



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS 

CONVERSIÓN DE UNA ANTENA OFFSET EN UNA ANTENA
CASSEGRAIN PARA COMPROBAR LA REDUCCIÓN DE LA
POLARIZACIÓN CRUZADA DEL ESPECTRO



AUTORAS

Jessica Berenice Pacheco Guachamín

Carol Elizabeth Rocha Saldaña

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**CONVERSIÓN DE UNA ANTENA *OFFSET* EN UNA ANTENA *CASSEGRAIN*
PARA COMPROBAR LA REDUCCIÓN DE LA POLARIZACIÓN CRUZADA DEL
ESPECTRO**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera en Electrónica y Redes de
Información e Ingeniera en Redes y Telecomunicaciones**

Profesor Guía

Msc. Jorge Wilson Granda Cantuña

Autoras

Jessica Berenice Pacheco Guachamín

Carol Elizabeth Rocha Saldaña

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Conversión de una antena *offset* en una antena *Cassegrain* para comprobar la reducción de la polarización cruzada del espectro, a través de reuniones periódicas con las estudiantes, Jessica Berenice Pacheco Guachamín y Carol Elizabeth Rocha Saldaña, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Ing. Jorge Wilson Granda Cantuña
Magister en Ingeniería Eléctrica

C.I.: 1708594187

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Conversión de una antena *offset* en una antena *Cassegrain* para comprobar la reducción de la polarización cruzada del espectro, de las estudiantes Jessica Berenice Pacheco Guachamín y Carol Elizabeth Rocha Saldaña, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Diego Fabián Paredes Páliz

Master in Optical Communications and Photonic Technologies

C.I.: 0603014143

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LAS ESTUDIANTES

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Jessica Berenice Pacheco Guachamín
C.I.: 1719219782

Carol Elizabeth Rocha Saldaña
C.I.: 1721095576

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Julio Freire y Ángel Jaramillo por la ayuda con las solicitudes y requerimientos que se les hizo y en el cual colaboraron con eficiencia y rapidez. Gracias a los ingenieros Marco González y Víctor Garzón quienes ayudaron con su conocimiento, experiencia y buena voluntad.

Jessica Pacheco

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque siempre me salva cuando más lo necesito.

A nuestro profesor guía por darnos el empujón para iniciar este proyecto y al ingeniero Diego Paredes porque con su ayuda y conocimientos se mejoró notablemente la tesis.

Carol Rocha

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres Andrés y Martha, sin ustedes no lo hubiese logrado, han estado ahí en cada fracaso y éxito. Me han enseñado a no rendirme y luchar por alcanzar mis metas.

Jessica Pacheco

DEDICATORIA

No hay mayor sacrificio, amor y paciencia en el mundo que la de mis padres y hermana, Ricardo, Gladys y Belén. A ustedes les dedico este trabajo, ya que me han enseñado que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

Lo hicimos de nuevo.

Carol Rocha

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño e implementación de un subreflector para realizar la conversión de una antena *offset* a una antena *Cassegrain* del mismo tipo. Para lograr esto, se utilizará cálculos matemáticos y diferentes condiciones de diseño para poder reducir la polarización cruzada presente en una antena *offset*.

En el capítulo I se recopilará la información necesaria acerca de las antenas parabólicas como: definición, características, elementos que la forman, clasificación, etc. Se enfatizará en las antenas de configuración *offset* con reflector simple y de doble reflector.

El capítulo II iniciará con una breve explicación de los parámetros de diseño de las antenas *offset* y *Cassegrain*, así como se expondrá las condiciones que se necesita para colocar los diferentes elementos que conforman la antena. Como segunda parte de este capítulo se presentará la conversión de antenas, con los cálculos efectuados, para luego puntualizar el diseño del subreflector en 2D-3D y la selección del material, con el cual, se construirá el reflector secundario.

En el capítulo III se detallará los pasos que se dieron para implementar la antena *Cassegrain offset*. Se describirá los elementos de la antena inicial, el proceso para la construcción del nuevo bazo y soportes, la fabricación del subreflector y se mostrará el resultado de la conversión de antenas. Finalmente se realizará las pruebas de campo y simulaciones.

El capítulo IV será para analizar los resultados obtenidos tanto en las simulaciones con el *software GRASP* y las pruebas de campo que se efectuarán con el analizador de espectros. De esta manera se tendrá las conclusiones y recomendaciones de este proyecto.

ABSTRACT

The purpose of this project is to design and implement a subreflector to convert an offset antenna to a Cassegrain antenna of the same type. For this, mathematical calculations and different design conditions will be used to reduce the cross polarization present in an offset antenna.

In chapter I, the necessary information about the parabolic antennas will be compiled: definition, characteristics, elements that form it, classification, etc. Emphasis will be placed on offset configuration antennas with single reflector and double reflector.

Chapter II will begin with a brief explanation of the design parameters of the offset and Cassegrain antennas, as well as the conditions needed to place the different elements that make up the antenna. The second part of this chapter will present the conversion of antennas, with the calculations made, to then specify the design of the subreflector in 2D-3D and the selection of the material, with which, the secondary reflector will be built.

Chapter III will detail the steps that were taken to implement the Cassegrain offset antenna. The elements of the initial antenna, the process for the construction of the new spleen and supports, the manufacture of the subreflector will be described and the result of the conversion of antennas will be shown. Finally, field tests and simulations will be carried out.

Chapter IV will be to analyze the results obtained both in the simulations with the GRASP software and the field tests that will be carried out with the spectrum analyzer. In this way you will have the conclusions and recommendations of this project.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1 Capítulo I. Marco Teórico	2
1.1 Antena	2
1.1.1 Parámetros de una antena.	3
1.1.1.1 Patrón de radiación	3
1.1.1.2 Ancho de banda	3
1.1.1.3 Directividad	3
1.1.1.4 Ganancia.....	4
1.1.1.5 Ancho de haz	4
1.1.1.6 Impedancia.....	5
1.1.1.7 Polarización.....	5
1.1.2 Aplicaciones de las antenas	9
1.1.3 Bandas de frecuencia.....	10
1.1.3.1 Banda Ku	10
1.2 Antena Parabólica	12
1.2.1 Características técnicas	15
1.2.1.1 Diámetro del reflector.....	15
1.2.1.2 Ganancia.....	15
1.2.1.3 Relación D/f y f/D	16
1.2.1.4 Ancho de haz	16
1.2.1.5 Relación señal/ruido.....	17

1.2.1.6	Polarización en antenas parabólicas.....	17
1.2.1.7	Polarización Cruzada	18
1.2.2	Tipos de antenas parabólicas.....	19
1.2.2.1	Según la forma del reflector	19
1.3	<i>Software</i> de simulación	30
1.3.1	<i>General Reflector Antennas Software Package</i>	30
2	Capítulo II. Diseño para la conversión de antenas	32
2.1	Condiciones de Diseño.....	34
2.1.1	Condición de <i>Mizugutch</i>	34
2.1.2	Condición de <i>Rusch</i>	34
2.2	Datos Iniciales	35
2.3	Cálculos	37
2.3.1	Resumen de Cálculos	41
2.4	Geometría del reflector principal	42
2.5	Geometría del subreflector	46
2.6	Diseño antena <i>Cassegrain offset</i> en <i>AutoCAD</i>	49
2.7	Selección del Material.....	53
2.7.1	Propiedades del Material	54
2.7.1.1	Corrosión	54
2.7.1.2	Costo.....	54
2.7.1.3	Resistencia Mecánica	54
2.7.1.4	Maquinabilidad	54
2.7.2	Métodos de obtención del subreflector	54

2.7.2.1	Fundición en Arena	54
2.7.2.2	Impresión 3D.....	55
2.7.3	Material seleccionado.....	56
3	Capítulo III. Implementación y Pruebas.....	57
3.1	Descripción de los elementos	57
3.2	Brazo y soportes de antena	59
3.3	Fabricación del Subreflector.....	62
3.4	Conversión de la antena <i>offset</i> a <i>Cassegrain offset</i>	65
3.5	Pruebas.....	67
3.5.1	Simulación.....	67
3.5.1.1	Simulación antena <i>offset</i>	68
3.5.1.2	Simulación antena <i>Cassegrain offset</i>	70
3.5.2	Pruebas de Campo.....	73
3.5.2.1	Instalación de Antena DIRECTV	73
3.5.2.2	Pruebas con antena <i>Cassegrain offset</i>	77
4	Capítulo IV. Análisis de Resultados	80
4.1	Análisis de las simulaciones	80
4.2	Análisis pruebas con antena <i>Cassegrain offset</i>	81
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones.....	87
	REFERENCIAS	89

ANEXOS 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Antena como dispositivo de transición	2
Figura 2. Valores típicos de ancho de haz en antenas reflectoras	5
Figura 3. Campo eléctrico en el tiempo	6
Figura 4. Polarización lineal	7
Figura 5. Polarización circular	8
Figura 6. Polarización elíptica	9
Figura 7. Elementos de antena parabólica	12
Figura 8. Geometría reflector parabólico	13
Figura 9. Perfil reflector parabólico	14
Figura 10. Funcionamiento reflector parabólico	14
Figura 11. Ancho de haz	17
Figura 12. Polarización en reflector parabólico	18
Figura 13. Antena parabólica según la forma del reflector	20
Figura 14. Zona de Sombra	21
Figura 15. Antena Offset	21
Figura 16. Construcción antena offset	22
Figura 17. Superficie del reflector offset	23
Figura 18. Eliminación efecto de sombra	23
Figura 19. LNB	24
Figura 20. Elementos LNB	25
Figura 21. Antena Cassegrain clásica	26
Figura 22. Antena Cassegrain Offset	28
Figura 23. Antena Gregorian	29
Figura 24. Antena Gregorian Offset	29
Figura 25. Representación cartesiana de polarización en Grasp	31
Figura 26. Diseño antena Cassegrain offset	32
Figura 27. Parámetros ángulo θ	40
Figura 28. Parábola en GeoGebra	43
Figura 29. Puntos del paraboloides	45

Figura 30. Elementos de la hipérbola.....	47
Figura 31. Puntos hiperboloide.....	48
Figura 32. Diseño antena Cassegrain offset en GeoGebra.....	49
Figura 33. Variación de datos iniciales.....	51
Figura 34. Diseño antena Cassegrain offset en AutoCAD	52
Figura 35. Subreflector en 3D	53
Figura 36. Antena offset DirecTV	57
Figura 37. Partes antena offset DIRECTV	58
Figura 38. Plancha de Aluminio.....	59
Figura 39. Corte por Plasma	60
Figura 40. Corte CNC.....	61
Figura 41. Brazo antena Cassegrain offset.....	62
Figura 42. Tiempo y porcentaje de la impresión.....	63
Figura 43. Subreflector con material ABS	64
Figura 44. Masilla Mustang y catalizador	64
Figura 45. Subreflector final	65
Figura 46. Antena Offset inicial	66
Figura 47. Conversión final.....	66
Figura 48. Ventana Principal de Grasp	67
Figura 49. Ventana del tipo de sistema	68
Figura 50. Ingreso de Datos antena offset	69
Figura 51. Antena offset 3D.....	69
Figura 52. Representación cartesiana de la polarización en antena offset	70
Figura 53. Ingreso de datos antena Cassegrain offset.....	71
Figura 54. Diseño en 3D Cassegrain offset.....	72
Figura 55. Representación cartesiana de la polarización en antena Cassegrain offset	73
Figura 56. Instalación antena DIRECTV – Paso1	74
Figura 57. Instalación antena DIRECTV – Paso2	74
Figura 58. Instalación antena DIRECTV – Paso3	75

Figura 59. Instalación antena DIRECTV – Paso4	76
Figura 60. Instalación antena DIRECTV – Paso5	76
Figura 61. Instalación antena DIRECTV – Paso6	77
Figura 62. Antena Cassegrain offset instalada.....	77
Figura 63. Esquema de conexión.....	78
Figura 64. Nivel de recepción del prototipo	79
Figura 65. Representación cartesiana de la polarización en antena offset - Cassegrain offset.....	80
Figura 66. Nivel de recepción offset	81
Figura 67. Nivel de recepción primera captura.....	82
Figura 68. Segunda captura del prototipo	83
Figura 69. Modelo antena Cassegrain	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la polarización	7
Tabla 2. Rango de bandas de frecuencia.....	10
Tabla 3. Límites de densidad de flujo de potencia	11
Tabla 4. Datos de diseño inicial.....	37
Tabla 5. Datos de Antena Offset	37
Tabla 6. Datos Técnicos Cassegrain offset.....	42
Tabla 7. Datos del reflector principal	44
Tabla 8. Puntos paraboloide.....	45
Tabla 9. Puntos hiperboloide.....	48
Tabla 10. Datos hiperboloide.....	50
Tabla 11. Datos paraboloide	50
Tabla 12. Ángulos de posicionamiento.....	50
Tabla 13. Datos de entrada	51
Tabla 14. Datos técnicos antena offset	58
Tabla 15. Resultados de las simulaciones	80

INTRODUCCIÓN

Una antena es un transductor que permite la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas a través de un medio guiado para luego pasar hacia el espacio libre. En los sistemas de microondas, radiocomunicaciones y enlaces satelitales las antenas con mayor aceptación son las de reflector parabólico, debido a su alta ganancia y directividad.

La función del reflector parabólico, en un enlace satelital por ejemplo, es recibir las ondas provenientes del satélite para luego ser reflejadas hacia el foco. De acuerdo a la ubicación del foco las antenas parabólicas se clasifican en: *prime focus*, *offset* y con doble reflector. La antena *offset* mejora el problema de bloqueo que tienen las antenas de foco central, pero tiene presencia de polarización cruzada lo cual perjudica a la señal.

A través de la conversión de antenas, se tomará elementos de la antena *offset* para transformarla a una antena *Cassegrain* del tipo *offset*, con el fin de lograr la disminución de la polarización cruzada.

Para lo cual se diseñará e implementará un reflector secundario para llevar a cabo la conversión de antenas. Con la investigación de teoría, cálculos, parámetros y condiciones de diseño se logrará tener una idea clara para realizar este proyecto.

En la parte de implementación se estudiará los materiales y métodos para la construcción del subreflector y para el ensamblaje de la antena y finalmente con las simulaciones - pruebas de campo se observará el comportamiento de la nueva antena.

1 Capítulo I. Marco Teórico

1.1 Antena

Se puede definir a una antena como un dispositivo o un medio capaz de radiar o recibir ondas electromagnéticas. Para la IEEE, una antena es una estructura de transición. En el caso de la transmisión la antena sería el elemento de transición entre una fuente – línea de transmisión y el espacio libre, como se observa en la figura 1 y viceversa para la recepción. (Balanis, 2005)



Figura 1. Antena como dispositivo de transición

Adaptado de (Balanis, 2005)

También una antena es conocida como un transductor, esto se puede explicar a través de una analogía, por ejemplo: puede ser representado por el estéreo de una casa, los sistemas de sonido tienen una cosa en común. La última parada del sistema en su camino hacia los oídos del usuario final es un transductor, un dispositivo que transforma la energía de una forma a otra, en este caso un altavoz.

La señal eléctrica que el amplificador entrega en energía, el altavoz la transforma en una onda acústica que puede propagarse a través del aire hasta los oídos.

Un transmisor de radio actúa de la misma manera, excepto que su amplificador de potencia produce energía a una frecuencia más alta que el sonido que puede escuchar, y el transductor es una antena que transforma la energía eléctrica de alta frecuencia en una onda electromagnética. Esta onda puede propagarse a través del aire durante largas distancias. (Hallas, 2009)

1.1.1 Parámetros de una antena.

1.1.1.1 Patrón de radiación

Un patrón de radiación se define como una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales.

En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región de campo lejano y se representa como una función de las coordenadas direccionales. Las propiedades de radiación incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización.

El campo y los patrones de potencia se normalizan con respecto a su valor máximo, produciendo patrones de potencia y campo normalizados. Además, el patrón de potencia se traza generalmente en una escala logarítmica o más comúnmente en decibelios. (Balanis, 2005)

1.1.1.2 Ancho de banda

El ancho de banda de una antena está definido como el rango de frecuencias dentro del cual el rendimiento de la antena, con respecto a algunas características, conforme a un específico estándar.

El ancho de banda se puede considerar como el rango de frecuencias, en cualquier lado de una frecuencia central, donde las características de la antena están dentro de un valor aceptable de aquellos en la frecuencia central. (Balanis, 2005)

1.1.1.3 Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena hasta la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones.

La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . (Balanis, 2005)

$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot U}{P_{rad}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

D: Directividad de la antena

U: Intensidad de radiación

Prad: Potencia total radiada

1.1.1.4 Ganancia

La ganancia de una antena es definida como una proporción de la intensidad, en una dirección dada, a la intensidad que podría ser obtenida si la potencia aceptada por la antena fue radiada isotrópicamente.

La ganancia no incluye las pérdidas que surgen por las pérdidas por reflexión y por las pérdidas causadas por la polarización. (Balanis, 2005)

$$\text{Ganancia} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{\text{intensidad de radiación}}{\text{potencia de entrada total (aceptada)}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

1.1.1.5 Ancho de haz

El ancho del haz de un patrón se define como la separación angular entre dos puntos idénticos en el lado opuesto del máximo del patrón.

Es un parámetro muy importante de la antena ya que a menudo se utiliza como una compensación entre éste y el nivel del lóbulo lateral; es decir, a medida que el ancho del haz disminuye, el lóbulo lateral aumenta y viceversa. Además entre menor sea el ancho de haz, mayor es la directividad de la antena.

Los anchos de haz de la antena para enlaces satelitales tienden a ser muy pequeños, en la mayoría de los casos mucho menores que 1° , lo cual requiere una cuidadosa orientación y control de la antena para mantener el enlace. (Ippolito, 2008)

f (GHz)	d (m)	G (dBi)	θ (°)
6	3	43	1.25
	4.5	46	0.83
12	1	39	1.88
	2.4	47	0.78
	4.5	53	0.42
30	0.5	41	1.50
	2.4	55	0.31
	4.5	60	0.17

Figura 2. Valores típicos de ancho de haz en antenas reflectoras

Tomado de (Ippolito, 2008)

1.1.1.6 Impedancia

La impedancia de una antena es la relación entre el voltaje y la corriente presentes en los terminales de la antena. Se generan reflexiones y pérdidas si la impedancia de las antenas y cables no coinciden. La impedancia tiene una componente real que es la resistencia, y una componente imaginaria que es la reactancia.

$$Z = R \pm jX \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Z: Impedancia

R: Parte real

jX: Parte imaginaria

1.1.1.7 Polarización

El término de polarización es asociado a las propiedades que tiene una onda electromagnética, formada por el campo magnético y el campo eléctrico que viajan en una sola dirección.

Lo que hace la polarización en ondas electromagnéticas planas es la descripción de la dirección del campo eléctrico en cierto instante de tiempo, como se muestra en la figura 3.

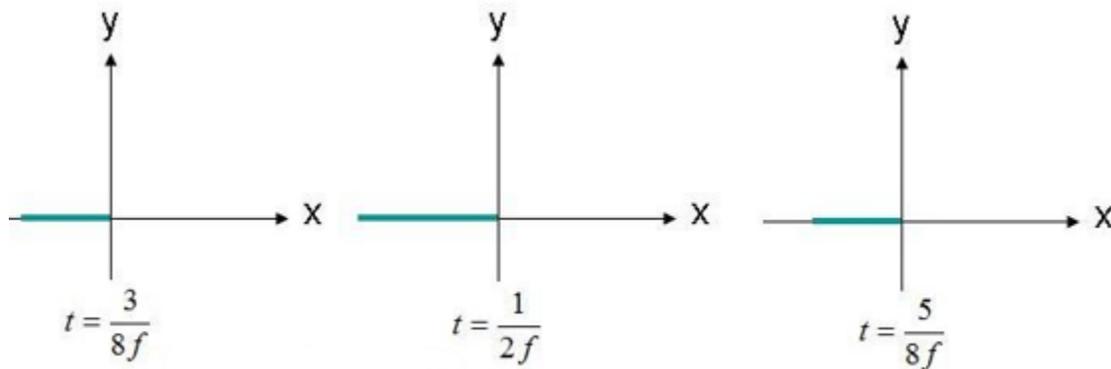


Figura 3. Campo eléctrico en el tiempo

Tomado de (Theory, 2015)

El campo eléctrico se descompone en dos proyecciones ortogonales, las cuales se relacionan de la siguiente forma:

$$\frac{E_x}{E_{ox}} = \cos(\theta) \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\frac{E_y}{E_{oy}} = \text{sen}(\theta) \quad (\text{Ecuación 5})$$

De acuerdo a la identidad trigonométrica $\text{sen}^2(\theta) + \text{cos}^2(\theta) = 1$ (Ecuación 6)

se obtiene la siguiente relación:

$$\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 = 1 \quad (\text{Ecuación 7})$$

En la tabla 1 se puede observar la clasificación de esta ecuación.

Tabla 1.

Clasificación de la polarización

Polarización	Condición	Observación
Lineal	$\theta = 0, \pi/3$	Las magnitudes E_{ox} y E_{oy} son paralelas
Circular	$E_{ox} = E_{oy}$	Las magnitudes E_{ox} y E_{oy} son iguales y perpendiculares
Elíptica	$E_{ox} \neq E_{oy}$	Las magnitudes E_{ox} y E_{oy} son diferentes y perpendiculares

Adaptado de (Hernández, 1998, p.38-40)

1.1.1.7.1 Polarización lineal

En las ondas electromagnéticas planas, el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético y viceversa. La polarización lineal ocurre cuando la dirección tanto del campo eléctrico como la de propagación se encuentran en el mismo plano. (Theory, 2015)

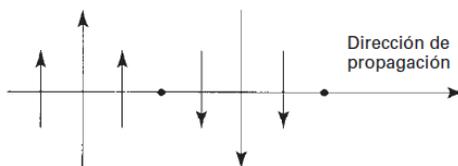


Figura 4. Polarización lineal

Tomado de (Tomasi, 2003)

Se clasifica en:

- Polarización lineal vertical.- Las líneas de fuerza eléctrica de polarización son verticales, mientras que la polarización magnética son horizontales. En un sistema de coordenadas el campo eléctrico tendría su referencia en el eje y.
- Polarización lineal horizontal.- Es lo contrario a la polarización nombrada anteriormente, en el eje de coordenadas el campo eléctrico se desplazaría en dirección del eje x. (Ceceña, 2009)

1.1.1.7.2 Polarización circular

El campo eléctrico describe una trayectoria circular y para lograr esto, debe cumplir con lo siguiente:

- El campo eléctrico debe contar con dos componentes ortogonales.
- Estas componentes ortogonales deben tener la misma magnitud.
- Finalmente, las componentes ortogonales deben tener un desfase de 90° . (Theory, 2015)

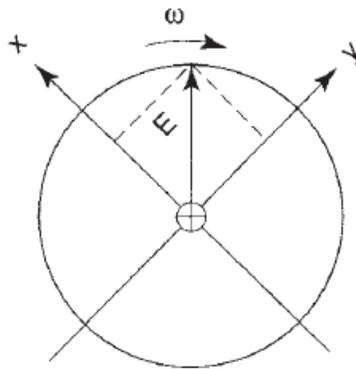


Figura 5. Polarización circular

Tomado de (Tomasi, 2003)

Si el campo eléctrico gira en sentido horario, se define como polarización circular de la mano izquierda, caso contrario, se tiene una polarización circular de la mano derecha con sentido de giro anti horario.

1.1.1.7.3 Polarización elíptica

Cuando el campo eléctrico tiene dos componentes perpendiculares y están desfasados 90° , pero con diferentes magnitudes se dice que el campo eléctrico tiene polarización elíptica.

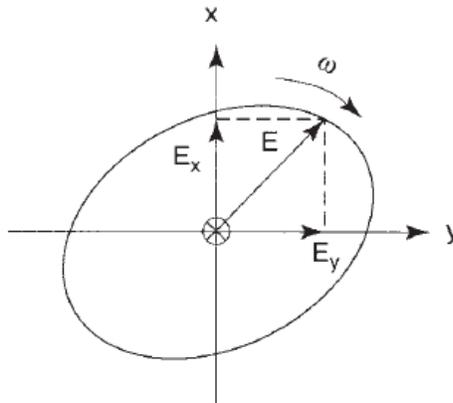


Figura 6. Polarización elíptica

Tomado de (Tomasi, 2003)

Al igual que la polarización circular, este tipo de polarización se clasifica en: polarización elíptica de la mano derecha e izquierda.

1.1.2 Aplicaciones de las antenas

De acuerdo al espectro de frecuencias, las antenas pueden desenvolverse en diferentes campos como:

- **Comunicaciones marítimas**

Aquí no existe línea de vista directa entre el receptor y el transmisor, por lo cual se requiere de frecuencias que reboten en la atmosfera. Por ejemplo en tierra se utilizan más las antenas *Yagi*, mientras que en la embarcación se encuentran las antenas omnidireccionales. (Hernández, 1998)

▪ Comunicaciones satelitales

En este tipo de comunicaciones debe existir línea de vista entre el satélite y la antena. Para este tipo de comunicación las bandas que son capaces de atravesar la atmosfera por completo y ser perjudicadas en lo mínimo ante condiciones climatológicas, son las bandas C, Ku y Ka. Las antenas más utilizadas para las comunicaciones satelitales son las antenas reflectoras. (Hernández, 1998)

1.1.3 Bandas de frecuencia

Los satélites comerciales funcionan en tres bandas de frecuencias denominadas C, Ku y Ka. La gran mayoría de emisiones de televisión por satélite se realizan en la banda Ku. En la tabla 2 se especifica el rango de frecuencias en que trabaja cada banda de frecuencia.

Tabla 2.

Rango de bandas de frecuencia

Banda	Frecuencia ascendente (GHz)	Frecuencia descendente (GHz)
C	5,925 - 6,425	3,7 - 4,2
Ku	12,75 – 13,25	10,7 - 10,95 11,2 - 11,45
Ka	27,5 - 30,0	18 - 21,7

Adaptado de (UIT, 1995, p.3)

1.1.3.1 Banda Ku

Esta banda de frecuencia se le fue asignada los servicios de radiodifusión directa por satélite en los años 70. Como se puede observar en la tabla 2 sus límites de frecuencia son: 12,75 – 13,25 GHz (frecuencia ascendente) y 10,7 – 10,95 GHz (frecuencia descendente).

Una ventaja de trabajar en banda Ku es que las frecuencias asignadas a los servicios que actúan en ella, no son compartidas por servicios terrestres.

La densidad de flujo de potencia se define como la potencia que atraviesa una unidad de área hipotética, es decir el flujo de potencia es uniforme en todas las direcciones.

Los desvanecimientos causados por el clima en los sistemas de radioenlaces, específicamente entre las frecuencias de 10 a 15 GHz, produce una disminución en las pérdidas en la línea de alimentación, lo cual también conlleva a reducir el límite admisible de densidad de flujo de potencia. (UIT, 1995)

Tabla 3.

Límites de densidad de flujo de potencia

Intervalos de frecuencia (GHz)	dB(W/m ²)		
	$\theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$
3-8	-152	-152 +0,5	-142
8-11,7	-150	-150 +0,5	-140
11,7-15,4	-148	-148 +0,5	-138
15,4-27,5	-115	-115 +0,5	-105

Adaptado de (UIT, 1995, p.6)

θ es el ángulo de llegada de onda radioeléctrica medido en grados sobre el horizonte. (UIT, 1995)

He ahí el por qué en lo que respecta a la densidad de flujo de potencia es más flexible que en banda C. Lo que permite tener antenas de recepción pequeñas, con diámetro de 40 a 80 cm, el cual también depende de la zona de cobertura del satélite.

Como desventaja en comparación con la banda C, existe mayor pérdida de propagación, por lo cual el P.I.R.E (potencia isotrópica radiada equivalente) debe ser mayor para obtener igual calidad de señal que en banda C. (Zamanillo, 2003)

1.2 Antena Parabólica

Este tipo de antenas se caracterizan por tener alta ganancia y directividad, son utilizadas en los enlaces de comunicaciones por radio y satélite.

Su diseño está conformado por un reflector, soportes, un alimentador o *feed* y un mástil que soporta todo el peso de la antena.

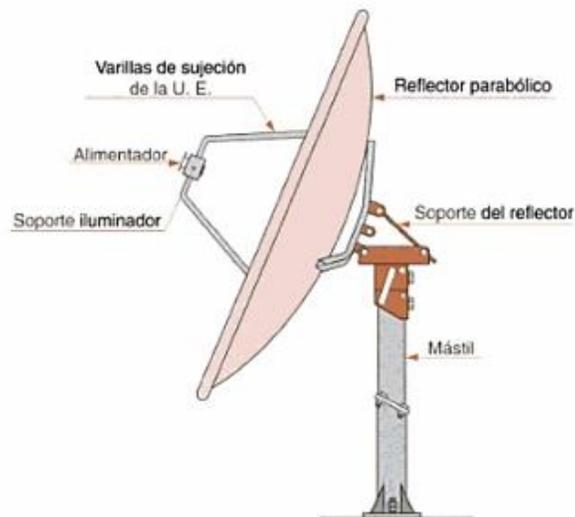


Figura 7. Elementos de antena parabólica

Tomado de (Ruiz, 1996)

El elemento principal de una antena parabólica es su reflector o conocido también como plato, su geometría es la de una parábola. Debido a esto, cualquier punto P está a la misma distancia de un punto f (foco) que de un punto D ubicado en la perpendicular de la directriz, es decir, la distancia Pf es igual a la distancia PD.

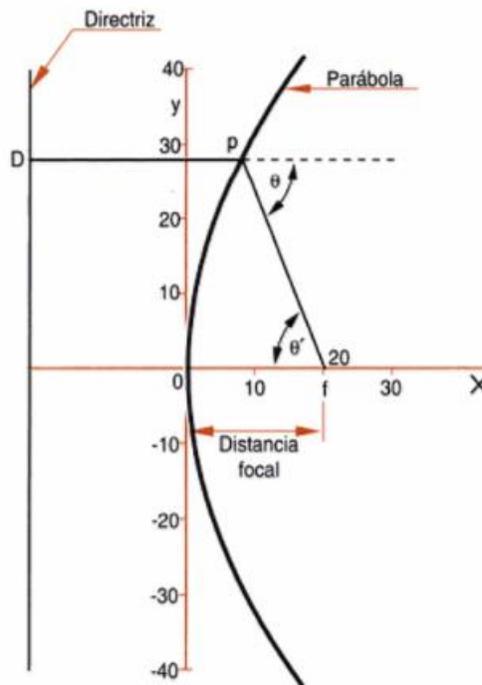


Figura 8. Geometría reflector parabólico

Tomado de (Ruiz, 1996)

Una característica de la parábola es que toda línea paralela al eje x que incida sobre un punto de ella, se desvía hacia el foco con un ángulo θ que geoméricamente es igual a θ' . Por lo cual, si se orienta a la antena hacia cualquier punto del espacio, las radiaciones provenientes de un satélite y que sean paralelas al eje x, se desviarán y se concentrarán en el punto focal. (Ruiz, 1996)

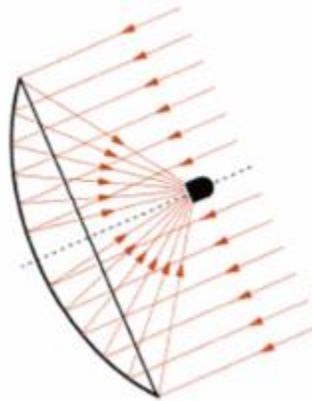


Figura 9. Perfil reflector parabólico

Tomado de (Ruiz, 1996)

Si se coloca una fuente en el foco de la parábola, esta irradiará energía electromagnética hacia el reflector, logrando que los rayos que se reflejen sobre el plato parabólico emergerán como un haz paralelo. A este tipo de configuración se la conoce como antena parabólica de transmisión.

Para las antenas parabólicas receptoras, su funcionamiento es el siguiente: Si una señal incide sobre el reflector de la antena, la radiación se enfocará en un punto conocido como foco. (Balanis, 2005)

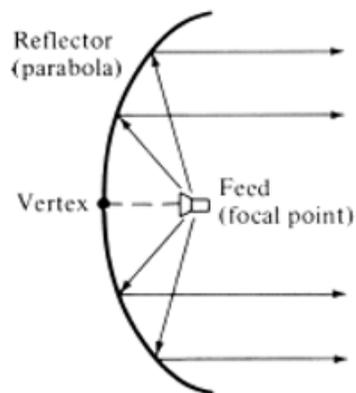


Figura 10. Funcionamiento reflector parabólico

Tomado de (Balanis, 2005)

1.2.1 Características técnicas

1.2.1.1 Diámetro del reflector

El diámetro del reflector para una antena parabólica depende del lugar geográfico en donde se ubica la antena, porque para captar la señal del satélite deseado se debe tomar en cuenta la zona de cobertura del mismo.

Mientras mayor sea el diámetro del reflector, mayor será la energía concentrada en su punto focal, lo cual asegura también mayor ganancia y mejor recepción.

Otro de los factores principales para definir el tamaño es la frecuencia en la que trabaja, en donde cuanto mayor sea, menor será el diámetro del reflector

En conclusión el factor principal para decidir el diámetro de la antena, además del precio y la influencia del viento sobre el reflector, debe ser el satélite, el cual cuenta con información y recomendaciones sobre el tamaño adecuado para el reflector. (Ruiz, 1996)

1.2.1.2 Ganancia

La ganancia depende de varios parámetros como el diámetro de plato, iluminación del alimentador y precisión de la superficie. En lo que se respecta al diámetro del plato debe ser grande en comparación con su profundidad.

Sobre la precisión de la superficie se refiere al grado de irregularidades superficiales que puede presentar el plato.

Y acerca de la iluminación del alimentador se refiere a como el alimentador irradia sobre la superficie del reflector. (Carr, 2001)

$$G = \frac{k \cdot (\pi \cdot D)^2}{\lambda^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

G: Ganancia.

D: Diámetro.

λ : Longitud de onda.

k : Eficiencia de la reflexión (0,4-0,7, con 0,55 siendo la más común)

1.2.1.3 Relación D/f y f/D

La relación entre el foco, diámetro y profundidad del reflector debe ser exacta, ya que, cualquier variación en alguno de estos tres parámetros afecta al rendimiento de la antena. El cociente entre D/f estrictamente está abarcado entre 2.3 y 2.7 para que la antena logre un alto rendimiento.

Cuando la relación D/f es baja se producen problemas de ruido y cuando ésta relación es alta se requiere alimentadores peculiares, todo esto sucede a causa de la escasa concavidad del plato. Para evitar estos problemas existen antenas parabólicas que muestran una relación inversa f/D el cual tiene valores entre 0.37 y 0.43.

1.2.1.4 Ancho de haz

El ancho del haz para un reflector parabólico puede determinarse aproximadamente a partir de la siguiente ecuación:

$$\theta \cong \frac{22,5}{d \cdot f} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

θ : Ancho de haz de 1/2 potencia en grados

d: Diámetro de la antena en metros

f: Frecuencia en GHz

El ancho de haz de 1/2 potencia, algunas veces llamada también como “3 dB de ancho de haz” se refiere a que la potencia está 3 dB por debajo del valor de ganancia del eje de puntería.

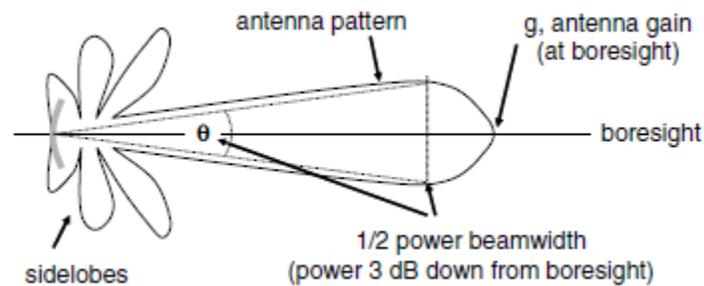


Figura 11. Ancho de haz

Tomado de (Balanis, 2005)

En la figura 11, se puede observar el típico patrón de radiación para una antena parabólica junto con varios parámetros utilizados para definir el rendimiento de la antena.

1.2.1.5 Relación señal/ruido

En un sistema de comunicaciones, una señal que no contiene información es llamada ruido. El cociente entre la señal de datos y la señal de ruido es llamado relación S/N. Este valor es expresado en decibelios, mientras mayor sea el valor, mejor es la comunicación. (Ruiz, 1996)

1.2.1.6 Polarización en antenas parabólicas

El fenómeno que ocurre al recibir una onda electromagnética enviada desde un satélite con polarización lineal vertical, es el siguiente:

Al recibir la señal en el reflector, el campo eléctrico reflejado se descompone en dos elementos de polarización en los ejes x – y. Conocidos como:

- Componente Co-Polar: Representa la polarización deseada (va en la dirección de propagación)
- Componente Contra-Polar: Conocida como polarización cruzada que representa al elemento ortogonal de la polarización deseada.

Como se observa en la figura 12, la componente del eje y coincide con la polarización del satélite (co-polarización), mientras que la componente presente en el eje x sería la polarización cruzada. (Balanis, 2005)

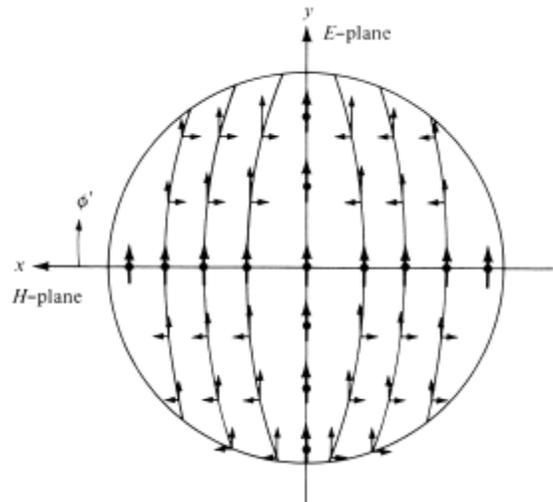


Figura 12. Polarización en reflector parabólico

Tomado de (Balanis, 2005)

1.2.1.7 Polarización Cruzada

Este subcomponente de la polarización en antenas es conocido como polarización parásita. En otros términos, en un sistema vectorial, la polarización de referencia sería un vector unitario con una determinada dirección, mientras que la polarización cruzada es otro vector cuya dirección es contraria u ortogonal a la del vector de polarización de referencia. (Ludwig, 1973)

En procesos de comunicación, la polarización ortogonal es utilizada para que dos señales a la misma frecuencia compartan un mismo canal y sean diferenciadas por el tipo de polarización. Pero también esto tiene consecuencias como:

- Bajo nivel de señal
- Interferencia de canal
- Aumento en los niveles de los lóbulos laterales de la señal

Respecto a la polarización en antenas, se considera a esta polarización como campos anti simétricos en la apertura y por lo tanto no contribuye a la radiación de la misma. (Ludwig, 1973)

1.2.2 Tipos de antenas parabólicas

Las antenas parabólicas se clasifican según la forma y cantidad del reflector, de la siguiente manera:

1.2.2.1 Según la forma del reflector

1.2.2.1.1 Cilindro parabólico

Utilizada en aplicaciones de radar, la energía de esta antena se colima en una línea paralela al eje del cilindro a través del punto focal del reflector, el tipo de alimentación para este tipo de antena es un dipolo lineal o una guía de ondas ranuradas.

En comparación con una antena paraboloide, tiene las siguientes características:

- Su estructura es simple, por lo cual facilita su construcción.
- Brinda un mayor bloqueo de apertura.
- En la región focal se coloca una fuente lineal para el cilindro parabólico, mientras que para un paraboloide se utiliza una fuente puntual.
- El alimentador al estar linealmente polarizado, es decir, el campo eléctrico se encuentra paralelo al eje del cilindro, por lo cual no se produce componentes de polarización cruzada. (Balanis, 2005)

1.2.2.1.2 Paraboloide de revolución

Se forma girando la parábola alrededor de su propio eje. La superficie debe ser un paraboloide de revolución para que los rayos provenientes del foco se transforman en ondas planas. El tipo de alimentador que se utiliza es el *feed* piramidal o cónico. Su diseño se base en técnicas ópticas. (Balanis, 2005)

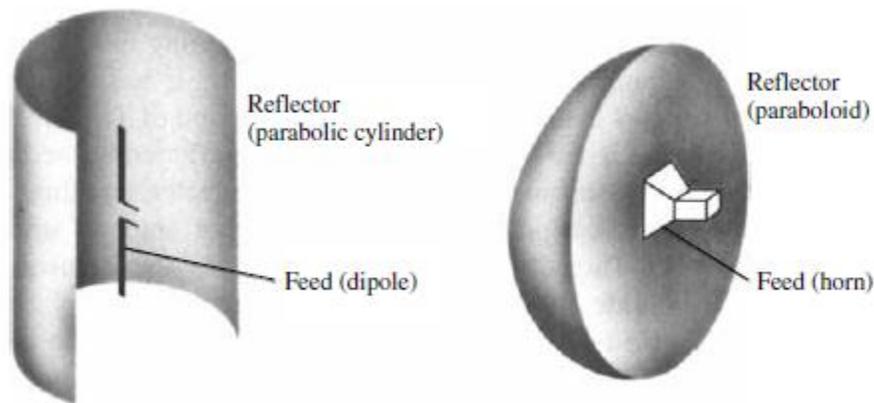


Figura 13. Antena parabólica según la forma del reflector

Tomado de (Balanis, 2005)

1.2.2.2 Según el número de reflectores

1.2.2.2.1 Simple

1.2.2.2.1.1 Antena *Prime Focus*

Se conoce a estas antenas como alimentación frontal o foco centrado debido a que el transmisor/receptor es colocado en el punto focal de la parábola.

La antena *prime focus* al poseer una superficie parabólica permite que una señal se refleje en su superficie para luego concentrarse en el punto focal (lugar donde se encuentra el alimentador). Los rayos reflejados por el reflector parabólico surgirán en forma de un haz paralelo, de esta manera se obtendrá mayor direccionalidad. (Erazo, 1998)

Una de sus desventajas es que la línea de transmisión del *feed* por lo general es larga y se coloca detrás o debajo del reflector, esto ocasiona pérdidas que en algunas aplicaciones como en sistemas receptores de bajo ruido no so toleradas. (Balanis, 2005)

Otro inconveniente que presenta la antena *prime focus*, surge por la sombra que se genera debido al alimentador y los soportes del mismos. Por esta razón el

rendimiento de la antena es del 60% y aumenta la intensidad de los lóbulos laterales. (Ruiz, 1996)

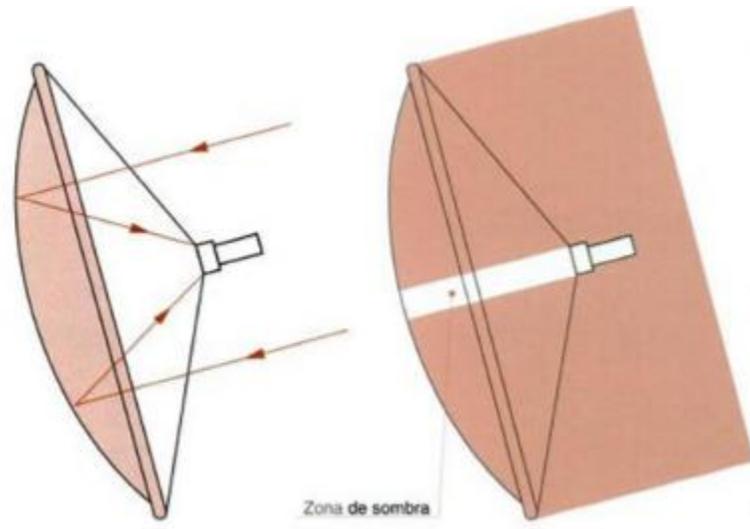


Figura 14. Zona de Sombra

Tomado de (Ruiz, 1996)

1.2.2.2.1.2 Antena Offset

Denominada también como antena de foco descentrado, son las más populares en el mercado de recepción de señal de TV porque su construcción es de bajo costo y con un tamaño reducido en comparación de los otros tipos de antenas parabólicas. Teóricamente, este tipo de antenas alcanzan un rendimiento de 80%. (Millán, 2014)



Figura 15. Antena Offset

Tomado de (TDT, 2017)

La antena *offset* proviene de la sección de una parábola por lo cual tiene el mismo funcionamiento que la antena de foco centrado. Toda la señal que incide sobre el reflector se concentrará en el foco, con la diferencia que este se encuentra desplazado y no se ubica en el centro. (Ruiz, 1996)

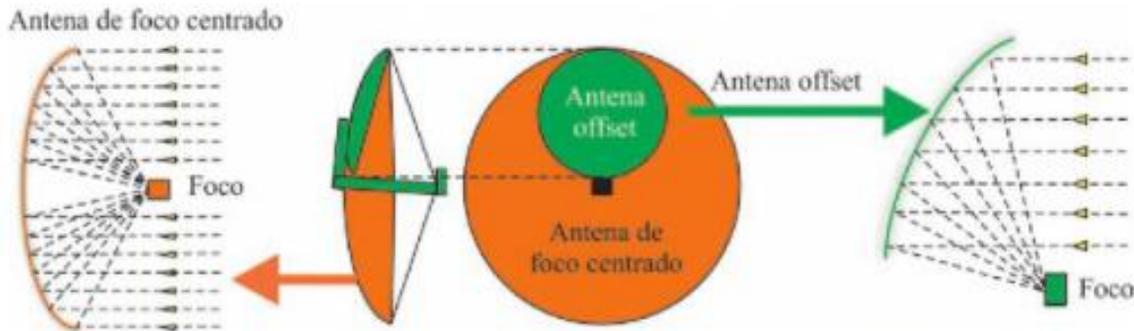


Figura 16. Construcción antena *offset*

Tomado de (Millán, 2014)

Se utiliza este tipo de antenas porque suprimen algunos problemas que presentan las antenas *prime focus*, como:

- Pérdidas por bloqueo.
- Lóbulos laterales.
- Permiten la colocación de múltiples alimentadores.

A continuación se detallarán los componentes de este tipo de antena.

1.2.2.2.1.2.1 Reflector

Para obtener el reflector de una antena *offset* se fraccionará a una parábola transversalmente. Como se puede observar en la figura 17, se parte de un reflector *prime focus* visto de frente, donde la zona pintada será una antena *offset*, cuyo foco quedará fuera del vértice. (Ruiz, 1996)

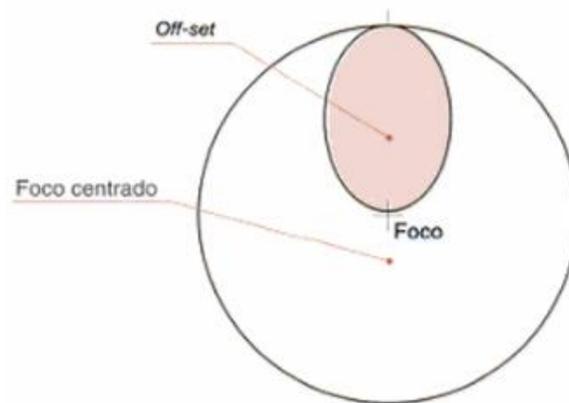


Figura 17. Superficie del reflector *offset*

Tomado de (Ruiz, 1996)

1.2.2.2.1.2.2 Brazo

Este tipo de antena para poder sostener el alimentador cuenta con un brazo situado debajo del reflector. De esta manera se evita el efecto de sombra causado por la unidad exterior y los soportes en el plato, como ocurre en la antena de foco centrado.

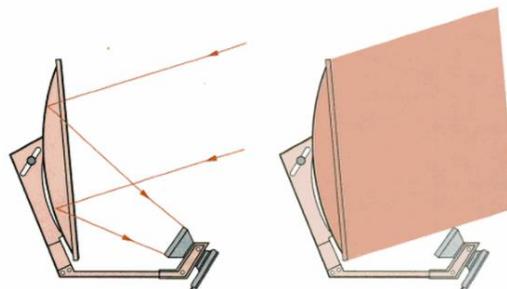


Figura 18. Eliminación efecto de sombra

Tomado de (Ruiz, 1996)

1.2.2.2.1.2.3 Unidad exterior

Conocida por sus siglas *LNB* (*Low Noise Block*) su función es elegir una de las bandas y polaridades del satélite para convertirla en frecuencia intermedia (950 –

2150 MHz). De esta manera se distribuye la señal por el cable hacia la red de distribución. (Millán, 2014)

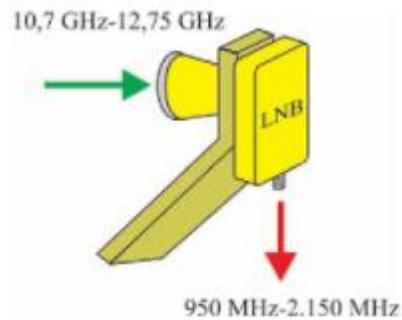


Figura 19. LNB

Tomado de (Millán, 2014)

La unidad exterior consta de los siguientes elementos:

- Alimentador.- Recoge la señal concentrada en el reflector.
- Dispositivos de polarización.- Rechazan la polarización no deseada. Se encuentran a la salida del alimentador y antes del conversor de la antena.
- Conversor *LNB*.- Recogen la señal que proviene de la antena, la amplifican y la convierten en frecuencia intermedia.

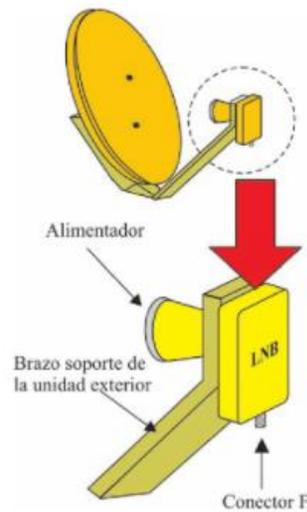


Figura 20. Elementos LNB

Tomado de (Millán, 2014)

1.2.2.2.2 Doble reflector

1.2.2.2.2.1 Antena *Cassegrain*

Un famoso astrónomo de nombre *Cassegrain* a través del estudio de la óptica geométrica demostró que los rayos paralelos incidentes se pueden enfocar en un punto utilizando dos reflectores. Para ello, el reflector principal debe ser una parábola, mientras que el segundo reflector o reflector secundario será una hipérbola, la ubicación del alimentador estará a lo largo del eje de la parábola.

El concepto de telescopios ópticos fue la base para diseñar sistemas de radiofrecuencia. De esta manera el equipo de transmisión/recepción puede colocarse detrás del reflector principal, eliminando el inconveniente de las antenas de foco central y presentando una eficiencia del 65 al 80%. (Balanis, 2005)

A su vez esta clasificación se subdivide en:

1.2.2.2.1.1 Cassegrain Clásica

Al tener su base de diseño en el telescopio *Cassegrain*, cuentan con las siguientes características:

- El reflector principal debe ser grande y cóncavo (paraboloide).
 - El reflector secundario debe ser más pequeño y convexo (hiperboloide).
- (Bava, 2013)



Figura 21. Antena Cassegrain clásica

Tomado de (Balanis, 2005)

La función del reflector principal es irradiar la onda electromagnética incidente hacia el subreflector, este refleja la onda hacia el centro del reflector principal donde se encuentra ubicado el alimentador.

Entre las principales ventajas se encuentran:

- Presenta gran directividad, elevada potencia en transmisión y receptor de bajo ruido. (Huidrobo, 2013)
- La antena *Cassegrain* permite colocar el alimentador cerca del vértice del reflector, de esta manera, se acorta la distancia de la línea de transmisión.
- En comparación con los reflectores simples, en configuración de recepción la antena *Cassegrain* capta menos ruido del espacio circundante. Esto se debe a que los lóbulos de spillover del alimentador se dirigen hacia el cielo, en lugar de apuntar a la tierra, como es el caso del reflector simple. (Bava, 2013)
- Tiene una eficiencia mayor que las antenas de un solo reflector, alrededor del 70% o más. (Pérez C. , 2008)
- En el caso de utilizar la antena *Cassegrain* como antena receptora, se debe considerar que el preamplificador debe situarse lo más cerca a la antena para evitar pérdidas. (Antonio, 2008)

El inconveniente que presenta la configuración *Cassegrain* es el bloqueo que produce el subreflector, ya que produce sombra en el reflector principal. De esta manera se produce una reducción en la ganancia y aumento en los niveles de los lóbulos laterales. (Balanis, 2005)

1.2.2.2.1.2 Cassegrain Offset

Al igual que la configuración *offset*, *Cassegrain offset* disminuye el problema de bloqueo presente en las antenas mencionadas anteriormente. Además poseen bajo nivel de lóbulo lateral, buena polarización y alta eficiencia. (Pérez C. , 2005)

Está formada por un reflector principal con forma de sector parabólico, su reflector secundario tiene forma de sector hiperbólico y cuenta con un alimentador.

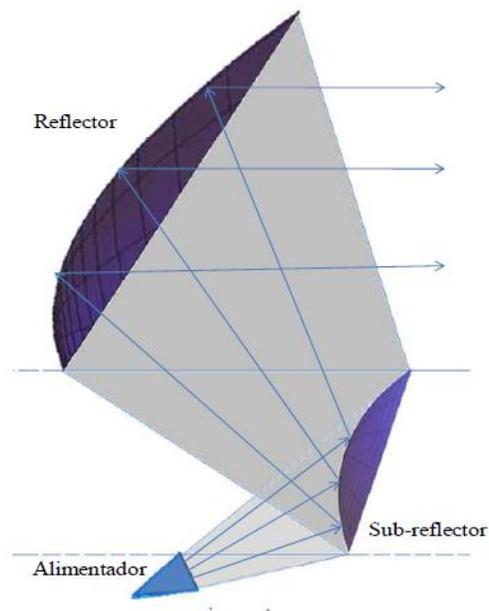


Figura 22. Antena Cassegrain Offset

Tomado de (Lemoine, 2010)

Este tipo de antena es un caso especial, en el cual, el eje focal del reflector principal se encuentra desplazado del eje de simetría, al igual que el foco primario del subreflector. (Lemoine, 2010)

1.2.2.2.2 Antena Gregorian

La antena *Gregorian* al igual que la antena *Cassegrain* cuenta con un reflector principal, alimentador y un subreflector que varía en su forma, este es un elipsoide que suele presentar la parte cóncava.



Figura 23. Antena Gregorian

Tomado de (DigiSat, 2017)

Las aplicaciones para este tipo de antenas van desde comunicaciones espaciales, radioastronomía y comunicaciones terrestres.

Presenta el problema de bloqueo por parte del subreflector, por lo que la antena *Gregorian* también cuenta con su versión tipo *offset*.

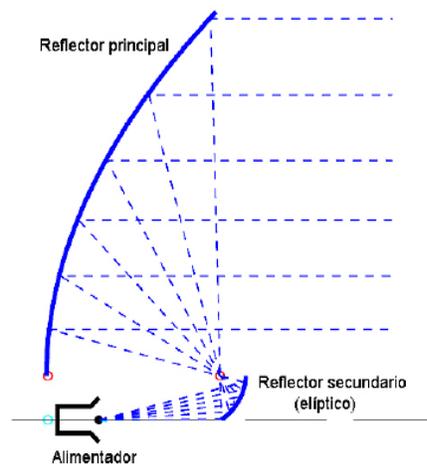


Figura 24. Antena Gregorian Offset

Tomado de (Zamanillo, 2003)

1.3 Software de simulación

En la actualidad el *software* de simulación se ha convertido en una herramienta bastante útil en el diseño y análisis de sistemas de comunicación y en común de cualquier sistema electrónico que se desee construir físicamente.

El diseño de antenas en las comunicaciones inalámbricas es una tarea que comúnmente demanda simulación, esto con el fin de conseguir características deseadas como patrón de radiación, directividad, ganancia, respuesta en frecuencia, la impedancia, etc.

En el mercado se presentan *software* para diseño y análisis de antenas los cuales son completos como lo es el caso *SuperNec*, *CST Microwave Studio*, *Antenna Magus*, etc. y que son los más utilizados en proyectos académicos e industriales.

Existen varios programas dedicados a la simulación de antenas que facilitan toda la información sobre el modelo acorde a la necesidad que se tiene para un proyecto en particular.

A la hora de decidir qué antena utilizar en una estación, se debe tomar en cuenta sus características en la ganancia, propagación y dimensiones.

Para el presente proyecto se utilizará el siguiente *software*:

1.3.1 General Reflector Antennas Software Package

Grasp es un *software* desarrollado por la empresa *Ticra*, su objetivo es complementar el modelado de antenas reflectoras de manera precisa.

Entre sus principales tareas se encuentran:

- Definición de geometrías de reflector único y doble mediante asistentes incorporados.
- Soporte para varias formas y materiales de reflector.
- Cálculos de campo cercano y campo lejano de campos vectoriales.
- Definiciones de alimentación matemática y numérica (medida).

A través de los parámetros como: frecuencia, medidas del reflector principal, distancia focal, etc. se puede diseñar cualquier tipo de sistema simple o dual y hasta utilizar arreglos de antenas.

La ventaja que posee esta herramienta es que nos presenta el diseño en 3D y además se puede realizar simulaciones para observar la representación cartesiana de la polarización, ganancia del sistema, relación S/N, etc. para su posterior análisis. (TICRA, 2015)

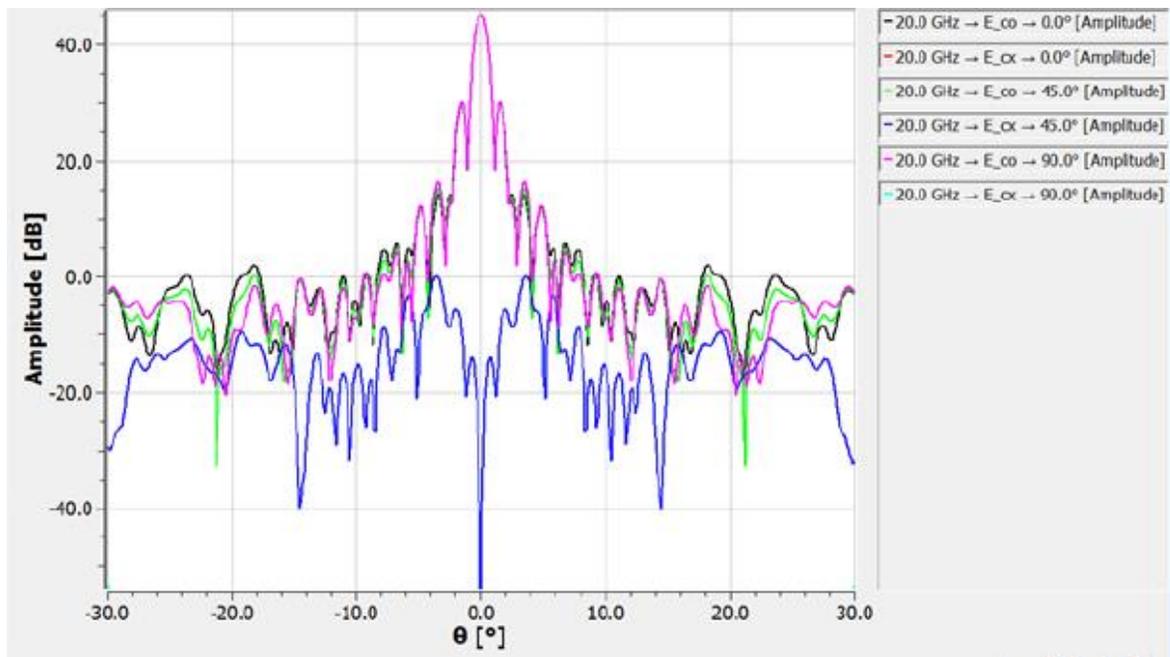


Figura 25. Representación cartesiana de polarización en Grasp

Tomado de (TICRA, 2015)

2 Capítulo II. Diseño para la conversión de antenas

Este proyecto se basó en la investigación de *Granet, Mizugutch y Brown*, en estas publicaciones se presentan el modelo y cálculos de una antena *Cassegrain offset* que elimina la polarización cruzada.

El esquema base es el siguiente:

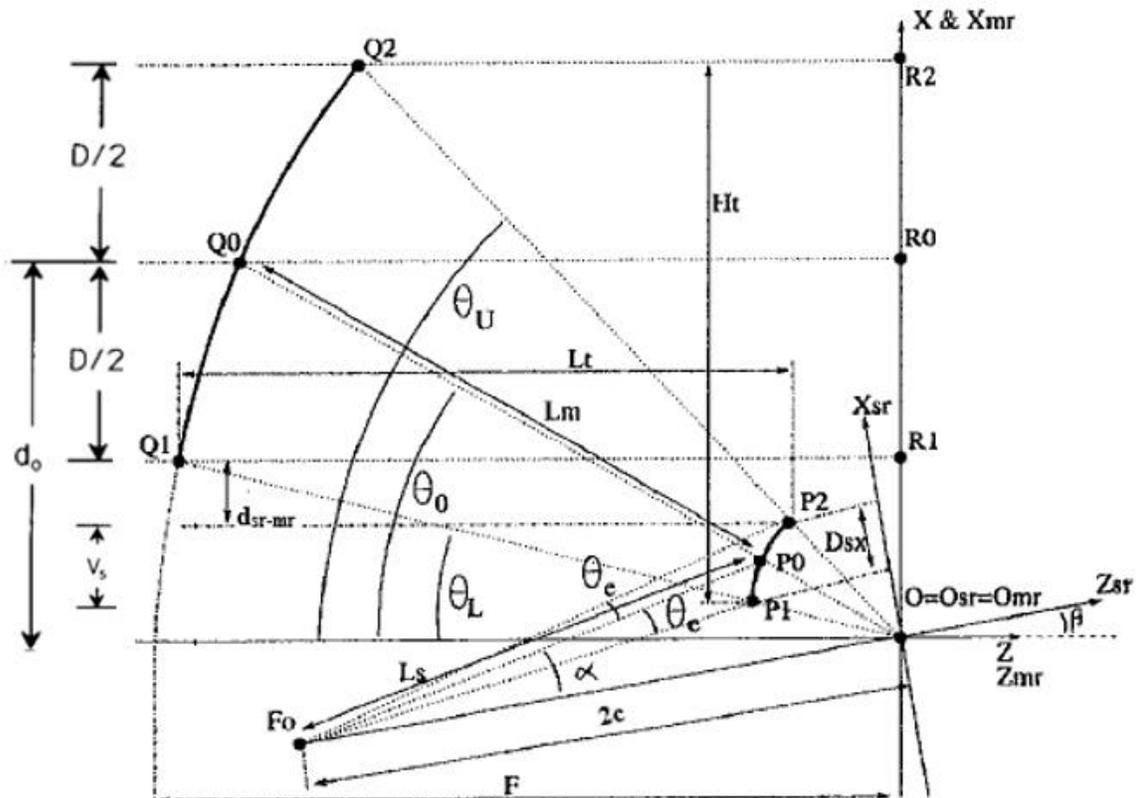


Figura 26. Diseño antena *Cassegrain offset*

Tomado de (Granet, 2002)

Donde:

- D_m : Diámetro de la apertura del reflector principal cuando está proyectado sobre el plano XY
- F : Longitud focal del reflector principal
- θ_0 : Ángulo *offset* del reflector principal

- θ_U : Ángulo *offset* de la parte superior del reflector principal
- θ_L : Ángulo *offset* del fondo del subreflector
- β : Ángulo de inclinación entre el subreflector de la coordenada el eje Z_{sr} y la coordenada del eje Z_{mr} del reflector principal
- θ_e : Ángulo entre el eje Z_f y el borde del subreflector
- e : Excentricidad del subreflector
- a : Superficie del subreflector
- f : Mitad de la distancia interfocal
- D_{sx} : Eje mayor de la apertura elíptica del subreflector tomado paralelamente al eje X_{sr}
- D_{sy} : Eje mayor de la apertura elíptica del subreflector tomado paralelamente al eje Y_{sr}
- A : Ángulo de inclinación entre la coordenada del eje Z_{sr} del subreflector y el alimentador de la coordenada del eje Z_f
- L_s : Distancia entre el punto focal F_0 y el punto P_0 sobre el subreflector (distancia entre el alimentador y el subreflector)
- L_m : Distancia entre el punto P_0 del subreflector y el punto Q_0 sobre el reflector principal (distancia entre el subreflector y el reflector principal)
- d_{sr-mr} : Distancia mínima vertical entre los bordes del subreflector (P_1, P_2) y el borde del reflector principal (Q_1)
- L_t : Máxima longitud (a lo largo del eje X) de la combinación de los dos reflectores
- H_t : Máxima longitud vertical (a lo largo del eje Z) de la combinación de los dos reflectores
- C_{sr} : Punto expresado en la coordenada del sistema del subreflector, definiendo el centro de apertura elíptica del subreflector.
- D : Diámetro del paraboloide.
- V_s : Altura proyectada del subreflector.
- d_o : Distancia *offset*, medida desde el punto P_0 hasta el centro del plano XZ de la parábola. (Granet, 2002)

Para la eliminación de la polarización cruzada se debe considerar la posición exacta del subreflector y el alimentador, por esta razón se utiliza las siguientes condiciones de diseño.

2.1 Condiciones de Diseño

2.1.1 Condición de *Mizugutch*

El efecto de polarización cruzada puede ser cancelado a través del uso de otro reflector asimétrico, siempre y cuando su ubicación frente al radiador primario, sea la adecuada. Para lograr este requerimiento, *Mizugutch* planteó la siguiente condición:

$$\tan(\alpha) = \frac{|1 - e^2| \cdot \text{Sen}(\beta)}{[(1 + e^2) \cdot \text{Cos}(\beta)] - 2e} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

α : Ángulo entre el eje del alimentador y el eje del subreflector.

β : Ángulo entre el eje del subreflector y el reflector principal.

e : excentricidad del subreflector. (Mizugutch, 1976)

Esta ecuación desde el punto de vista de la geometría óptica, establece la orientación del alimentador y también coincide con el eje del paraboloide equivalente. (Brown, 1994)

En el caso de tener un diseño que no cumpla con esta condición, el parámetro de polarización cruzada tiende a elevarse.

2.1.2 Condición de *Rusch*

Esta condición minimiza las pérdidas de propagación, esto se debe al alineamiento entre el eje del paraboloide equivalente y el centro angular del subreflector.

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) = \left(\frac{e-1}{e+1}\right)^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{\beta-\theta_0}{2}\right)\right] \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

θ_0 : Ángulo *offset* del reflector principal

β : Ángulo entre el eje del subreflector y el reflector principal.

e: excentricidad del subreflector

Al realizar la conversión de antenas, se está tomando parte de la estructura de una antena *offset* para luego añadirle un subreflector. Para lograr esto, se enseñará la geometría de la parábola e hipérbola, ya que a través de la segmentación de las mismas se obtendrá la forma del reflector y subreflector junto con los diferentes parámetros de la antena *Cassegrain* que sirven para la ubicación de sus elementos.

Esto fue realizado con dos programas, el primero es el *software GeoGebra*, el cual, es un procesador geométrico y matemático que realiza desde cálculos básicos como el perímetro de un cuadrado hasta dibujar figuras cónicas con la ayuda de sus respectivas fórmulas. Una vez obtenido el primer boceto de la antena, se la dibujará en *AutoCAD* para proceder con el diseño del subreflector en 3D.

A continuación se detallará el proceso de obtención de la antena *Cassegrain offset*.

2.2 Datos Iniciales

A partir de los requerimientos de diseño y con el objetivo de cumplir con dos condiciones detalladas anteriormente, tres datos iniciales (V_s , d_0 y β) han sido aproximados de acuerdo al diseño final que se quiere obtener con la conversión de la antena, los cuales pueden variar muy poco o mantenerse cuando sean graficados en el *software GeoGebra*.

Para iniciar con el procedimiento de diseño se necesitan al menos los siguientes parámetros de entrada D , V_s , d_0 , σ y β .

Donde:

D: Diámetro del paraboloide

Vs: Altura proyectada del subreflector

d_0 : Distancia *offset*, medida desde el punto P0 hasta el centro del plano XZ de la parábola

σ : es una variable fija a -1 para antenas *Cassegrain* y +1 para antenas *Gregorian*.

β : Ángulo que se encuentra entre los ejes XZ del paraboloide y los ejes XZ del hiperboloide.

Para hallar el diámetro del reflector principal (D), se partió de la ecuación de la parábola con el propósito de graficarla en el plano XZ y de allí proceder a medir el diámetro de apertura formado por el paraboloide.

Los valores asignados para Vs, d_0 y β se obtuvieron de la siguiente forma:

- Para Vs se desea tener una altura proyectada del subreflector aproximado a 10 cm.
- Para β se considera que el valor debe cumplir con la condición de *Mizugutch*, entonces de acuerdo a la geometría del plato este debe cumplir con $\beta \leq 4,4^\circ$. Se eligió trabajar con el valor $4,4^\circ$.
- Para d_0 se debe contemplar que éste abarca otros parámetros de diseño que son:
 - La distancia proyectada entre el punto Q0 y Q1 (29 cm)
 - Vs (10 cm aprox.)
 - d_{sr-mr} (10 cm aprox.)
 - La distancia entre Vs y el eje z de la parábola (2 cm aprox.)

Por las razones antes descritas se escoge un valor aproximado a 51 cm

Tabla 4.

Datos de diseño inicial

Datos de entrada	Valor
D	55,05 cm
V _s	10 cm
d _o	51 cm
σ	-1 (para antenas <i>Cassegrain</i>)
β	4,4°

2.3 Cálculos

1. Distancia Focal

Para el cálculo de la distancia focal se necesita de los siguientes datos:

Tabla 5.

Datos de Antena Offset

Datos de Antena	Valor (cm)
Ancho	60,8
Alto	65,5
Profundidad	5,6

$$F = \frac{\text{ancho}^3}{16 \cdot \text{profundidad} \cdot \text{alto}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$F = \frac{60,8^3}{16 \cdot 5,6 \cdot 65,6}$$

$$F = 38,2 \text{ cm}$$

2. Para hallar los puntos que determinan el centro, borde inferior y borde superior tanto del paraboloide como del hiperboloide, se necesita calcular tres ángulos anti horarios que parten del foco.

a. Ángulo θ_L que va desde el eje Z de la parábola hasta el punto Q1.

$$\theta_L = -2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_0 - \frac{D}{2}}{2 \cdot F} \right) \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\theta_L = -2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{51 - \frac{55,05}{2}}{2 \cdot 38,2} \right)$$

$$\theta_L = -32,08^\circ$$

b. Ángulo θ_O que va desde el eje z de la parábola hasta el punto Q0.

$$\theta_O = -2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_0}{2 \cdot F} \right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\theta_O = -2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{51}{2 \cdot 38,2} \right)$$

$$\theta_O = -68,2^\circ$$

c. Ángulo θ_U que va desde el eje Z de la parábola hasta el punto Q2.

$$\theta_U = -2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_0 + \frac{D}{2}}{2 \cdot F} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\theta_U = -2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{51 + \frac{55,05}{2}}{2 \cdot 38,2} \right)$$

$$\theta_U = -90,46^\circ$$

3. Para el cálculo de la excentricidad, se aplica la siguiente fórmula.

$$e = \frac{1 - \left(\sigma \cdot \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sqrt{\tan\left(\frac{\beta - \theta_0}{2}\right)}} \right)}{1 + \left(\sigma \cdot \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sqrt{\tan\left(\frac{\beta - \theta_0}{2}\right)}} \right)} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$e = \frac{1 + \frac{\tan\left(\frac{4,4}{2}\right)}{\sqrt{\tan\left(\frac{4,4 + 68,2}{2}\right)}}}{1 - \frac{\tan\left(\frac{4,4}{2}\right)}{\sqrt{\tan\left(\frac{4,4 + 68,2}{2}\right)}}}$$

$$e = 1,5$$

4. El ángulo α es necesario para determinar el apuntamiento del *feed* hacia el subreflector, el cual además coincide con el punto medio (P0) del hiperboloide, también se lo define como el ángulo entre el eje Z del alimentador y el eje Z del subreflector.

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left[\left(\frac{e + 1}{e - 1} \right) \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left[\left(\frac{1,5 + 1}{1,5 - 1} \right) \cdot \tan\left(\frac{4,4}{2}\right) \right]$$

$$\alpha = 22^\circ$$

5. Calcular c que es la mitad de la distancia entre los dos focos de una hipérbola, en este caso representa la mitad de la distancia entre el foco del alimentador (*feed*) y el foco del paraboloide.

$$c = \frac{-\sigma \cdot e \cdot V_s}{(e^2 - 1) \cdot \left(\frac{\text{sen}(\theta_L)}{(e \cdot \cos(\theta_L - \beta)) + 1} - \frac{\text{sen}(\theta_U)}{(e \cdot \cos(\theta_U - \beta)) + 1} \right)} \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$c = \frac{1,5 \cdot 10}{(1,5^2 - 1) \cdot \left(\frac{\text{sen}(-32,08^\circ)}{(1,5 \cdot \cos(-32,08^\circ - 4,4)) + 1} - \frac{\text{sen}(-90,46)}{(1,5 \cdot \cos(-90,46 - 4,4)) + 1} \right)}$$

$$c = 8,6 \text{ cm}$$

6. Calcular d_{sr-mr} (*clearance*) que es la distancia entre el borde inferior del reflector principal y el borde superior del subreflector.

$$d_{sr-mr} = d_0 - \frac{D}{2} + \left(\frac{c}{e} \right) \cdot \frac{(e^2 - 1) \cdot \text{sen}(\theta_U)}{(e \cdot \cos(\theta_U - \beta)) + 1} - \left(\frac{\sigma + 1}{2} \right) \cdot V_s \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$d_{sr-mr} = 51,73 - \frac{55,05}{2} + \left(\frac{8,6}{1,5} \right) \cdot \frac{(1,5^2 - 1) \cdot \text{sen}(-90,46)}{(1,5 \cdot \cos(-90,46 - 4,4)) + 1} - \left(\frac{-1 + 1}{2} \right)$$

$$d_{sr-mr} = 10,5 \text{ cm}$$

7. Calcular θ_e que es el ángulo de borde del subreflector.

$$\theta_e = -\sigma \cdot \left\{ 2 \cdot \tan^{-1} \left[\left(\frac{1-e}{1+e} \right) \cdot \tan \left(\frac{\theta_U - \beta}{2} \right) \right] - \alpha \right\} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$\theta_e = \left\{ 2 \cdot \tan^{-1} \left[\left(\frac{1-1,5}{1+1,5} \right) \cdot \tan \left(\frac{-90,46 - 4,4}{2} \right) \right] - 22 \right\}$$

$$\theta_e = 12^\circ$$

8. Calcular el ángulo de intersección θ

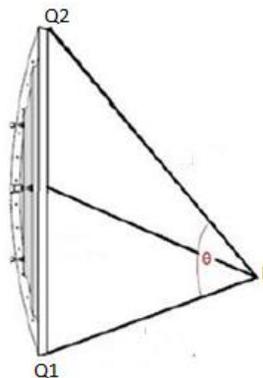


Figura 27. Parámetros ángulo θ

Adaptado de (Andrade, 2012)

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(\overline{Q1F})^2 + (\overline{Q2F})^2 - (\text{alto})^2}{2 \cdot \overline{Q1F} \cdot \overline{Q2F}} \right) \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(38,97)^2 + (69,44)^2 - (65,6)^2}{2 \cdot 38,97 \cdot 69,44} \right)$$

$$\theta = 68,07^\circ$$

9. Calcular F/D

$$F/D = \left(\frac{1}{4 \cdot \tan \left(\frac{0,5 \cdot \theta}{2} \right)} \right) \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$F/D = \left(\frac{1}{4 \cdot \tan \left(\frac{0,5 \cdot 68,07}{2} \right)} \right)$$

$$F/D = 0,816$$

2.3.1 Resumen de Cálculos

En la siguiente tabla constan los resultados obtenidos para el diseño de la antena.

Tabla 6.

Datos Técnicos Cassegrain offset

Características	Resultados
Ancho	60,8 cm
Alto	65,5 cm
Profundidad	5,6 cm
Foco (Distancia Focal)	38,2 cm
θ_L	-32,08°
θ_0	-68,2°
θ_U	-90,46°
e	1,5
α	22°
c	8,6 cm
d_{sr-mr}	10,5 cm
θ_e	12°
θ	68,07°
F/D	0,816

2.4 Geometría del reflector principal

El reflector principal de este tipo de antena, es un segmento de un paraboloide, para encontrar este segmento se va a proceder a localizar todos los elementos que conforman a una parábola.

Una parábola está formada por un conjunto de puntos en un plano que están a la misma distancia de una recta fija llamada directriz y un punto fijo llamado foco.

Sus elementos son:

- Foco: punto fijo F , el cual determina hacia donde abre la parábola.
- Directriz: es la recta perpendicular al plano el cual pasa por el punto A
- Vértice: es el punto medio entre el foco y la directriz V

- Distancia focal: es la distancia desde el vértice hacia el foco, se denomina *distancia focal* $= |\overline{VF}|$
- Lado recto: es una recta perpendicular al plano que pasa por el foco, la cual define la apertura de la parábola por ello es también llamado ancho focal $LR1 = 4 * |\overline{VF}|$

Se trabaja en los ejes principales de la aplicación, los cuales por defecto no hace falta dibujar.

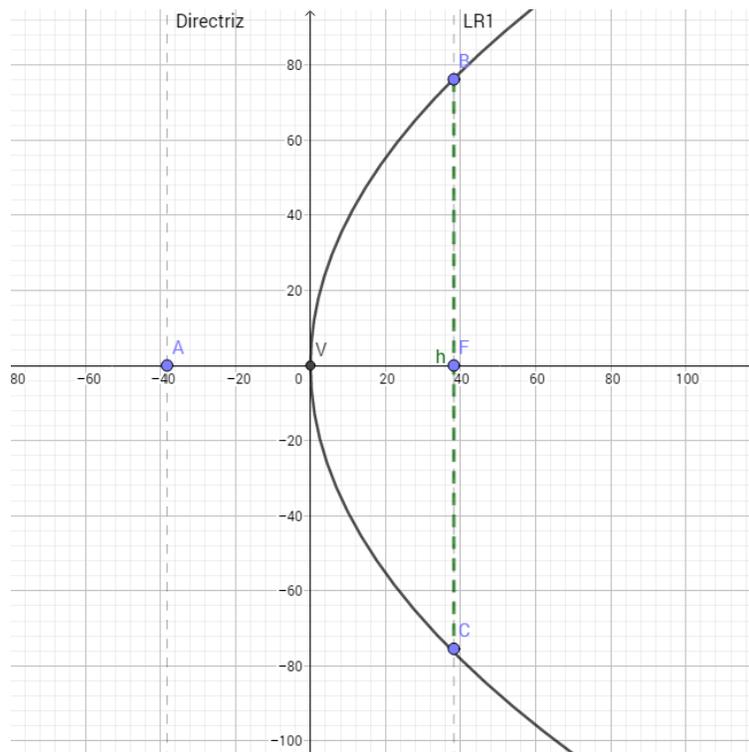


Figura 28. Parábola en GeoGebra

De acuerdo a la ubicación del foco, éste indica que la parábola se abre hacia la derecha por lo tanto se puede definir la siguiente ecuación:

$$y^2 = 4 \cdot p \cdot x \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

p : Distancia focal.

La ecuación ayudará a encontrar el conjunto de puntos que forman a la parábola.

Para encontrar el paraboloides que forma el reflector principal se utilizó los siguientes datos:

Tabla 7.

Datos del reflector principal

Datos	Resultado
θ_0	-68.21°
θ_U	-90.46°
θ_L	-32.08°
Foco	38.2 cm
d_{sr-mr} (<i>clearance</i>)	10.5 cm

A través de los ángulos $\theta_0, \theta_U, \theta_L$ se obtuvo los siguientes puntos:

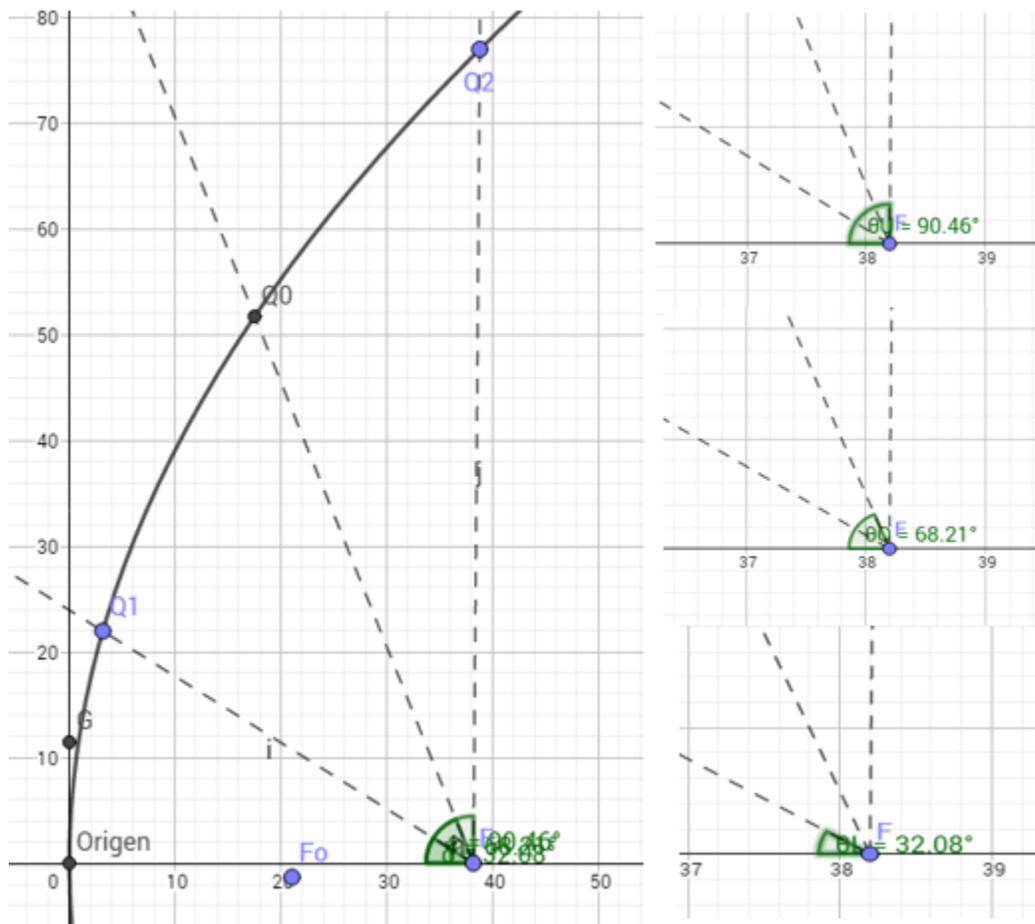


Figura 29. Puntos del paraboloido

Tabla 8.

Puntos paraboloido

Puntos	Eje X	Eje Z
Q2	38.81	77.01
Q0	17.52	51.73
Q1	3.16	21.96

2.5 Geometría del subreflector

La antena *offset* tipo *Cassegrain* utiliza un subreflector hiperboloide, es decir es un segmento de una hipérbola.

Una hipérbola es el lugar geométrico de un conjunto de puntos en el cual la diferencia de sus distancias a dos puntos fijos llamados focos es constante.0

Los elementos que forman parte de una hipérbola son:

- Focos: son los puntos fijos F1 y F2
- Vértices: son los puntos de intersección de la hipérbola con el eje focal V1 y V2
- Centro: punto de intersección de los ejes O
- a: semieje real
- b: semieje imaginario
- c: es la mitad de la distancia entre los focos de la hipérbola
- Asíntotas: son las rectas de ecuaciones

$$y = \pm \left(\frac{b}{a}\right) x \quad (\text{Ecuación 24})$$

Para hallar todos los parámetros antes descritos, se trabaja en el eje Xsr y Zsr, como se observa a continuación.

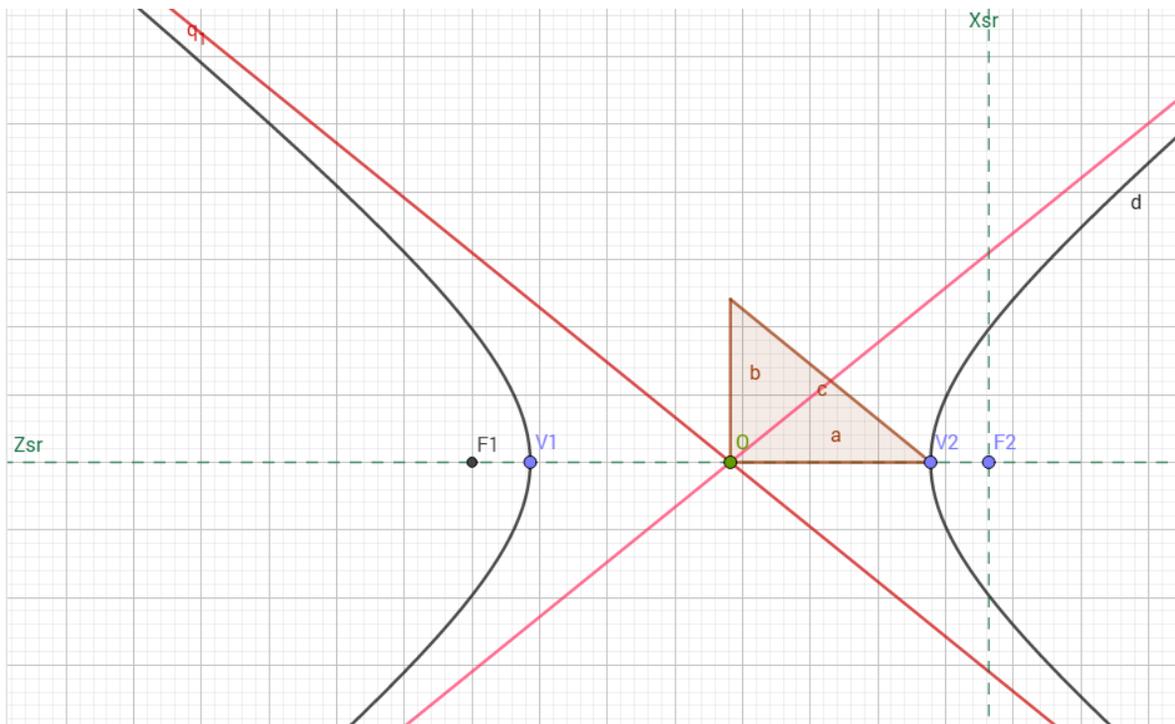


Figura 30. Elementos de la hipérbola

Los semiejes a , b , c forman un triángulo rectángulo imaginario que debe cumplir con el teorema de Pitágoras:

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (\text{Ecuación 25})$$

Esta ecuación nos ayudará a encontrar el valor de la distancia focal que equivale a $2c$.

Luego de encontrar todos estos parámetros se puede definir la ecuación de la hipérbola con centro fuera del origen, que es la siguiente:

$$\frac{(x - h)^2}{a^2} - \frac{(y - k)^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

h, k : Puntos de ubicación en los ejes para hallar el centro de la hipérbola.

Una vez trazada la hipérbola en el *software GeoGebra*, se procederá a encontrar los puntos para el hiperboloide, de la siguiente manera:

Con la ayuda de los ángulos anti horarios $\theta_0, \theta_U, \theta_L$ que parten del foco de la parábola se traza semirrectas que cortan la hipérbola y la parábola, permitiendo encontrar los siguientes puntos.

Tabla 9.

Puntos hiperboloide

Puntos	Eje X	Eje Z
P1	34.72	2.18
P0	35.8	6
P2	38.29	11.45

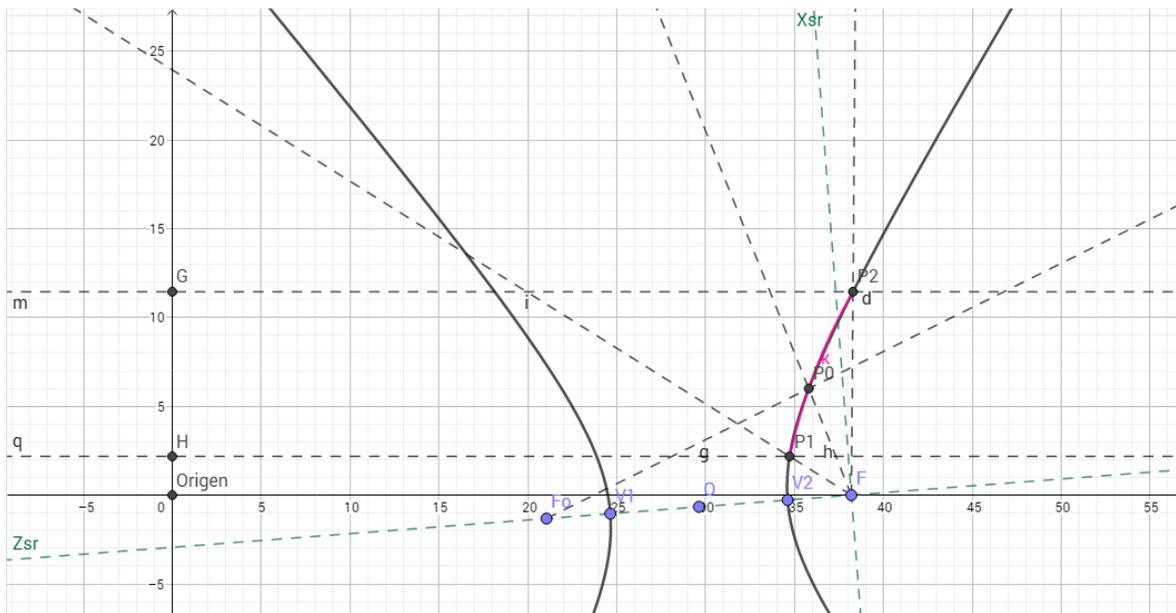


Figura 31. Puntos hiperboloide

Los puntos descritos anteriormente son el perfil del hiperboloide y representan al subreflector en el formato 2D.

Mediante las mediciones y cálculos, se logró conseguir el primer boceto de diseño en *GeoGebra* como se muestra en la figura 32, para finalmente establecer el diseño definitivo en *AutoCAD*.

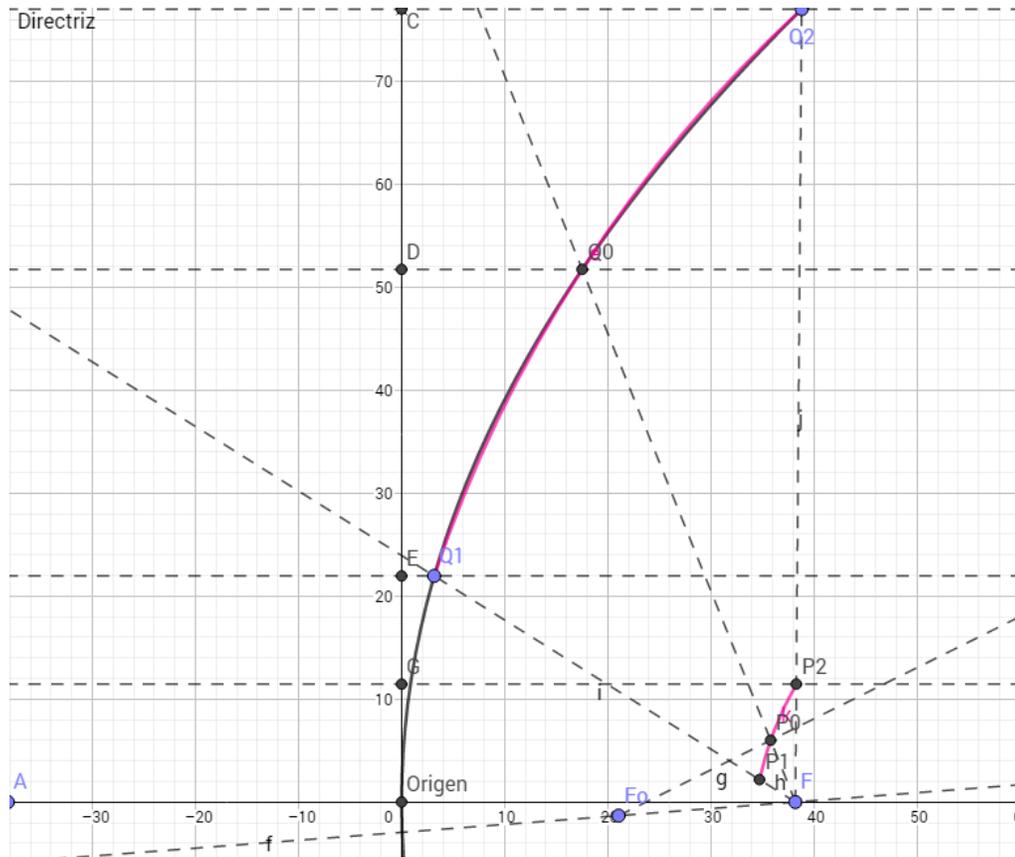


Figura 32. Diseño antena Cassegrain offset en *GeoGebra*

2.6 Diseño antena Cassegrain offset en *AutoCAD*

Para ubicar los elementos que conforman la antena, se utilizó los resultados anteriormente mencionados, que se presentan a continuación.

Tabla 10.

Datos hiperboloide

Puntos	Eje X	Eje Z
P1	34.72	2.18
P0	35.8	6
P2	38.29	11.45

Tabla 11.

Datos paraboloide

Puntos	Eje X	Eje Z
Q2	38.81	77.01
Q0	17.52	51.73
Q1	3.16	21.96

Ángulos de posicionamiento, los cuales determinan la inclinación que van a tener los ejes XZ del subreflector y del alimentador

Tabla 12.

Ángulos de posicionamiento

Datos	Resultado
α	22°
β	4,4°

Como se mencionó en los datos iniciales de diseño, los valores de Vs y do tuvieron su mínimo de variación con respecto a los valores aproximados iniciales. Estos cambios son los siguientes:

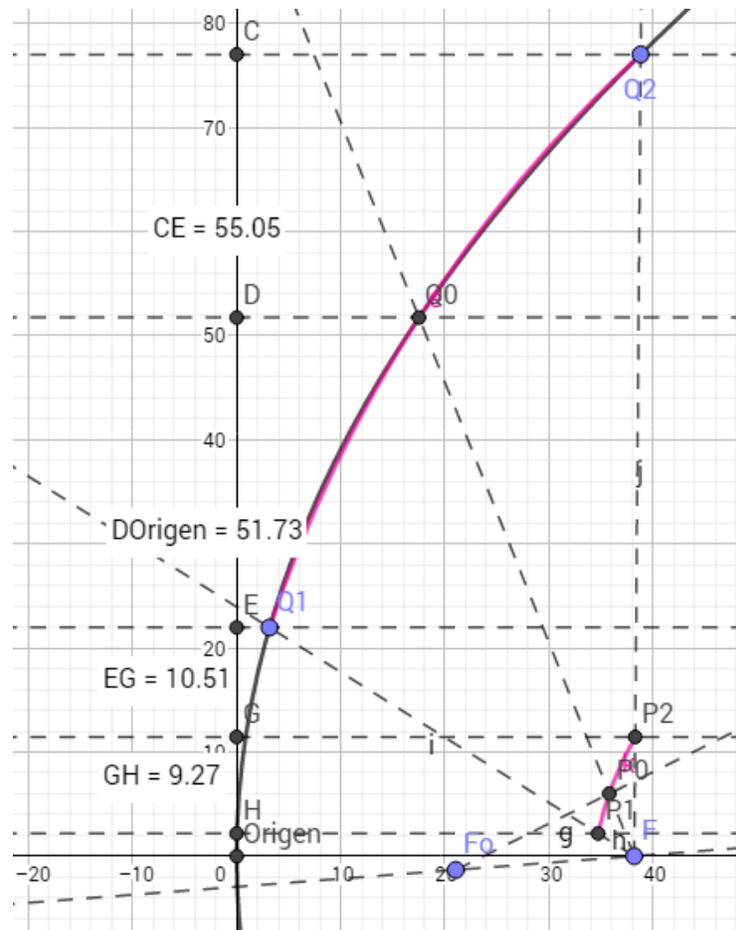


Figura 33. Variación de datos iniciales

V_s es igual a la distancia $GH = 9,27$ y d_o es ahora igual a $D_{Origen} = 51,73$. Finalmente los datos de entrada quedan de la siguiente forma:

Tabla 13.

Datos de entrada

Datos de entrada	Valor
D	55,05 cm
V_s	9,27 cm
d_o	51,73 cm
Foco	38.2 cm
d_{sr-mr} (<i>clearance</i>)	10.5 cm

Con estos datos, se procedió a dibujar en *AutoCAD* el paraboloides y el hiperboloides con la ayuda de los siguientes comandos:

Línea: Puede crear una serie de segmentos de línea contiguos. Cada segmento es un objeto de línea que se puede editar por separado.

Orthomode: Permite que las líneas que se dibujan sean ortogonales al plano

Desfase.- Permite el desfase de un objeto a una distancia determinada.

Empalme.- Conocido también como fillet permite enlazar dos líneas del dibujo a través de un arco o vértice, en este caso, se utilizó un arco de tres puntos. (AutoDesk, 2017)

Con el uso del comando desfase, las líneas que se dibujó con anterioridad, se pueden desfasar tanto verticalmente como horizontalmente, se logra así ubicar y cruzar las líneas, para encontrar los puntos descritos en las tablas 10 y 11 (Datos hiperboloides y paraboloides). Con el comando empalme, se retiras las líneas innecesarias.

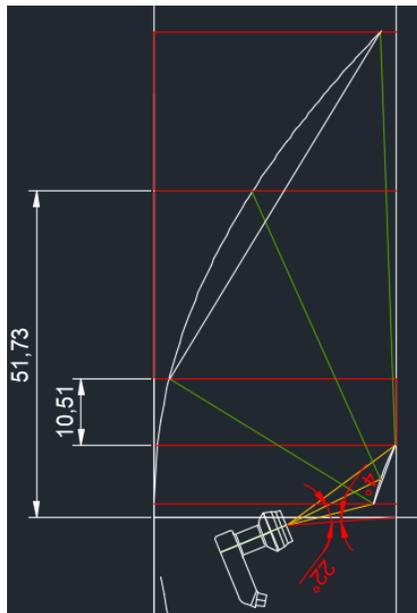


Figura 34. Diseño antena Cassegrain offset en AutoCAD

Con respecto al subreflector, es necesario transformar el formato 2D a 3D debido a la impresión con ABS, para ellos se utilizó tres superficies de revolución y los comandos.

Explode.- Divide un objeto compuesto en cada uno de los elementos que lo forman.

Fillet.- Como se detalló inicialmente, a este comando se le define el Radio $r=0$ para que el empalme se realice en un vértice y no en arco.

Revolve.- Crea una malla de revolución, con la cual, se realiza un barrido del objeto en 2D alrededor de un eje.

ConvtoSolid.- En el caso de utilizar el comando anterior, se logra convertir en sólido un objeto tipo malla y también superficies. (AutoDesk, 2017)



Figura 35. Subreflector en 3D

2.7 Selección del Material

Seleccionar el tipo de material con el que se va a construir el subreflector y el brazo de la antena, es uno de los puntos críticos del diseño, se debe considerar varios factores para que la antena trabaje correctamente. Entre ellos constan.

2.7.1 Propiedades del Material

2.7.1.1 Corrosión

De acuerdo al lugar donde se coloque la antena, este factor es de suma importancia para la reducción de costos, para garantizar la vida útil de la antena y no disminuir la eficiencia de la misma.

2.7.1.2 Costo

En todo tipo de proyecto, el factor económico juega un papel importante. A través de este, se puede llegar al éxito o al fracaso. Por lo cual se debe analizar todas las opciones que brinda el mercado actual para la selección del material, el mismo que debe estar acorde a las necesidades del proyecto.

2.7.1.3 Resistencia Mecánica

El material del subreflector debe resistir los vientos, lluvia y diferentes fenómenos naturales que se pueden presentar, por lo que sus características mecánicas deben ser las mejores.

2.7.1.4 Maquinabilidad

Para la elección del material se contará con que el mismo, tenga facilidad de ser cortado con una máquina de corte, para poder moldearlo de acuerdo a la forma que se necesite.

Existen varios tipos de materiales y métodos de fabricación, con los que se pueden trabajar. Entre ellos se han destacado dos y son:

2.7.2 Métodos de obtención del subreflector

2.7.2.1 Fundición en Arena

La fundición de arena es uno de los procesos más conocidos en el medio, este material mezclado con bentonita y agua logra tener mayor maleabilidad y cohesión.

Este método consiste en colar un metal fundido como: aleaciones de hierro, acero, bronce, aluminio, etc. en un molde de arena para su posterior solidificación y extracción del molde. La arena que se utiliza puede ser proveniente de la naturaleza o la comercializada, la diferencia entre las dos es que en la primera se puede reutilizar para moldear la pieza.

Previamente se debe contar con el diseño subreflector para poder obtener un molde de madera, plástico o metal cuyas medidas serán ligeramente mayores a las del reflector secundario, ya que hay que considerar que en el proceso el metal se contrae de acuerdo a su porcentaje de reducción.

El proceso que sigue la fundición de arena, es el siguiente:

- Obtención del molde del subreflector.
- Fundición
 - Compactación
 - Realización del bebedero y desfogue
 - Colada y vertido del material fundido
 - Enfriamiento y Solidificación
 - Desmolde
 - Desbarbado
 - Acabado y limpieza de restos de arena (Román, 2016)

2.7.2.2 Impresión 3D

La impresora 3D realiza réplicas volumétricas de varios objetos de acuerdo al diseño que se le proporcione, este debe ser realizado en programas que trabajen con modelamiento 3D como: *AutoCAD*, *SolidWorks*, *FreeCAD*, *TinkerCAD*, etc.

Al realizar una impresión en 3D, se debe proporcionar el alto, largo y ancho del objeto, además estos dispositivos trabajan en los ejes x, y encargados de brindar el movimiento plano, z da la altura al producto.

Con el diseño en 3D del objeto, se realiza la sección en capas para que la impresora pueda interpretar el mismo e ir construyéndolo. El material más utilizado para esto es el rollo de ABS, este es un termoplástico que se deforma en temperaturas relativamente altas y cuando se enfría se endurece. El cabezal de la impresora a una temperatura de 230°C derrite al ABS para luego construir las diferentes capas hasta finalizar la impresión del objeto. (Contreras, 2017)

Los elementos necesarios para realizar este proyecto son:

- Un subreflector
- Piezas de soporte

2.7.3 Material seleccionado

En lo que respecta al subreflector, la Universidad de las Américas cuenta con una impresora 3D, que trabaja con el material ABS. Los estudiantes pueden tener acceso a la misma para realizar cualquier tipo de proyecto, por esta razón se decidió escoger la impresión 3D para la construcción del subreflector, ya que el costo del material es bajo, el tiempo en obtener la pieza es corto y no se tiene varios subprocesos en comparación con la fundición de arena.

El nuevo brazo de la antena será construido con aluminio, el cual, es fácil de conseguir y trabajar para obtener la pieza deseada. Se tratará su implementación con mayor énfasis en el próximo capítulo.

3 Capítulo III. Implementación y Pruebas

Para el presente capítulo se explicará la implementación del diseño planteado anteriormente, los procesos que se realizaron para la construcción del subreflector y la posterior conversión de antenas.

3.1 Descripción de los elementos

Al hablar de conversión de manera general, es fácil tener la idea, que se trata del paso o cambio a un objeto diferente al inicial.

Por lo cual para empezar la ilustración de la conversión de la antena *offset* a una antena *Cassegrain offset*, se muestra en la siguiente figura la antena original.

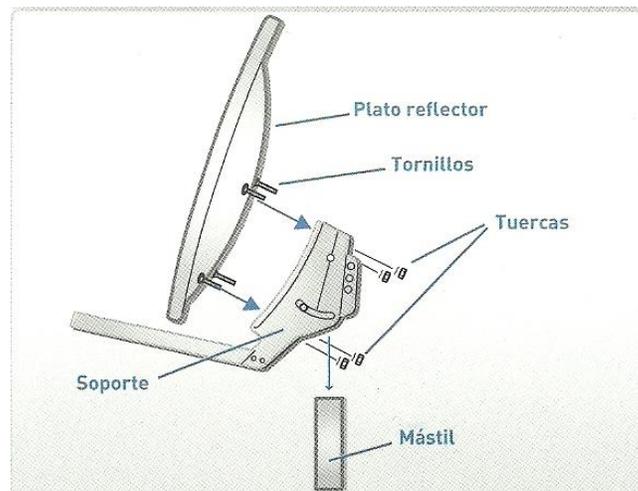


Figura 36. Antena *offset* DirecTV

Tabla 14.

Datos técnicos antena offset

Datos	Valores
F/D	0,6
Alto	65,5 cm
Diámetro	60 cm
Ancho	60,8 cm
Profundidad	5,6 cm
Foco	38,2 cm

*Figura 37. Partes antena offset DIRECTV*

Tomado de (Comunicaciones, 2013)

Esta antena es de gran ayuda tanto en la parte de diseño y en lo económico, ya que a través de su estructura se tuvo una pauta para el inicio de la conversión de antenas. Por lo cual, se trabajará con cuatro de sus elementos que son: el reflector principal, soporte, mástil y el alimentador.

La primera idea que se desplegó fue utilizar el mismo brazo de la antena *offset* para colocar en el lugar del *LNB*, el subreflector, pero apareció un inconveniente. Al colocar el alimentador en este brazo se originaba sombra hacia el subreflector y esto puede ser un factor perjudicial. Por esta razón se decidió cambiar la forma del brazo.

3.2 Brazo y soportes de antena

Como se mostró en el capítulo anterior, el diseño de la antena *Cassegrain offset* se diferencia por la forma del brazo, sus soportes y el subreflector. A continuación se puntualiza el proceso para la fabricación de estos elementos.

Con el diseño del brazo realizado en *AutoCAD* y seleccionado el tipo de material a utilizar (aluminio) se adquirió una plancha de 80 x 60 cm con espesor de 6mm debido a que si se escoge una lámina de menor espesor puede llegar a doblarse y deformarse con facilidad, es decir, no cumpliría con los requisitos de resistencia mecánica y maquinabilidad requeridos.



Figura 38. Plancha de Aluminio

Tomado de (Evisos, 2017)

Para conseguir la forma del brazo en la plancha de aluminio se utilizó una máquina de corte por plasma. El funcionamiento de la máquina es el siguiente:

Utiliza un arco entre el electrodo y la lámina de aluminio, al iniciar el proceso, el gas aún no se encuentra ionizado por lo que no es posible establecer el arco y es ahí donde interviene el generador de alta frecuencia que produce el arco piloto. Este arco calienta el gas plasmágeno, lo ioniza y el arco piloto se apaga automáticamente para dar paso al arco de plasma. (Máquinas-Herramientas, 2013)

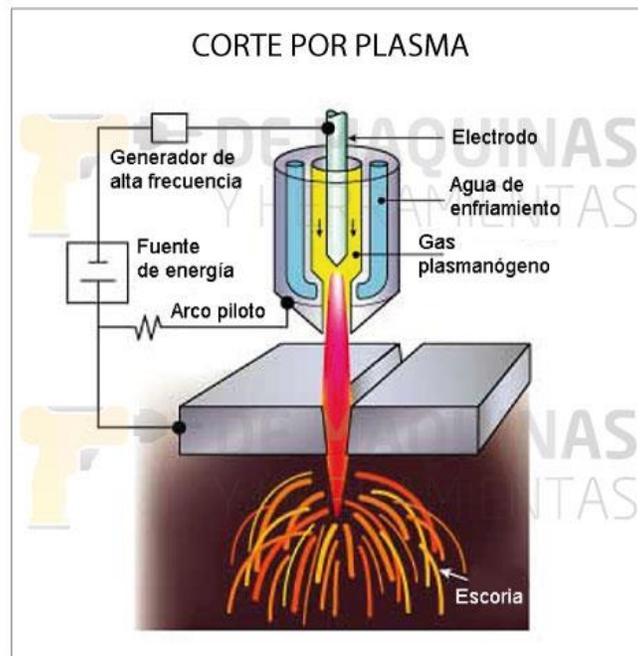


Figura 39. Corte por Plasma

Tomado de (Máquinas-Herramientas, 2013)

En la actualidad existen varias máquinas para este tipo de proceso, pero si se quiere mayor presión en el corte se puede utilizar la máquina de corte CNC.



Figura 40. Corte CNC

Tomado de (Máquinas-Herramientas, 2013)

Este tipo de máquinas a diferencia de las tradicionales, adjunta un computador que a través de *software* controla la posición y velocidad de los cortes. Con esto se puede realizar cortes de círculos, líneas, figuras complejas y tridimensionales.

CNC proviene del término control numérico, es decir, los datos de la figura son transformados a códigos numéricos.

Con respecto al brazo realizado en *AutoCAD*, se lo copia en el computador, para que la máquina con el sistema CAM (Manufactura asistida por computadora) tome la información del diseño y organice una ruta de corte y de esta manera alcanzar la pieza deseada con mayor rapidez y calidad. (Viwa, 2016)

Finalmente, se pule la pieza resultante con limas o discos pulidores y se procede a pintar la misma con pintura electrostática, para conseguir un mejor acabado.

El mismo proceso fue ejecutado para las piezas de soporte que forman parte del brazo. Estas piezas sirven para manipular el subreflector y el alimentador, la posición de ambos elementos puede ser manipulable hasta una distancia de 3 cm.



Figura 41. Brazo antena Cassegrain offset

3.3 Fabricación del Subreflector

Con base al diseño en 3D presentado en *AutoCAD* se procedió a la impresión del subreflector con el material ABS de diámetro de 2.85 mm y color azul.

Antes de realizar este proceso hay que transformar el archivo .dwg en .stl porque la impresora es estereolitográfica, es decir, su impresión se lleva a cabo a través de sucesivas y finas capas del material asignado mediante luz ultravioleta.

El programa a utilizar tiene como nombre Cura, este permite establecer el tipo de material, selección de temperatura, número de capas del objeto, espesor del relleno, velocidad y tiempo de la impresión en formato 3D.

Como se observa en la figura 42, el tiempo de impresión es de 3 horas con 15 minutos y mientras la impresión avanza, el programa muestra el porcentaje de impresión.

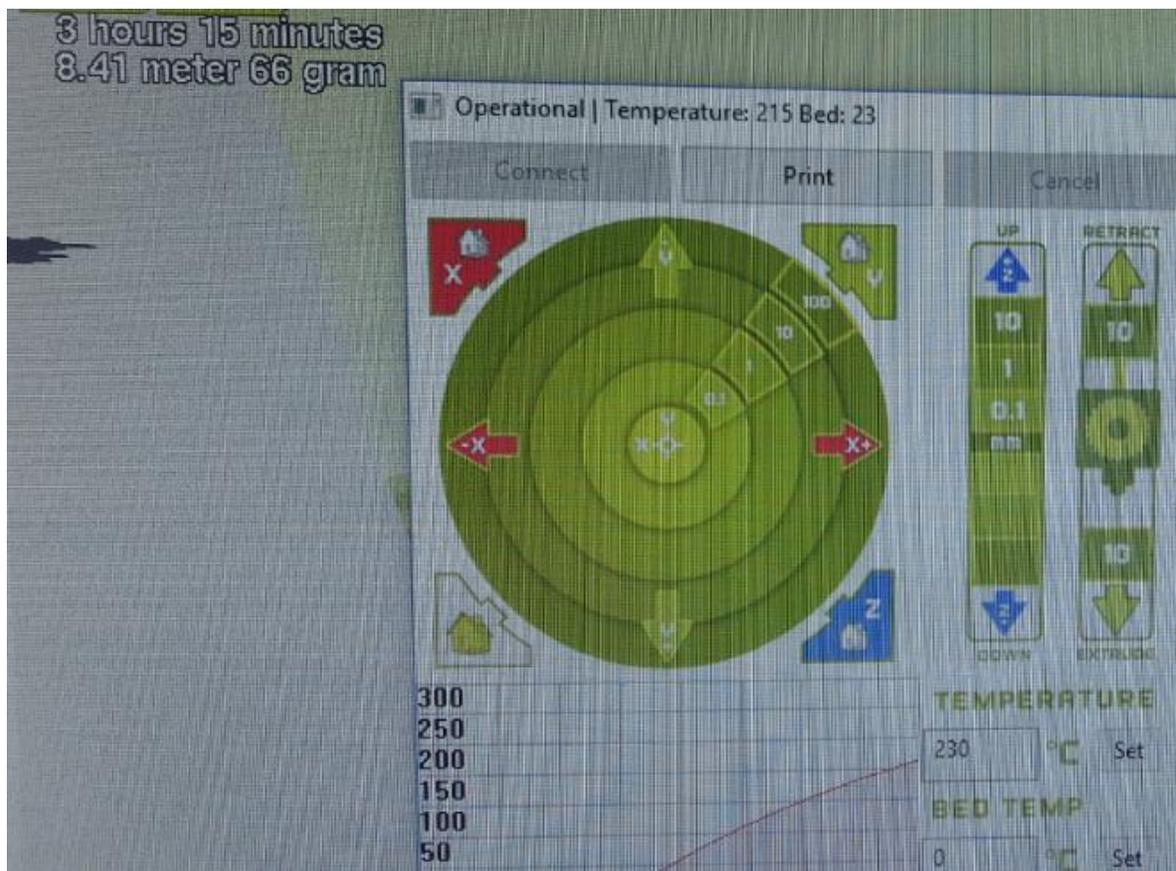


Figura 42. Tiempo y porcentaje de la impresión

A continuación se muestra el resultado final de la impresión.



Figura 43. Subreflector con material ABS

Existen algunas irregularidades en la superficie y para eliminarlas se mezcla masilla Mustang con unas gotas de catalizador.



Figura 44. Masilla Mustang y catalizador

Esta mezcla permite endurecer la superficie del subreflector para luego lijarla y lograr una superficie más lisa.

Para finalizar se recubrió al reflector secundario con spray galvanizante en frío de zinc al 93% para que pueda captar las señales procedentes del plato principal. (Román, 2016)



Figura 45. Subreflector final

3.4 Conversión de la antena *offset* a *Cassegrain offset*

Mediante las figuras 46 y 47 se evidencia la conversión de antenas. En la izquierda se encuentra la antena *offset* y en la derecha se ilustra el paso a la antena *Cassegrain offset*, destacando el nuevo brazo que sostiene tanto el reflector como el subreflector. Estas dos piezas pueden movilizarse una distancia máxima de tres centímetros a través del brazo y son ajustados con tornillos dependiendo de la distancia seleccionada.

Se realizó este modelo porque para las pruebas de campo, el subreflector debe estar ubicado en un ángulo $\beta \leq 4,4^\circ$.

Además se puede verificar que se utilizó los elementos de la antena *offset*.

- Reflector Principal
- Soporte
- Mástil
- LNB
- Base



Figura 46. Antena Offset inicial

Tomado de (Carrefour, 2017)



Figura 47. Conversión final

La estructura del subreflector hecha de aluminio, permite integrar la impresión 3D de una manera sencilla, para poder extraer y colocar el objeto. Esto debido a las pruebas que se explicarán a continuación.

3.5 Pruebas

3.5.1 Simulación

Cuando se abre el programa *GRASP10*, aparece una ventana (Figura 48) que ofrece tres tipos de opciones de diseño al usuario, las cuales son ayuda del asistente (use wizard), proyecto en blanco (blank project) o ejemplos (tutorial examples).

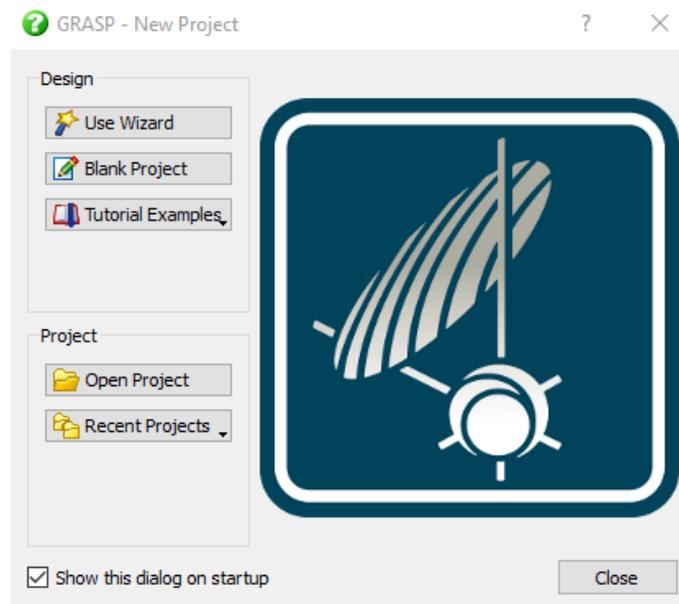


Figura 48. Ventana Principal de *Grasp*

Se selecciona la opción ayuda del asistente, ya que esta opción permite elegir entre el diseño de un sistema simple o doble reflector y definir el tipo de parámetro de entrada inicial, como se observa en la figura 49.

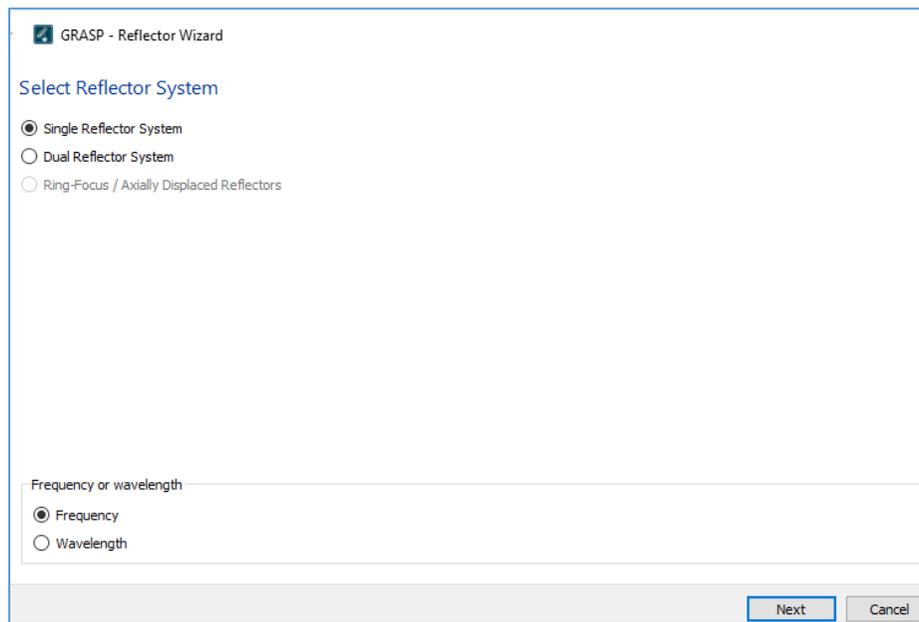


Figura 49. Ventana del tipo de sistema

3.5.1.1 Simulación antena *offset*

La opción Single Reflector System, permite diseñar una antena *offset* con los siguientes parámetros de entrada:

- Frequency: frecuencia en la que opera la antena
- Reflector diameter: apertura del diámetro del reflector paraboloide
- Focal length: distancia focal del reflector
- Reflector *offset*: distancia desde el eje del paraboloide al centro de apertura del diámetro.

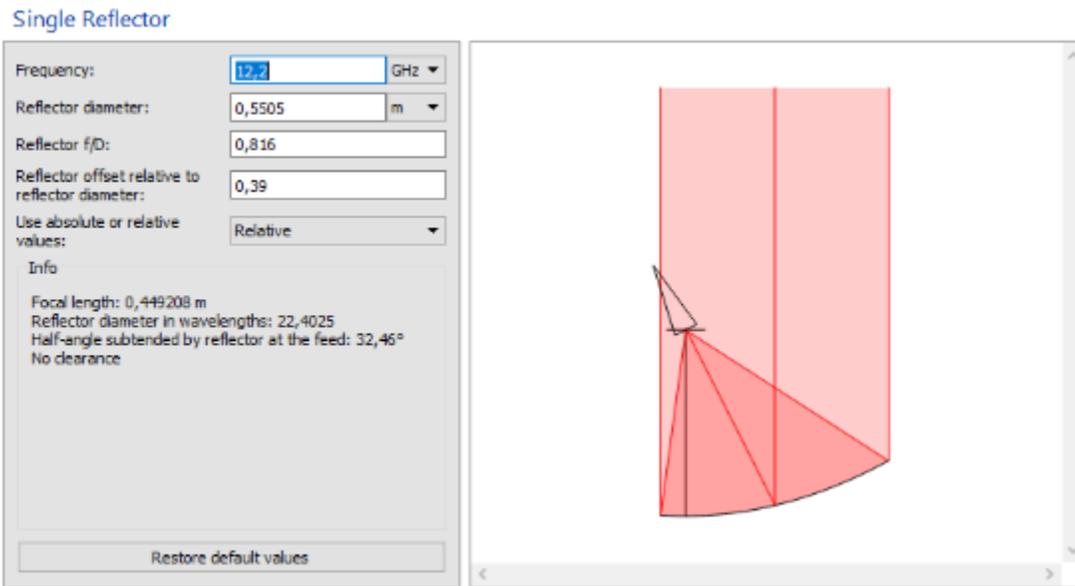


Figura 50. Ingreso de Datos antena *offset*

Tan pronto como se ingresan los parámetros, la antena empieza a tomar la forma deseada como se observa en la Figura 51.

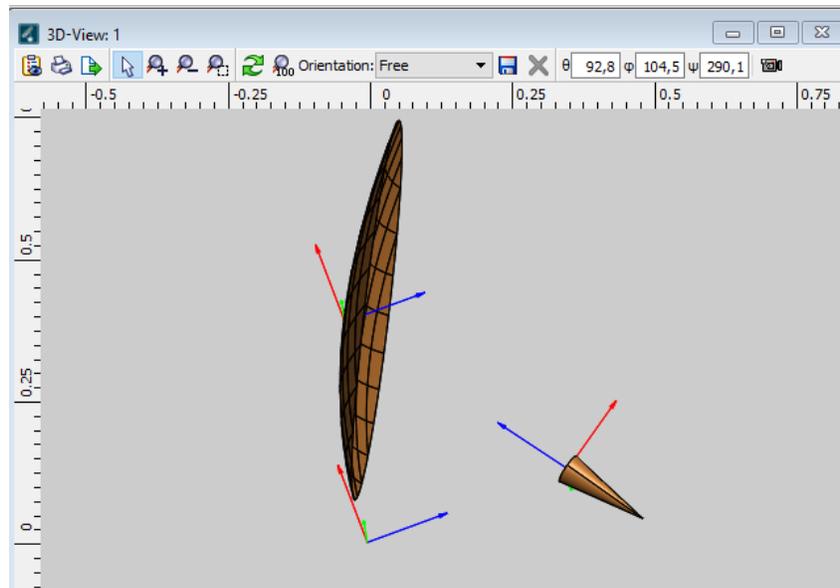


Figura 51. Antena *offset* 3D

Para observar la representación cartesiana de la polarización, se debe dirigir hacia el menú ubicado en el lado izquierdo de *software* de simulación y escoger la opción *Results*, donde se muestra la siguiente ventana (Figura 52).

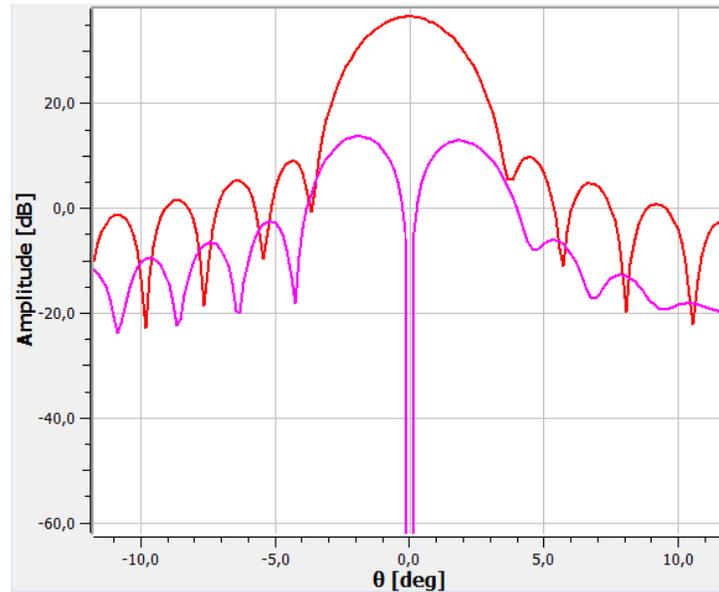


Figura 52. Representación cartesiana de la polarización en antena *offset*

Se especifican las dos componentes de la polarización, diferenciadas por el color rojo y violeta. En el capítulo cuatro, se tratará de mejor manera estos resultados.

3.5.1.2 Simulación antena *Cassegrain offset*

La frecuencia debe estar dentro de la banda Ku y como la antena es solo receptora, el tipo de enlace será descendente (downlink) que comprende los valores de 11.45 a 12.2 GHz, además se considera que la frecuencia debe ser alta, ya que al ser una antena satelital se busca que no exista obstáculos en el apuntamiento hacia el satélite, aunque en baja frecuencia también funciona. Por todas las razones antes mencionadas se eligió trabajar con la frecuencia 12.2 GHz.

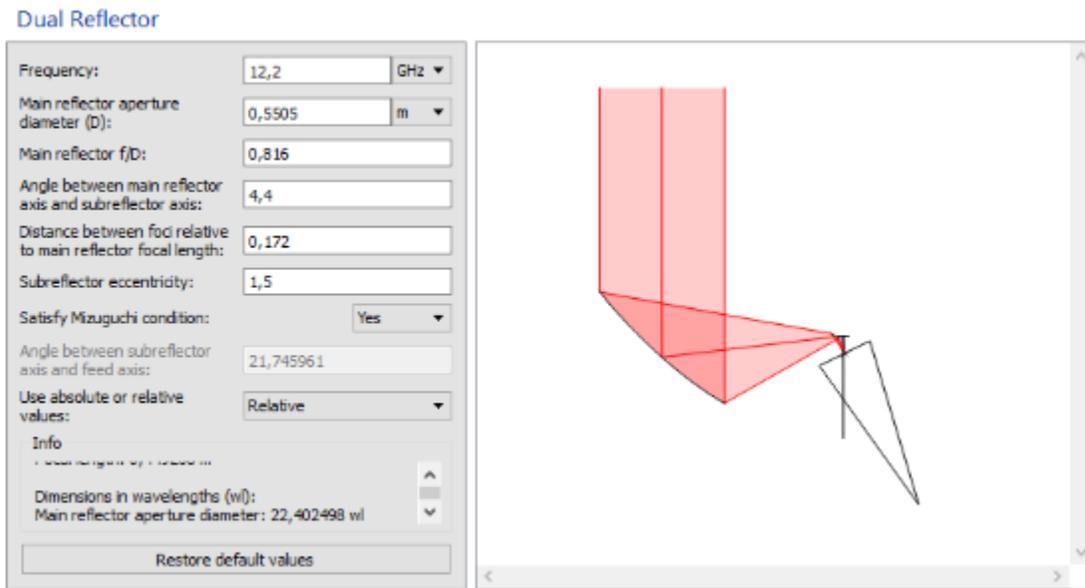


Figura 53. Ingreso de datos antenna Cassegrain offset

Luego del ingreso de todos los parámetros solicitados, se obtiene el diseño de la antenna (Figura 54), como dato interesante se puede observar que solo el ángulo comprendido entre el eje del subreflector y el eje del *feed*, se calcula automáticamente, el programa realiza esta operación para comprobar que realmente se cumple con la condición de *Mizugutch*.

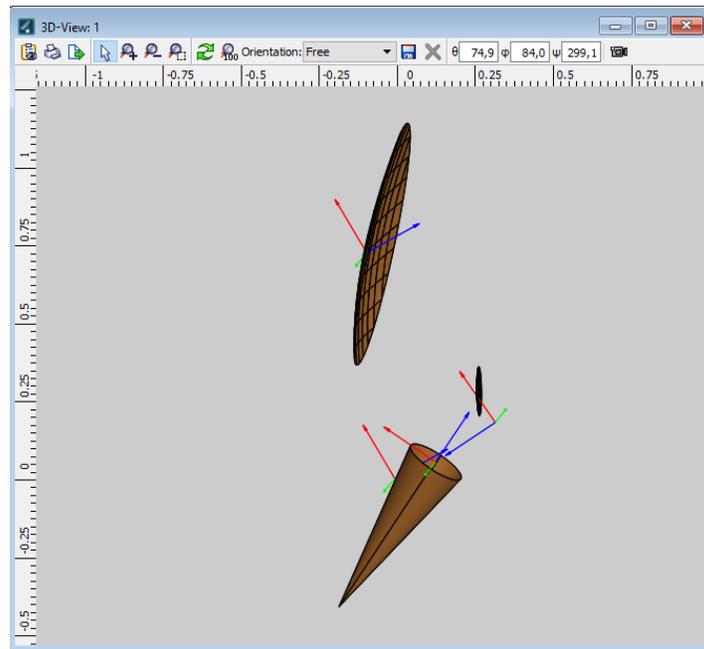


Figura 54. Diseño en 3D Cassegrain offset

En la figura 55 se puede observar las siguientes curvas:

- Verde: componente copolar
- Celeste: componente *crosspolar*
- Azul: bloqueo del subreflector

La ausencia de la curva azul nos indica que el reflector principal no tiene nada de bloqueo por parte del subreflector.

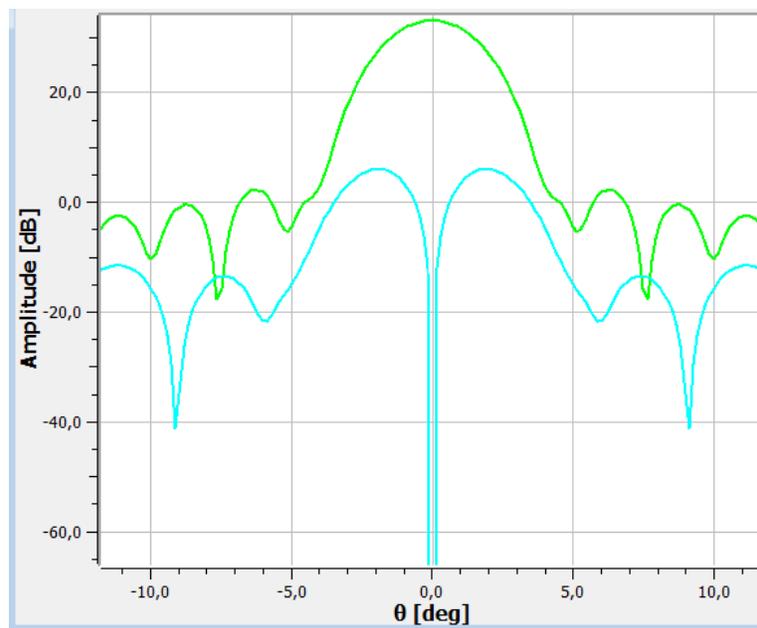


Figura 55. Representación cartesiana de la polarización en antena *Cassegrain offset*

3.5.2 Pruebas de Campo

3.5.2.1 Instalación de Antena DIRECTV

Para llevar a cabo las pruebas se procedió con la instalación de la antena, como se detalla a continuación.

- Buscar un lugar libre de edificios, cables, árboles, diferentes obstáculos que obstruyen el paso de la señal.

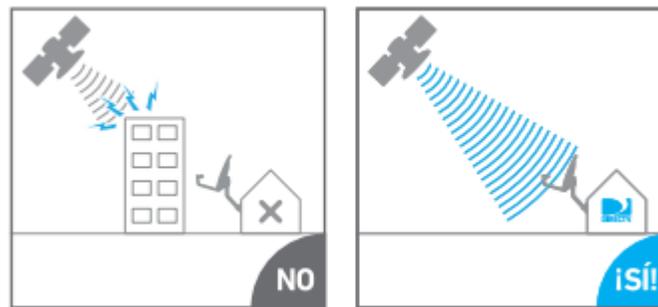


Figura 56. Instalación antena DIRECTV – Paso1

Tomado de (DirecTV, s.f.)

- Ajustar el mástil a un punto fijo, puede ser: pared, techo, ventana, etc.

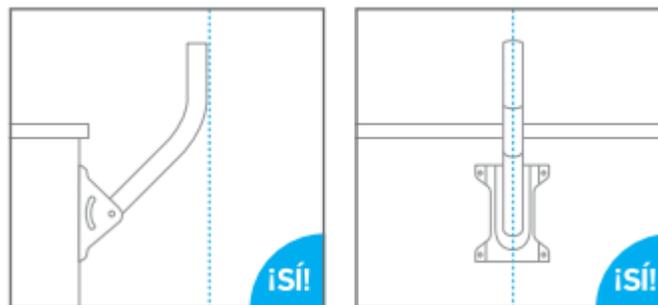


Figura 57. Instalación antena DIRECTV – Paso2

Tomado de (DirecTV, s.f.)

- Armar el reflector principal para luego unirlo con el brazo (en este caso el nuevo brazo) y además colocarlo en el mástil.

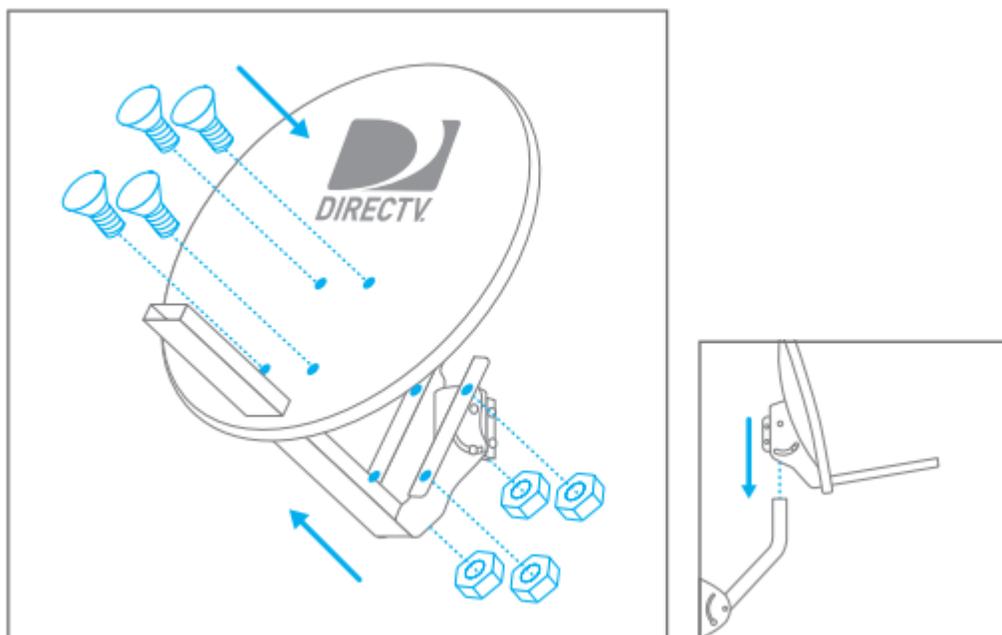


Figura 58. Instalación antena DIRECTV – Paso3

Tomado de (*DirectTV, s.f.*)

- Ajustar el ángulo de elevación de acuerdo a como se muestra en la figura 59, en el caso de Quito es de 71°.

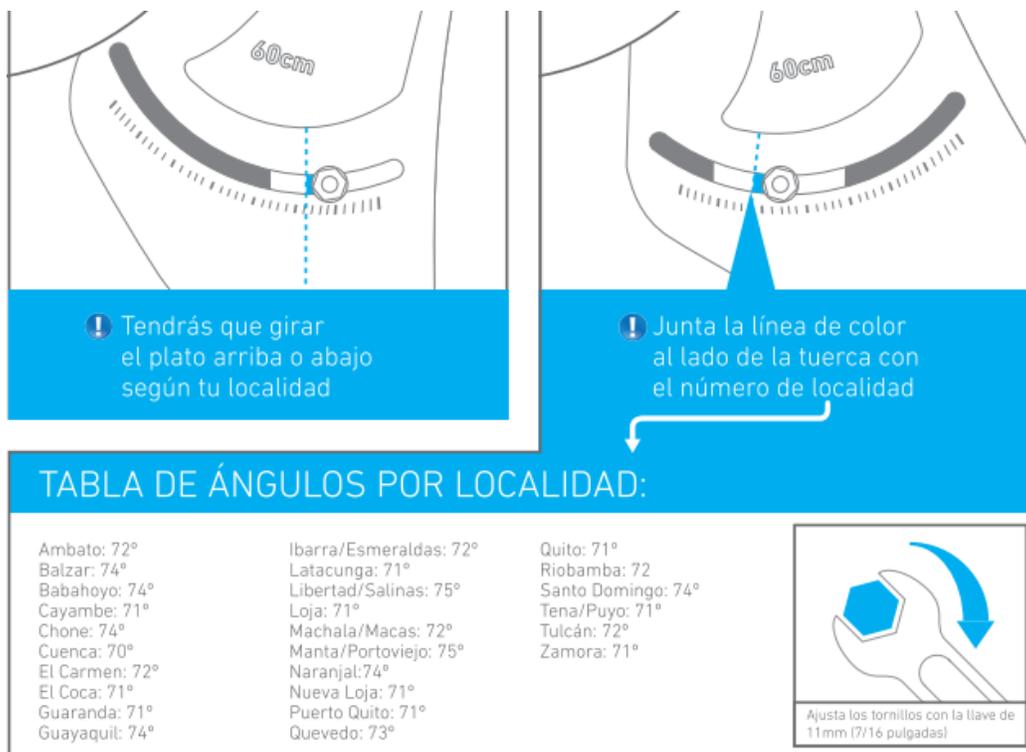


Figura 59. Instalación antena DIRECTV – Paso4

Tomado de (DirecTV, s.f.)

- Se coloca el cable coaxial debajo del brazo para que sea conectado con el LNB.

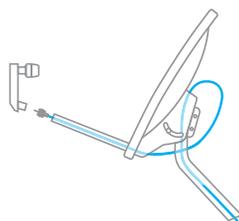


Figura 60. Instalación antena DIRECTV – Paso5

Tomado de (DirecTV, s.f.)

- A continuación se debe colocar una brújula detrás de la antena, para que poder tener una buena orientación hacia el satélite de DirecTV. Para ello la elevación del reflector principal es de 71°, azimut de 271° al Oeste.

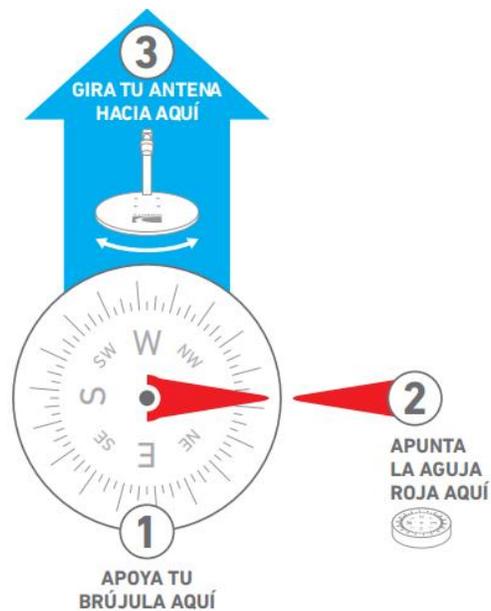


Figura 61. Instalación antena DIRECTV – Paso6

Tomado de (DirecTV, s.f.)

Siguiendo estos pasos, se logró instalar la antena, como se muestra en la figura 62.



Figura 62. Antena Cassegrain offset instalada

3.5.2.2 Pruebas con antena *Cassegrain offset*

Para llevar a cabo las pruebas con el prototipo de antena *Cassegrain offset* previamente, se instaló la misma, con un ángulo de elevación de 71° y azimut de

271° W. Se utilizó el analizador de espectros HP 8563E que tiene rango de frecuencia de 30Hz a 25,5GHz. (HP, s.f.)

Para la conexión entre la antena y el analizador se requirió 20 m de cable coaxial, como se muestra en el esquema de la siguiente figura.

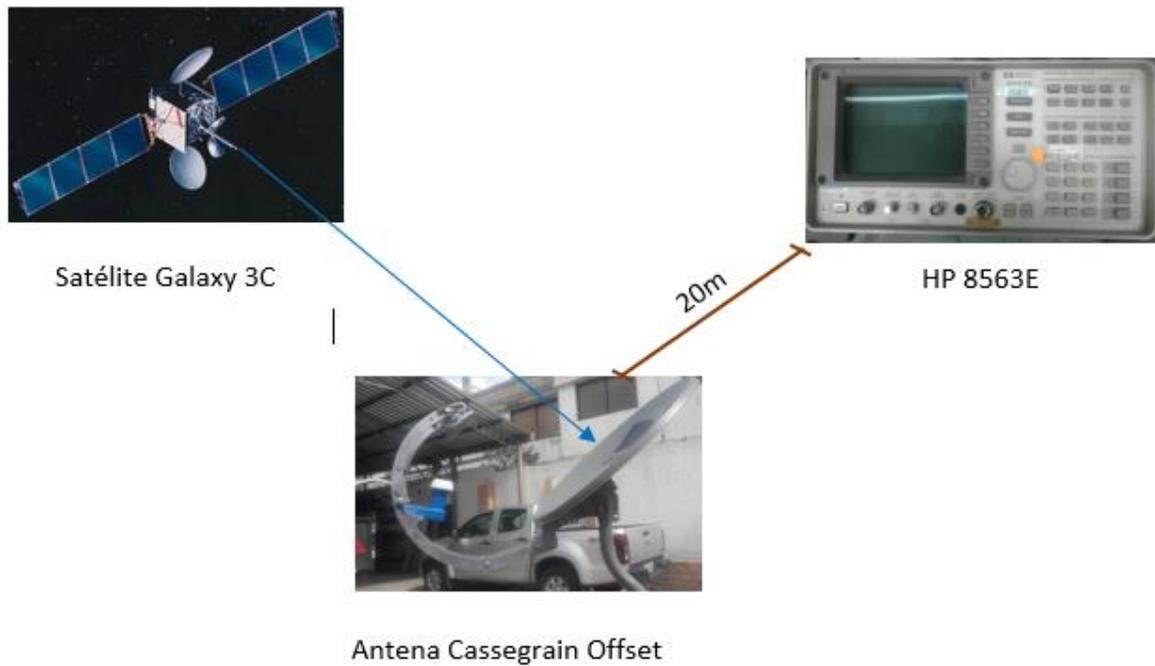


Figura 63. Esquema de conexión

A continuación se presenta el nivel de recepción de señal obtenido.

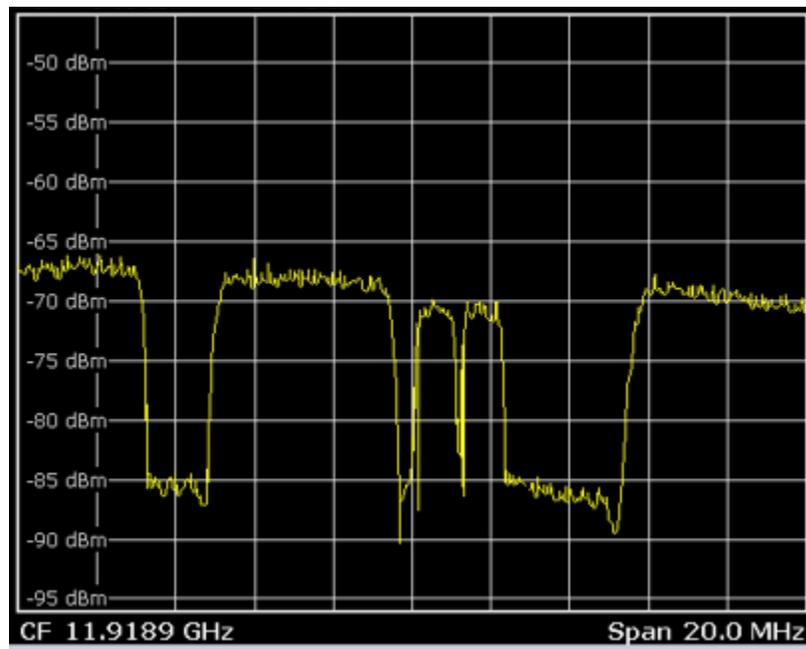


Figura 64. Nivel de recepción del prototipo

4 Capítulo IV. Análisis de Resultados

4.1 Análisis de las simulaciones

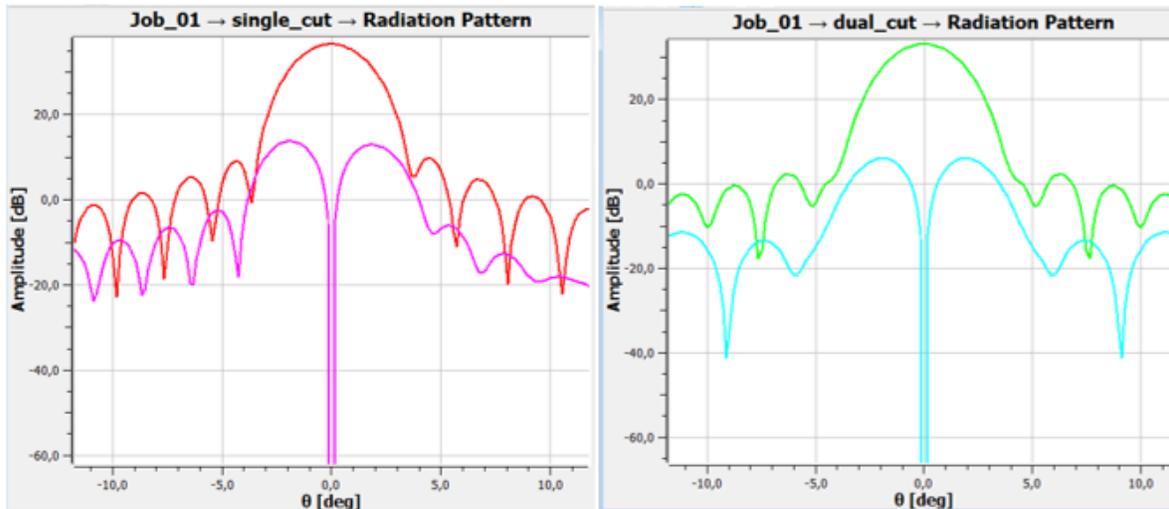


Figura 65. Representación cartesiana de la polarización en antena *offset* - *Cassegrain offset*

Para empezar el análisis de las simulaciones realizadas, en la figura 65, se tiene a la izquierda la representación cartesiana de la polarización en la antena *offset* y a la derecha de la antena *Cassegrain offset*.

A simple vista con la antena *Cassegrain offset* se tiene mayor amplitud y menor número de lóbulos laterales que en la antena *offset*. En la siguiente tabla, se muestra los valores obtenidos.

Tabla 15.

Resultados de las simulaciones

	Offset	Cassegrain
Co-Polarización		
Amplitud (dB)	33,18	36,5
Ancho de haz (°)	1,3°	1,4°
Cross-Polarización		
Amplitud (dB)	13,7	5,9
Ancho de haz (°)	1.95	2.07

En la componente de co-polarización la amplitud aumenta de 33, 18 a 36, 5 [dB] esto se debe al aumento del subreflector en el sistema de la antena. Mientras que ocurre lo contrario con la componente de *cross-* polarización, por lo que se puede decir que existe una disminución en este tipo de polarización.

El ancho de haz tiene un ligero crecimiento, ya que se utilizó el mismo reflector de la antena *offset*. En el caso de variar el diámetro, el cambio de valor en el ancho de haz es inversamente proporcional, es decir, a mayor diámetro el ancho de haz es menor.

4.2 Análisis pruebas con antena *Cassegrain offset*

En la figura 66, se presenta el nivel de recepción de una antena *offset* en una frecuencia de 11,902 Ghz.

En el gráfico se puede notar que la polarización cruzada son las líneas que parecen resaltadas y son cuatro, sus valores son: -77, -79, -74 y -71 [dBm].

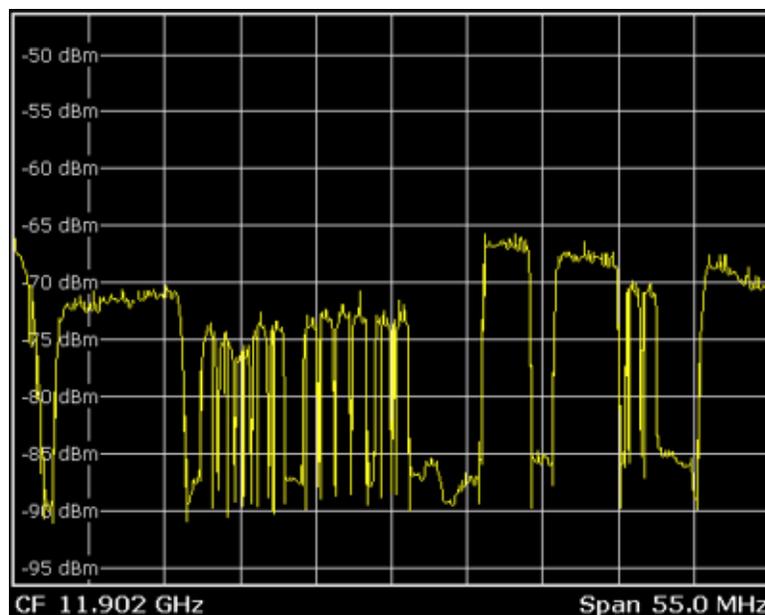


Figura 66. Nivel de recepción *offset*

Para empezar el análisis de la antena *Cassegrain offset*, se tomó una captura en la frecuencia de 11,891 Ghz. La polarización cruzada tiene los siguientes valores: -76,

-77, -74 [dBm]. Se observa que ha disminuido el número de componentes de la polarización cruzada, tanto en cantidad como el valor de potencia.

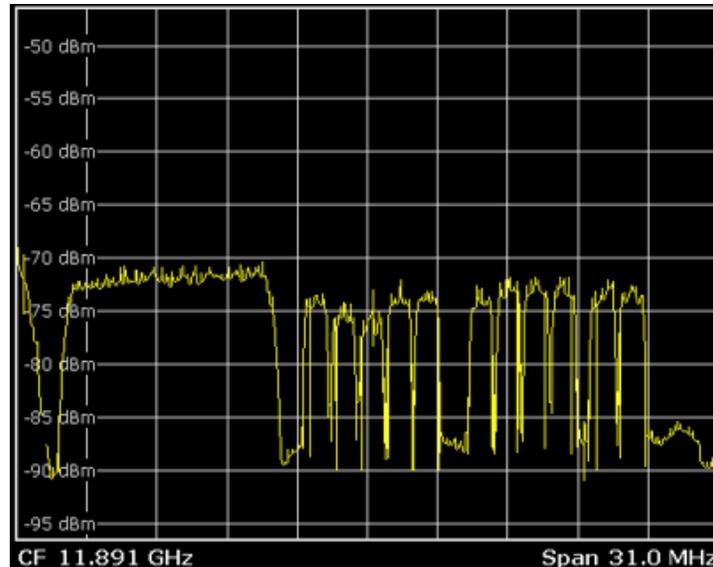


Figura 67. Nivel de recepción primera captura

La segunda captura fue en la frecuencia de 11,9189 Ghz, debido a que se estaba buscando encontrar la señal del satélite. En la figura 68, se comprueba que se va disminuyendo la polarización cruzada y sus valores son: -77y -74 [dBm].

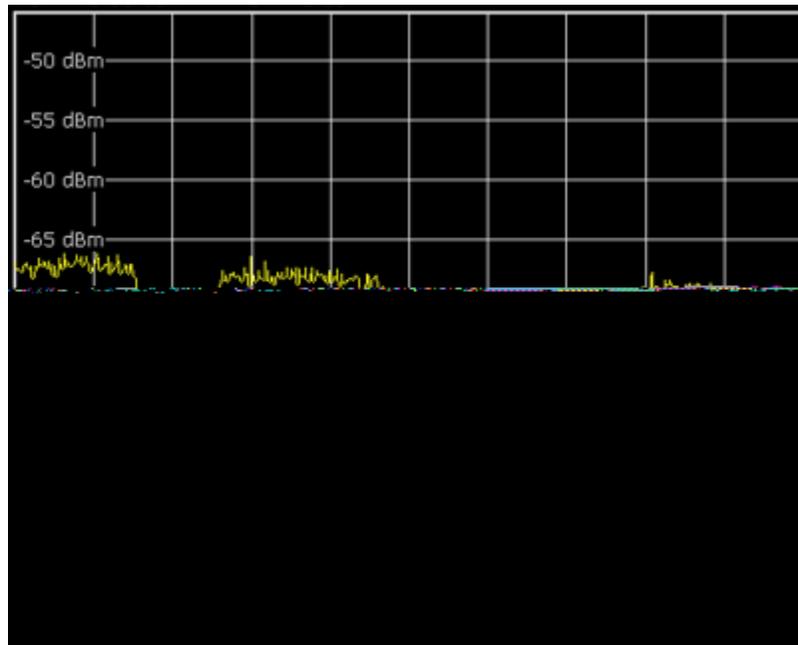


Figura 68. Segunda captura del prototipo

Al contar con menos componentes de polarización cruzada, se comprueba la reducción de la misma y la mejora en la señal de recepción.

Como se ha mencionado la antena *offset* es la más utilizada en comunicaciones satelitales, ya que no tiene el problema de sombra debido a las partes que la conforman como es el caso de la antena *prime focus*, además tiene una estructura simple y peso ligero.

Su problema es la presencia de polarización cruzada y si se requiere reducirla una gran opción es introducir una segunda superficie reflectora, pero al realizar esto se debe considerar la forma del nuevo reflector. Un hiperboloide es útil debido a que tiene dos puntos focales, en los cuales se puede colocar el alimentador y el reflector secundario respectivamente. Al reducir la polarización cruzada se mejora el nivel de la señal y la disminución de lóbulos laterales.

La polarización cruzada se produce porque la antena *offset* cuenta con un reflector paraboloide asimétrico, el cual al reflejar las ondas electromagnéticas hacia el alimentador, no lo hace con la misma potencia y además aparece la componente

de polarización cruzada. Al añadir el subreflector hiperboloide permite que el sistema de la antena sea simétrico, no se desperdicie la señal, disminuye el *spillover* y disminuye la presencia de lóbulos laterales.

Para lograr la simetría del sistema se utilizó la condición de *Rusch*, esta dice que la polarización cruzada se debe a la configuración asimétrica del reflector principal y para mejorar esto se debe alinear el eje del subreflector con el eje del paraboloide a través del ángulo beta descrito en capítulos anteriores. De igual manera se debe alinear el eje Z del subreflector con el eje Z del alimentador por medio del ángulo alfa, el cual se encuentra con la condición de *Mizugutch*, así se logra obtener un sistema *Cassegrain* totalmente simétrico.

Cada uno de los componentes de la antena *Cassegrain offset* necesita de una calibración exacta. En el caso del subreflector al colocarlo en la posición de $\beta=4,4^\circ$ al momento de ajustar sus tuercas variaba los valores del nivel de señal de recepción. También se debe considerar el estado del clima, ya que en este tipo de frecuencia de trabajo, al tener lluvia la señal se distorsiona y el calor afecta al material ABS.

Como se ve en la figura 69, se puede tener otros diseños de antena, pero no se cumpliría con la conversión, ya que se debe diseñar el modelo desde cero, analizar que parte de la parábola se utilizaría y la implementación de un nuevo plato generaría mayores costos.

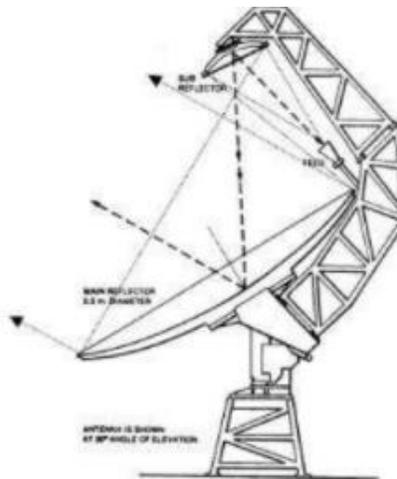


Figura 69. Modelo antena Cassegrain

Tomado de (Omar8, 2011)

Además el alimentador puede estar ubicado detrás del reflector principal, pero para hacer esto, se debe modificar al plato principal, realizar algunos cortes a la estructura y acoplar varias piezas, etc. Lo cual aumentaría el costo de fabricación.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La antena *offset* por su estructura simple, de bajo costo y compacta, es la más utilizada en aplicaciones satelitales. Su inconveniente es la polarización cruzada la cual aparece debido a la asimetría del reflector principal. Los efectos que produce la polarización cruzada son bajo nivel de señal y aumento de lóbulos laterales, para reducir estos problemas se debe añadir un segundo reflector, para lograr obtener un sistema simétrico. Por esta razón se escogió convertir la antena *offset* en una antena *Cassegrain offset*.

Existen dos formas para el diseño de antenas. La primera es mediante modelos matemáticos establecidos a través del estudio del comportamiento de las antenas tipo *offset* y la segunda forma se basa en el uso de la geometría óptica que estudia la reflexión de las ondas electromagnéticas con lo cual se puede establecer la posición de los elementos que conforman la antena.

Además de la geometría óptica, se utilizó dos condiciones de diseño que permiten la simetría de la antena. Por un lado, *Mizugutch* ayuda a establecer el ángulo de orientación del *feed* para así obtener cero polarizaciones cruzadas y la condición de *Rusch* permite que el paraboloide sea axialmente simétrico con el hiperboloide, es decir alinea los ejes tanto de la parábola como de la hipérbola para minimizar las pérdidas por desbordamiento.

La conversión de antenas consiste en la adaptación de componentes existentes para su transformación en otra antena, por lo cual se realizó el levantamiento del reflector parabólico de la antena *offset*, para encontrar el diámetro y foco por medio de las mediciones del alto, ancho y profundidad del plato. De esta manera con los cálculos obtenidos se procedió a dibujar y ubicar los elementos que componen a la antena *Cassegrain offset*, como el reflector principal, el subreflector y el alimentador en el *software GeoGebra* y así obtener el primer boceto de la antena.

Para obtener un diseño más realista de la antena se utilizó *AutoCAD*, el cual permitió modelar en formato 2D el sistema *Cassegrain*. Además de lograr un modelado en 3D del subreflector, para su respectiva impresión.

Para verificar los parámetros de diseño, se procedió a realizar la simulación de la antena en el programa *GRASP*, en donde se puede observar que la componente de co-polarización aumentó su amplitud debido a la disminución de *cross-polarización* y también se obtuvo la disminución de la amplitud en los lóbulos laterales.

Al igual que en las pruebas con el simulador, en las pruebas de campo se obtuvo una reducción de la polarización cruzada, no en su totalidad porque hay que considerar que el simulador trabaja de manera ideal, es decir, no se toma en cuenta factores como la temperatura, tiempo, ubicación geográfica, etc.

En el país el campo de investigación de antenas, no se ha desarrollado, debido a que los elementos como: instrumentación, repuestos, convertidores, e incluso diseños, etc. se importan del extranjero. Lo cual dificulta el estudio de posibles cambios en el modelo de antenas.

5.2 Recomendaciones

En lo que respecta a los cálculos, para los parámetros de entrada deseados, se tomó en cuenta varias sugerencias de diferentes fuentes, en donde señalan que el valor de β no debe ser negativo, ya que esto produce excentricidades complejas o en el peor de los casos bloqueo del reflector principal por el *feed*.

Para realizar la toma de medidas del plato reflector se debe utilizar un calibrador para tener la forma exacta, ya que, si no se hace esto, no se puede ubicar al foco de la antena y demás elementos.

Para el diseño final del nuevo brazo de la antena *Cassegrain offset*, se debe tomar en cuenta tanto el material del mismo como su acabado final. Por ejemplo, para pintar el brazo se debe considerar utilizar colores neutros porque un color oscuro puede absorber las ondas electromagnéticas como ocurre con la luz.

La antena *Cassegrain* al tener una estructura compleja necesita de materiales especiales. Por esta razón se recomienda realizar el análisis económico, ya que su costo aumenta frente a la adquisición de una antena offset.

Debido a que el material *ABS* es plástico no es un conductor y no soporta altas temperaturas, por estos motivos se lo pinto con spray galvanizado al 93% de Zinc para poder reflejar la señal. Se recomienda utilizar un porcentaje mayor o en cuyo caso seleccionar materiales conductores como: cobre y aluminio.

Se debe utilizar *DC BLOCK* en la conexión entre la antena parabólica y el analizador de espectros para asegurar el tipo de banda de frecuencia en el que trabaja este componente coaxial, ya que si no se utiliza la banda correcta se puede correr el riesgo de dañar el analizador.

La calibración de los componentes del sistema *Cassegrain* y factores como el azimut, elevación y características del satélite al cual se quiere apuntar son fundamentales y críticos, ya que al mínimo movimiento se puede disminuir el nivel de señal receptado por la antena.

Se recomienda realizar un diseño desde cero de una antena *Cassegrain*, ya que la conversión al utilizar componentes existentes no se adaptan tan fácilmente para un nuevo diseño, lo cual hace que el objetivo principal sea más difícil de lograr.

REFERENCIAS

- Andrade, L. y Terán, R. (2012). Diseño y construcción de un diseño multi-recepción para televisión satelital aplicando varios receptores (LNB) sobre un reflector único. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4664/1/CD-4297.pdf>
- Antonio. (2008). *Scribd*. Recuperado el 04 de Octubre de 2017, de <https://es.scribd.com/doc/58919474/ANTENA-CASSEGRAIN>
- Arrancarcast. (s.f.). Telemetría. Recuperado el 28 de Octubre de 2017, de <http://www.qsl.net/eb3fym/arrancarcast.htm>
- AutoDesk. (2017). *AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK*. Recuperado el 06 de Diciembre de 2017, de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ESP/AutoCAD-Core/files/GUID-85FD1106-8F10-4EE8-B0FB-99F1E3AEE405-htm.html>
- Balanis, C. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design* (Tercera ed.). Hoboken, New Jersey, Estados Unidos: Wiley Interscience. Recuperado el 25 de Enero de 2018
- Bava, J. (2013). *Antenas reflectoras en microondas* (Primera ed.). La Plata, Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de La Plata. Recuperado el 02 de Octubre de 2017
- Brown, K. (1994). *A Design Procedure for Classical Offset Dual Reflector Antennas with Circular Apertures*. 1-9. IEEE. doi:10.1109/8.310006
- Carr, J. (2001). *Practical Antenna Handbook*. New York: McGraw-Hill. Recuperado el 27 de Enero de 2018
- Carrefour. (2017). Kit Antena DirecTV Prepago. Recuperado el 08 de Diciembre de 2017, de <https://www.carrefour.com.ar/directv-antena-06-mts.html>

- Carreta, R. (2016). Diseño de una antena con doble arreglo reflectivo tipo espirafase para la banda U. 1-73. México, México: UNAM. Recuperado el 21 de Octubre de 2017
- Ceceña, A. (2009). Red Satelital Banca Cremi S.A. 50 - 150. México D.F, México: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado el 26 de Diciembre de 2017
- Comunicaciones, S. (2013). Instalación y orientación antena de 60 cm DIRECTVLA. Recuperado de <http://servycoms.blogspot.com/2013/05/instalacion-y-orientacion-antena-de-60.html>
- Contreras, A. (2017). Qué es la impresión 3D, la tecnología que revoluciona la fabricación de todo tipo de objetos. *emol.Tecnología*, 1-2. Recuperado el 30 de Noviembre de 2017, de <http://www.emol.com/noticias/Tecnologia/2017/01/28/842042/Que-es-la-impresion-3D-la-tecnologia-que-revoluciona-la-fabricacion-de-todo-tipo-de-objetos.html>
- DigiSat. (2017). *Gregorian Earth Station Antenna System*. Recuperado de <https://www.digisat.org/asc-signal-4-9m-gregorian-earth-station-antenna-system>
- DirecTV. (s.f.). Instalación de DIRECTV Prepago. Recuperado el 29 de Diciembre de 2017, de <http://www.directv.com.ec/ayuda/articulos/1258/41/instalacion-de-directv-prepago>
- Erazo, E. (1998). Diseño y construcción de una antena parabólica prime focus, para recepción de TV Satelital. 1 - 192. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 14 de Octubre de 2017
- Evisos. (2017). *Planchas metálicas en acero inoxidable, aluminio y bronce*. Recuperado de <http://guayaquil.evisos.ec/planchas-metalicas-en-acero-inoxidable-aluminio-y-bronce-id-157538>

- Granet, C. (2002). *Designing Classical Offset Cassegrain or Gregorian Dual-Reflector Antennas from Combinations of Prescribed Geometric Parameters*. IEEE. doi:10.1109/MAP.2003.1282183
- Hallas, J. (2009). *Practical Antennas and Design*. Newington: ARRL. Recuperado el 25 de Enero de 2018
- Hernández, J. (1998). *Antenas: Principios básicos, análisis y diseño*. Mexicali, México: Universidad Autónoma de Baja California. Recuperado el 11 de Enero de 2018
- HP. (s.f.). *Agilent 8560 E-Series Spectrum Analyzers*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2017, de <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/Agilent-8563E-Datasheet.pdf>
- Huidrobo, J. (2013). *Revista digital Acta*. Recuperado el 04 de Octubre de 2017, de http://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf
- Ippolito, L. (2008). *Satellite Communications Systems Engineering*. Washington: John Wiley & Sons Ltd. Recuperado el 25 de Enero de 2018
- Lemoine, D. (2010). *PROPUESTA DE ANTENA PARABÓLICA QUE OPERE EN LA BANDA KU. 1 - 97*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Recuperado el 28 de Octubre de 2017
- Ludwig, A. (1973). *Definition of Cross Polarization*. 1-4. IEEE. Recuperado el 26 de Diciembre de 2017
- Magus, A. (2017). *Horn fed Gregorian Axisymmetrical dual reflector*. Recuperado de http://www.antennamagus.com/database/antennas/antenna_page.php?id=159
- Máquinas-Herramientas. (2013). *De máquinas y herramientas*. Recuperado de <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/corte-por-plasma-generalidades>

- Millán, J. (2014). Configuración de infraestructuras de sistemas de telecomunicaciones. Madrid, España: Paraninfo, S.A. Recuperado el 28 de Octubre de 2017
- Miranda, J. (2002). Ingeniería de microondas: técnicas experimentales. Madrid: Pearson Educación. Recuperado el 26 de Diciembre de 2017
- Mizugutch, Y. (1976). *Offset Dual Reflector Antenna*. 1-4. IEEE. doi:10.1109/APS.1976.1147539
- Omar8. (2011). Antena Parabólicas. Recuperado de <https://es.slideshare.net/omar8/antenas-parabolicas>
- Perez, A. (2014). Instalaciones de telecomunicaciones. Madrid, España: Paraninfo S.A. Recuperado el 12 de Noviembre de 2017
- Pérez, C. (2005). ANÁLISIS DE MODELOS DE ANTENAS PARA SATÉLITES. 1 - 122. Mexico: UNAM. Recuperado el 28 de Octubre de 2017
- Pérez, C. (2008). Antenas con Reflector Parabólico. 1-20. Santander, España: Universidad de Cantabria. Recuperado el 04 de Octubre de 2017
- Pérez, G. (2016). Polarización Cruzada en Antenas. Recuperado el 14 de Octubre de 2017, de <https://prezi.com/97xtrd4ahm-q/polarizacion-cruzada-en-antenas/>
- Radiación, G. (s.f.). Reflectores. Recuperado el 28 de Octubre de 2017, de <http://www.gr.ssr.upm.es/>
- Rodriguez, M. (2010). Polarización. Recuperado el 26 de Diciembre de 2017, de <https://es.slideshare.net/Toti711/polarizacin-3851314>
- Román, J. (2016). Implementación de un prototipo de antena receptora de televisión satelital, utilizando arreglos de antenas parabólicas tipo offset para el incremento de ganancia. 1-120. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 17 de Noviembre de 2017

- Ruiz, F. (1996). Antenas parabólicas. Perú: Grupo Planeta. Recuperado el 14 de Octubre de 2017
- TDT. (2017). Antenas parabólicas *offset*. Recuperado de <https://www.tdtprofesional.com/es/antena-parabolica-offset-130-cm-de-acero.html>
- Theory, A. (2015). *Polarization - EM Waves and Antennas*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2017, de <http://www.antenna-theory.com/basics/polarization.php>
- TICRA. (2015). TICRA-Productos. Recuperado de <http://www.ticra.com/products/software/grasp>
- Tomasi, W. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas (Vol. Cuarto). Phoenix, Estados Unidos: Pearson Educación. Recuperado el 25 de Enero de 2018
- UIT. (1995). UIT. Recuperado el 26 de Enero de 2018, de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sf/R-REC-SF.358-5-199510-W!!PDF-S.pdf
- Viwa. (2016). *VIWA CNC*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2017, de <http://viwacnc.com/index.php?seccion=articulo&art=48>
- Zamanillo, C. (2003). Fundamentos de televisión analógica y digital. 61-62. Universidad de Cantabria. Recuperado el 12 de Noviembre de 2017

ANEXOS

Costo del prototipo

Detalle	Cantidad	Precio Unitario	Valor total
Antena DIRECTV	1	65,00	65,00
Cable RG6 Coaxial de 10 m	1	10,00	10,00
Diseño <i>AUTOCAD</i>	1	50,00	50,00
Rollo ABS	1	40,00	40,00
Impresión en 3d	1	150,00	150,00
Masilla Mustang	1	26,35	26,35
Lija de agua	3	1,50	4,50
Catalizador	1	18,00	18,00
Spray Galvanizante en frio	1	18,48	18,48
Nuevo brazo (plancha de 80 x 60 cm con espesor de 6mm, mano de obra y pintura)	Varios	250,00	250,00
COSTO TOTAL			632,33

Datos técnicos *LNB*



Model Number	DTVGS
I/P Frequency	11.45-12.2 GHz
O/P Frequency	950-1700 MHz
LO Frequency	10.5 GHz
LO Initial Accuracy	$\pm 1\text{MHz @ } 25^\circ \text{C}$
LO Stability (-35°C to +52°C)	$\pm 2.0 \text{ MHz}$
LO Phase Noise	$< -50 \text{ dBc/Hz (@1kHz)}$
	$< 70 \text{ dBc/Hz (@10kHz)}$

Conversion Gain -35°C to	50 dB - 62 dB
Gain Variation	± 0.5 dB (max.)/24 MHz <7.5 5 dB (max.)/750 MHz
Image Rejection	40 dB
Third Order Intermodulation	-50 dBc (min.)
1 dB Compression Point	0 dBm
Polarization Selection	RHCP 10.5 - 14.0 VDC LHCP 15.0 - 21VDC
Output VSWR	2.5 : 1 max
Output Impedanc	75 W, F-female
DC Current	120 mA
Operating Temperature	-35°C to +52°C
hroat Size	31 mm

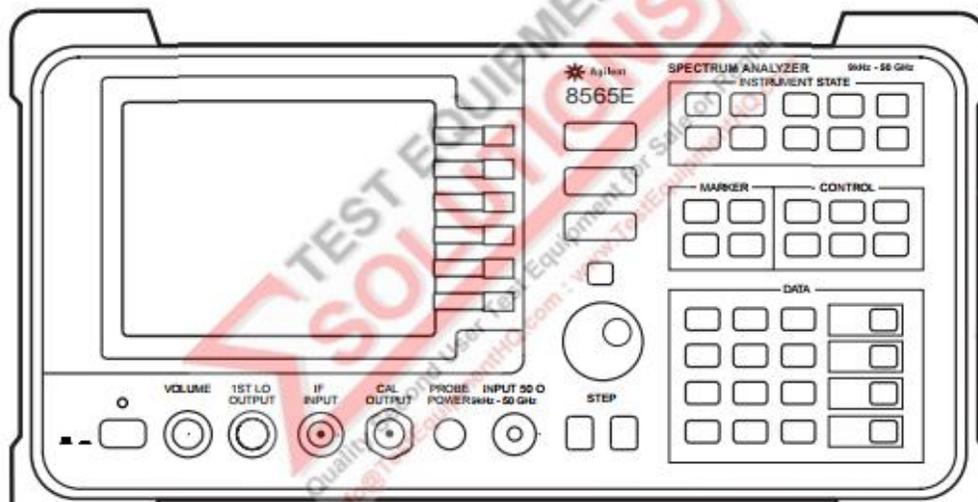
Datos técnicos analizador de espectros



Agilent 8560 E-Series Spectrum Analyzers

Data Sheet

8560E 30 Hz to 2.9 GHz
 8561E 30 Hz to 6.5 GHz
 8562E 30 Hz to 13.2 GHz
 8563E 30 Hz to 26.5 GHz
 8564E 30 Hz to 40 GHz
 8565E 30 Hz to 50 GHz



Unless noted, all specifications describe the instruments' warranted performance under the following conditions: 5-minute warm-up from ambient conditions, autocoupled controls, digital display, IF ADJ ON, REF LVL CAL adjusted, SECOND IF OUTPUT and 1ST LO OUTPUT terminated in 50 Ω. After a 30-minute warm-up, and over a temperature range of 20°C to 30°C, the preselector does not have to

be peaked at each signal of interest; under these conditions factory preselector peak values are sufficient to meet all specifications. Typical performance is nonwarranted. Supplemental characteristics are denoted by "nominal" and "approximately"; these constitute nonwarranted functional performance information derived during the design process and are not tested on a continuing basis.



Agilent Technologies

Innovating the HP Way

Frequency Range

	8560E	8561E	8562E	8563E	8564E	8565E
Internal Mixing	30 Hz** to 2.9 GHz	30 Hz** to 6.5 GHz	30 Hz** to 13.2 GHz	30 Hz* to 26.5 GHz	30 Hz* to 40 GHz	30 Hz* to 50 GHz
External Mixing	18 GHz to 325 GHz	18 GHz to 325 GHz	18 GHz to 325 GHz	18 GHz to 325 GHz	18 GHz to 325 GHz	18 GHz to 325 GHz

* 8563E, 8564E, 8565E require Option 006 for operation below 9 kHz.

** 8560E, 8561E, 8562E minimum frequency in AC coupled mode is 100 kHz. In DC coupled mode minimum frequency is 30 Hz.

Frequency Band

30 Hz to 2.9 GHz
2.75 GHz to 6.46 GHz
5.86 GHz to 13.2 GHz
12.4 GHz to 26.8 GHz
26.4 GHz to 31.15 GHz
31.0 GHz to 50 GHz

Harmonic Mixing Mode (N)

1
1
2
4
4
8

Frequency Counter Accuracy

Marker Count Accuracy $\pm(\text{marker freq} \times \text{freq ref accuracy} + 2 \text{ Hz} \times N^{***})$
(S/N ≥ 25 dB)
Accuracy at 1 GHz (25°C, 1 yr aging, marker resolution = 1 Hz) $\pm 225 \text{ Hz}$ (5 minute warmup)**
 $\pm 135 \text{ Hz}$ (15 minute warmup)**
 $\pm 3003 \text{ Hz}$ (Option 103)
Delta Count Accuracy $\pm(\text{delta freq} \times \text{freq ref accuracy} + 4 \text{ Hz} \times N^{***} + 2 \text{ LSD})$
Counter Resolution Selectable from 1 Hz to 1 MHz

Frequency Reference

Temperature Stability*

Aging (per year)
(per day nom.)

Initial Achievable Accuracy

Short-term warmup

accuracy factors (nominal)

5 minute

15 minute

$\pm 1 \times 10^{-9}$

$\pm 1 \times 10^{-7}$

$\pm 5 \times 10^{-10**}$

$\pm 2.2 \times 10^{-8}$

$\pm 1 \times 10^{-7}$

$\pm 1 \times 10^{-8}$

Opt. 103

$\pm 1 \times 10^{-5}$

$\pm 2 \times 10^{-5}$

$\pm 1 \times 10^{-3}$

Frequency Span

Range

0, 100 Hz to full span
(100 Hz $\times N^*$ when using external mixers)

Accuracy

Span $> 2 \text{ MHz} \times N^*$

$\pm 5\%$

Span $\leq 2 \text{ MHz} \times N^*$

$\pm 1\%$

* -10°C to +55°C, referenced to 25°C

** after 7-day warmup

Frequency reference accuracy = aging x time since last adjustment + initial achievable accuracy + temperature stability

** Short term warmup accuracy factors have been included in this calculation.

*** N = harmonic mixing mode number

** N = harmonic mixing mode number

Frequency Readout Accuracy

(Start, Stop, Center, and Marker frequency functions)

Span $> 2 \text{ MHz} \times N^*$

$\pm(\text{freq readout} \times \text{freq ref accuracy}^{**})$
 $+5\% \times \text{span} + 15\% \times \text{RBW} + 10 \text{ Hz}$

Span $\leq 2 \text{ MHz} \times N^*$

$\pm(\text{freq readout} \times \text{freq ref accuracy}^{**})$
 $+1\% \times \text{span} + 15\% \times \text{RBW} + 10 \text{ Hz}$

* N = harmonic mixing mode number

** Frequency reference accuracy = aging x time since last adjustment + initial achievable accuracy + temperature stability

* N = harmonic mixing mode number

** Frequency reference accuracy = aging x time since last adjustment + initial achievable accuracy + temperature stability

Frequency Specifications, continued

Sweep Time

Range

Span = 0 Hz 50 μ s to 6000 s

Span \pm 100 Hz

RBW \geq 300 Hz 50 ms to 2000 s

RBW \leq 100 Hz 50 ms to 100 ks

Accuracy (Span = 0 Hz)

Sweep time \geq 30 ms \pm 1% (digitized trace data)

Sweep time < 30 ms \pm 10% (analog trace data)

(non-Option 007)

Sweep time < 30 ms \pm 0.1% (digitized trace data)

(Option 007*)

Sweep Trigger

delayed, free run, single,
line, video, external

* Option 007 extends digitized trace data capability to sweep times < 30 ms.

Resolution Bandwidth

Range (-3 dB) 1 Hz to 1 MHz in a 1, 3, 10 sequence
and 2 MHz (3 MHz at -6 dB)

Option 103 10 Hz to 1 MHz in a 1, 3, 10 sequence
and 2 MHz (3 MHz at -6 dB)

Accuracy
1 Hz to 300 kHz \pm 10%
1 MHz \pm 25%
2 MHz $+50\%$, -25%

Selectivity (-60 dB/ -3 dB BW ratio)

RBW \geq 300 Hz < 15:1

RBW \leq 100 Hz < 5:1

Video Bandwidth
Range 1 Hz to 3 MHz in a 1, 3, 10 sequence

Noise Sidebands (see figure 1)

Center Frequency \leq 1 GHz

Offset

100 Hz \leq 88 dBc/Hz*

1 kHz \leq 97 dBc/Hz*

10 kHz* \leq 113 dBc/Hz**

30 kHz*^{###} \leq 113 dBc/Hz***

100 kHz** \leq 117 dBc/Hz****

Opt. 103

\leq 70 dBc/Hz*

\leq 90 dBc/Hz*

\leq 113 dBc/Hz**

\leq 113 dBc/Hz***

\leq 117 dBc/Hz****

* Add $5.2 \times ((f/1 \text{ GHz}) - 1)$ for $f > 1 \text{ GHz}$ and $f \leq 2.9 \text{ GHz}$

** Add $2.5 \times ((f/1 \text{ GHz}) - 1)$ for $f > 1 \text{ GHz}$ and $f \leq 2.9 \text{ GHz}$

*** Add $3.0 \text{ dB} \times ((f/1 \text{ GHz}) - 1)$ for $f > 1 \text{ GHz}$ and $f \leq 2.9 \text{ GHz}$

**** Add 2 dB for $f > 1 \text{ GHz}$ and $f \leq 2.9 \text{ GHz}$

RBW \leq 1k or Span \leq 745 kHz

RBW \geq 3k or Span $>$ 745 kHz

Not specified at 30 kHz offset for 8564E and 8565E

Residual FM

(zero span, 10 Hz RBW)

< 1 Hz pk-pk \times N* in 20 ms

< 0.25 Hz pk-pk \times N* in 20 ms
(typical)

Option 103

< 10 Hz pk-pk \times N* in 20 ms

* N = harmonic mixing mode number

** Frequency reference accuracy = aging \times time since last adjustment + initial achievable accuracy + temperature stability

Amplitude Specifications, Agilent 8560 E-Series

Range Displayed Average Noise Level to +30 dBm

Maximum Safe Input Level

Average Continuous Power +30 dBm (1 W, input attn ≥ 10 dB)
Peak Pulse Power +50 dBm (100 W, input attn ≥ 30 dB)
 (≤ 10 μs pulse width, < 1% duty cycle)

Maximum DC Input Voltage

DC coupled ±0.2 Vdc
 AC coupled ±50 Vdc

1 dB Gain Compression

Maximum power at mixer =
 input power (dBm) – input attenuation (dB)
 10 MHz to 2.9 GHz –5 dBm
 2.9 GHz to 6.46 GHz +0 dBm*
 6.46 GHz to 26.8 GHz –3 dBm
 26.8 GHz to 50 GHz +0 dBm (nominal)

* 8561E: -3 dBm

Displayed Average Noise Level (DANL) (see figure 2)

(0 dB attenuation, 1 Hz resolution bandwidth*)

	8560E	8561E	8562E	8563E	8564E, 8565E
30 Hz**	≤ 90 dBm				
1 kHz**	≤ 105 dBm				
10 kHz	≤ 120 dBm				
100 kHz	≤ 120 dBm				
1 MHz to 10 MHz	≤ 140 dBm				
10 MHz to 2.9 GHz	≤ 151 dBm	≤ 145 dBm	≤ 151 dBm	≤ 151 dBm	≤ 145 dBm
2.9 GHz to 6.46 GHz		≤ 145 dBm	≤ 148 dBm	≤ 148 dBm	≤ 147 dBm
6.46 GHz to 13.2 GHz			≤ 145 dBm	≤ 145 dBm	≤ 143 dBm
13.2 GHz to 22.0 GHz				≤ 140 dBm	≤ 140 dBm
22.0 GHz to 26.8 GHz				≤ 139 dBm	≤ 136 dBm
26.8 GHz to 31.15 GHz					≤ 139 dBm
31.15 GHz to 40 GHz					≤ 130 dBm
40 GHz to 50 GHz					≤ 127 dBm

* For Option 103, degrade DANL by 10 dB

** 8563E, 8564E, 8565E require Option 006 for operation below 9 kHz.

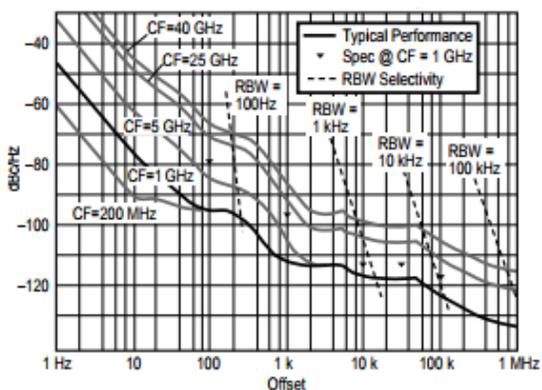


Figure 1. Noise sidebands normalized to 1 Hz BW versus offset from carrier.

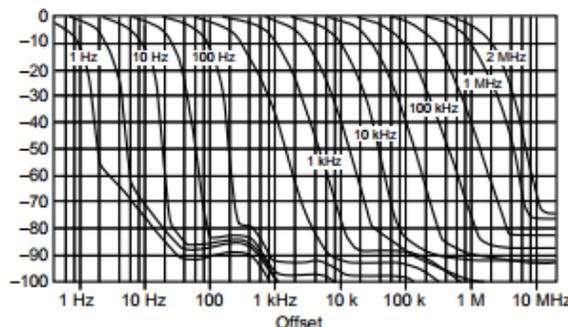


Figure 2. Typical on-screen dynamic range vs offset from 1 GHz center frequency for all RBWs (mixer level = -10 dBm).

Amplitude Specifications, continued

Dynamic Range (see figure 3)

Compression to Noise*	8560E	8561E	8562E	8563E	8564E, 8565E
10 MHz to 2.9 GHz	> 146 dB	> 140 dB	> 146 dB	> 144 dB	> 145 dB
2.9 GHz to 6.46 GHz		> 142 dB	> 148 dB	> 148 dB	> 147 dB
6.46 GHz to 13.2 GHz			> 142 dB	> 142 dB	> 140 dB
13.2 GHz to 22.0 GHz				> 137 dB	> 137 dB
22.0 GHz to 26.8 GHz				> 136 dB	> 133 dB
26.8 GHz to 31.15 GHz					> 139 dB
31.15 GHz to 40 GHz					> 130 dB
40 GHz to 50 GHz					> 127 dB

* (1dB compression - DANL) For Option 103, degrade compression to noise dynamic range by 10 dB.

Signal to Distortion

Harmonic*	8560E	8561E	8562E	8563E	8564E, 8565E
20 MHz to 1.45 GHz	> 95 dB	> 88.5 dB	> 95 dB	> 94 dB	> 92 dB
1.45 GHz to 2 GHz		> 98.5 dB	> 111.5 dB	> 111.5 dB	> 111 dB
2 GHz to 3.25 GHz		> 119 dB	> 119 dB	> 119 dB	> 113.5 dB
3.25 GHz to 6.6 GHz			> 117.5 dB	> 117.5 dB	> 111.5 dB
6.6 GHz to 11 GHz				> 115 dB	> 110 dB
11 GHz to 13.4 GHz				> 114.5 dB	> 108 dB
13.4 GHz to 15.6 GHz					> 109.5 dB
15.6 GHz to 20 GHz					> 105 dB
20 GHz to 25 GHz					> 103.5 dB

* 0.5 x (SHI - DANL at 2 x input frequency) For Option 103, degrade harmonic (SHI) dynamic range by 5 dB.

Intermodulation*	8560E	8561E	8562E	8563E	8564E, 8565E
10 MHz to 2.9 GHz	> 108 dB	> 103 dB	> 108 dB	> 107 dB	> 104 dB
2.9 GHz to 6.46 GHz		> 107 dB	> 108.5 dB	> 108.5 dB	> 108 dB
6.46 GHz to 13.2 GHz			> 101.5 dB	> 101.5 dB	> 100 dB
13.2 GHz to 22.0 GHz				> 98 dB	> 98 dB

