

ARREGLO DE ANTENA YAGI-UDA PARA RECEPCIÓN DE LA SEÑAL DE
CUBESAT DE ORBITA BAJA QUE TRANSMITAN EN LA FRECUENCIA DE
435,800 MHz SSB/CW

Sergio Alberto Monroy Prieto

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA ELECTRONICA
BOGOTA D.C.
2014

ARREGLO DE ANTENA YAGI-UDA PARA RECEPCIÓN DE LA SEÑAL DE
CUBESAT DE ORBITA BAJA QUE TRANSMITAN EN LA FRECUENCIA DE
435,800 MHz SSB/CW

Sergio Alberto Monroy Prieto

Proyecto trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Luis Fernando Ríos Sendoya
Ingeniero Electrónico, MSc I&C

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA ELECTRONICA
BOGOTA D.C.

2014

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, 6 de Junio de 2014

Dedicatoria:

Este trabajo de grado lo dedico a todos ustedes que son las personas más importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado. Con todo mi cariño este trabajo de grado lo dedico a:

Mis padres
Alberto y Mercedes
Esposa Diana
Hija Isabela
Hermanos Leonardo y Dennis
Todos mis amigos

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a todos los profesores que a lo largo de la carrera me han dado el conocimiento y las enseñanzas para hacerme un profesional intachable.

A mis queridos padres que siempre estuvieron apoyándome en cada paso que he dado en mi vida, y ahora en este tan importante como es mi grado, a mis amadas esposa e hija que llegaron en el mejor momento de mi vida a darme las alegrías más grandes y a acompañarme hoy y siempre en todos mis triunfos y proyectos.

CONTENIDO

1.	TÍTULO	9
2.	JUSTIFICACIÓN	9
3.	OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS.....	9
4.	MARCO REFERENCIAL.....	10
4.1	MARCO TEÓRICO.....	10
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA.....	10
4.3	MARCO HISTÓRICO.....	11
4.4	MARCO CONCEPTUAL.....	13
4.5	ESTADO ACTUAL.....	15
4.6	MARCO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO	15
5	DISEÑO METODOLÓGICO	24
5.1	INFORMACIÓN DE FRECUENCIA.....	27
5.2	PARÁMETROS ORBITALES	28
5.3	ÁREA DE COBERTURA	29
5.4	RASTREANDO EL SATÉLITE	32
5.5	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA ANTENA	36
6	RECURSOS DISPONIBLES	40
7	MUESTRA, INSTRUMENTOS, ESTUDIO PILOTO Y LOS ELEMENTOS PERTINENTES AL TIPO DE ESTUDIO;.....	40
7.1	PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION DE LA ANTENA.....	40
7.2	SIMULACION Y DATOS OBTENIDOS POR MATLAB.....	53
7.3	PRUEBAS REALIZADAS EN EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES PARA LA ANTENA DE ALUMINIO.	56
7.4	PRUEBAS REALIZADAS EN EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES PARA LA ANTENA DE COBRE.	60
8	CONCLUSIONES.....	64
	BIBLIOGRAFIA.....	66
	Anexo A.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía de Yagi a la edad de 70 años	11
Figura 2. Fotografía de Shintaro Uda.....	12
Figura 3. Ilustración de una antena Yagi Uda	14
Figura 4. Patrón de radiación para un elemento.....	16
Figura 5. Arreglo para un dipolo y un elemento parasito.....	17
Figura 6. Patrón de radiación para dos elementos.....	18
Figura 7. Patrón de radiación de una antena Yagi de 3 elementos.....	20
Figura 8. Prueba realizada con un director de longitud 0.408λ	21
Figura 9. Prueba realizada con un director de longitud 0.43λ	22
Figura 10. Prueba realizada con un director de longitud 0.44λ	22
Figura 11. Diagrama de radiación aumentando el número de elementos parásitos para incrementar Directividad.	23
Figura 12. Variación de la señal emitida	24
Figura 13. Fotografía de un arreglo de antena Yagi-Uda típica de radio aficionados para comunicación satelital. La antena relacionada a este proyecto corresponde a la del lado derecho.....	25
Figura 14. Fotografía Satélite Fuji OSCAR 29 FO-29.....	26
Figura 15. Parámetros Orbitales Espaciales.	28
Figura 16. Ángulos de Elevación y Azimuth.	30
Figura 17. Huella del satélite registrada luego del paso por área cerca a Colombia.	30
Figura 18. Cruce del satélite por la tierra describiendo una órbita con variación del ángulo de observación por cada paso.....	31
Figura 19. Pasos del satélite y puntos de observación.....	32
Figura 20. Interfaz que permite la predicción de las órbitas descritas por satélite en su cruce por nuestra ubicación geográfica	34
Figura 21. Resultados arrojados con ángulos correspondientes a la órbita descrita con respecto a la estación en tierra.	35

Figura 22. Posición del satélite en su recorrido normal por la órbita alrededor de la tierra.....	36
Figura 23. Antena Yagui-Uda básica	37
Figura 24. Características del dipolo.....	39
Figura 25: Varila de aluminio de 3/16”	41
Figura 26: Varilla de cobre de 1/8”	41
Figura 27: Varilla de cobre y varilla de aluminio cortada a la medida	42
Figura 28: Matriz para el doblaje de las varillas	43
Figura 29: Dipolo con varilla de aluminio.....	44
Figura 30: Madera puerto asís	45
Figura 31: Proceso de pintado	46
Figura 32: Proceso de perforado de la madera.....	47
Figura 33: Madera perforada.....	48
Figura 34: Antena Yagi –Uda para la frecuencia de 435.800Mhz.....	49
Figura 35. Conector de dipolos diseñado con cable RG8	50
Figura 36. Conexión realizada en los dipolos de la antena.....	51
Figura 37. Análisis del arreglo de la antena Yagi-Uda.....	52
Figura 38: Distribución actual de la antena.....	53
Figura 39: Patrón de radiación de la antena Yagi-Uda	53
Figura 40. Aislamiento en la cámara anecoica para la antena de aluminio	56
Figura 41. Conexión de la antena al analizador vectorial de redes	57
Figura 42. Perdida de retorno para la antena de aluminio.	58
Figura 43. Impedancia de la antena de aluminio, por medio de la carta de Smith.	58
Figura 44. Obtención del VSWR para la antena de aluminio.	59
Figura 45. Aislamiento en la cámara anecoica y conexión para la antena de cobre	60
Figura 46. Perdida de retorno para la antena de cobre.	61
Figura 47. Impedancia de la antena de cobre, por medio de la carta de Smith.	62
Figura 48. Obtención del VSWR para la antena de cobre	63

PROYECTO

1. TÍTULO

Arreglo de Antena Yagi-Uda para recepción de la señal de CubeSat de órbita baja que transmitan en la frecuencia de 435,800 MHZ SSB/CW

2. JUSTIFICACIÓN

La Institución Universitaria Los Libertadores, tiene en su plan de desarrollo las telecomunicaciones e implementar en el laboratorio una estación de recepción de señales radioeléctricas de CubeSat, contando con la instrumentación para la medición de los parámetros y caracterización de las antenas. Con este recurso veremos cómo obtener la información de satélites CubeSat de los países Andinos, tales como:

- Fuji Oscar 29 o FO29

3. OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS

Diseñar y Construir un arreglo de antena Yagi-Uda con el propósito de recibir la señal de satélites del tipo CubeSat, que transitan por la órbita baja (LEO) y lograr la medición de los parámetros de transmisión dentro de la banda 435.800 MHZ SSB/CW y para ello se desarrollaran los siguientes objetivos específicos:

- Cálculos de los parámetros de diseño.
- Simulaciones en MatLab (de propósito académico).
- Capturar las señales provenientes de uno de los CubeSat que muestran su huella sobre el territorio nacional.
- Caracterización de los parámetros de la antena.

- Construcción de la antena en alambres de cobre y otra con varillas de aluminio.
- Evaluar la importancia del metal utilizado en la construcción del arreglo de antenas.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

Una de las características de las antenas Yagi-Uda es su selectividad (responde solo al ancho de banda y frecuencia de oscilación para la cual se diseña).

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA.

El arreglo de antenas Yagi-Uda se caracterizara mediante la utilización de:

- un analizador de espectro,
- un analizador vectorial de redes,
- un generador de radio frecuencia y
- un conjunto de pruebas de antenas.

Con este conjunto de instrumentos de medición se realizaran las siguientes evaluaciones del Arreglo de antenas Yagi-Uda:

- Medición de la impedancia de entrada
- Parámetros S11 o coeficiente de reflexión,
- Razón de onda estacionaria
- Pérdidas de retorno (RL),
- Pérdidas de inserción (IL),
- Parámetro T (de transmisión)

4.3 MARCO HISTÓRICO

Como se entiende hoy, la antena Yagi-Uda fue desarrollada por *H. Yagi* y *Shintaro Uda* en la Universidad Imperial *Tohoku* en Sendai, Japón, en un intento conjunto por comunicar las islas Japonesas y los barcos, fue reportada por primera vez.

Figura 1. Fotografía de Yagi a la edad de 70 años



Fuente: Beam Transmission of Ultra short Waves: An Introduction to the Classic Paper by H. Yagi Proc. IRE, Junio 1928 IEEE.

En una publicación conjunta de autoría de Yagi y Uda y publicada en inglés en “*Imperial Academy Proceedings*” en Japón en Febrero de 1926. Como se reportó en artículos por el profesor G. Sato sobre la historia de la antena Yagi Uda, una serie de documentos posteriores describen esta antena en la literatura Japonesa desde 1926 hasta 1929; la antena fue patentada por Yagi en Japón en Marzo de 1926.

El trabajo recibió poca atención fuera de Japón, sin embargo en 1928, cuando Yagi visitó los Estados Unidos y repartió los documentos en reuniones del

Institute Radio Engineers (IRE) en Nueva York, Washington y Hartford. El tema de estas charlas fue publicado por Yagi en *Proceedings del IRE* en 1928 y ese documento dio a conocer el concepto del arreglo Yagi-Uda al mundo. De acuerdo a los comentarios públicos publicados con estos documentos técnicos, *J. H. Dellinger*, jefe de la División de Radio de la Oficina de Estándares en Washington, dijo: “Nunca he escuchado un documento en el que yo me sintiera tan seguro fuera destinado a ser clásico” Él estaba en realidad correcto en su conclusión. Yagi murió en Enero de 1976 a la edad de 90

Figura 2. Fotografía de Shintaro Uda



Fuente: Beam Transmission of Ultra short Waves: An Introduction to the Classic Paper by H. Yagi Proc. IRE, Junio 1928 IEEE.

Hidetsugu Yagi nació el 1ro de Enero de 1886 en Osaka, Japón. Graduado en ingeniería eléctrica de la Universidad Imperial de Tokio en 1909, y durante 1913-1916 viajó a Alemania, Inglaterra y los Estados Unidos para estudios posteriores. En 1919 Yagi fue designado profesor en la recientemente establecida Facultad de Ingeniería en la Universidad Imperial *Tokohu* de Sendai. Yendo en contra de la tendencia en esa época de ingeniería de “corriente pesada”. *Shintaro Uda* nació el 1ro de Junio de 1896, en Toyama Japón. Después de trabajar como profesor en una Universidad, Uda ingreso al programa de ingeniería eléctrica en la Universidad Imperial *Tokohu* donde se graduó en 1924 bajo la dirección del

profesor Yagi y fue nombrado como profesor en septiembre de 1924. Fue durante ese periodo que Yagi y Uda desarrollaron su arreglo de antena. Uda recibió un doctorado en 1931, después de ser nombrado profesor asociado de *Tokohu*. Visitó los Estados Unidos en 1932 y estudió por 2 años y fue nombrado profesor en *Tokohu* en 1936. Permaneció en la Universidad de *Tokohu* por el resto de su carrera, y murió en Agosto de 1976.

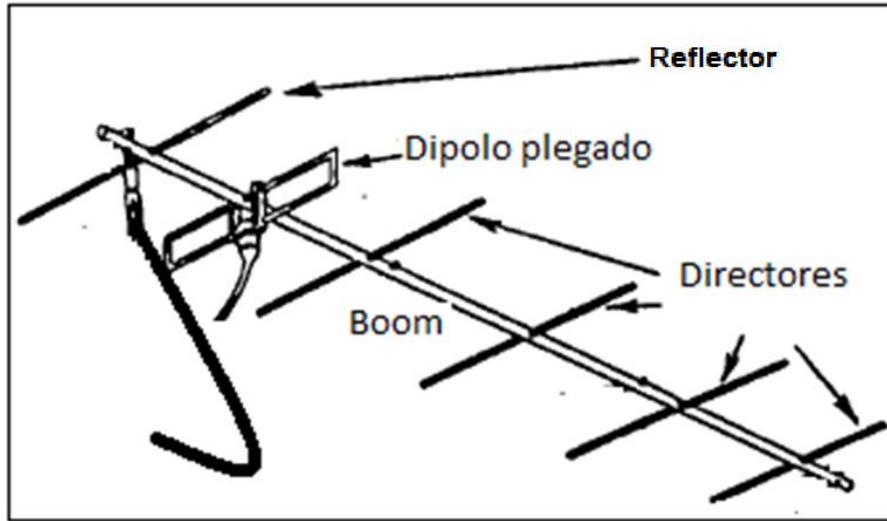
4.4 MARCO CONCEPTUAL

Al realizar la construcción de la antena se determinó que un dipolo lineal muy delgado tiene un ancho de banda y unas características de impedancia de entrada de banda muy angostas.

Se puede observar como la señal alcanzada tiene su nivel máximo cuando se tiene una distancia de 0.34λ , entre elementos y la longitud del elemento parásito se encuentra en un rango de 0.45λ , situación que cambia cuando la longitud de este elemento es mayor a 0.5λ en donde se aprecia un incremento para la distancia entre elementos de 0.34λ con respecto a la distancia de 0.1λ .

Se presenta a continuación el diagrama obtenido para implementar la antena Yagi-Uda final.

Figura 3. Ilustración de una antena Yagi Uda



Fuente: Design of Yagi Aerials By R.M .Fishenden, M.A. and E.R. Wimblin. 1948

El director es el más corto de los elementos parásitos y es por donde la Yagi apunta a la estación receptora. Es relativamente más resonante en frecuencia que su elemento conductor, y su longitud es cerca de 5% más corto, progresivamente más que el elemento conductor. La longitud del director puede variar, dependiendo del espaciamiento del director, el número de directores empleados, el patrón deseado, ancho de banda y el diámetro del elemento. El número de directores que pueden ser usados son determinados por el tamaño físico (longitud) del boom necesitado en el diseño.

Los directores son usados para dar a la antena patrones direccionales y ganancia. La cantidad de ganancia es directamente proporcional a la longitud al arreglo de la antena y no por el número de directores usados. El espacio de los directores puede variar de 0.1 a 0.5 la longitud de onda o más y dependerá en gran medida de las especificaciones del diseño.

El reflector es el elemento que es puesto en la parte de atrás del elemento conductor (el dipolo). Su frecuencia de resonancia es más baja, y su longitud es

aproximadamente 5% más larga que el elemento conductor. Su longitud variará dependiendo del espacio y del diámetro del elemento. El espaciamiento del reflector estará entre 0.1 y 0.25 longitudes de onda. Su espaciamiento dependerá de la ganancia, ancho de banda, F/R (Relación de adelante hacia atrás) y requerimientos del patrón del lóbulo lateral del diseño de antena final.

Dipolos anchos son considerados de banda ancha mientras que los dipolos delgados son de banda angosta. Esta geometría puede ser considerada una forma especial de la antena bicónica cuando $\alpha = 0$.

4.5 ESTADO ACTUAL

Este tipo de antenas es principalmente usado en transmisiones y recepción de señales de TV.

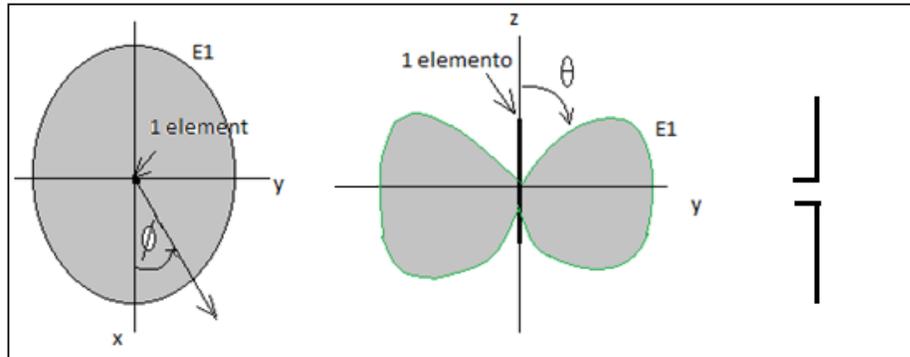
Hoy en día el diseño de una antena Yagi-Uda convencional, la cual puede ser encontrada en casi cada tejado, no solo permanece como referencia para radio aficionados y antenas de TV sino también generó una nueva cantidad de actividades en nano-óptica, apuntado a conseguir emisión de luz unidireccional de transmisión y detección a escala nano.

4.6 MARCO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

Los estudios realizados por *Shintaro Uda* y *Hidetsugu Yagi* para hacer que el descubrimiento de su antena patentada tuviera el patrón de radiación totalmente directivo comenzó realizando pruebas de cómo se comporta el patrón de radiación de un dipolo elemental, preguntándose qué sucedería si le agregan elementos extraños cercanos a este y observar que cambios se obtuvieron en el patrón de radiación.

La figura 6 muestra un segmento en dos dimensiones del patrón de radiación de un dipolo elemental en un plano perpendicular al plano de la espira. No hay radiación de un bucle a lo largo del eje que pasa por el centro del bucle, como se muestra a continuación.

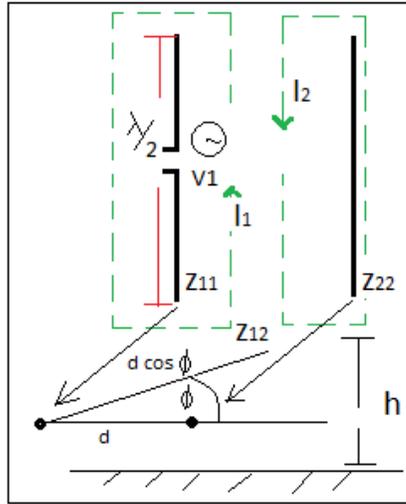
Figura 4. Patrón de radiación para un elemento



Fuente: Ilustración del autor

Tenemos que ahora ubicamos en las relaciones del circuito de las antenas y para ello utilizamos la ley de Kirchhoff para dos circuitos, dado que inicialmente el análisis se realiza con dos elementos, por lo tanto partimos del caso de un arreglo en espacio libre que consiste en un dipolo de $\lambda/2$ y un elemento parásito, ahora vamos a suponer que ambos elementos están ubicados verticalmente de tal manera que el ángulo azimuth ϕ es como se indica en la figura 7:

Figura 5. Arreglo para un dipolo y un elemento parasito



Fuente: Ilustración del autor

El arreglo para un dipolo y un elemento parasito describiendo corrientes e impedancias además del ángulo formado considerando los elementos paralelos sobre la superficie a una altura h.

Las ecuaciones mostradas a continuación se basan en el modelamiento básico de dos mallas por las que circula la corriente, una de ellas formada por el dipolo con un voltaje de entrada y el otro equivalente a un elemento parásito que forma un circuito cerrado con diferencial de potencial igual a cero.

$$V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12}$$

$$0 = I_2 Z_{22} + I_1 Z_{12}$$

Dónde:

$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ = Equivalente a la impedancia propia del elemento 1.

$Z_{22} = R_{22} + jX_{22}$ = Equivalente a la impedancia propia del elemento 2.

Z_{12} = Equivalente a la impedancia mutua de las antenas (debido a la altura sobre un plano horizontal).

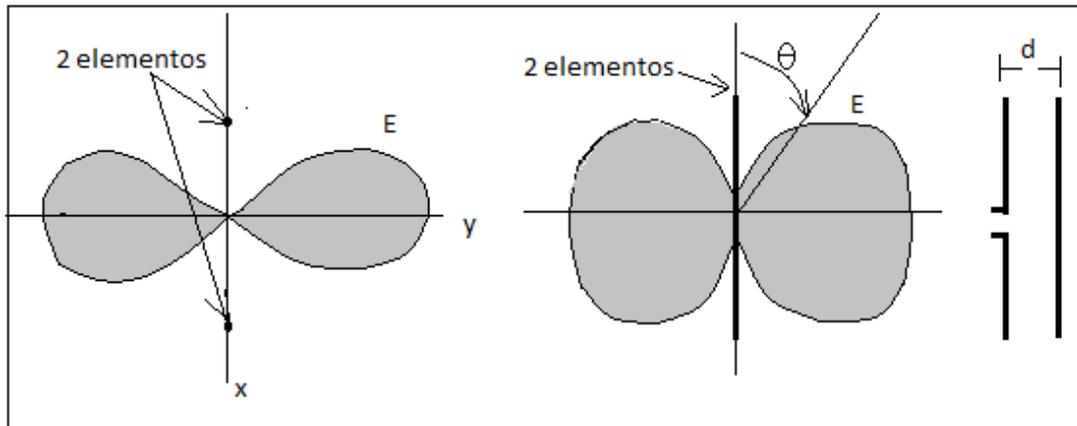
V_1 = Equivalente de diferencia de potencial en las terminales de la antena.

Corriente en el elemento 2

$$I_2 = -I_1 \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| \angle \tau_m - \tau_2$$

En los experimentos que realizaron Yagi y Uda, notaron que los lóbulos empezaron a hacerse más directivos, como se muestran en la siguiente figura:

Figura 6. Patrón de radiación para dos elementos.



Fuente: Ilustración del autor

El circuito equivalente de los elementos anteriores está representado por:

$$I_2 = I_1 \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| \angle \xi$$

Donde $\xi = \pi + \tau_m - \tau_2$, en el cual

$$\tau_m = \arctan \frac{X_{12}}{R_{12}}$$

$$\tau_2 = \arctan \frac{X_{22}}{R_{22}}$$

La intensidad de campo eléctrico para un elemento de $\frac{\lambda}{2}$ está dada por con una potencia de entrada P es

$$E_{HW}(\phi) = kI_0 = k \sqrt{\frac{P}{R_{00} + R_{0L}}} (Vm^{-1})$$

Donde

$$R_{00} = \text{Auto resistencia de un solo elemento de } \frac{\lambda}{2}, \Omega$$

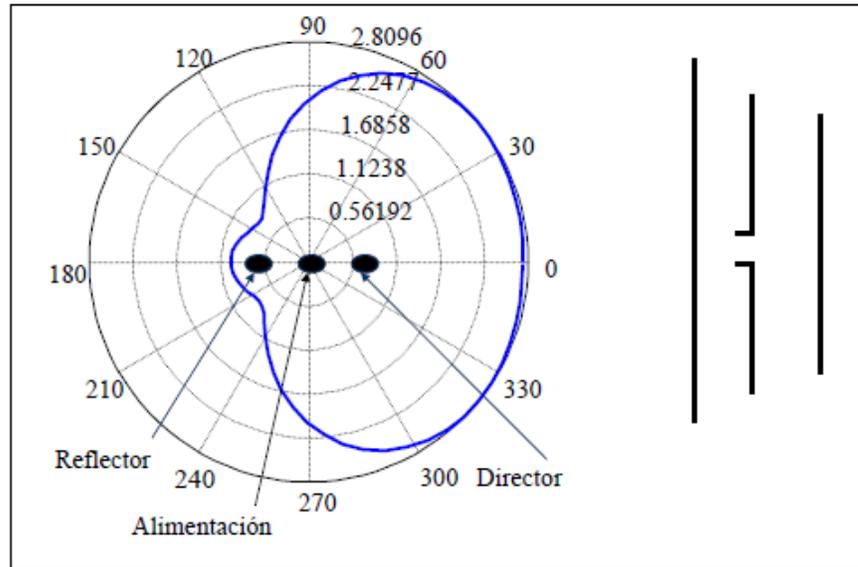
$$R_{0L} = \text{Perdida de resistencia de un solo elemento de } \frac{\lambda}{2}, \Omega$$

La ganancia de intensidad de campo de un arreglo de antena respecto a un solo elemento de $\lambda/2$ con la misma relación de campo eléctrico, Ya que $R_{00} = R_{11}$ y dejando a $R_{0L} = R_{1L}$, tenemos

$$G_f(\phi) \left[\frac{A}{HW} \right] = \sqrt{\frac{R_{11} + R_{1L}}{R_{11} + R_{1L} - |Z_{12}^2 / Z_{22}| \cos(2\tau_m - \tau_2)}} \left(1 + \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| \angle \xi + d_r \cos \phi \right)$$

Se entra a considerar dos casos cuando la adición de elementos parásitos es mayor, en este caso detrás de dicho dipolo el patrón de radiación desapareciendo uno de los lóbulos y el otro haciéndose más directivo, tal como se apreciará a continuación.

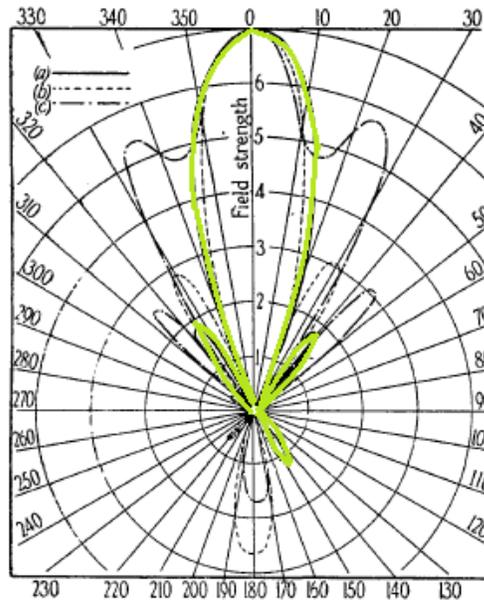
Figura 7. Patrón de radiación de una antena Yagi de 3 elementos



Fuente: Radiación y Comunicación Juan José Murillo. Noviembre 2007

Las siguientes pruebas que dieron paso a su descubrimiento fue agregarle más elementos extraños (directores) y así se darían cuenta que uno de los lóbulos cada vez sería más directivo y el otro se convertiría en pequeñas pérdidas de potencia.

Figura 8. Prueba realizada con un director de longitud 0.408λ .

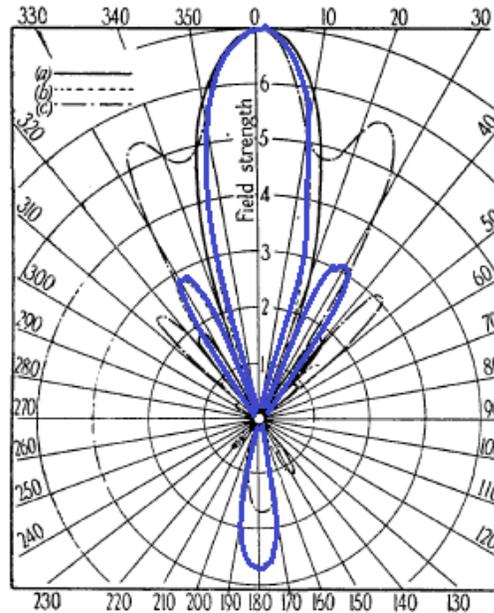


Fuente: Design of Yagi Aerials By R.M.Fischenden,M.A. and E.R. Winblin. 1948

También se tomó en cuenta que estos cambios en el patrón de radiación se favorecerían cambiando la geometría y la longitud de dichos elementos que luego fueron llamados directores, aquellos que encontramos delante del dipolo y reflector el que vemos detrás de este.

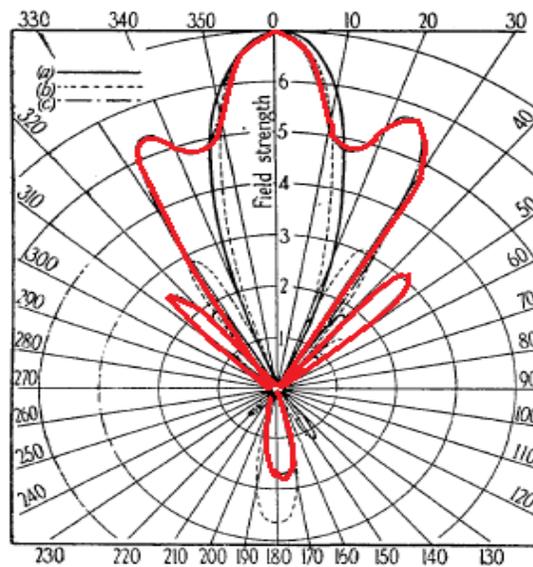
Las amplitudes de los lóbulos laterales pueden ser obtenidos directamente, si los diagramas de vector son asumidos como arcos circulares, por la adición de una gran cantidad de vectores, pequeños, iguales e inclinados.

Figura 9. Prueba realizada con un director de longitud 0.43λ .



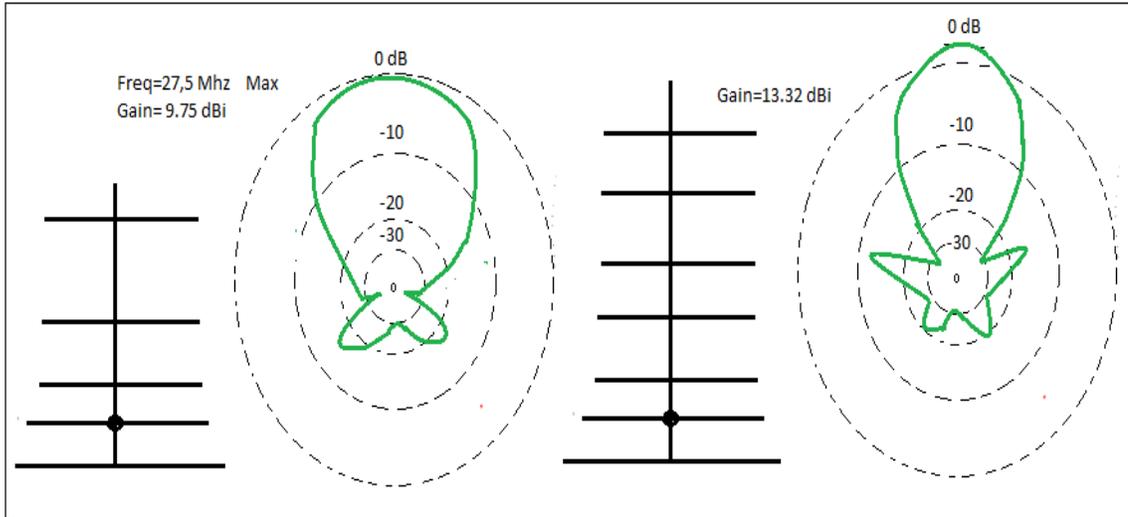
Fuente: Design of Yagi Aerials By R.M.Fischenden,M.A. and E.R. Winblin.1948

Figura 10. Prueba realizada con un director de longitud 0.44λ .



Fuente: Design of Yagi Aerials By R.M.Fischenden,M.A. and E.R. Winblin.1948

Figura 11. Diagrama de radiación aumentando el número de elementos parásitos para incrementar Directividad.



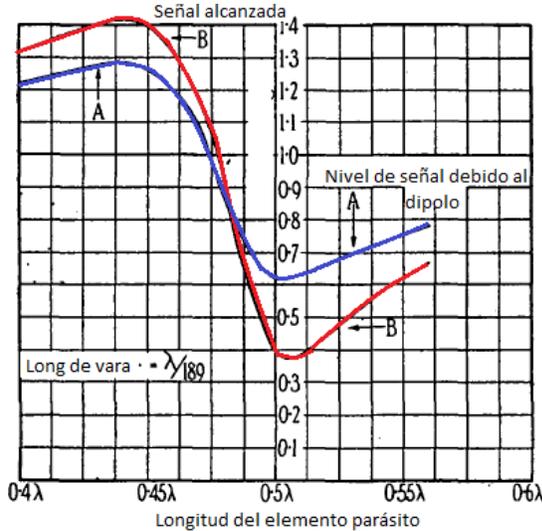
Fuente:Electrodinámica clásica, Miguel Ángel Solano.

La misión de los elementos situados delante, entre 1 y 20, de longitud menor, es la de dirigir el haz en esa dirección, son los elementos directores. El diseño es sencillo y barato, se alimenta fácilmente, tiene un peso ligero sin gran resistencia al viento, un ancho de banda relativamente grande y tiene una ganancia relativamente alta en el rango 5-20 dB dependiendo del número de elementos directores.

A continuación se va a presentar un esquema que indica la magnitud de la señal con respecto a la variación de la distancia entre el dipolo como elemento excitador y el primer elemento parásito para una serie de longitudes del elemento en mención. Para un elemento parásito de longitud menor a 0.47λ hay un incremento de señal en dirección de del elemento parásito y es un director, para longitudes de señales mayores hacia el elemento parásito la señal es decrementada y el elemento parásito se convierte en un reflector.

Figura 12. Variación de la señal emitida

Del dipolo y parásito con la longitud de este último. La línea azul a un espacio de 0.34λ y la roja con espacio de 0.1λ entre elementos.



Fuente: Design of Yagi Aerials By R.M .Fishenden, M.A. and E.R. Wimblin. 194

5 DISEÑO METODOLÓGICO

La comunicación se lleva a cabo cuando el satélite se ubica en la órbita deseada. El área de cobertura sobre la superficie terrestre depende de parámetros orbitales, de tal manera que se alcanza la comunicación cuando la estación en tierra puede entrar en contacto con los satélites LEO (Low Earth Orbiting) en una región visible y su duración varía dependiendo del satélite y del tiempo de permanencia en la región visible. La comunicación en ángulos de baja elevación suele ser afectado por factores como barreras naturales o ruido producido por el hombre.

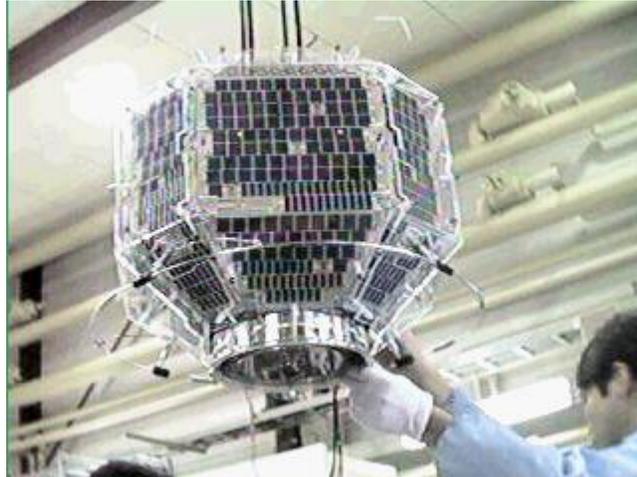
Uno de los posibles satélites a interceptar es el Fuji Oscar 29 FO-29 o cualquiera que transmita en la frecuencia de los 435.000 MHz.

Figura 13. Fotografía de un arreglo de antena Yagi-Uda típica de radio aficionados para comunicación satelital. La antena relacionada a este proyecto corresponde a la del lado derecho.



Fuente: Antenna system for a ground station communicating with the NTNU Test Satellite (NUTS), July 2011.

Figura 14. Fotografía Satélite Fuji OSCAR 29 FO-29.



Fuente: http://ukamsat.files.wordpress.com/2012/10/fuji-oscar-29-ias_2.gif

El FO-29, llamado JAS-2, es un satélite japonés lanzado desde el Centro Espacial de Tenagashima el 17 de agosto de 1996. Opera tanto en modo analógico como digital de acuerdo a una programación mensual que publica su estación de control

El satélite FO-29 transmite en modo de J (Transmisión de datos analógicos y digitales) o SSB Modulación de banda lateral única) que significa que utiliza para el enlace descendente UHF y VHF para el enlace ascendente. A juzgar por la regla de oro, de siempre sintonizar manualmente los satélites de más altas frecuencias usando el efecto Doppler, como el FO-29 se puede trabajar con un semidúplex todo el modo de radio.

Denominación:	FO-29
Puesto en órbita:	1974-11-15
Nombre Común:	<i>Fuji Oscar 29</i>
Tipo de Satélite:	Micro satélite
Altura:	830km
Inclinación:	101.59 grados
Apogeo:	1459.00

Perigeo:	1440.00
Periodo:	114.87
Dimensiones:	36.0cm X 42.4cm octaedro.
Peso:	28.800 Kg
Orbita:	Polar LEO (Low Earth Orbit)

5.1 INFORMACIÓN DE FRECUENCIA

Central:	435.800Mhz
Ancho de banda:	10khz
Modulación audio:	CW, SSB

Guía (100 mW) Formato de Telemetria

- 435.795 MHz – CW (12 wpm)
- 435.910 MHz – PSK digital – Transmisor Digital

Transponder Digital – Modo JD (1 Watt)

- Uplinks: AFSK (FM) 1200 bps, AX.25, Manchester Encoded
 - 145.850 MHz
 - 145.870 MHz (the only 9600 bps uplink frequency)
 - 145.890 MHz
 - 145.910 MHz
- Downlink: BPSK 1200 bps or FSK 9600 bps
 - 435.910 MHz (Tambien Transmisor Digital de Frecuencia)

Transponder Analogico – Modo JA (1 Watt)

- Uplink: 145.900 – 146.000 MHz
- Downlink: 435.800 – 435.900 MHz (invertido)

Los parámetros básicos de la comunicación son la frecuencia de comunicación y la órbita. La asignación de frecuencias es tratado por acuerdos internacionales,

generalmente las órbitas descritas son elipses dentro de planos orbitales definidos por parámetros orbitales, las órbitas que presentan cero excentricidad son llamadas órbitas circulares y simplifican el análisis, el movimiento del satélite dentro de su órbita circular es representado por tiempo orbital, radio, altitud y velocidad.

5.2 PARÁMETROS ORBITALES

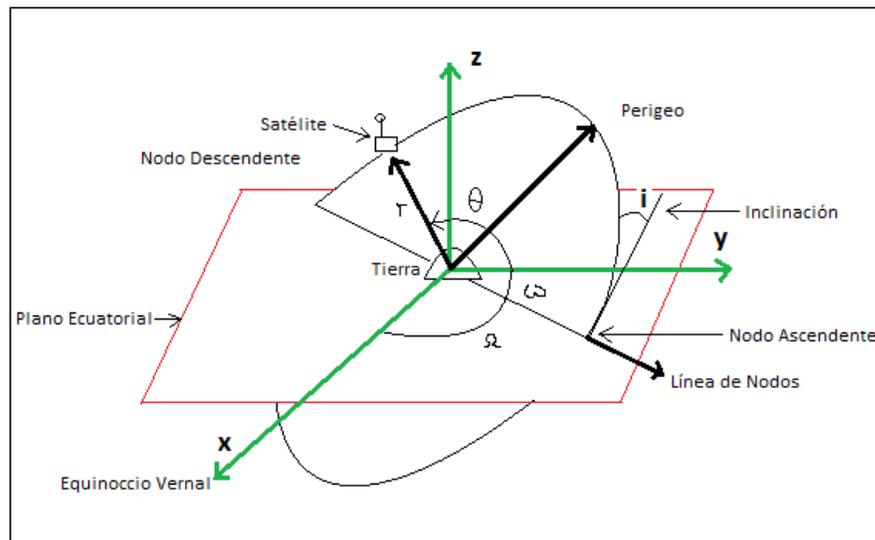
Las órbitas son generalmente clasificadas de esta manera:

GEO: Geosynchronous Earth Orbits.

MEO: Medium Earth Orbits.

LEO: Low Earth Orbits.

Figura 15. Parámetros Orbitales Espaciales.



Fuente: Ilustración del autor

A continuación se dará un repaso acerca de cada uno de los términos señalados previamente.

Posición de plano orbital en el espacio: Se especifica a través de dos parámetros, la inclinación i y la inclinación del nodo ascendente Ω . La inclinación i representa el ángulo del plano orbital con respecto al ecuador de la Tierra. El nodo de ascenso Ω (Omega) define la localización de puntos de cruce orbitales ascendentes y descendentes (haciendo una línea de nodos) con respecto a una dirección fija en el espacio llamada equinoccio Vernal, la cual corresponde a la línea de unión el centro de la tierra y el sol el primer día de primavera, estos cálculos se realizan para países que cuenta con los cambios de estación, los países localizados en el trópico adoptamos estos parámetros para los cálculos de ingeniería.

Localización de la órbita en el plano orbital: Normalmente un número infinito de orbitas pueden extenderse a lo largo de un plano orbital, de tal manera que la orientación de la órbita en su plano se define por el ángulo perigeo ω , es el ángulo tomado positivamente de 0 a 360 grados en la dirección del movimiento del satélite, entre la dirección del nodo de ascenso y la dirección del perigeo.

Posición del Satélite en la órbita: Está determinado por el ángulo v llamado anomalía verdadera, el cual es el ángulo medido positivamente en la dirección del movimiento del satélite de 0 a 360 grados, entre la dirección del perigeo y la posición del satélite.

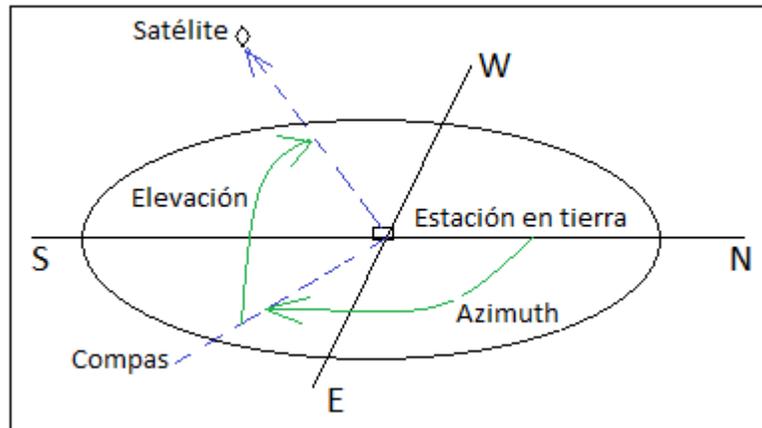
Figura de la órbita: Se presenta por el eje semi principal a , el cual determina el tamaño de orbita y excentricidad e , que definen la forma de la órbita.

5.3 ÁREA DE COBERTURA

La posición del satélite considerando su órbita y un lugar desde el punto de observación se determina por los ángulos Azimuth y de Elevación, y esta área se

define como una región de la Tierra donde puede verse con un mínimo ángulo de elevación:

Figura 16. Ángulos de Elevación y Azimuth.



Fuente: Ilustración del autor

Figura 17. Huella del satélite registrada luego del paso por área cerca a Colombia.

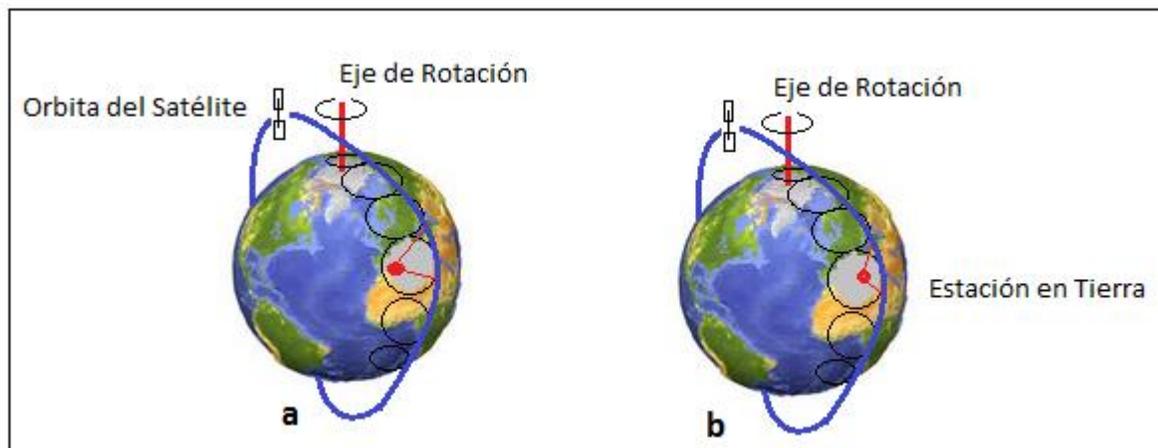


Fuente: <http://www.n2yo.com/?s=18362>

En la figura anterior se muestra el área de influencia o huella del satélite y es precisamente la que estamos captando, la duración varía en cada cruce pero se ha determinado que en promedio supera los 15 minutos, en este caso el cruce fue por una zona cercana al territorio nacional, se tomó como ejemplo pero a la hora de realizar la comunicación debemos garantizar que el área sombrada se alinee perfectamente con nuestra ubicación en Colombia, cruce que se logra alrededor de cada 3 días según patrón captado luego de varios rastreos.

Debido a que la Tierra tiene rotación constante, cada órbita descrita por el Satélite en cada uno de sus pasos por la tierra presenta ángulos de observación diferentes, esto evidencia el cambio de los ángulos de Elevación y Azimuth por cada paso, esto conduce a pensar que habrá múltiples cruces con un ángulo máximo de elevación igual a 5° .

Figura 18. Cruce del satélite por la tierra describiendo una órbita con variación del ángulo de observación por cada paso.



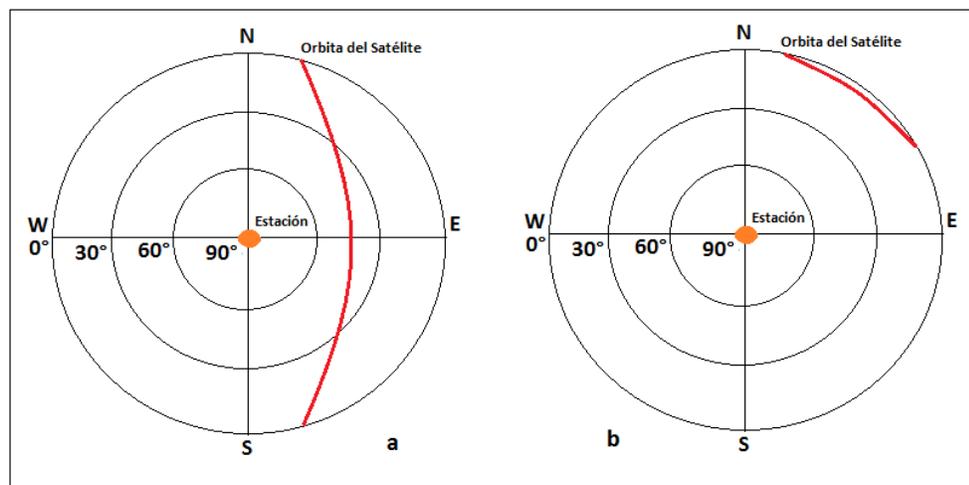
Fuente: Ilustración del autor

La gráfica anterior nos permite ver como el área sombreada en gris tiene ángulos de observación diferentes a medida que el satélite describe una órbita, esto por el movimiento rotacional de nuestro planeta tierra.

5.4 RASTREANDO EL SATÉLITE

El parámetro del círculo es el plano horizontal, con el Norte en la cima ($Az = 0^\circ$), al Este ($Az = 90^\circ$), al Sur ($Az = 180^\circ$) y al Oeste ($Az = 270^\circ$). Tres círculos representan elevaciones diferentes a 0° , 30° y 60° , se observa que en la mitad el ángulo de elevación es igual a 90° :

Figura 19. Pasos del satélite y puntos de observación.



Fuente: Ilustración del autor

- primer paso del satélite, punto de mayor observación,
- segundo paso del satélite menor tiempo de observación.

Podemos observar como en el primer gráfico el cruce del satélite con respecto a la estación en tierra permite mayor tiempo de observación y por lo tanto el enlace es más efectivo dado que no existen barreras para hacerlo, en el segundo caso se

puede decir que la comunicación es nula dado que el tiempo durante el cual se puede establecer cualquier contacto es mínimo y el ángulo de observación es muy reducido pudiéndose ver afectado por barreras naturales y ruido producido por el hombre.

También vale la pena describir algunos parámetros que se tratarán durante el rastreo del satélite tal como sigue:

AOS_{time}: consecución de satélite (tiempo).

LOS_{time}: pérdida del satélite (time).

AOS_{az}: consecución de satélite (azimuth).

LOS_{az}: pérdida del satélite (azimuth).

MaxEI: Máxima elevación.

El tiempo teórico máximo para establecer la comunicación está dado por la ecuación:

$$Duration = AOS_{time} - LOS_{time}$$

Teniendo en cuenta lo estudiado previamente ahora vamos a realizar un monitoreo para rastrear el satélite y determinar las coordenadas durante los próximos 10 cruces, para ello ubicamos nuestras coordenadas a través de la página EXA que nos proporciona nuestra ubicación exacta en Bogotá D.C. obteniendo los siguientes resultados:

Latitude: 4.60971° N

Longitude: -74.08175° W

Magnetic decl.: 6° 26' W

A continuación se muestra la tabla donde podemos simular en línea teniendo en cuenta los parámetros anteriores, número de cruces y satélite requerido.

Figura 20. Interfaz que permite la predicción de las órbitas descritas por satélite en su cruce por nuestra ubicación geográfica

Your results are shown above
Use the form below to request more pass predictions

Show Predictions for: FO-29 ▼ for Next 10 ▼ Passes	
Calculate Latitude and Longitude from Gridsquare:	<input type="text"/> <input type="button" value="Calculate Position"/>
<i>Or</i>	
Enter Decimal Latitude:*	<input type="text" value="4.60971"/> North ▼
Enter Decimal Longitude:*	<input type="text" value="-74.08175"/> West ▼
Elevation (Metres):	<input type="text" value="6°26'"/>
<input type="button" value="Predict"/>	
<input type="checkbox"/> Save my location for later use *** Database Error - sql - InitDB line 14	

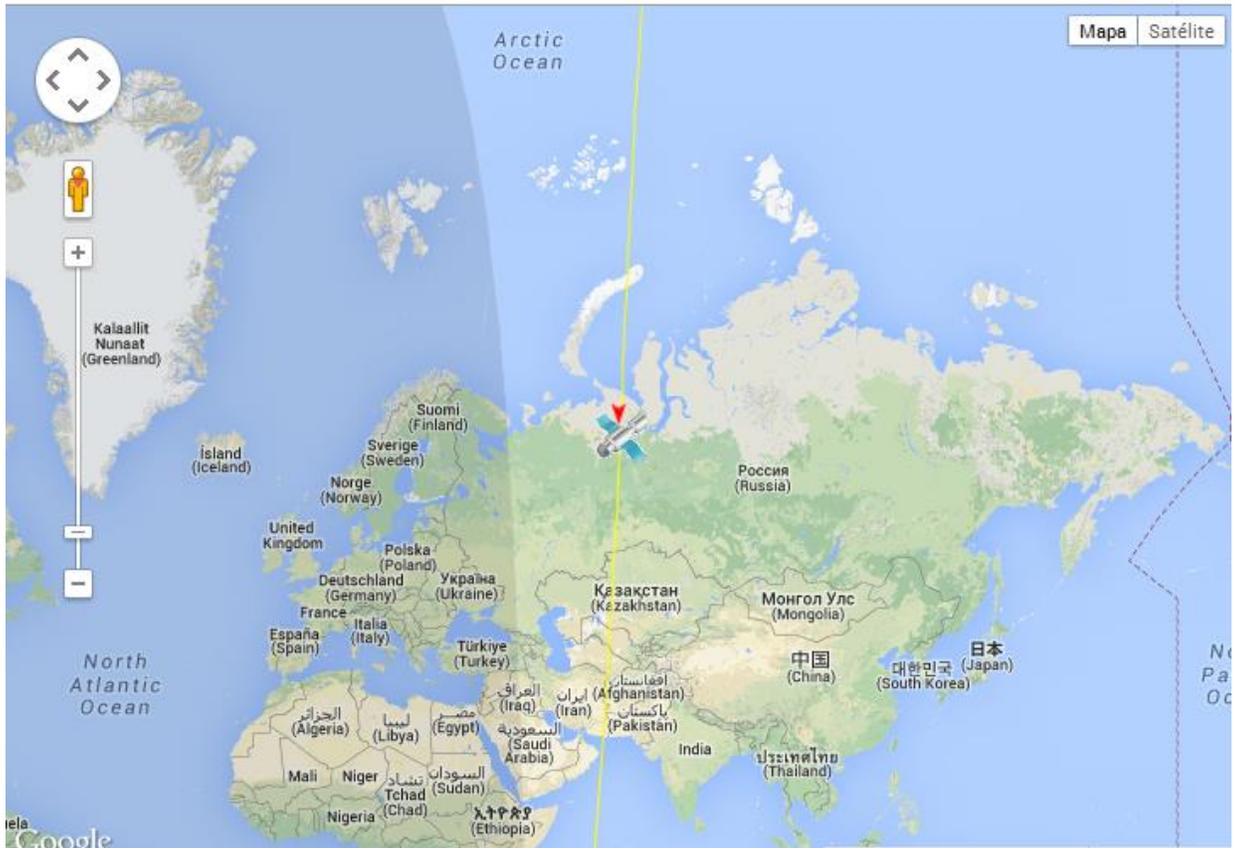
Fuente: <http://ww2.amsat.org/amsat-new/tools/predict/>

Figura 21. Resultados arrojados con ángulos correspondientes a la órbita descrita con respecto a la estación en tierra.

AMSAT Online Satellite Pass Predictions - FO-29							
View the current location of FO-29							
Date (UTC)	AOS (UTC)	Duration	AOS Azimuth	Maximum Elevation	Max El Azimuth	LOS Azimuth	LOS (UTC)
21 May 14	00:39:02	00:19:09	35	29	108	169	00:58:11
21 May 14	02:23:31	00:19:41	355	37	282	212	02:43:12
21 May 14	12:18:29	00:11:06	124	10	82	27	12:29:35
21 May 14	14:01:28	00:14:42	182	40	269	335	14:16:10
21 May 14	23:47:33	00:12:30	64	7	102	140	00:00:03
22 May 14	01:28:11	00:20:51	15	78	81	190	01:49:02
22 May 14	03:15:32	00:15:11	333	12	279	237	03:30:43
22 May 14	13:06:33	00:14:44	155	42	67	0	13:21:17
22 May 14	14:53:23	00:10:54	211	9	252	306	15:04:17
23 May 14	00:34:21	00:18:55	36	27	109	168	00:53:16
23 May 14	02:18:36	00:19:55	357	40	286	210	02:38:31
23 May 14	12:13:51	00:10:36	121	9	79	29	12:24:27
23 May 14	13:56:31	00:14:52	180	45	267	337	14:11:23
23 May 14	23:43:13	00:11:46	67	6	105	137	23:54:59
24 May 14	01:23:23	00:20:51	16	74	94	188	01:44:14
24 May 14	03:10:28	00:15:46	335	13	298	235	03:26:14
24 May 14	13:01:43	00:14:37	152	38	64	2	13:16:20
24 May 14	14:48:14	00:11:24	208	10	250	309	14:59:38
25 May 14	00:29:40	00:18:41	38	25	110	166	00:48:21
25 May 14	02:13:43	00:20:07	358	43	289	208	02:33:50

Fuente: <http://ww2.amsat.org/amsat-new/tools/predict/>

Figura 22. Posición del satélite en su recorrido normal por la órbita alrededor de la tierra.



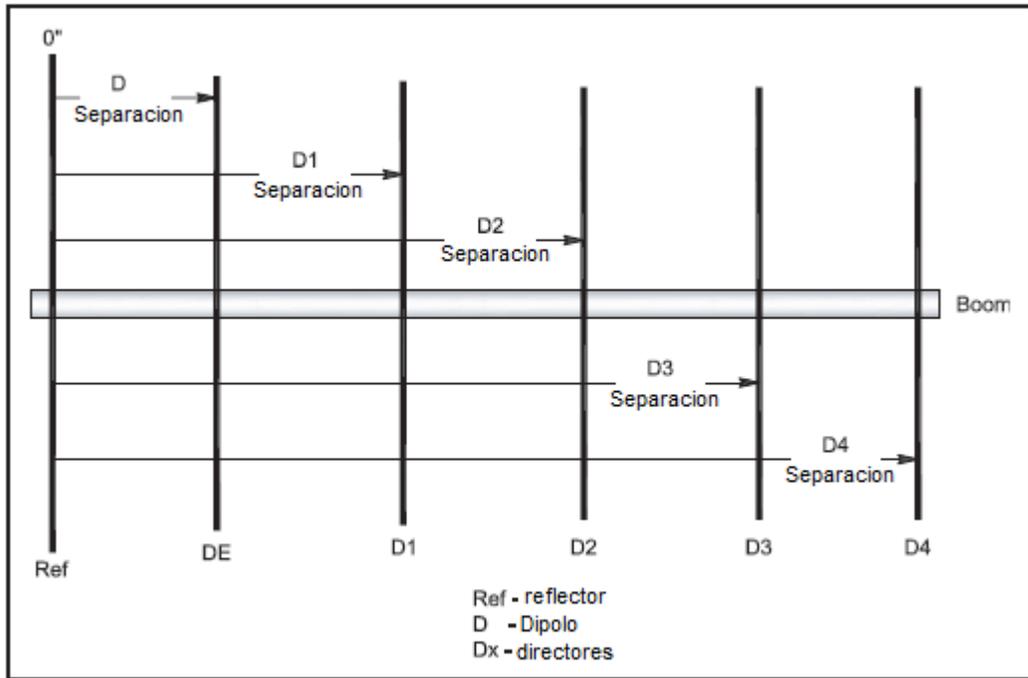
Fuente: <http://www.n2yo.com/?s=18362>

La gráfica anterior nos da una descripción en cuanto a posicionamiento del satélite en tiempo real, se describe la órbita que éste recorre normalmente al igual que latitud, longitud, altitud y velocidad.

5.5 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA ANTENA

Para el cálculo de la antena que recibirá la señal de un satélite, se debe tener en cuenta la frecuencia a la cual transmite y otros parámetros dados por el fabricante del satélite, y de este modo realizar el procedimiento matemático para conocer las longitudes de los elementos paracitos que llevara el diseño.

Figura 23. Antena Yagui-Uda básica



Fuente: The ARRL Handbook For Radio Communications 2013 90 edition

La figura 25 muestra el plan básico para la antena y las etiquetas de las dimensiones que se dan en la tabla para cada banda. Todas las dimensiones de la mesa se dan en pulgadas.

Reflector:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{150}{f} [m] = 37.31cm$$

Director:

$$0.9 \frac{\lambda}{2} = \frac{135}{f} [m] 33.59cm$$

Directores:

$$m: 0.900 \frac{\lambda}{2} = \frac{135}{f} [m] = 33.59cm$$

$$n: 0.885 \frac{\lambda}{2} = \frac{133}{f} [m] = 33.09cm$$

$$p: 0.867 \frac{\lambda}{2} = \frac{130}{f} [m] = 32.34cm$$

$$q: 0.860 \frac{\lambda}{2} = \frac{129}{f} [m] = 32.09cm$$

$$s: 0.837 \frac{\lambda}{2} = \frac{126}{f} [m] = 31.35cm$$

Estos modelos matemáticos están dados para estos elementos, en la siguiente tabla se ve cómo se da la ganancia a la antena según la cantidad de elementos parásitos en ella.

Para estos satélites de Amsat, existen parámetro que ellos proporcionan a los radioaficionados por medio de libros y publicaciones, especifican como diseñar las antenas para la transmisión y recepción de sus satélites según su necesidad o su frecuencia de transmisión, como es el caso de este proyecto donde se diseñara una antena Yagui-Uda para la recepción de la señal emitida por el satélite meteorológico Amsat que transmite en la banda de los 435MHz.

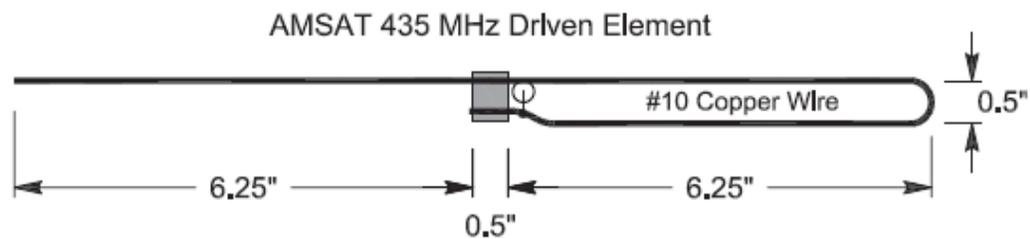
Tabla 1. Cantidad de elementos parásitos según ganancia.

Dimensione de la antena Yagi												
WA5VJB 435 MHz		<i>Ref</i>	<i>DE</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	<i>D5</i>	<i>D6</i>	<i>D7</i>	<i>D8</i>	<i>D9</i>
6-elementos	Longitud	13.4	—	12.4	12.0	12.0	11.0					
8-elementos	Longitud	13.4	—	12.4	12.0	12.0	12.0	12.0	11.1			
10-elementos	Longitud	13.4	—	12.4	12.0	12.0	12.0	12.0	11.75	11.75	11.1	
11-elementos	Longitud	13.4	—	12.4	12.0	12.0	12.0	12.0	11.75	11.75	11.75	11.1
	Longitud	0	2.5	5.5	11.25	17.5	24.0	30.5	37.75	45.0	52.0	59.5
Dimensiones en pulgadas												

Fuente: The ARRL Handbook For Radio Communications 2013 90th edition

Los parámetros de diseño del dipolo que se utilizara para esta antena también son suministrados de la misma forma que los datos anteriores y tendrá las siguientes recomendaciones.

Figura 24. Características del dipolo



Fuente: The ARRL Handbook For Radio Communications 2013 90 edition

La figura 26 demuestra cómo se construye el elemento accionado para esta antena. Tiene un corte en un extremo del elemento excitado para sintonizar la ROE mínima a la frecuencia deseada.

Es una importante consideración de diseño tener una alta relación de *front-to-back ratio*(F/B), el modelo predice que para una antena de 6 elementos se tendrá una relación de *front-to-back ratio*(F/B), es de 30 dB, y para más de 6 elementos será de más de 40 dB. En cuanto a la ganancia, la antena de 6 elementos tendrá 11,2 dBi, en el caso de la de 8 elementos será de 12,6 dBi, para 10 elementos será de 13,5 dBi, y para los 11 elementos será una ganancia de 13,8 dBi por lo tanto esta es la apropiada para el desarrollo de este proyecto.

El uso de madera (cedro Puerto Asis) cuadrada de $\frac{3}{4}$ de pulgada para el mástil hace que sea fácil de construir dos antenas en el mismo brazo con polarización circular. El desplazamiento de las dos antenas es de 6,5 pulgadas a lo largo de la pluma y alimentarlos en fase de polarización circular, o simplemente utilizar uno para operaciones portátiles. Todos los elementos parásitos están hechos de varilla

de diámetro 1/8-pulgada y el elemento excitado o dipolo está hecho de alambre 10 AWG (American wire gauge) de cobre sólido como y su longitud esta especificada en la figura 26. Las longitudes y separaciones se dan en la Tabla 1.

6 RECURSOS DISPONIBLES

Varilla de cobre de 1/8"

Varilla de aluminio de 3/16"

Conectores tipo N hembra

Conectores tipo N macho

Cable RG8

Madera Cedro Puerto Asis

Abrazaderas de sujeción

Conexiones al sistema de puesta a tierra

Cable 7 hilos calibre 10 AWG verde con franja amarilla

Terminales de cobre estañado

7 MUESTRA, INSTRUMENTOS, ESTUDIO PILOTO Y LOS ELEMENTOS PERTINENTES AL TIPO DE ESTUDIO;

7.1 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION DE LA ANTENA

Teniendo en cuenta los parámetros de diseño según Amsat para la construcción de la antena Yagi-Uda se procedió a utilizar y adecuar los materiales requeridos.

En este proyecto se construirán dos antenas iguales utilizando materiales diferentes en cada una y observar cuál de los dos es más eficiente para este tipo de antenas, varilla de aluminio de 3/16" para la antena 1 y varilla de cobre de 1/8" para la antena 2 como lo dice el texto antes mencionado.

Figura 25: Varila de aluminio de 3/16"



Fuente: Ilustración del autor

Figura 26: Varilla de cobre de 1/8"



Fuente: Ilustración del autor

Luego de conseguir ambos tipos de varilla, se realizaron las medidas de cada elemento de las antenas y se cortaron a las longitudes especificadas en la tabla 1,

Figura 27: Varilla de cobre y varilla de aluminio cortada a la medida



Fuente: Ilustración del autor

El paso a seguir fue construir los dipolos, los cuales tienen parámetros de diseño especificados en la figura 26, los cuales muestran las medidas y la curvatura de este tipo de elemento, para ello se fabricó una matriz con hierro y en ella una barra con un diámetro de la misma medida del radio interno de la curva del dipolo.

Figura 28: Matriz para el doblaje de las varillas



Fuente: Ilustración del autor

A continuación se mostrara paso a paso el doblaje de las varillas.

Figura 29: Dipolo con varilla de aluminio



Fuente: Ilustración del autor

El mismo procedimiento visto en la figura 31 se realizó para la varilla de cobre. Una vez terminado el trabajo con las varillas, se realiza el terminado de la madera que será el mástil para las antenas, se utilizara madera cedro puerto asís por sus propiedades de duración y resistencia en exteriores.

Figura 30: Madera puerto asís



Fuente: Ilustración del autor

Luego de tener la madera cortada a la medida requerida por los cálculos realizados, se le aplica un sellante protector para exteriores y de esta manera evitar que el agua u otros agentes extraños en el medio ambiente puedan dañarla.

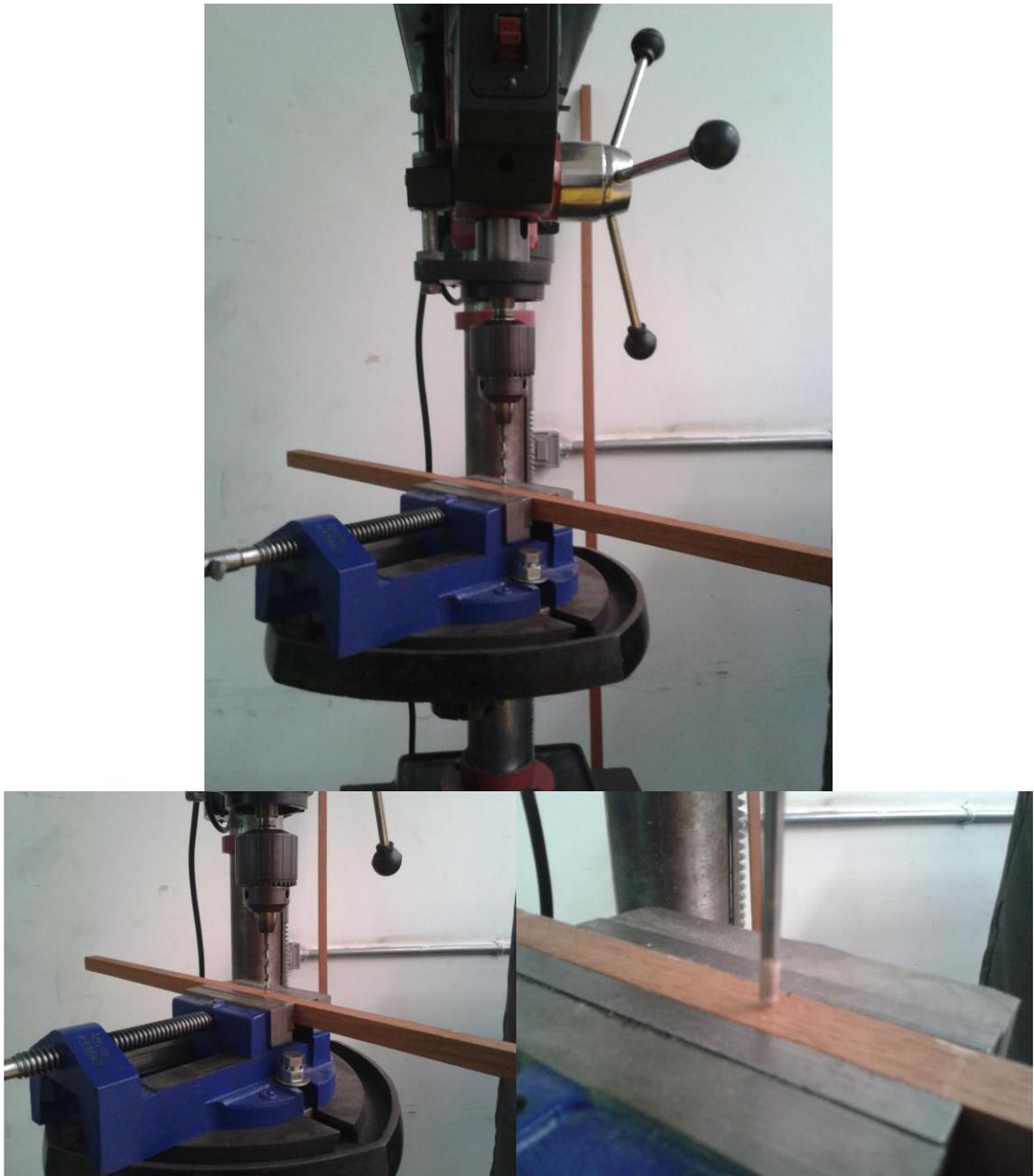
Figura 31: Proceso de pintado



Fuente: Ilustración del autor

Luego del secado la madera se marcan los puntos donde se pondrán los elementos de la antena y para perforarla se usa un taladro de árbol para que el orificio del director, reflector o dipolo quede totalmente perpendicular a la madera.

Figura 32: Proceso de perforado de la madera



Fuente: Ilustración del autor.

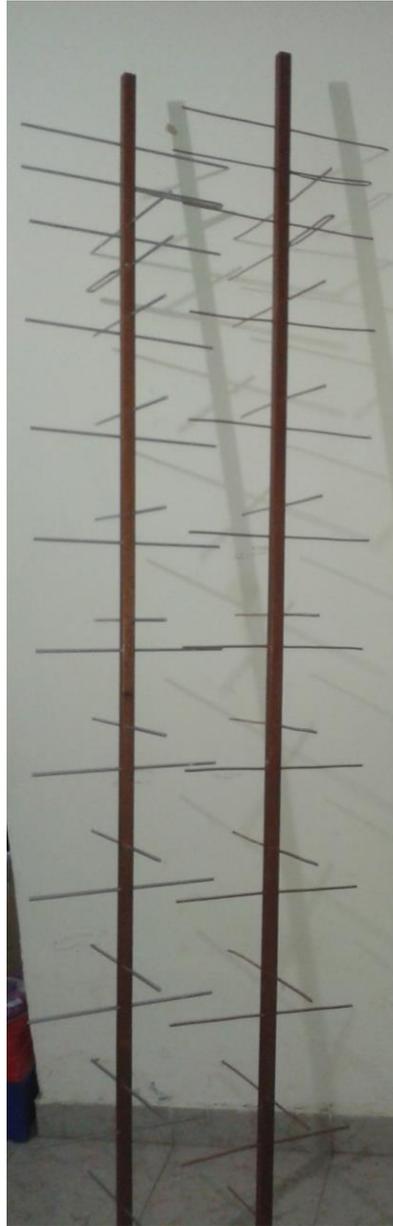
Figura 33: Madera perforada



Fuente: Ilustración del autor

Terminado todo este proceso, se puede ubicar cada elemento de la antena en el lugar que le corresponde a lo largo de cada madera, como veremos en la figura 34.

Figura 34: Antena Yagi –Uda para la frecuencia de 435.800Mhz



Fuente: Ilustración del autor

Después de ubicar cada elemento en su lugar, y teniendo en cuenta que se está trabajando con polarización circular se tiene que diseñar un circuito para conectar los dos dipolos de cada antena y para ello se diseñó el siguiente conector.

Figura 35. Conector de dipolos diseñado con cable RG8



Fuente: Ilustración del autor

Como se ve en la figura 35, este conector está hecho con un trozo de cable coaxial RG8 calculado con los parámetros de la antena, y en sus extremos añadido a él unas terminales planas tipo macho, que se conectara a la terminal hembra que estará en los dipolos y aisladas con un encauchetado termo encogible para evitar ruido o señales no deseadas en la antena.

Y se conectara de esta forma para poder energizar ambos dipolos al mismo tiempo:

Figura 36. Conexión realizada en los dipolos de la antena



Fuente: Ilustración del autor

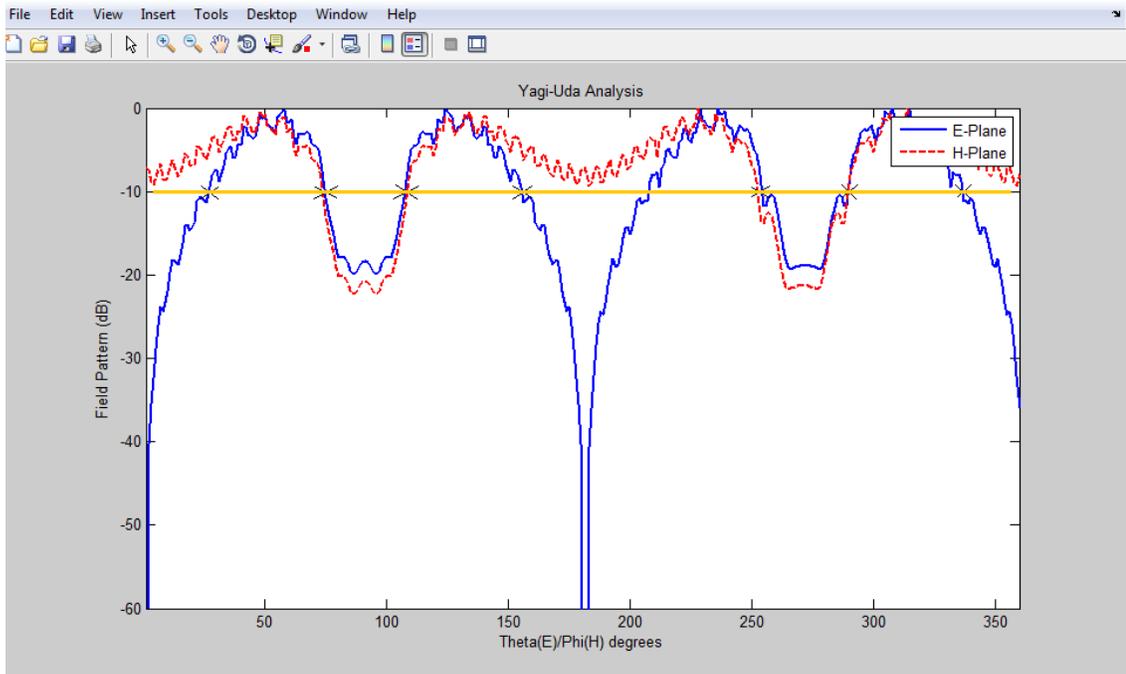
Como se ve en la figura 36, se debe realizar la conexión entre ambos elementos activos y de la misma forma se hará para la antena hecha con los elementos de cobre.

RESULTADOS Y DISCUSION

Lo siguiente son los parámetros de la antena que se introducirán en Matlab para calcular su caracterización:

Luego de introducir los parámetros de la antena en Matlab obtenemos los siguientes resultados:

Figura 37. Análisis del arreglo de la antena Yagi-Uda

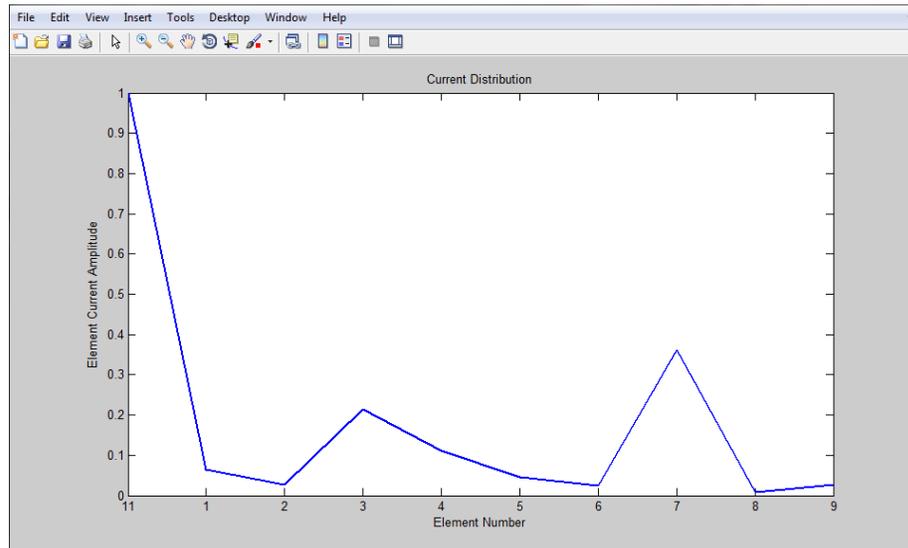


Fuente: Ilustración de simulación en Matlab

En la figura anterior podemos apreciar la radiación de campo de la antena en el plano E o eléctrico siendo la gráfica azul y el plano H o magnético en el gráfico rojo, donde observamos que para ambos entre los 40° y 80° su resonancia va a estar por encima de los -10dB , entre 80° y 120° su resonancia llegará a más debajo de los -20 dB , a partir de los 120° para el plano H resonará por encima de los -10dB hasta los 260° , para el caso del plano E a partir de los 120° hasta los 160 subirá hasta cero decaerá de nuevo hasta los -60dB retornando un ciclo semejante para ambos planos en los 170° .

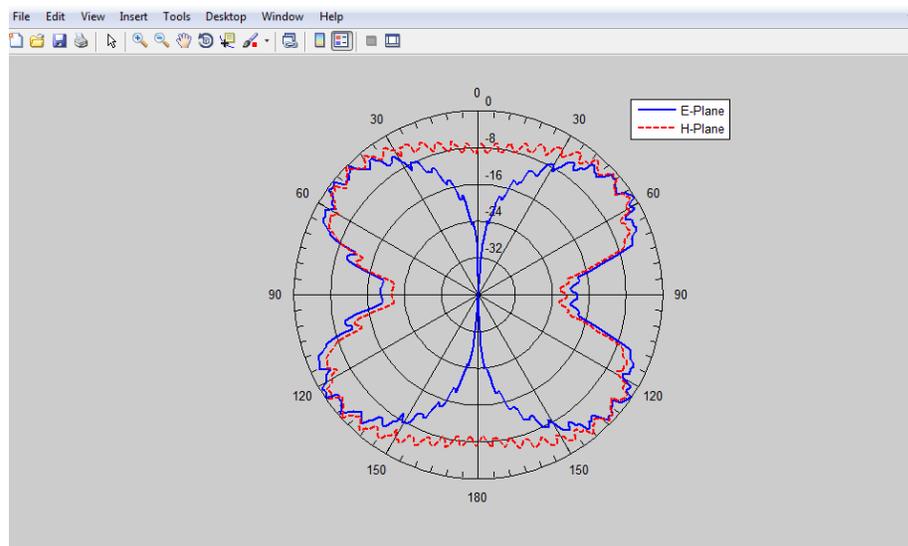
En la figura 38 vemos el análisis de la distribución de corriente de los elementos y se puede decir que en el elemento número 11 o el último elemento tiene la mayor concentración de corriente a comparación de los demás y que entre el décimo y noveno elementos la corriente tiene una caída bastante considerable, donde de nuevo tendrá una elevación entre el sexto y el octavo elemento.

Figura 38: Distribución actual de la antena



Fuente: Ilustración de simulación en Matlab

Figura 39: Patrón de radiación de la antena Yagi-Uda



Fuente: Ilustración de simulación en Matlab

7.2 SIMULACION Y DATOS OBTENIDOS POR MATLAB

Al ejecutar el programa fuente en Matlab pedirá una serie de datos en el siguiente orden:

Numero de modos por elemento (entero positivo) = 2

Número de elementos (entero positivo mayor que 1) = 11

Hay que tener en cuenta que para esta antena cada elemento tiene una longitud diferente por lo tanto aparecerá la siguiente pregunta.

¿Todos los directores tienen la misma longitud?

Respuesta: (y or n) N

Dada la anterior respuesta debemos digitar todos los datos dados según los parámetros calculados de la antena Yagi-Uda, y se tendrá que introducir la longitud de cada elemento de la antena dado en longitudes de onda o términos de λ .

Longitud (en longitudes de onda) del director # 1 = 2.188

Longitud (en longitudes de onda) del director # 2 = 2.261

Longitud (en longitudes de onda) del director # 3 = 2.261

Longitud (en longitudes de onda) del director # 4 = 2.261

Longitud (en longitudes de onda) del director # 5 = 2.261

Longitud (en longitudes de onda) del director # 6 = 2.309

Longitud (en longitudes de onda) del director # 7 = 2.309

Longitud (en longitudes de onda) del director # 8 = 2.309

Longitud (en longitudes de onda) del director # 9 = 2.444

Longitud (en longitudes de onda) del reflector = 2.025

Longitud (en longitudes de onda) del elemento activo= 2.010

A continuación se digitaran las longitudes de separación entre los elementos de la antena también dados en longitudes de onda de la siguiente forma:

Separación (En Longitudes De Onda) Entre El Elemento Activo & 1st Director = 9.045

Igual que en las longitudes de los elementos se debe tener en cuenta que la separación de cada elemento tampoco es igual, por lo tanto:

¿La separación entre los directores es uniforme?

Respuesta: (y or n) N

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 1 y # 2 = 4.719

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 2 y # 3 = 4.342

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 3 y # 4 = 4.175

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 4 y # 5 = 4.175

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 5 y # 6 = 3.743

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 6 y # 7 = 3.743

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 7 y # 8 = 3.876

Separación (en longitudes de onda) entre el director # 8 y # 9 = 3.618

Separación (en longitudes de onda) entre el reflector & elemento activo = 10.855

Para finalizar es necesario digitar el radio de la varilla utilizada para los elementos de la antena también dado en longitudes de onda así:

Radio (en longitudes de onda) de los elementos usados = 217.102

Dados todos los datos solicitados por el programa, se procede a su ejecución y obtendremos los siguientes datos como respuesta incluyendo las figuras 35 a la 37 donde observamos que son los esperados para el objetivo del presente proyecto.

Salida del programa para la matriz Yagi-Uda

3-dB ancho de haz en el plano E = 49.31 grados

3-dB ancho de haz en el plano H = 73.58 grados
Front-to-back ratio en el plano E = 18.8568 Db
Front-to-back ratio en el plano H = 21.2781 Db
Directividad = -13.253 Db

Anexo A. Programa Fuente.

7.3 PRUEBAS REALIZADAS EN EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES PARA LA ANTENA DE ALUMINIO.

Para realizar estas pruebas primero hay que aislar la antena en un ambiente que impida la mayor cantidad de interferencias a la hora de tomar las mediciones y se encierra en una cámara anecoica de la siguiente manera:

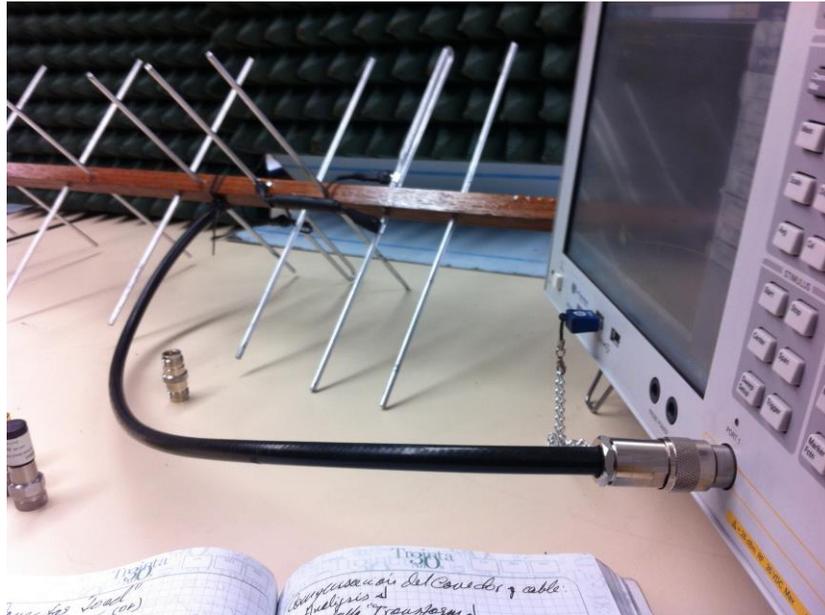
Figura 40. Aislamiento en la cámara anecoica para la antena de aluminio



Fuente: Ilustración del autor

Luego de aislar la antena se procede a calibrar el analizador vectorial de redes en la frecuencia adecuada para esta antena que está en los 435 MHz.

Figura 41. Conexión de la antena al analizador vectorial de redes

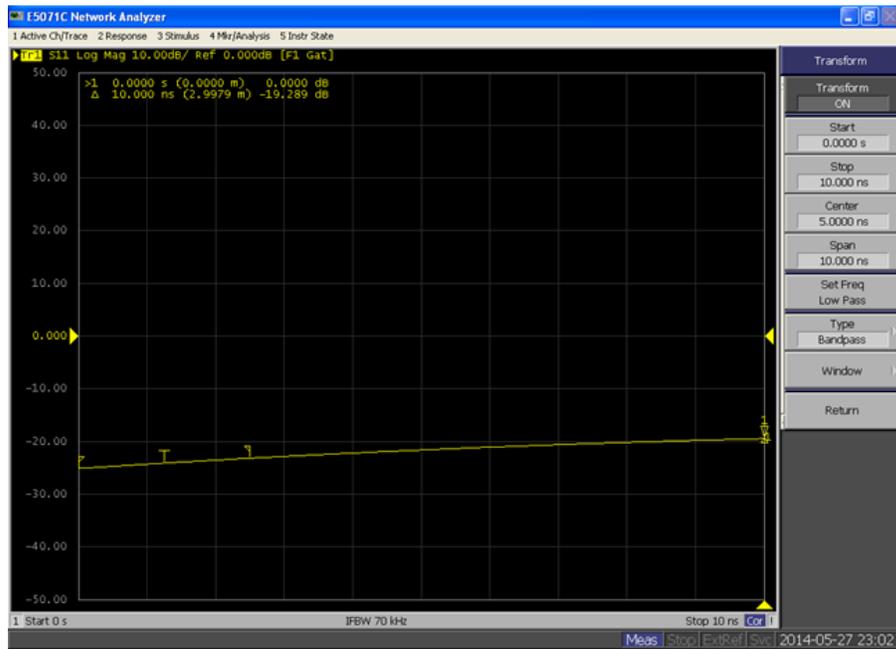


Fuente: Ilustración del autor

Ya calibrado el equipo se procede a medir el primer parámetro que arroja esta herramienta que corresponde a la pérdida de retorno o *return loss*, que es la pérdida de potencia de la señal resultante de la reflexión causado por una discontinuidad en una línea de transmisión.

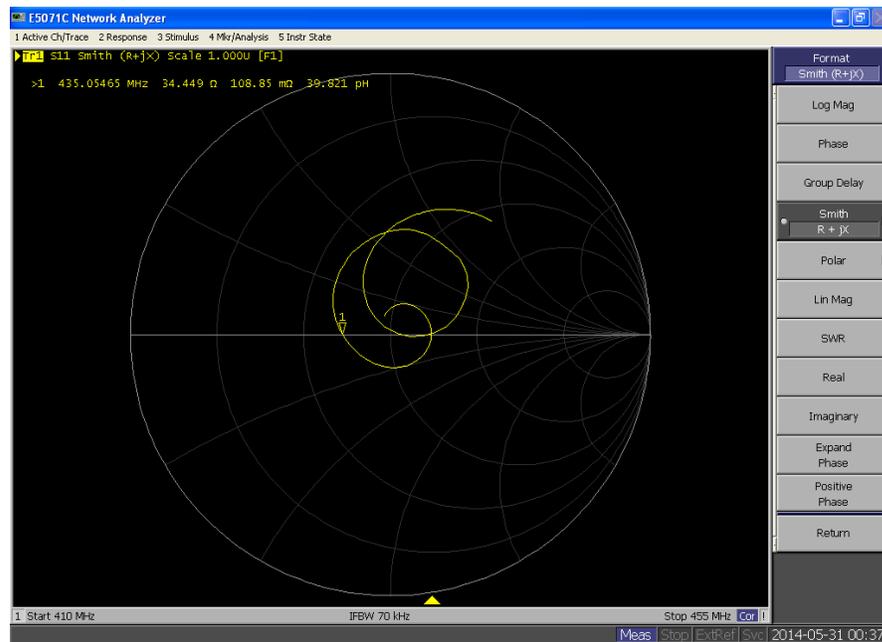
Esta discontinuidad puede ser una coincidencia con el cierre o carga con un dispositivo insertado en la línea. Generalmente se expresa como una relación en decibelios (dB).

Figura 42. Perdida de retorno para la antena de aluminio.



Fuente: Ilustración del autor

Figura 43. Impedancia de la antena de aluminio, por medio de la carta de Smith.



Fuente: Ilustración del autor

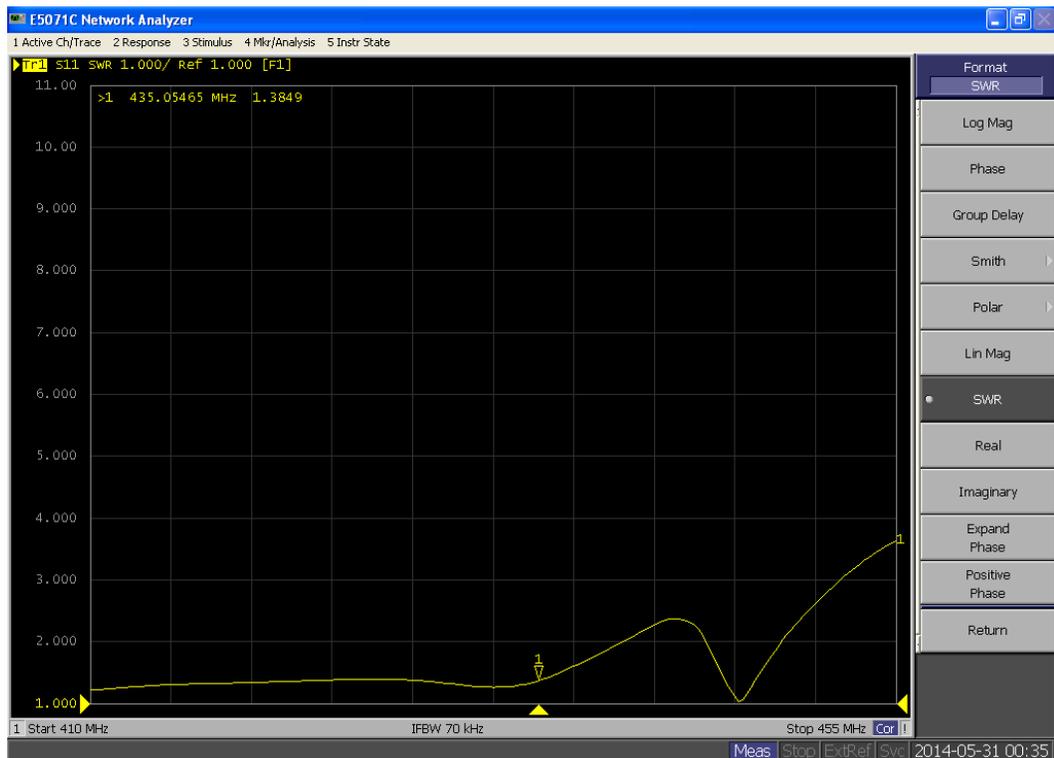
En la figura 42 vemos la impedancia de la antena por medio de la carta Smith y en ella apreciamos que la antena esta resonando en la frecuencia deseada.

La carta de Smith constituye una herramienta básica en el análisis y diseño de cualquier circuito de microondas.

El fundamento de la carta de Smith es la transformación de impedancias y coeficientes de reflexión haciendo uso de una representación polar en el plano, de esta forma se obtiene una representación acotada del conjunto de todas las impedancias pasivas existentes.

Otro parámetro importante que podemos medir en el analizador vectorial de redes es el VSWR o relación de onda estacionaria.

Figura 44. Obtención del VSWR para la antena de aluminio.



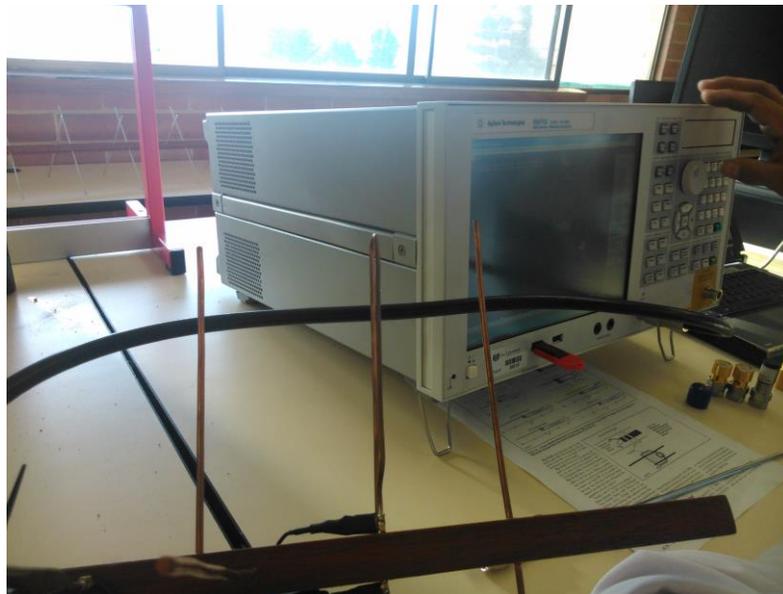
Fuente: Ilustración del autor

El coeficiente de reflexión de una onda estacionaria se define como el cociente entre la intensidad de señal de la onda reflejada y la de la onda incidente, su valor máximo es 1, que coincide con la línea de transmisión en circuito abierto, el mínimo es -1, que tiene lugar con la línea de transmisión en cortocircuito, y la situación óptima tiene lugar cuando toma el valor 0, que es cuando no hay reflexión alguna o tenemos una situación ideal. Toda la potencia entregada se transmite, para este caso tenemos un coeficiente de 1.3849.

7.4 PRUEBAS REALIZADAS EN EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES PARA LA ANTENA DE COBRE.

Igual que para la antena de aluminio se prepara el aislamiento en la cámara anecoica para tomar los datos sin interferencias que puedan afectar los resultados.

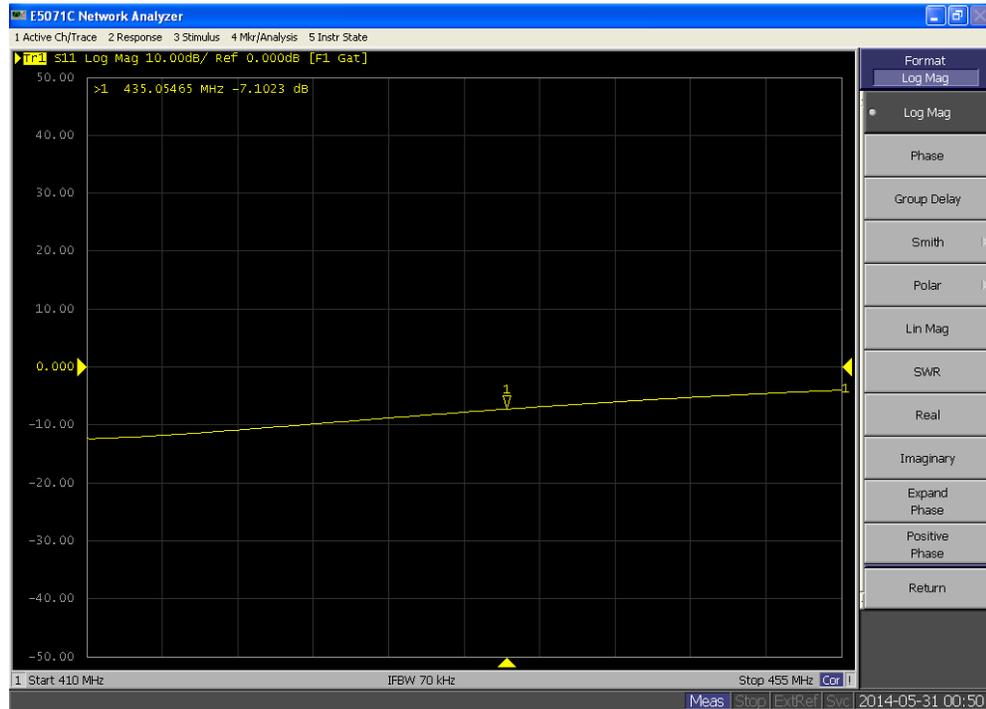
Figura 45. Aislamiento en la cámara anecoica y conexión para la antena de cobre



Fuente: Ilustración del autor

Como en las pruebas anteriores se calibra el equipo y se medirá el primer parámetro corresponde a la pérdida de retorno o *return loss*.

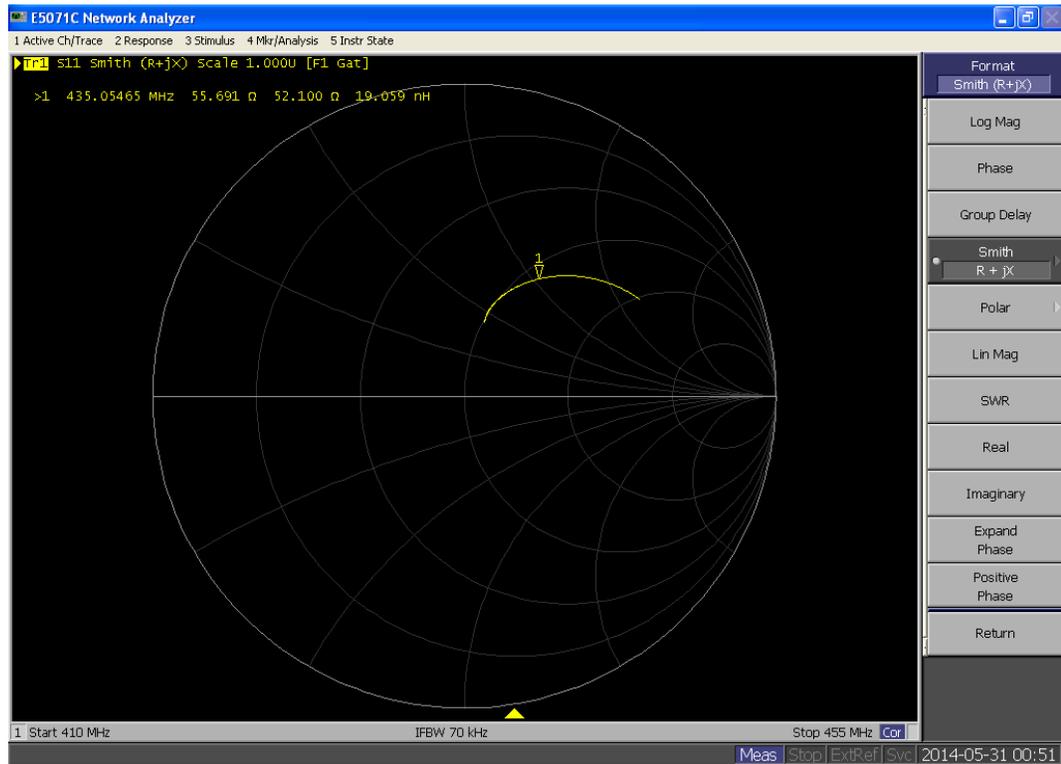
Figura 46. Pérdida de retorno para la antena de cobre.



Fuente: Ilustración del autor

En este caso se puede apreciar que la pérdida de retorno es bastante alta para una antena de este tipo y supera la pérdida en -7.1023 dB.

Figura 47. Impedancia de la antena de cobre, por medio de la carta de Smith.

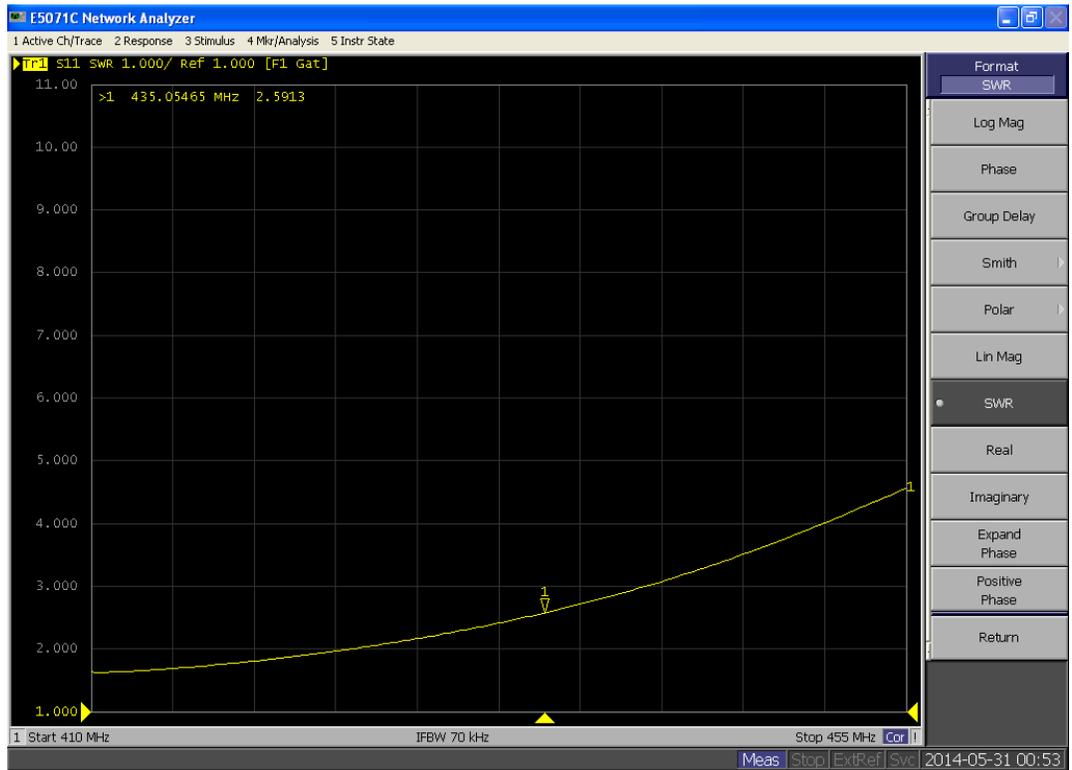


Fuente: Ilustración del autor

En la figura 47 vemos la impedancia de la antena por medio de la carta Smith y en ella apreciamos que la antena no está resonando en la frecuencia deseada.

Otro parámetro importante que podemos medir en el analizador vectorial de redes es el VSWR o relación de onda estacionaria.

Figura 48. Obtención del VSWR para la antena de cobre



Fuente: Ilustración del autor

En este último parámetro medido observamos que el coeficiente de onda estacionaria de esta antena está demasiado alto, por lo tanto se debe considerar que esta antena no es apta para el fin de este proyecto.

8 CONCLUSIONES

Las ecuaciones de Maxwell determinan la calidad de los materiales que van a servir como propagadores de la onda electromagnética con los parámetros, constante de permitividad eléctrica, constante de permeabilidad magnética y la conductividad por ello los elementos utilizados en las conexiones de alimentación de la antena deben ser de muy buena calidad porque pueden influir en el comportamiento de las antenas para bien o para mal, de modo que es indispensable contar con materiales de buena calidad como son, soldadura, cable, conectores, entre otros para que las pérdidas, que se pueden considerar, sean lo más mínimo posible.

Las antenas más utilizadas en el mercado de las comunicaciones satelitales son las Yagi-Uda con polarización circular ya que si no tiene polarización circular habría que seguir el satélite en el momento del cruce por la ciudad con servomecanismos, por lo que son antenas de fabricación económica con estructura robusta y se pueden compactar para trabajar a ciertas frecuencias.

A la hora de diseñar este tipo de antenas hay muchísimas maneras que nos dan una alta confiabilidad con respecto a los parámetros esperados, pero existen excepciones como en el caso que se estudió en este proyecto, que consistió en calcular una antena Yagi-Uda y construirla utilizando dos materiales diferentes como son, el cobre y el aluminio, para comparar cuál de ellos sería el más eficiente en este tipo de transmisión.

Al realizar todo el estudio pertinente luego de medir los parámetros de cada antena se observó que para la antena construida con los elementos de aluminio su respuesta fue bastante acertada y con buenos resultados para obtener una buena

recepción a la hora de recibir las señal para la cual fue diseñada, en cambio con la antena construida con los elementos de cobre, la respuesta estuvo bastante alejada y con resultados deficientes y se determinó que esta última no puede ser utilizada para el fin que fue construida, se debe tener en cuenta que ambas antenas se construyeron basadas en los mismos cálculos y parámetros de diseño.

Esto nos llevó a la conclusión de que el mejor material para trabajar con este tipo de antenas es el aluminio ya que es un material más rígido aunque su conductividad es de un 56% nos permite optimizar de una mejor manera la finalidad del proyecto, a diferencia del cobre que tiene una conductividad del 98%, es un material más maleable por lo tanto los elementos no serán totalmente rectos y con estas curvaturas leves en cada elemento afectara de manera considerable los parámetros de la antena al momento de hacer las mediciones.

Para un enlace de comunicación satelital de órbita baja con esta antena se debe tener en cuenta que debe estar en la capacidad de recibir señales en polarización circular, ya sea porque la antena del satélite este polarizada de esta forma o por un efecto atmosférico terrestre que pueda hacer que giren las polarizaciones lineales produciendo una polarización aleatoria, este inconveniente se soluciona utilizando antenas con polarización circular ya que pueden recibir polarización lineal en cualquier sentido.

Cuando se van a realizar las mediciones de acople de las antenas es importante trabajar con cables cortados a la frecuencia de operación de estas, teniendo en cuenta el factor de velocidad del cable y calibrar el analizador vectorial de redes para que elimine la incidencia del cable de alimentación, soldaduras, conectores, entre otros permitiendo que las perdidas medidas sean solo las causadas por la antena ya que si no se hace esto se estará midiendo la antena más la longitud del cable y sus componentes afectando así los resultados.

BIBLIOGRAFIA

CONSTANTINE A. BALANIS, antenna theory: Analysis and design, third edition.
John Wiley. 2005.

MIGUEL ANGEL SOLANO, electrodinámica clásica.

J.D. KRAUSS, R.J. MARHEFKA. Antennas for all applications. Third Edition.
McGraw Hill. 2002.

ÁNGEL CARDAMA AZNAR, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris, Universidad Politécnica de Catalunya, Segunda Edición, Septiembre de 2002

DESIGNO OF YAGI AERIALS BY R.M.FISCHENDEN,M.A. and E.R. Winblin.1948

BEAM TRANSMISSION OF ULTRA SHORT WAVES: An Introduction to the Classic Paper by H. Yagi Proc. IRE, Junio 1928 IEEE.

THE ARRL HANDBOOK. For Radio Communications 2013 90th Edition

ANTENNA SYSTEM FOR A GROUND STATION Communicating With The NTNU Test Satellite (NUTS), July 2011

Anexo A

A.1 Programa fuente en Matlab para la simulación

```
*****
%   YAGI_UDA.M
%*****
%   THIS IS A MATLAB M-FILE THAT COMPUTES, FOR THE YAGI-UDA ARRAY,
%   THE
%
%   I.    FAR-ZONE E- AND H-PLANE AMPLITUDE PATTERNS (IN dB)
%   II.   DIRECTIVITY OF THE ARRAY (IN dB)
%   III.  E-PLANE HALF-POWER BEAMWIDTH (IN DEGREES)
%   IV.   H-PLANE HALF-POWER BEAMWIDTH (IN DEGREES)
%   V.    E-PLANE FRONT-TO-BACK RATIO (IN dB)
%   VI.   H-PLANE FRONT-TO-BACK RATIO (IN dB)
%
%   THE PROGRAM IS BASED ON POCKLINGTON'S INTEGRAL EQUATION
%   FORMULATION OF SECTION 10.3.3, EQUATIONS (10-42) - (10-65a).
%   M ENTIRE DOMAIN COSINUSOIDAL (FOURIER) BASIS MODES ARE USED
%   FOR EACH OF THE ANTENNA ELEMENTS.
%
%   ** INPUT PARAMETERS BY USER
%   1. M    =   NUMBER OF ENTIRE DOMAIN BASIS MODES
%   2. N    =   NUMBER OF ANTENNA ELEMENTS
%   3. L    =   LENGTH OF EACH ELEMENT (IN WAVELENGTHS)
%   4. ALPHA =   RADIUS OF EACH ELEMENT (IN WAVELENGTHS)
%   5. S    =   SEPARATION BETWEEN THE ELEMENTS (IN WAVELENGTHS)
%
%   ** NOTES
%   1. REFER TO FIGURE 10.19 FOR THE GEOMETRY.
%   2. DRIVER ELEMENT IS LOCATED AT THE ORIGIN.
%   3. FIRST ELEMENT (N=1) IS THE FIRST DIRECTOR.
%   4. REFLECTOR IS THE N-1 ELEMENT; ONLY ONE REFLECTOR.
%   5. DRIVEN ELEMENT IS N.
%
%   THE FORMULATION OF THE PROBLEM IS BASED ON THE PAPER `ANALYSIS OF
%   YAGI-UDA-TYPE ANTENNAS' BY GARY A. THIELE, IEEE TRANS. ANTENNAS
%   PROPAGAT., VOL. 17, JAN. 1969.
%   *****
%   Written by: Mingwei Hsu, Arizona State University
%   *****

function [] = YAGI_UDA

%   Declare global variables
global MMAX NMAX Z RHO N2 NMODE L
MMAX = 30;
NMAX = 30;

close all;
```

```

%
%   Choice of output
%
fprintf (1, '\n\n');
fprintf (1, '   OUTPUT DEVICE OPTION\n');
fprintf (1, '   OPTION (1): SCREEN\n');
fprintf (1, '   OPTION (2): OUTPUT FILE\n\n');
device = input ('   OUTPUT DEVICE = ', 's');
device = str2num (device);

if (device == 1)
    fid = 1;
elseif (device == 2)
    filename = input ('\n   INPUT THE DESIRED OUTPUT FILENAME = ', 's');
    fid = fopen (filename, 'wt');
else
    fprintf (1, '\n');
    fprintf (1, '   ***ERROR***\n');
    fprintf (1, '   OUTPUT DEVICE NUMBER SHOULD BE EITHER 1 OR 2\n\n');
    return
end

%
% INPUT THE LENGTH OF THE ELEMENTS, L, AND THEIR RELATIVE SEPARATION IN
% FREE
% SPACE WAVELENGTHS, S.  THE VARIABLE YP DEFINES THE ABSOLUTE DISTANCE OF
% THE ELEMENTS ALONG THE Y-AXIS, WITH THE DRIVEN ELEMENT AT THE ORIGIN.
% ALPHA IS THE ELEMENT WIRE RADIUS IN WAVELENGTHS.
%
%
%
% *****
%   INPUT NUMBER OF MODES PER ELEMENT
%   -----
M = input ('\n   NUMBER OF MODES PER ELEMENT (A POSITIVE INTEGER) = ',
's');

M = str2num (M);
M = round (M);
if (M > MMAX)
    fprintf (1, '\n   *** ERROR: Need to increase MMAX in the
program.\n\n');
    return
elseif (M <= 0)
    fprintf (1, '\n   *** ERROR: The number has to be greater than
0!\n\n');
    return
elseif isempty (M)
    % If the user enters a value other than a number
    fprintf (1, '\n   ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, '   INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end
end

```

```

%      INPUT NUMBER OF ELEMENTS
%      -----
N = input ('      NUMBER OF ELEMENTS (A POSITIVE INTEGER GREATER THAN 1) =
', 's');

N = str2num (N);
N = round (N);
if (N > NMAX)
    fprintf (1, '\n      *** ERROR: Need to increase NMAX in the
program.\n\n');
    return
elseif (N <= 0)
    fprintf (1, '\n      *** ERROR: The number has to be greater than
0!\n\n');
    return
elseif isempty (N) % If the user enters a value other than a number
    fprintf (1, '\n      ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, '      INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end

fprintf (1, '\n');

%      INPUT ELEMENT LENGTHS AND ELEMENT SEPARATION DISTANCES
%      -----
%      ---> ELEMENT LENGTHS (IN WAVELENGTHS)
if (N > 3)
    fprintf (1, '      DO ALL DIRECTORS HAVE THE SAME LENGTH?\n');
    ANS = input ('      ANSWER: (Y OR N) ..... ', 's');
else
    ANS = 'N';
end

fprintf (1, '\n');

%      THE LENGTH OF THE DIRECTORS
if (ANS == 'Y') || (ANS == 'y')
    LDIR = input ('      THE UNIFORM LENGTH (in WAVELENGTHS) OF THE DIRECTOR
= ', 's');
    LDIR = str2num (LDIR);
    if (isempty (LDIR)) || (LDIR <= 0)
        fprintf (1, '\n      ***** ERROR *****\n');
        fprintf (1, '      INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
        return
    end
    L = LDIR * ones (1, N-2);

elseif (ANS == 'N') || (ANS == 'n')
    a = 1;
    while a <= (N-2)
        fprintf (1, '      LENGTH (in WAVELENGTHS) OF DIRECTOR # %2d =', a);
        b = input (' ', 's');
        b = str2num (b);

```

```

        if (isempty (b)) || (b <= 0)
            fprintf (1, '\n ***** ERROR *****\n');
            fprintf (1, ' INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT
FORMAT.\n\n');
            return
        else
            L (a) = b;
            end
            a = a + 1;
        end
    else

        fprintf (1, '\n ***** ERROR *****\n');
        fprintf (1, ' INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
        return
    end

% GET THE LENGTH OF THE REFLECTOR
b = input (' LENGTH (in WAVELENGTHS) OF THE REFLECTOR = ', 's');
b = str2num (b);
if (isempty (b)) || (b <= 0)
    fprintf (1, '\n ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, ' INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end
L (N-1) = b;

% GET THE LENGTH OF THE DRIVEN ELEMENT
b = input (' LENGTH (in WAVELENGTHS) OF THE DRIVEN ELEMENT = ', 's');
b = str2num (b);
if (isempty (b)) || (b <= 0)
    fprintf (1, '\n ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, ' INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end
L (N) = b;

% INPUT ELEMENT SEPARATION DISTANCES
% -----

% ELEMENT SEPARATION BETWEEN THE DRIVEN ELEMENT AND THE 1ST DIRECTOR
b = input ('\n SEPARATION (in WAVELENGTHS) BETWEEN DRIVEN ELEMENT & 1ST
DIRECTOR = ', 's');
b = str2num (b);
if (isempty (b)) || (b <= 0)
    fprintf (1, '\n ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, ' INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end

S_1 = b;

if (N > 3)

```

```

        fprintf (1, '\n  IS THE SEPARATION BETWEEN DIRECTORS UNIFORM?\n');
        ANS = input ('  ANSWER: (Y OR N) ..... ', 's');
        fprintf (1, '\n');
    else
        ANS = 'N';
    end

%     THE SEPARATION DISTANCES OF THE DIRECTORS
if (ANS == 'Y') || (ANS == 'y')
    SDIR = input ('  THE UNIFORM SEPARATION (in WAVELENGTHS) BETWEEN
DIRECTORS = ', 's');
    SDIR = str2num (SDIR);
    if (isempty (SDIR)) || (SDIR <= 0)
        fprintf (1, '\n  ***** ERROR *****\n');
        fprintf (1, '  INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
        return
    end
    S = SDIR * ones (1, N-2);

elseif (ANS == 'N') || (ANS == 'n')
    a = 2;
    while a <= (N-2)
        fprintf (1, '  SEPARATION (in WAVELENGTHS) BETWEEN DIRECTORS #
%2d AND # %2d =', a-1, a);
        b = input (' ', 's');
        b = str2num (b);
        if (isempty (b)) || (b <= 0)
            fprintf (1, '\n  ***** ERROR *****\n');
            fprintf (1, '  INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT
FORMAT.\n\n');
            return
        else
            S (a) = b;
        end
        a = a + 1;
    end

else
    fprintf (1, '\n  ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, '  INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end

S (1) = S_1;

%     ELEMENT SEPARATION BETWEEN THE DRIVEN ELEMENT AND THE REFLECTOR
b = input ('  SEPARATION (in WAVELENGTHS) BETWEEN REFLECTOR & DRIVEN
ELEMENT = ', 's');
b = str2num (b);
if (isempty (b)) || (b <= 0)
    fprintf (1, '\n  ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, '  INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end

```

```

end
S (N-1) = b;

%      RADIUS OF EACH ELEMENT
b = input ('\n  RADIUS (in WAVELENGTHS) FOR ALL ELEMENTS USED = ', 's');
b = str2num (b);
if (isempty (b)) || (b <= 0)
    fprintf (1, '\n  ***** ERROR *****\n');
    fprintf (1, '  INPUT DATA ARE NOT OF THE RIGHT FORMAT.\n\n');
    return
end
ALPHA = b;

%
*****
*****
%
*****
*****

%      Echo all the input parameters
%      -----
fprintf (fid, '\n
*****');
fprintf (fid, '\n  PROGRAM INPUT FOR THE YAGI UDA ARRAY');
fprintf (fid, '\n
*****\n');

fprintf (fid, '\n  NUMBER OF MODES PER ELEMENT = %2d', M);
fprintf (fid, '\n  NUMBER OF ELEMENTS = %2d\n', N);

%      Print out the length of each element
a = 1;
while a <= (N-2)
    fprintf (fid, '\n  LENGTH OF DIRECTOR # %2d = %12.5f WAVELENGTHS',
a, L (a));
    a = a + 1;
end
fprintf (fid, '\n  LENGTH OF REFLECTOR = %12.5f WAVELENGTHS', L (N-1));
fprintf (fid, '\n  LENGTH OF DRIVEN ELEMENT = %12.5f WAVELENGTHS\n', L
(N));

%      Print out the element separation
fprintf (fid, '\n  SEPARATION BETWEEN DRIVEN ELEMENT & 1ST DIRECTOR =
%12.5f WAVELENGTHS', S (1));
a = 2;
while a <= (N-2)
    fprintf (fid, '\n  SEPARATION BETWEEN DIRECTORS # %2d AND # %2d =
%12.5f WAVELENGTHS', a-1, a, S (a));
    a = a + 1;
end

```

```

fprintf (fid, '\n SEPARATION BETWEEN REFLECTOR & DRIVEN ELEMENT =
%12.5f WAVELENGTHS\n', S (N-1));

fprintf (fid, '\n RADIUS FOR ALL ELEMENTS USED = %12.5e
WAVELENGTHS\n\n\n', ALPHA);

% Warn the user the program takes time to execute.
fprintf (1, ' WAIT ... This may take a few minutes !!!\n\n\n');

% Open all necessary files for writing
fid1 = fopen ('Epl_yagi.dat', 'wt');
fid2 = fopen ('Hpl_yagi.dat', 'wt');
fid3 = fopen ('Cur_yagi.dat', 'wt');
fid4 = fopen ('Coe_yagi.dat', 'wt');

%
*****
*****
%
*****
*****
% The real computation starts here.

% Initialize some variables
a = 1;
while a <= (N - 2)
    YP (a) = a * S (a);
    a = a + 1;
end
YP (N-1) = - S (N-1);
YP (N) = 0;

RES = 0;
G2 = 0;
INDEX = 0;
DZ = L / (2 * M - 1);
ETA = 120 * pi;
MU = 4 * pi * 10 ^ (-7);
C = 3 * 10 ^ 8;
K = 2 * pi;
RTOD = 180 / pi;
DTOR = pi / 180;

A = zeros (M * N, M * N);
B = 1:(M*N);
B = B * 0;
Inm = zeros (N, M);

I = 1;
h=waitbar(0, 'Program is running ...');

```

```

while I <= (M * N)
    waitbar(0.8*I/(M*N),h);
    IFACT = floor ((I - 1) / M);%      This determines the position of the
observer with
    N1 = IFACT + 1;                    % N1 being the element at which the
observer is.
    IMODE = I - IFACT * M;

    Z = (M - IMODE) * DZ (N1); % Based on the mode # and element find
the distance Z

    J = 1;
    while J <= (M * N)

        JFACT = floor ((J - 1) / M); %      This determines the position
of the source and its
        N2 = JFACT + 1;                % corresponding mode. N2 is the element
on which the
        NMODE = J - JFACT * M; % source is and NMODE its mode #.

        if (N1 == N2)                 %      If the effect of a mode is found on
the element
            RHO = ALPHA;                % that it is located, Y is the radius of
the element.
        else                            % Otherwise the distance Y is found
using the formula
            RHO = YP (N1) - YP (N2);    % (assuming X, X' = 0).
        end

        LL = 0;                        %      Define the limits of the
integration
        UL = L (N2) / 2;

        RES = SINTEG (UL, LL, 10); %      Perform numerical integration
        LEN = L (N2) / 2;
        G2 = KERNEL (LEN);
        F2M = NMODE * 2 - 1;

        A (I, J) = ETA / (1i * 8 * pi ^ 2) * ...
            ((F2M * pi / L (N2)) * (-1) ^ (NMODE + 1) * G2 + ...
            (K ^ 2 - F2M ^ 2 * pi ^ 2 / L (N2) ^2) * RES);
        J = J + 1;

    end

    I = I + 1;
end

% Fill the last row of the matrix corresponding to the feeder.
I = zeros (1, M * (N - 1));
J = ones (1, M);
A (M * N, :) = [I J];

```

```

B (M * N) = 1;

% Invert the system to solve for the current coefficients in the
% Fourier Series expansion.

ISIZE = N * M;
[A, IPERM, PIVOT] = LUDEC (A, ISIZE);
B = LUSOLV (A, ISIZE, IPERM, B);

%
% CONVERT THE SINGLE ARRAY OF THE CURRENT COEFFICIENTS TO A
% DOUBLE ARRAY OF THE FORM Imn.
%
NCUT = 0;

I = 1;
while I <= N

    J = 1;
    while J <= M
        Inm (I, J) = B (J + NCUT);
        J = J + 1;
    end

    NCUT = NCUT + M;
    I = I + 1;
end

%
% CALCULATE THE RADIATED FIELDS IN THE E-PLANE
%
% IN THIS PLANE THETA VARIES FROM 0 < THETA < 180, WHEREAS
% PHI = 90 IN HALF OF THE PATTERN AND PHI=270 IN THE OTHER
% HALF. THE PATTERN IS CALCULATED AT ONE DEGREE INCREMENTS.
%
NCUT = 0;

ML = 1;
% h=waitbar(0,'Program is running ...');
while ML <= 2

    if (ML == 1)
        PHI = 90 * DTOR;
        MAX = 181;
    else
        PHI = 270 * DTOR;
        MAX = 180;
    end

    ICOUNT = 1;
    while ICOUNT <= MAX
        waitbar(ICOUNT/MAX*ML*0.5*0.2+0.8,h);
    end
end

```

```

    THETA = (ICOUNT - 1) * DTOR;

    if (THETA > pi)
        PHI = 270 * DTOR;
    end

    EZP = 0;

    I = 1;
    while I <= N

        IZP = 0;

        J = 1;
        while J <= M
            MODE = J;
            LEN = L (I);
            ANG = THETA;
            IZP = IZP + Inm (I, J) * ...
                (ZMINUS (ANG, LEN, MODE) + ...
                 ZPLUS (ANG, LEN, MODE));
            J = J + 1;
        end

        AEXP = K * YP (I) * sin (THETA) * sin(PHI);
        EZP = EZP + L (I) * exp (1i * AEXP) * IZP;

        I = I + 1;
    end

    ETHETA (NCUT + ICOUNT) = 1i * C * MU / 8 * sin (THETA) * EZP;

    ICOUNT = ICOUNT + 1;
end

NCUT = NCUT + MAX;
ML = ML + 1;
end
close(h);

% FIND THE MAXIMUM VALUE IN THE E-PLANE PATTERN
EMAX = 10 ^ (-12);

abs_ETHETA = abs (ETHETA);
ARG = max (abs_ETHETA);
if ARG > EMAX
    EMAX = ARG;
end

% NORMALIZE THE PATTERN TO THE MAXIMUM VALUE, CONVERT IN dB,
% AND WRITE OUT THE RESULTS

```

```

fprintf (fid1, '# E-PLANE PATTERN OF THE YAGI UDA ANTENNA\n');
fprintf (fid1, '# =====\n#\n');
fprintf (fid1, '#          THETA          E-THETA (THETA, PHI=90 OR 270)\n#\n');

I = 1;
while I <= 361
    THETA = I - 1;
    ARG = abs (ETHETA (I));

    if ((ARG/EMAX) > (10 ^ (-6)))
        ETH (I) = 20 * log10 (ARG / EMAX);
    else
        ETH (I) = -120;
    end

    fprintf (fid1, ' %12.4f%12.4f\n', THETA, ETH (I));
    I = I + 1;
end

% RECORD THE E-PLANE VALUES FOR FUTURE PLOTTING.
E_PLANE = ETH;

%
% FIND THE FRONT-TO-BACK RATIO IN THE E-PLANE PATTERN
%
EFTOB = - ETH (271);

%
% FIND THE 3-dB BEAMWIDTH IN THE E-PLANE PATTERN
%
I = 91;
while I <= 270
    ETH (I) = ETH (I) + 3;
    I = I + 1;
end

I = 91;
while I <= 270
    THETA = I-1;

    if (ETH (I) == 0)
        E3D_BW = 2 * ((I - 1) - 90);
        I = 300;      % Terminate while loop early
    elseif ((ETH (I - 1) > 0) && (ETH (I) < 0))
        E3D_BW = 2 * (- ETH (I) / (ETH (I) - ETH (I - 1)) + (I - 1) -
90);
        I = 300;
    end

    I = I + 1;
end

```

```

%
% CALCULATE THE RADIATED FIELDS IN THE H-PLANE
%
% IN THIS PLANE THETA = 90 AND PHI VARIES FROM 0 < PHI < 360.
%
THETA = 90 * DTOR;
MAX = 361;

ICOUNT = 1;
while ICOUNT <= MAX

    PHI = (ICOUNT - 1) * DTOR;
    EZP = 0;

    I = 1;
    while I <= N
        IZP = 0;

        J = 1;
        while J <= M
            MODE = J;
            LEN = L (I);
            ANG = PHI;
            IZP = IZP + Inm (I, J) * ...
                (ZMINUS (ANG, LEN, MODE) + ...
                 ZPLUS (ANG, LEN, MODE));
            J = J + 1;
        end

        AEXP = K * YP (I) * sin (THETA) * sin(PHI);
        EZP = EZP + L (I) * exp (1i * AEXP) * IZP;
        I = I + 1;
    end

    ETHETA (ICOUNT) = 1i * C * MU / 8 * sin (THETA) * EZP;
    ICOUNT = ICOUNT + 1;
end

%
% FIND THE MAXIMUM VALUE IN THE H-PLANE PATTERN
%
EMAX = 10 ^ (-12);
abs_ETHERETA = abs (ETHERETA);
ARG = max (abs_ETHERETA);
if (ARG > EMAX)
    EMAX = ARG;
end

%
% NORMALIZE THE PATTERN TO THE MAXIMUM VALUE, CONVERT IN dB, AND
% WRITE OUT THE RESULTS
%

```

```

fprintf (fid2, '# H-PLANE PATTERN OF THE YAGI UDA ANTENNA\n');
fprintf (fid2, '# =====\n#\n');
fprintf (fid2, '#          PHI          E-THETA (PHI, THETA=90)\n#\n');

I = 1;
while I <= 361

    PHI = I - 1;
    ARG = abs (ETHETA (I));

    if (ARG / EMAX) > (10 ^ (-6))
        ETH (I) = 20 * log10 (ARG / EMAX);
    else
        ETH (I) = - 120;
    end

    fprintf (fid2, ' %12.4f%12.4f\n', PHI, ETH (I));
    I = I + 1;
end

% RECORD THE H-PLANE VALUES FOR FUTURE PLOTTING
H_PLANE = ETH;

%
% FIND THE FRONT-TO-BACK RATIO IN THE H-PLANE PATTERN
%
HFTOB = - ETH (271);

%
% FIND THE 3-dB BEAMWIDTH IN THE H-PLANE PATTERN
%
I = 1;
while I <= 181
    ETH (I) = ETH (I) + 3;
    I = I + 1;
end

I = 91;
while I <= 270
    PHI = I - 1;

    if (ETH (I) == 0)
        H3D_BW = 2 * ((I - 1) - 90);
        I = 300;
    elseif (ETH (I-1) > 0) && (ETH (I) < 0)
        H3D_BW = 2 * (- ETH (I) / (ETH (I) - ETH (I - 1)) + (I - 1) -
90);
        I = 300;
    end

    I = I + 1;
end

```

```

%
% CALCULATE THE ANTENNA DIRECTIVITY
%
THETA = 90 * DTOR;
PHI = 90 * DTOR;
AZ = 0;

I = 1;
while I <= N
    IZP = 0;

    J = 1;
    while J <= M
        MODE = J;
        LEN = L (I);
        ANG = THETA;
        IZP = IZP + Inm (I, J) * ...
            (ZMINUS (ANG, LEN, MODE) + ...
             ZPLUS (ANG, LEN, MODE));
        J = J + 1;
    end

    AEXP = K * YP (I) * sin (THETA) * sin (PHI);
    AZ = AZ + L (I) * exp (1i * AEXP) * IZP;

    I = I + 1;
end

UMAX = 3.75 * pi * abs (AZ) ^ 2 * sin (THETA) ^ 2;

PRAD = SCINT2 (0, pi, 0, 2 * pi, N, M, Inm, YP);

D0 = 4 * pi * UMAX / abs (PRAD);

fprintf (fid, '\n
*****\n');
fprintf (fid, ' PROGRAM OUTPUT FOR THE YAGI UDA ARRAY\n');
fprintf (fid, '
*****\n');
fprintf (fid, '\n 3-dB BEAMWIDTH IN THE E-PLANE PATTERN = %12.2f
DEGREES\n', E3D_BW);
fprintf (fid, '\n 3-dB BEAMWIDTH IN THE H-PLANE PATTERN = %12.2f
DEGREES\n', H3D_BW);
fprintf (fid, '\n FRONT-TO-BACK RATIO IN THE E-PLANE = %12.4f dB\n',
EFTOB);
fprintf (fid, '\n FRONT-TO-BACK RATIO IN THE H-PLANE = %12.4f dB\n',
HFTOB);
fprintf (fid, '\n DIRECTIVITY = %16.3f dB\n', 10 * log10 (D0));

%
% BASED ON THE FOURIER COEFFICIENTS OF THE CURRENT, CALCULATE THE
% CURRENT DISTRIBUTION ON THE ELEMENTS. NOTE THAT EACH ELEMENT

```

```

%       IS SUBDIVIDED INTO 100 SECTIONS FOR THIS CALCULATION.
%
%
fprintf (fid3, '   CURRENT DISTRIBUTION ON THE ELEMENTS\n');
fprintf (fid3, '   =====\n\n');

IL = 1;
while IL <= N

    fprintf (fid3, '\n\n   ELEMENT # %3d\n', IL);
    fprintf (fid3, '   =====\n\n');

    DZ (IL) = L (IL) / 100;

    I = 1;
    while I <= 51

        Z = (I - 1) * DZ (IL);
        IZP = 0;

        J = 1;
        while J <= M

            F2M = 2 * J - 1;
            IZP = IZP + Inm (IL, J) * cos (F2M * pi * Z / L (IL));

            J = J + 1;
        end

        CUR (I) = abs (IZP);
        angle = atan2 (imag (IZP), real (IZP));
        PHA (I) = angle * RTOD;

        I = I + 1;
    end

    fprintf (fid3, '           DISTANCE           CURRENT           CURRENT\n');
    fprintf (fid3, '           MAGNITUDE           PHASE \n\n');

    I = 1;
    while I <= 51
        Z = (I - 1) * DZ (IL);
        fprintf (fid3, '   %12.5f   %12.5f   %12.5f\n', Z, CUR (I), PHA
(I));
        I = I + 1;
    end

    CENTER_CURRENT (IL) = CUR (1); % Record for future plotting
    IL = IL + 1;
end

I = 1;

```

```

while I <= N

    fprintf (fid4, '\n\n  ELEMENT # %3d\n', I);
    fprintf (fid4, '  =====\n\n');
    fprintf (fid4, '  MODE #      MAGNITUDE      PHASE\n\n');

    J = 1;
    while J <= M

        CURRENT = abs (Inm (I, J));
        angle_radian = atan2 (imag (Inm (I, J)), real (Inm (I, J)));
        ANGLE = angle_radian * RTOD;

        fprintf (fid4, '    %2d    %12.5f    %12.5f\n', J, CURRENT, ANGLE);

        J = J + 1;
    end

    I = I + 1;
end

I = 1;
while I > 0

    fprintf (fid, '\n\n  *** NOTE:\n');
    fprintf (fid, '    E-PLANE PATTERN IS STORED IN Epl-yagi.dat\n');
    fprintf (fid, '    H-PLANE PATTERN IS STORED IN Hpl-yagi.dat\n');
    fprintf (fid, '    CURRENT ON EACH ELEMENT IS STORED IN Cur-
yagi.dat\n');
    fprintf (fid, '    MODE COEFFs. FOR EACH ELEMENT ARE STORED IN
Coe-yagi.dat\n\n');

    if fid == 1
        I = 0; % exit the loop
    else
        fid = 1; % print same message on the screen again
    end

end

fclose ('all');

E_PLANE = E_PLANE (1:360);
H_PLANE = H_PLANE (1:360);
angle = 1:1:360;

figure;
plot (angle, E_PLANE, '-b', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot (angle, H_PLANE, '--r', 'LineWidth', 2);
legend ('E-Plane', 'H-Plane');
xlim ([1 360]);

```

```

ylim ([-60 0]);
title ('Yagi-Uda Analysis');
xlabel ('Theta(E)/Phi(H) degrees');
ylabel ('Field Pattern (dB)');
hold off;

figure;
INDEX = 1:1:N;
if N >= 3
    CENTER_CURRENT = [CENTER_CURRENT(N-1:N) CENTER_CURRENT(1:N-2)];
    INDEX = [INDEX(N-1:N) INDEX(1:N-2)];
end
plot (CENTER_CURRENT, 'LineWidth', 2);
set (gca, 'XTick', 1:1:N);
set (gca, 'XTickLabel', INDEX);
title ('Current Distribution');
ylim ([0 1]);
xlabel ('Element Number');
ylabel ('Element Current Amplitude');

figure;
h1=elevation(angle*pi/180,E_PLANE,-40,0,5,'b'); hold on;
h2=elevation(angle*pi/180,H_PLANE,-40,0,5,'r--');
set([h1 h2], 'linewidth', 2);
legend([h1 h2], {'E-Plane', 'H-Plane'});

% End of the yagi_uda function
%*****

%*****
%      FUNCTION SINTEG  (SINGLE PRECISION)
%
%      PURPOSE
%      TO PERFORM COMPLEX SINGLE INTEGRATION
%      DOES SIXTEEN POINT GAUSSIAN QUADRATURE INTEGRATION
%      WITH INCREASING ACCURACY SET BY INTEGER NO
%
%      USAGE
%      ANS = SINTEG(UL,LL,NO)
%
%      DESCRIPTION OF PARAMETERS
%      UL  -  UPPER LIMIT OF THE INTEGRATION (REAL)
%      LL  -  LOWER LIMIT OF THE INTEGRATION (REAL)
%      NO  -  NUMBER OF DIVISIONS BETWEEN LL AND UL  (INTEGER)
%
%      ANS -  INTEGRATION RESULT
%      L   -  THE LENGTHS OF THE ARRAY ELEMENTS (GLOBAL VARIABLE)

function ANS = SINTEG (UL, LL, NO)

GAUSS = [-0.0950125098376370
         -0.2816035507792590

```

```

-0.4580167776572270
-0.6178762444026440
-0.7554044083550030
-0.8656312023878320
-0.9445750230732330
-0.9894009349916500
0.0950125098376370
0.2816035507792590
0.4580167776572270
0.6178762444026440
0.7554044083550030
0.8656312023878320
0.9445750230732330
0.9894009349916500];

LEGEND = [0.1894506104550680
0.1826034150449240
0.1691565193950020
0.1495959888165770
0.1246289712555340
0.0951585116824930
0.0622535239386480
0.0271524594117540
0.1894506104550680
0.1826034150449240
0.1691565193950020
0.1495959888165770
0.1246289712555340
0.0951585116824930
0.0622535239386480
0.0271524594117540];

DEL = (UL - LL) / (2 * NO);
SUM = 0;

J = 1;
while J <= NO
    S = LL + (2 * J - 1) * DEL;
    I = 1;
    while I <= 16
        X = S + GAUSS (I) * DEL;
        SUM = SUM + LEGEND (I) * FF (X);
        I = I + 1;
    end
    J = J + 1;
end

ANS = SUM * DEL;

% End of the SINTEG function
%*****

```

```

%*****
%      FUNCTION FF
%
function value = FF (X)
global Z RHO N2 NMODE L

K = 2 * pi;

RMINUS = sqrt (RHO ^ 2 + (Z - X) ^ 2);
RPLUS = sqrt ( RHO ^ 2 + (Z + X) ^ 2);

F2M = NMODE * 2 - 1;

value = (exp (-1i * K * RMINUS) / (4 * pi * RMINUS) + ...
        exp (-1i * K * RPLUS) / (4 * pi * RPLUS)) * ...
        cos (F2M * pi * X / L (N2));

% End of the FF function
%*****

%*****
%      FUNCTION KERNEL
%
function G2 = KERNEL (ZP)
global Z RHO

K = 2 * pi;

RMINUS = sqrt (RHO ^ 2 + (Z - ZP) ^ 2);
RPLUS = sqrt (RHO ^ 2 + (Z + ZP) ^ 2);

G2 = exp (-1i * K * RMINUS) / (4 * pi * RMINUS) + ...
      exp (-1i * K * RPLUS) / (4 * pi * RPLUS);

% End of the KERNEL function
%*****

%*****
%      FUNCTION ZMINUS
%
function value = ZMINUS (TH, LG, NM)

K = 2 * pi;

F2M = 2 * NM - 1;

ARG1 = (F2M * pi / LG - K * cos (TH)) * (LG / 2);
if (ARG1 == 0)

```

```

        value = 1;
else
    value = sin (ARG1) / ARG1;
end

% End of the ZMINUS function
%*****

%*****
%      FUNCTION ZPLUS
%
function value = ZPLUS (TH, LG, NM)

K = 2 * pi;

F2M = 2 * NM - 1;

ARG2 = (F2M * pi / LG + K * cos (TH)) * (LG / 2);
if (ARG2 == 0)
    value = 1;
else
    value = sin (ARG2) / ARG2;
end

% End of the ZPLUS function
%*****

%*****
%      FUNCTION FXZ
%
function value = FXZ (THETA, PHI, N, M, Inm, YP)
global L

K = 2 * pi;
AZ = 0;

I = 1;
while I <= N

    IZP = 0;

    J = 1;
    while J <= M

        MODE = J;
        LEN = L (I);
        ANG = THETA;

        IZP = IZP + Inm (I, J) * ...

```

```

                                (ZMINUS (ANG, LEN, MODE) + ...
                                ZPLUS (ANG, LEN, MODE));
        J = J + 1;
end

AEXP = K * YP (I) * sin (THETA) * sin (PHI);
AZ = AZ + L(I) * exp (li * AEXP) * IZP;

I = I + 1;
end

U = 3.75 * pi * abs (AZ) ^ 2 * sin (THETA) ^ 2;

value = sin (THETA) * U;

% End of the FXZ function
%*****

%*****
%      FUNCTION LUDEC
%
function [A, IPERM, SCAL] = LUDEC (Z, N)

%      REPLACES MATRIX BY ITS LU DECOMPOSITION
%      GET SCALING INFO.

I = 1;
while I <= N

    ZMAX = 0;

    J = 1;
    while J <= N

        CAZ = abs (Z (I,J));
        if (CAZ > ZMAX)
            ZMAX = CAZ;
        end
        J = J + 1;
    end

    SCAL (I) = 1 / ZMAX;
    I = I + 1;
end

%      CROUT's algorithm.
J = 1;
while J <= N

```

```

I = 1;
while I <= (J - 1)

    K = 1;
    while K <= (I - 1)
        Z (I, J) = Z (I, J) - Z (I, K) * Z (K, J);
        K = K + 1;
    end

    I = I + 1;
end

%   SEARCH FOR LARGEST PIVOT ELEMENT.
ZMAX = 0;

I = J;
while I <= N

    K = 1;
    while K <= (J - 1)
        Z (I, J) = Z (I, J) - Z (I, K) * Z (K, J);
        K = K + 1;
    end

    TEST = SCAL (I) * abs (Z (I, J));

    if (round ((TEST - ZMAX) * 10 ^ 8) > 0) % Work around way
        IMAX = I;
        ZMAX = TEST;
    end

    I = I + 1;
end

%   INTERCHANGE THE ROWS.
if (J ~= IMAX)

    K = 1;
    while K <= N
        TEMP = Z (IMAX, K);
        Z (IMAX, K) = Z (J, K);
        Z (J, K) = TEMP;
        K = K + 1;
    end
    SCAL (IMAX) = SCAL (J);
end

%   DIVIDE BY PIVOT ELEMENT.
IPERM (J) = IMAX;
if (J ~= N)

    I = J + 1;

```

```

        while I <= N
            Z (I, J) = Z (I, J) / Z (J, J);
            I = I + 1;
        end
    end

    J = J + 1;
end

A = Z;

% End of the LUDEC function
%*****

%*****
%      FUNCTION LUSOLV
%
function B = LUSOLV (Z, N, IPERM, V)

%      SOLVES LINEAR SYSTEM GIVEN THE LU DECOMPOSITION FROM LUDEC
%      FORCING VECTOR IS REPLACED WITH SOLUTION VECTOR UPON EXIT

%      FORWARD SUBSTITUTION.
I = 1;
while I <= N

    TEMP = V (IPERM (I));
    V (IPERM (I)) = TEMP;

    J = 1;
    while J <= (I - 1)
        TEMP = TEMP - Z (I, J) * V (J);
        J = J + 1;
    end

    V (I) = TEMP;
    I = I + 1;
end

%      BACKWARD SUBSTITUTION.
I = 1;
while I <= N
    II = N - I + 1;
    TEMP = V (II);

    J = II + 1;
    while J <= N
        TEMP = TEMP - Z (II, J) * V (J);
        J = J + 1;
    end
end

```

```

    V (II) = TEMP / Z (II, II);
    I = I + 1;
end

B = V;
% End of the LUSOLV function
%*****

%*****
% FUNCTION SCINT2
% SCINT2 IS A SINGLE PRECISION, COMPLEX, INTEGRATION ROUTINE
% IN 2 DIMENSIONS. THIS ROUTINE USES 16 POINT GAUSSIAN QUADRATURES,
% WITH LEGANDRE COEFFICIENTS. ENTER WITH:
%
% (R) X1          LOWER LIMIT OF X INTEGRATION
% (R) X2          UPPER LIMIT OF X INTEGRATION
% (R) Z1          LOWER LIMIT OF Z INTEGRATION
% (R) Z2          UPPER LIMIT OF Z INTEGRATION
% (C) RES         RESULTS OF INTEGRATION
% (I) N           NUMBER OF ELEMENTS IN THE ARRAY
% (I) M           NUMBER OF MODES PER ELEMENT
% (R) Inm         THE ARRAY OF CURRENT COEFFICIENTS
% (R) YP         THE ELEMENT DISTANCES ALONG THE Y AXIS
%
%*****
%
%
function RES = SCINT2 (X1, X2, Z1, Z2, N, M, Inm, YP)

R = [0.0950125098
     0.2816035508
     0.4580167777
     0.6178762444
     0.7554044084
     0.8656312024
     0.9445750231
     0.9894009350
    -0.9894009350
    -0.9445750231
    -0.8656312024
    -0.7554044084
    -0.6178762444
    -0.4580167777
    -0.2816035508
    -0.0950125098];

W = [0.1894506105
     0.1826034150
     0.1691565194
     0.1495959888
     0.1246289713

```

```

0.0951585117
0.0622535239
0.0271524594
0.0271524594
0.0622535239
0.0951585117
0.1246289713
0.1495959888
0.1691565194
0.1826034150
0.1894506105];

SX = 0.5 * (X2 + X1);
DX = 0.5 * (X2 - X1);
SZ = 0.5 * (Z2 + Z1);
DZ = 0.5 * (Z2 - Z1);

TT = 0;

J = 1;
while J <= 16

    Z = SZ + DZ * R (J);
    SS = 0;

    I = 1;
    while I <= 16

        X = SX + DX * R (I);
        SS = W (I) * FXZ (X, Z, N, M, Inm, YP) + SS;

        I = I + 1;
    end

    S = DX * SS;
    TT = S * W (J) + TT;

    J = J + 1;
end

RES = DZ * TT;
% End of the SINT2 function
%*****

```