

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Diseño, simulación y construcción de una
antena Uda-Yagi para la recepción del canal
39 en la Dirección Provincial de Radiocuba
Santiago.**

Autor: Arnaldo López Tamayo.

Tutores: Ing. Enaide Maine Calzado.

Msc. Eduardo Gracial Cleger.

Santiago de Cuba

Junio 2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Diseño, simulación y construcción de una antena
Uda-Yagi para la recepción del canal 39 en la
Dirección Provincial de Radiocuba Santiago.**

Autor: Arnaldo López Tamayo.

Arnaldo.lopez@tle.uo.edu.cu

Tutores: Ing. Enaide Maine Calzado.

Prof. Instructor, Departamento de Telecomunicaciones, ezerum@fie.uo.edu.cu.

Msc. Eduardo Gracial Cleger.

Departamento de Planta Exterior, Radiocuba, Santiago

Consultantes: Msc. Rafael Selva Castañeda.

Prof. Asistente, Departamento de Telecomunicaciones, aselva@fie.uo.edu.cu

Ing. Yanet Almaguer Lora.

Prof. Instructor, Departamento de Telecomunicaciones, yanet@fie.uo.edu.cu

Santiago de Cuba

Junio 2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

PENSAMIENTO

Solo en momentos de crisis es más importante la imaginación que el conocimiento.

Albert Einstein.

DEDICATORIA

A la persona que más quiero en este mundo a mi Abuela Inés María Isaac Chacón.

AGRADECIMIENTOS

A Dios a la Virgen de la Caridad del Cobre.

A mis abuelos maternos y paternos en especial a mi abuela Inés y mi abuelo José Antonio por criarme y siempre estar allí cuando los necesité.

A mis padres Arnaldo y Mónica por su apoyo incondicional.

A mis tíos José Andrés y María Antonia por sus valiosos consejos y ayuda.

A mis hermanas Ana Claudia y Leisi y a mi primo David por su apoyo moral.

A Ana María Abraham Serguienko por ser mi amiga, mi novia, mi bastón, mi cómplice, mi motivación, por su apoyo incondicional, en fin mi razón de ser en todos estos años.

A Ibrahin, Tatiana, Charles, Valentín, Marita por su ayuda y aliento.

A mis amigos del barrio Eduardito, Daibel, Angel, Osmel por su apoyo y ayuda incondicional.

A mis amigos y compañeros del cuarto Eric, Andrés, Rafael, Albertico, Héctor por su grata compañía, ayuda y apoyo en los momentos difíciles.

A todo el grupo de telecomunicaciones en especial a Espronceda, Hamlet, Javier, Babastro, Ballester, Mario, Rolando Peña, Karel, Hassan, Julio, Lalé, Obed, Jorge (Luki), Bello, Máximo, Adrián, Hernán, José Miguel (Ratopin), Panchi, Félix, Fernando (ya graduado) por ayudarme de una forma u otra a llegar al final, por aguantarme, de verdad gracias.

A Danais por ayudarme con la ortografía.

A el colectivo de profesores del Departamento de Electrónica en especial al profesor Garrido por sus consejos y al profesor Héctor por su paciencia.

A el colectivo de profesores del Departamento de Radio en especial al profesor Selva, a la profesora Yanet y al profesor Enaide por su ayuda en mi trabajo de Diploma.

A mi tutor de la producción Eduardo Gracial por toda su ayuda incondicional y sus consejos.

A todos aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron con su granito de arena para que todo esto fuera posible (estas personas saben quiénes son y por supuesto yo también, GRACIAS).

RESUMEN

El presente trabajo de diploma se realiza una descripción de los principales parámetros de las antenas, haciendo énfasis en las antenas Uda-Yagi, se muestra detalladamente como se lleva a cabo el diseño de la misma, así como la simulación apoyándonos en el software profesional HFSS. Posteriormente se muestra minuciosamente la forma en que fue construida, las herramientas que se utilizaron y el procedimiento a seguir para ello. Finalmente se da a conocer como dicha antena fue medida en laboratorio de Altas Frecuencias, donde las mediciones dan a conocer la fiabilidad de la antena construida.

Palabras clave: antenas Uda-Yagi, software profesional HFSS, laboratorio de Altas Frecuencias.

ABSTRACT

This dissertation first makes a description of the main parameters of the antennas, emphasizing the Yagi-Uda antennas, others are shown in detail as is done in the same design and simulation software relying on professional HFSS. Subsequently thoroughly shows how it was built, the tools used and the procedure for this. Finally it disclosed as the antenna was measured in High Frequency laboratory where measurements disclosed reliability antenna constructed.

Keywords: Yagi-Uda antennas, professional HFSS software, High-Frequency laboratory.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS ANTENAS. ANTENAS UDA-YAGI.....	5
1.1 Definición de antena	5
1.2 Parámetros principales de las antenas	6
1.2.1 Patrón de radiación	7
1.2.2 Lóbulos de los patrones de radiación.....	9
1.2.3 Impedancia de entrada	10
1.2.4 Directividad	11
1.2.5 Ganancia	13
1.2.6 Eficiencia	14
1.2.7 Resistencia de radiación.....	14
1.2.8 Ancho de banda	16
1.3 Aspectos de la antena Yagi	17
1.3.1 Evoluciones de la antena Uda-Yagi.....	19
1.3.2 Propiedades eléctricas.....	20
1.3.3 Polarización	21
1.3.4 Impedancia.....	21
1.3.5 Resonancia.....	21
1.3.6 Patrón de radiación	22
CAPÍTULO 2. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA UDA-YAGI PARA LA RECEPCIÓN DEL CANAL 39.....	23
2.1 Diseño de la antena Uda-Yagi.....	23
2.2 Simulación de la Antena Uda-Yagi.....	25
2.3 Construcción de la antena Uda-Yagi.....	31
2.3.1 Materiales.....	31
2.3.2 Herramientas.....	31
2.3.3 Método de construcción.....	31
2.3.4 Diseño del Acoplador Gamma.....	33
2.4 Análisis económico	40

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
Referencias Bibliográficas	42
GLOSARIO DE TÉRMINOS	43

INTRODUCCIÓN

La tecnología ha experimentado un sin número de cambios, hoy en día tenemos muchos avances enfocados a las comunicaciones, los cuales nos ayudan a tener una vida más cómoda. Desde tiempos pasados hasta la actualidad el desarrollo de la tecnología aplicada a las comunicaciones ha ido evolucionando, ayudando al progreso del ser humano.

Desde hace ya algún tiempo el ser humano buscaba que la comunicación entre la sociedad fuera clara y lo más rápida posible, aunque esto no ocurrió de la noche a la mañana, se puede decir que el proceso se va dando a pasos agigantados.

A principios del siglo XIX los científicos establecieron que la electricidad y el magnetismo son fenómenos relacionados. En 1820 Hans Oersted descubre que una brújula se deflacta cuando se coloca cerca de un circuito de corriente eléctrica, después en 1831, Michael Faraday, y simultáneamente, Joseph Henry, demuestran que, cuando un magneto o imán se mueve cerca de un alambre, una corriente eléctrica se observa en el mismo alambre, en ese mismo siglo se dieron dos predicciones, una fue que los campos electromagnéticos podían viajar a través del espacio y la otra de que la luz es una onda electromagnética.

Posteriormente en 1873, James Clerk Maxwell usó estas observaciones y otros factores experimentales como base para seleccionar un conjunto de cuatro ecuaciones (originalmente 20 ecuaciones) que describen por completo los fenómenos electromagnéticos, poco tiempo después alrededor de 1888 Heinrich Hertz verifica las predicciones de Maxwell produciendo ondas electromagnéticas en un laboratorio, Hertz utilizó un dipolo alimentado en su centro con las descargas de una bobina. Como antena receptora usó una espira cuadrada con un entrehierro en el que se producían descargas. Hertz consiguió sintonizar el sistema añadiendo esferas a los brazos del dipolo, equivalentes a una carga capacitiva y bobinas en serie y condensadores en paralelos a la espira receptora.

El físico francés Edouard Branly construyó en 1891 el primer receptor de ondas electromagnéticas al que denominó cohesor. Consistía en un tubo lleno de limaduras de hierro conectado a una pila y un galvanómetro.

En 1926 fue inventada la antena Yagi-Uda por Shintaro Uda de la Universidad Imperial de Tohoku, Sendai, Japón, con la colaboración de Hidetsugu Yagi, también de la Universidad Imperial de Tohoku (de ahí al nombre Yagi-Uda). Esta invención "de quitar la tierra" a las ya convencionales antenas, produjo que mediante una estructura simple de dipolo, combinado con elementos parásitos, conocidos como reflector y directores, logró construir una antena de muy alto rendimiento.

A partir de la antena dipolo de media onda es posible lograr antenas que radien o reciban las ondas electromagnéticas en un haz estrecho, lo que permite concentrar en un punto toda la energía, logrando de esta manera que la intensidad de campo en un punto sea mucho mayor que la que se obtendría con otra antena de la misma potencia. Esta antena está constituida por varios elementos paralelos y coplanarios, directores, activos y reflectores, se utilizan ampliamente en la recepción de señales televisivas. Los elementos directores dirigen el campo eléctrico, los activos radian el campo y los reflectores lo reflejan.

La invención del Dr. Yagi no fue usada en Japón en un principio, ya que el diseño de la antena no fue para implementarse en las comunicaciones sino para utilizarse en la guerra como un arma radioactiva. Yagi experimentaba con ratones a los que sometía a fuertes ondas de radio que eran concentradas gracias a la direccionalidad de la antena.

Hidetsugu Yagi intentó la transferencia inalámbrica de energía en febrero de 1926 con esta antena. Yagi y Uda publicaron su primer informe sobre la proyección de onda de la antena direccional. Yagi publicó la primera referencia en idioma Inglés de la antena en un artículo de 1928 y llegó a ser asociada con su nombre. Sin embargo, El mismo reconoció el principal aporte de Uda para el diseño y el nombre propio para la antena es el de antena Yagi-Uda.

Fue aceptada en Europa y Norteamérica, en donde se incorporó a la producción comercial, de los sistemas de difusión, TV y otros. El uso de esta antena en Japón solo comenzó a utilizarse durante la Segunda Guerra Mundial, el primero que la utilizó durante esta etapa fue Yagi para el funcionamiento aerotransportado del conjunto radares, debido a su simplicidad y direccionalidad. A pesar de ser inventado en Japón, muchos ingenieros

de radar japonés estaban al tanto del diseño hasta muy tarde en la guerra, debido a los enfrentamientos internos entre el Ejército y la Armada. Las autoridades militares japonesas tuvieron conocimiento de esta tecnología después de la Batalla de Singapur cuando capturaron las notas de un técnico de radar británico que mencionó "Yagi antenna". Oficiales de inteligencia japoneses ni siquiera reconocen que Yagi fue un nombre japonés, en este contexto. Al ser interrogado, el técnico dijo que era una antena con el nombre de un profesor japonés.

Las Antenas Yagi siguen utilizándose para la recepción de radio frecuencia, y son ampliamente utilizados para recibir señales de televisión.

Actualmente las antenas Yagi-Uda son ampliamente utilizadas por los radioaficionados, son ampliamente utilizados para recibir señales de televisión y para comunicaciones en frecuencias de onda corta, VHF/UHF, recepción de radio frecuencia y en bandas de microondas.

Antecedentes del problema

El Centro de Dirección Provincial (CDP) de la Empresa Radiocuba División Santiago de Cuba realiza el monitoreo de los parámetros de las señales de radio y televisión a nivel provincial, la mayoría de las transmisiones de televisión están ubicadas en el Centro Internacional de Transmisiones de señal de televisión y frecuencia modulada del Puerto Boniato, donde se utiliza una antena Yagi para la recepción de los canales 15, 21 y 27 en la banda de UHF. El (CDP) necesita monitorear la señal de televisión del canal 39 correspondiente a la estación comunitaria de Santiago de Cuba donde se transmite multivisión. La no existencia de un transmisor en el Puerto Boniato, debido a que este se encuentra en el estudio de televisión de Teleturquino, por la disposición espacial que este centro tiene con respecto a Puerto Boniato con una sola antena dirigida a este último no se puede realizar una recepción eficiente de los parámetros de la señal del canal 39 ya que cae fuera del lóbulo principal de la antena que se dispone para Puerto Boniato esto exige que para hacer una recepción eficiente de dicha señal sea necesario una antena específica para la recepción de este canal en dicho centro.

Problema a resolver

En la Dirección Provincial de Radiocuba Santiago no existe una antena que permita la recepción eficiente de la señal del canal 39 de televisión.

Objeto de estudio

Sistemas de Radiocomunicaciones.

Objetivo

Realizar el diseño, construcción y medición de una antena Uda-Yagi para la recepción del canal 39 de televisión que garantice una detección eficiente de dicha señal.

Hipótesis.

Si se realiza el diseño y construcción de una antena Uda-Yagi para la recepción del canal 39 de televisión se podrá realizar el correcto monitoreo de dicha señal en la Dirección Provincial de Radiocuba Santiago.

CAPÍTULO 1. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS ANTENAS. ANTENAS UDA-YAGI.

En el presente capítulo se harán referencia a los principales parámetros de las antenas y se dará su definición.

1.1 Definición de antena

Una antena se define [1]:

- Según el diccionario Webster como “Un dispositivo metálico (tal como una varilla o un alambre) para radiar o recibir ondas de radio”.
- Según la IEEE (Institute of Electronic and Electrical Engineers) como: “Dispositivo para radiar o recibir ondas de radio”.

Una antena es un conductor de longitud definida que se coloca al final de la línea de transmisión, y que se encarga de transmitir al ambiente y recibir, la señal suministrada por el equipo. De todos los elementos de una estación, la antena es el que posee el comportamiento menos predecible, esto debido a que interacciona fuertemente con todo lo que lo rodea [2].

En otras palabras, las antenas son estructuras de transición en que las ondas de radio pasan de la propagación guiadas por una línea de transmisión a la propagación en el espacio libre o viceversa, tal como se observa en la Figura 1.1 [1].

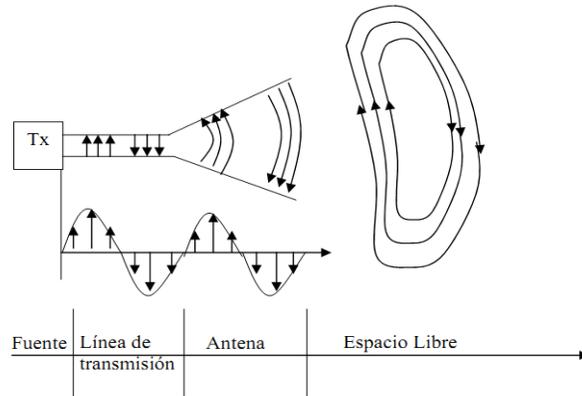


Figura 1.1. Radiación de ondas de radio. (Fuente: [1])

Las antenas además de recibir o transmitir energía en forma de ondas de radio también tienen la función de optimizar o acentuar la radiación de energía en algunas direcciones o suprimirlas en otras. Es decir que las antenas además de ser dispositivos emisores y receptores de energía electromagnética, también son dispositivos direccionales. Las antenas pueden adoptar formas muy diversas para cumplir con los requisitos de diseño y además estar constituida de muy diversos materiales [1].

1.2 Parámetros principales de las antenas

Las antenas se describen mediante la definición de varios parámetros, los cuales en ocasiones están interrelacionados entre sí y de los cuales ninguno de ellos por sí solo logra dar una descripción completa de su comportamiento [1].

Entre los parámetros primarios se encuentran:

- Característica direccional de radiación, del cual a su vez se han derivado los tres parámetros primarios siguientes:
 - Patrón de radiación.
 - Patrón de fase.
 - Patrón de polarización.
- Resistencia de radiación.
- Eficiencia.
- Impedancia de entrada.

Los parámetros secundarios son [1]:

- Ancho del lóbulo principal.

- Ancho del lóbulo principal entre los nulos.
- Coeficiente de radiación secundaria, de los cuales a su vez se pueden derivar los siguientes casos particulares:
 - Coeficiente de radiación trasera.
 - Coeficiente de radiación lateral.
 - Coeficiente de radiación transversal.
- Directividad.
- Ganancia.
- Ancho de banda de trabajo.

1.2.1 Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena, se define como, la representación gráfica de las características de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos el patrón de radiación se determina en las zonas de los campos lejanos o zonas de los campos de radiación y es representado como una función de las coordenadas direccionales [1].

En términos generales, el patrón de radiación de una antena es también su patrón de recepción. Cuando una antena emite, actúa como un lente, concentrando la señal en ciertas direcciones. Cuando una antena recibe, actúa como un embudo, concentrando la señal de solo ciertas direcciones [2].

Las propiedades de radiación se pueden analizar, mediante una de las siguientes magnitudes con resultados equivalentes [1]:

\vec{P} -Densidad de potencia de radiación o vector de Poynting.

\vec{U} -Intensidad de radiación.

\vec{E} -Intensidad de campo eléctrico de radiación.

Todas las magnitudes anteriores tienen carácter vectorial. Las propiedades de radiación de una antena se determinan, generalmente, por la distribución espacial tridimensional de la energía de las ondas de radio que atraviesan una esfera de observación de radio constante alrededor de esta. Por tanto es conveniente escoger una esfera de observación de radio R suficientemente grande ($r \gg \lambda$) para estar en la zona de radiación lejana y en cuyo centro se encuentra la antena, tal como se observa en la Figura 1.2 [1].

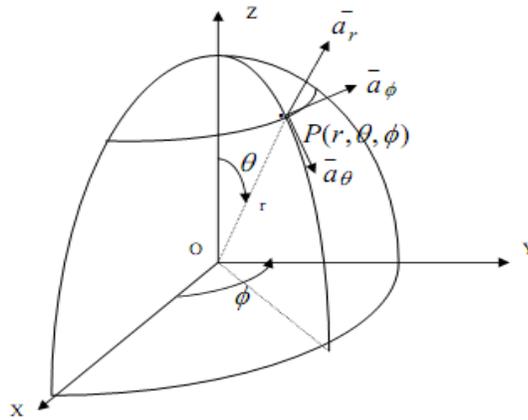


Figura 1.2. Esfera de observación de los patrones de radiación. (Fuente: [1])

Las características de radiación en función de la densidad de potencia o del campo eléctrico se pueden separar en tres factores que describen completamente la distribución angular de la amplitud, fase y polarización de dichas magnitudes [1].

En el caso de la densidad de potencia se tiene [1]:

$$\vec{P}(\Theta, \Phi) = P(\Theta, \Phi) * \vec{p}(\Theta, \Phi) * e^{j\theta(\Theta, \Phi)} \quad (1.1)$$

Donde:

$\vec{P}(\Theta, \Phi)$ - Densidad de potencia o vector de Poynting compleja sobre la esfera de observación en la dirección (Θ, Φ) .

$P(\Theta, \Phi)$ - Módulo de amplitud de la densidad de potencia.

$\vec{p}(\Theta, \Phi)$ - Es el vector unitario que tiene que ver con la dirección del vector \vec{P} sobre la esfera de observación y también se le conoce como patrón de polarización.

$\theta(\Theta, \Phi)$ - Caracteriza la variación de la fase de la componente principal de la polarización sobre la esfera de observación, y se le conoce como patrón de fase.

En el caso del campo eléctrico, de igual forma [1]:

$$\vec{E}(\Theta, \Phi) = E(\Theta, \Phi) * \vec{p}(\Theta, \Phi) * e^{j\theta(\Theta, \Phi)} \quad (1.2)$$

Donde:

$\vec{E}(\Theta, \Phi)$ - Es la intensidad del campo eléctrico compleja sobre la esfera de observación en la dirección (Θ, Φ) .

$E(\theta, \phi)$ - Módulo de amplitud de intensidad del campo y se le conoce como patrón de radiación de amplitud.

Al módulo de amplitud de la densidad de potencia $P(\theta, \phi)$ o de la intensidad del campo eléctrico $E(\theta, \phi)$ se le conoce como patrón de radiación de amplitud o simplemente patrón de radiación. Los patrones de radiación tridimensional pueden ser medidos y graficados mediante una serie de patrones bidimensionales. Sin embargo para la mayoría de las aplicaciones prácticas, es suficiente con el trazado de unos pocos patrones de radiación bidimensionales en función de θ para algunos valores particulares de ϕ , más algunos como función de ϕ para algunos valores de θ [1].

Se define como patrón de radiación de amplitud o simplemente como patrón de radiación al módulo de la densidad de potencia $P(\theta, \phi)$ o del campo eléctrico $E(\theta, \phi)$ en todas las direcciones angulares θ y ϕ sobre la esfera de observación de radio suficientemente grande para estar en la zona de los campos lejanos o de radiación. [1]

1.2.2 Lóbulos de los patrones de radiación

Los patrones de radiaciones de las antenas, generalmente no son uniformes, ya que en una dirección se incrementa su radiación y en otras se anulan, obsérvese la Figura 1.3. La radiación en cada uno de esos sectores se le conoce como lóbulos. Los lóbulos se clasifican por sus dimensiones y posición en [1]:

- Lóbulo principal.
- Lóbulos secundarios.
- Lóbulos laterales.
- Lóbulos traseros.

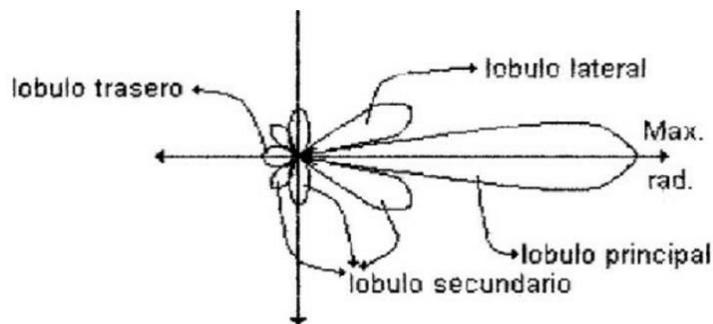


Figura 1.3. Principales lóbulos del patrón de radiación. (Fuente: [1])

El lóbulo principal: Es el que contiene la región de máxima radiación. Hay antenas en que puede existir más de un lóbulo principal.

Los lóbulos secundarios: Incluyen todos los lóbulos de radiación de una antena excepto el lóbulo principal.

Los lóbulos laterales: Son aquellos lóbulos secundarios con su radiación máxima a los lados del lóbulo principal y generalmente son los mayores entre los lóbulos secundarios.

Lóbulo trasero: Es el lóbulo secundario situado en la dirección opuesta a la del lóbulo principal. La radiación de una parte de la potencia total a través de los lóbulos secundarios en general o en particular en los lóbulos laterales o en el lóbulo trasero tiene carácter indeseable y se desea que tenga un valor mínimo. Para su control se definen varios parámetros secundarios derivados del patrón de radiación como una relación o un coeficiente entre el valor máximo de dichos lóbulos con respecto al valor máximo del lóbulo principal tales como [1]:

- El coeficiente de radiación secundaria.
- El coeficiente de radiación lateral.
- El coeficiente de radiación trasero.

1.2.3 Impedancia de entrada

Cuando una antena se excita en su entrada por un generador de radiofrecuencia con una diferencia de tensión V , aparece en esta una corriente de excitación I_a tal como se observa en la Figura 1.4 [1].

La impedancia de entrada se define como la relación entre dichas magnitudes, o sea [1]:

$$Z_{ent} = \frac{V}{I_a} \quad (1.3)$$

Donde:

V - Voltaje de excitación o alimentación de la antena.

I_a - Corriente de alimentación que toma la antena.

En general esa magnitud es compleja, o sea:

$$Z_{ent} = R_{ent} \pm jX_{ent} \quad (1.4)$$

Donde:

Z_{ent} - Impedancia de entrada.

R_{ent} - Resistencia de entrada.

X_{ent} - Reactancia de entrada.

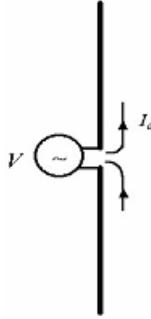


Figura 1.4. Corriente de antena originada por la fuente V. (Fuente: [1])

Una vez conocida la distribución de corriente $I_z(z)$ en la antena la impedancia de entrada se calcula de la forma siguiente [1]:

$$Z_{ent} = \frac{V}{I_z(Z=0)} \quad (1.5)$$

La impedancia de una antena es una especie de resistencia que posee toda antena, y de hecho todo sistema eléctrico, y que se deriva del efecto combinado de resistencia de los elementos, reactancias capacitivas y reactancias inductivas. La impedancia afecta la transferencia de energía entre las diferentes partes de un sistema de radio. En cuanto a impedancia, la regla general es que para lograr una máxima transferencia de energía a la antena, la impedancia de la antena debe ser igual a la impedancia de la línea de transmisión, la cual debe ser igual a la impedancia del equipo de radio [2].

1.2.4 Directividad

La directividad es un parámetro secundario de las antenas ya que depende de la forma del patrón de radiación. En ella se establece una comparación entre la densidad de radiación máxima de una antena con respecto a otra tomada como referencia y bajo la condición de que la potencia total radiada sea la misma [1].

En muchos casos se toma como referencia la antena isotrópica, lo que equivale a comparar la antena contra su valor promedio. En otros casos se toma como elemento de comparación una antena Dipolo Simétrico ideal de media longitud de onda.

En esencia, la directividad es uno de los parámetros eléctricos que contribuye a la cuantificación de las propiedades direccionales que poseen todas las antenas [1].

Si se tiene en cuenta la densidad de potencia radiada, la directividad se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$D = \frac{P_{max}}{P_0} \Big|_{W_r=W_0} \quad (1.6)$$

Donde:

P_{max} - Densidad de potencia máxima de la antena.

P_0 - Densidad de potencia máxima de la antena de referencia.

W_r - Potencia total radiada por la antena.

W_0 - Potencia total radiada por la antena de referencia.

Como:

$$P = \left| \frac{E^2}{2 * \eta} \right| W/m \quad (1.7)$$

Si se tiene en cuenta el campo eléctrico la ecuación de la directividad queda de la forma siguiente:

$$D = \frac{E_{max}}{E_0} \Big|_{W_r=W_0} \quad (1.8)$$

La directividad también se puede definir si se tiene en cuenta la intensidad de radiación.

$$D = \frac{U_{max}}{U_0} \Big|_{W_r=W_0} \quad (1.9)$$

El significado físico de la directividad corresponde a cuántas veces es mayor la radiación en una dirección de la antena en cuestión con respecto a la antena de referencia [1].

En la Figura 1.5 se muestra un ejemplo donde la directividad alcanza un valor de 5 veces. Este parámetro generalmente se expresa en dB.

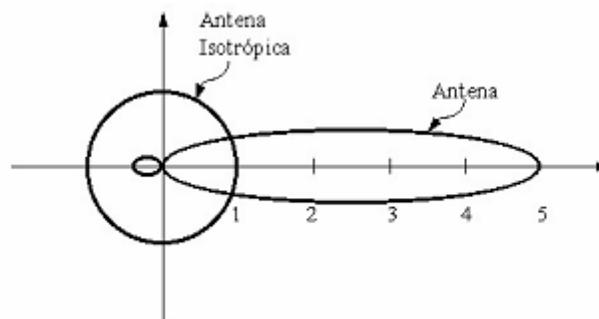


Figura 1.5. Directividad de una antena respecto a una fuente isotrópica. (Fuente: [1])

$$D_{db} = 10 \log D \quad (1.10)$$

$$D_{db}=10\log\frac{P_{max}}{P_0} \quad (1.11)$$

$$D_{db}=10\log\frac{U_{max}}{U_0} \quad (1.12)$$

$$D_{db}=20\log\frac{E_{max}}{E_0} \quad (1.13)$$

El rango teórico de variación de la directividad está comprendido entre $1 \leq D \leq \infty$.

La menor directividad corresponde a la fuente isotrópica.

1.2.5 Ganancia

Otro parámetro secundario corresponde a la ganancia. Su definición es casi idéntica a la de directividad, excepto que ahora las potencias tomadas a cuenta son las de alimentación, o sea que en este caso se encuentra en juego también la eficiencia de la antena, o sea:

$$G = \frac{P_{max}}{P_0} \Big|_{W_a=W_0} \quad (1.14)$$

Donde:

W_0 -Potencia total con que se alimenta la antena bajo prueba.

W_a -Potencia total con que se alimenta la antena de referencia.

La directividad y la ganancia están relacionadas entre sí por la eficiencia:

$$D = \xi G \quad (1.15)$$

Donde:

ξ - Eficiencia de la antena.

La eficiencia de la antena ideal de referencia se considera igual a uno, $\xi=1$ (100%). Como la eficiencia varía entre cero y uno, entonces el rango de G es $0 \leq G \leq \infty$.

En general siempre la ganancia debe ser menor que la directividad, ya que la eficiencia siempre es menor de 1 pero en el caso de las antenas ideales ($\xi=1$), ambos parámetros toman el mismo valor.

$$G = D \quad (1.16)$$

La ganancia de una antena es una medida de su tendencia a concentrar la señal en una dirección específica. Una antena con alta ganancia es altamente direccional, mientras que

una antena con baja ganancia es omnidireccional. La unidad para medir la ganancia es el decibel (dB) [2].

1.2.6 Eficiencia

La eficiencia de una antena es un parámetro primario, pues no depende de ningún otro parámetro primario o secundario, y se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia de alimentación de la antena, tal como se muestra en la Figura 1.6 [1].

$$\xi = \frac{W_r}{W_a} \quad (1.17)$$

Donde:

W_r -Potencia total radiada por la antena en todas las direcciones.

W_a -Potencia total con que se alimenta la antena.

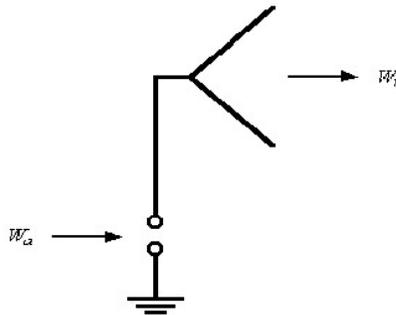


Figura 1.6. Potencia de alimentación y potencia radiada de una antena. (Fuente: [1])

1.2.7 Resistencia de radiación

La impedancia de entrada de una antena tiene, según se analizó anteriormente, una componente real y una componente reactiva o sea [1]:

$$Z_{ent} = R_{ent} \pm jX_{ent} \quad (1.18)$$

Donde:

Z_{ent} - Impedancia de entrada.

R_{ent} - Resistencia de entrada.

X_{ent} - Reactancia de entrada.

La potencia total real que la antena extrae de la fuente o de la línea de transmisión viene dada por [1]:

$$W_a = R_{ent} I_a^2 \quad (1.19)$$

Donde:

I_a - Corriente que toma la antena en su punto de alimentación.

w_a - Potencia total con que se alimenta la antena.

Una parte de esa potencia se pierde en la antena por efecto Joule al calentarse el conductor, ya que la conductividad del metal es finita, por lo que evidentemente existirá una resistencia de pérdidas R_p , de modo que esa potencia es igual a [1]:

$$W_p = R_p I_a^2 \quad (1.20)$$

Donde:

W_p -Potencia de pérdidas por efecto Joule.

La diferencia entre la potencia de alimentación de la antena y la de perdidas será igual a la potencia total radiada por la antena:

$$W_r = W_a - W_p \quad (1.21)$$

Asociada a esa resistencia de radiación igualmente se podrá asociar una resistencia equivalente o ficticia, ya que físicamente no existe como tal o sea [1]:

$$W_r = R_r I_a^2 \quad (1.22)$$

Donde:

W_r -Potencia de radiación.

R_r -Resistencia de radiación.

Despejando la resistencia de radiación, se obtiene que:

$$R_r = \frac{W_r}{I_a^2} \quad (1.23)$$

Pero como la potencia total radiada es:

$$W_r = \oint \vec{P}_r \cdot \vec{D}_s \quad (1.24)$$

Donde P_r es el Vector de Poynting sobre la esfera de observación, entonces [1]:

$$R_r = \frac{\oint \vec{P}_r \cdot \vec{D}_s}{I_a^2} \Omega \quad (1.25)$$

En dicho caso la resistencia de radiación se puede analizar como un parámetro equivalente a una resistencia óhmica que consumiría en calor por efecto Joule, la misma cantidad de potencia que la antena radia al medio circundante en forma de ondas electromagnéticas, cuando la corriente de alimentación es la misma. Realmente esa resistencia de radiación no existe físicamente pero dicho concepto es muy útil y se emplea mucho en el análisis de cualquier antena [1].

Definición: La resistencia de radiación se puede definir como la resistencia equivalente o ficticia que consumiría en forma de calor, la misma potencia total que la antena radia al medio circundante en forma de ondas de radio, con igual corriente de alimentación [1].

1.2.8 Ancho de banda

Es el intervalo de frecuencias en la cual debe funcionar satisfactoriamente la antena, dentro de las normas técnicas vigentes a su aplicación. Puede ser descrito en términos de porcentaje respecto a la frecuencia central de la banda [3].

Las antenas se clasifican por su ancho de banda en [1]:

- Antenas de banda estrecha.
- Antenas de banda ancha.
- Antenas independientes de frecuencia.

Las antenas de banda estrecha son aquellas en que su ancho de banda es menor del 10% de su frecuencia nominal o de diseño (Portadora). De modo que:

$$AB = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1.26)$$

Obsérvese la variación de la ROE (Razón de Onda Estacionaria) contra frecuencia mostrada en la Figura 1.7 [1].

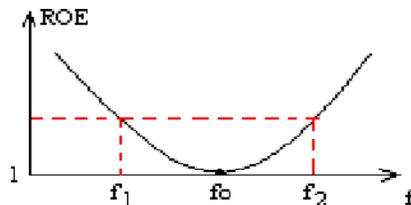


Figura 1.7. Potencia de alimentación y potencia radiada de una antena. (Fuente: [1])

Donde $AB \leq 0.1 f_0$ o lo que es igual a la relación máxima: (1:1.1) o sea que $f_2 = 1.1f_1$.

Las antenas de banda ancha son aquellas que su ancho de banda va desde 10% hasta el 120% de su portadora central, o lo que es igual de 1: 1.1 hasta 1:4 ($1:1.1 \leq AB \leq 1.4$). La frecuencia de trabajo mayor es 4 veces la frecuencia menor. Para anchos de banda encima del 50 por ciento de la portadora, es conveniente cambiar la nomenclatura al segundo caso [1].

Las antenas independientes de frecuencia, son aquellas que poseen anchos de banda de trabajo muy grandes, mayores de 1: 4. Significa que la frecuencia límite superior es cuatro veces mayor que la inferior. Por ejemplo las antenas logarítmicas periódicas de dipolos alcanzan esos valores o superiores. Realmente en estas antenas ya no tiene sentido el concepto de frecuencia de resonancia [1].

1.3 Aspectos de la antena Uda-Yagi

La antena Uda-Yagi es una de las antenas direccionales más comúnmente utilizadas en bandas de radioaficionados. Su nombre se deriva del apellido del científico japonés que la diseñó originalmente [2].

La Uda-Yagi consiste en un elemento tipo dipolo que irradia la señal. Detrás de este elemento se ubica uno más largo que refleja la señal hacia el frente, y es conocido como reflector. Por delante del elemento activo también se pueden ubicar elementos ligeramente más cortos, que se conocen como directores o parásitos y sirven para darle mayor direccionalidad a la señal reflejada [2].

Las Uda-Yagi son fabricadas para longitudes que van desde los 80 m hasta los 70 cm. o menos. En longitudes muy cortas son especialmente populares las Uda-Yagi con gran cantidad de directores, especialmente para trabajo de satélites y comunicaciones espaciales [2].

Como se muestra en la Figura 1.8, la antena Uda-Yagi solo tiene alimentación en el elemento activo a diferencia de la logarítmica periódica en la que se alimentan todos los dipolos. Los elementos parásitos se tratan de colocar lo más próximos posible, para producir un fuerte acoplamiento electromagnético, creando así una fuerte interacción mutua que produzca un aumento sustancial en las propiedades direccionales de la antena con respecto al elemento activo.

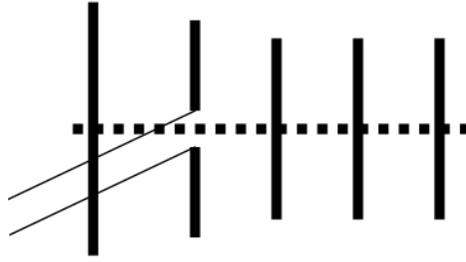


Figura 1.8. Potencia de alimentación y potencia radiada de una antena. (Fuente: [1])

La separación óptima entre el dipolo activo y el reflector se escoge entre los límites de [4]:

$$d_r = (0.15 - 0.25)\lambda \quad (1.27)$$

Y entre el dipolo activo y el primer director o entre los directores sucesivos es de [4]:

$$d_d = (0.10 - 0.35)\lambda \quad (1.28)$$

El número de elementos directores puede incrementarse hasta 18, límite a partir del cual la ganancia por elemento disminuye y los costos se disparan, desequilibrando la relación ganancia/ costos y dejando de ser rentable la construcción de la antena.

En este tipo de arreglo, la impedancia mutua de los elementos parásitos se resta de la impedancia propia del elemento activo, disminuyendo su resistencia de radiación según aumenta el número de elementos o según disminuye la separación entre ellos. Esto se transforma en una deficiencia severa de este tipo de antenas pues al disminuir la resistencia de radiación, también disminuye la eficiencia de la antena o sea [4]:

$$\xi = \frac{R_r}{R_r + R_p} * 100 \quad (1.29)$$

Para contrarrestar el efecto negativo de la disminución de la resistencia de radiación, se emplean dispositivos que aumenten la impedancia de entrada de la antena y por ende su resistencia de radiación como es el caso del dipolo doblado de conductores de igual diámetro que incrementa su impedancia de entrada por cuatro veces y que además tiene la gran ventaja de permitir conectar el elemento activo al potencial de tierra, tal como se observa en la Figura 1.9 [1].

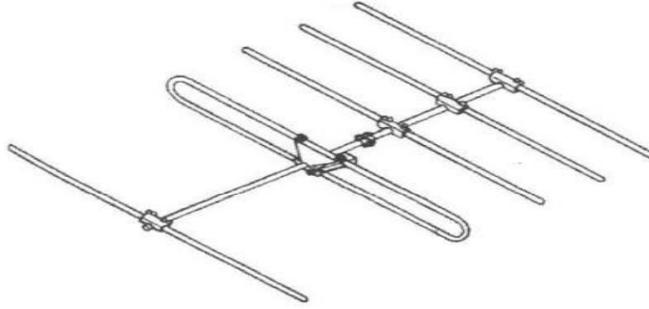


Figura 1.9. Antena Uda-Yagi de 5 elementos alimentada a través de un dipolo doblado. (Fuente: [1])

1.3.1 Evoluciones de la antena Uda-Yagi

- Con el desarrollo de las tecnologías y las nuevas necesidades la antena Uda-Yagi ha evolucionado, un ejemplo de esta evolución son las redes de antenas Uda-Yagi las cuales consisten en un conjunto de antenas Uda-Yagi que han sido alineadas apuntando perpendicularmente a un mismo plano.

La razón para agregar varias antenas Uda-Yagi en paralelo, es que cada antena suplementaria aporta 3 dB a la señal, o sea, la multiplica por dos en potencia, con un límite teórico de 20dB.

Es por eso que las redes de antenas Uda-Yagi se utilizan sobre todo en EME (contactos por reflexión lunar), donde las señales recorren 600 000 Km. entre emisor y receptor y llegan considerablemente atenuadas.

Existe una distancia mínima entre antenas para minimizar el efecto de cada antena sobre su vecina. Las redes de antenas Uda-Yagi exigen una interconexión cuidadosa, sobre todo para respetar la impedancia de salida requerida por el transmisor. Por razones de dimensiones de las antenas, las redes de antenas Uda-Yagi se utilizan mucho en VHF (*Very High Frequency*) y UHF (*Ultra High Frequency*) [5].

- Antenas Uda-Yagi de elementos ahusados.

Por razones mecánicas convienen elementos gruesos, mientras que por razones eléctricas convienen elementos lo más finos que sea posible. Un compromiso entre ambos es hacer elementos ahusados, gruesos en el centro y afinándose progresivamente hacia el extremo [5].

- Antenas Uda-Yagi de elementos acortados.

Sobre todo en las bandas HF (*High Frequency*) de 3-30 MHz, los elementos tienen longitudes del orden de las decenas de metros. Eso hace que una antena Uda-Yagi sea poco práctica, sea por razones mecánicas, sea por razones de espacio.

Es posible construir antenas Uda-Yagi más cortas, reemplazando un segmento de cada elemento (por ejemplo, el tercio central de cada mitad de elemento) por un solenoide o bobina. Eso hace que la antena sea más corta, y por lo tanto mecánicamente viable, a costa de otras virtudes: ancho de banda, ganancia, y otras características. El resultado final es un compromiso [6].

1.3.2 Propiedades eléctricas

Siendo una evolución del dipolo, el punto medio del elemento conductor es un nodo de tensión y un vientre de corriente. Los reflectores y directores, pese a no estar directamente alimentados, también tienen tensiones y corrientes. [3]

En la Figura 1.10 se muestra el funcionamiento de una antena Uda-Yagi mediante el diagrama de emisión.



Figura 1.10. Funcionamiento de una antena Uda-Yagi. (Fuente: [2])

La antena Uda-Yagi puede concebirse como una evolución del dipolo, donde los reflectores reducen la emisión hacia atrás, y donde los directores concentran la emisión hacia adelante.

Dependiendo entre otras cosas de la cantidad de elementos directores, y de la longitud de la antena es posible llegar a ganancias máximas de por ejemplo 15 dB, lo que equivale a multiplicar la señal por 32.

Como la antena Uda-Yagi no crea energía, cuanto más ganancia en una dirección, más estrecho será el haz. Para medir esa apertura, se define como el ángulo respecto del eje de la Uda-Yagi donde la ganancia cae a la mitad, es decir, pierde 3 dB respecto del eje central.

Sumamente importante en las antenas Uda-Yagi, cuyo objetivo es el de ser direccional, es el coeficiente de ganancia en las direcciones 0°/180° (adelante/atrás). Cuanto mayor sea ese coeficiente, más inmune es la antena a señales provenientes de otras direcciones [2].

1.3.3 Polarización

- Cuando la antena Uda-Yagi es paralela al plano de la tierra, la componente eléctrica de la onda es paralela al plano de la tierra: se dice que tiene polarización horizontal [7].
- Cuando la antena Uda-Yagi es perpendicular al plano de la tierra, la componente eléctrica de la onda es perpendicular al plano de la tierra: se dice que tiene polarización vertical [1].
- En HF, y en VHF en clase de emisión banda lateral única se prefiere la polarización horizontal, y en VHF en clase de emisión frecuencia modulada, la polarización vertical [8].

1.3.4 Impedancia

La impedancia de una antena Uda-Yagi depende de la configuración de los reflectores y directores (dimensiones de cada elemento, espaciamiento entre elementos). Habitualmente las antenas se diseñan para que la impedancia sea de 50 o 75 Ω, o sea, la impedancia requerida por los equipos conectados a la antena [2]:

- Antenas de recepción de televisión: 75 Ω.
- Antenas de emisión / recepción (por ejemplo, radioaficionados): 50 Ω.
- Antenas de WIFI (*Wireles Fidelity*): 50 Ω.

1.3.5 Resonancia

La Uda-Yagi es una antena resonante, es decir, existe una frecuencia la cual presenta una resistencia óhmica pura. Esto se presenta cuando la reactancia inductiva del circuito que conforma la antena tiene igual valor que la reactancia capacitiva [9]:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1.30)$$

Las reactancias inductiva y capacitiva se muestran en las ecuaciones 1.31 y 1.32 respectivamente.

$$X_L = W_L \quad (1.31)$$

$$X_C = \frac{1}{W_L} \quad (1.32)$$

Donde:

$$W_L = 2\pi F \quad (1.33)$$

La frecuencia de resonancia será aquella para la cual se cumple que $X_L = X_C$, resultando un circuito resistivo puro.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1.34)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + 0} = \sqrt{R^2} = R \quad (1.35)$$

1.3.6 Patrón de radiación

En la Figura 1.11 se aprecia el patrón de radiación de una antena Uda-Yagi de seis elementos en el plano vertical.

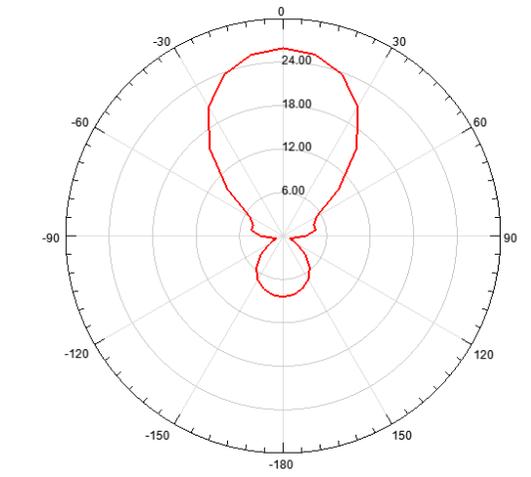


Figura 1.11. Patrón de radiación de una antena Uda-Yagi en el plano de sus conductores.

CAPÍTULO 2. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA UDA-YAGI PARA LA RECEPCIÓN DEL CANAL 39.

En este capítulo se dará a conocer la forma en que se diseñó la antena Uda –Yagi. Una vez diseñada se da paso a la simulación de la misma en el programa profesional HFSS 15.0.2 y posteriormente a la explicación de cómo se construyó.

2.1 Diseño de la antena Uda-Yagi

Para diseñar la antena para el canal 39 se consulta a qué frecuencia trabaja el mismo en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Gama de frecuencia de los canales de televisión de UHF. (Fuente: [8]).

Gama de frecuencia de los canales de televisión de UHF	
Número del canal de TV	Banda de frecuencia (MHz)
31	572-578
32	578-584
33	584-590
34	590-596
35	596-602
36	602-608
37	608-614
38	614-620
39	620-626
40	626-632

Como se puede observar trabaja entre los 620-626 (MHz) por lo que:

$$F_m = \frac{F_I + F_f}{2} = \frac{620 + 626}{2} = 623 \text{ MHZ} \quad (2.1)$$

Donde:

F_m - Frecuencia media de trabajo.

F_f - Frecuencia final.

F_I - Frecuencia inicial.

Una vez calculada la frecuencia media de trabajo se prosigue al cálculo de la longitud de onda para la frecuencia media de trabajo.

$$\lambda = \frac{c}{F_m} = \frac{3 \cdot 10^8}{623 \cdot 10^6} = \frac{300}{623} = 0,481 \text{ m} = 48 \text{ cm} \quad (2.2)$$

En la práctica, de todos los elementos parásitos, sólo existe un reflector y el resto son directores. El número de directores puede ser muy grande ya que la radiación de la antena se dirige hacia ellos, excitándose sucesivamente con bastante intensidad, formándose una especie de “canal de ondas lentas”. La separación óptima entre el dipolo activo y el reflector se escoge entre los límites de [4]:

$$dr = (0.15 - 0.25)\lambda \quad (2.3)$$

Y entre el dipolo activo y el primer director o entre los directores sucesivos es de:

$$dd = (0.10 - 0.35)\lambda \quad (2.4)$$

Un dipolo parásito operando como reflector tiene una impedancia propia positiva (inductiva) por lo cual su longitud es de alrededor de un 5 por ciento mayor que la longitud del elemento activo resonante, mientras que por el contrario, en el caso de los directores, su impedancia propia es negativa (capacitiva) y su longitud es alrededor de un 5 por ciento menor que del elemento activo resonante. La longitud del elemento activo resonante no corresponde exactamente a media longitud de onda debido a la fuerte interacción mutua entre los elementos, pero realmente su longitud eléctrica está muy próxima a dicho valor [4].

$$\text{Reflector} = \frac{\lambda}{2} = \frac{48}{2} = 24 \text{ cm} \quad (2.5)$$

$$\text{Elemento activo} = \text{Reflector} * \frac{95}{100} = 22.8 \text{ cm} \quad (2.6)$$

$$\text{Director 1} = \text{Reflector} * \frac{90}{100} = 22.66 \text{ cm} \quad (2.7)$$

$$\text{Director 2} = \text{Reflector} * \frac{85}{100} = 20.58\text{cm} \quad (2.8)$$

$$\text{Director 3} = \text{Reflector} * \frac{80}{100} = 19.56\text{cm} \quad (2.9)$$

$$\text{Director 4} = \text{Reflector} * \frac{75}{100} = 18.59\text{cm} \quad (2.10)$$

2.2 Simulación de la Antena Uda-Yagi

Una vez calculadas las dimensiones de los elementos y las separaciones entre ellos pasamos a la simulación de la antena en el programa profesional HFSS 15.0.2. .

HFSS (*High Frequency Structure Simulate*) es un software de alto rendimiento para el diseño, modelación y simulación de estructuras en 3D creado para altas frecuencias. Permite el estudio electromagnético de modelos a través del método de elementos finitos y mallas adaptativas, facilitando además la visualización del comportamiento de las ondas electromagnéticas por medio de herramientas interactivas y dinámicas.

HFSS es una herramienta útil para resolver sistemas de estructura compleja que son difíciles o imposibles de modelar considerando métodos puramente algebraicos. Se utiliza para la creación de prototipos virtuales de guías de onda, conectores, filtros, chip, integradores de señal, antenas, entre otros.

En la Figura 2.1 se muestra la antena modelada en 3D en dicho programa:

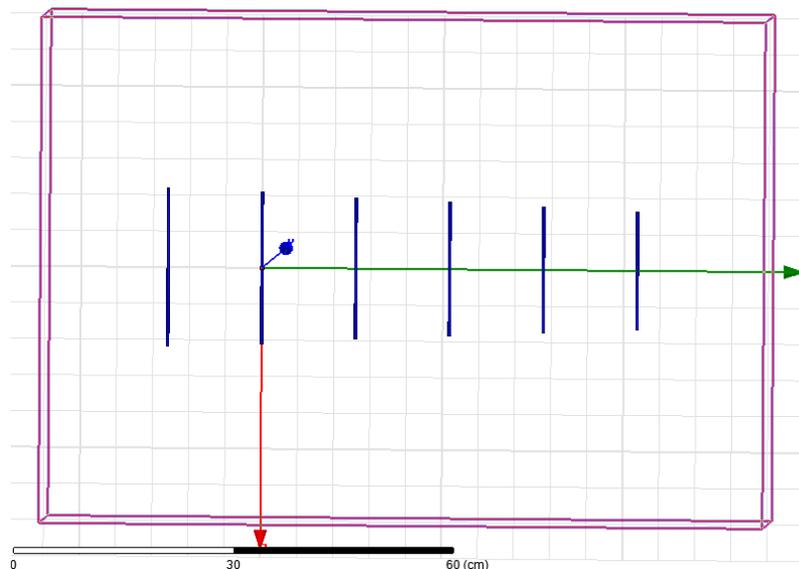


Figura 2.1. Antena Uda-Yagi dibujada en 3D.

Una vez que la antena es simulada se puede observar en la Figura 2.2 el patrón de radiación en 3 dimensiones (3D) con el valor de la ganancia y en la figura 2.3 se observa el patrón de radiación en 3D superpuesto a la antena y donde se aprecia que dicha antena tiene demasiada radiación trasera.

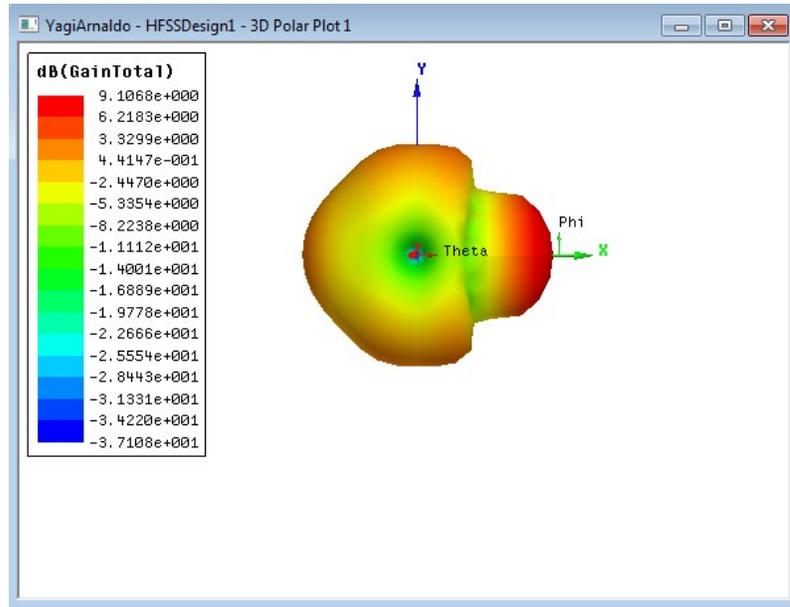


Figura 2.2. Patrón de radiación en 3D y valor de la ganancia.

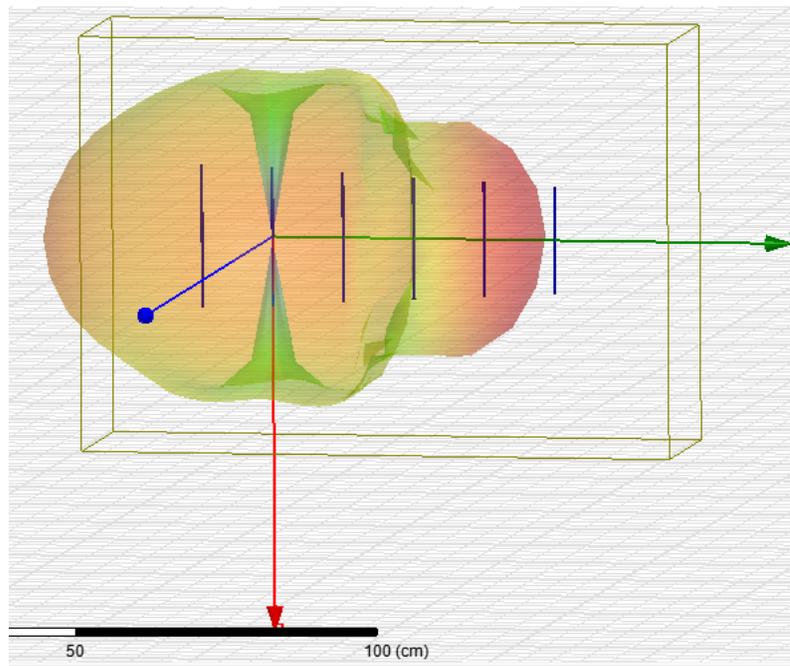


Figura 2.3. Patrón de radiación en 3D superpuesto a la antena.

En la Figura 2.4 se puede observar los valores de la pérdida de retorno los cuales nos dicen que la antena no está resonando a la frecuencia calculada debido a que no existe un perfecto acople de impedancia, mostrado en la Figura 2.5.

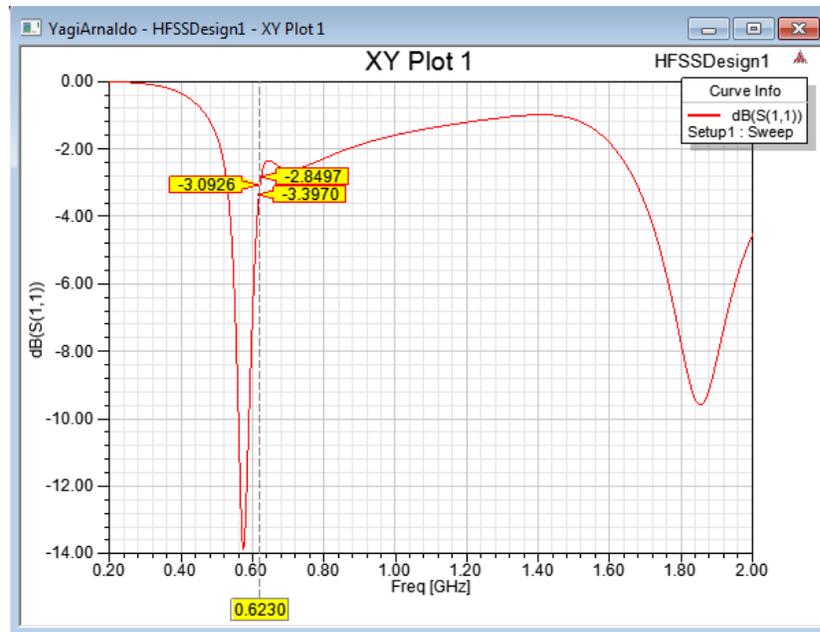


Figura 2.4. Pérdidas de retorno.

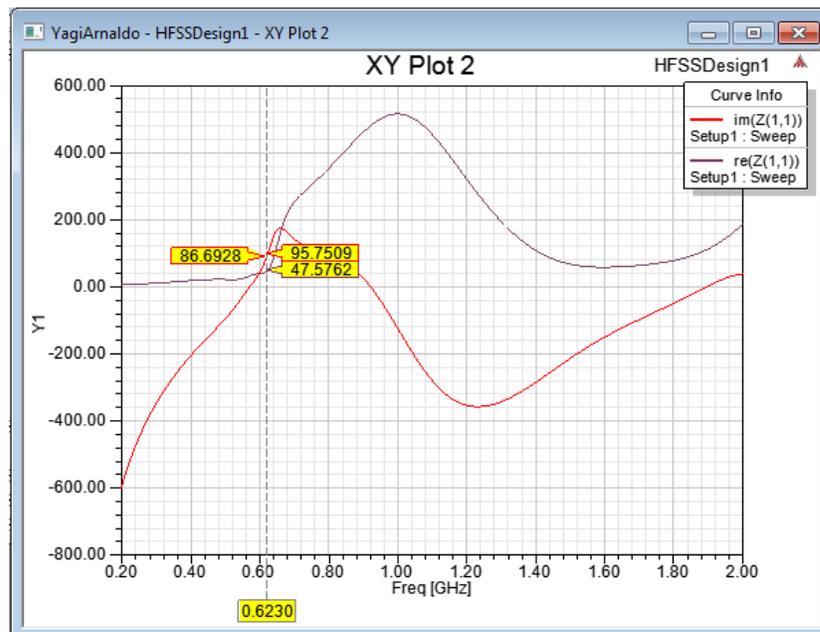


Figura 2.5. Acoplamiento de impedancia.

Una vez vistos estos resultados el próximo paso fue la utilización de herramientas de análisis más específicas dentro del programa HFSS que permitieran variar parámetros dimensionales del diseño, buscar numéricamente una óptima bajo condiciones asignadas, hacer un estudio de sensibilidad o tomar datos estadísticos, por lo que se utilizaron las herramientas de parametrización y optimización, las cuales permitieron la variación de las dimensiones de los elementos que fueron calculados anteriormente.

En la Figura 2.6 se muestra el patrón de radiación y el valor de la ganancia donde se puede apreciar que la antena tiene una ganancia de 10 dB siendo esto favorable debido a que fue diseñada según la cantidad de elementos para una ganancia aproximadamente con este valor.

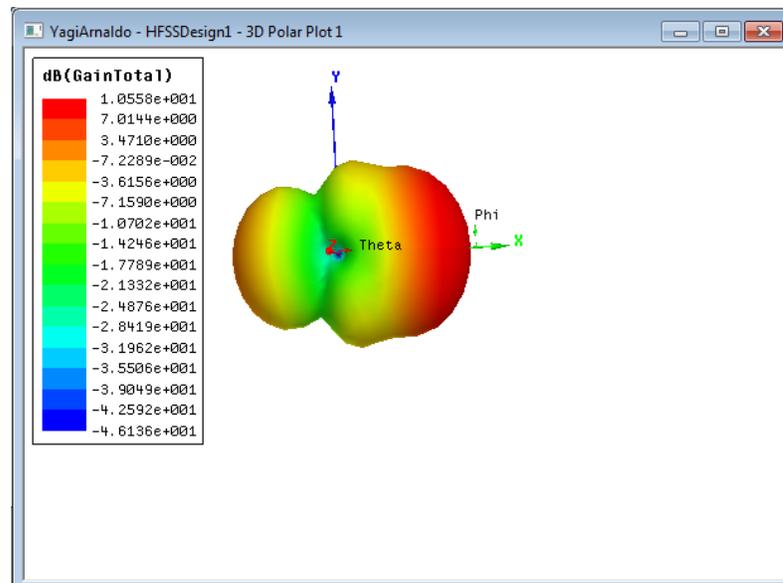


Figura 2.6. Patrón de radiación y valor de la ganancia después de la parametrización y optimización.

La Figura 2.7 muestra el patrón de radiación superpuesto a la antena donde se observa la disminución de radiación trasera y el aumento de radiación delantera lo cual es un resultado favorable porque la antena es más directiva y tiene más ganancia.

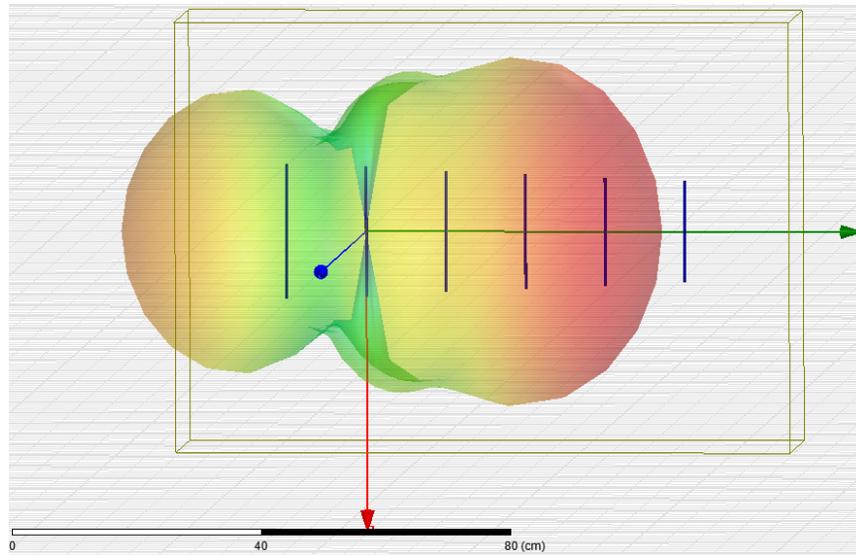


Figura 2.7. Patrón de radiación en 3D superpuesto a la antena después de la parametrización y optimización.

En las Figuras 2.8 y 2.9 se muestran los resultados del acoplamiento de impedancia y de las pérdidas de retorno después de la parametrización y la optimización.

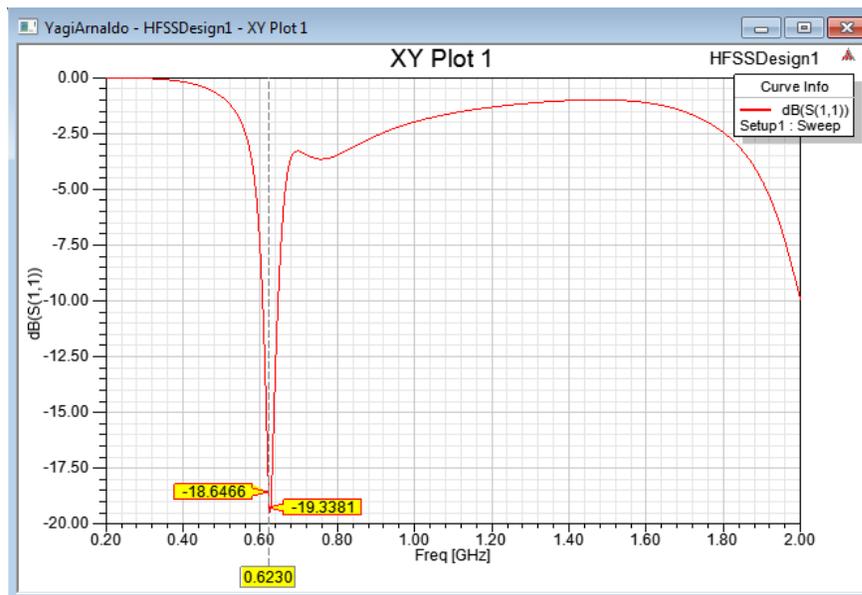


Figura 2.8. Pérdidas de retorno después de la parametrización y optimización.

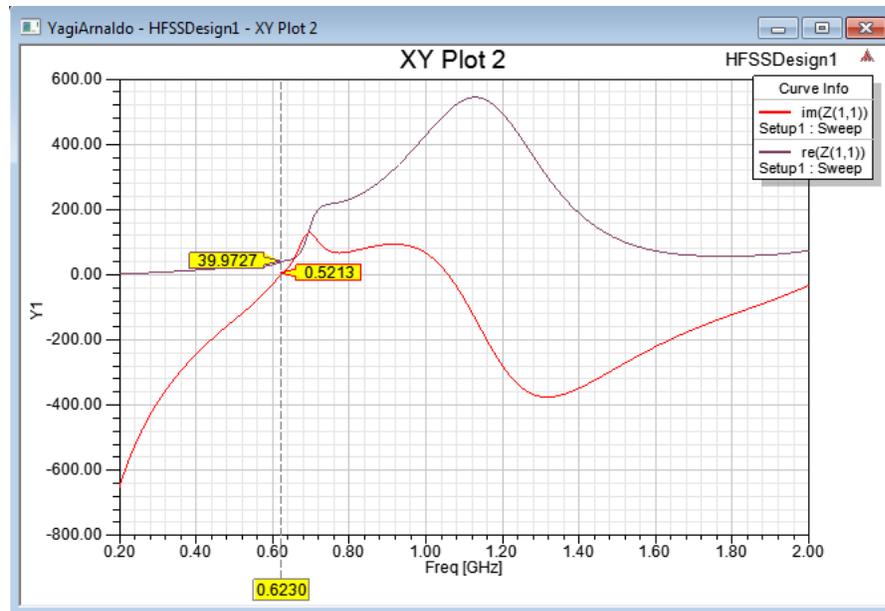


Figura 2.9. Acoplamiento de impedancia después de la parametrización y optimización.

Se puede concluir que la antena diseñada funciona ya que presenta un buen acople de impedancia de $39+j0.5\Omega$ donde la parte imaginaria es prácticamente 0, lo que da lugar a que resuene a la frecuencia de trabajo para la que fue calculada (623MHz).

En la Tabla 2.2 se muestran las dimensiones de los elementos antes y después de la parametrización y optimización.

Tabla 2.2. Dimensiones de los elementos antes y después de la parametrización y optimización.

Elementos del diseño	Medidas (cm) antes	Medidas (cm) después
Largo del reflector	24.00	21.8
Largo del elemento activo	22.80	20.60
Largo del director 1	21.66	19.70
Largo del director 2	20.58	18.60
Largo del director 3	19.56	17.50
Largo del director 4	18.59	16.40
Separación entre elementos	13.00	12.20
Diámetro de los elementos	0.48	0.48

2.3 Construcción de la antena Uda-Yagi

Una vez que se diseña, se simula y se hace un análisis de los resultados de la antena comprobándose que estos resultados eran los adecuados se prosigue a la construcción de la misma.

2.3.1 Materiales

- $1\frac{1}{2}$ m de conductor interno de un cable coaxial LDF4 el cual está fabricado de aluminio y cobre y tiene un diámetro de 4.8 mm.
- $1\frac{1}{2}$ m de conductor interno de un cable coaxial HF-50 el cual está fabricado de cobre y tiene un diámetro de 1.25 mm pulgada.
- 10 cm de cable coaxial RG-59 de 3.73mm de diámetro.
- 4 m de estaño de un diámetro de 3 mm.
- 1 conector BNC hembra de chasis (sujeción 4 tornillos).
- 10 cm de tubo de refrigeración de 3.75 mm de diámetro.
- Tuercas, tornillos y arandelas (M-10).

2.3.2 Herramientas

- Taladro con juego de barrenas de 0.5 mm hasta 9 mm.
- Soldadores de 80w y 170w respectivamente.
- Pinzas, alicate, destornillador.
- Tornillo de Banco.
- Martillo.
- Segueta.

Esta antena fue fabricada en el taller de Torres y Antenas de Radiocuba Santiago con la autorización de las autoridades pertinentes y con la plena supervisión de un Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, trabajador del centro, en dicho taller se encontraban todas las herramientas necesarias para la confección de la antena.

2.3.3 Método de construcción

Para la confección de los elementos de la antena primeramente se pela el coaxial LDF4 hasta llegar al conductor central, después se cortan todos los elementos 2 cm más extenso de lo que había dado las medidas arrojadas por el programa, después se verifica

que estén lo más recto posible con la ayuda de un martillo y el tornillo de banco, en la Figura 2.10 se observa un cable coaxial LDF4.



Figura 2.10. Cable coaxial LDF4. (Fuente [9])

Para la construcción del *boom* se realiza el mismo procedimiento con el cable HF-50 pero nada más se cortaron 10 cm del mismo para la posterior realización de otra pieza.

Una vez cortados los elementos se perforó el *boom* con una barrena de 5 mm, luego se prosigue a la soldadura de los elementos con estaño, se comenzó soldando el director 4 hasta llegar al reflector, en las Figuras 2.11 y 2.12 se muestra el método de soldadura con estaño y el director 4 soldado al *boom*.



Figura 2.11. Método de soldadura con estaño



Figura 2.12. Director 4 soldado al boom.

Una vez que todos los elementos estén bien fijados al boom se corrige a la medida original como se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Elementos Corregidos y fijados al boom.

2.3.4 Diseño del Acoplador Gamma

La eficiencia de una antena es un parámetro primario, pues no depende de ningún otro parámetro primario o secundario, y se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia de alimentación de la antena.

Una antena trabaja en resonancia cuando su impedancia de entrada tiene carácter resistivo. Por debajo de la frecuencia de resonancia tiene carácter capacitivo y por encima inductivo. En general, se desea que una antena esté acoplada perfectamente a la línea de transmisión para lograr máxima transferencia de potencia y evitar la reflexión de una parte de la potencia hacia el generador [4].

Los resultados de la simulación muestran que la impedancia de entrada obtenida para la frecuencia media de trabajo es $39.97+j0.52$, y la línea de alimentación es un cable coaxial de 50Ω , por lo tanto es necesario acoplar las impedancias para lograr máxima transferencia de potencia. En este caso particular se diseñará un Acoplador Gamma.

Este tipo de acople se utiliza cuando tenemos que acoplar un elemento radiante simétrico a una línea de transmisión asimétrica como es el caso del cable coaxial. Al mismo tiempo se hace una transformación en la impedancia. Debido a que la mayoría de las antenas directivas de varios elementos presentan una impedancia de 20Ω a 40Ω en su punto de alimentación, el ajuste se hace de forma capacitiva mediante el condensador que este dispositivo tiene, con la configuración mostrada en la Figura 2.14 [4].

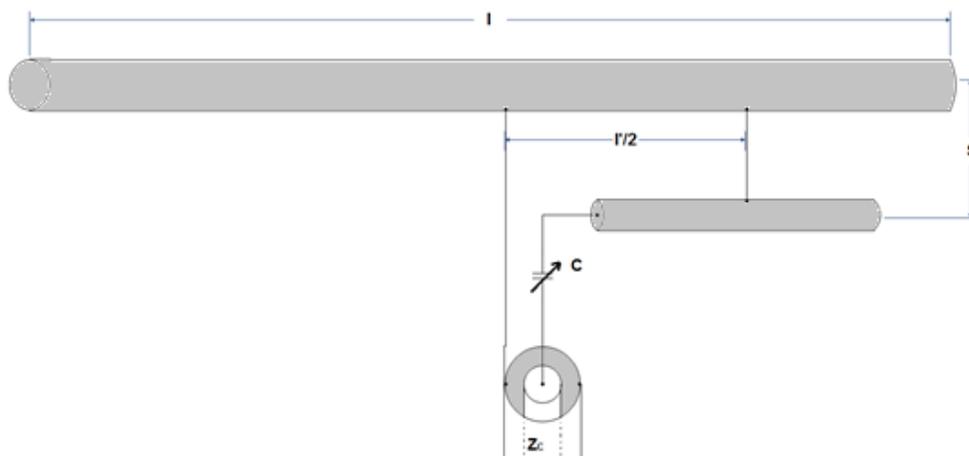


Figura 2.14. Configuración del Acoplador Gamma. (Fuente: [1])

La Figura 2.15 muestra el circuito equivalente del Acoplador Gamma.

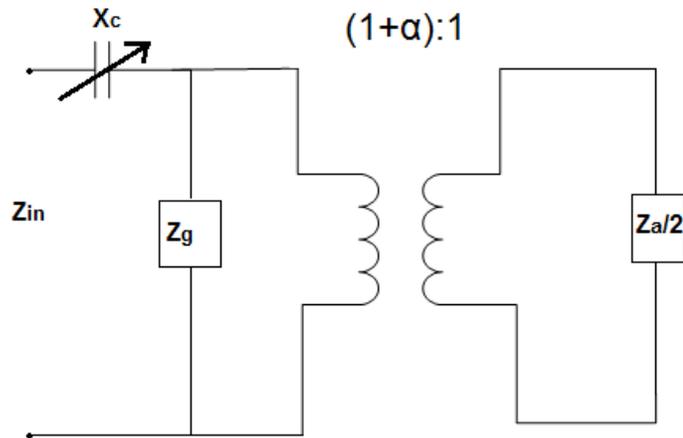


Figura 2.15. Circuito equivalente del Acoplador Gamma. (Fuente: [1])

Para la confección del Acoplador Gamma primeramente se utilizan los 10cm que se le habían cortado al *boom*, luego se divide a la mitad de forma longitudinal como se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Forma en que fue cortada la pieza.

Con uno de los fragmentos restantes se procede a moldear el mismo de forma tal que una parte mantuviera la misma estructura, y la restante resultara lo más plana posible. Posteriormente, se dobla hasta lograr un ángulo de 90° , para luego perforar la parte plana con 5 orificios, con el objetivo de fijar el conector BNC. La otra parte fue fijada al *boom* al mismo nivel del elemento activo como se muestra en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Pieza fijada al boom con el conector BNC instalado.

Luego se pasa a la construcción de la varilla del Gamma, la longitud de la misma es más pequeña que media longitud de onda, usualmente entre un 10% o un 15% de la longitud del elemento activo. En este caso se calculó a un 15% de la longitud del elemento activo. Como se pudo observar en la Figura 2.14 a la línea de transmisión se conecta un capacitor en serie, en nuestro caso se construyó un capacitor variable de forma cilíndrica formado por un tubo de refrigeración y cable coaxial RG-59 utilizando de este último solamente el conductor interno y el dieléctrico, el valor del capacitor va a ser variado por una presilla móvil la cual une a la varilla del Gamma y al elemento activo como se muestra en las Figuras 2.18 y 2.19.

En los dipolos existe una distribución de voltaje y corriente determinada, con la variación de este capacitor lo que se trata de hacer es buscar una relación de voltaje y corriente tal que la impedancia de entrada de la antena sea igual a la impedancia de la línea de transmisión.



Figura 2.18. Acoplador Gamma vista delantera.

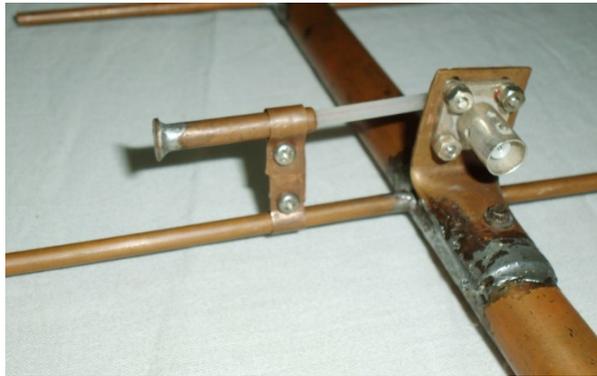


Figura 2.19. Acoplador Gamma vista trasera.

Una vez terminado el acoplador Gamma la antena queda como muestra la Figura 2.20.

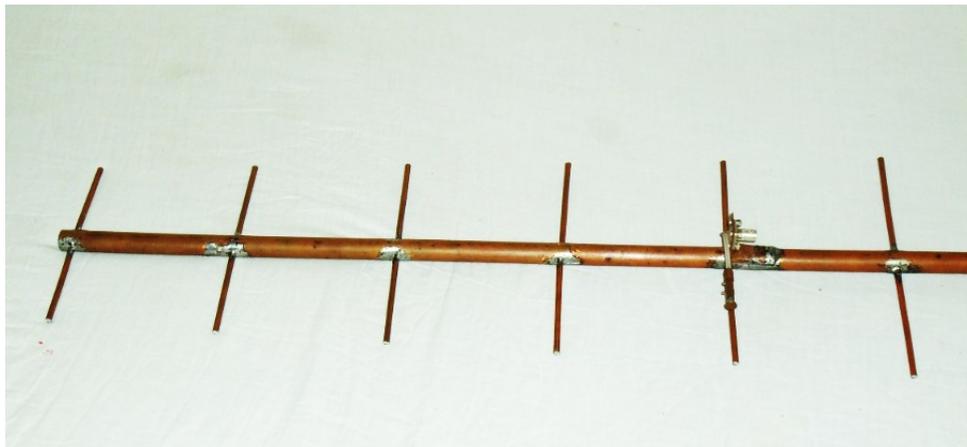


Figura 2.20. Antena Uda-Yagi.

Después se prosigue a la medición de los parámetros de la antena con el Analizador Vectorial de Red (ROHDE & SCHWARZ) el cual se muestra en la Figura 2.21.



Figura 2.21. Analizador Vectorial de Red (ROHDE & SCHWARZ).

En la Figura 2.22 se puede observar los valores de la pérdida de retorno los cuales son favorables ya que la antena está resonando a la frecuencia calculada debido a que existe un buen acople de impedancia mostrado en la Figura 2.23.



Figura 2.22. Pérdida de retorno medida con el analizador de espectro.

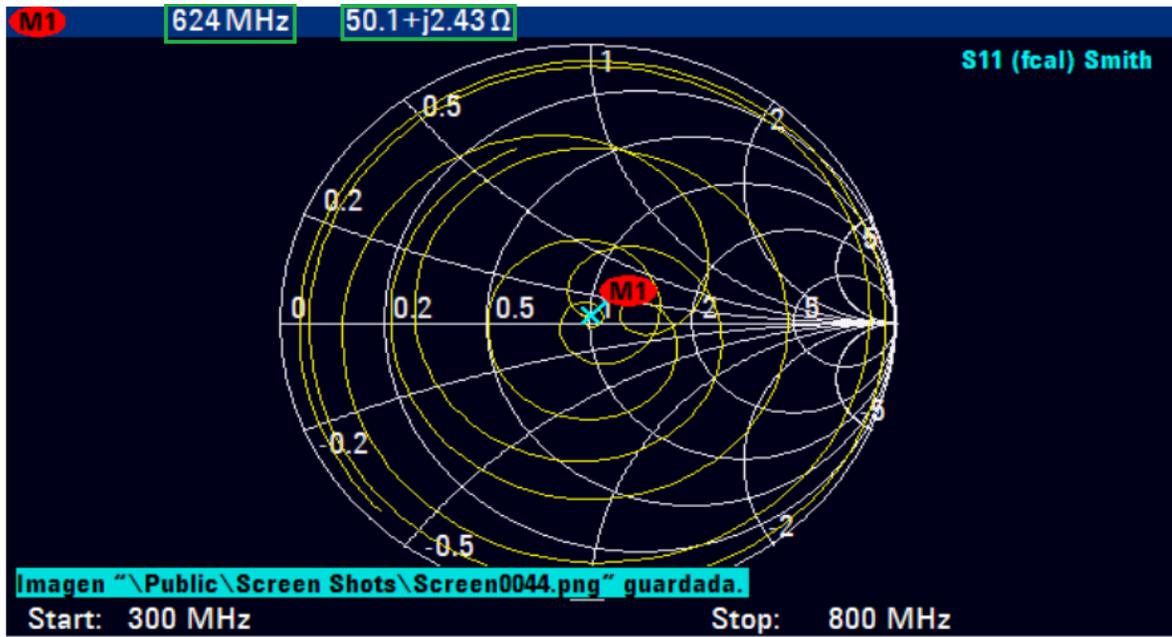


Figura 2.23. Impedancia de entrada medida con el analizador de espectro.

En la Figura 2.24 se muestra el resultado de la razón de onda estacionaria (ROE).

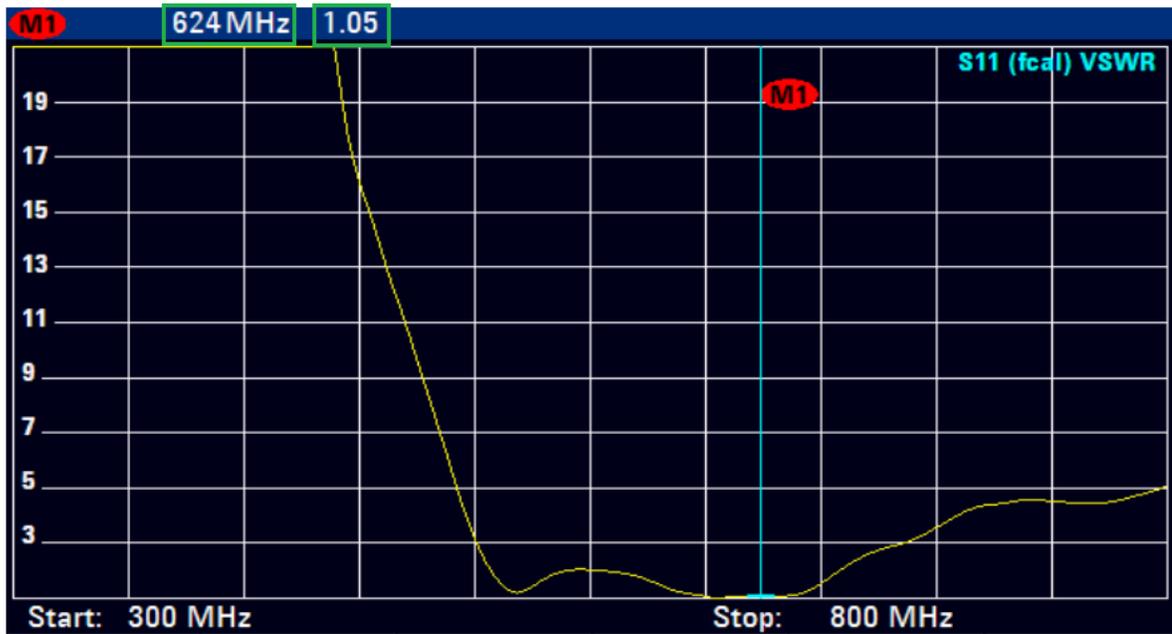


Figura 2.24. ROE medida con el analizador de espectro.

La razón de onda estacionaria (ROE) obtenida es una medida del correcto acoplamiento que garantiza el acoplador Gamma, además cumple con los requerimientos de este parámetro para televisión donde la razón de onda estacionaria debe ser $1 \leq ROE < 2$ para lograr un funcionamiento eficiente del sistema.

2.4 Análisis económico

Todos los cables coaxiales antes mencionados son recortes sobrantes que la empresa donó, el conector BNC hembra fue recuperado de un trasladador de TV marca NEC (*Nippon Electric Company*) japonés, las tuercas fueron recuperadas de equipos no utilizables, esta antena no es para un fin comercial, y por los aspectos antes mencionados nada más se va a ser alusión a el gasto de energía eléctrica y al estaño que se utilizó.

Como ya se había mencionado fueron utilizados dos soldadores de $S_1=170W$ y $S_2=80W$ de potencia respectivamente, durante un período total de 6h de trabajo cada uno, por tanto:

$$W/h=P_{S_1} * h=170 * 6=1020=1.020kW/h \quad (2.11)$$

$$W/h=P_{S_2} * h=80 * 6=480=0.480kW/h \quad (2.12)$$

Donde:

P_{S_1} - Potencia del soldador 1.

P_{S_2} - Potencia del soldador 2.

h- Horas de trabajo.

Sumando los kW/h consumido por ambos soldadores obtenemos 1.5 kW/h, la empresa eléctrica para las empresa tiene para un rango de 0-100 kW/h un precio de 0.17 pesos moneda nacional (MN), por lo que multiplicando el consumo de los dos soldadores por el precio establecido por la empresa eléctrica según el consumo, obtenemos aproximadamente 0.26 pesos MN.

El cono de estaño tuvo un costo de 19.55 cuc para la empresa cuyo cono contiene 60m de estaño, dividiendo el precio del estaño por la cantidad de metros del cono obtenemos que cada metro de estaño le costó a la empresa 0.32 cuc lo que equivale a 7.68 pesos MN se utilizaron 3 m de estaño por lo que obtenemos a un total de 23.04 pesos MN.

Por tanto:

$$CEE + CTE = 23.30 \text{ pesos MN} \quad (2.13)$$

Donde:

CEE -Consumo de energía eléctrica en MN.

CTE -Costo total de estaño en MN.

La antena tuvo un costo de producción de 23.30 pesos MN.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se diseñó la antena Uda-Yagui a partir de las frecuencias de trabajo del canal 39, donde se comprobó a partir del análisis teórico realizado y con ayuda del software de simulación HFSS que con la variación de las dimensiones de los elementos y la separación entre ellos a partir de las dimensiones obtenidas en principio, se logró que la antena mostrara características de radiación mucho más favorables en cuanto a directividad y ganancia, debido a una disminución de la radiación trasera y el aumento de la radiación delantera. Con un buen acople de impedancia de $39 + j0.5\Omega$ que presentó la antena, con parte imaginaria prácticamente 0, se logró que la misma resonara a la frecuencia de trabajo para la que fue diseñada (623 MHz). Se mostró el diseño práctico del acoplador gamma para lograr el acople de impedancia entre la antena y el cable coaxial.

Se construyó la antena Uda-Yagui a partir de materiales reciclables que permitieron que disminuyera el costo de producción de la misma. Con el analizador vectorial de redes del laboratorio de altas frecuencias del Departamento de Telecomunicaciones se midió la antena construida, donde se obtuvieron mejores características de radiación que las obtenidas con el software HFSS, comprobándose la calidad del diseño y construcción de la antena.

Recomendaciones

Construcción de una antena Uda-Yagi que permita la recepción eficiente del canal 33 para las prácticas de laboratorio correspondiente a la asignatura Antenas.

Construcción de una antena Uda-Yagi para cada uno de los canales que se monitorean en la empresa Radiocuba, Santiago.

Referencias Bibliográficas

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, New Jersey: Wiley & Sons, 2005.
- [2] M. M. Esquivel, «Teoría de Antenas,» Costa Rica, JUNIO 2001.
- [3] F. M. Emilio, «Conceptos generales de las Antenas,» Tucuman, 2011.
- [4] R. P. L., *Ser Radioaficionado*, Juarez: The American Radio Relay League (ARRL), 2001.
- [5] J. C. M. Porras, «Antena TV YAGI,» febrero 2012. [En línea]. Available: www.transmisoresperu.com. [Último acceso: marzo 2015].
- [6] R. Wester, «Radiocomunicacion,» mayo 2000. [En línea]. Available: www.rcomunicacion.com. [Último acceso: marzo 2015].
- [7] A. G. F. Marcelo Rodríguez Danta, *Campos Electromagnéticos*, México, 2000.
- [8] A. F. machado, «Canales de TV,» *Manual de antenas*, vol. 1, n° 3, p. 36, 2000.
- [9] C. Andrew, «Cables coaxiales,» mayo 2001. [En línea]. Available: [Cables coaxiales.com](http://Cables-coaxiales.com). [Último acceso: enero 2015].
- [10] P. Enterprises, «transmisoresperu,» enero 2012. [En línea]. Available: www.transmisoresperu.com. [Último acceso: febrero 2015].

GLOSARIO DE TÉRMINOS

BNC	<i>Baby N Conector</i>
CDP	Centro de Dirección Provincial
CEE	Consumo de energía eléctrica MN
CTE	Costo total de estaño en MN
IEEE	<i>Institute of Electronic and Electrical Engineers</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HFSS	<i>High Frequency Estructure Simulate</i>
MN	Moneda Nacional
NEC	<i>Nipan Electric Compani</i>
ROE	Razón de Onda Estacionaria
TV	Televisión
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>