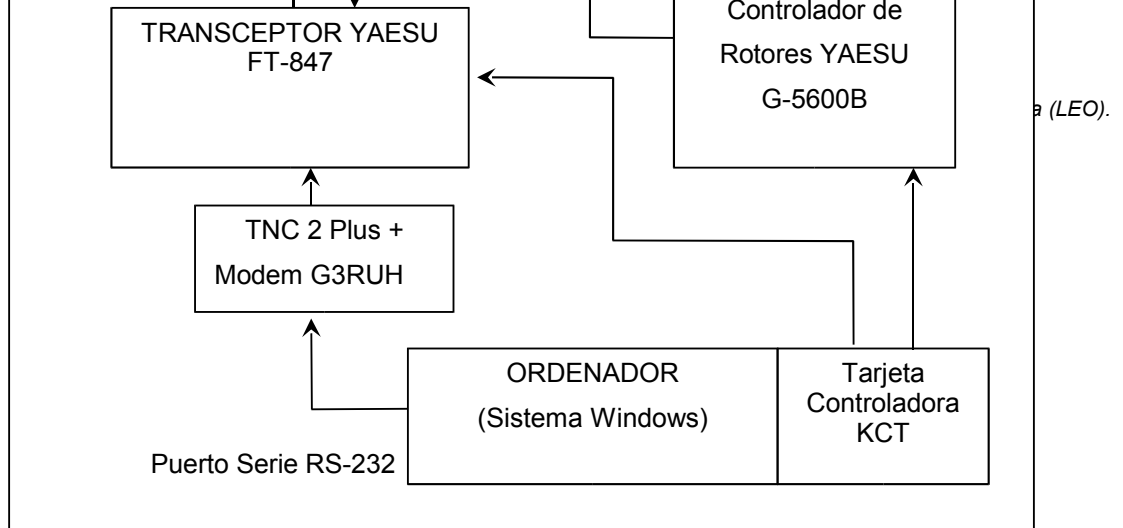
Además del programa WiSP el ordenador que realiza el control de la estación dispone de una tarjeta especial llamada KCT. (Kansas City Tracker)

Esta tarjeta permite las comunicaciones con:

- el transceptor de radio, al que informa del comienzo y final de la comunicación dual (transmisión y recepción continua) así como de las frecuencias de transmisión y recepción.
- El sistema de rotores, comunicando el acimut y elevación del satélite en cada momento del pase.







### 2.7.2.- TNC 2 Plus.

La comunicación entre la estación terrena y el satélite se realiza a través del protocolo AX.25. La tarjeta TNC (Terminal Node Controller) realiza las funciones HDLC (High Level Data Link Control) de este protocolo. El ordenador se comunica con la TNC a través de un cable RS232.

La señal FSK en banda base se modula con un módem específico, La TNC 2 + de la estación del GBT incluye un módem del modelo G3RUH.

En el punto de interfaz entre la TNC y el transceptor se encuentran las señales de TX y RX en banda base, igualmente la TNC proporciona al transceptor una señal de activación de PTT. Además la TNC ofrece una señal adicional para el receptor de Control Automático de Frecuencia (AFC) que no se usa en la configuración que se está describiendo.

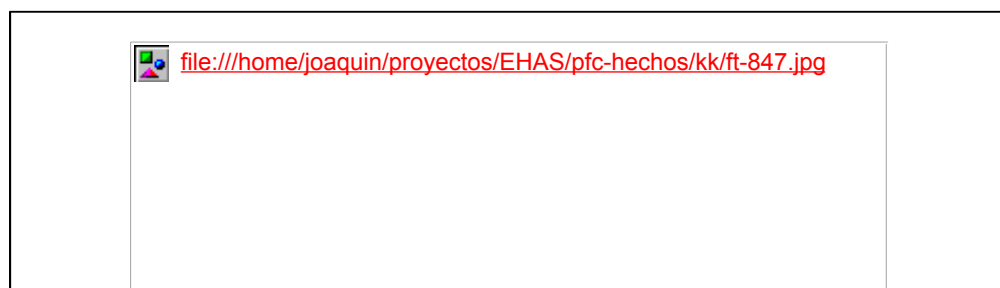
### 2.7.3.- Sistema de antenas.

La estación está dotada de dos antenas transmisora y receptora formadas a su vez cada una de ellas por otras dos antenas yagi para conferir al conjunto la polarización circular requerida. Cada una de estas dos antenas está formada por 9 elementos en el caso de la transmisora (VHF) y 19 elementos de receptora (UHF).

Para alimentar estos conjuntos de antenas se utilizan dos divisores sumadores TONNA 29202, que realizan la adaptación de impedancias.

### 2.7.4.- Transceptor VHF/UHF para el satélite.

La estación dispone de un transceptor full-duplex (Yaeshu FT-847) especialmente diseñado para su utilización por radioaficionados ya que abarca toda la banda y permite recepción y transmisión simultanea en bandas distintas. En los anexos de la memoria se proporcionan las características técnicas.



*Fig. 3.7-2.7.2 Transceptor de la Estación Terrena*

### 2.7.5.- Controlador de Rotores.

Para realizar el seguimiento físico del satélite se utiliza un sistema de rotores que permite el giro en acimut y elevación. El sistema presentado en la figura (Fig. 3.7-2.7.3) se compone de dos elementos, los rotores propiamente dichos y el controlador. El ordenador de la estación LEO, a través de la tarjeta KCT, proporciona las órdenes al controlador para realizar el apuntamiento de las antenas hacia el satélite.



*Fig. 3.7-2.7.3 Sistema de Rotores de la Estación*

## **2.8.- Configuración futura de la Estación LEO EHAS.**

---

El objetivo de los sistemas LEO para el programa EHAS es la implantación de estaciones terrenas en entornos rurales, usualmente en Centros de Salud. La configuración de la estación terrena descrita en el apartado anterior presenta varios inconvenientes para su uso en un entorno rural bajo el prisma de las tecnologías apropiadas y de bajo coste, algunos de estos inconvenientes son los siguientes:

- Complejidad Técnica. La estación en esta configuración resulta enormemente compleja, necesitando de técnicos elevadamente cualificados tanto para el montaje y puesta en funcionamiento como para las labores de operación y mantenimiento. Esta complejidad existe tanto desde un punto de vista físico (rotores y sistema de antenas móviles) como la configuración del software, requiriendo además la actualización periódica de los elementos keplerianos para poder realizar un correcto seguimiento.
- Falta de robustez ya que se requiere una elevada dedicación para mantener a punto la estación.
- Elevado precio. El coste total de la estación es lógicamente proporcional a la complejidad técnica aludida anteriormente,

Todas estas razones apuntan hacia una configuración de la estación terrena que se plantea en torno al esquema de la figura (Fig. 3.8-2.8.1).

La simplificación de esta estación con respecto a la anterior viene dada por la supresión del seguimiento físico del satélite durante el periodo del pase del satélite. La corrección del efecto doppler que en la otra configuración de la estación se veía resuelto a través del programa de seguimiento que proporciona a la radio los valores corregidos de la frecuencia de la portadora en sentido descendente se ha de realizar de forma automática.

El funcionamiento de esta nueva estación es el siguiente:

La estación se encuentra normalmente a la escucha a la espera de recibir señal de portadora procedente del satélite. En este momento la frecuencia del oscilador del receptor debe estar corregida para compensar el efecto doppler. Una vez que el receptor de la estación reciba la portadora estable pondrá en marcha el resto de la estación y podrá empezar a intercambiar tramas de datos con el satélite siguiendo el protocolo AX.25. Esta tarea la ha de realizar el ordenador del Gateway LEO, que dispondrá de una TNC que como ya se ha explicado genera la señal moduladora y realiza las funciones de control de enlace de datos.

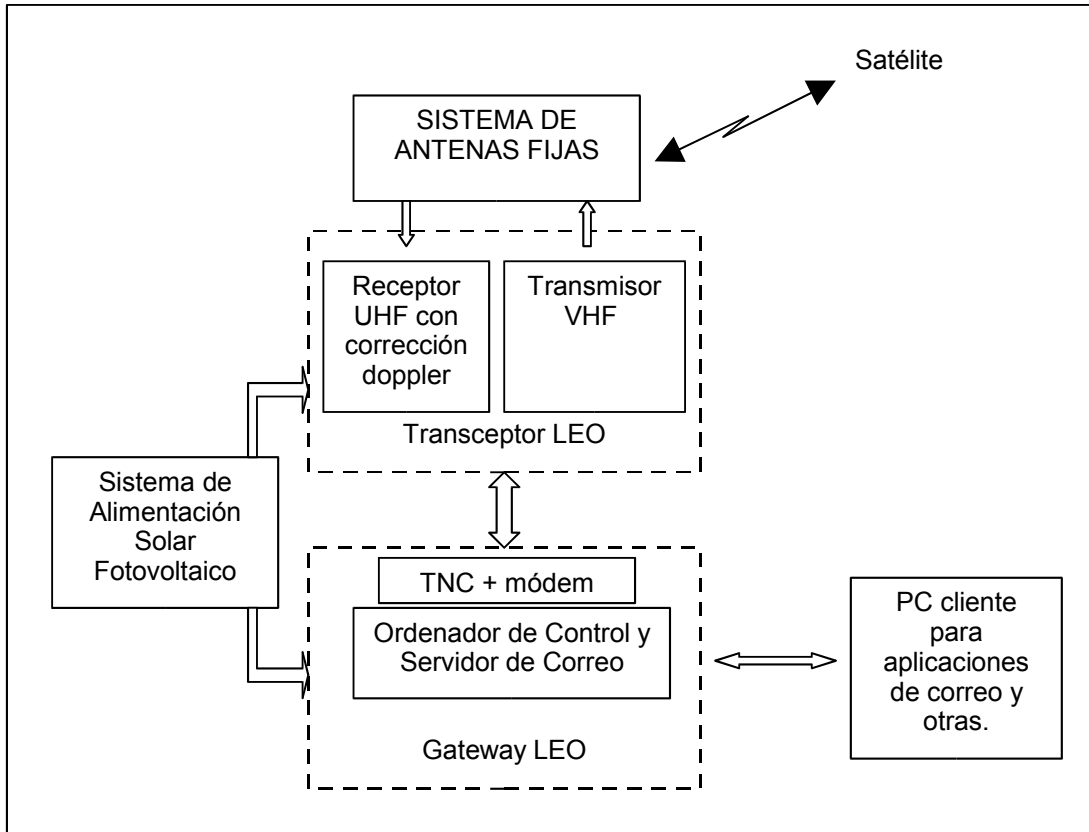


Fig. 3.8-2.8.1 Configuración en Desarrollo de la Estación LEO EHAS

## 2.9.- Efecto Doppler.

La velocidad a la que se desplazan los satélites con respecto a la tierra hace que resulte necesario considerar el efecto Doppler, para lo que se presenta a continuación el cálculo del mismo para el satélite UO-22.

El número de vueltas que el satélite da a la tierra al día es de 14,37, esto es que necesita 1,67 horas para completar una vuelta, es el llamado período de rotación.

Al tratarse de una órbita de excentricidad próxima a 0 la distancia al apogeo coincide con el eje mayor de la elipse y el radio de giro.

Aplicando la tercera ley de Kepler, podemos despejar  $a$ , y de esta forma obtener después la distancia del satélite a la estación terrena:

$$a = \sqrt[3]{\frac{T^2 \cdot K}{4\pi^2}}$$

Tomando:

$$T = 1,67 * 3.600 = 6.008 \text{ s}$$

$$K = 3,99 \cdot 10^{14} \left( \frac{m}{s} \right)^3$$

Obtenemos:

$$a = 7.146 \text{ Km}$$

Para calcular la distancia al satélite desde la superficie terrestre

$$a = r_e + d$$

Siendo  $r_e = 6.377 \text{ Km}$  es el radio de la tierra

$$d \approx 770 \text{ Km}$$

Por último, podemos obtener la velocidad lineal del satélite, que la aproximamos como constante en toda la órbita:

$$v = \sqrt{K \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

$$v \approx 7.472 \frac{m}{s}$$

La velocidad angular

$$\eta = \frac{2\pi}{T}$$

$$T = 6.008 s$$

$$\eta = 1,04 \cdot 10^{-3} \frac{rad}{s}$$

Suponiendo que el satélite emitiese un tono de frecuencia constante

$$x = A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

La señal afectada por el efecto Doppler se podrá expresar como:

$$x' = A' \cos(\omega_0 t \pm \omega_d t - )$$

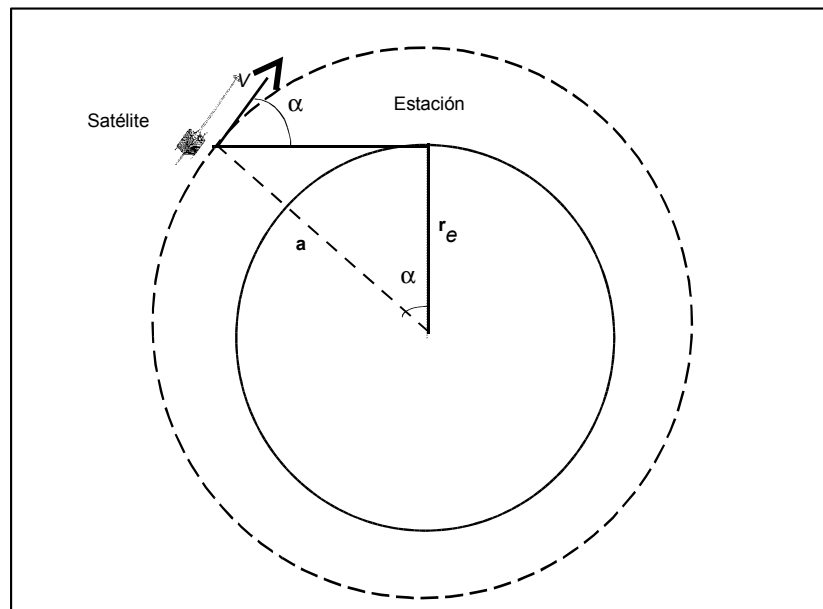
Que también se puede expresar de la siguiente manera:

$$x' = A' \cos(2\pi \cdot f_0 t \pm 2\pi \cdot f_d t - )$$

En esta expresión  $f_d$  es la frecuencia doppler. Conociendo la velocidad con la que se acerca el móvil al receptor se puede expresar como:

$$f_d = \frac{v_l}{\lambda}$$

La componente de la velocidad que va a afectar produciendo efecto Doppler es la proyección de la velocidad sobre la línea que une el satélite y la estación terrena.



$$|\vec{v}_R| = |\vec{v}| \cdot \cos \alpha$$

En definitiva podemos expresar la frecuencia de la señal recibida como:

$$f_R = f_0 \pm \frac{f_0}{c} v \cdot \cos \alpha$$

Para el satélite UO-22 el ángulo  $\alpha$  máximo será cuando:

$$\cos \alpha = \frac{r_e}{a}$$

$$\alpha = 26^\circ$$

Tomando:

$$v = 7.472 \frac{m}{s}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Para el enlace descendente:

$$f_0 = 435 \text{ MHz}$$

Esto hace una frecuencia doppler máxima:

$$f_{d_{max}} = 9.738 \text{ Hz}$$

Para el enlace ascendente:

$$f_0 = 146 \text{ MHz}$$

Esto hace una frecuencia doppler máxima:

$$f_{d_{max}} = 3.268 \text{ Hz}$$

Como conclusión el efecto doppler máximo que se va a producir no va a pasar de los 10KHz en el enlace descendente y de los 3,5 KHz en el ascendente. Estas dos variaciones de la frecuencia central de la señal recibida habrán de ser tenidas en cuenta para el cálculo del ancho de banda de las antenas.

## 2.10.- Protocolos de Comunicaciones

La comunicación entre el satélite y las estaciones terrenas se establece a través de un conjunto de protocolos denominado PACSAT protocol suite. Las capas física y de enlace del Modelo de Referencia ISO siguen el protocolo AX.25. Establecida la comunicación a través del protocolo AX.25 existen dos modos de funcionamiento:

- Modo Difusión (PACSAT Broadcast Protocol), que se utiliza para retransmitir ficheros que pueden ser de interés para más de una estación de terrestre.
- Modo Servidor de ficheros (File Transfer Level 0), en el que se establece una conexión entre la estación terrena y el satélite, de manera que la primera le solicita información al satélite o solicita al satélite la recepción de un fichero.

### 2.10.1.- Protocolo AX.25

El protocolo AX.25 define la capa HDLC (High-level Data Link Control) esto es el control de alto nivel del enlace de datos.

El protocolo AX.25 también define el interfaz físico, en nuestro caso el nivel físico es una señal modulada en FSK a 9.600 bps. Esta señal se modula posteriormente con una portadora de 435,120 MHz en el enlace descendente y 145,900 MHz en el enlace ascendente.

### Trama AX.25

La trama AX.25 se compone de los siguientes campos:

Nombre del campo	Longitud (octetos)	Explicación.
FLAG	1	La bandera está compuesta siempre por la misma secuencia de Bits 01111110. Nunca más se repiten 6 unos seguidos.
DIRECCIÓN	14 a 70	Son <b>siete octetos por cada dirección</b> contenida, al menos tiene el origen y el destino, pero puede contener la dirección de 8 "digipeaters" adicionales.
CONTROL	1	Indica el <b>tipo de trama</b> de que se trata.
PID	0 ó 1	"Protocol Identifier" solamente está presente en algunas tramas (Tipos I, UI) e indica el tipo de RED
INFORMACIÓN	Hasta 256	Este es el campo de información de las tramas tipo I, UI ó FRMR.
FCS	2	"Frame Check Sequence"
FLAG	1	El flag de fin de una trama puede usarse para el inicio de la siguiente.

Por lo tanto una trama de información tendrá 276 octetos (2,2K) si utiliza toda la capacidad de información y dos direcciones.

El octeto de control que informa del tipo de trama puede tomar los valores que se indican en la siguiente tabla:



Tipo de trama			Bit							
			7	6	5	4	3	2	1	0
Trama I			N(R)		P		N(S)		0	
Trama S	Receiver Ready	RR	N(R)		P/F	0	0	0	1	
	Receiver Not Ready	RNR	N(R)		P/F	0	1	0	1	
	Reject	REJ	N(R)		P/F	1	0	0	1	
Trama U	Set SABM Mode	SABM	0	0	1	P	1	1	1	1
	Disconnect	DISC	0	1	0	P	0	0	1	1
	Disconnected	DM	0	0	0	F	1	1	1	1
	Unnumbered ACK	UA	0	1	1	F	0	0	1	1
	Frame Reject	FRMR	1	0	0	F	0	1	1	1
	Unnumbered Info	UI	0	0	0	P/F	0	0	1	1

- ❶ Las tramas de tipo I envían información, cada trama va numerada por los números N(S) de secuencia en emisión y N(R) de secuencia en recepción.
- ❷ Las tramas de tipo S son para la supervisión, RR indica que todas tramas han sido recibidas, RNR que todas han sido recibidas pero no se pueden transmitir nuevas y REJ pide la repetición a partir de N(R).
- ❸ Las tramas de información no numerada se utilizan para el establecimiento y la liberalización de la conexión. Una trama SABM inicia la conexión, si es respondida con UA la conexión se puede establecer, al finalizar la transmisión la estación enviará un DISC al que se responde con DM.

Las tramas UI permiten enviar información sin que esté establecida la conexión, esto será especialmente útil en el modo de Broadcasting.

Por tanto AX.25 permite dos modos de funcionamiento uno conectado y otro no conectado. Cuando se utiliza el modo conectado se envían tramas consecutivas numeradas y si alguna se ha recibido con error se descarta y se solicita de nuevo la transmisión. En modo desconectado se transmiten tramas sin numerar, la única protección es el CRC (Cyclic Redundancy Check) proporcionado por el campo FCS que llevan todas las tramas.

## 2.10.2.- PACSAT Broadcast Protocol.

El tipo de datos que el satélite va a transmitir se puede agrupar en los siguientes:

- 1) Mensajes, pueden ser mensajes personales o para ser retransmitidos a otros destinatarios en estaciones terrenas.

- 2) Información de telemetría, en tiempo real (temperatura interna, potencia entregada por los paneles solares...) o almacenada (imágenes y otros ficheros log del satélite).
- 3) Boletines, información de interés general, como pueden ser previsiones de órbitas, Noticias de AMSAT...
- 4) Mensajes Punto-Multipunto. Son generados por un usuario hacia todos los demás o hacia un grupo de usuarios

PACSAT Broadcast Protocol se utiliza para la retransmisión de información de los grupos 2 al 4, utilizando tramas UI (Unnumbered Information). Este modo de trabajo tiene la desventaja de que cuando se produce un error en una trama la estación terrena irá dejando "huecos" en la recepción de un fichero. Estos huecos se podrán rellenar en sucesivas retransmisiones en modo Broadcast o bajo demanda de la estación terrena.

Al objeto de poder mantener el estado de los ficheros recibidos dentro del campo de información de cada trama se envía una "cabecera de trama" (Frame Header):

```
<flags><file_id><file_type><offset><data><crc>
```

Además la primera trama de cada fichero incluye una cabecera de fichero con información sobre el tamaño, la fecha de creación, el nombre completo del fichero...

### 2.10.3.- PACSAT FTLO (File Transfer Level 0)

En modo transferencia de ficheros se utiliza una filosofía de cliente - servidor, en la que el satélite ejerce obviamente las tareas de servidor de todas las estaciones terrenas que lo soliciten. Para ello se establecen conexiones full - duplex que proporcionan una transferencia de información se realiza simultáneamente en el sentido ascendente y descendente.

El protocolo FTLO utiliza paquetes formados por 2 bytes de cabecera y entre 0 y 2047 bytes de datos. Los 16 bits de la cabecera informan del tamaño del paquete (11 bits) y el tipo de paquete a transmitir:

0	DATA
1	DATA_END
2	LOGIN_RESP
3	UPLOAD_CMD
4	UL_GO_RESP
5	UL_ERROR_RESP
6	UL_ACK_RESP
7	UL_NAK_RESP
8	DOWNLOAD_CMD
9	DL_ERROR_RESP
10	DL_ABORTED_RESP
11	DL_COMPLETED_RESP
12	DL_ACK_CMD
13	DL_NAK_CMD
14	DIR_SHORT_CMD
15	DIR_LONG_CMD
16	SELECT_CMD
17	SELECT_RESP

*Tabla 3.10-2.10.1 Tipos de paquetes transmitidos en FTL0.*

En cuanto se ha establecido la conexión AX.25 el servidor envía un paquete de tipo LOGIN\_RESP.

A partir de este momento puede comenzar el intercambio de ficheros entre la estación y el satélite, para descargar un fichero el cliente envía DOWNLOAD\_CMD y el servidor si es posible comienza el envío de datos.

El funcionamiento del software del protocolo FTL0 está basado en dos máquinas de estados finitos, una para la carga y otra para la descarga de ficheros. Estas máquinas no son exactamente iguales en el lado cliente y servidor.

3Cálculo del Radioenlace.

# Capítulo 3.- Cálculo del Radioenlace.

## 3.1.- Balance del Radioenlace.

---

Para realizar el cálculo del balance del radioenlace tendremos en cuenta dos cosas:

- La señal recibida ha de ser superior a la sensibilidad del receptor.
- La relación Señal-Ruido tiene que ser mayor a la mínima necesaria para la correcta demodulación de la señal FSK.

La potencia de la señal recibida será igual a la potencia transmitida menos las pérdidas que se producen en todo el trayecto.

$$P_S ( dB ) = P_T - Pérdidas$$

Una vez conocido el nivel de la señal a la salida de la antena receptora se evalúa el nivel de ruido que se encuentra en este punto y se calcula la relación entre el nivel de la señal y el ruido:

$$S/N ( dB ) = P_S - P_N$$

Si esta relación se encuentra por encima de un determinado valor umbral el balance será positivo y por tanto la comunicación radioeléctrica será posible.

Para el cálculo de la potencia de ruido se necesita conocer el ancho de banda y el factor de ruido evaluado en el punto en el que se realiza el cálculo, empezamos por tanto por esta evaluación.

Dado que las pérdidas de espacio libre son 9,5 dB superiores en la frecuencia del enlace descendente (435 MHz) que en el enlace ascendente (146 MHz), se realizará la evaluación en UHF.

### 3.1.1.- Cálculo del Ancho de banda.

El ancho de banda según la regla de Carson:

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m)$$

La frecuencia máxima de la señal en banda base:

$$f_m = \frac{1}{2T_0}$$

La señal binaria en banda base es 9.600 bps. por tanto:

$$T_0 = \frac{1}{9.600} \Rightarrow f_m = 4799 \text{ Hz}$$

La desviación de frecuencia que se suele utilizar para la modulación FSK es:

$$\Delta f = 5 \text{ KHz}$$

Por tanto

$$B = 19,5 \text{ KHz}$$

Este es el ancho de banda necesario para la transmisión de señal FSK. Dado que la canalización utilizada es de 25KHz en algunos cálculos utilizaremos este valor como el ancho de banda. Para el cálculo del ancho de banda necesario de la antena hay que contar con el efecto dopler (+-10 KHz en el enlace descendente).

### 3.1.2.- Relación Señal Ruido y Factor de Ruido del Receptor.

En primer lugar necesitamos conocer el factor de ruido del receptor de la estación terrena. Dado que en el conjunto de características no se ofrece este dato intentaremos aproximarlos a partir de las medidas que si disponemos. En concreto se proporciona el dato de la sensibilidad a 430 Mz en FM, siendo ésta de  $0,16 \mu V$  para obtener una SINAD a la salida de 12 dB.

La relación SINAD se define como <sup>4</sup>:

$$SINAD = \frac{S+N+D}{N+D}$$

Siendo  $S$  la potencia de la señal demodulada,  $N$  y  $D$  la potencia del ruido y distorsión respectivamente que acompaña a la señal demodulada. Para determinar la SINAD se aplica al receptor una señal modulada al 60% por un tono de 1KHz. Se mide a la salida la potencia de la señal demodulada obteniéndose la medida de  $S+N+D$ . Posteriormente se introduce la señal demodulada en un filtro de ranura que extrae el tono de 1KHz midiendo la potencia de  $N+D$ .

Con un valor de SINAD de 12dB podemos asimilar la SINAD por la relación Señal - Ruido ( $S/N$ ):

$$\frac{S+N+D}{N+D} \simeq \frac{S}{N}$$

La siguiente expresión relaciona la  $S/N$  a la salida del demodulador con la relación portadora - ruido de la entrada.

$$\left(\frac{s}{n}\right) = \frac{3}{2} \left(\frac{\Delta f}{f_m}\right)^2 \frac{B}{f_m} \left(\frac{c}{n}\right)$$

Como ya se vio en el apartado anterior

$$f_m = 4.799 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = 5 \text{ KHz}$$

$$B = 19,5 \text{ KHz}$$

Con esto obtendríamos una relación  $C/N$  de 3,8dB.

<sup>4</sup> J.M Hernando Rábanos, "Transmisión por Radio". Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A. 1993.

En realidad debido al efecto umbral de FM resulta imposible demodular con relaciones  $C/N$  por debajo de 11 dB, por lo tanto tomaremos éste último valor de la relación portadora ruido como el necesario a la entrada del receptor.

$$\frac{C}{N} = 11 \text{ dB}$$

Estamos ahora en condiciones de evaluar el factor de ruido equivalente del sistema a partir del dato proporcionado de sensibilidad,

$$s = 0.16 \mu V$$

Expresándolo en unidades de potencia, teniendo en cuenta que el receptor presenta una impedancia de  $50 \Omega$

$$S(\text{ dBu }) \equiv 107 + S(\text{ dBm })$$

$$S \equiv -119 \text{ dBm}$$

Para éste valor mínimo de señal el ruido será:

$$N = -119 - 11 = -130 \text{ dBm}$$

$$N = kT_o B F_{\text{radio}}$$

$$N(\text{ dBm }) = 10 \cdot \log(kT_o) + F_{\text{radio}}(\text{ dB }) + 10 \cdot \log B$$

Con los valores de:

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J } / ^\circ K$$

$$T_o = 293 \text{ } ^\circ K$$

$$B = 19.5 \text{ KHz}$$

Finalmente podemos tomar un valor de la figura de ruido:

$$F_{\text{radio}}(\text{ dB }) \approx 1 \text{ dB}$$



### 3.1.3.- Cálculo del factor de ruido de la estación terrena.

La estación satélites LEO que se dispone en el GBT se compone de:

- La antena, en principio suponemos una ganancia de 4dBi en recepción. Además como la antena tiene un apuntamiento básicamente hacia el espacio consideraremos el ruido captado por la antena (ruido cósmico + radiación de la tierra) para la frecuencia de 435 MHz y a temperatura ambiente se puede considerar la temperatura de ruido captado por la antena de 150K.
- un preamplificador de bajo ruido en este caso es el modelo SSB con una figura de ruido de 0,9 dB y 20 dB de ganancia.
- Un filtro de cavidad que introduce unas pérdidas de inserción de 2dB en la banda de paso.
- 50 m de cable RG213/U para conectar la antena con el transceptor. Estos 50 m de cable presenta una atenuación 8,5 dB a la frecuencia de trabajo, podemos además incluir 1 dB de pérdidas adicionales en conectores con lo que tomaremos 9,5 dB de atenuación total.
- Por último el factor de ruido del transceptor FT-847 se ha evaluado en 1dB.

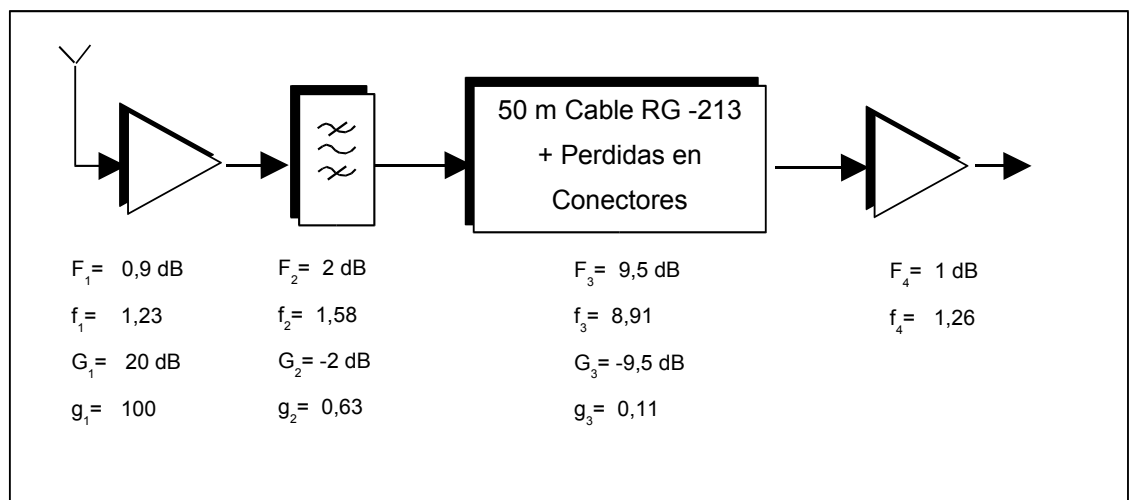


Fig. 4.1-3.1.1 Configuración de la estación terrena.

El factor de ruido del conjunto del sistema receptor viene dado por:

$$f_T = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1} + \frac{f_3 - 1}{g_1 \cdot g_2} + \frac{f_4 - 1}{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}$$

En este caso:

$$f_T = 1,23 + \frac{1,58 - 1}{100} + \frac{8,91 - 1}{100 \cdot 0,63} + \frac{1,26 - 1}{100 \cdot 0,63 \cdot 0,11} = 1,34$$

### 3.1.4.- Potencia de la Señal Recibida.

Realizaremos el balance de potencia del enlace descendente, Como el balance de potencia depende de la elevación a la que lo evaluemos, vamos a calcular la potencia recibida a diferentes elevaciones.

Comenzaremos por el cálculo de la potencia de la señal entregada por la antena a la estación terrestre.

$$P_S( dB ) = P_T + G_T + G_R - L_p - L_b$$

Donde

- $P_T$  es la potencia que transmite el satélite. El transmisor proporciona a la antena una potencia máxima  $P_t = 5 W$ , en decibelios:

$$P_T = 36,4 \text{ dBm}$$

- $G_T$  es la ganancia de la antena transmisor: El satélite en el canal descendente dispone de un monopolo cuya ganancia se puede cifrar en:

$$G_T = 3 \text{ dBi}$$

- $L_p$  es pérdida de polarización que se produce ya que la propagación es de una onda de polarización lineal y se recoge con una antena de polarización circular.

$$L_p = 3 \text{ dB}$$

- $G_R$  es la ganancia de la antena receptora. Tomaremos los siguientes valores de ganancia para una antena voluta de vuelta y media:

Elevación	Ganancia
10°	-4 dB
20°	0 dB
30°	2 dB
40°	4 dB
50°	4 dB
60°	3 dB
70°	2 dB
80°	1 dB
90°	1 dB

Tabla 4.1-3.1.1 Ganancia de antena voluta.

- $L_b$  es pérdida básica de propagación en condiciones de espacio libre a compensar para el enlace descendente:

Elevación	Perdida Básica
10°	152 dB
20°	150 dB
30°	148 dB
40°	146 dB
50°	145 dB
60°	144 dB
70°	143 dB
80°	143 dB
90°	143 dB

Tabla 4.1-3.1.2 Pérdida Básica de Propagación

Sustituyendo obtenemos los resultados de potencia de señal recibida de:

Elevación	Potencia de señal
10°	-119,6 dB
20°	-113,6 dB
30°	-109,6 dB
40°	-105,6 dB
50°	-104,6 dB
60°	-104,6 dB
70°	-104,6 dB
80°	-105,6 dB
90°	-105,6 dB

Tabla 4.1-3.1.3 Potencia de la señal recibida a la salida de la antena.

Por lo que podemos comprobar como para elevaciones superiores a 20° será posible la comunicación ateniéndonos a la sensibilidad del receptor que se sitúa en:

$$S \equiv -119 \text{ dBm}$$

### 3.1.5.- Potencia de ruido.

En cuanto al cálculo de la potencia de ruido, partiendo del valor del factor de ruido del apartado anterior  $f_T = 1.33$  y del ancho de banda  $B = 19,5 \text{ KHz}$

$$p_n = K \cdot T_e \cdot B$$

Donde:

- $K$  es la constante de Boltzman:

$$K = 1,38 \cdot 10^{-20} (\text{mJ} / ^\circ \text{K})$$

- $T_e$  es la Temperatura equivalente de ruido que está formada por:

$$T_e = T_R + T_0$$

la temperatura equivalente de ruido del sistema

$$T_R = 290 \cdot (10^{F_T/10} - 1)$$

y la temperatura del ruido captado por la antena, que a esta frecuencia evaluamos en:

$$T_0 = 150$$

La potencia de ruido:

$$p_n = 6,84 \cdot 10^{-14} \text{ mW}$$

$$P_n = -131,6 \text{ dBm}$$

Por lo que la potencia mínima de la señal a la salida de la antena será:

$$P_{Smin} = -131,6 + 11 \text{ dB} = -120,6 \text{ dBm}$$

Como se puede ver en la Tabla 4.1-3.1.3 el valor de la señal recibida será superior a estos -120,6 dBm en todos los casos siendo el mínimo margen para 20° de elevación de 7dB.

### 3.2.- Diagrama de radiación de la antena requerida.

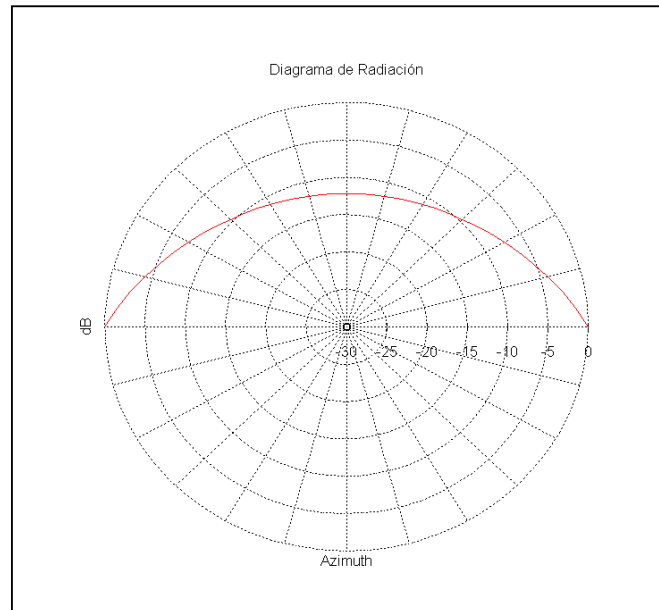
A la hora de elegir la antena de la estación terrena buscaremos una que posea un diagrama de radiación específico que sea capaz de compensar en cierta medida la diferencia de pérdidas de espacio libre en función del ángulo de elevación.

Suponiendo que realmente se pudiese comunicar con el satélite desde el momento en que la elevación es superior a 0° tendríamos la siguiente tabla.

Elevación (°)	Pérdidas de Espacio libre a 435 MHz (dB)	Ángulo correspondiente al diagrama de radiación (°)	Ganancia de la antena que compensaría las pérdidas
0	155,63	90	0
5	154,19	85	-1,44
10	152,8	80	-2,83
15	151,49	75	-4,14
20	150,29	70	-5,34
25	149,21	65	-6,42
30	148,25	60	-7,38
35	147,4	55	-8,23
40	146,65	50	-8,98
45	145,94	45	-9,69
50	145,43	40	-10,2
55	144,94	35	-10,69
60	144,53	30	-11,1
65	144,23	25	-11,4
70	143,92	20	-11,71
75	143,71	15	-11,92
80	143,56	10	-12,07
85	143,47	5	-12,16
90	143,45	0	-12,18

*Tabla 4.2-3.2.1 Pérdidas de espacio libre y ganancia de antena receptora.*

Si trasladamos los datos de esta tabla a una curva podríamos ver la forma del diagrama de radiación:



*Fig. 4.2-3.2.1 Diagrama de Radiación de una antena que compensaría las pérdidas en el horizonte.*

En realidad éste es un diagrama de radiación imposible ya que no se puede construir una antena con una caída infinita como la que éste dibujo (Fig. 4.2-3.2.1) muestra para ángulos de  $\pm 90^\circ$ . Además, lo que si resulta evidente es que la antena tendrá que radiar toda su potencia en la dirección superior, esto quiere decir que tendremos que intentar colocar los nulos de radiación lo más próximos posible de la dirección horizontal.

Todo esto nos lleva a pensar que el diagrama de radiación óptimo tendría un máximo de radiación en una dirección de unos  $\pm 60^\circ$  con el mínimo en la dirección vertical superior con dos nulos en  $90^\circ$ . En la siguiente tabla se muestra cómo podía ser un diagrama en el que el máximo de radiación estuviese  $60^\circ$  desviado con respecto a la vertical y compensase la diferencia de pérdidas de espacio libre entre la vertical de la estación y el resto de elevaciones.

Elevación (°)	Pérdidas de Espacio libre a 435 MHz (dB)	Ángulo correspondiente al diagrama de radiación (°)	Ganancia hipotética de la antena
0	-	90	-30
5	-	85	-16
10	-	80	-8
15	-	75	-4
20	-	70	-2
25	-	65	-1
30	148,25	60	0
35	147,4	55	-0,85
40	146,65	50	-1,6
45	145,94	45	-2,31
50	145,43	40	-2,82
55	144,94	35	-3,31
60	144,53	30	-3,72
65	144,23	25	-4,02
70	143,92	20	-4,33
75	143,71	15	-4,54
80	143,56	10	-4,69
85	143,47	5	-4,78
90	143,45	0	-4,8

Tabla 4.2-3.2.2 Valores para un diagrama de radiación posible.

Y en este dibujo se representa el diagrama de radiación resultante de los anteriores datos. En este diagrama no se ha contemplado la existencia de los lóbulos laterales, que evidentemente en cualquier antena con una cierta directividad han de aparecer, pero esto no es más que una representación del modelo radiación al que hay que aproximarse para compensar las pérdidas de espacio libre que se producen en las diferentes elevaciones.

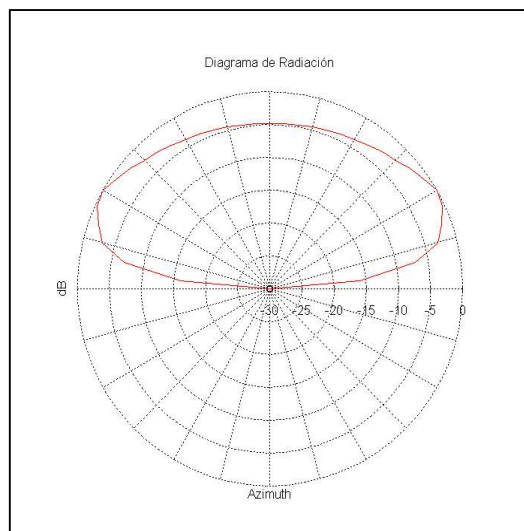


Fig. 4.2-3.2.2 Un posible diagrama de radiación para compensar las pérdidas.









**Anexos.**

# **Anexos.**

Se incluyen a continuación los siguientes anexos:

- Características del transceptor YAESU FT-487.
- Características del amplificador de bajo de ruido.
- Ejemplo de una aplicación de antena QHA para satélites LEO.
- Fotografías de las antenas construidas.



### **Agradecimientos**

en primer lugar y especialmente a Manolo Sierra, a Jambrina y todo el grupo de Radición, a Valentín, Alejandro, y el resto gente del GBT especialmente a los que forman el grupo EHAS, a David Sáez y David Eliot, a mis compañeras y compañeros de ISF, a Jacobo y Armando, a Wallter Maxwell WD2U. a Leonardo Da Vinci, a la internet. Y a todos los que me han apoyado en este proyecto.