



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Proyecto final de carrera:

Diseño y construcción de una antena cuadrifilar helicoidal para recepción
de imágenes transmitidas por satélites de órbita polar

Bruce Vera Navides

Tutor

José María Miguel Lopez

Barcelona, febrero de 2012

Agradecimiento

En primer lugar quiero dar las gracias a mi familia, que siempre me ha apoyado en todas las decisiones que he tomado, como la de venir a estudiar a Barcelona. Dar las gracias a mis padres por escucharme y aconsejarme siempre, ambos son mi ejemplo a seguir por los sacrificios y esfuerzos que han hecho para poder darme una educación de calidad; porque para ellos la educación siempre ha sido primordial.

A mi hermano que, aunque él piense que soy su ejemplo, él es mi ejemplo; porque en cada cosa que hace nunca piensa sólo en él. Además; aunque no he estado muchos años a su lado siempre lo he sentido cerca .Estoy orgulloso de todos sus logros, de cómo los ha conseguido y que siempre ha sabido seguir adelante.

A mi tutor José M. Miguel Lopez, que me ha dado la oportunidad de realizar un proyecto final de carrera donde, además del estudio teórico y el diseño, he podido construir mi proyecto y realizar todas las pruebas necesarias; haciendo que este proyecto sea desde mi punto de vista un proyecto de ingeniería completo.

A todos mis amigos con los que he venido a Barcelona, los cuales siempre me han apoyado; a los amigos que dejé en Perú y siempre me han alentado. A Frescia que me ha apoyado mucho en mi estancia en Barcelona porque siempre se ha preocupado que no me sienta solo.

A mis compañeros donde realicé mis prácticas, porque me han enseñado mucho y me han brindado su amistad. A David Espinosa que es una persona que confía en mí y me ha ayudado a tener una mejor perspectiva de vida.

Resumen

Este proyecto tiene la finalidad el diseño y la realización de una antena cuadrifilar helicoidal que optimice el comportamiento de una estación receptora. Con optimizar nos referimos ha receptionar imágenes con la máxima cobertura posible, lo cual será posible con una antena que sea lo más omnidireccional.

Este proyecto esta estructurado con un tutorial acerca del contexto del proyecto, el cual habla acerca de satélites de orbita polar baja, su funcionamiento, como estos transmiten imágenes y como recibir estas imágenes en una estación receptora.

Luego nos centraremos en el diseño y la construcción de la antena cuadrifilar. Donde primero, se hará un análisis teórico de la antena; seguido de unas pruebas del diseño de la antena con ayuda de un simulador. En segundo lugar, se procede a la construcción de la antena; luego se realizan mediciones de la antena con la ayuda de un analizador de antenas para comprobar que las características de la antena sean iguales a las echas previamente en el análisis teórico. Por ultimo, se instala la antena en la estación receptora y se reciben las imágenes.

Por ultimo se hace un análisis de los resultados de las imágenes recibidas y se hacen algunas recomendaciones para futuras aplicaciones.

Contenido

1 Introducción.....	6
Capítulo 2: Problemática involucrada en la recepción de imágenes de satélites de órbita polar baja	7
2.1 Satélites meteorológicos	7
2.2 Visibilidad de los satélites de órbita polar baja.....	9
2.3 Predicción de horarios de paso	11
2.4 Adquisición de datos	13
2.5 Sistema APT	14
2.6 Cobertura de una imagen	17
2.7 Esquema de modulación y demodulación.....	18
Capítulo 3: Antenas.....	20
3.1 Polarización circular.....	21
3.2 Estudio de antenas para recepcionar de imágenes de satélites de órbita polar baja.....	22
3.2.1 Antena de dipolos cruzados o turnstile	23
3.2.2 Antena de dipolos cruzados doble o Double Cross	25
3.2.3 Antena cuadrifilar helicoidal	28
3.2.3.1 Modelo físico de la antena cuadrifilar helicoidal.....	29
3.2.3.2 Simulación de antena cuadrifilar helicoidal	34
Capítulo 4: Diseño y Construcción de la antena cuadrifilar helicoidal.....	40
4.1 Calculadora para construcción de una antena cuadrifilar helicoidal	40
4.2 Comprobación de los resultados de la calculadora.....	43
4.3 Construcción de la antena	45
4.4 Analizador de antenas RigExpert AA-520	50
4.4.1 Resultados del analizador de antenas RigExpert AA-520	53
4.5 Cambios en el diseño de la antena usando el analizador de antenas.....	53
4.6 Conclusiones de los cambios realizados en la antena.....	59
Capítulo 5: Recepción de imágenes.....	62
5.1 Resultados de la recepción de imágenes.....	65
Capítulo 6: Aplicaciones y recomendaciones	69
Apéndice A: Configuración del software APTDecoder	70
Apéndice B: Configuración del software Orbitron.....	76
Bibliografía	78

1 Introducción

Este proyecto final de carrera fue planteado como un proyecto de ingeniería real, se planteó el diseño y la construcción de una estación receptora la cual podría ser construida en cualquier lugar del mundo, teniendo como pilar el tipo de antena receptora que se usara.

En primer lugar se explicará una idea general de los satélites meteorológicos de órbita polar baja, el proceso de transmisión de las fotografías que estos capturan y la recepción de las señales para su final procesamiento.

Los satélites de órbita polar baja están a una altura entre 800 y 1200Km. Estos satélites giran alrededor de la tierra varias veces al día, pero en cada giro recorren diferentes partes de la tierra, lo cual da la posibilidad de que se puedan establecer diferentes estaciones receptoras. En cada órbita los satélites pasan por los polos.

Los satélites de órbita polar baja transmiten señales de manera continua; entonces para poder receptionarlas se debe detectar cuando el satélite ha cruzado el horizonte ya que es en este momento cuando se puede comenzar a recibir estas señales, la calidad de la señal aumenta a medida que el satélite avanza y luego se va debilitando hasta que el satélite desaparece que es cuando vuelve a cruzar el horizonte.

Las señales que el satélite transmite son fotografías de la tierra que el satélite va capturando a lo largo de su órbita, las imágenes son en blanco y negro por lo que se usa la escala de grises para indicar los diferentes valores de la imagen. Estos valores se modulan en amplitud lo que significa que se van asignando valores de amplitud para la escala de grises; después para poder ser transmitidas a la tierra se modulan en frecuencia con una portadora en el orden de los Mega-Herz, por ejemplo para el NOAA 15 se usa 137.5MHz.

El formato que usan los satélites de órbita polar NOAA para la transmisión de las imágenes es el Automatic Picture Transmission (APT). Este formato es analógico y transmite dos canales (uno del espectro visible y otro del espectro infrarrojo); además, de la información que lleva también indica cuando empieza y cuando acaba una línea.

Los satélites de órbita polar baja con los que se trabaja usan frecuencias entre 137 y 138 Mhz por lo que cualquier radioaficionado puede construir una estación receptora. En el presente trabajo se explicará el proceso de recepción además de los instrumentos que se han usado en éste. Cabe resaltar que la construcción de una estación receptora no es muy costosa.

Capítulo 2: Problemática involucrada en la recepción de imágenes de satélites de órbita polar baja

En este capítulo se explicará todo lo relacionado con los satélites de órbita polar baja y el proceso de recepción; para ello se explicará todo lo concerniente al funcionamiento y al comportamiento de estos satélites, así como lo que se tiene que tener en cuenta para poder receptionar las señales que transmiten: La visibilidad, Efecto Doppler, predicción de horarios de paso, transmisión de datos y el esquema de modulación de los satélites.

2.1 Satélites meteorológicos

Se distingue 2 tipos de satélites meteorológicos:

- Satélites de órbita geoestacionarias: Las órbitas geoestacionarias son aquellas en las que el satélite está siempre en la misma posición con respecto a la rotación de la Tierra; porque orbitan a la misma velocidad que la Tierra, y en la misma dirección. El satélite parece estacionario (sincronizado con respecto a la rotación de la Tierra). Esto se logra mediante la colocación del satélite a una órbita a una altitud de 35.790 kilómetros (22.240 millas) por encima del ecuador, lo que produce un período orbital igual al período de la rotación de la Tierra (alrededor de 23 horas 56 minutos). Con esta altura y posición estacionaria cerca, un satélite puede proporcionar una cobertura continua sobre una amplia área, ésta es su principal característica. Entonces la antena de la estación receptora tendrá que apuntar directamente al satélite (enlace punto a punto). Una antena con buenas prestaciones para este caso es una antena direccional.

A continuación se muestra una imagen en la que se muestra la cobertura de los satélites geoestacionarios, las líneas amarillas indican la cobertura del satélite, los puntos rojos indican el centro de cobertura que es el mismo que el punto estacionario del satélite. En la base de la imagen se observa los nombres de los satélites.

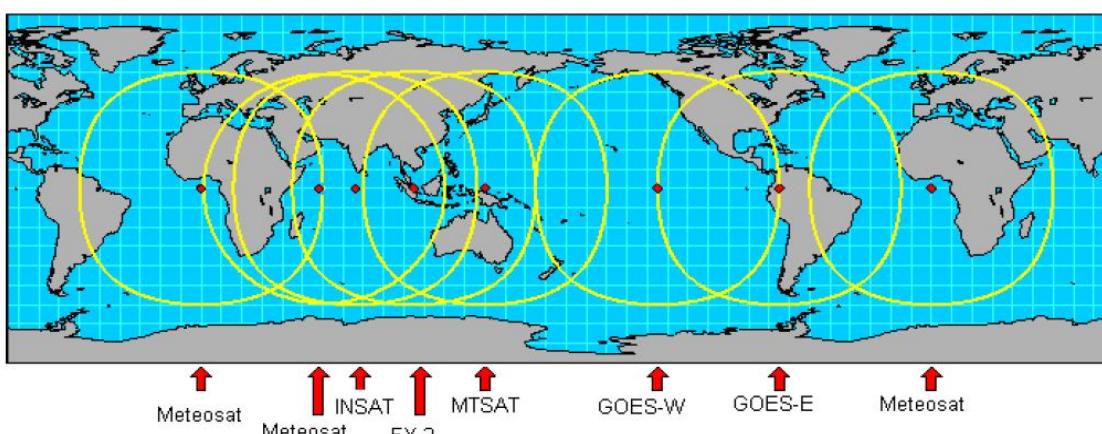


Figura 2.1-1: Cobertura de los satélites geoestacionario en todo el mundo. Imagen del National Oceanic and Atmospheric Administration.

- Satélites de órbita polar baja: se dice que son de órbita polar baja porque se encuentran orbitando a una altura entre los 160 Km y 2000 Km. En cada una de sus órbitas pasan por los polos y el periodo de una órbita es del orden de los 100 minutos, más adelante se explicara esto con mayor detalle; entonces cuando el satélite termina una órbita la tierra habrá girado un poco. En el siguiente gráfico se muestra el efecto combinado del satélite orbitando y la rotación de la tierra. En la órbita de la derecha realiza un barrido por la costa de Orlando (Estados Unidos) y en la siguiente órbita realiza un barrido por Los Ángeles (Estados Unidos).

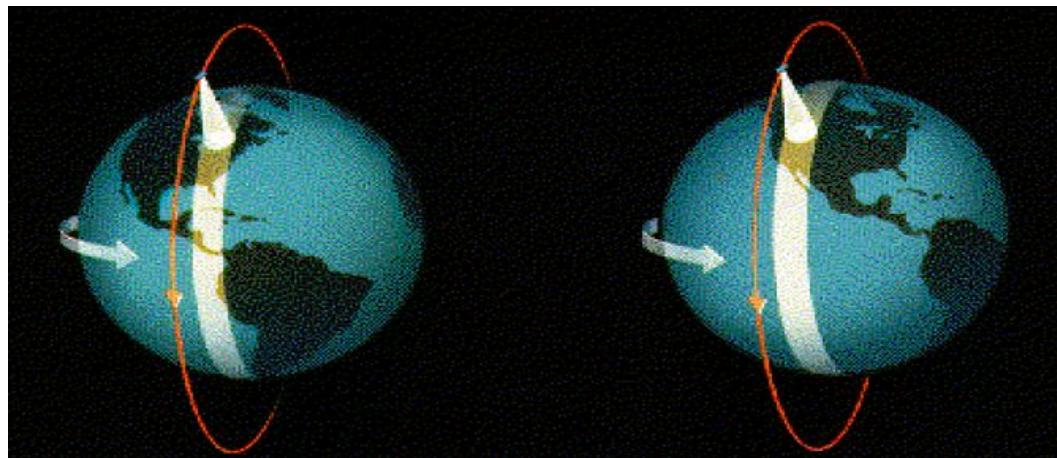


Figura 2.1-2: Características de una órbita polar. Imagen del National Oceanic and Atmospheric Administration.

Los satélites de órbita polar al estar orbitando a alturas más pequeñas que los satélites geoestacionarios tienen imágenes con mayor resolución; pero una desventaja es que los satélites de órbita polar baja no siempre están disponibles. En la siguiente imagen se observa una órbita de un satélite, en esta órbita el satélite transmitirá imágenes para Australia pero no para la India, en la siguiente órbita en la India se podrá recibir imágenes.

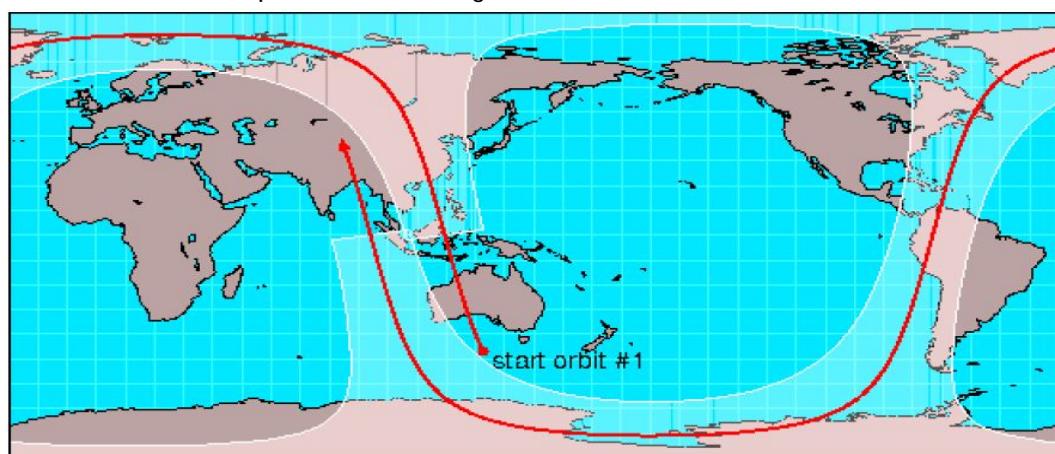


Figura 2.1-3: Trayectoria de una órbita de un satélite de órbita polar baja y su desplazamiento en la siguiente órbita debido al desplazamiento de la tierra. Imagen del National Oceanic and Atmospheric Administration.

El movimiento de rotación de la tierra sumado al movimiento del satélite orbitando alrededor de la tierra hace que el satélite realice un barrido de toda la superficie de la tierra como se observa en la siguiente figura.

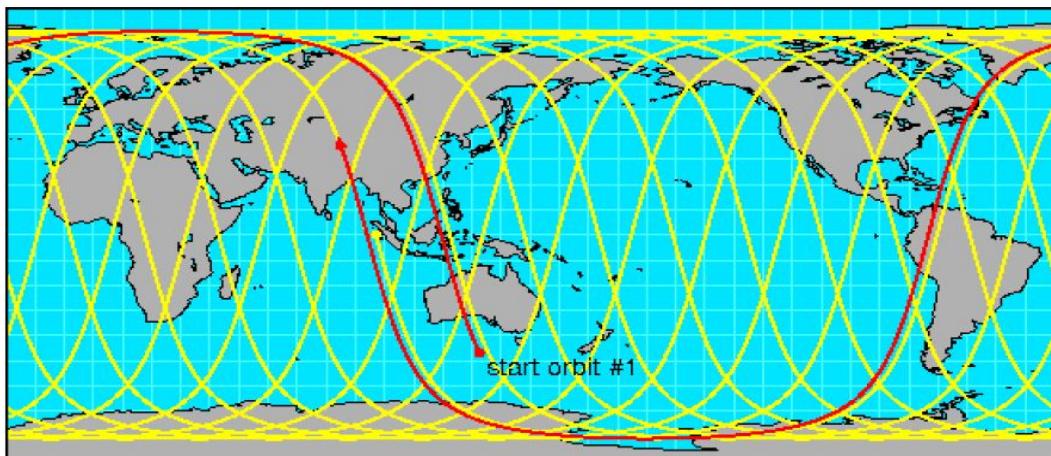


Figura 2.1-4: Seguimiento de un satélite de órbita polar baja 24 horas (14 órbitas).
Imagen del National Oceanic and Atmospheric Administration.

Ahora ya sabemos que hay satélites que están girando alrededor de la tierra, entonces como se indicó al principio de este proyecto, la finalidad es tener la máxima cobertura posible; por ello necesitamos saber cuánto tiempo se podrá recibir imágenes transmitidas por los satélites. La recepción de imágenes se inicia cuando el satélite cruza el horizonte y finaliza cuando vuelve a cruzar el horizonte, a esto le llamaremos “visibilidad del satélite”.

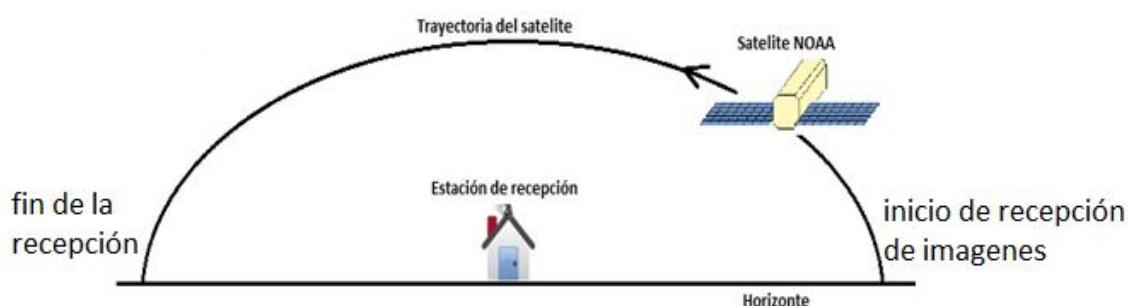


Figura 2.1-5: Diagrama de la trayectoria de un satélite de órbita polar cuando cruza el horizonte.

2.2 Visibilidad de los satélites de órbita polar baja

Para determinar la visibilidad de un satélite primero se debe conocer la duración de su órbita. Para ello usamos la tercera ley de Kepler.

$$T^2/R^3 = \text{constante}$$

Donde T es el periodo orbital y R radio desde el centro de inercia.

Como la relación anterior es una constante, se puede usar la siguiente relación:

$$\frac{T_a^2}{R_a^3} = \frac{T_b^2}{R_b^3}$$

Donde "a" representa el satélite de órbita polar baja y "b" representa un satélite geoestacionario, como se indica en el capítulo 2.1 estos satélites tienen un periodo igual al de la tierra (23 h 56 min); además se conoce la distancia a la cual orbitan (36 000 Km).

Se despeja la ecuación anterior para hallar el periodo de satélite de órbita polar baja (T_a).

$$T_a^2 = \frac{R_a^3}{R_b^3} \times T_b^2$$

$$T_a = \sqrt{\left(\frac{R_a}{R_b}\right)^3 \times T_b^2}$$

Como ambos satélites giran alrededor de la Tierra, el valor del centro de inercia del satélite será la distancia a la que se encuentra el satélite desde el centro de la tierra $R_a = R_{tierra} + h_{polar}$ y $R_b = R_{tierra} + h_{geo}$

Donde el radio de la tierra es 6378 km (R_{tierra}), la altura a la que se encuentra el satélite de órbita polar baja es 800 km (h_{polar}) la altura de un satélite geoestacionario es 36000km (h_{geo}) y el periodo satélite geoestacionario es 23 h 56 min (T_{geo})

$$T_a = \sqrt{\frac{(R_{tierra} + h_{polar})^3}{(R_{tierra} + h_{geo})^3} \times T_{geo}^2}$$

$$T_a = 101 \text{ min}$$

Ahora ya se conoce el periodo de un satélite de órbita polar baja, entonces para calcular el tiempo de visibilidad del satélite se tiene que calcular el valor del ángulo θ primero. En el siguiente gráfico se muestra el ángulo θ . Donde R_{Earth} es el radio de la tierra y R_{sat} es la distancia desde el centro de la tierra hasta el satélite. El ángulo θ se puede hallar utilizando la relación de arco-coseno o coseno inverso.

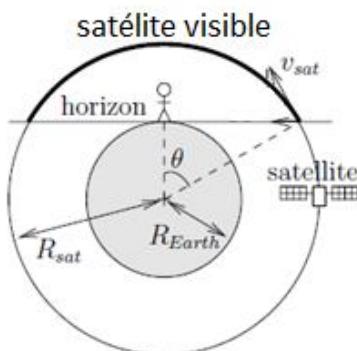


Figura 2.2-1: Parámetros de la órbita de un satélite meteorológico polar.

$$\cos(\theta) = \frac{R_{tierra}}{R_{satelite}} = \frac{R_{tierra}}{R_{tierra} + h_{polar}}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{R_{tierra}}{R_{tierra} + h_{polar}}\right)$$

La visibilidad es 2θ ; además, se sabe que la duración de una órbita (2π) es 101 min. Entonces para hallar el tiempo de visibilidad se usa una regla de tres simple.

$$2\pi - 101 \text{ minutos}$$

$$2\theta - \text{tiempo de visibilidad}$$

$$\text{tiempo de visibilidad} = \frac{2\theta}{2\pi} \times 101 \text{ minutos}$$

$$\frac{2\theta}{2\pi} = \frac{2 \times \arccos\left(\frac{R_{tierra}}{R_{tierra} + h_{polar}}\right)}{2\pi} \cong 0.151$$

$$\text{tiempo de visibilidad} = 15.3 \text{ minutos}$$

Ya se conoce el tiempo de visibilidad de un satélite; entonces hace falta saber cuando poner en marcha nuestra estación receptora porque como se indicó al principio estos satélites no están siempre disponibles.

2.3 Predicción de horarios de paso

Para saber cuando un satélite cruza el horizonte se tiene que conocer la posición actual de los satélites para poder realizar una predicción de su paso. Existen muchos programas informáticos que se encargan de hacer seguimientos a los satélites.

Estos programas calculan y actualizan la posición de los satélites en tiempo real a partir de los elementos keplerianos. Los elementos keplerianos son una serie de números donde figura el identificador del satélite, la fecha de lanzamiento, la información necesaria para calcular la órbita del satélite (6 números llamados elementos orbitales) y la posición del satélite en su órbita. A partir de esta información es capaz de calcular la posición del satélite en cualquier momento del tiempo usando las ecuaciones de Kepler. Hay que actualizar estos elementos keplerianos vía internet cada 3-4 semanas para corregir desviaciones en la órbita. Los valores de los elementos keplerianos y sus actualizaciones los realiza el North American Aerospace Defense Command (NORAD).

Si se consulta la página web de NORAD <http://celestrak.com/NORAD/elements/noaa.txt>, se pueden observar los elementos keplerianos para los satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

A continuación se muestra los datos que se observa para el satélite NOAA 17 en la página del NORAD:

NOAA 17

1 27453U 02032A 04141.47085506 .00000028 00000-0 31630-4 0 9103

2 27453 98.7010 214.0435 0012905 114.4615 245.7918 14.23528214 98966

Un programa que hace el seguimiento de satélites es el "Orbitron" en este programa solo se tiene que indicar la posición de la estación receptora y seleccionar qué satélites se desea seguir. Este programa nos muestra la posición actual del satélite que se desee.

En el Anexo B se da más información acerca de este programa.

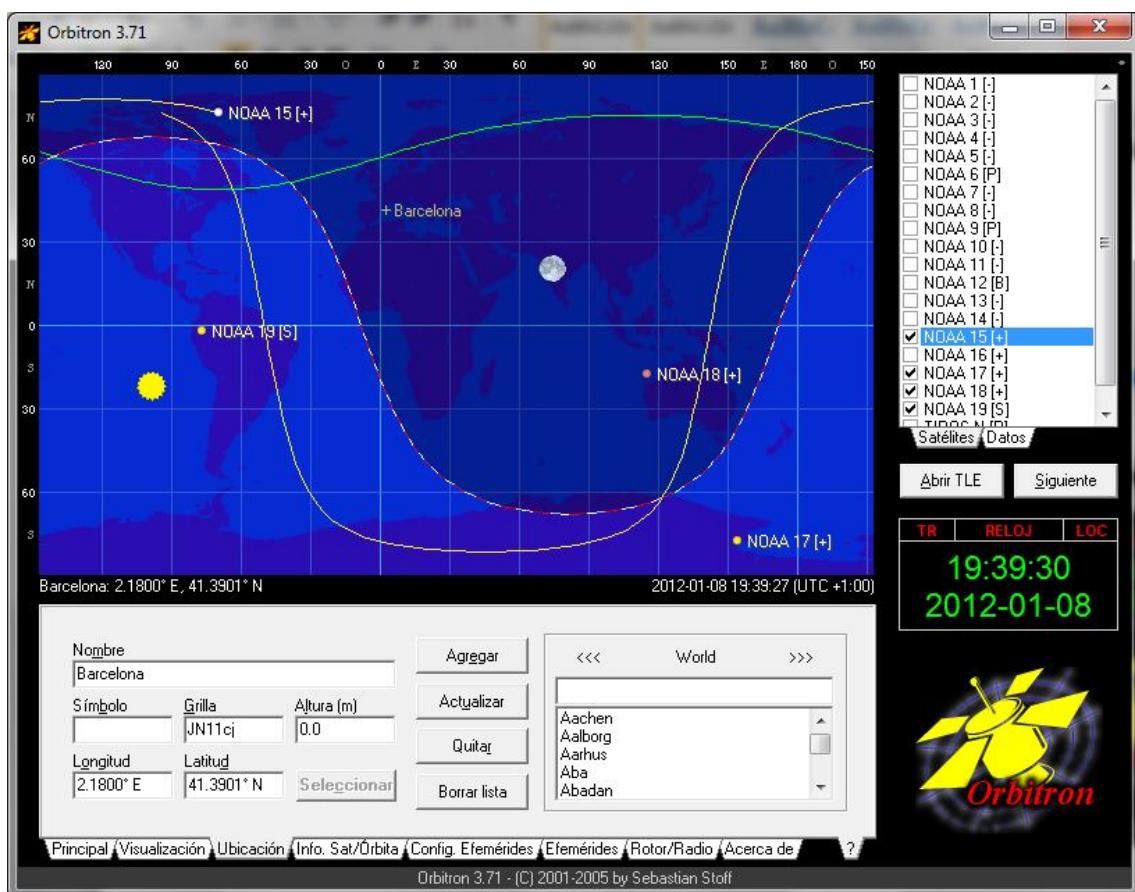


Figura 2.3-1 programa de seguimiento de satélites "Orbitron"

Existen muchos satélites de órbita polar baja pero en este proyecto se trabaja con los satélites de órbita polar baja de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Esta organización se encarga del control del estado de la atmósfera y de los océanos; también se encarga de informar de la previsión del tiempo, prever e informar sobre catástrofes y estudiar el cambio climático. La NOAA actualmente tiene 4 satélites en órbita NOAA 15, NOAA 17, NOAA 18 y NOAA 19.

A continuación se muestran algunas características importantes de los satélites de la NOAA.

Satélite	NOAA 15	NOAA 17	NOAA 18	NOAA 19
Fecha de lanzamiento	12/15/1998	06/24/2002	05/20/2005	02/06/2009
Fecha de puesta en marcha	12/15/1998	10/15/2002	08/30/2005	06/02/2009
Altitud (Km)	807	810	854	870
Periodo (min)	101.1	101.2	102.12	102.14
Frecuencia APT (MHz)	137.5	137.620	137.9125	137.1

Tabla 2.3-1 Características de los cuatro satélites actuales en órbita de la NOAA

Como se explicó al inicio el objetivo de este proyecto es recibir imágenes con la máxima cobertura. El formato que usan los satélites de la NOAA para transmitir imágenes es el APT (Automatic Picture Transfer). Más adelante se explicará el formato APT.

Los satélites de la NOAA transmiten la información sin codificar por lo que cualquier radioaficionado puede recibirlas en tiempo real. A continuación se explica cómo los satélites adquieren las imágenes y las transmiten.

2.4 Adquisición de datos

En los satélites de la NOAA cuenta un sistema llamado AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer), el cual se encarga de adquirir datos de la superficie terrestre y transmitirlos en tiempo real como ya explicaremos más adelante. El formato que se usa en la transmisión de datos es de tipo APT (Automatic Picture Transfer) y es un sistema de transmisión de baja resolución de datos que obtiene el AVHRR/3.

El AVHRR/3 tiene seis canales y cada canal se encarga de recoger información de una banda diferente del espectro. Cada canal dispone de un sensor específico diseñado para captar la energía recibida solo en su ancho de banda. Los tres primeros canales son dedicados a registrar la radiación proveniente del sol que se refleja en la tierra: Canal 1 (visible), canal 2 (rojo visible e infrarrojo cercano) y canal 3A (infrarrojo cercano); los otros tres se encargan de captar la radiación térmica proveniente del suelo, océanos, nubes y parte de la atmósfera: canal 3B (infrarrojo medio), canal 4 (infrarrojo lejano o térmico) y canal 5 (infrarrojo lejano o térmico).

Parámetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3A	Canal 3B	Canal 4	Canal 5
Ancho de banda (μm)	0.58-0.68	0.725-1	1.58-1.64	3.55-3.93	10.3-11.3	11.5-12.5
Resolución (Km)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
IFOV (mili-radianes)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

Tabla 2.4-1 Canales del AVHRR/3

Solo se pueden transmitir 5 canales porque el 3A y el 3B no se pueden transmitir simultáneamente.

El AVHRR / 3 escanea continuamente la superficie de la Tierra mientras el satélite recorre su órbita. Hace el escaneo punto por punto, todos los sensores del AVHRR escanean el mismo punto a la vez, siguiendo una línea perpendicular a la trayectoria del satélite. Cuando termina de escanear el último punto de una línea, sigue con el primer punto de la línea siguiente. Este punto se llama IFOV y es el campo de vista del satélite en un momento determinado. El IFOV tiene una apertura de 1.3 mili-radianes.

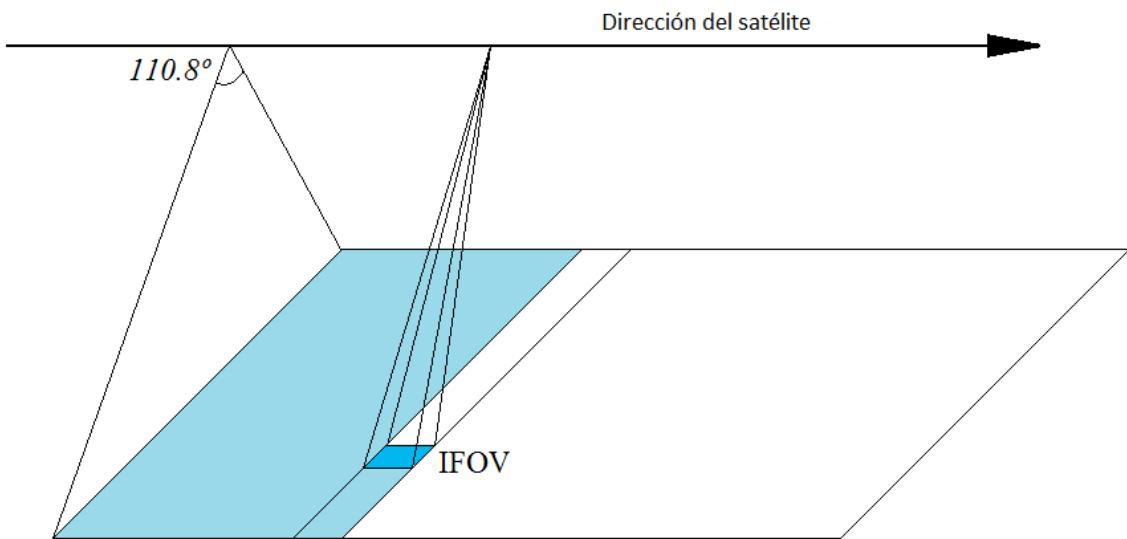


Figura 2.5-1 Esquema de cómo el AVHRR/3 escanea la tierra.

El campo de vista total que se escanea el satélite es de 110.8 grados y el AVHRR / 3 coge una muestra cada 0.95 mili-radianes. Esto es $1,36 \left(\frac{1.3 \text{ mrad}}{0.95 \text{ mrad}} \right)$ muestras para cada IFOV y un total de 2048 muestras en cada cada línea que se escanea.

La información proveniente del AVHRR/3, es procesada por el procesador MIRP (Manipulated Information Rate Processor) el cual se encarga de digitalizar la información muestreando 39.936 muestras por segundo y por canal. Convirtiendo esta información en palabras de 10 bits y tránsitiéndolas en paralelo al sistema APT; además de agregar calibraciones y datos de simetría, por lo que cada palabra de 10 bits representa un punto de la imagen.

2.5 Sistema APT

El sistema APT (Automatic Picture Transfer) es un sistema de transmisión de baja resolución de datos que obtiene el AVHRR/3. El formato APT usa dos canales del sistema AVHRR/3. Durante el día usa un canal visible y un canal infrarrojo, durante la noche se usa dos canales infrarrojos. A estos dos canales del formato APT se les llama canal A y canal B.

Desde el satélite se transmiten 120 líneas cada minuto (0.5 líneas/segundo). Cada línea contiene la información de los dos canales que transmite en formato APT, así como sincronismos y otras señales útiles para la decodificación de la imagen. La unión de todas las líneas forma la imagen.

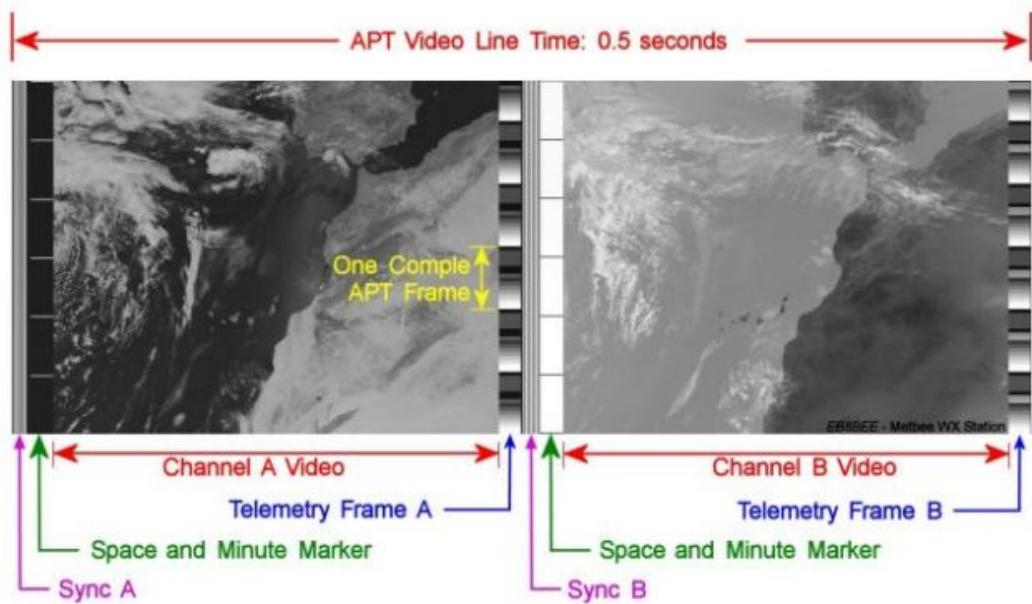


Figura 2.5-1 Imagen formada por 256 líneas APT. El canal A es el de la izquierda y el canal B el de la derecha.

Cada línea es de una longitud de 0.5 segundos, conteniendo dos segmentos iguales. Cada segmento de 0.25 segundos contiene:

1. Un pulso de sincronización específico
2. Espacio y un marcador de minuto.
3. Datos del canal de video
4. Datos de telemetría.

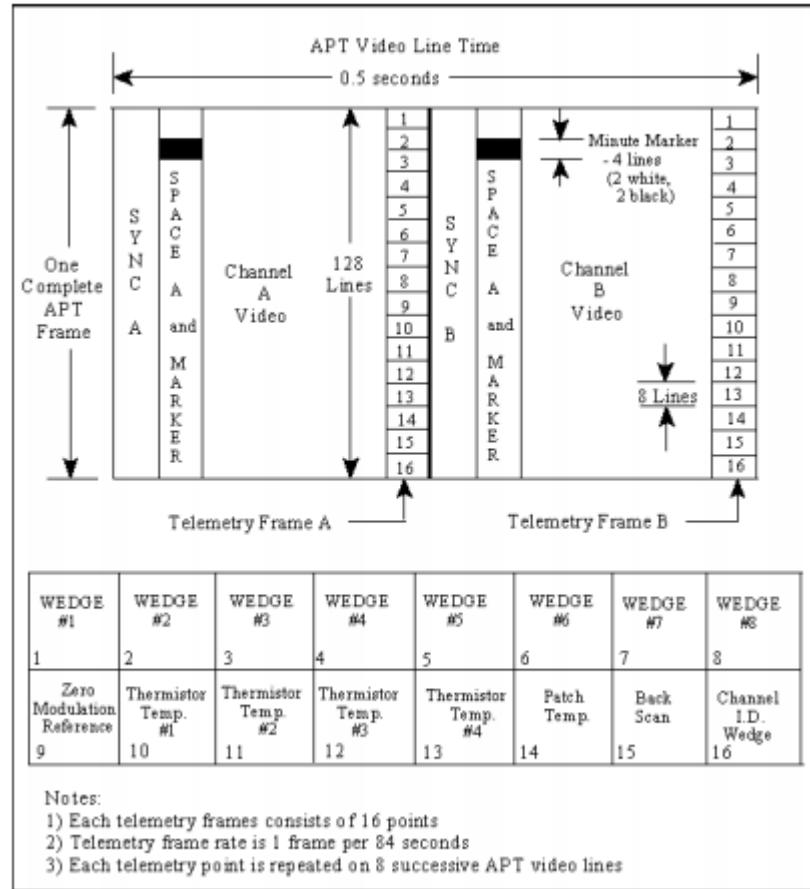


Figura 2.5-2 Esquema del formato APT.

- Sincronización (SYNC): para el canal A son 7 pulsos de 1024Hz, para el canal B son 7 pulsos de 832Hz. Estos impulsos de sincronismo aparecen como estrechas franjas verticales en blanco y negro.
- Espacio y marcador de minuto: antes de escanear la tierra el sensor escanea el espacio y una vez cada minuto el reloj del satélite inserta un marcador. Para el canal A este escaneo de la luz visible da como resultado una raya negra y el marcador se presenta como una línea blanca horizontal. Para el caso del canal B el escaneo del espacio da como resultado una raya blanca y el marcador de minuto se presenta como una línea negra horizontal.
- Escaneo de la tierra: la mayoría de los 0.25 segundos se usa para el escaneo del canal A, del mismo modo se hace para el canal B. En el escaneo de la luz visible, canal A, se realiza un análisis de toda la luz reflejada desde la superficie de la tierra; las nubes aparecen en varios tonos de blancos, el agua en color negro y las características de la tierra en distintos tonos de gris. Para el escaneo de los infrarrojos, canal B, los objetos calientes aparecen en negro o tonos de gris, los objetos fríos aparecen en tonos de color blanco o claro gris.
- Telemetría: lo primero que indican los datos telemétricos que se transmiten con cada canal son los niveles modulación y amplitud que forman la escala de grises con que se dibuja la imagen. En total hay 7 grises diferentes por lo que

esta información ocupa las primeras 9 franjas de la columna. Seguido hay información de temperatura y finalmente el identificador de canal. Éste indica qué canal se está transmitiendo. Cada una de las informaciones telemétricas se repite durante 8 líneas consecutivas. En cada trama, 128 líneas, se vuelve a enviar toda la información de nuevo.

Se conoce el tiempo de visibilidad de un satélite, cómo este captura y envía las imágenes; pero aun no se ha explicado la máxima cobertura de una imagen del satélite.

2.6 Cobertura de una imagen

La resolución de las imágenes trasmitidas en el modo APT es de $4 \times 4\text{Km}^2/\text{píxel}$. El cálculo de los 4Km por lado de pixel se realiza de la forma que se explica a continuación.

El periodo de órbita del satélite es 101 min y la circunferencia de la tierra es 40 000 Km; además el satélite transmite una línea en 0.5 segundos; entonces la altura de un pixel (eje de las ordenadas) debe de cubrir una longitud correspondiente al movimiento del satélite durante este intervalo de tiempo:

$$\frac{40000\text{Km}}{101\text{min} \times 60\frac{\text{seg}}{\text{min}}} \times 0.5\text{seg} = 3.3\text{Km/línea} \cong 4\text{Km/línea.}$$

Ahora considerando que la visibilidad máxima del satélite es 15 min, que se observa 2 líneas por segundo y que cada pixel cubrirá $4 \times 4\text{Km}^2$, la máxima latitud de la extensión de una imagen es:

$$\frac{(15 \times 60\text{seg}) \times (2\text{pixel/seg}) \times (4\text{Km/pixel})}{40\ 000\text{Km}} \times 360^\circ = 65^\circ$$

Un ejemplo de la cobertura del satélite podría ser una imagen centrada España en la latitud 40° , las Islas Feroe en el Norte (latitud 68°) y Cabo Verde en el Sur (latitud 16°). Obtener una imagen como esta, es el objetivo de este proyecto. Puede que en otras aplicaciones se busque solo imágenes de una zona, por ejemplo imágenes de solo España, pero no es nuestro caso. Nosotros buscamos imágenes con el máximo de cobertura.

En la siguiente imagen se muestra la cobertura de una imagen para un satélite con visibilidad de 15 minutos.

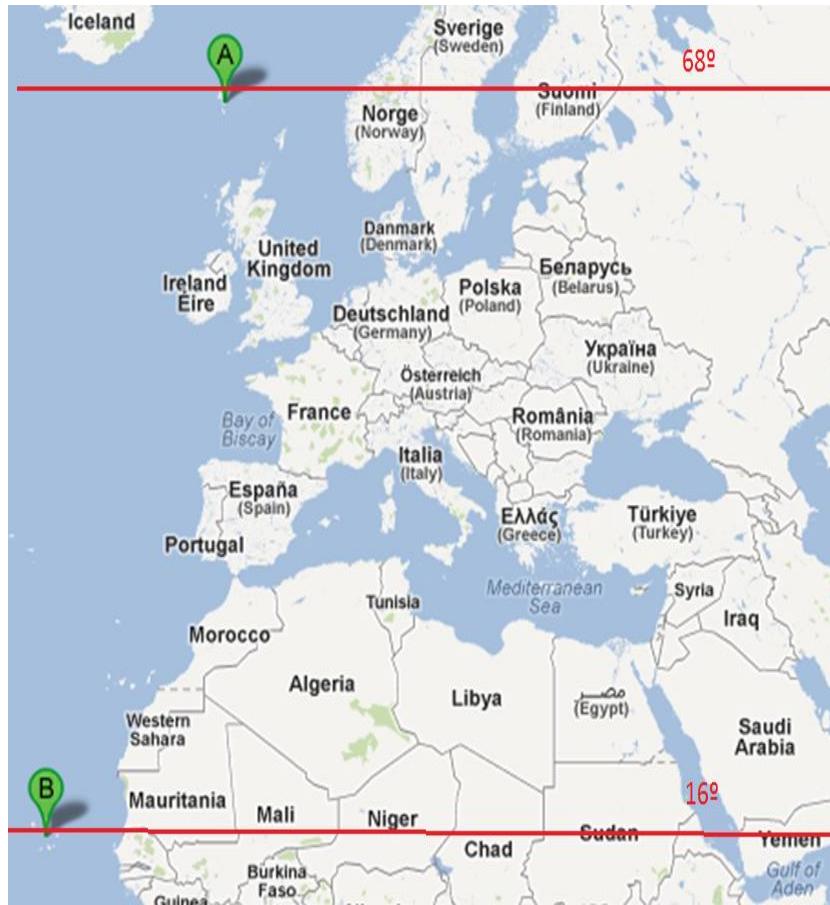


Figura 2.6-1 Punto A islas Feroe y punto B Cabo Verde. Imagen de GoogleMaps.

El satélite esta transmitiendo continuamente la señal en formato APT por lo que la recepción se hace en tiempo real.

A continuación se explica cómo el satélite modula las imágenes para luego transmitirlas y como estas son recibidas y demoduladas por una estación receptora.

2.7 Esquema de modulación y demodulación

La modulación se realiza con un generador de tensión (V_s) el cual representa la luminosidad de la salida del sensor, para el canal visible la amplitud máxima representara el color blanco y la mínima amplitud el color negro. La señal del generador se multiplica con una señal sinusoidal (V) de 2.4KHz el cual es un pitido audible, el resultado de esta multiplicación será un pitido más o menos intenso en función del brillo de los puntos que va escaneando el sensor, esta multiplicación viene a ser una modulación de amplitud. El resultado de la modulación de amplitud (V_r) se lleva a un modulador de frecuencia con un generador en mega-hertz; por ejemplo para el NOAA 15 el generador es de 137.5MHz. En la demodulación se realiza el proceso inverso.

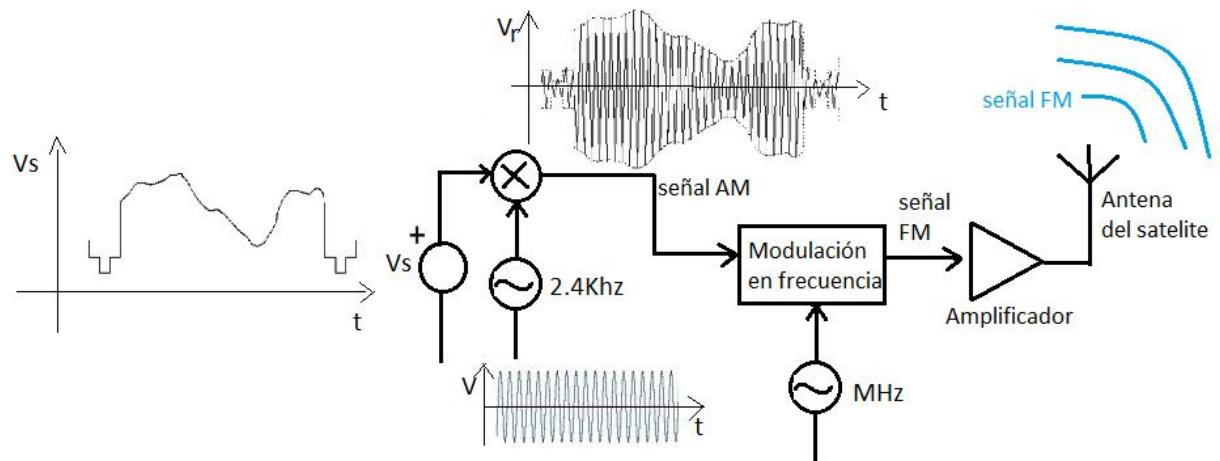


Figura 2.7-1 Proceso de modulación en el satélite.

En la demodulación (en Tierra) se recibe las señales con una antena, después estas señales se demodulan en frecuencia con un receptor para obtener la señal modulada en amplitud (señal con pitidos audibles que varían en función del brillo de la imagen), esta señal audible con ayuda de una tarjeta de audio que hace de procesador de señales y un sistema de visualización permiten obtener las imágenes enviadas por el satélite. La señal de pitidos audibles variables es importante porque gracias a que es audible se puede usar una tarjeta de sonido. El uso de un pre-amplificador es para compensar las pérdidas que introduce el cable que conecta la antena y el receptor.

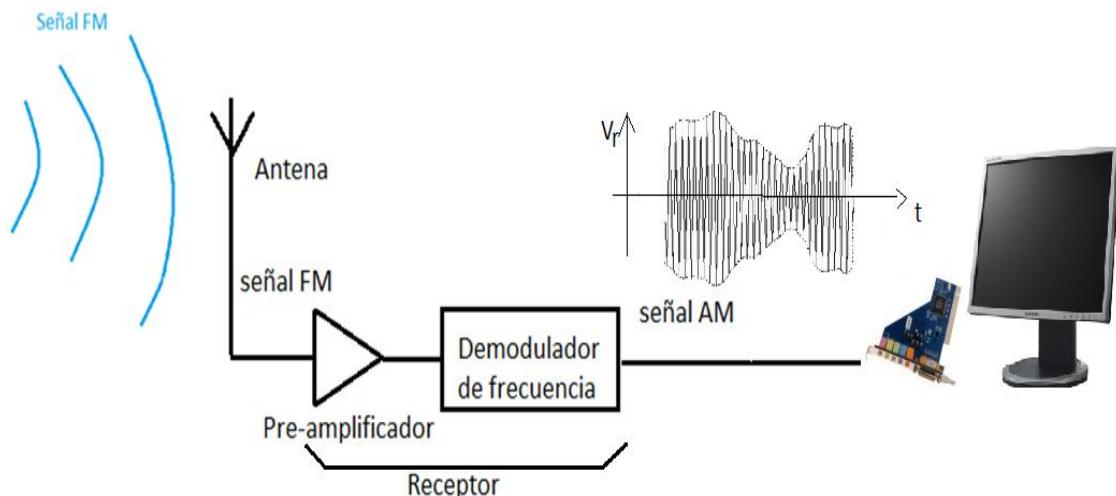


Figura 2.7-2 Proceso de demodulación en la estación receptora.

Capítulo 3: Antenas

En este capítulo se hará un estudio de la antena que se desea construir para la recepción de señales transmitidas por los satélites de órbita polar baja, para ello se explicara primero los requisitos que debe cumplir la antena que se desea construir, luego se realizara un análisis teórico de la misma, seguido de simulaciones para analizar el comportamiento de la antena. Para ello se hará un análisis de tres antenas.

Ya se hemos explicado todas las características de los satélites de órbita polar baja, sabemos que están en constante movimiento y que nuestra estación receptora debe ponerse en marcha desde que un satélite cruza el horizonte, es visible, hasta que lo vuelve a cruzar, deja de ser visible, con esto se busca obtener imágenes con el máximo de cobertura; para ello nuestra antena debe de tener un **diagrama de radiación lo más omnidireccional posible en el semi-espacio superior**, esto quiere decir no tener nulos en el diagrama de radiación porque en estos puntos será en los cuales no podrá recibir ninguna señal.

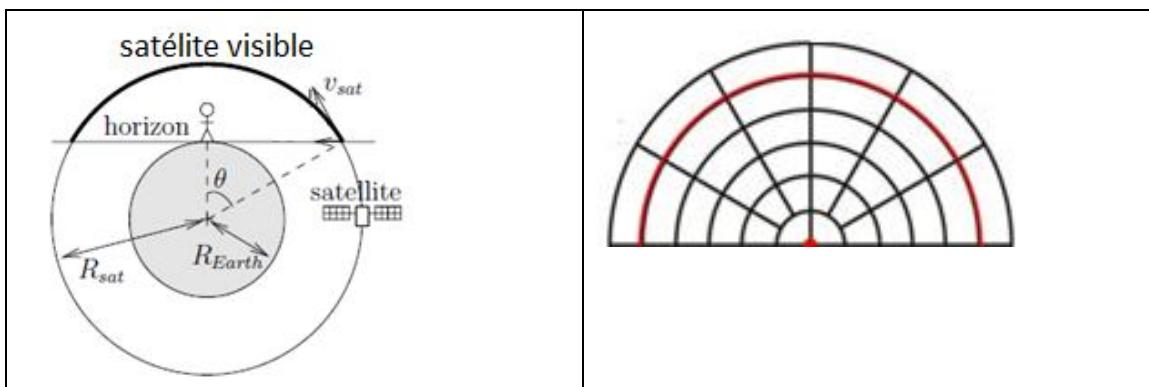


Figura 3-1 Derecha, diagrama de la trayectoria de un satélite de órbita polar baja sobre una estación receptora; izquierda, en rojo diagrama de radiación ideal de una antena para la recepción de imágenes trasmitidas por satélites de órbita polar baja.

Otra opción seria que la antena tenga un diagrama directivo y usar un motor que mueva la antena para hacer el seguimiento del satélite; descartamos esta opción porque es muy costosa.

Otro requisito que debe de cumplir nuestra antena es el **requisito eléctrico**, nuestra antena tiene que estar adaptada. Como la antena no esta conectada directamente al receptor y para conectarlos usamos un cable coaxial el cual se comporta como una línea de transmisión, necesitamos que la antena esta adaptada al cable coaxial para que no haya perdidas por reflexión.

La antena tiene que tener la misma polarización que el satélite, el satélite transmite con polarización circular porque con esta polarización evita las interferencias en la ionosfera.

3.1 Polarización circular

Las ondas electromagnéticas están compuestas por campos eléctricos y campos magnéticos, ambos campos son perpendiculares entre si y también los son a la dirección de propagación.

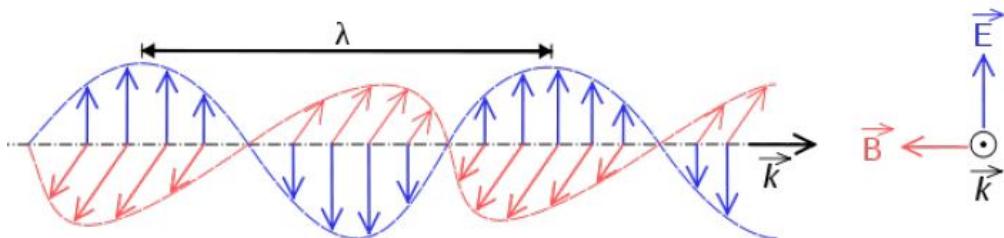


Figura 3.1-1 Onda electromagnética y sus dos componentes, campo eléctrico \vec{E} y campo magnético \vec{B} .

Donde \vec{K} es la dirección de propagación de la onda y λ una longitud de onda.

Para el estudio de la polarización de las ondas electromagnéticas se trabaja con los campos eléctricos; debido a que el vector de campo magnético puede obtenerse a partir del vector de campo eléctrico, pues es perpendicular y proporcional a él. Ahora para el estudio de la polarización los campos eléctricos se descomponen en sus componentes vectoriales perpendiculares, como se muestra en la figura siguiente (Figura 3.2), donde:

1. $x = \cos \alpha$
2. $y = \sin \alpha$
3. α es el ángulo de elevación del vector de campo eléctrico

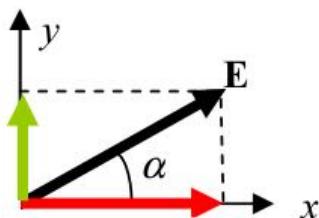


Figura 3.1-2: Campo eléctrico y sus componentes.

Como se ve en la figura 3.1, el campo eléctrico va variando su amplitud con respecto al tiempo, cada punto del campo eléctrico se puede descomponer en sus dos componentes (figura 3.2). Estas componentes son perpendiculares a la dirección de propagación. Ambas componentes van variando sus amplitudes en el tiempo y la suma de ambas va trazando una figura geométrica. Esta figura será la que definirá el tipo de polarización que tiene el campo. Si dicha figura es una recta, la polarización se denomina lineal; si es un círculo, la polarización es circular; y si es una elipse, la polarización es elíptica. En la siguiente figura se ve el campo eléctrico (azul) y sus dos componentes (rojo y verde) y el tipo de polarización que tiene (púrpura).

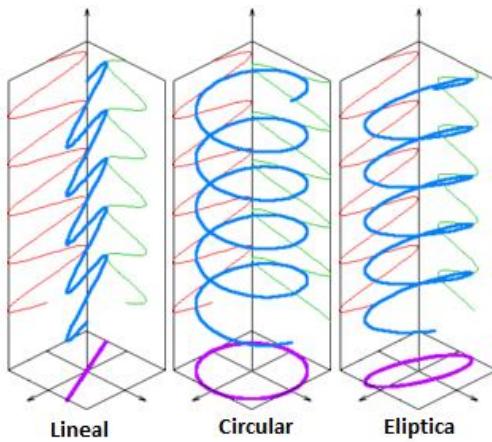


Figura 3.1-3: Tipos de polarizaciones.

En la figura de la izquierda, la polarización es lineal. Ésta se produce cuando ambas componentes están en fase (con un ángulo de desfase nulo, cuando ambas componentes alcanzan sus máximos y mínimos simultáneamente) o en contrafase (con un ángulo de desfase de 180° , cuando cada una de las componentes alcanza sus máximos a la vez que la otra alcanza sus mínimos). La relación entre las amplitudes de ambas componentes determina la dirección de la oscilación, que es la dirección de la polarización lineal.

En la figura central, las dos componentes ortogonales tienen exactamente la misma amplitud y están desfasadas exactamente 90° . En este caso, una componente se anula cuando la otra componente alcanza su amplitud máxima o mínima. Se pueden dar dos tipos de casos en esta polarización, esto depende de si la componente X esta adelantada o retrasada 90° , esta relación define el tipo de giro del campo eléctrico (horario o anti-horario)

En la tercera figura, se representa la polarización elíptica. Este tipo de polarización corresponde a cualquier otro caso diferente a los anteriores, es decir, las dos componentes tienen distintas amplitudes y el ángulo de desfase entre ellas es diferente a 0° y a 180° (no están en fase ni en contrafase).

3.2 Estudio de antenas para recepciona de imágenes de satélites de orbita polar baja

Se estudiara tres tipos de antenas, la antena de dipolos cruzados, antena de dipolos cruzados doble y cuadrifilar helicoidal. Se estudia la primera porque es la antena más básica y sencilla de construir; la segunda y la tercera son las que mejores prestaciones presentan ya que cuentan con diagramas muy omnidireccionales.

Para el diseño de estas antenas se usa diferentes simuladores que estudian el comportamiento de las ondas electromagnéticas en estructuras metálicas. Lo que se busca es conseguir un diagrama de radiación lo más omnidireccional en el semi-espacio superior; porque la recepción se debe iniciar apenas el satélite cruce el horizonte hasta que se

pierda la señal y debe tener la misma potencia de recepción en todo el recorrido del satélite.

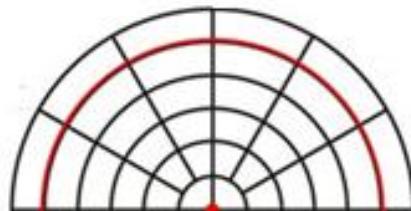


Figura 3.2-1 En rojo, diagrama de radiación ideal para una antena.

3.2.1 Antena de dipolos cruzados o turnstile

Se estudia esta antena porque es la más sencilla de construir, pero no es la más eficiente como se verá a continuación.

Está compuesta por dos dipolos cruzados y desfasados 90° para conseguir la polarización circular. Para conseguir el desfase se puede optar por una línea que retrase la señal $\lambda/4$. Según se retarde uno o el otro dipolo, la polarización será a derechas o izquierdas.

Un error caracteriza a esta antena es que en el horizonte tiene una polarización horizontal dando como resultado distorsiones al inicio y al final de la imagen. Esto se puede comprobar visualmente si se mira la antena desde el plano que contiene los dipolos, solo se ve un dipolo horizontal. Este error se solventa por lo general configurando el ángulo de recepción más alto. A medida que la antena se aleja más del horizonte la polarización va cambiando de horizontal a circular, se suele obtener una polarización totalmente circular en el cenit (punto que se encuentra por encima de la cabeza del observador).



Figura 3.2.1-1 Antena de dipolos cruzados con un plano conductor.

Para el diseño de estas antenas se usa diferentes simuladores que estudian el comportamiento de las ondas electromagnéticas en estructuras metálicas. El diseño se puede empezar combinando una línea de retraso entre los dos dipolos ortogonales, esta línea será la que hará el desfase de 90° ($\lambda/4$) entre los dos dipolos.

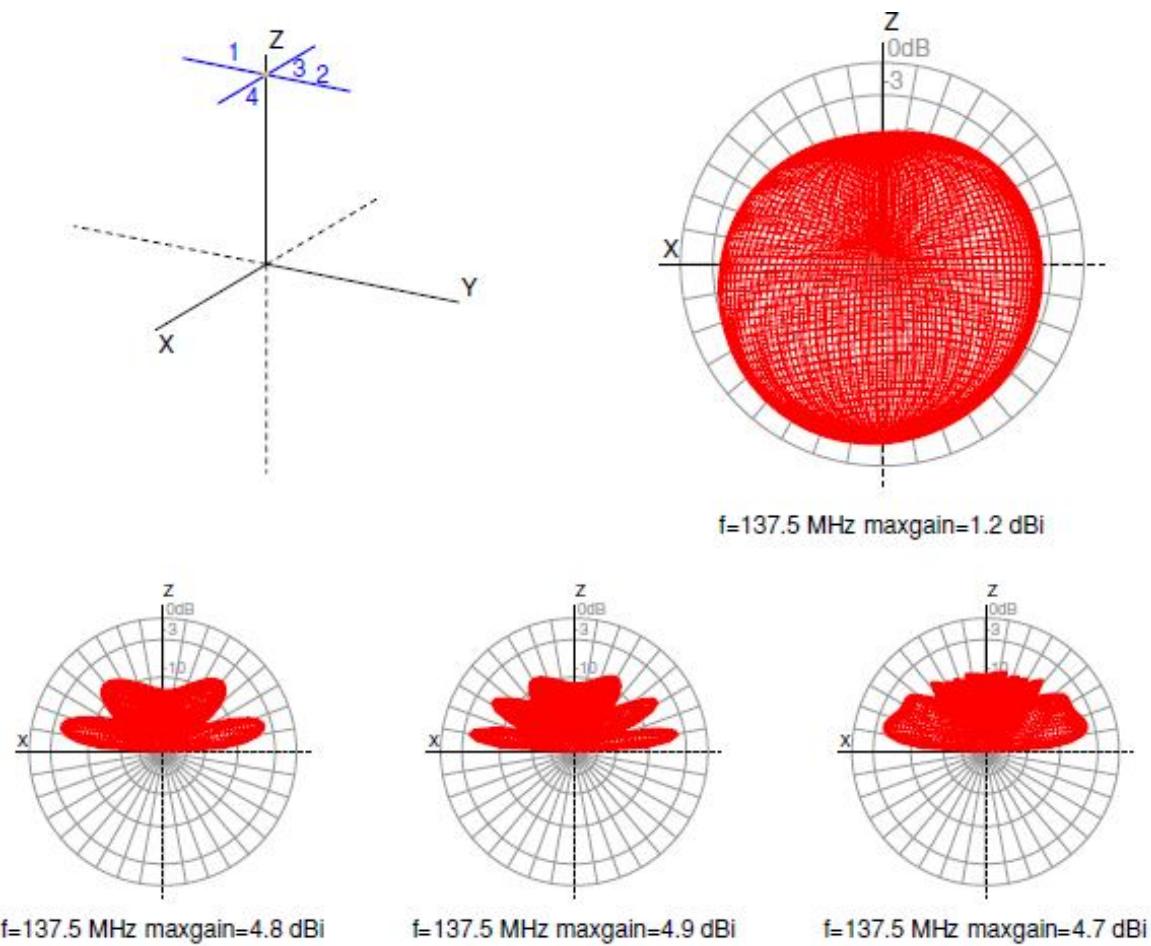


Figura 3.2.1-2 Graficas del diagrama de radiación de diferentes simulaciones para una antena de dipolos cruzados. Imagen del documento “Satellite image eavesdropping: a multidisciplinary science education project”.

En figura anterior se ve, en la parte superior izquierda, la antena y su posición sobre la tierra. En la parte inferior los 3 gráficos muestran los diferentes patrones de radiación dependiendo de la altura de la antena (de izquierda a derecha 2,1 m; 3,1 m; 23,1m).

Como se ve en los gráficos de los patrones de radiación para las diferentes alturas, el número de nulos incrementa si la altura de la antena aumenta. En general, consideramos que estarán presentes N nulos cuando la antena tendrá una altura de N longitudes de onda sobre la tierra.

En la base de la antena es recomendable usar una malla de alambre para que se asemeje al plano de la tierra y se tenga una buena “imagen” de la antena, otro factor importante para el diagrama de radiación de la antena es la altura a la cual está la antena de la tierra.

Se observa entonces que esta antena NO tiene un diagrama omnidireccional, tiene un diagrama más direccional en el cenit; por lo que no es una antena con las características que se buscan.

3.2.2 Antena de dipolos cruzados doble o Double Cross

Esta antena es una de las últimas que se ha estado estudiando por las buenas prestaciones que presenta, ya que tiene un buen diagrama omnidireccional pero tiene algunas desventajas como explicaremos a continuación.

La Double Cross es una antena que usa dos pares de dipolos cruzados para conseguir una polarización circular a derechas en todo el semi-espacio superior. Se basa en situar un par de dipolos cruzados sobre cada eje del plano horizontal.

Los dipolos de la double cross están inclinados respecto al eje vertical y cada pareja está separada por una distancia de $\lambda/4$.

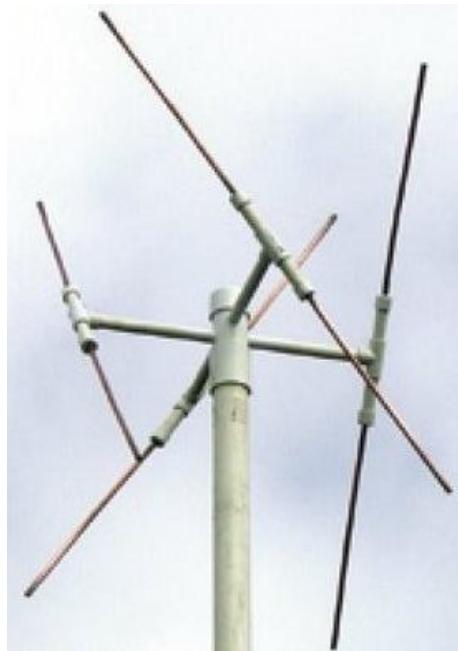


Figura 3.2.2-1 Antena de dipolos cruzados doble o double cross.

Primero analizaremos el comportamiento simulado de dos dipolos cruzados, para ello analizamos un gráfico del patrón de radiación de la simulación de estos dos dipolos cruzados en el espacio libre.

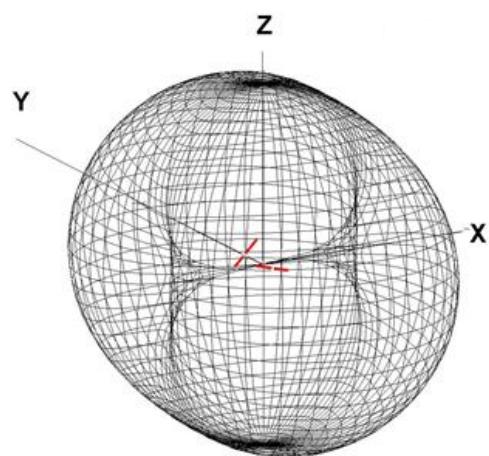


Figura 3.2.2-2 Diagrama de radiación en el espacio libre en 3D con polarización circular generada por dos dipolos cruzados.

En la figura anterior se ve que la polarización es circular a lo largo de la dirección del eje Y, si se observa desde otra dirección se degrada a una polarización lineal. El problema de este diseño es que presenta los nulos en el eje X, para el diseño se busca que no tenga nulos porque si se el satélite aparece por el eje X la antena no recibirá ninguna señal por tener nulos en ese eje. Se busca que no tenga nulos en el plano XY porque el satélite puede empezar su transmisión desde cualquier punto de este plano.

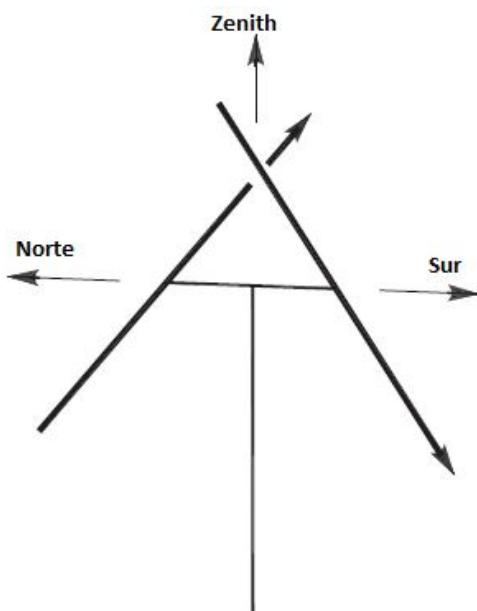


Figura 3.2.2-3 Vista lateral de dos dipolos espaciados $\lambda/4$ y alimentados en fase, con la polarización indicada por las flechas.

El nulo en el patrón de radiación en el eje x se puede arreglar agregando un par de dipolos cruzados. Si el segundo par de dipolos se alimenta con un desfase de 90° respecto al primer par de dipolos entonces se tendrá un patrón de radiación con polarización circular.

Luego de la simulación de una double cross se obtiene el siguiente gráfico:

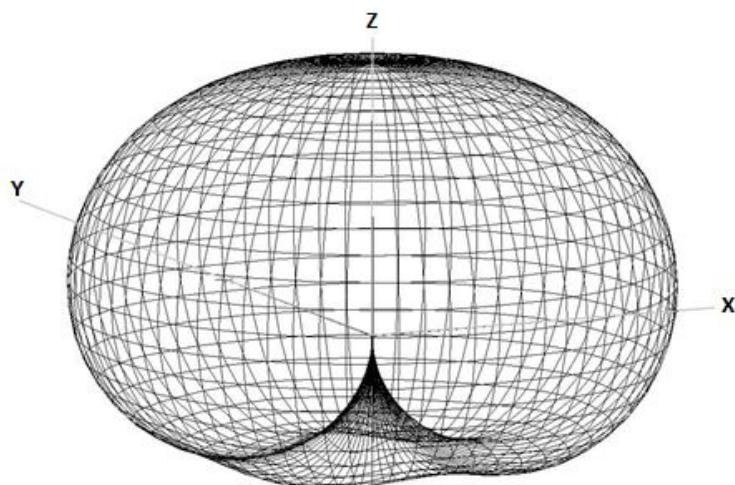


Figura 3.2.2-4 Diagrama de radiación en el espacio libre en 3D con polarización circular generada por una Double Cross.

Para el diseño de esta antena, como se explicó anteriormente, el segundo par de dipolos tiene que estar desfasado 90° con respecto al primer par; entonces, lo que hace es que el segundo par de dipolos tenga una longitud de $\lambda/4$ más que el primer par, como se muestra a continuación.

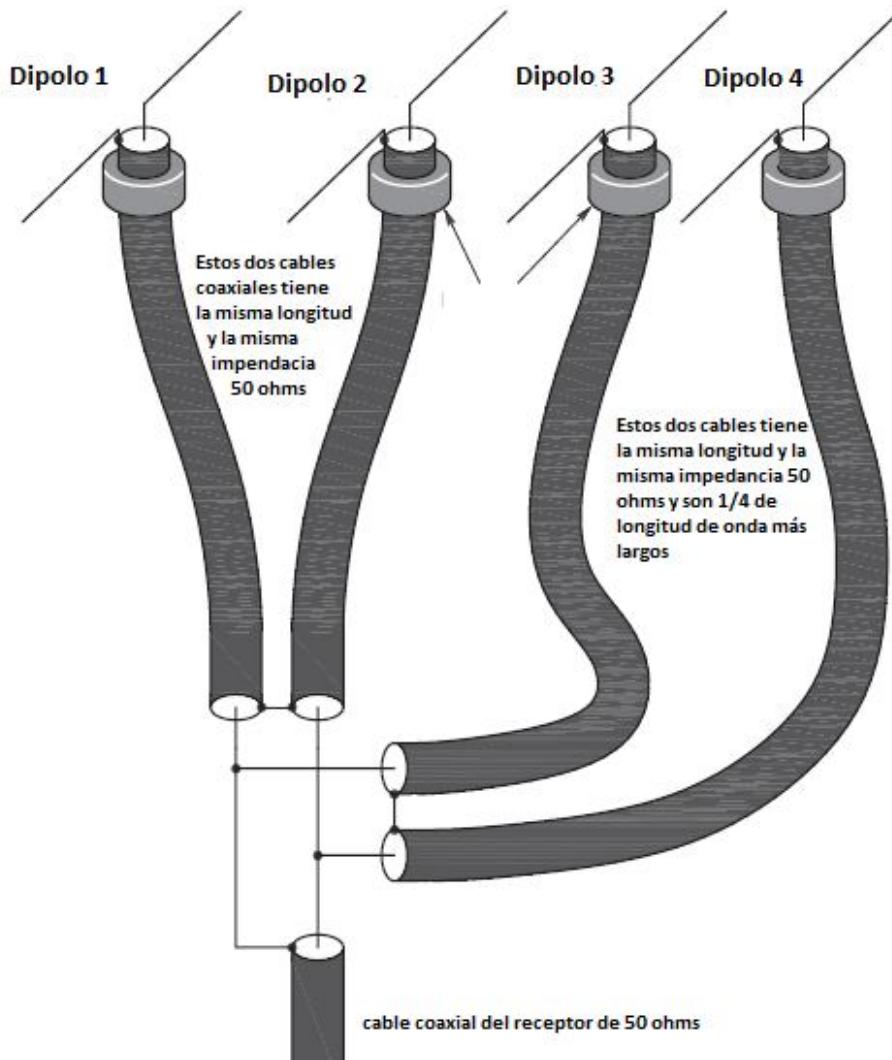


Figura 3.2.2-5 Diseño de una double cross usando cable coaxial de 50 Ohms.

Después de analizar esta antena en base a las simulaciones se llega a la siguiente conclusión, la antena tiene un buen diagrama de radiación omnidireccional pero tiene inconvenientes, porque tiene que estar a una gran altura (2 o 3 longitudes de onda) para obtener este diagrama de radiación y es sensible al ruido.

Esta antena es ideal para entornos rurales donde no hay obstáculos ya que así se sus buenas características de recepción en los horizontes. En entornos urbanos para que no disminuyan sus prestaciones la antena tiene que estar a una gran altura, para que no se vea afectada por los obstáculos; por lo que, en entornos urbanos esta antena se monta en

un mástil de 2 ó 3 longitudes de onda, esto implica usar anclajes para que la antena esté fija. Como se explica al final de esta memoria una aplicación posible para este proyecto sería la pesca; entonces la estación receptora se ubicaría en un barco, pero montar la antena sería muy complicado por los anclajes que se necesitaría.

3.2.3 Antena cuadrifilar helicoidal

Esta antena es la más recomendada por la literatura y es la antena que se ha escogido para trabajar en la recepción de señales trasmisidas por los satélites de órbita polar baja de la NOAA. En las próximas líneas se explicará por qué se ha escogido esta antena; además se realizará un estudio con mayor profundidad de las características de esta antena, como su modelo físico y su comportamiento simulado.

La antena cuadrifilar helicoidal es una antena compuesta de dos espiras, esta antena tiene una polarización circular a derechas en todo el semi-espacio superior. En las siguientes figuras se observa la estructura de la antena, en la cual se observa que se realiza una torsión de media circunferencia de las espiras que la componen.

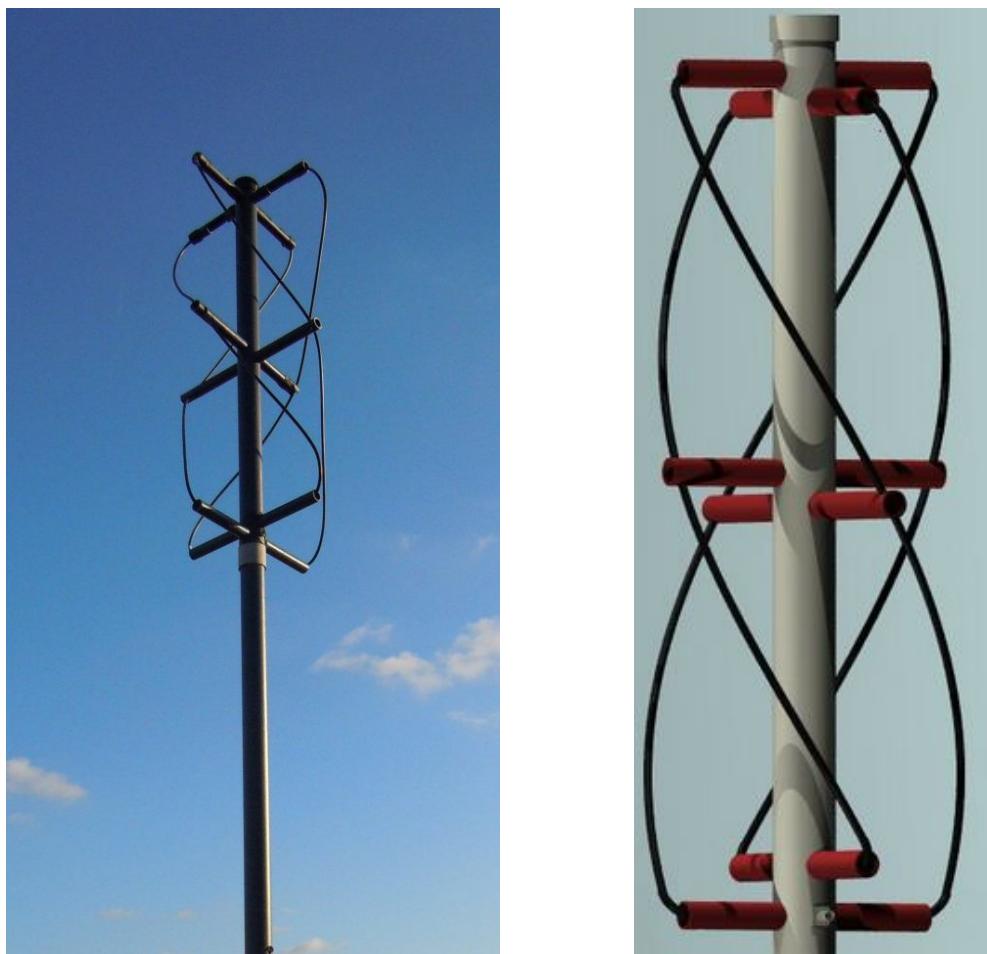


Figura 3.2.3-1 Antena cuadrifilar helicoidal.

Cabe indicar que en este proyecto se usa el término “espira” para referirnos a un lazo cuadrado torcido, más adelante se explicará con mayor detalle este proceso. Otros autores usan el término “hélice”; “anillo”, “lazo” o “loop” (en inglés sin traducirlo al español).

La antena cuadrifilar se basa en el diseño de una antena previa a esta, la cual consiste en una espira circular atravesada por un dipolo; además si la antena está alimentada correctamente se consigue una polarización circular a derechas en todo el espacio.

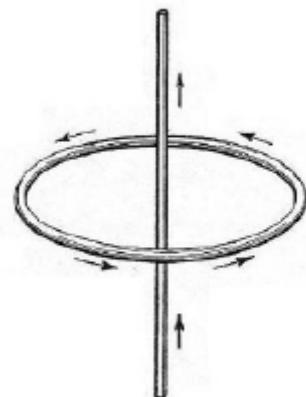


Figura 3.2.3-2 Espira circular atravesada por un dipolo.

Se puede describir a la antena cuadrifilar helicoidal (QHA) como una antena que se compone de dos espiras, las cuales vienen a ser dos circuitos bifilares helicoidales orientados en una mutua relación ortogonal sobre un eje común. Los terminales de cada circuito se alimentan en contrafase y las corrientes en las dos espiras tienen un desfase de +/- 90° entre ellos, este desfase hace posible la polarización circular. Al seleccionar la configuración apropiada de las espiras, una amplia gama de formas patrón de radiación está disponible. La forma básica de la QHA resonante fue desarrollada por el Dr. C.C. Kilgus del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad John Hopkins y fue publicada en diciembre de 1970 en la revista "The Microwave Journal". Desde entonces, muchas investigaciones se han hecho en el número de vueltas y las relaciones altura/diámetro ya que todo esto afecta al diagrama de radiación.

3.2.3.1 *Modelo físico de la antena cuadrifilar helicoidal*

El análisis físico de la antena se basa en dos partes:

- La primera parte es el modelo físico de la estructura de la antena, en esta parte se estudia la antena como una espira con torsión y el comportamiento de las corrientes que se aplican a esta y cómo se distribuyen.
- La segunda parte es el estudio de la antena como un circuito RLC (resistencia, inductancia y capacitancia), en esta parte se explica el sistema que se usa para conseguir que los lazos de la antena se alimenten con una fase correcta

1. Estudio de la antena cuadrifilar como una espira

En primer lugar, la antena cuadrifilar helicoidal se debe de comenzar analizando un circuito de lazo cuadrado de perímetro λ , donde cada lado tiene una longitud $\lambda/4$. La alimentación se sitúa en la mitad del lado inferior de la espira. Las corrientes en el circuito se distribuyen de forma que se crean dos nulos de

corriente, uno en cada mitad de los lados laterales, como se muestra en la siguiente figura.

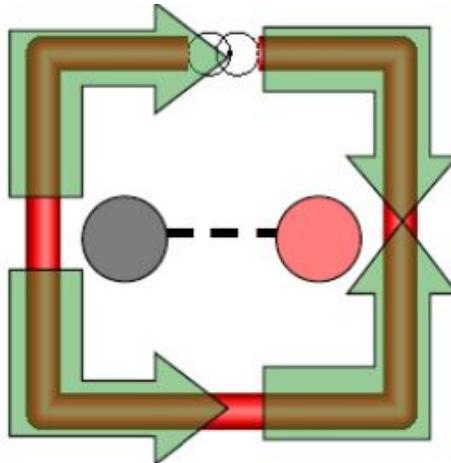


Figura 3.2.3.1-1 Circuito de lazo cuadrado de longitud λ y la dirección de sus corrientes.

Siguiendo con el desarrollo de la antena, se toma el lazo cuadrado y se tuerce sobre un cilindro imaginario, quedando constantes y paralelas las partes superior e inferior, los laterales quedan como una espiral que sigue la superficie del cilindro. Debido a la torsión, la distancia entre los lados superior e inferior se ve reducida, siendo ahora menor a $\lambda/4$. A pesar de eso, la distribución de las corrientes a lo largo de la espira será la misma, ya que no se ha variado la longitud total de la espira, como se muestra en la siguiente figura.

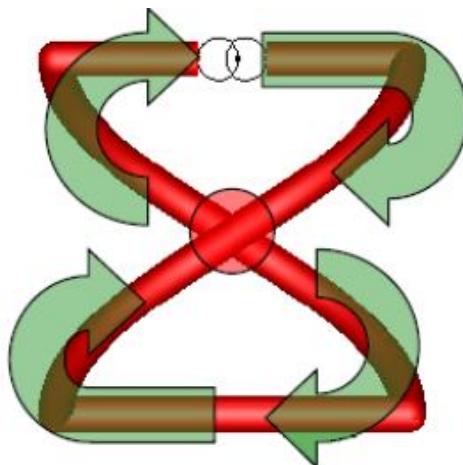


Figura 3.2.3.1-2 Espira de longitud λ y la dirección de sus corrientes.

Si en este último caso se mira la espira desde una gran distancia, se puede aproximar que las corrientes describen un circuito cuadrado. Así un modelo equivalente a “la espira” (Figura 3.2.3.1-2) es tener todas las corrientes recorriendo todo el circuito en el mismo sentido, como se muestra en la siguiente figura.

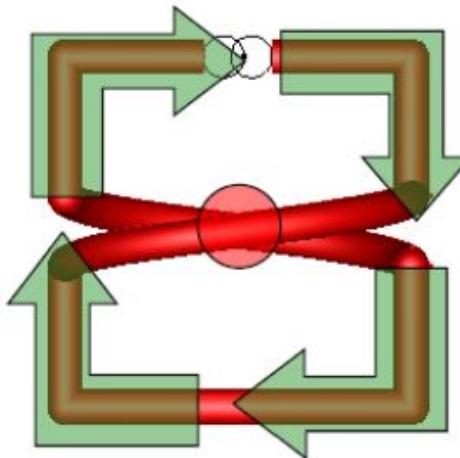


Figura 3.2.3.1-3 Modelo equivalente al modelo de la espira (Figura 3.2.3.1-2) vista desde una gran distancia, propuesto por C.C. Kilgus, y la dirección de sus corrientes.

La unión de dos espiras da como resultado el diagrama de radiación deseado, un diagrama casi omnidireccional en el semi-espacio superior y con polarización circular a derechas.

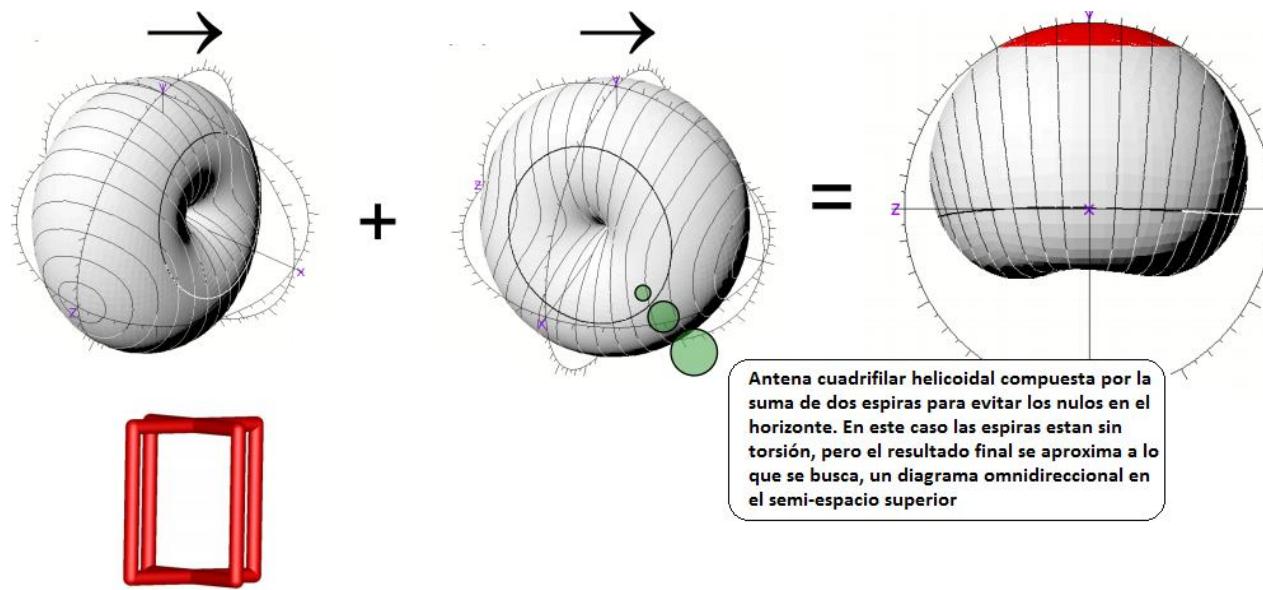


Figura 3.2.3.1-4 Antena QHA como la suma de los patrones de radiación de dos espiras (sin torsión) para evitar nulos en el horizonte.

Variando la relación entre la altura y la anchura del cuadrado, se puede variar el diagrama de radiación, haciéndolo más omnidireccional hacia los lados o más directivo hacia el cenit.

2. Estudio de la antena como un circuito RLC

Cuando se trabajan con frecuencias altas en corriente alterna, los circuitos comienzan a tener diferentes comportamientos (inductivos o capacitivos). Como la frecuencia del generador de la corriente alterna ya es significativa para el circuito lo que se hace es un estudio de un circuito RLC equivalente para el circuito.

Para el caso de la antena cuadrifilar helicoidal se analizara el comportamiento de sus dos espiras para frecuencias entre 137 y 138 MHz. Este el rango de frecuencias con las que se trabaja; porque los satélites de orbita polar baja NOAA trasmitten en este rango de frecuencias.

Para este análisis tomaremos a cada espira como una línea de trasmisión, la cual tendrá una impedancia igual a $R \pm jX$ como se ve en esta impedancia tiene un valor real e imaginario; donde R es la valor de la resistencia, además representa la parte real; X representa el valor imaginario, si es positivo (+) entonces es inductancia y si es negativo (-) entonces es capacitancia. La impedancia varía su valor en función de la longitud de la línea de transmisión.

Para trabajar con impedancias lo que se usara será la carta de Smith, la cual es una herramienta grafica que nos ayuda a graficar el valor real e imaginario de una impedancia normalizada y con esto evitar realizar cálculos con números complejos. Las espiras de la antena cuadrifilar helicoidal se tomaran como líneas de transmisión de longitud λ y con ello analizar su impedancia en la carta de Smith como se muestra en la siguiente figura.

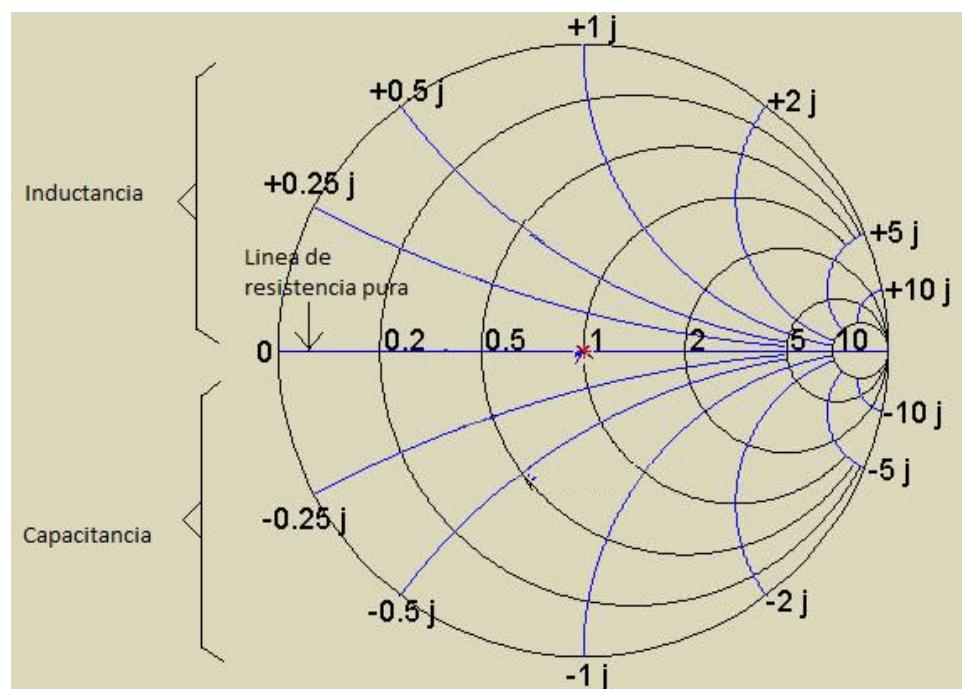


Figura 3.2.3.1-5 Carta de Smith para una línea de transmisión de longitud λ .

Como se observa en la figura anterior, la línea de trasmisión de longitud λ tiene una impedancia normalizada igual a 1 (punto rojo). Esta impedancia solo tiene parte real, $R \pm j0$. Si se aumenta la longitud de línea de transmisión entonces aparecerá un valor inductivo en la impedancia ($R_1 + jX_1$), pero si disminuye la longitud de la línea de transmisión entonces aparece un valor capacitivo ($R_2 - jX_2$).

Del análisis anterior se concluye que como se necesita un desfase de 90° entre las espiras que conforman la antena cuadrifilar helicoidal; entonces en una espira se reducirá su longitud y en la otra se aumentará su longitud, con ello se conseguirá el desfase buscado. Una alternativa es desfasar una espira -45° y la otra $+45^\circ$, para ello las partes reales e imaginarias de cada espira tienen que cumplir con la siguiente relación $R_1 = X_1$ y $R_2 = X_2$

Para la espira de mayor tamaño se tendrá un circuito equivalente RL y para la de menor tamaño un circuito RC; entonces para tener el circuito equivalente para una antena cuadrifilar helicoidal estos dos circuitos se deben de unir (figura)

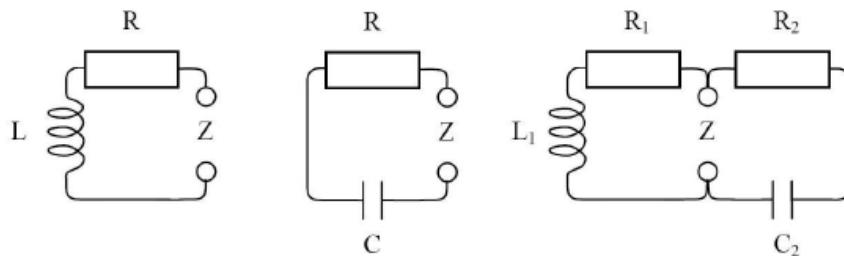


Figura 3.2.3.1-6 Izquierda, circuito RL (espira mayor que λ). Centro, circuito RC (espira menor que λ). Derecha, circuito RLC para una QHA.

En el circuito para la antena cuadrifilar helicoidal se observa que el circuito RC y RL están en paralelo por lo que la impedancia total será:

$$Z_{antena} = \frac{R_1 R_2 + X_1 X_2 + j(X_1 R_2 - X_2 R_1)}{R_1 + R_2 + j(X_1 - X_2)}$$

Aplicando la relación $R_1 = X_1 = \frac{Z_{RL}}{2}$ y $R_2 = X_2 = \frac{Z_{RC}}{2}$, entonces:

$$Z_{antena} = \frac{\frac{1}{2} Z_{RL} Z_{RC} + Z_{RL} Z_{RC} + j(Z_{RL} Z_{RC} - Z_{RL} Z_{RC})}{Z_{RL} + Z_{RC} + j(Z_{RL} - Z_{RC})} = \frac{Z_{RL} Z_{RC}}{Z_{RL} + Z_{RC} + j(Z_{RL} - Z_{RC})}$$

Por ultimo, forzamos que $Z_{RL} = Z_{RC}$, entonces:

$$Z_{antena} = \frac{Z_{RL}}{2} = \frac{Z_{RC}}{2}$$

Una conclusión importante de los cálculos anteriores es que la antena es resonante, ya que no tiene valores imaginarios en su impedancia; además que el desfase de 90° para tener una polarización circular se consigue usando la misma estructura de la antena.

3.2.3.2 Simulación de antena cuadrifilar helicoidal

Primero analizaremos el comportamiento simulado de la QHA, para ello se estudiara el diagrama del patrón de radiación en el espacio libre para diferentes relaciones de altura/diámetro. Se utilizarán las simulaciones que realizó Daniel Cañelles Bofarull en su proyecto final de carrera “Obtención de imágenes de satélites meteorológicos polares con una antena cuadrifilar”, las simulaciones se realizaron con el software FEKO.

En los casos que van a estudiar a continuación todas las medidas de las espiras son iguales a una longitud de onda.

1. El primer análisis a realizar será ver el caso de una QHA sin torsión:

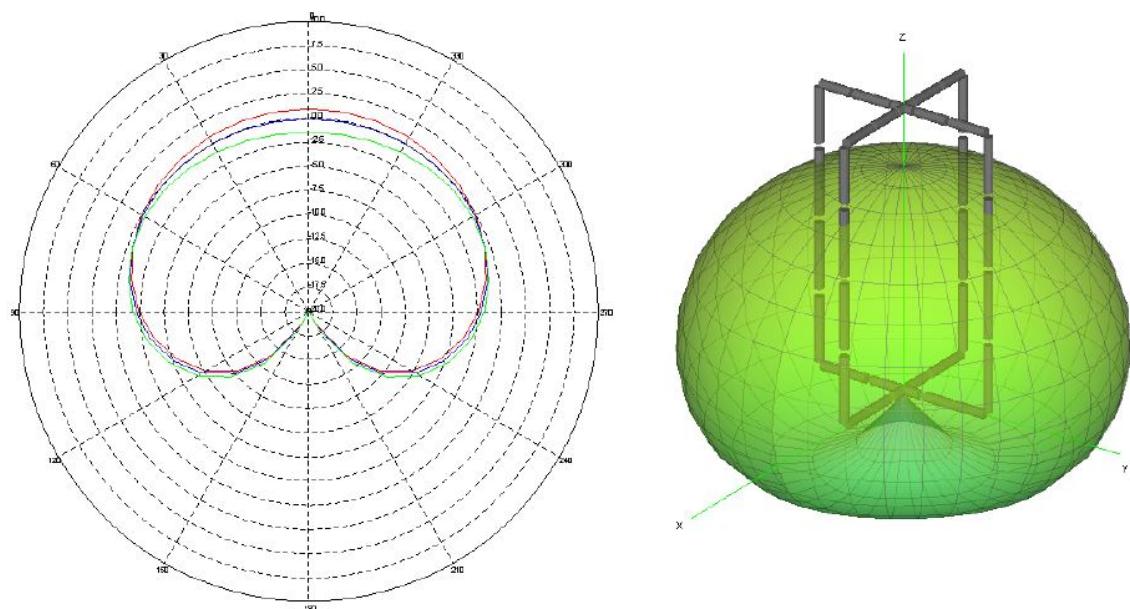


Figura 3.2.3.2-1 A la izquierda grafica del diagrama de radiación para tres casos diferentes de altura/diámetro y la derecha patrón de radiación en el espacio libre en 3D.

Altura/diámetro	Color	Ganancia en el Cenit	Ganancia a 30°	Ganancia a 60°	Ganancia a horizonte
50-50	Rojo	0.9dB	0.8dB	0dB	-2dB
60-40	Azul	-0.2dB	0dB	0dB	-2dB
70-30	Verde	-0.5dB	-1dB	-0.4dB	-1.5dB

Tabla 3.2.3.2-1 Leyenda de la grafica sin torsión.

En los tres casos los comportamientos son muy parecidos, pero para el caso de 50-50 se observa que se tiene mejores valores de ganancia; en general los valores de ganancia son muy bajos para los tres casos, por lo que no es una antena óptima.

Esta antena sin torsión ya nos muestra que se puede conseguir un diagrama del patrón de radiación que buscamos (omnidireccional en el semi-espacio superior).

2. El segundo análisis a realizar será ver el caso de una QHA con torsión de $\frac{1}{4}$ de circunferencia:

En los tres casos los comportamiento son muy parecidos; la conclusión más importante en esta simulación es que todos los valores de ganancia aumentan entre 2 y 3 dB con respecto a la simulación anterior, QHA sin torsión.

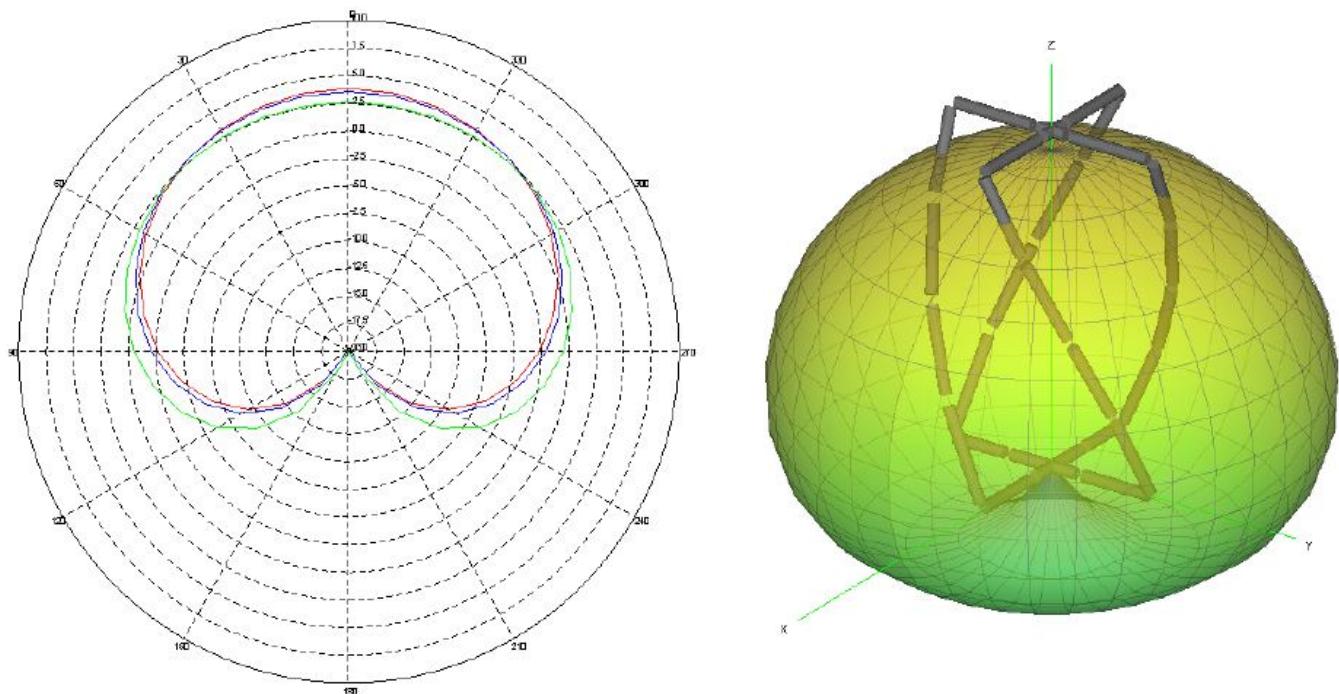


Figura 3.2.3.2-2 A la izquierda grafica del diagrama de radiación para tres casos diferentes de altura/diámetro y la derecha patrón de radiación en el espacio libre en 3D.

Altura/diámetro	Color	Ganancia en el Cenit	Ganancia a 30°	Ganancia a 60°	Ganancia a horizonte
50-50	Rojo	3.9dB	3dB	1.1dB	-2.7dB
60-40	Azul	3.5dB	3dB	1.6dB	-2dB
70-30	Verde	3.4dB	3dB	1.5dB	-2dB

Tabla 3.2.3.2-2 Leyenda de la grafica con torsión de $\frac{1}{4}$ de circunferencia.

En los tres casos los comportamiento son muy parecidos; la conclusión mas importante en esta simulación es que todos los valores de ganancia aumentan entre 2 y 3 dB con respecto a la simulación anterior, QHA sin torsión.

3. El tercer análisis a realizar será ver el caso de una QHA con torsión de 0.375 de circunferencia:

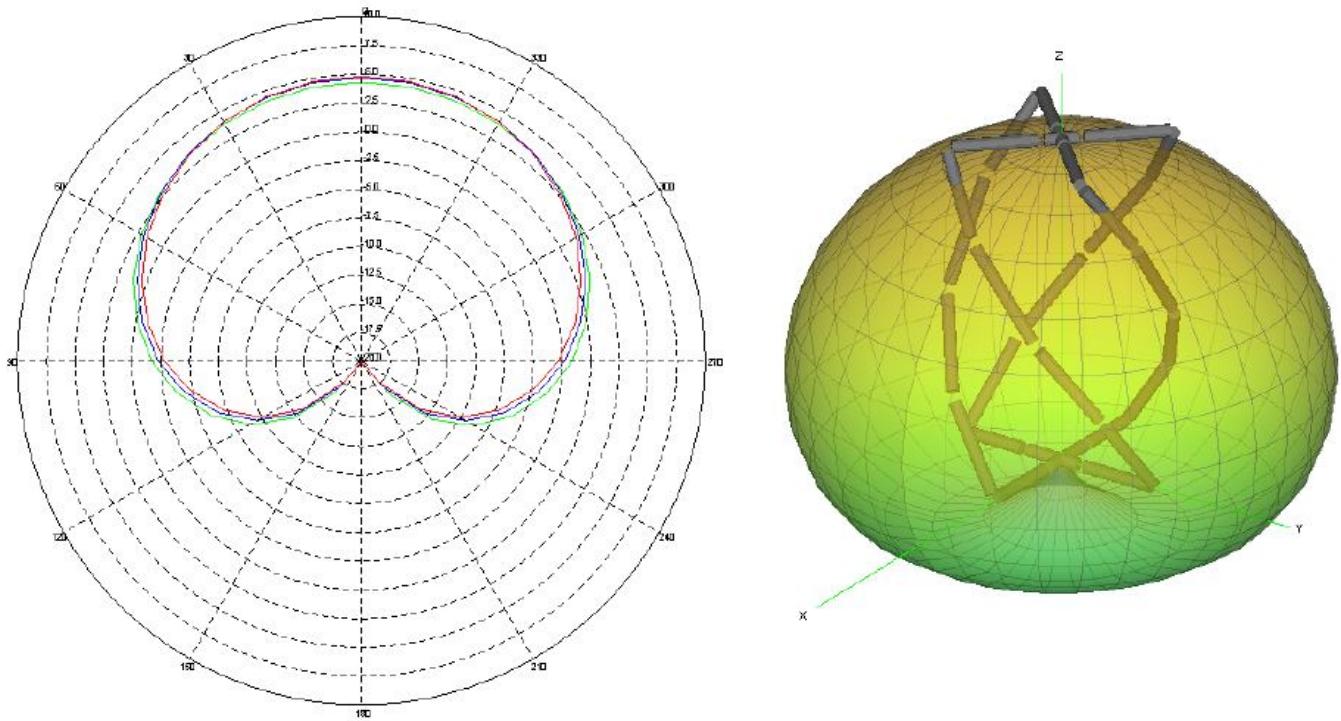


Figura 3.2.3.2-3 A la izquierda grafica del diagrama de radiación para tres casos diferentes de altura/diámetro y la derecha patrón de radiación en el espacio libre en 3D.

Altura/diámetro	Color	Ganancia en el Cenit	Ganancia a 30°	Ganancia a 60°	Ganancia a horizonte
50-50	Rojo	4.7dB	4dB	1.5dB	-3dB
60-40	Azul	4.5dB	4dB	2dB	-2.5dB
70-30	Verde	4.2dB	3.7dB	2.2dB	-1.7dB

Tabla 3.2.3.2-3 Leyenda de la grafica con torsión de 0.375 de circunferencia.

En esta simulación como en la anterior observamos que la ganancia mejora 1 dB respecto a la simulación anterior, QHA con un cuarto de torsión. No es una gran mejora pero se observa que a medida que se ha ido incrementando la torsión ha ido mejorando la ganancia.

4. El cuarto análisis a realizar será ver el caso de una QHA con torsión de media circunferencia:

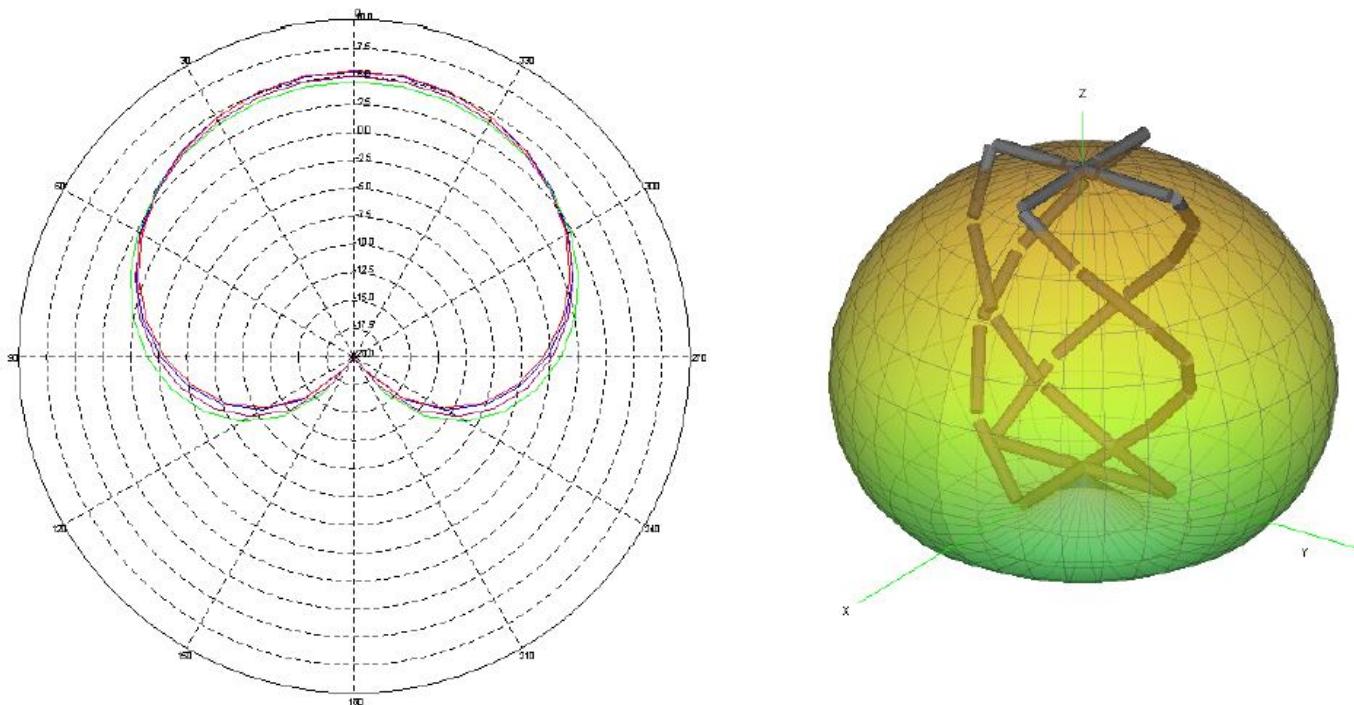


Figura 3.2.3.2-4 A la izquierda grafica del diagrama de radiación para tres casos diferentes de altura/diámetro y la derecha patrón de radiación en el espacio libre en 3D.

Altura/diámetro	Color	Ganancia en el Cenit	Ganancia a 30°	Ganancia a 60°	Ganancia a horizonte
50-50	Rojo	5.5dB	4.7dB	1.9dB	-3.1dB
60-40	Azul	5.5dB	4.7dB	2dB	-2.7dB
70-30	Verde	4.4dB	4.2dB	2.3dB	-1.5dB
80-20	Lila	5dB	4.2dB	1.9dB	-2.1dB

Tabla 3.2.3.2-4 Leyenda de la grafica con torsión de media circunferencia.

En esta simulación observamos que la ganancia mejora poco, en general aproximadamente 0.5 dB respecto a la simulación anterior, QHA con 0.375 de torsión; entonces seguir aumentando la torsión no dará resultados sustanciales de ganancia en la simulaciones por lo que ya no se realizarán más simulaciones. Se ha añadido la relación de altura/diámetro de 80-20 para ver si se tiene mejores valores de ganancia haciendo la antena más alta y más angosta.

Como conclusión general para todas las simulaciones observamos que el mejor caso es la antena con una torsión de media circunferencia porque es la que tiene mejores ganancias con respecto a las simulaciones anteriores. Ahora para esta simulación el mejor caso de relación altura/diámetro es la de 70-30 porque aunque en el cenit no tenga la ganancia más alta tiene el comportamiento mas uniforme, ya que lo que se busca es un comportamiento lo más omnidireccional posible en el semi-espacio superior. La relación 70/30 se dice que tiene el comportamiento más uniforme posible; porque aunque tenga valores de ganancia muy parecidos a las otras medidas la ganancia que tiene en el horizonte es la mejor respecto a las otras medidas, esta medida es muy importante ya que de este valor depende cuando la estación receptora comenzara y finalizara la recepción de las señales que trasmiten los satélites.

Entonces esta antena tiene un excelente diagrama omnidireccional que es una de las características que tiene que tener nuestra antena; además, a diferencia de la antena de dipolos cruzados,esta antena necesita estar ubicada a poca altura (1 longitud de onda).

Mientras mejor sea la ganancia en el horizonte se cumple lo siguiente:

- Más pronto comenzará y más tarde finalizará la recepción por lo que como resultado se tendrá una imagen más completa.
- Se tendrá una mejor calidad de la señal tanto al comienzo como al final de la recepción lo cual se traduce como una imagen nítida en la parte inferior y superior.

En la figura siguiente se muestra el resultado del proceso de recepción donde el valor de ganancia en el horizonte es muy bajo (menor a -2dB aproximadamente), lo cual lleva a tener partes oscuras al inicio y al final de la imagen.

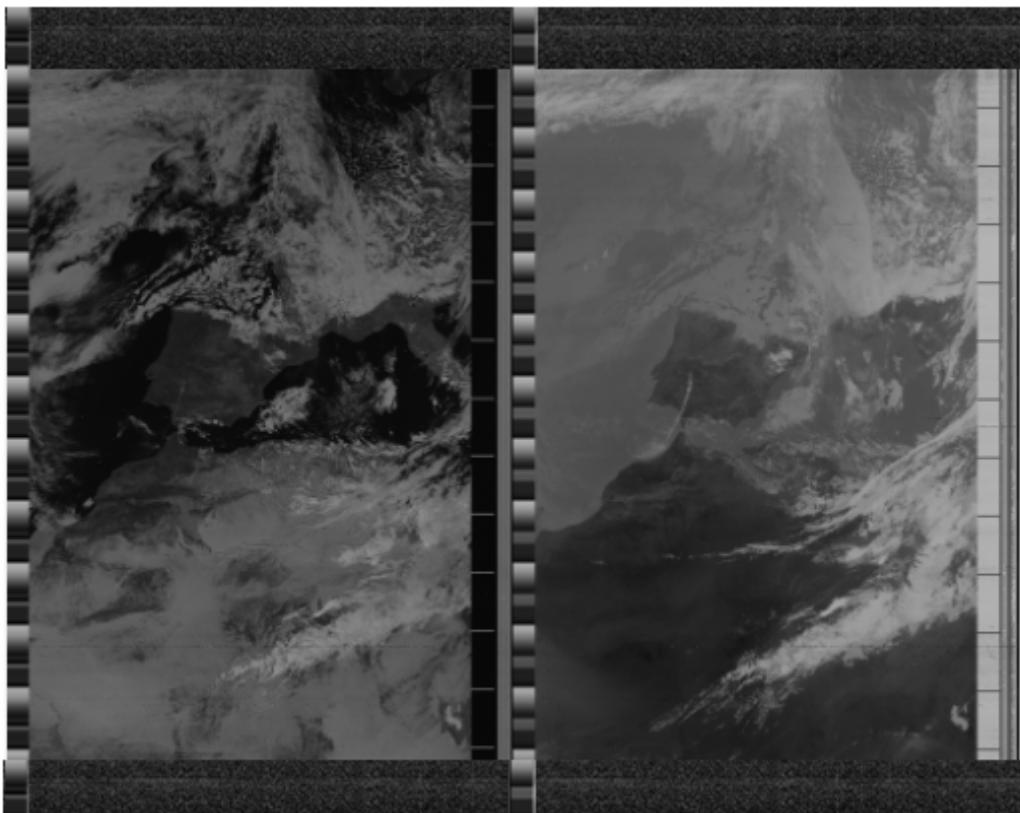


Figura 3.2.3.2-5 Resultado del proceso de recepción para una antena con valor de ganancia pequeño en el horizonte.

En este capítulo solo se ha hecho un análisis con simulaciones de uno de los requisitos de la antena, el cual es que tenga un diagrama omnidireccional; el otro requisito, la adaptación de impedancias se vera en el siguiente capítulo, ya que primero se tiene que construir la antena y luego realizar mediciones de su impedancia para comprobar que este adaptada (la impedancia de la antena tiene que ser de 50 ohms para una frecuencia de 137.5MHz). Por ultimo se realizaran las mediciones del diagrama de radiación de la antena para comprobar que las simulaciones son correctas.

Capítulo 4: Diseño y Construcción de la antena cuadrifilar helicoidal

Se procede a construir la antena luego de las simulaciones echas. En este capítulo se realizara la construcción de la antena con ayuda de una calculadora electrónica la cual recomienda toda la literatura. Después de la construcción de la antena se realizaran mediciones para comprobar que la antena cumpla, primero el requisito eléctrico, el cual es la adaptación de impedancias y en segundo lugar que tenga un diagrama omnidireccional para ello se medirá su diagrama de radiación.

Para la construcción de la parte radiante de la antena, las espiras, el material que se ha elegido es cable coaxial RG-58, porque este nos ofrece flexibilidad. Un problema que aparece en la construcción de la antena es la alimentación, ya que la antena tiene que ser simétrica. El uso del cable coaxial no tiene problemas de simetría, por los siguientes motivos:

- La impedancia no varía, ya que se conecta la antena a otro cable coaxial igual.
- Las corrientes externas se eliminan; porque las conexiones que se hacen entre una y otra espira, de la antena, hace que esta tenga un “Balun infinito adherente”, esto se explicara más adelante.

Para antenas hechas con otros materiales, cobre o aluminio por ejemplo, se tiene que pensar en hacerla simétrica de alguna manera, como por ejemplo usar un Balun infinito, transformador de impedancias o una inductancia.

4.1 Calculadora para construcción de una antena cuadrifilar helicoidal

Para profundizar más acerca del diseño y la construcción de la antena se consulto varias páginas y foros en Internet, en todas recomendaban usar la página [“http://jcoppens.com/ant/qfh/index.php”](http://jcoppens.com/ant/qfh/index.php) de John Coppens; porque en ésta se encuentra una calculadora donde una vez ingresados los datos básicos de la antena (Figura 4-1), genera un informe completo acerca de las espiras de la antena, como por ejemplo las longitudes de cable que se necesitan para cada espira.

Frecuencia de diseño	137.5	MHz
Cantidad de vueltas	0.5	<input type="button" value="▼"/>
Largo de una vuelta	1	<input type="button" value="▼"/> largos de onda
Radio del doblado	15	mm
Diámetro del conductor	6	mm (valor óptimo: - mm)
Relación diámetro/altura	0.429	
	<input type="button" value="Calcular"/>	

Figura 4.1-1 Pantalla de la calculadora de la página [“http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php”](http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php) con los datos básicos de la antena cuadrifilar helicoidal.

La página originalmente está en inglés, pero ésta tiene la opción de cambiar de idioma a español. Cabe indicar que las traducciones de algunos términos no son los mismos que se han usado en esta memoria; como por ejemplo en esta página el término “longitud total de una vuelta” se refiere a la longitud total de la “espira”. A continuación se explica los datos que pide la calculadora:

- Frecuencia de diseño: es la frecuencia con la que trabaja nuestra antena, nuestra antena trabaja en el rango de 137 a 138 MHz, ya que los satélites de órbita polar baja NOAA tienen sus frecuencias en ese rango; por lo que se escoge la frecuencia intermedia de este rango.
- Cantidad de vueltas: ese valor se refiere a la torsión que tendrá la espira; por lo que, como se analizó y se concluyó en el capítulo anterior, el valor de torsión más óptimo para esta antena es de media circunferencia.
- Largo de vuelta: este valor se refiere a la longitud total de la espira. En el estudio teórico de esta antena, en el capítulo anterior en la parte “Modelo físico de una antena cuadrifilar helicoidal”, se comenzó indicando que la longitud de las espiras sería de una longitud de onda.
- Radio del doblado: como se ve en la estructura de la antena, al final de cada brazo se dobla el cable (Figura 4-2), de forma que queda como un arco de circunferencia. El radio de doblado se toma en cuenta en esta calculadora, porque influye en la altura de la antena. Si aumenta el radio de doblado, la altura de la antena disminuirá; ya que, la longitud de la espira tiene que ser constante e igual a una longitud de onda.

Para esta antena escogemos un valor de 15mm. Este valor está en el orden de los milímetros (mm) porque los radios de doblado son siempre pequeños.

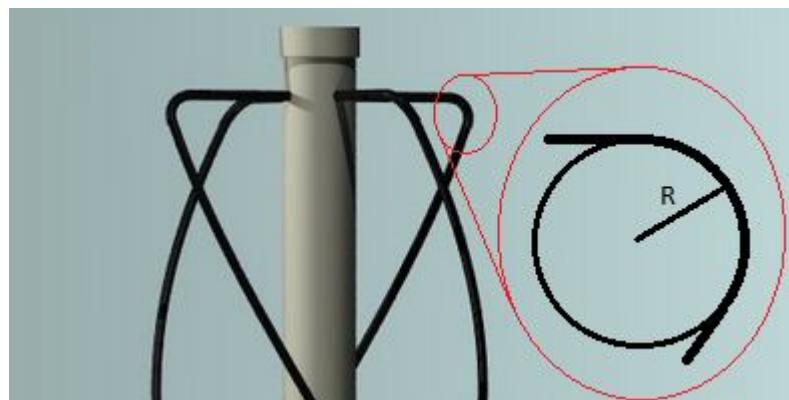


Figura 4.1-2 Gráfico del radio de doblado.

- Diámetro del conductor: esta antena puede estar construida con diferentes conductores, para esta antena se ha decidido usar un cable RG-58 el cual tiene un diámetro total de 6mm.
- Relación diámetro/altura: luego de las simulaciones se llegó a la conclusión que la mejor relación altura/diámetro era la 70/30; para este caso sería 30/70 porque la calculadora usa la relación inversa. El valor 30/70 será igual a 0.429 pero se aproxima a 0.44.

Una vez ingresados los datos en la calculadora, ésta nos genera un informe de las longitudes de la espira larga y de la espira corta. En el Capítulo anterior en la parte del estudio del “Modelo físico de una antena cuadrifilar helicoidal” como un circuito RLC, se concluyó que esta antena está formada por dos espiras de tamaños diferentes para poder tener un circuito RLC el cual tendrá que ser resonante a 137.5MHz.

A continuación se muestran los resultados de la calculadora:

<u>Largo de onda</u>	2181.8 mm
<u>Largo de onda compensado</u>	2334.5 mm
<u>Corrección por doblado</u>	6.4 mm

Cuadro grande	
<u>Largo total</u>	2395.2 mm
<u>Separación vertical</u>	888.7 mm
<u>Largo total compensado</u>	2420.9 mm
<u>Separación vertical compensada</u>	858.7 mm
Altura antena	H1 731.1 mm
Diámetro interno	Di1 315.7 mm
Separador horizontal	D1 321.7 mm
Separador horz. compensado	Dc1 291.7 mm

Cuadro chico	
<u>Largo total</u>	2276.1 mm
<u>Caño vertical</u>	845 mm
<u>Largo total compensado</u>	2301.9 mm
<u>Caño vertical compensado</u>	815 mm
Altura antena	H2 695.1 mm
Diámetro interno	Di2 299.8 mm
Separador horizontal	D2 305.8 mm
Separador horz. compensado	Dc2 275.8 mm

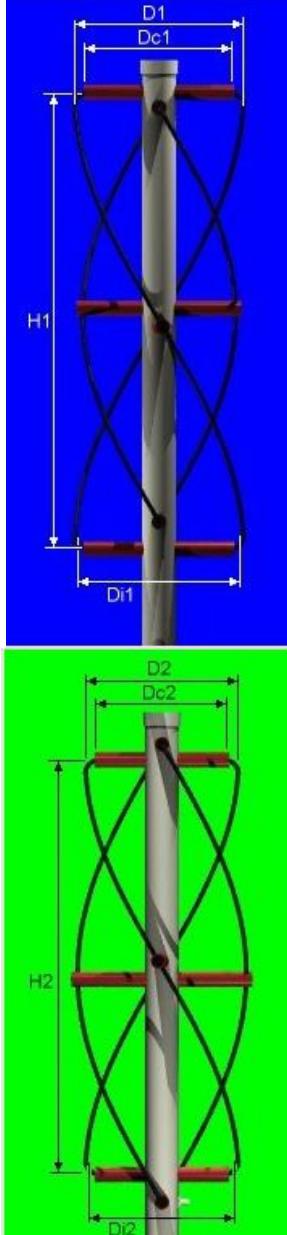


Figura 4.1-3 Resultados de la calculadora de la pagina
[“http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php”](http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php) para la construcción de una antena cuadrifilar helicoidal.

A continuación se explican los términos nuevos de los resultados de la calculadora:

- Largo de onda (compensada): Largo de onda se refiere a la longitud en milímetros (mm) de una longitud de onda. El valor compensado aparece porque se toma en cuenta el efecto del diámetro del conductor.
- Corrección por doblado: Valor de la corrección por doblado.
- Largo total del lazo (compensado): Largo total de la espira. El valor compensado indica el efecto del doblado, y la necesidad de aumentar el tamaño de la espira levemente.
- Separación vertical: Largo de la espira.
- Separación vertical compensada: Este valor como en el “largo de onda compensado” aparece por el efecto del diámetro del conductor. Este valor no toma en cuenta el doblado en cada brazo.
- Separador horizontal: Ancho de la espira.
- Separador horizontal compensado: Este valor viene a ser la longitud del tubo horizontal. Este valor no toma en cuenta el doblado en cada brazo.



Figura 4.1-4 Separación horizontal (D) y separación horizontal compensada (Dc)

4.2 Comprobación de los resultados de la calculadora

Después de ver estos datos, procedemos a hacer cálculos numéricos para hallar la longitud de onda y los valores de las longitudes de cada espira para comprobar si la calculadora funciona bien, porque si funciona bien, podemos realizar diferentes diseños de la antena cuadrifilar helicoidal. Como por ejemplo cambiar la frecuencia de trabajo, el número de vueltas, etc.

Longitud de onda: $\lambda = v/f$

Donde:

- v = velocidad de propagación, en el vacío tiene un valor de $c= 300 \times 10^6 \text{ m. s}^{-1}$ y para un cable coaxial RG-58, según su hoja de especificaciones, tiene un valor igual al 66% de la velocidad de propagación en el vacío (0.66 c)
- f = frecuencia de trabajo, igual a 137.5 MHz.

Para la velocidad de propagación en el vacío:

$$\lambda = \frac{300 \times 10^6 \text{ m. s}^{-1}}{137.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2.1818 \text{ m} = 2181.8 \text{ mm}$$

Para la velocidad de propagación en el cable RG-58:

$$\lambda = \frac{0.66(300 \times 10^6 \text{ m. s}^{-1})}{137.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 1.44 \text{ m} = 1440 \text{ mm}$$

Los dos resultados anteriores de la longitud de onda son muy diferentes; entonces se tiene que escoger trabajar con un valor de la velocidad de propagación. Se han consultado el trabajo de R.W. Hollander "WORKING GROUP SATELLITES: Resonant Quadrifilar Helix Antenna" donde en el diseño de la antena trabaja con la velocidad de propagación en el espacio ($c = 300 \times 10^6 \text{ m.s}^{-1}$).

Otro valor a comprobar es la longitud de las espiras. Como se vió en el capítulo anterior en el estudio de la antena como un circuito RLC, se concluyó que la antena tenía que ser resonante y que sus dos espiras deben de tener tamaños diferentes; entonces, lo que se agregue a una espira se deberá restar a la otra para que la antena sigan siendo resonante. A continuación se explica los cálculos del trabajo de R.W. Hollander:

- $c = 300 \times 10^6 \text{ m.s}^{-1}$, entonces $\lambda = 2181.8 \text{ mm}$
- Hollander aproxima este valor a $\lambda = 2180 \text{ mm}$, entonces aplica un valor de corrección llamado "porcentaje de elongación" del 7.2% de la longitud de onda, el cual se sumara a la longitud de onda
- La nueva longitud de onda será $\lambda = 2180 + \frac{7.2}{100} (2180) = 2338.05 \text{ mm}$. Este valor en la calculadora se llama "largo de onda compensado" y tiene un valor muy próximo igual a 2334.5 mm
- Para hallar el valor de las longitudes de las espiras, Hollander usa un valor llamado "desviación media" igual al 2.5% de la longitud de onda, entonces este valor será: $\frac{2.5}{100} \times 2338.05 = 59.15 \text{ mm}$
- Espira grande: $L_G = 2338.05 + 59.1 = 2397.15 \cong 2397.1 \text{ mm}$
- Espira pequeña: $L_P = 2338.05 - 59.1 = 2278.95 \cong 2218.9 \text{ mm}$
- Luego aplica una relación diámetro/altura de 0.44. Para la calculadora esta relación es de $\frac{30}{70} = 0.429$; pero se approximó a 0.44 para poder realizar la comprobación.
- En el siguiente cuadro se compara los tamaños de la espira antes de aplicarle la torsión, según Hollander y la calculadora. Los valores de la tabla son valores que toman en cuenta el efecto del doblado en los brazos o lo que se llama separaciones verticales y horizontales compensadas en la calculadora.

	Hollander	Calculadora
Ancho (espira grande)	$146.8 \times 2 = 293.6 \text{ mm}$	291.7 mm
Largo (espira grande)	857.9 mm	858.7 mm
Ancho (espira pequeña)	$138.9 \times 2 = 277.8 \text{ mm}$	275.8 mm
Largo (espira pequeña)	814.5 mm	815 mm

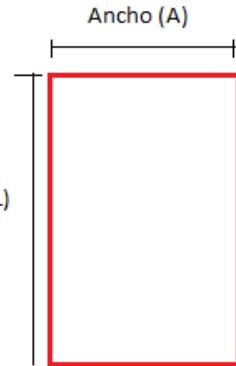


Figura 4.2-1 Estructura de la espira antes de la torsión.

La conclusión a la que se llega luego de los cálculos es que la calculadora funciona bien; por lo que se procede a la construcción de la antena.

4.3 Construcción de la antena

Usaremos los datos de la figura 4.1-3 Resultados de la calculadora de la pagina "<http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php>" para la construcción de una antena cuadrifilar helicoidal.

Los materiales a usar para construcción son:

- 5 metros de cable coaxial RG-58
- Tubo PVC de 4 cm de diámetro de 2 metros de altura, el cual se usara para el mástil
- Tubo PVC de 1.5 cm de diámetro de 2 metros, que se usara para los brazos de la antena.
- 4 o 5 borneras para las conexiones entre las espiras

Los pasos a seguir en la construcción de la antena son:

1. Se corta los tubos de 1.5 cm para hacer los brazos superiores e inferiores de la antena. 2 piezas de 27.5 cm y 2 piezas de 29 cm. En la siguiente figura se muestra un tubo de 27.5 cm y otro de 29 cm.



Figura 4.3-1 Brazos de la antena.

2. Se cortan otros dos tubos para los brazos intermedios de la antena de 2 cm más de longitud, 29.5 cm y 31 cm; en estos se realiza dos agujeros distanciados 27.5 cm y 29 cm respectivamente.

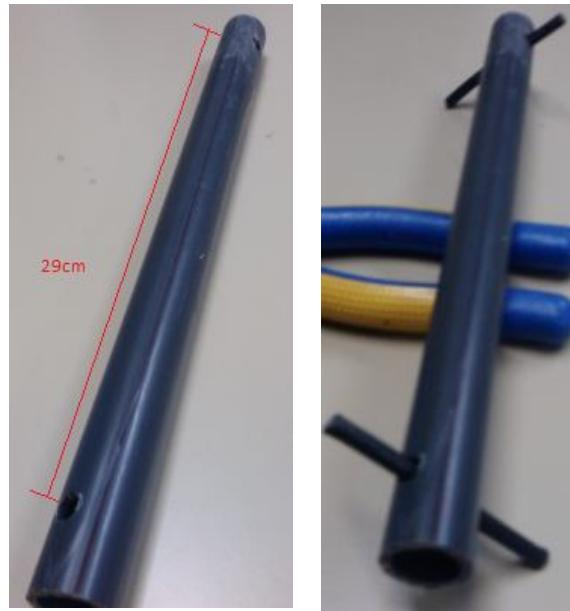


Figura 4.3-2 Uno de los brazos intermedio de la antena.

En la figura anterior los agujeros se hacen de esa manera para que puedan pasar los cables que formarán la espira.

3. En el tubo de 4 cm de diámetro se realiza los cortes necesarios para que los tubos que formaran los brazos lo atraviesen. En al calculadora indica que los cortes estén hechos con una separación de 731.1 mm (H1) para la altura de la espira grande y a 695.1 mm (H2) para la altura de la espira pequeña. Se aproxima H1=73 cm y H2=69.5cm

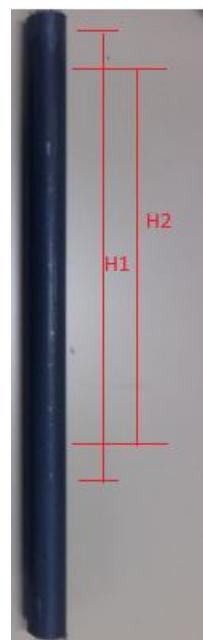


Figura 4.3-3 Alturas de las espiras de la antena.

4. Los agujeros que se hacen en el mástil tienen que ser de 1.5cm de diámetro para que los brazos puedan pasar. Es recomendable hacer los agujeros unos milímetros más pequeños y luego con ayuda de una lija ir agrandando poco a poco el agujero; porque, es conveniente que los brazos estén firmes ya que la antena se colocara en el techo del edificio y se someterá a vientos de gran fuerza.

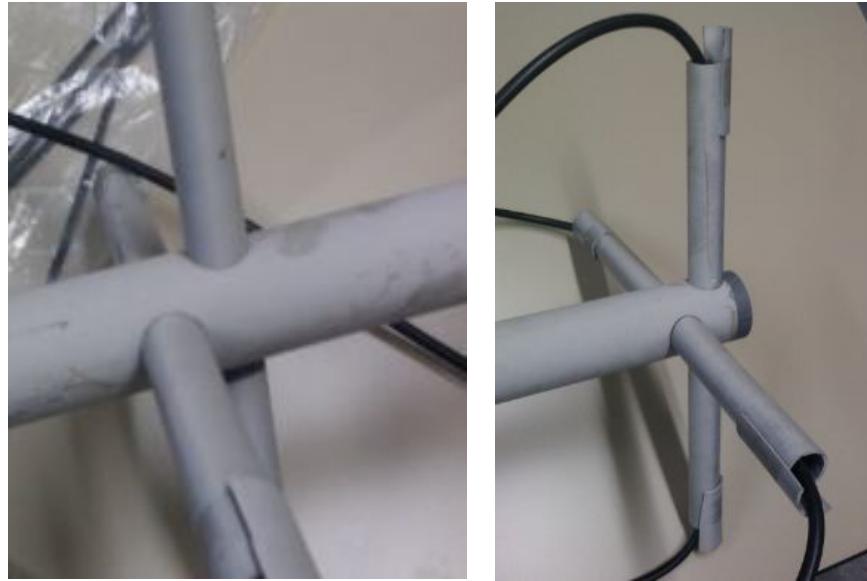


Figura 4.3-4 Brazos de la antena cruzando el mastil. Izquierda brazos intermedios.
Derecha brazos superiores.

5. Se cortan el cable, según la calculadora la espira grande tiene que tener una longitud total de 2395.2 mm y la espira pequeña una longitud de 2276.1 mm . Las longitudes se aproximan a 239.5 cm y 227.6 cm , para la espira grande y pequeña respectivamente.
6. El cable de la espira grande lo cortamos por la mitad; porque como se explicó al inicio de este capítulo esta antena tiene un “Balun infinito adherente”. En la siguiente figura se muestra la manera de realizar las conexiones entre las espiras para conseguir que la antena sea simétrica.

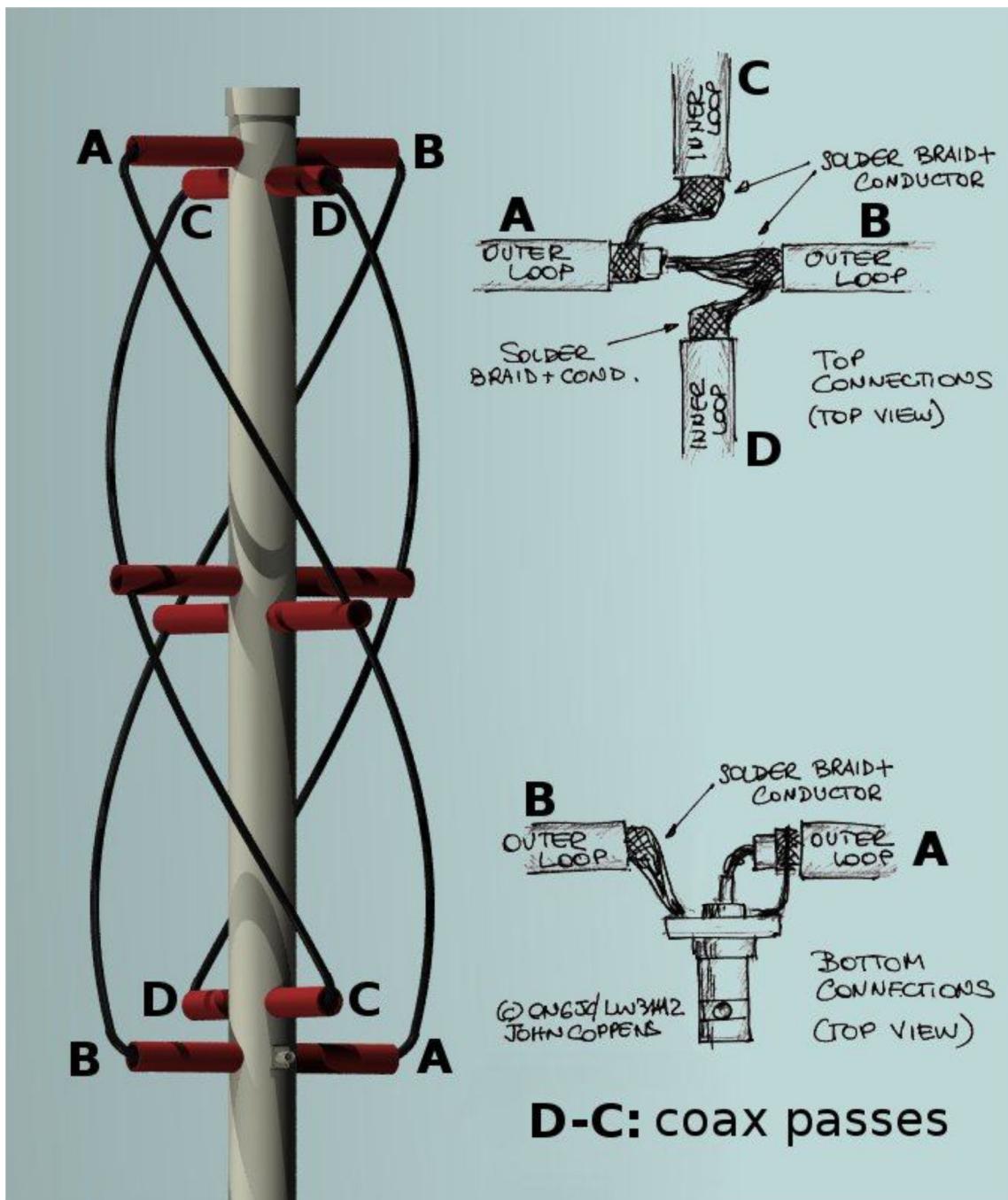


Figura 4.3-5 Antena cuadrifilar helicoidal y conexiones entre los cables de las espiras. Figura sacada de la página de John Coppens

La figura anterior muestra un gráfico de la antena, donde usa las letras A y B para espira grande; y las letras C y D para la espira pequeña. El motivo de usar letras es para indicar la manera de realizar las conexiones entre las espiras, tanto en la parte superior e inferior de la antena.

En los tramos B, C y D se usa el cable coaxial como un conductor único, por ese motivo se sueldan la malla y el núcleo del cable coaxial; pero en el tramo A se usa la malla del cable para formar el “Balun infinito” es por ello que es adherente, porque no usa otro material, usa el mismo cable.

7. En la construcción de la antena, en los empalmes se optó por usar borneras, para tener una mayor facilidad a la hora de realizar los empalmes.



Figura 4.3-6 Empalmes usando borneras, en la parte superior de la antena.

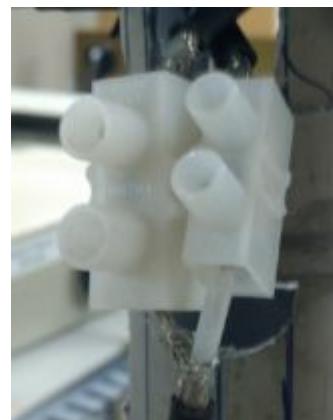


Figura 4.3-7 Empalmes usando borneras, en la parte inferior de la antena.

4.4 Analizador de antenas RigExpert AA-520

Una vez terminada la antena, se procede a comprobar su impedancia para una frecuencia de resonancia de 137.5 MHz. Para ello se usa el equipo **RigExpert AA-520**, el cual es un potente analizador de antenas diseñado para comprobar, verificar, sintonizar o reparar antenas y líneas de alimentación en el margen entre 1 y 520 MHz. Con este equipo se realizarán gráficas de la impedancia del ROE (Relación o razón de Ondas Estacionarias)



Figura 4.4-1 RigExpert AA-520

Impedancia: Como se explicó en el capítulo 3, la impedancia de la antena tiene que tener solo una componente real, $R \pm j0$, a una frecuencia de 137.5 MHz, la cual es la frecuencia de resonancia. La impedancia de la antena será igual a la impedancia de sus espiras las cuales tienen, para la frecuencia de resonancia, un valor igual a la impedancia del cable coaxial. Es decir una impedancia de 50 ohms.

En el analizador de antenas se puede generar un gráfico de la impedancia de la antena, $R \pm jX$; este gráfico esta compuesto de dos curvas, una curva para la parte real de la impedancia (R) y otra curva para la componente imaginaria de la impedancia(X).

En la curva de la componente imaginaria se usa el valor absoluto de la reacctancia ($|X|j$).

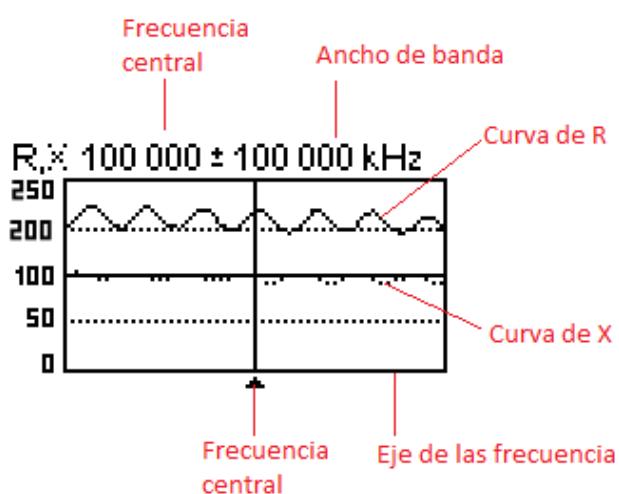


Figura 4.4-2 Grafico de la impedancia de la antena ($R \pm jX$) compuesta por las curvas.

Entonces, la finalidad de este proyecto es que en la gráfica de la impedancia de la antena la curva de la componente real tenga un punto de valor igual a 50 ohms para la frecuencia de resonancia (137.5Mhz, 50ohms) y la curva de la componente imaginaria tenga un punto de valor igual a cero para la frecuencia de resonancia (137.5MHz, 0 ohms). Esta grafica tiene relación directa con la grafica de la relación de onda estacionaria.

Relación de onda estacionaria: Cuando una línea de trasmisión no está adaptada, es decir, terminada en su impedancia característica, parte de la energía incidente sobre la carga es reflejada hacia el generador; entonces se generan dos ondas una incidente y una reflejada. Este hecho da lugar a que a lo largo de la línea se forme una onda estacionaria, con máximos y mínimos de voltaje y corriente, a distancias fijas a lo largo de la línea y que tiene la forma mostrada en la siguiente figura:

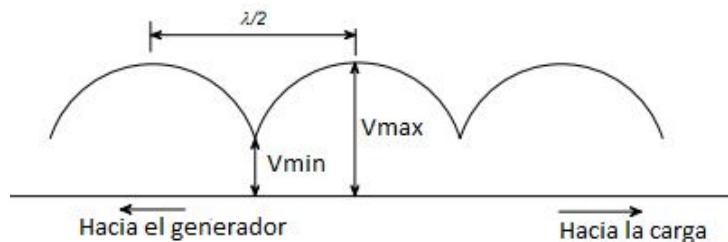


Figura 4.4-3 Onda estacionaria.

En el capítulo 3 se indicó que las espiras de la antena se estudiarían como líneas de transmisión, por lo que la antena también se toma como una línea de transmisión, donde analizaremos su ROE.

El ROE se define como relación de onda estacionaria de voltaje o simplemente relación de onda estacionaria:

$$ROE = \frac{|v_{\max}|}{|v_{\min}|}$$

En la antena coexisten una onda incidente de amplitud v_i y una onda reflejada de amplitud v_r , ambas ondas se combinan y dan como resultado una onda estacionaria. Si la onda incidente y la reflejada están en fase, producen una interferencia constructiva, entonces la onda resultante será $|v_{\max}| = |v_i| + |v_r|$; pero si la onda incidente y la reflejada están en contrafase, producen una interferencia destructiva, entonces la onda resultante será $|v_{\min}| = |v_i| - |v_r|$. Los dos casos anteriores son para los valores extremos de la onda resultante.

La ROE es siempre real y positiva, en el rango $1 \leq ROE \leq \infty$. Si la antena está adaptada, la impedancia de la carga es igual a la impedancia de la antena ($ZL = Z_0$), no hay onda reflejada y $ROE = 1$; entonces para nuestro caso el valor de la impedancia de la antena tiene que ser de 50 Ohms ya que la impedancia de la carga es de 50 Ohms y con ello conseguir que no exista onda reflejada.

Si la impedancia de la antena está terminada en circuito abierto o en cortocircuito, hay reflexión total y $ROE = \infty$.

Entonces, la finalidad de este proyecto es que la grafica del ROE de la antena tenga una valor lo más próximo a 1 para una frecuencia de 137.5MHz o como se dijo antes que la grafica de la impedancia sea de 50 Ohms para esta frecuencia.

Para realizar las medidas del ROE de la antena, conectamos un cable de longitud igual a $\lambda/2$ al analizador de antenas. Con esta longitud las características de la antena no variarán. Donde: $\frac{\lambda}{2} = \frac{2181.8 \text{ mm}}{2} = 1090.9 \text{ mm} \cong 1.1 \text{ m}$

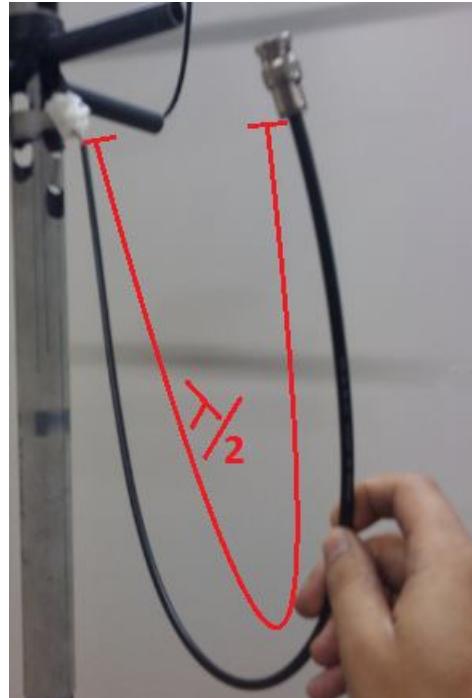


Figura 4.4-4 Cable para conectar la antena al analizador de antenas RigExpert.

Se realizan las graficas del ROE, para ello se configura el equipo para que realice un barrido en rango de frecuencias. Para el barrido se indica la frecuencia central que es de 137.5MHz y el ancho de banda de $\pm 11.5 \text{ MHz}$.



Figura 4.4-5 Conexión entre el analizador de antenas y la antena.

4.4.1 Resultados del analizador de antenas RigExpert AA-520

En el siguiente gráfico se ve que el ROE de la antena construida con el diseño seguido por la calculadora no es el deseado. El ROE tiene un valor mínimo, tiende a uno, para una frecuencia de 133.150 MHz:

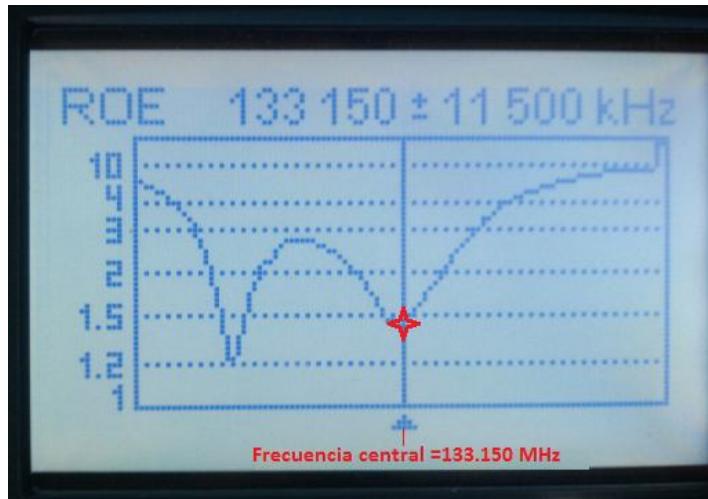


Figura 4.4.1-1 Grafica del ROE de la antena.

Entonces el diseño de la antena tiene que cambiarse, 133.150MHz no es un valor muy lejano a 137.5MHz. Los cálculos teóricos y prácticos tienen una diferencia de $\Delta F = 4.35 \text{ MHz}$.

4.5 Cambios en el diseño de la antena usando el analizador de antenas.

Los cambios que se realizan en la antena no son radicales, ya que la diferencia entre el valor práctico y teórico es de solo 4.35MHz. Los cambios que se realizan a continuación en la antena tienen como finalidad que esta diferencia sea nula $\Delta F \cong 0$. Se ha hecho un trabajo serio y meticuloso para realizar reajustes en la antena (prueba-error).

- El primer cambio que se realizó fue estirar mas los brazos medios de la antena para con ello conseguir que las espiras estén mas tensadas.

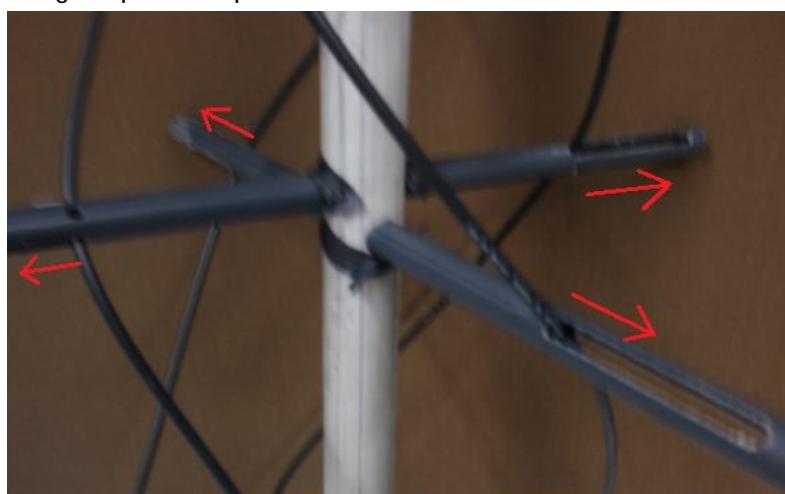


Figura 4.5-1 Cambios en los brazos medios de la antena.

Este cambio fue negativo por que el ROE empeora; ya que, tiende a uno pero para una frecuencia de 131.1MHz, $\Delta F = 6.4$ MHZ, este valor se aleja aun más del valor deseado. Por lo que aumentar el tamaño de los brazos medios de la antena se descarta como cambio.

- El segundo cambio que se realizó fue reducir la altura de la espira pequeña, se redujo en 3 cm la altura.

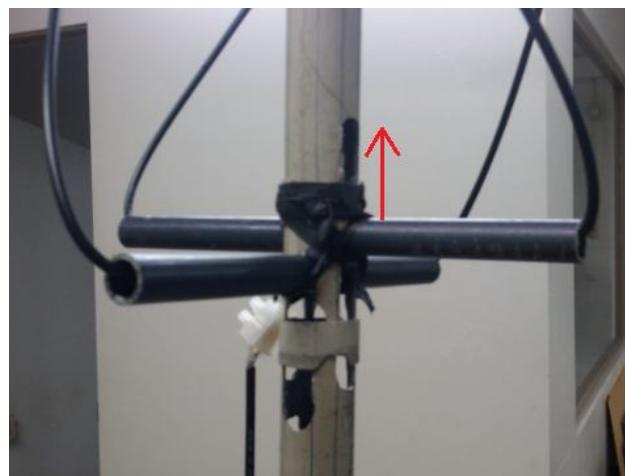


Figura 4.5-2 Cambios en la espira pequeña de la antena.

Este cambio fue negativo por que el ROE empeora; ya que, tiende a uno pero para una frecuencia de 130.4MHz, $\Delta F = 7.1$ MHZ, este valor se aleja aun más del valor deseado.

Luego se redujo la altura en 2cm, entonces $\Delta F = 6.4$ MHZ ; y para 1cm de reducción $\Delta F = 5.2$ MHZ ; por lo que reducir la altura de la espira pequeña se descarta como cambio.

- El tercer cambio que se realizó fue aumentar el tamaño de altura de la espira grande, se agregó en 6 cm la altura de la espira.

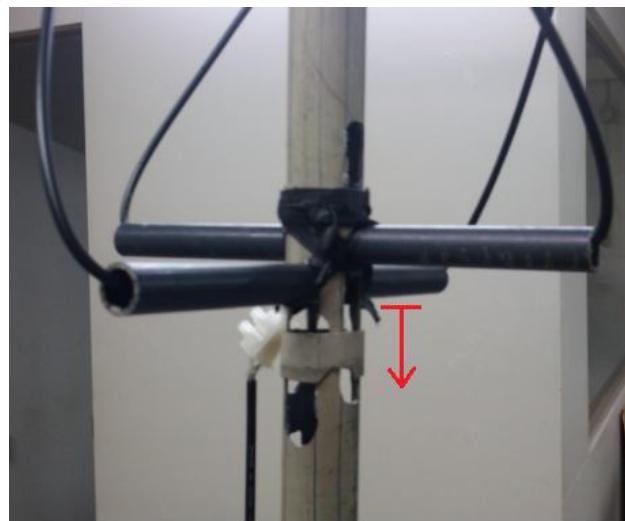


Figura 4.5-3 Cambios en la espira grande de la antena.

Este cambio fue negativo porque el ROE empeora; ya que, tiende a uno pero para una frecuencia de 128.5 MHz, $\Delta F = 9$ MHZ, este valor se aleja aun más del valor deseado.

Luego se redujo la altura en 3cm, entonces $\Delta F = 6$ MHZ ; y para 1cm de reducción $\Delta F = 4.9$ MHZ ; por lo que aumentar la altura de la espira grande se descarta como cambio.

Después de realizar los cambios anteriores, se concluye que agrandar los brazos intermedios o aumentar la altura de las espiras no contribuye a que la diferencia entre los cálculos teóricos y prácticos disminuya.

Los cambios a realizar ahora serán reducir gradualmente el tamaño de las longitudes de los cables que forman las espiras e ir analizando como varia el grafico del ROE. Se realiza esta reducción porque se observa que los cables en la antena se pueden tensar unos centímetros y con ello reducir sus longitudes.

En la siguiente figura se muestra la antena regresada a las medidas iniciales luego de realizar los cambios.



Figura 4.5-4 Antena cuadrifilar helicoidal construida con el diseño de la calculadora de John Coppens.

Las reducciones se realizan en los extremos de los cables, estas serán primero de 5 cm y se irán incrementando a 6 ó 7 cm. Esto dependerá de cuanto se pueda tensar los cables.

El uso de las borneras para realizar los empalmes ayuda a realizar estas reducciones, ya que sólo tenemos que usar un destornillador para deshacer los empalmes.

- La primera reducción de 5 cm en las longitudes de los cables de las espiras, da como resultado la siguiente grafica del ROE de la antena:

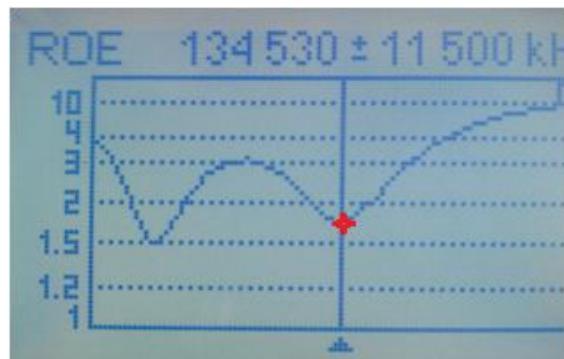


Figura 4.5-5 Grafica del ROE de la antena.

Este cambio fue positivo por que el ROE mejora; ya que, tiende a uno pero para una frecuencia de 134.53 MHz, $\Delta F = 2.97$ MHZ, este valor se aproxima al valor deseado.

- Como la reducción anterior fue positiva, se reduce dos centímetros más las longitudes de los cables de las espiras, lo que equivale a una reducción de 7 cm en la longitud inicial de los cables. La grafica del ROE de la antena para esta reducción es la siguiente:

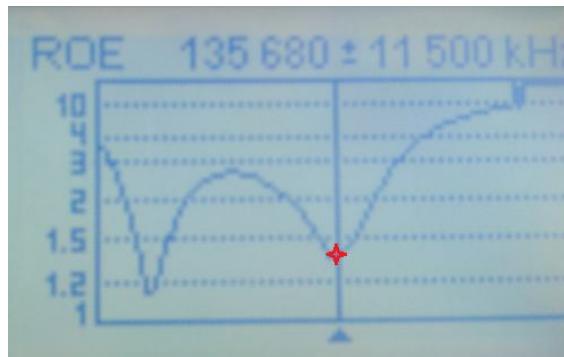


Figura 4.5-6 Grafica del ROE de la antena.

El ROE vuelve a mejorar; ya que, tiende a uno pero para una frecuencia de 135.68 MHz, $\Delta F = 1.82$ MHZ, este valor se aproxima al valor deseado.

- Entonces se tiene que seguir reduciendo aun más las longitudes de los cables de las espiras. Pero el cable ya no se puede tensar más, por lo que ya no se puede seguir reduciendo las longitudes de los cables.
La solución que se usa es reducir las alturas de las espiras, separación entre los brazos superiores e inferiores de las dos espiras. La reducción es de 2 cm para la espira grande, entonces $H1 = 71$ cm; para la espira pequeña la reducción es de 1 cm, entonces $H2 = 68.5$ cm.

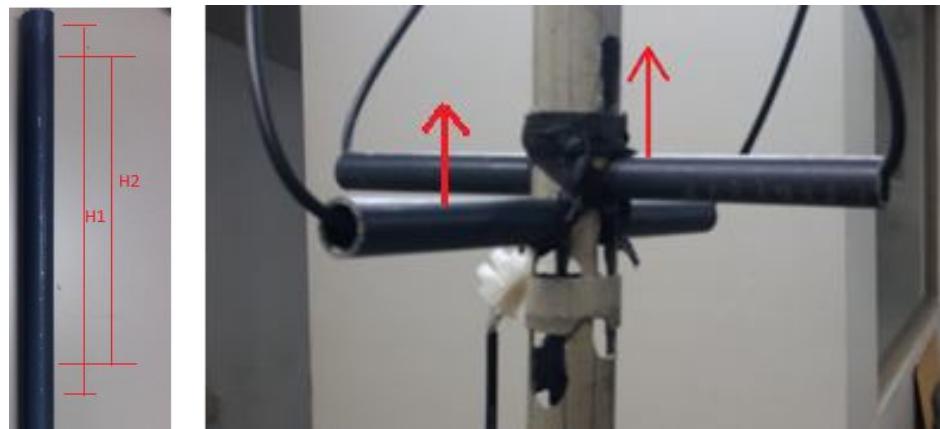


Figura 4.5-7 En la derecha, altura de las espiras. En la izquierda, reducción de las alturas.

Después de la reducción de la altura de las espiras se reducen las longitudes de los cables de las espiras en otros 3 cm, lo que equivale a una reducción de 10 cm en la longitud inicial de los cables. La gráfica del ROE de la antena es:

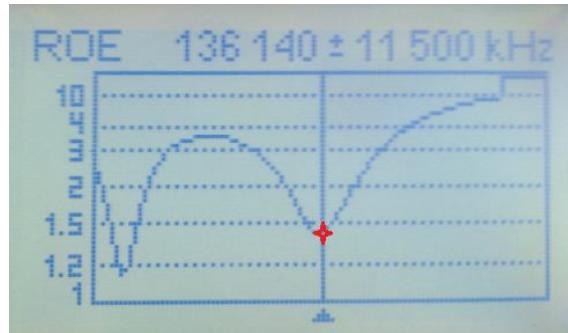


Figura 4.5-8 Gráfica del ROE de la antena.

Ahora el ROE tiende a uno pero para una frecuencia central de 136.14 MHz, $\Delta F = 1.36$ MHZ, este valor se aproxima mucho al valor deseado.

- El siguiente cambio que se realizará es nuevamente en las longitudes de los cables de las espiras. Para la espira pequeña se reduce 1.1 cm más, lo que equivale a una reducción de 11.1 cm en la longitud inicial; para la espira grande se reduce 2.5 cm más, lo que equivale a una reducción de 12.5 cm en la longitud inicial. La grafica del ROE de la antena es:

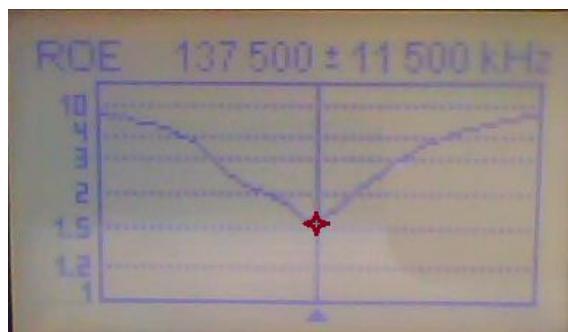


Figura 4.5-9 Grafica del ROE de la antena.

Ahora el ROE tiende a uno para una frecuencia central de 137.5 MHz, $\Delta F = 0$
Este es el valor deseado.

Después de realizar las medidas del ROE de la antena para una frecuencia central de 137.5MHz, se realizan las medidas de la impedancia para comprobar el valor de la impedancia de la antena, el cual tiene que ser de 50 Ohms. Como se explico antes la impedancia y el ROE tienen relación directa.

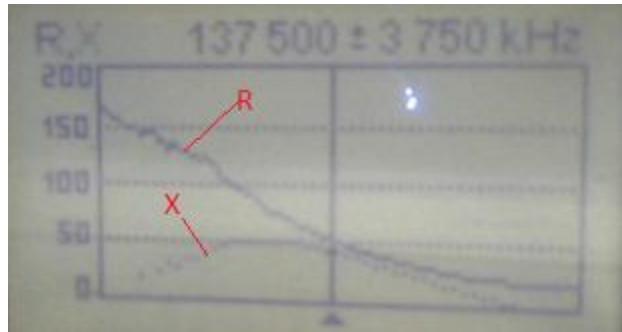


Figura 4.5-10 Grafica de la impedancia de la antena.

En la figura anterior se observa que la curva de la componente real (R) tiene un valor de 50 para la frecuencia de 137.5MHz; pero la componente imaginaria (X) que tendría que tener una valor igual a cero para la frecuencia de 137.35MHz tiene un valor cercano a 50.

El modulo de la impedancia es $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ donde: $R = 50$ y $X \approx 50$ entonces $|Z| = 50 \text{ ohms}$.

Para poder analizar mejor las gráficas anteriores (ROE e impedancia) se usa el programa del analizador de antenas “AntScope”, con la ayuda de este programa podemos analizar y visualizar mejor el ROE de la antena, ya que podemos guardar la grafica del ROE. La gráfica del ROE se configura con un ancho de banda de 23MHz y una frecuencia central de 137.5MHz.

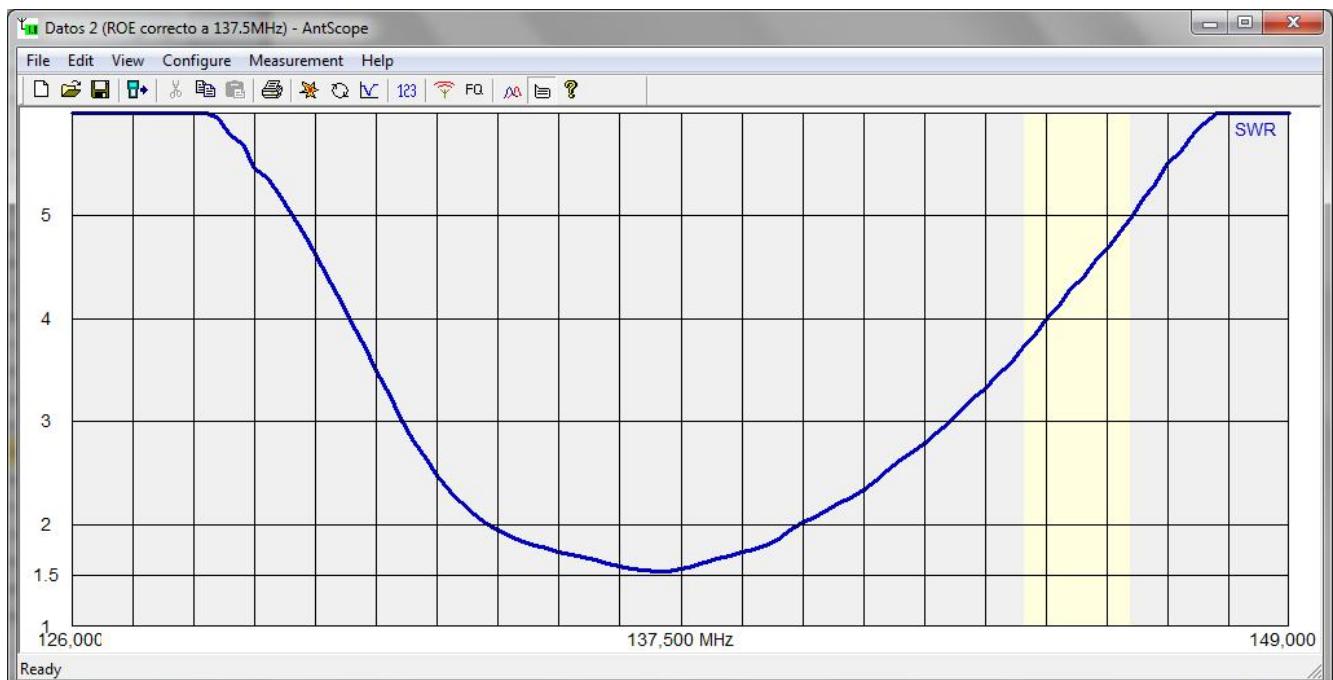


Figura 4.5-11 Grafica del ROE de la antena usando el software “AntScope”.

Este software está disponible en la página de RigExpert, <http://www.rigexpert.com>; además en esta pagina se puede encontrar manuales para el manejo de este equipo.

Si se pasa el cursor encima de la curva de la grafica anterior, se muestra valores como su frecuencia, su ROE (SWR en ingles), la impedancia de la antena para esa frecuencia.

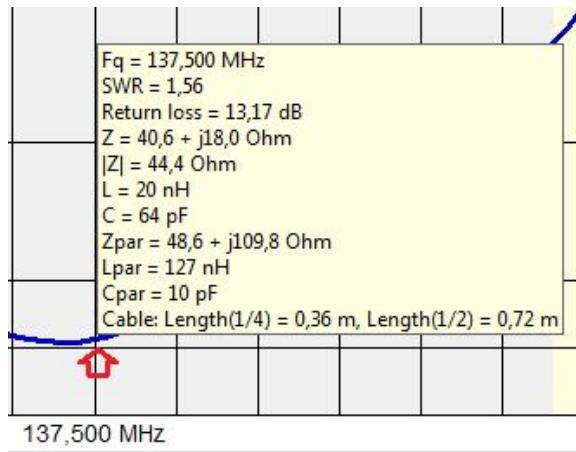


Figura 4.5-12 Valores para una frecuencia de 137.5MHz

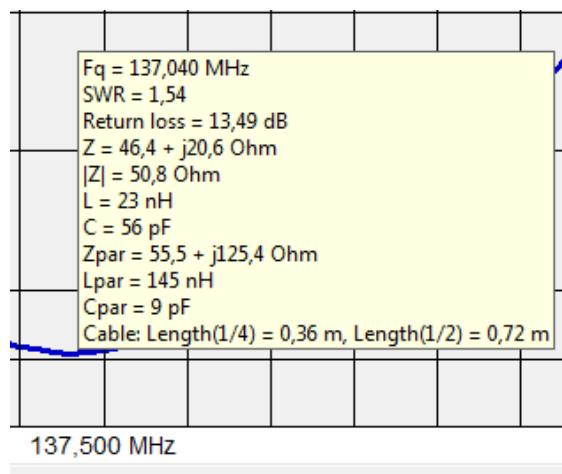


Figura 4.5-13 Valores para una frecuencia de 137.0.4MHz

4.6 Conclusiones de los cambios realizados en la antena

Ya no se realizan más cambios en la estructura de la antena porque se ha conseguido que el ROE tienda a uno para una frecuencia de 137.5MHz y que el modulo de la impedancia de la antena sea 50 ohms.

La antena ha quedado con la siguiente estructura:

- Altura de la espira grande, separación entre el brazo superior e inferior de la espira. H1= 71cm.
- Altura de la espira pequeña, separación entre el brazo superior e inferior de la espira. H2= 68.5cm.

- Longitud del cable de la espira grande es 227cm. Además de 1 cm en cada extremo para los empalmes entre las espiras.
- Longitud del cable de la espira pequeña es 216.5cm. Además de 1 cm en cada extremo para los empalmes entre las espiras.
- El tamaño de los brazos de la antena, ancho de las espiras, no varía. Es decir 29cm para la espira grande y 27cm para la espira pequeña.

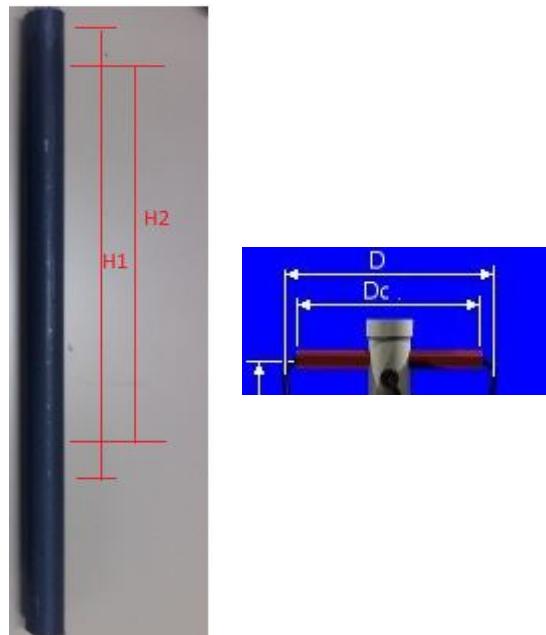


Figura 4.6-1 Derecha, altura de las espiras. Izquierda, brazo de la antena.

Se vuelve a construir la antena con los valores indicados con anterioridad, a continuación se muestran unas imágenes de la antena resultante.



Figura 4.6-2 Antena resultante.

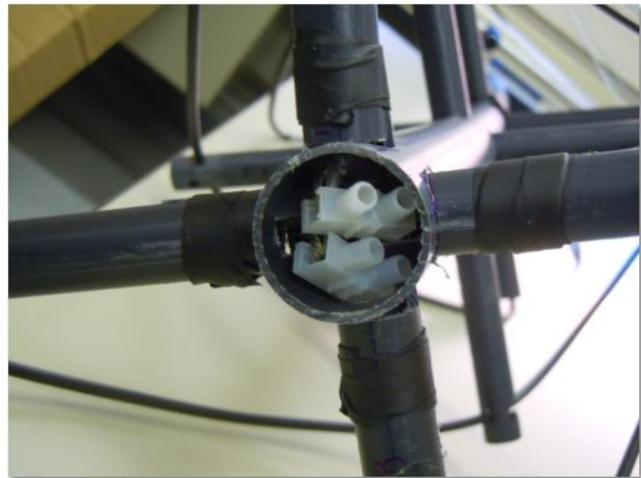


Figura 4.6-3 Empalmes superiores de la antena resultante.



Figura 4.6-4 Empalmes inferiores de la antena resultante.



Figura 4.6-5 Izquierda, antena resultante. Izquierda, antena de pruebas.

Luego de tener el nuevo diseño de esta antena con los reajustes necesarios para que tenga una impedancia de 50 ohms a una frecuencia de 137.5Mhz, toca medir su diagrama de radiación. Los diagramas de radiación de las antenas se miden en cámaras niconicas, pero para las frecuencias con las que se trabaja se necesitaría tener una cámara muy grande (del tamaño de un salón de clase). En nuestro caso se usa un truco muy imaginativo y que el receptor que usamos lo posibilita, que es monitorizar la amplitud de la portadora de 137.5MHz y eso permite obtener el diagrama de radiación de forma indirecta. Entonces se realizan experimentos de la estación receptora para obtener las imágenes que transmiten los satélites y también obtener el diagrama de radiación de la antena.

Capítulo 5: Recepción de imágenes

Después de terminar la construcción de la antena, con los cambios aplicados, se procede a la recepción de las señales transmitidas por los satélites NOAA. Para ello se coloca la antena en la azotea del edificio, la azotea tiene que estar a la misma altura o a una altura mayor de las azoteas de los edificios colindantes; ya que tiene que tener una línea de visión sin obstáculos con el horizonte.

Luego de poner la antena en la azotea, se conecta a esta un pre-amplificador, a una distancia de $\lambda/2$. Donde: $\frac{\lambda}{2} = \frac{2181.8 \text{ mm}}{2} = 1090.9 \text{ mm} \cong 1.1 \text{ m}$. Con esta longitud las características de la antena no variarán.



Figura 5-1 Pre-amplificador conectado a $\lambda/2$ de la antena.

El receptor a todas horas hace un barrido en el rango de frecuencias de 137 y 138 MHZ; porque las frecuencias de transmisión de los satélites NOAA están en ese rango. Cuando el receptor detecta que un satélite cruza el horizonte, el receptor se engancha a la frecuencia del satélite hasta que termina la recepción, que es cuando el satélite vuelve a cruzar el horizonte.

El pre-amplificador ayuda a amplificar las señales recibidas antes que llegue al receptor y con ello hace que el receptor tenga un mejor funcionamiento.

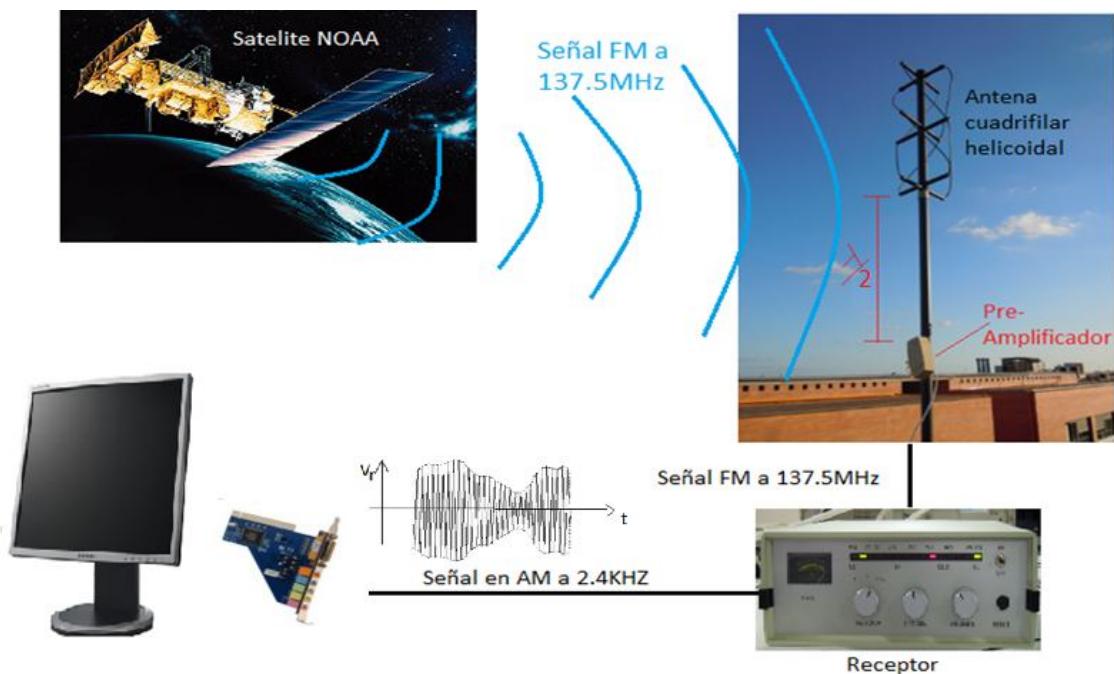


Figura 5-2 Esquema del proceso de recepción.

La figura anterior describe el proceso de recepción en la estación receptora, el último proceso en la recepción de imágenes es usar un programa de decodificación de señales, el que se ha usado en este proyecto es el “APTDecoder”. Este programa usa la tarjeta de audio como un procesador de señales para demodular las señales de AM y con ello recuperar los valores de la envolvente que es la información del brillo (para el canal visible); además este programa interpreta la información adicional que hay en envolvente, como el formato APT y con ello obtener las imágenes de los dos canales. Se ha redactado un manual de este programa, ya que en la página web de este programa y en internet no se ha encontrado uno. [Apéndice A]

Se recomienda usar un ordenador con una tarjeta de audio con dos entradas, micrófono y línea de entrada. La entrada que se usará es la línea de entrada. Una tarjeta de audio con estas características es la Realtek.

El software “Orbitron” sirve sólo para saber los horarios de paso, es sencillo de configurar. [Apéndice B]

5.1 Resultados de la recepción de imágenes

Los resultados de la recepción de imágenes, después de realizar los cambios, fueron imágenes como la siguiente:

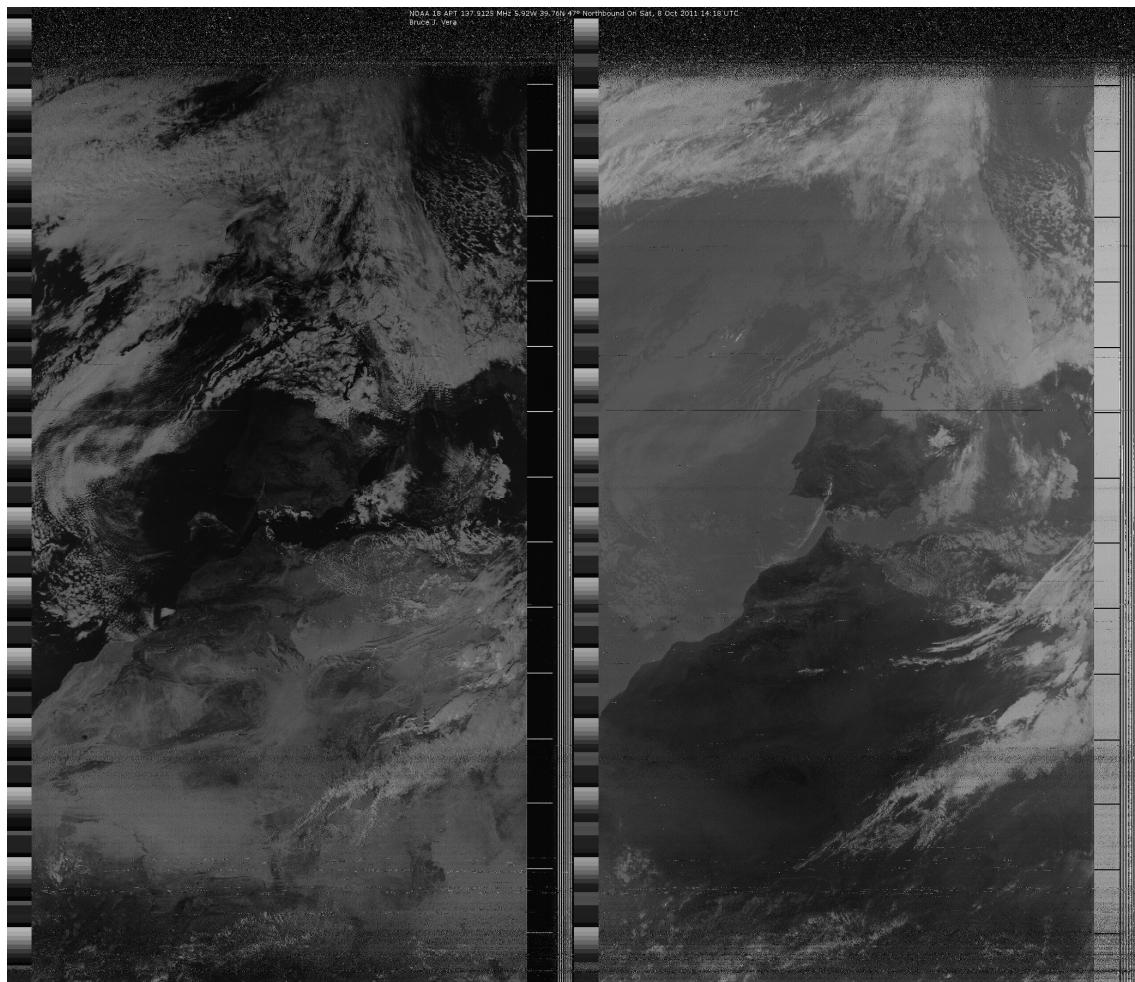


Figura 5.1-2 Imagen resultante para una antena cuadrifilar helicoidal.

En la figura anterior se observa los resultados de la antena después del proceso de recepción, se observa una imagen nítida y sin interferencias; en la parte superior de la imagen se observa interferencia y es porque las montañas que están ubicadas a la espalda del edificio donde esta nuestra antena (hacia el norte) hacen que decaiga la señal antes que el satélite llegue a Islas Feroe. A continuación se muestra el diagrama de radiación de la antena, el cual corresponde a la imagen anterior.

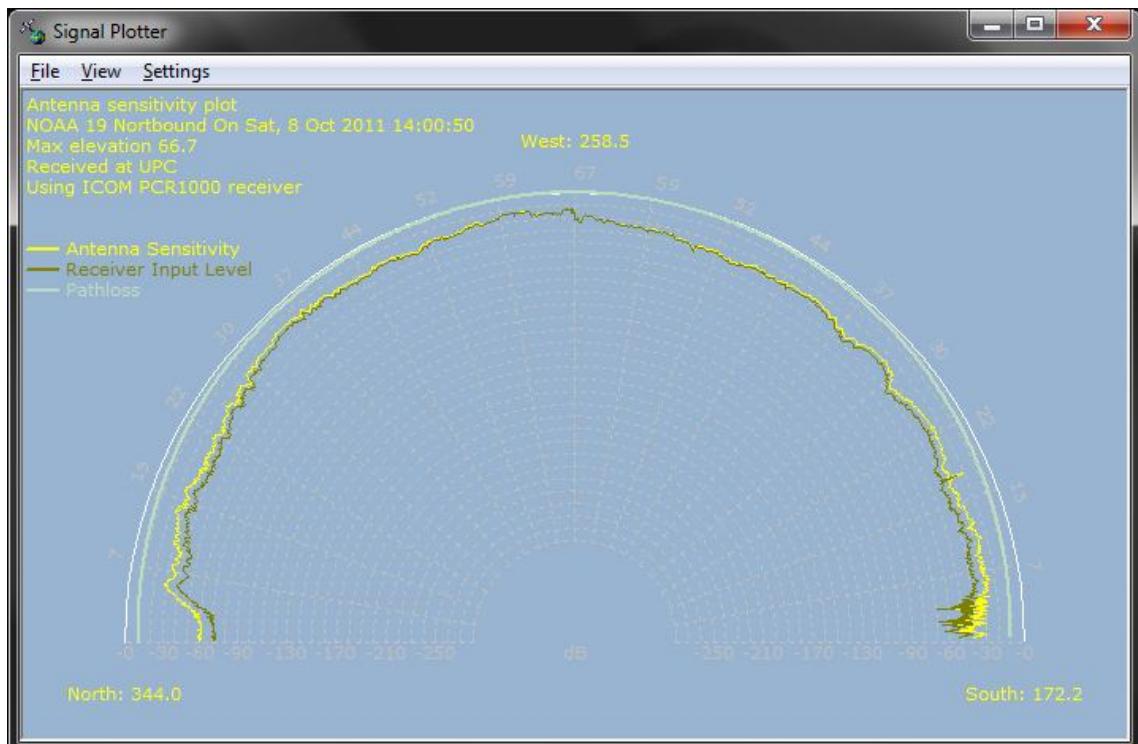


Figura 5.1-3 Patrón de radiación para un espaciado del semicírculo igual a 10 dB y un factor de la escala igual a 5

Para una mejor visión del gráfico anterior se cambia la configuración del "Plotter"

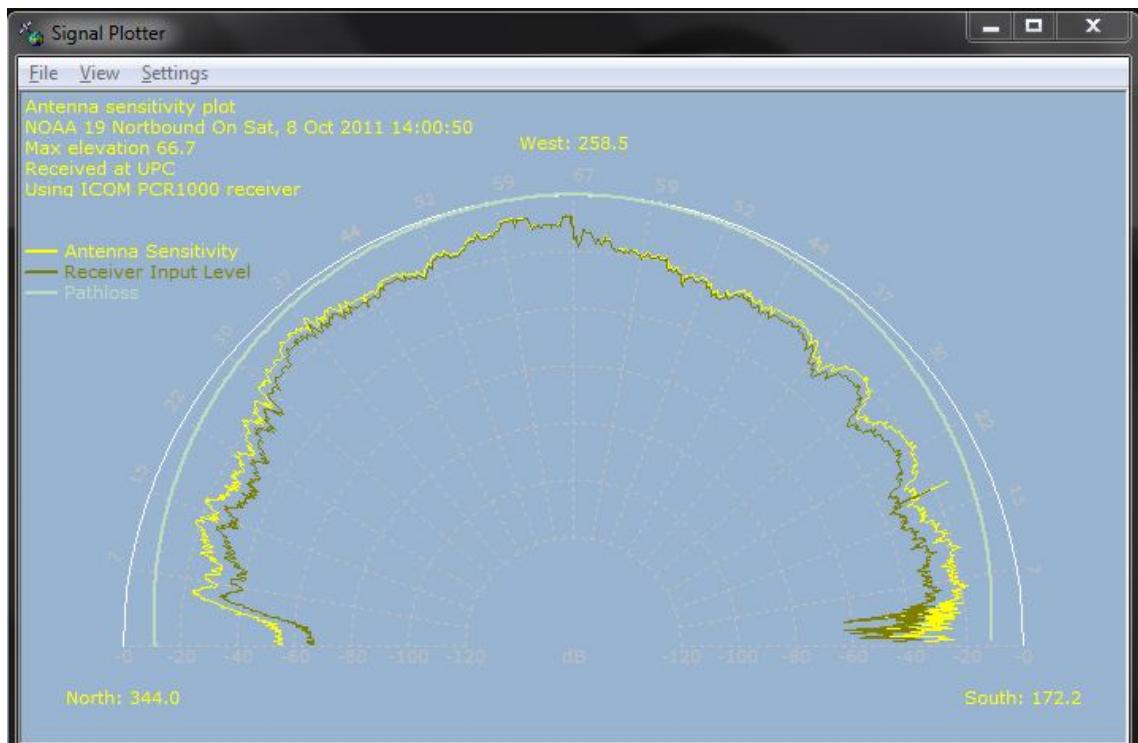


Figura 5.1-4 Patrón de radiación para un espaciado del semicírculo igual a 20 dB y un factor de la escala igual a 3

En las gráficas anteriores se observa:

- El nivel de entrada de la señal (Receiver Input Level), indica la potencia de la señal recibida.
- La sensibilidad de antena (Antenna Sensitivity), indica cuan débil puede ser la señal recibida y aun se pueda procesar.
- Perdida por atenuación (PathLoss), son las perdidas en la propagación de la señal. Estas perdidas pueden ser debido a muchos efectos como la refracción, reflexión y pérdidas de acoplamiento, entre otras.

Todos estos valores están decibelios (dB).

El los gráficos anteriores se ve el diagrama de radiación de la antena es de muy parecido al omnidireccional en el semi-espacio superior; además no se observa ningún cero u otro valor próximo a cero (en la imagen que recibimos se representaría como una línea horizontal negra). Se demuestran que los cambios hechos en la antena son correctos.

Como se explico en el inicio, el objetivo de este proyecto es obtener una imagen con la máxima cobertura; también se explico cual es el valor de esta máxima cobertura (una imagen centrada en España (latitud 40°) y limitada por el norte por las Islas Feroe (latitud 68°) y por el sur por Cabo Verde (latitud 16°).



Figura 5.1-5 Punto A Islas Feroe y punto B Cabo Verde. Imagen de GoogleMaps.

En la siguiente figura se muestra una de las imágenes resultantes del proceso de recepción, se observa que por el sur la imagen comienza en Abu Simbel, Egipto (latitud 21°) y por el norte termina en Noruega, a la misma latitud que las Islas Feroe (latitud 68°). Por el sur hay diferencia de 5° en la latitud; ya que debió empezar en 16°. Por le norte si cumple con lo esperado. Luego de todos los cambios realizados en la antena, se concluye que se tiene un buen resultado en la recepción de imágenes; porque se obtiene una imagen con lo máxima cobertura posible; además de nítida, esto gracias a que nuestra antena tiene un diagrama muy omnidireccional y tiene una impedancia de 50 ohms.

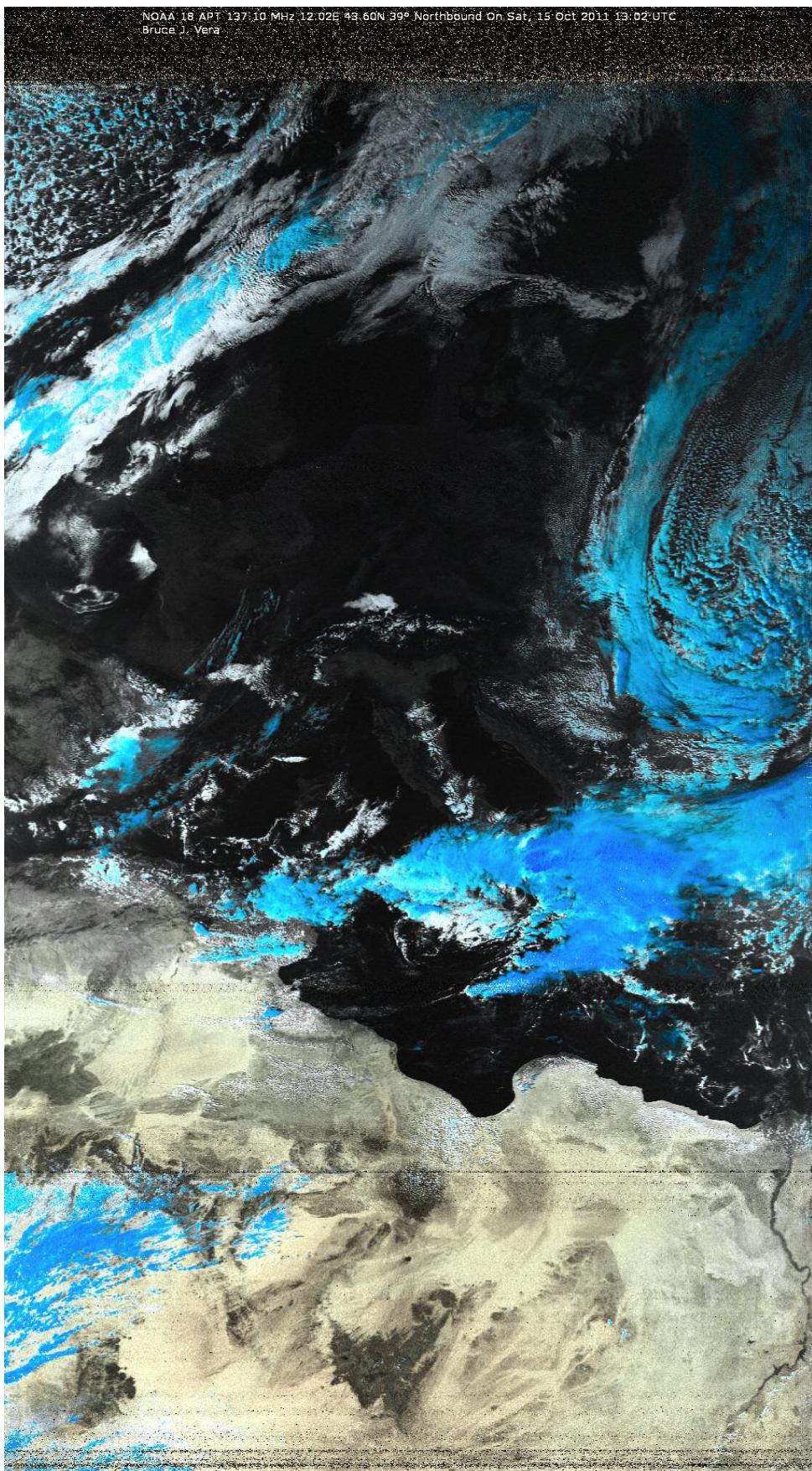


Figura 5.1-6 Imagen resultante del proceso de recepción. Se usa el programa APTDecoder para mezclar las imágenes de los dos canales.

Capítulo 6: Aplicaciones y recomendaciones

La aplicación evidente de este proyecto es, ver las condiciones climatológicas. Pero una aplicación interesante para este proyecto es usarlo en la pesca.

Para la pesca lo que realiza es, como la imagen infrarroja proporciona información de la temperatura, se puede realizar un estudio de la temperatura del mar y los peces. En este estudio se tendrá que analizar las temperaturas que tienen los bancos de peces, así como la temperatura de los lugares del mar donde está el alimento de los peces, fitoplancton; al final de este estudio se tendrá que concluir en cuales son los rangos de temperatura en los que están los bancos de peces y su alimento. Con este estudio se podrá indicar las mejores coordenadas para ir de pesca.

Con el APTDecoder se puede obtener una imagen que cuando se pasa el cursor encima de un punto de la imagen nos indica la temperatura en ese punto.

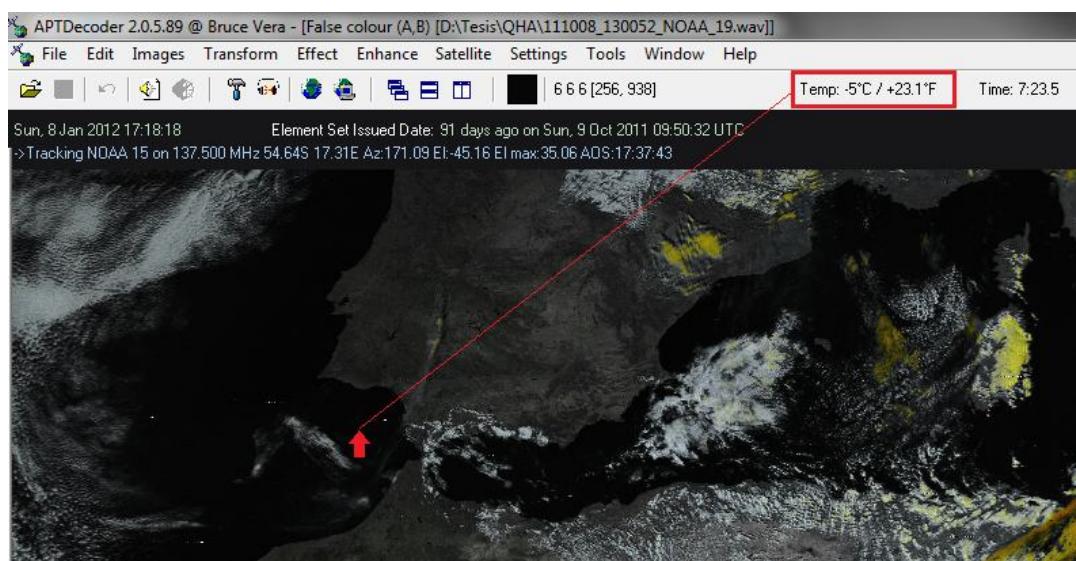


Figura 6-1 Imagen resultante de mezclar la imagen normal con la infrarroja.

Al final de la recepción se tiene estas dos imágenes por separado, la normal y la infrarroja. En la figura anterior se mezclaron las dos imágenes y se obtuvo una imagen en la que se sabe la temperatura en cada punto de la imagen. Para esto en el APTDecoder se escoge la opción “Images” en la barra de herramientas y dentro de esta se escoge la opción “False colour (A, B)”.

Una recomendación para la aplicación en la pesca es que, una vez terminado el estudio de la temperatura del mar y los peces, crear filtros para quitar las nubes de la imagen y crear una función que busque los rangos de temperaturas donde hay bancos de peces. El resultado final se irá actualizando cada vez que se termine de receptionar las señales que trasmitten cualquiera de los satélites con los que se trabaja.

Apéndice A: Configuración del software APTDecoder

Este software se puede descargar desde la página “<http://www.poes-weather.com/>”

La configuración de este software se realiza de la siguiente manera:

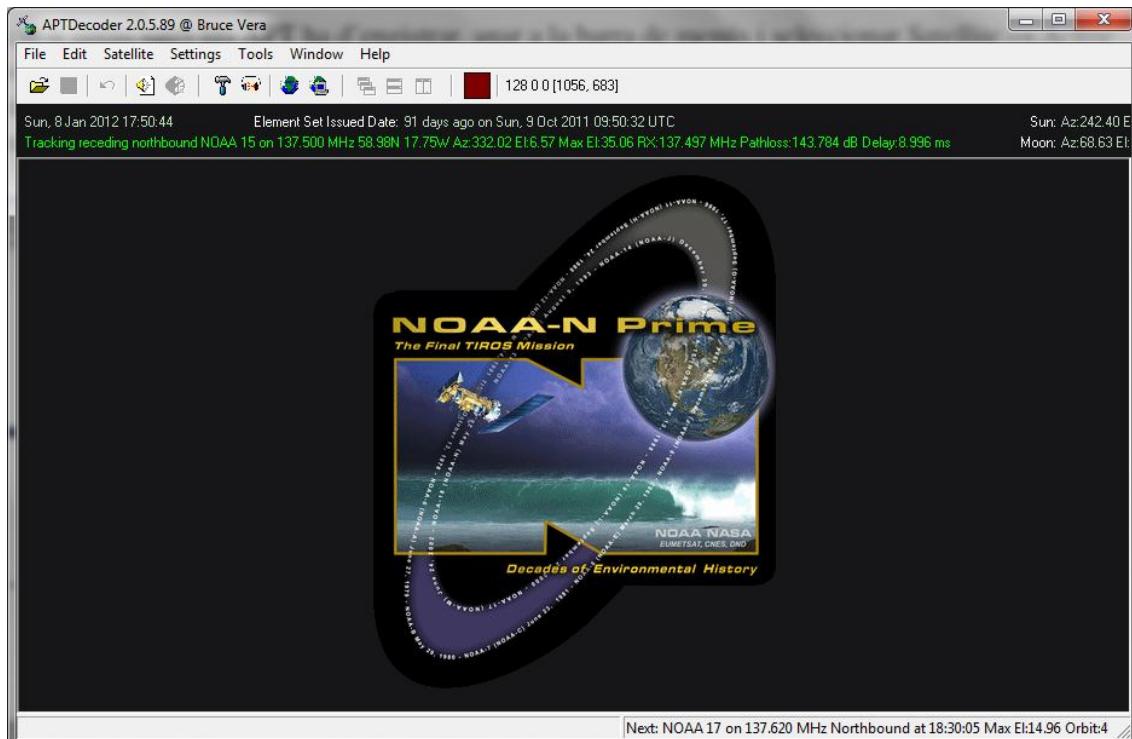


Figura A-1 Pagina de inicio del APTDecoder.

Se selecciona los satélites con los que se trabaja, en este caso los NOAA 15, 17,18 y 19. Para ello en la barra de herramientas se escoge la opción “Satellite” y dentro de esta la opción “Active APT satellites”

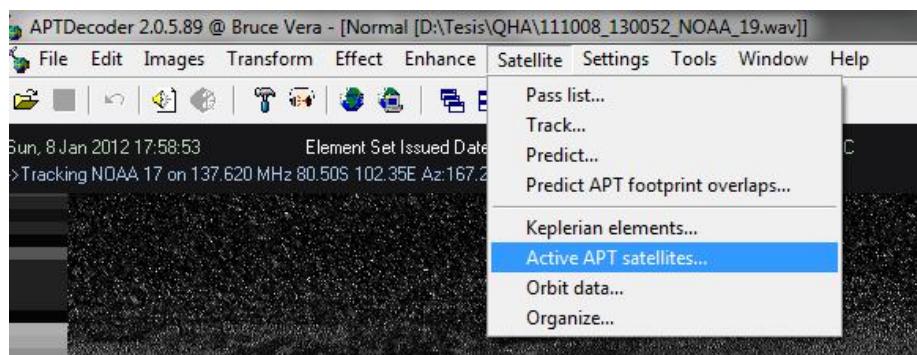


Figura A-2 Configuración de los satélites con lo que se trabaja.

Se abre una ventana donde nos muestra los satélites con lo que puede trabajar el software, escogemos los satélites antes mencionados.

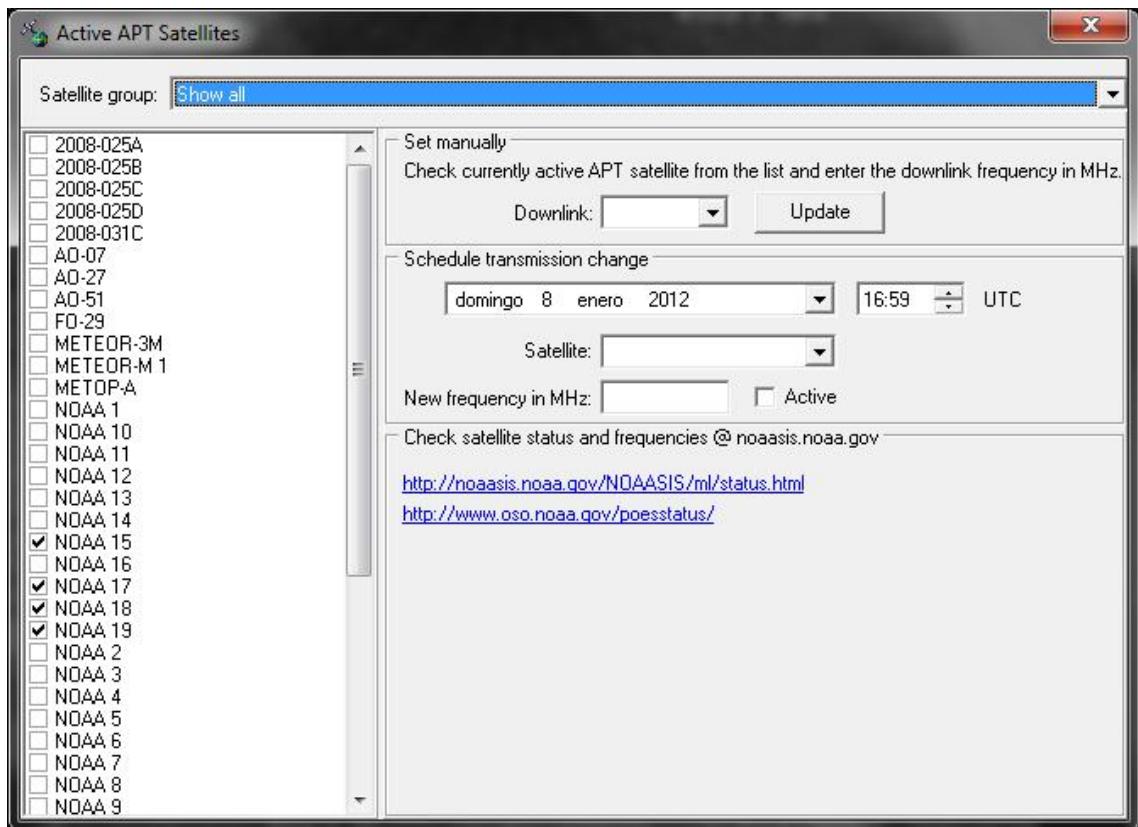


Figura A-3 Selección de los satélites con lo que se trabaja.

Una vez seleccionados los satélites con lo que se trabajara, se realiza la configuración general del software. Para ello en la barra de herramientas se escoge la opción “Settings” y dentro de esta la opción “General settings”, también se puede usar el botón con la figura del martillo.

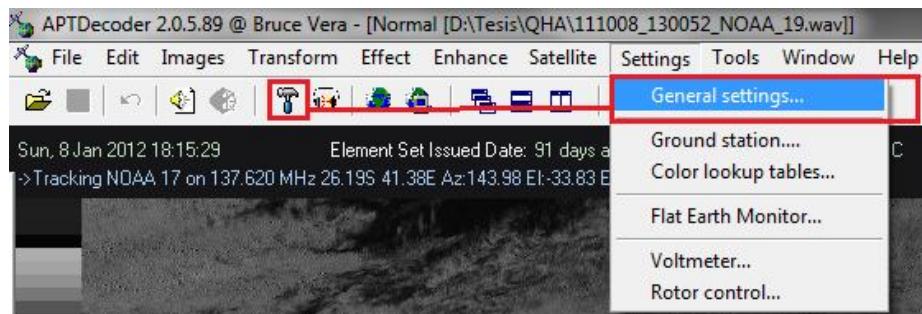


Figura A-4 Configuración general del software.

Se abre una ventana con varias pestañas, a continuación se muestran imágenes con la configuración de cada pestaña.

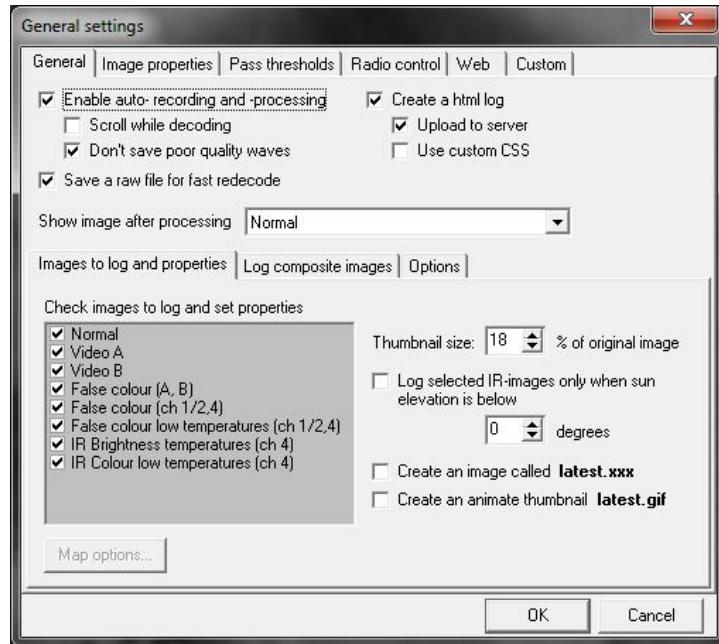


Figura A-5 Configuración de la pestaña "General".

La pestaña "Image properties" tiene tres pestañas adicionales "Formats", "Enhancements" y "Annotations".

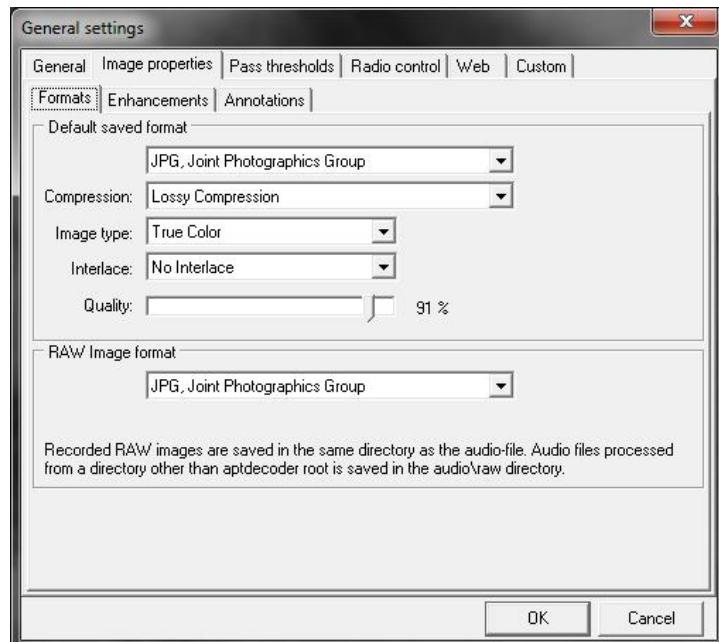


Figura A-6 Configuración de la pestana "Formats" en la pestaña "Image properties".

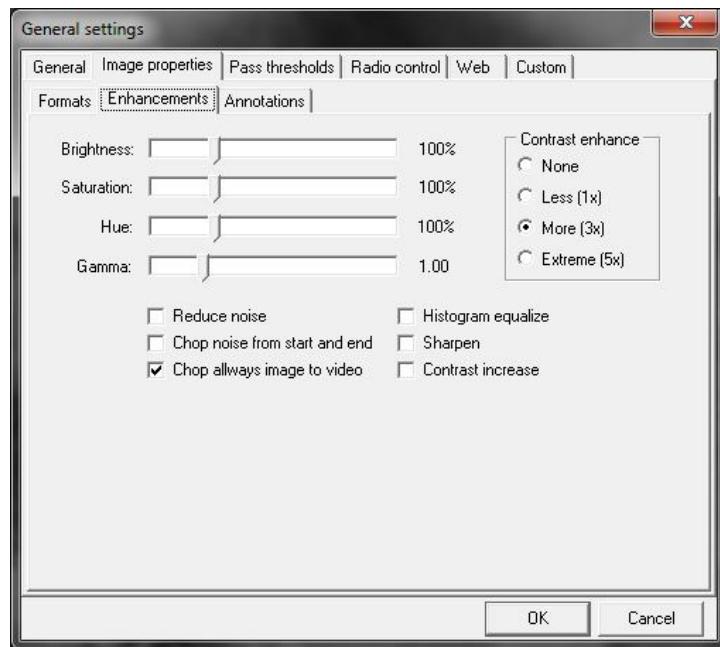


Figura A-7 Configuración de la pestana “Enhancements” en la pestaña “Image properties”.

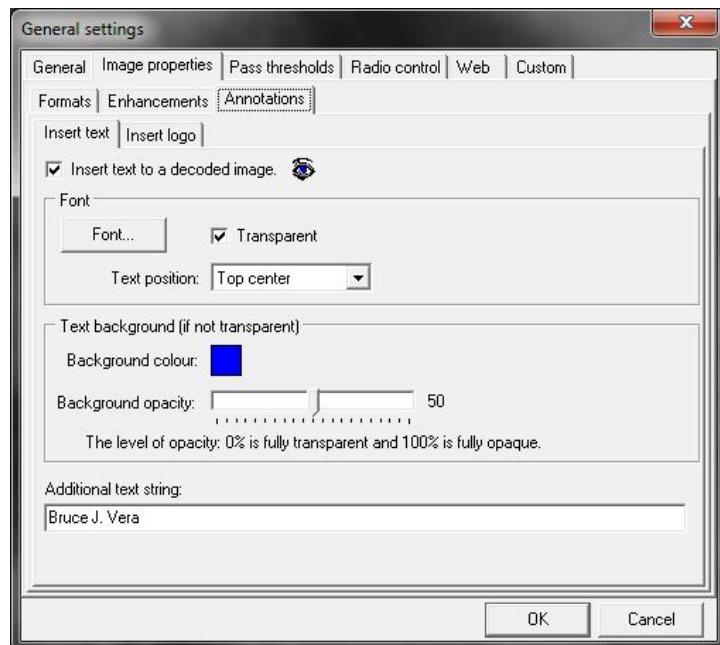


Figura A-8 Configuración de la pestana “Annotations” en la pestaña “Image properties”.

En la pestaña "Pass thresholds" se configura cuando el software comenzara el proceso de decodificación, se ha escogido 10° por encima del horizonte.

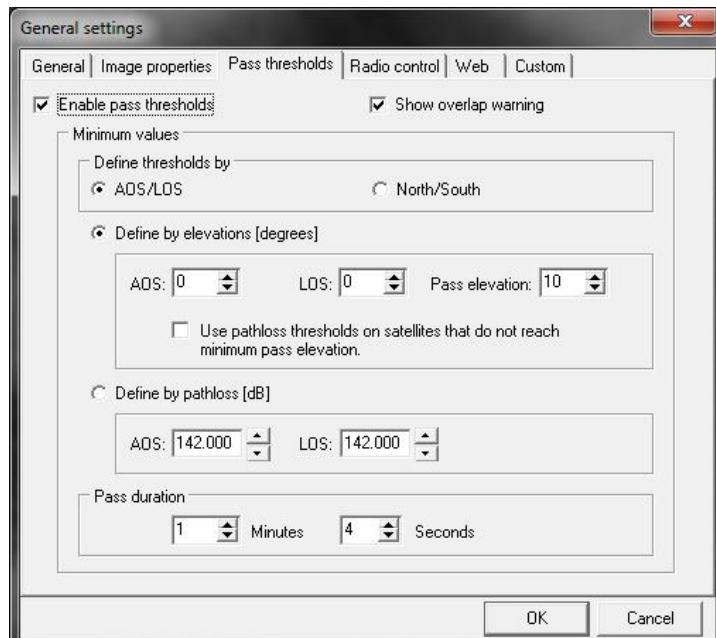


Figura A-9 Configuración de la pestana "Pass thresholds".

En la pestaña "Radio control" se configura el tipo de receptor que se usara y el tipo de antena que se usa para para la recepción.

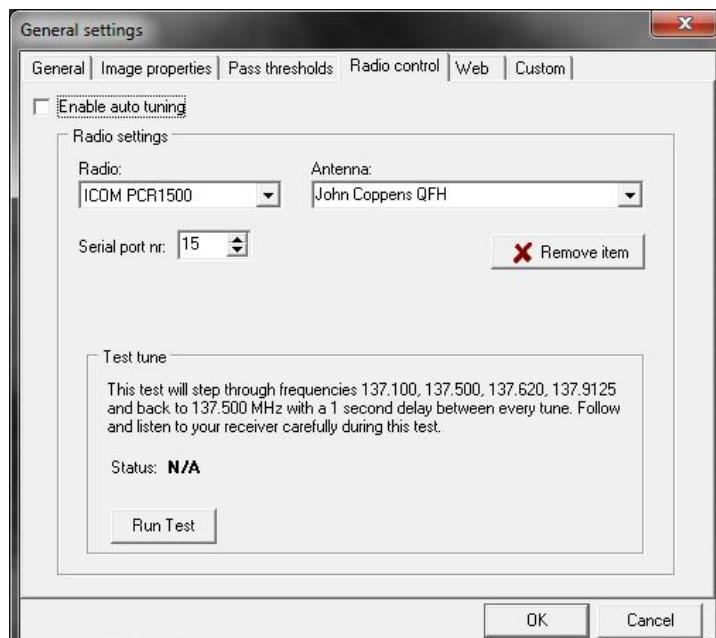


Figura A-10 Configuración de la pestana "Radio control".

En la pestaña "Web" se configura el repositorio donde se desea que se guarde las imágenes en internet.

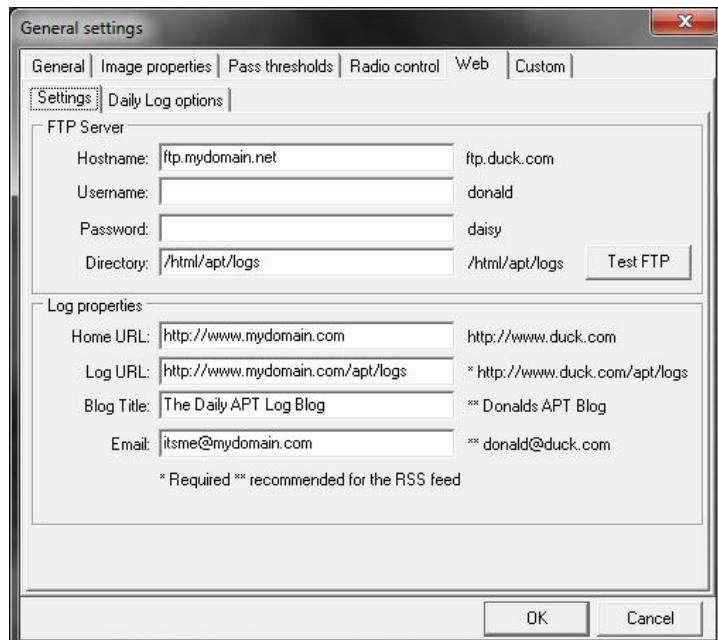


Figura A-11 Configuración de la pestana "Web".

En la pestaña "Custom" se configura el repositorio físico donde se desea que se guarde las señales recibidas.

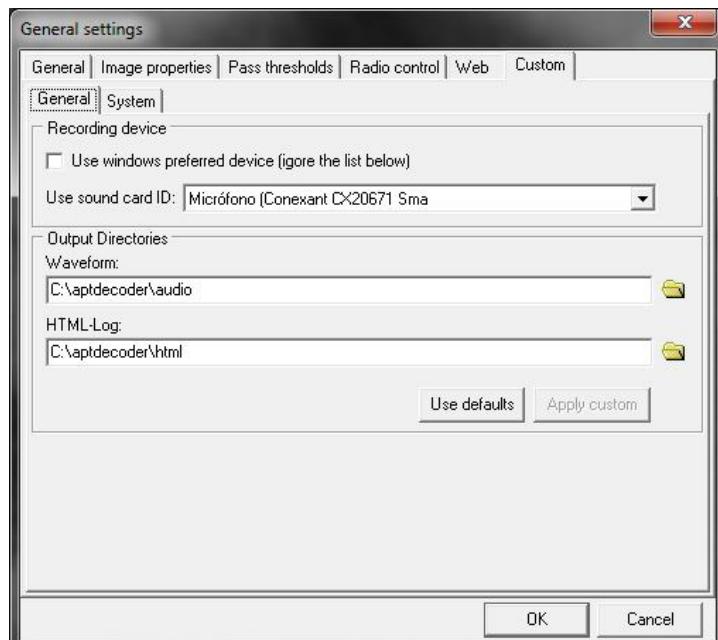


Figura A-12 Configuración de la pestana "Custom".

El APTDecoder cuenta con herramientas de tratamiento de imágenes, como normalizado, ecualizado, contraste entre otras. Se ha redactado un manual básico de estas herramientas, el cual se deja la dirección:
http://www.4shared.com/folder/fQ7gHCzg/_online.html

Apéndice B: Configuración del software Orbitron

Este software se puede descargar desde la página "<http://www.stoff.pl/>"

La configuración de este software es muy sencilla, sólo se indica los satélites a hacer seguimiento y la ubicación de la estación receptora:

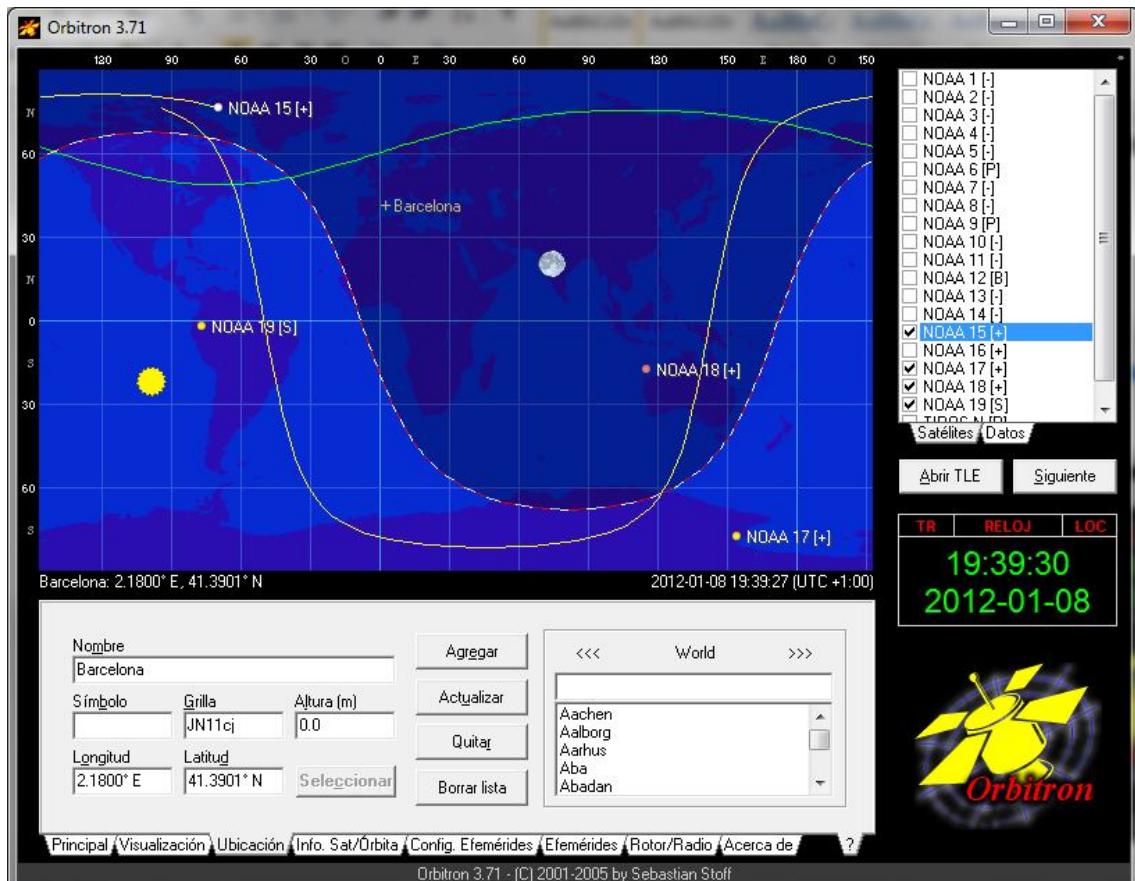


Figura B-1 Nombre y ubicación de la estación receptora.

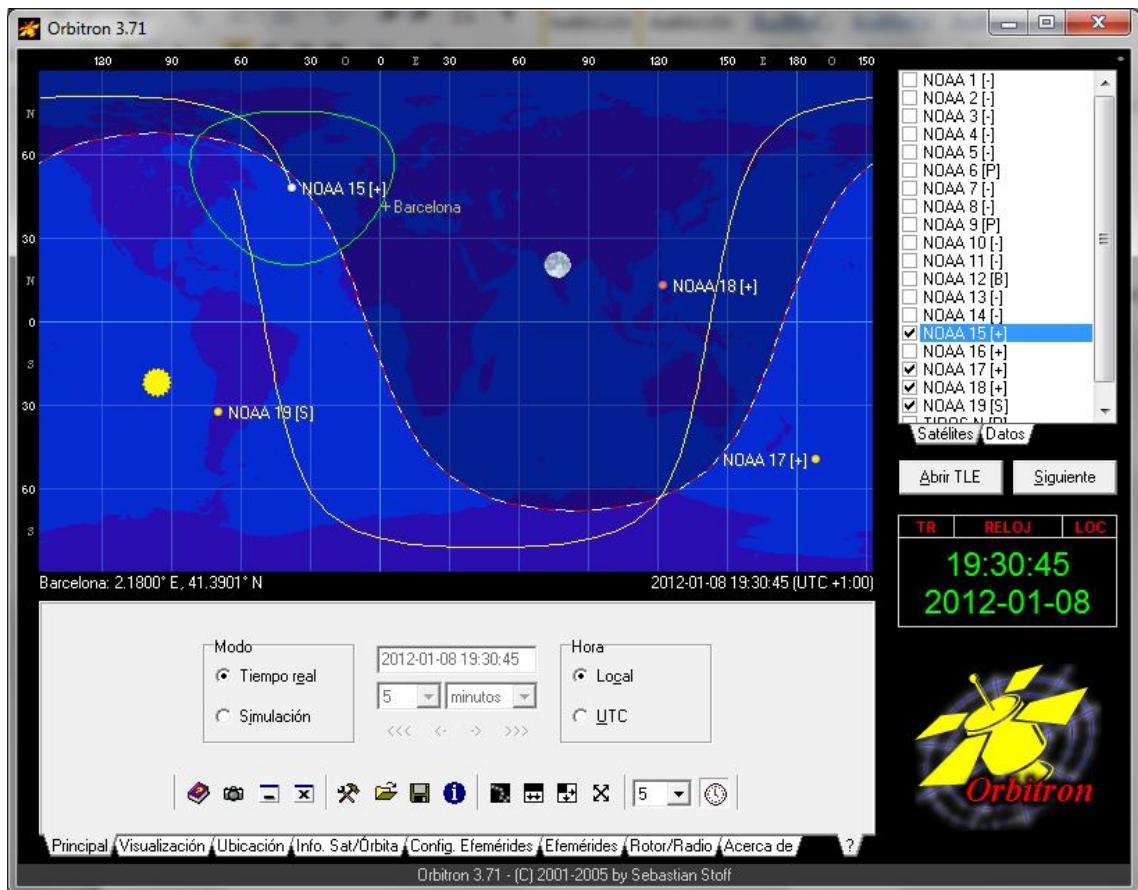


Figura B-2 Pagina principal del software “Orbitron”.

En la figura anterior se observa que se puede simular los horarios de paso de los satélites, esta herramienta es muy importante porque se puede simular los horarios de paso en segundos, minutos, hora o días.

Bibliografía

1. Jean-Michel Friedt, "Satellite image eavesdropping: a multidisciplinary science education project", INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, 2005.
2. R.W. Hollander, "Resonant Quadrafilar Helical Antenna", WORKING GROUP SATELLITES, 1999.
3. C. C. KILGUS, "Resonant Quadrifilar Helix Design", THE MICROWAVE JOURNAL, 1970.
4. National Oceanic and Atmospheric Administration, "User Guide for Building and operating environmental satellite receiving stations", 2009.
5. Daniel Cañelles Bofarull, "Obtenció d'imatges de satél-lits meteorològics polars amb una antena quadrifilar", 2010.
6. Gerald Martes, "Double Cross a NOAA Satellite Downlink Antenna", Febrero 2008.
7. Blanch, Sebastian; Romeu, Jordi, "Antenas", Edicions UPC, Septiembre 2002.
8. James K. Hardy, "Electronic Communications Technology", PRENTICE-HALL, 1986.
9. Satélites y orbitas geoestacionarias, "<http://celestak.com/columns/v04n07/>"
10. Parámetros del NORAD y predicción de paso,
["http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSAT09-2-FormatoTLE.pdf"](http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSAT09-2-FormatoTLE.pdf)
11. Satélites NOAA,
["http://books.google.es/books?id=t8ZLSpM20m8C&pg=PA203&lpg=PA203&dq=modelo+orbital+NOAA&source=bl&ots=i22r3__ZIT&sig=kyzlyUID4CPGDRWzIMBa68NyKGg&hl=es&ei=EVXFTqjJYn28gPsyp2FCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=OCBwQ6AEwAA#v=onepage&q=modelo%20orbital%20NOAA&f=false"](http://books.google.es/books?id=t8ZLSpM20m8C&pg=PA203&lpg=PA203&dq=modelo+orbital+NOAA&source=bl&ots=i22r3__ZIT&sig=kyzlyUID4CPGDRWzIMBa68NyKGg&hl=es&ei=EVXFTqjJYn28gPsyp2FCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=OCBwQ6AEwAA#v=onepage&q=modelo%20orbital%20NOAA&f=false)
12. Estructura de la antena cuadrifilar helicoidal,
["http://www.cst.com/Content/Documents/Events/UGM2009/3-1-2-Development-of-Breakthrough-Technology-for-the-Satellite-Telephone-Handset.pdf"](http://www.cst.com/Content/Documents/Events/UGM2009/3-1-2-Development-of-Breakthrough-Technology-for-the-Satellite-Telephone-Handset.pdf)
13. Calculadora de la antena cuadrifilar helicoidal, "<http://jcoppens.com>"

