

**MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION PARA ANTENAS  
MICROONDAS DE BAJO COSTO**

**MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION DE BAJO COSTO**

**JHON JAIRO VALLE REYES**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA**

**CARTAGENA - COLOMBIA**

**MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION DE BAJO COSTO**

**AUTOR**

**JHON JAIRO VALLE REYES**

**Monografía para optar título de ingeniero electrónico**

**DIRECTOR**

**José Luis villa Ramírez**

**Ingeniero electrónico**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA**

**CARTAGENA - COLOMBIA**

Cartagena de Indias, Agosto del 2015

Señores:

**COMITÉ DE EVALUACIÓN**

Facultad de Ingeniería Electrónica

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados Señores:

De la manera más cordial, nos permitimos presentar a ustedes para su estudio, consideración y aprobación el Trabajo de Grado titulado “DISEÑO DE UN MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION PARA ANTENAS MICROONDAS DE BAJO COSTO”, Trabajo de Grado presentado para obtener el título de Ingenieros Electrónicos. Esperamos que este proyecto sea de su total agrado.

Cordialmente,

---

**JHON JAIRO VALLE REYES**

CC. 1102835434 de Sincelejo

Cartagena de Indias, Agosto del 2015

Señores:

**COMITÉ DE EVALUACIÓN**

Facultad de Ingeniería Electrónica

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados Señores:

Con el mayor agrado me dirijo a ustedes para poner a consideración el Trabajo de Grado titulado “DISEÑO DE UN MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION PARA ANTENAS MICROONDAS DE BAJO COSTO”, el cual fue llevado a cabo por el estudiante JHON JAIRO VALLE REYES, bajo mi orientación como Director.

Agradeciendo su amable atención.

Cordialmente,

---

**José Luis Villa Ramírez**

# CONTENIDO

CONTENIDO .....	6
INTRODUCCION.....	11
MARCO TEORICO .....	14
1.1 TIPOS DE ANTENAS.....	16
1.1.1 ANTENA DIPOLO.....	16
1.1.2 DISTRIBUCCION DE CORRIENTE Y TENSION DE UN DIPOLO.....	17
1.1.3 IMPEDANCIA DE UN DIPOLO.....	18
1.1.4 RADIACION DE UN DIPOLO .....	19
1.1.5 ANTENA YAGUI .....	20
1.1.6 ANTENA PATCH.....	21
1.1.7 IMPEDANCIA.....	22
1.1.8 INTENSIDAD DE RADIACION.....	24
1.1.9 DIAGRAMA DE RADIACION.....	27
1.1.10 DIRECTIVIDAD.....	30
1.1.11 POLARIZACION.....	31
1.1.12 POLARIZACION LINEAL.....	32
1.1.13 POLARIZACION CIRCULAR.....	32
1.1.14 ANCHO DE BANDA.....	33

MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION .....	34
2.1 GENERALIDADES. ....	34
2.2 DESCRIPCION DEL HARDWARE.....	38
2.2.1 FUENTE RF. ....	38
2.2.2 Antena de transmisión. ....	39
2.2.3 Antena bajo prueba.....	40
2.2.4 Amplificador de bajo ruido. ....	41
2.2.5 Filtro pasa-banda. ....	42
2.2.6 Atenuador. ....	43
2.2.7 Detector RF. ....	44
2.2.8 Microcontrolador. ....	45
2.2.8.1 Arduino Pro micro. ....	45
2.2.8.2 Raspberry pi. ....	47
2.2.9 Motor paso a paso. ....	48
2.2.10 Convertidor de dos canales de AC/DC. ....	49
2.3 SOFTWARE .....	49
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE LA ANTENA.....	53
2.3.1 GENERALIDADES.....	53
2.3.2 Diagrama conexión eléctrica. ....	55
VALIDACION DEL PROTIPO .....	58
3.1 Calibración. ....	59

3.2	Medición del patrón de radiación.....	60
3.3	Ganancia.....	61
4	Conclusión.....	66
5	ANEXO.....	70

## Índice de tablas

Tabla 1	Relación de costos.....	¡Error! Marcador no definido.
---------	-------------------------	-------------------------------



## Índice de figuras

Figura 1 Antena Dipolo.....	16
Figura 2 Diagrama de radiación.....	19
Figura 3 Antena yagui .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 4 Antena patch. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 6 Diagrama de radiación vectorial.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 7 Diagrama de radiación tridimensional.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 8 Diagrama radiación polar y rectangular. ....	29
Figura 9 Diagrama radiación isotrópico, direccional, omni.....	30
Figura 10 Diagrama de bloques.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 11 Presupuesto de enlace microondas .....	37
Figura 12 Fuente RF. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 13 Antena patch. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 14 Amplificador de bajo ruido. ...	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 15 Filtro pasa bandas. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 16 Atenuador 20 dB .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 17 Detector de frecuencias.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 18 Arduino mini pro. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 19 Raspberry pi.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 20 Diagrama de flujo software .....	50
Figura 21 Estructura montaje antena....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 22 Diagrama eléctrico potencia. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Figura 23 Pcb montaje motor y microcontrolador. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 24 Diagrama eléctrico control .... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 25 Regresión lineal obtención función de ganancia. .... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 26 Diagrama de radiación monopolo prueba 1 ..... 63

Figura 27 Diagrama de radiación monopolo prueba 2 ..... 63

Figura 28 Diagrama de radiación prueba 2 **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 29 Diagrama de radiación prueba 1 **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 30 Vista superior plataforma antena..... 70

Figura 31 Vista lateral plataforma antena ..... 71

Figura 32 Vista diagonal plataforma antena ..... 71

## **INTRODUCCION**

El presente trabajo se encuentra enfocado en dos puntos relacionados con la calidad de las comunicaciones: el primero es la medición del patrón de radiación de diferentes tipos de antenas, el segundo es que con la obtención de dicho patrón este nos describe el comportamiento direccional de la energía que se irradia. En este trabajo se propone un sistema que consiste en la medición de la magnitud de la señal relativa en base a la señal electromagnética recibida de la antena bajo medición y así poder obtener la representación del campo eléctrico o la densidad de potencia en diferentes posiciones angulares. Esto se logra mediante una tarjeta generadora de señales en alta frecuencia, un detector de fase y ganancia y un microcontrolador que es el encargado del sistema de adquisición de datos y de la interfaz gráfica.

Tomando en cuenta su diseño y los materiales con los que están construidas, las antenas irradian a cierta frecuencia. Después de su construcción es necesario colocar dicha antena bajo pruebas haciendo mediciones principalmente a su patrón de radiación, impedancia y pérdidas por polarización, siendo el más utilizado el

medidor de patrón de radiación ya que este nos muestra como irradia o recibe en cierta frecuencia.

Lamentablemente los medidores de patrón de radiación son sistemas costosos que no se consiguen fácilmente. Es por esto que en este trabajo se diseña, construye y valida un medidor de patrón de radiación de bajo costo.

En consecuencia, el objetivo general del proyecto es Diseñar e implementar un sistema de bajo costo para la medición rápida y eficiente del patrón de radiación de antenas para comunicaciones inalámbricas en el rango de microondas que sea liviano, y portátil. Adicionalmente se busca que ofrezca una interfaz amigable al usuario y que se pueda usar para realizar demostraciones experimentales orientadas a la enseñanza y la investigación formativa en pregrado.

Como objetivos específicos se definieron:

- Establecer un estudio del estado del arte de antenas pequeñas para comunicaciones inalámbricas de corto alcance en el rango de frecuencias de microondas, enfatizando en sus características estructurales, los requerimientos de funcionamiento y los parámetros que definen su desempeño.
- Diseñar conceptualmente e implementar el sistema de transmisión y recepción.

- Implementar una interfaz de usuario que permita realizar el procesamiento de los datos de medición y generar la gráfica del patrón de radiación de la antena de prueba.
  
- Validar el sistema diseñado con al menos dos tipos de antenas.

Este documento está estructurada de la siguiente manera, en el primer capítulo tratamos acerca de las comunicaciones añadiendo un poco acerca ondas y líneas de trasmisión, generalidades de las antenas, intensidad de radiación y la polarización de las antenas. En el segundo capítulo tratamos acerca del diseño y construcción del sistema de medición de patrón de radiación, especificando tres puntos importantes los cuales son: descripción hardware y software, sistema de posicionamiento y validación del prototipo.

## MARCO TEORICO

Las primeras demostraciones de los fenómenos eléctricos y magnéticos se pudieron contemplar por medio de las fuerzas que actuaban sobre cargas, pero esta manifestación, aunque muy provechosa, no permite estudiar fácilmente los fenómenos de propagación y radiación de las ondas, por lo que es obligatorio la introducción del concepto de campo. Un campo se manifiesta en un punto, o se mide, agregando cargas y corrientes de prueba facilitando la observación de las fuerzas ejercidas sobre ella. (Bataller, 2002)

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que logran crear esta. El Institute of Electrical and Electronics Engineer define una antena como una parte de un sistema de transmisión o recepción que es capaz de radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983). Sus formas son muy variadas, las antenas poseen una región de transmisión en medio de una zona donde se encuentra una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre, a la cual se le puede agregar una propiedad direccional. La representación de las ondas guiadas se presenta por voltajes y corrientes que viajan a

través de una línea de transmisión o por campos que en su caso viajan a través de una guía de onda; en el espacio libre mediante campos.

La primera y más importante labor de una antena es radiar potencia que se le suministra con ciertas características. Dependiendo de su aplicación cambia su direccionalidad. Por ejemplo, las comunicaciones móviles o radiodifusión requieren de antenas omnidireccionales, por otro lado las comunicaciones fijas requieren de antenas direccionales. En general cada aplicación contiene ciertos requisitos acerca de la zona del espacio en la que se quiere concentrar la energía. Existen dos trabajos básicos de las antenas: transmitir y recibir, asignando ciertas condiciones a las antenas dependiendo de su aplicación como los niveles de potencia que deberá soportar la antena, la frecuencia de trabajo de esta y demás parámetros que definiremos posteriormente. Situaciones como esta son las que hacen crear un sin número de antenas variando sus parámetros. Toda onda variable en el tiempo se caracteriza por su longitud de onda y frecuencia. El espectro de frecuencia se divide por décadas de bandas, que tienen ciertos rangos de frecuencia. Las antenas tienen unas características de impedancia y radiación que dependen de la frecuencia de trabajo. A partir de las ecuaciones de Maxwell se permite realizar un análisis de dichas características en el dominio de la frecuencia, utilizando expresiones en forma compleja o fasorial.

## 1.1 TIPOS DE ANTENAS.

### 1.1.1 ANTENA DIPOLO.

La antena dipolo es el diseño más sencillo. Consiste en un conductor de media longitud de onda a la frecuencia de trabajo, cortado por la mitad, en cuyo centro se proporciona una tensión transmitida por una línea desde un generador.

La longitud de un dipolo es:

$$L = 150 / f$$

Siendo  $f$  la frecuencia en megahercios.

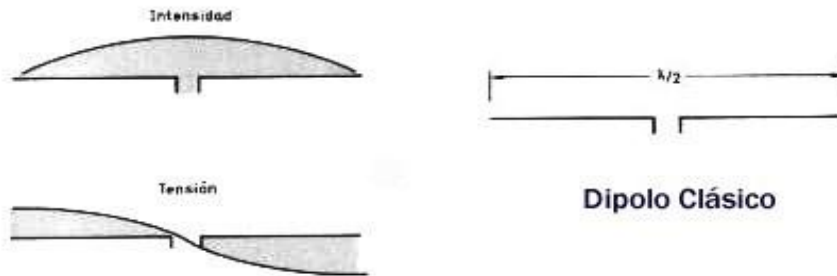


Figura 1 Antena Dipolo Fuente: Antenas Miguel Bataller

Para obtener la resonancia se debe acortar esta longitud debido al mismo efecto que el factor de propagación de las líneas de transmisión.



Para todos los efectos prácticos, salvo para dipolos en frecuencias muy elevadas en las que el diámetro del hilo puede tener influencia, se puede considerar que acortando la longitud un 5 % se consigue la condición de resonancia. (Radio comunicaciones, s.f.)

Por lo tanto, la fórmula queda:

$$L = 142,5 / f$$

### **1.1.2 DISTRIBUCCION DE CORRIENTE Y TENSION DE UN DIPOLO.**

En el centro tenemos una tensión reducida y una intensidad elevada, mientras que en las puntas se produce una tensión muy elevada y una intensidad nula. Esto quiere decir que hay que tener cuidado con la sujeción de esos puntos. Si el aislador no es de buena calidad, la elevada tensión existente en las puntas puede producir grandes pérdidas. También hay que tener en cuenta el hecho de que incluso con potencias pequeñas se pueden producir quemaduras en caso de tocar accidentalmente esas puntas. (Radio comunicaciones, s.f.)

### **1.1.3 IMPEDANCIA DE UN DIPOLO.**

La impedancia nominal de un dipolo es de 73 ohmios. Sin embargo, en un dipolo real situado a una cierta distancia del suelo la impedancia varía considerablemente. Este efecto no tiene demasiada importancia si se puede aceptar una Relación de Onda Estacionaria (ROE) máxima en la línea de transmisión de 2:1. Si se quiere anular esta ROE sólo podemos hacerlo variando la altura del dipolo. Cuanto más alto se encuentra el dipolo respecto a tierra, menor es la variación de impedancia y más se aproxima al valor nominal de 73 ohmios. Un dipolo colocado a una altura de  $3/8$  de la longitud de onda tendrá una impedancia de 81 ohmios aproximadamente.

Conectándolo a una línea de 75 ohmios, la ROE será  $81/75$  o sea 1,08:1, que es muy pequeña. Si el dipolo se encuentra a más de media longitud de onda de altura sobre el suelo a la frecuencia de trabajo, la ROE que habrá en la línea será insignificante.

En cualquier caso, alimentando un dipolo con una línea de 52 ohmios habrá que aceptar una ROE de 1,5:1 aproximadamente. Además conviene evitar las alturas comprendidas entre un poco más de  $1/4$  y un poco menos de  $1/2$  de longitud de onda. Como norma general, un dipolo no debe montarse a alturas inferiores a  $1/4$  de longitud de onda, ya que la impedancia baja muy rápidamente.

### 1.1.4 RADIACION DE UN DIPOLO

La radiación de un dipolo en el espacio libre es la que se indica en la figura 2. Radia exactamente igual en todas direcciones, mientras que en el plano del dipolo radia con un máximo en la dirección perpendicular al hilo y un mínimo en la dirección del hilo. O sea que el dipolo es ligeramente directivo en direcciones perpendiculares al hilo del dipolo. Para efectos prácticos puede decirse que el dipolo es omnidireccional, excepto para direcciones hacia las puntas o muy próximas a ellas. (Bataller, 2002)

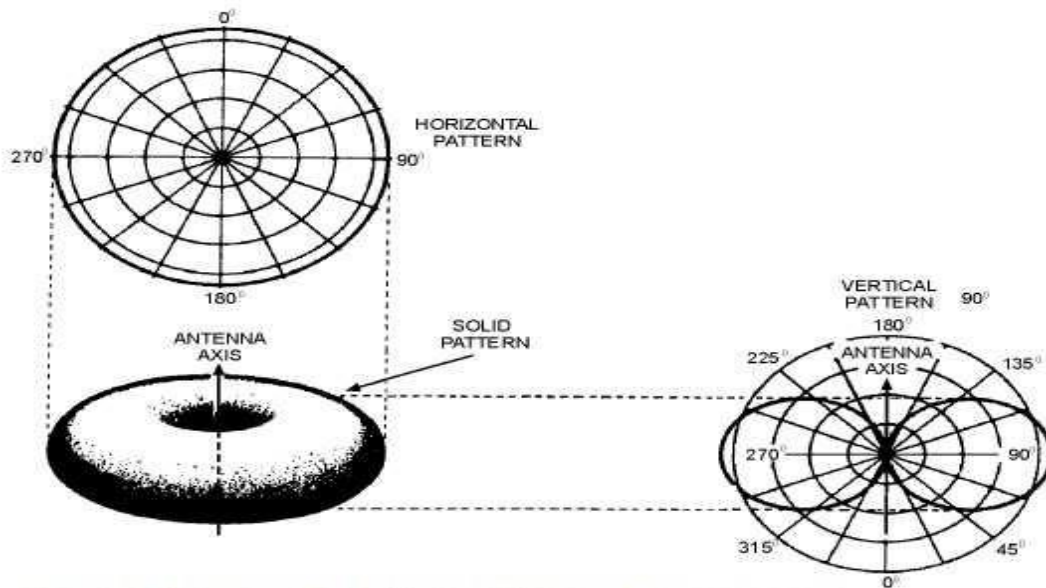
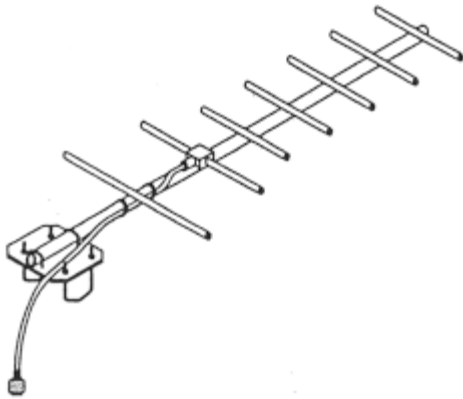


Figura 2 Diagrama de radiación Fuente: Antenas Miguel Bataller

### 1.1.5 ANTENA YAGUI



*Figura 3 Antena yagui*

Se componen de un arreglo de elementos independientes de antena, donde solo una de ellas transmite las ondas. El número de elementos determine la ganancia y directividad, estas no son tan direccionales como las parabólicas pero son más directivas que las antenas tipo panel.

### 1.1.6 ANTENA PATCH.



*Figura 4 Antena patch.*

Las antenas del panel plano son antenas como su nombre lo dice de forma cuadrada o rectangular, se encuentran configuradas de un formato tipo patch. Las antenas del tipo panel plano son antenas muy direccionales ya que su potencia radiada se encuentra en una dirección determinada sea en el plano horizontal o vertical. Su ganancia puede variar dependiendo a sus parámetros de construcción.

### 1.1.7 IMPEDANCIA.

Como en todo sistema eléctrico, electrónico o de cualquier campo el factor más importante es la eficiencia del sistema, se busca minimizar las pérdidas y en este caso lo que necesitamos es la máxima radiación de energía posible que pueda brindar la antena. Esto lo podemos lograr gracias al acoplamiento de impedancias entre el transmisor y la antena para lograr la máxima transferencia de potencia. La conexión entre estas se hace mediante guías de ondas o líneas de transmisión, considerando su impedancia característica, atenuación y su longitud.

En la entrada de la antena podemos definir la impedancia de entrada  $Z_e$  como la relación entre la tensión-corriente en ese punto. En notación fasorial con régimen permanente sinusoidal estará constituida por una parte real  $R_e(\omega)$  y una imaginaria  $X_e(\omega)$ , ambas dependientes en general de la frecuencia. Si en caso tal la antena no presenta en su impedancia parte reactiva en cierta frecuencia, se dice que es una antena resonante. Dado que la antena radia energía, podemos encontrar una pérdida de potencia hacia el espacio debida a la radiación, que puede ser asignada a una resistencia de radiación  $R_r$ , definida como el valor de la resistencia que disiparía la misma potencia que la radiada por la antena.

$$P_{\text{radiada}} = I^2 * R_r$$

En la radiación se obtienen las pérdidas que puedan producirse en la antena, por lo general de tipo óhmicas en los conductores, si bien podemos hallar pérdidas en el núcleo en aquellas antenas de material ferrita. La potencia total radiada por la antena puede deducirse en la suma de las potencias radiadas y de pérdidas en la antena, todas las pérdidas pueden generalizarse en una resistencia de pérdidas  $R_\Omega$ . La resistencia de entrada es la suma de la radiación y pérdidas.

$$P_{\text{entregada}} = P_{\text{radiada}} + P_{\text{pérdidas}} = I^2 * R_r + I^2 * R_\Omega$$

La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia, ya que condiciona las tensiones de los generadores que se deben fijar para obtener determinados valores de corriente en la antena y, en consecuencia una determinada potencia radiada. Si encontramos en el sistema una parte reactiva muy grande, los niveles de tensión cambiarán elevándolos para poder encontrar la corriente necesaria para obtener la potencia deseada, si la resistencia de radiación es baja, se necesitarán elevadas corrientes para obtener una potencia radiada deseada.

Con esto se logra que la mayor parte de la potencia emitida en el transmisor sea radiada. Llamaremos la eficiencia como la relación entre la potencia radiada y la entregada.

$$\eta = \frac{P\text{-radiada}}{P\text{-entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

### 2.1.1 INTENSIDAD DE RADIACION.

Una de las características fundamentales de las antenas es la capacidad para radiar energía con una directividad determinada, es decir, la característica que posee cada antena para concentrar cierta cantidad de energía en un espacio determinado. Por lo tanto es conveniente cuantificar este fenómeno con distintos parámetros que nos permitan establecer una comparación entre distintas antenas.

Inicialmente se define el marco de referencia donde se encuentra posicionada la antena que se quiere caracterizar. Para ello se emplea un sistema de coordenadas que permita definir fácilmente una dirección en el espacio.

El sistema de coordenadas utilizado comúnmente en antenas para su caracterización es el esférico. Para especificar dirección se utilizan los ángulos  $\Theta$ ,  $\varphi$ . En el sistema utilizado (Figura 6) se definen los vectores unitarios que forman una base ortogonal.

La onda electromagnética radiada se encuentra compuesta de un campo eléctrico  $\vec{E}$  (V/m), y uno magnético  $\vec{H}$  (A/m), ambos con magnitudes vectoriales y ligadas a las ecuaciones de Maxwell.

Partiendo de los valores eficaces de los campos mencionados se obtiene la densidad de flujo por unidad de superficie mediante.



$$\bar{Q}(\theta, \varphi) = R_e(\bar{E} \times \hat{H}^*) \text{ W/m}^2$$

Para los campos radiados, los módulos de campo eléctrico y campo magnético están relacionados por la impedancia característica del medio  $\eta$ , que en el vacío equivale a  $120\pi \Omega$ .

Por lo tanto, la densidad de potencia radiada también se puede calcular a partir de las componentes transversales del campo eléctrico.

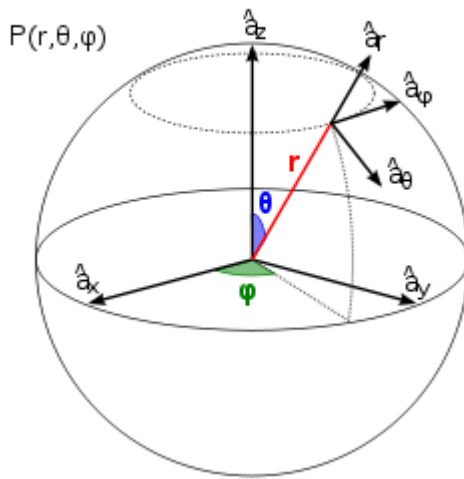


Figura 5 Diagrama de radiación vectorial

$$\bar{Q}(\theta, \varphi) = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{\eta}$$

La potencia total radiada se puede obtener como la integral de la densidad de potencia en una superficie esférica que encierre a la antena

$$P_r = \iint_S \bar{Q}(\theta, \phi) \cdot ds$$

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una dirección determinada. Sus unidades son vatios por estereorradián y a distancias elevadas tiene la característica de ser independiente de la distancia a la que se encuentra la antena.

$$K(\theta, \phi) = \bar{Q}(\theta, \phi)r^2$$

Además la potencia total radiada se puede calcular en todas las direcciones del espacio integrando.

$$P_r = \iint_{4\pi} K(\theta, \phi) \cdot d\Omega$$

Al ser un término diferencial el ángulo sólido en coordenadas esféricas

$$d\Omega = ds/r^2 = \sin\theta d\theta d\phi$$

### 1.1.8 DIAGRAMA DE RADIACION.

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las diferentes propiedades de radiación de la antena, dependiendo de las distintas direcciones en el espacio a una distancia fija. Como lo mencionamos anteriormente el sistema escogido para la representación de la intensidad de radiación de una antena es el sistema esférico. Con la antena fijada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresa el campo eléctrico en función de las variables angulares. El campo es una magnitud vectorial, se determina en cada punto de la esfera de radio constante el valor de las dos componentes ortogonales, definido según los vectores unitarios.

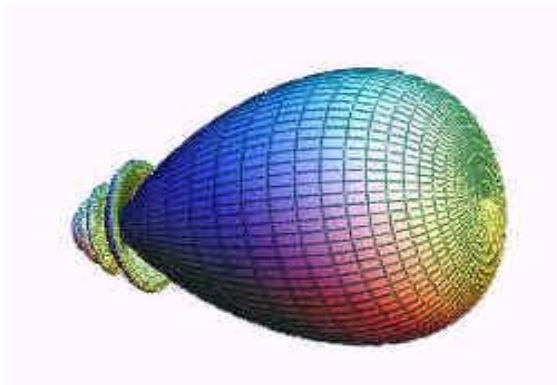
La intensidad de potencia es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico, por lo que la representación gráfica de un diagrama de potencia contiene la misma estructura que un diagrama de radiación de campo.

En determinadas circunstancias puede ser necesario la representación gráfica de la fase de  $E(\theta, \phi)$ , incluyendo la amplitud de las dos componentes. Esta representación se denomina diagrama de fase de la antena.

Al observar el diagrama de radiación de la antena a una gran distancia, su radiación se observara como si esta proviniera de un

punto, es decir, los frentes de ondas serian esféricos. A este punto, centro de la curvatura de la superficie de fase constante, es denominado centro de fase de la antena.

El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional utilizando técnicas de gráficas, en la figura 7 y 8 se puede apreciar los diagramas tridimensionales y en dos dimensiones de una antena y los planos E y H. Los niveles se expresan en dB tomando como referencia el máximo de radiación.



*Figura 6 Diagrama de radiación tridimensional.*

Para antenas linealmente polarizadas se define el plano E como el plano que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección.

Los diagramas bidimensionales del diagrama de radiación son representados en coordenadas polares y cartesianas. En el primer caso el ángulo theta representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la magnitud del campo eléctrico o densidad de

potencia radiada. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y la intensidad de campo en ordenadas.

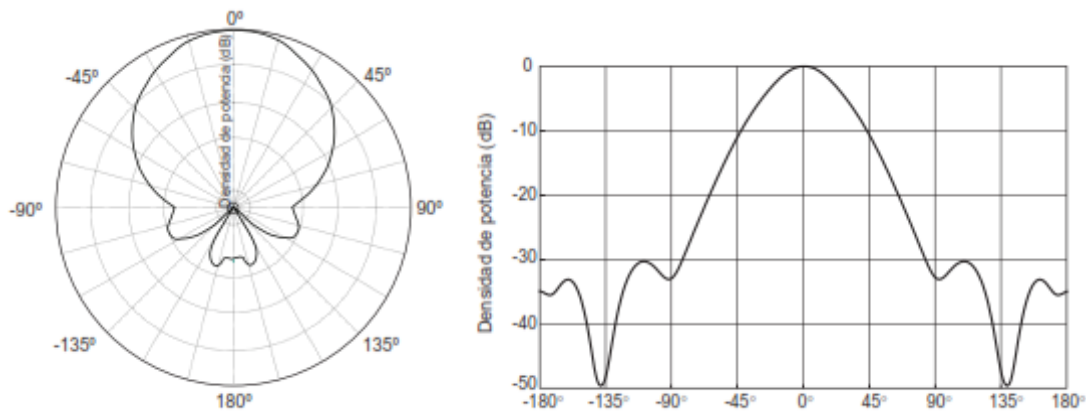


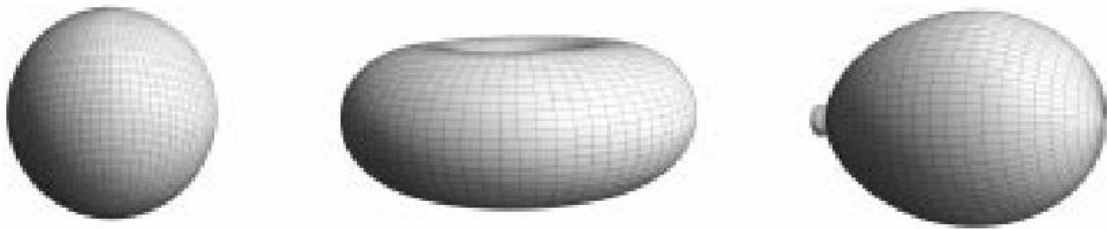
Figura 7 Diagrama radiación polar y rectangular.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, en tanto el diagrama polar nos suministra una información general de la potencia radiada por la antena en las diferentes direcciones del espacio.

En un diagrama típico como se muestra en las figura 8, se aprecia una región en donde la radiación es máxima, a la que se denominó lóbulo principal. Las zonas restantes que rodean el lóbulo principal se llaman lóbulos laterales, el mayor lóbulo lateral se denomina lóbulo secundario. El ancho del haz a -3 dB se denomina separación angular en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo. La relación del lóbulo principal y secundario (NLPS) es el cociente, expresado en dB, entre la magnitud en la dirección

máxima de radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario. La relación delante-atrás (D/A) es el cociente, también expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor opuesto. Si un diagrama de radiación de potencia presenta simetría de revolución en torno a un eje, podemos decir que la antena es omnidireccional.

Se denomina antena isotrópica a una antena ideal que radie la misma potencia en todas las direcciones del espacio. La antena mencionada anteriormente no existe, aunque es de gran utilidad para definir diferentes parámetros que se estudiarán más adelante.



*Figura 8 Diagrama radiación isotrópico, direccional, omnidireccional. Fuente: Antenas Miguel Bataller.*

### **1.1.9 DIRECTIVIDAD.**

La directividad  $D$  de una antena se determina como la relación entre la potencia radiada en una dirección, a una distancia determinada, y la potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica que radiara la misma potencia en la antena.

$$D(\Theta, \varphi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_T / (4\pi r^2)}$$

Si en caso tal no se define la dirección angular, se entenderá que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$D(\Theta, \varphi) = \frac{\rho_{max}}{P_T / (4\pi r^2)}$$

#### **1.1.10 POLARIZACION.**

La polarización de una antena es la polarización de la onda radiada por la antena en una dirección determinada.

La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada. Para ondas de tipo sinusoidal dicha figura es en general una elipse. Existen varios casos particulares.

El sentido de giro del campo eléctrico, para una onda que se aleja del observador, determina si la onda está polarizada circularmente a la derecha o a la izquierda. El mismo caso aplica para la polarización de tipo elíptica.

### **1.1.11 POLARIZACION LINEAL.**

Se dice que una onda esta polarizada de manera lineal si las componentes x e y del campo eléctrico se encuentra en fase o a  $180^\circ$ , para todo plano z constante el extremo del campo eléctrico se define una recta en el plano X-Y.

### **2.1.2 POLARIZACION CIRCULAR.**

Es una característica deseable para muchas clases de antenas, ya que dos antenas polarizadas circularmente no sufren pérdidas de señal gracias a la desadaptación de la polarización. El vector campo eléctrico describe una trayectoria circular. Si rota en dirección a las manecillas del reloj la polarización es a la derecha, si el vector campo eléctrico gira en contra de las manecillas del reloj la polarización es a la izquierda.

Para generar o recibir polarización circular existen dos métodos, o construir las antenas mecánicamente de tal manera que su forma de irradiar sea intrínsecamente circular, que es el caso de las antenas helicoidales, o utilizar dos antenas de tipo yagui de tipo lineal montadas mecánicamente a  $90$  grados y alimentadas con un desfase de  $90$  grados entre ellas en su punto de resonancia con una alimentación única.



### 2.1.3 ANCHO DE BANDA.

Todas las antenas, gracias a su geometría limitada, se encuentran cerradas a operar satisfactoriamente en un margen de frecuencia. Este intervalo de frecuencia, en el que un parámetro de una antena determinada no sobrepasa los límites establecidos, se conoce como el ancho de banda de una antena.

El ancho de banda (BW) se puede establecer como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen dichos parámetros y la frecuencia central. Esta relación se puede representar en porcentaje.

$$BW = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_0}$$

El ancho de banda de la antena lo impondrá el sistema del que forma parte y afectará al parámetro más sensible o crítico de la aplicación. Para detalles los parámetros pueden dividirse en dos grupos según se interactúen con la impedancia o el diagrama, el primero de ellos será la directividad, la pureza de la polarización, el ancho de haz, el nivel del lóbulo principal a secundario y la dirección máxima de radiación, en el segundo la impedancia de la antena, el coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria.

## MEDIDOR DE PATRON DE RADIACION

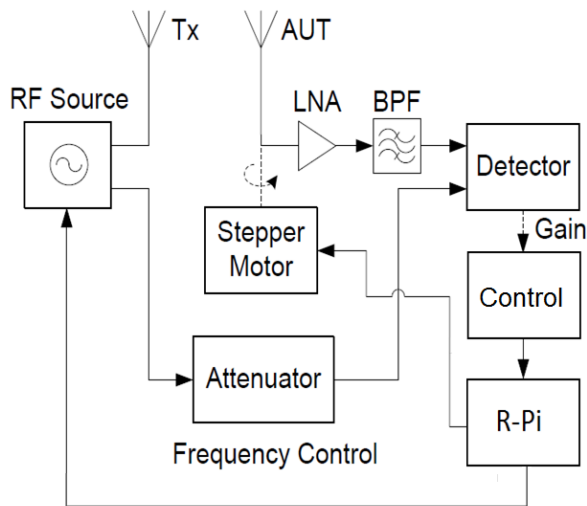


Figura 9 Diagrama de bloques.

En esta sección presentamos el diseño del sistema de medición de patrón de radiación propuesto. Primero definimos los parámetros de diseño, luego presentamos el diseño del hardware y finalmente presentamos los algoritmos de cálculo y el software de visualización.

### 2.1.4 GENERALIDADES.

Los parámetros de diseño para el sistema de medición de patrón son los siguientes:

- Construir y establecer un radio enlace para antenas microondas de baja potencia con el fin de construir un sistema capaz de realizar una medición de la relación de la señal emitida y recibida mediante un dispositivo electrónico.

- Procesar los datos obtenidos y representarlos gráficamente.

Para la realización del radio enlace se procedió a escoger el detector encargado de la medición de ganancia entre dicha señales, a partir de las condiciones de operación del detector se escogerán los dispositivos restantes para construcción radioenlace. Un sintetizador controlado por voltaje con doble salida y frecuencia ajustable es elegido para la generación de ondas en alta frecuencia. Para el diseño del radio enlace los anteriormente mencionados son los dispositivos electrónicos básicos para nuestra aplicación en especial, a partir de estos procedimos escoger las líneas de trasmisión un filtro pasa banda para eliminar señales ajenas a nuestro rango de frecuencia y amplificadores para mantener el rango de potencia permitido por el detector en la figura 11 se muestra la propuesta de enlace. La relación de onda estacionaria (ROE) es admisible hasta 1:2, con el fin de asegurar niveles de potencia deseados, en lo posible no flexionar las líneas de trasmisión esto aumentara el ROE, asegurar los conectores. La impedancia del sistema en general es 50 ohm, impedancia establecida por los requerimientos del detector. Para el sistema de procesamiento de datos y control de giro de la antena, es preciso seleccionar un microcontrolador con conversor A/D integrado adicionando pines capaces de generar una modulación por ancho de pulso con el fin de controlar el movimiento de la antena con resolución de 1°. Para el almacenamiento de datos y construcción grafica del

patrón de radiación, es necesario una tarjeta capaz de hacer dicho proceso.

Para la selección de los dispositivos electrónicos se hizo un contraste que integre rendimiento y costo, las empresas que nos brindaban lo anteriormente mencionado eran, por la parte del detector y el generador de onda Texas instrument y Analog Devices, ya que ambos nos brindaron las mismas características, el precio definirá la selección del dispositivo.

Para la construcción del medidor de patrón de radiación se ha realizado un diagrama de bloques donde se generaliza el comportamiento y el sistema hardware/software que se implementaran. Un diagrama de bloques del sistema de medición para la antena se muestra en la Figura 10. La fuente de RF consiste en un sintetizador de frecuencia de doble salida. Una de las salidas está conectada directamente a una antena de trasmisión, el filtrado no se requiere desde la antena de trasmisión ya que se asume que es de banda estrecha y diseñada para funcionar a 2,4 GHz. La otra salida es conectada al detector RF/IF ganancia y fase, atenuada según el nivel de referencia que se calcule.

La señal recibida por la antena bajo prueba es amplificada por un amplificador de bajo ruido y es filtrada por medio de un filtro pasa banda. La detección de la señal se consigue utilizando un detector de ganancia. Este dispositivo genera un voltaje analógico proporcional a la ganancia en dB de las señales presentes en sus dos entradas. La

salida de tensión del detector es digitalizada por un microcontrolador para su procesamiento a su vez encargándose también del accionamiento y control del motor paso a paso que es acoplado por engranes a un sistema de montaje para la antena bajo prueba, la unidad central que se manejara será la raspberry pi donde se diseñara la interfaz gráfica amigable al usuario fácil de comprender basada en el lenguaje de programación Python.

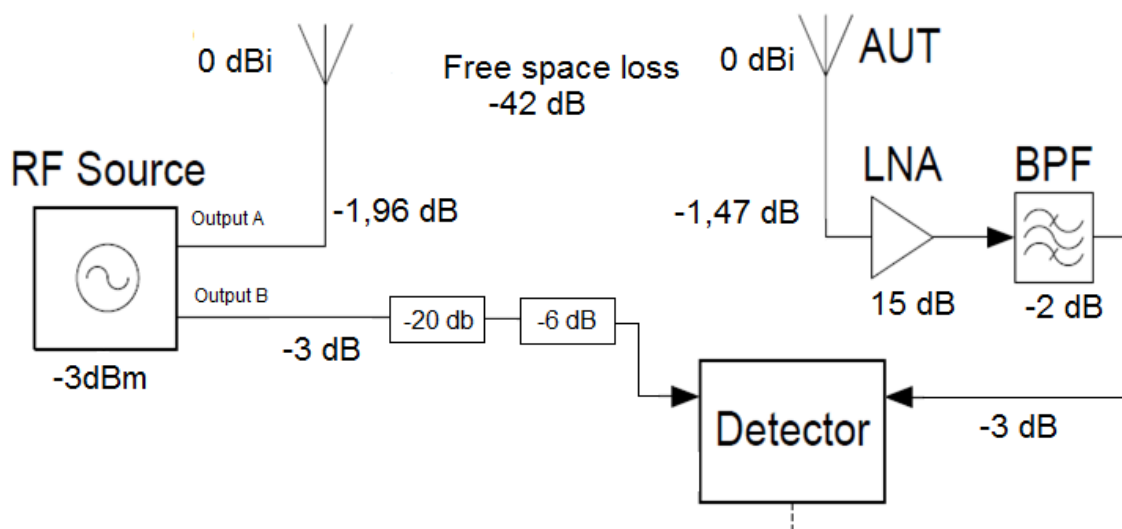


Figura 10 Presupuesto de enlace microondas

## 2.1.5 DESCRIPCION DEL HARDWARE.

### 2.1.6 FUENTE RF.



Figura 11 Fuente RF.

La fuente de RF consiste en la placa Analog Devices ADF43600 placa de evaluación. El ADF4360-0 es un sintetizador de frecuencia y un oscilador controlado por voltaje integrado, capaz de generar señales de microondas complementaria de referencia de cristal sobre un rango de frecuencia de 2,4 GHz a 2,725 GHz. Tanto el nivel de frecuencia y la potencia de las salidas de 50 ohm se ajustan mediante la actualización de registros de control en serie desde el microcontrolador. Tras la puesta en marcha, la frecuencia se establece en 2,4 GHz y el nivel de potencia se ajusta a -3 dBm.

Durante una medición, se hace un barrido de frecuencia desde 2,4 GHz a 2,45 GHz en diez pasos discretos, para evitar así señales distintas a la programada en los registros.

### 2.1.7 Antena de transmisión.



*Figura 12 Antena patch.*

Una de las salidas de la ADF4360-0 se alimenta a la antena de transmisión a través de 96 pulg de RG-316 cable coaxial. La pérdida asociada a esta longitud de cable es de aproximadamente 2 dB. En consecuencia, la potencia transmitida es -5 dBm. La antena está montada 0,9 m por encima de la superficie de la mesa en un soporte de madera fijada para reducir al mínimo la perturbación de los campos electromagnéticos. La antena de transmisión debe exhibir una VSWR

de entrada de 2: 1 o menos de 2,4 GHz a 2,45 GHz. También debe exhibir exposición 5 dBi a 10dBi de ganancia con el fin de mejorar el rango dinámico del detector.

### **2.1.8 Antena bajo prueba.**

La antena bajo prueba se monta 0,9 m por encima de la superficie de la mesa sobre el sistema de posicionamiento de la antena. La AUT se coloca al menos 1,25 m de la antena de transmisión. La pérdida de propagación en el espacio libre asociado es de aproximadamente 42 dB. Ignorando la ganancia de la antena, la potencia recibida es de - 47 dBm. La antena bajo prueba debe exhibir un VSWR de entrada de 2: 1 o menos de 2,4 GHz a 2,45 GHz.

La pérdida de propagación en el espacio libre fue calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$LL_{fs} = 32.45 + 20(\log(f * 10^3) + \log(D/10^3))$$

Donde:

*F: frecuencia [GHz]*

*D: distancia [m]*



## 2.1.9 Amplificador de bajo ruido.



*Figura 13 Amplificador de bajo ruido.*

La salida de la AUT se alimenta a la LNA a través de 72 pulg de RG-316 cable coaxial que se traduce en una pérdida de aproximadamente 1.5 dB. El Mini-Circuits ZX60-272LN + LNA opera desde 2.3 GHz a 2.7 GHz y proporciona una ganancia de 14 dB. En consecuencia, la potencia de salida del amplificador es de aproximadamente -34,5 dBm con 0 dBi antenas.

### 2.1.10 Filtro pasa-banda.



*Figura 14 Filtro pasa bandas.*

La entrada a la BPF está conectado directamente a la salida del LNA. El Mini-Circuits VBF-2435 + BPF opera con una frecuencia central de 2435 MHz y un ancho de banda de 190 MHz. La pérdida de inserción a 2,4 GHz es de aproximadamente 2 dB, lo que resulta en un nivel de potencia de salida de aproximadamente -37 dBm con antenas 0 dBi. La salida del BPF se alimenta a una entrada del detector de ganancia a través de un tramo corto de cable coaxial.

### 2.1.11 Atenuador.



*Figura 15 Atenuador 20 dB*

La otra salida de la ADF4360-0 está conectado a una etapa de atenuación a través de un cable corto exhibiendo 3 dB de pérdida. La etapa de atenuación consta de un atenuador de 6 dB seguido de un atenuador de 20 dB. Como resultado, una señal -29,5 dBm se alimenta a la otra entrada del detector de ganancia.

### 2.1.12 Detector RF.



Figura 16 Detector de frecuencias

El detector consiste en la placa de evaluación Analog Devices AD8302. El AD8302 es un detector de ganancia y fase RF / IF que es capaz de operar hasta 2,7 GHz y ofrece una sensibilidad de ganancia nominal de 30 mV / dB. Tenga en cuenta que la ganancia se mide entre las entradas INPA e INPB. La entrada INPB actúa como nivel de referencia para el cálculo de ganancia. El dispositivo responde a las señales entre 0 dBm y -60 dBm, en consecuencia, el nivel de potencia de referencia óptimo a INPB es -30 dBm información proporcionada por la hoja de datos del fabricante y coincide con el -29.5 dBm entregado desde la fase de atenuación, El error de linealidad en el 2,2 GHz es especificado como +/- 0,5 dB para un rango dinámico de 51 dB. En consecuencia, el nivel de potencia que aparece en INPA debe oscilar entre -5 dBm y -55 dBm. Para antenas con 0 dBi de ganancia, el nivel de potencia en el INPA es de aproximadamente -37 dBm, la

gama dinámica mínima para la medición debe ser de 14 dB. La tensión suministrada en por el detector AD8302 (Gain) se procesara a través de un convertidor análogo digital (ADC) de 10 bits de resolución contenido en el microcontrolador seleccionado, esto se encuentra sujeto a errores de cuantificación

### 2.1.13 Microcontrolador.

### 2.1.14 Arduino Pro micro.



Figura 17 Arduino mini pro.

El Arduino Pro Mini es una placa electrónica basada en el ATmega328 (ficha técnica). Cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador de a bordo, un botón de reinicio, y los agujeros para el montaje de conectores macho. Un cabezazo de seis pines se puede conectar a un cable FTDI o tablero del desbloqueo de Sparkfun para proporcionar alimentación USB y la comunicación a la junta.

El Arduino Pro Mini está diseñado para la instalación semi - permanente en objetos o exposiciones. El tablero viene sin cabeceras pre-montada, permitiendo el uso de varios tipos de conectores o soldadura directa de cables. La disposición de las clavijas es compatible con el Arduino Mini.

El Arduino Pro Mini tiene una serie de instalaciones para la comunicación con un ordenador, otro Arduino, u otros microcontroladores. El ATmega328 cuenta con una UART TTL de comunicación serie, que está disponible en los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX). El software de Arduino incluye un monitor de puerto serie que permite a los datos de texto simples ser enviados hacia y desde la placa Arduino a través de una conexión USB.

El ATmega328 también es compatible con el protocolo I2C (TWI) y con comunicación SPI. El software de Arduino incluye una biblioteca denominada wire para simplificar el uso del bus I2C. (Arduino)

### 2.1.15 Raspberry pi.



*Figura 18 Raspberry pi.*

La raspberry pi es un ordenador de placa reducida de bajo costo diseñado con el fin de estimular la enseñanza en las ciencias de la computación.

El diseño incluye un system on a chip Broadcom BCM2835 que contiene un procesador central (CPU) ARM1176JZF-S a 700 MHz, un procesador gráfico (GPU) videoCore IV, y 512 MB de memoria RAM. El diseño no incluye un disco duro ni unidad de estado sólido, ya que usa una tarjeta SD para el almacenamiento permanente, tampoco contiene fuente de alimentación ni carcasa. El sistema operativo es basado en Linux y con derivaciones de los distintos sistemas operativos creados a partir de Linux, promueve principalmente el aprendizaje del lenguaje de programación Python. (Raspberry pi, 2008)

Un Raspberry Pi contiene un puerto Ethernet, dos puertos USB, un puerto HDMI, una salida VGA video y un Jack para sonido. Adicionalmente cuenta con una placa GPIO donde radica una de las más importantes aplicaciones ya que esta placa cuenta con pines digitales para la lectura y escritura, además pines para comunicación serial I2C y SPI y pines para alimentación 5 v y 3,3 v. El voltaje de referencia de la raspberry es 3,3 v. su alimentación consta de un Jack de nano USB 5 V y hasta 1000 mA.

La raspberry pi es la encargada del control del sistema mediante un programa basado en Python encargado de la recolección de los datos obtenidos por medio de la comunicación serial, la graficación de dichos datos y el control del motor en secuencia completa o paso a paso.

### **2.1.16 Motor paso a paso.**

Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte señales eléctricas en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de avanzar en una serie de pasos con un determinado ángulo que depende de la señal de control y de la configuración empleada para conectar dicho motor.

En nuestro proyecto se utiliza un motor con una resolución de 0.9 grados/paso para el sistema de posicionamiento de la antena.



Actuando este según los comandos asignados en el microcontrolador, secuencia completa o paso a paso en contra o en sentido del reloj, en configuración bipolar. Siendo una limitante la corriente que utiliza este motor en dicha configuración se emplea un integrado ULN2803 que consta de un arreglo de transistores de tipo Darlington, así utilizaremos los transistores como switches.

### **2.1.17 Convertidor de dos canales de AC/DC.**

Según las consideraciones de la corriente y tensiones que se emplean en los dispositivos se ha seleccionado una fuente de 30 W con salidas de 5 y 12 v, ya que son las tensiones características en los dispositivos empleados con una salida de corriente de 4 y 2 A respectivamente. Este convertidor se caracterizó teniendo en cuenta las consideraciones de consumo por parte del sistema.

## **2.2 SOFTWARE**

En esta sección brindaremos información acerca de la programación del sistema de medición de patrón de radiación. Como anteriormente se mencionó para el control del sistema de medición fue primordial el uso de un microcontrolador y de la raspberry, por una parte el microcontrolador seleccionado como se puede ver en la anterior

sección, es de fácil programación, este se puede hacer mediante un GUI que podemos instalar ya sea en Windows o Linux. Para su programación utilizaremos el puerto serie de nuestra computadora, este microcontrolador es basado en lenguaje C.

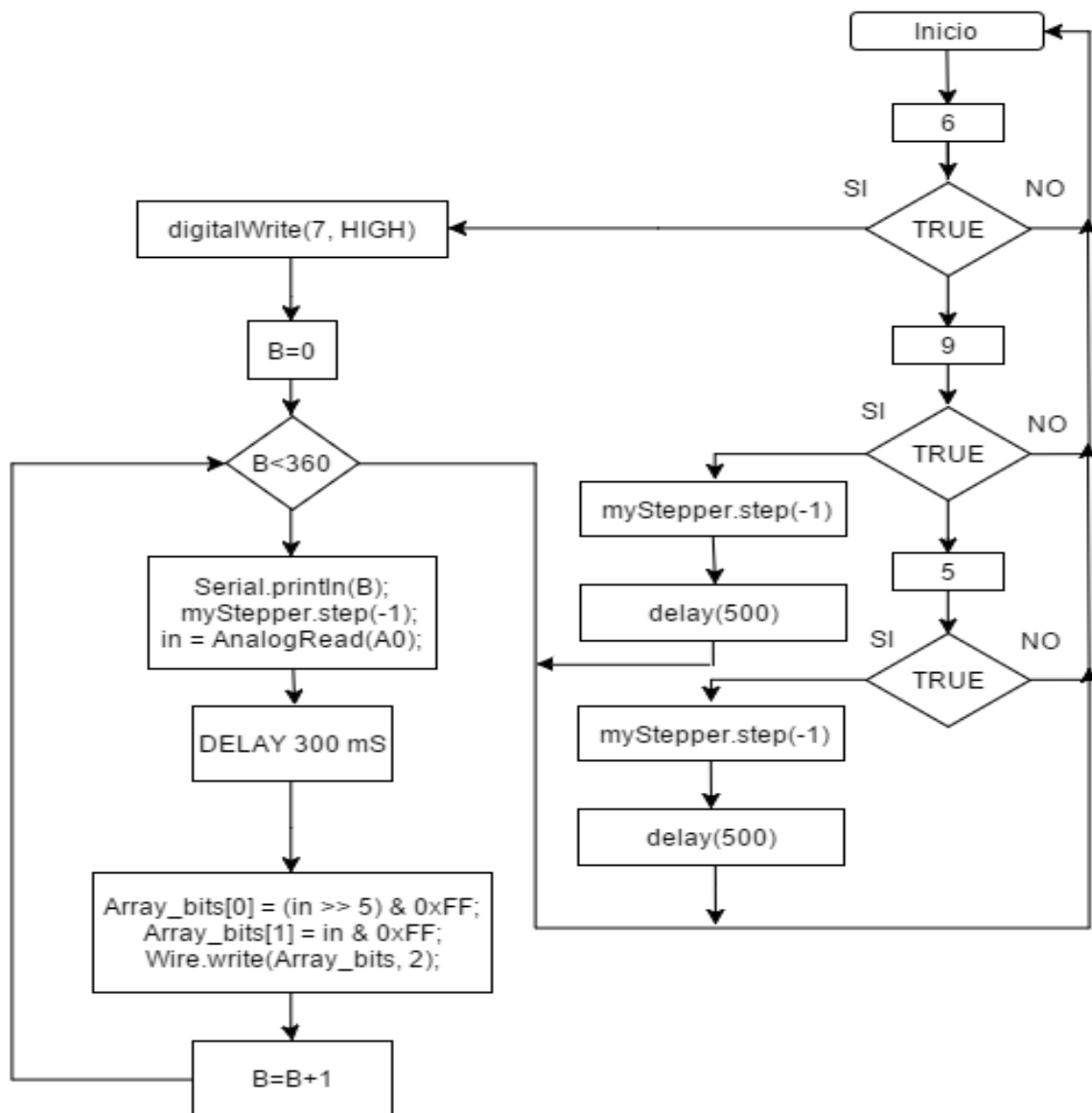


Figura 19 Diagrama de flujo software

El funcionamiento del microcontrolador es procesar los datos adquiridos en el detector de ganancia y fase donde posteriormente serán enviados a la raspberry pi mediante comunicación I2C, cabe resaltar que a medida que se realiza el programa se hace una sincronización de los dos dispositivos mediante la función delay, otra función del microcontrolador es controlar el movimiento de un motor paso a paso con una resolución de 0.9 grados por paso mediante la función "stepper motor control one revolution". El programa construido se basa en la declaración de funciones las cuales serán llamadas por medio de activación de entradas digitales las cuales se conectaron a la tarjeta GPIO de la raspberry pi. Hay que tener en cuenta la tensión de trabajo de las tarjetas ya que si aplicamos más tensión en los pines de entrada de una de las tarjetas puede existir el riesgo de dañar el microcontrolador.

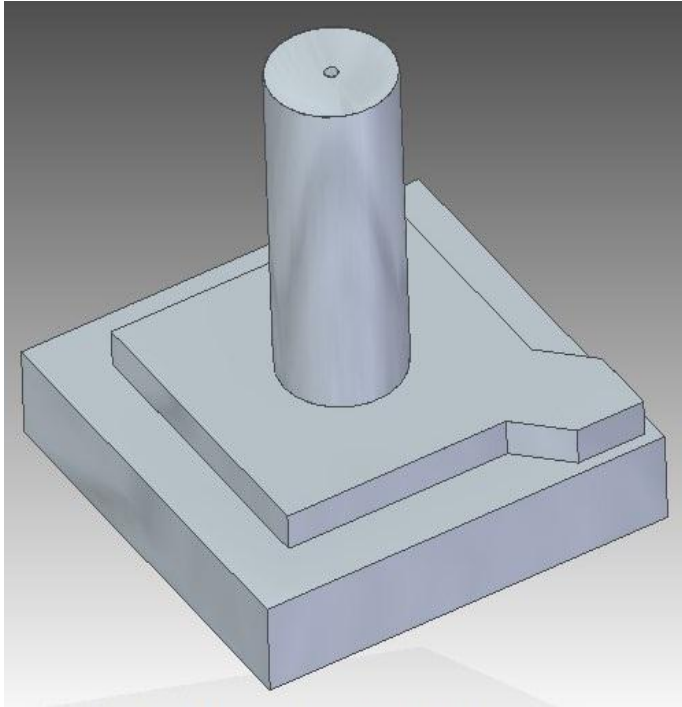
El funcionamiento de la raspberry se basa en la recepción y almacenamiento de la información brindada por el detector de ganancia y fase, la cual es enviada a través del microcontrolador como se explicó anteriormente. Posterior a esto, se procede a la construcción de la gráfica. Cabe resaltar que esta se encuentra en el sistema de coordenadas polares, pero con la diferencia que esta se trabajara con valores de radio negativo esto se logra mediante la utilización de la librería matplotlib y scipy. Para la comunicación I2c se ha utilizado la librería smbus. La raspberry pi nos brinda varias opciones para su programación y las de sus puertos como son los

lenguajes C, Python, Java entre otros. La construcción de dicho programa se basó en lenguaje Python con fines de facilidad y entendimiento por parte de los estudiantes ya que presenta una alta afinidad con el lenguaje C. El cuerpo del programa fue parecido al utilizado anteriormente en el microcontrolador utilizando funciones y realizando su llamado mediante la activación de entradas o salidas digitales.

La interfaz gráfica, consta de una ventana programa en Python con las librerías `tty`, `tkinter`. Este se encuentra estructurada a base de botones los cuales son asociados con funciones, estas se llaman al momento de presionar un botón, esta interfaz sencilla y fácil de programar con el fin de implementar cambios futuros. Cuenta con botones de obtención de patrón de radiación, reset, calibración, CW, CCW, estos dos últimos botones los utilizamos para girar ya sea en contra o en dirección de las manecillas del reloj. Un pequeño documento es adicionado en el botón información, donde se brinda en detalle el funcionamiento de los botones.

## SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE LA ANTENA.

### 2.2.1 GENERALIDADES.



*Figura 20 Estructura montaje antena*

Las consideraciones principales asociados con el diseño del posicionado fueron los siguientes, facilidad de fabricación, montaje y la integración con un conjunto de motor y transmisión por engrane, con el fin de lograr el mínimo impacto en la calidad de las mediciones de RF y que su diseño sea de bajo costo. Basándose en estos criterios, se seleccionó como material del sistema de posicionamiento

la madera. El sistema de posicionado requiere de un cilindro giratorio de tal manera que la base permanece estática mientras que el cilindro por encima de ella es capaz de rotar. Esto se logró mediante el uso de un torno para moldear el material. Un eje de varilla roscada se fija al cilindro superior y se extiende por el centro del cilindro y la plataforma inferior. Un gran engrane de sincronización se fija al extremo del eje permitiendo que el cilindro giratorio pueda ser accionado por un motor paso a paso a través un engranaje acoplado al anteriormente mencionado con el fin de ejercer movimiento en el cilindro.

Este sistema utiliza un par de engranajes con relación 9:10 para acoplar el eje de varilla roscada al engranaje del eje del motor. Debido a variaciones en la geometría de las antenas, una solución para un montaje universal no es práctico. Una ranura fue cortada en la parte superior de la antena, esta es acoplada para permitir la inserción de las antenas de tipo PCB.

Otros antenas pueden montarse mediante el uso de abrazaderas y / o cinta adhesiva. Tenga en cuenta que las antenas no deben ser tan grandes o pesados que el sistema de posicionamiento de la antena está sobrecargado. Debido a la naturaleza dinámica del posicionado, el usuario no debe permitir que el cable de alimentación de la antena sea enganchado por la plataforma cilíndrica.

## 2.2.2 Diagrama conexión eléctrica.

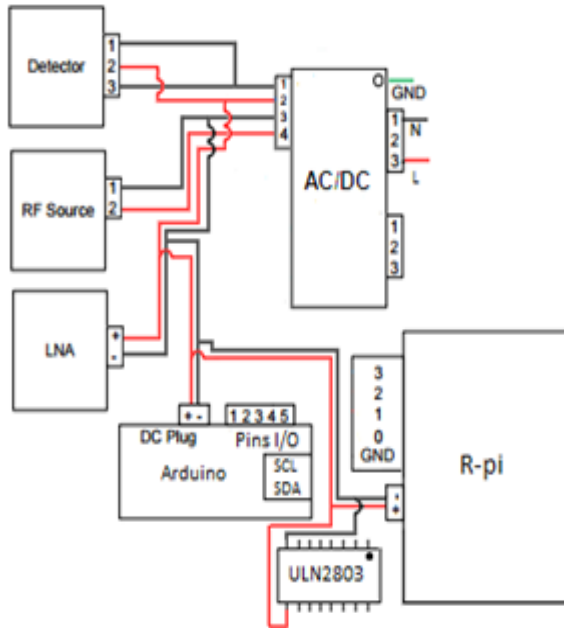
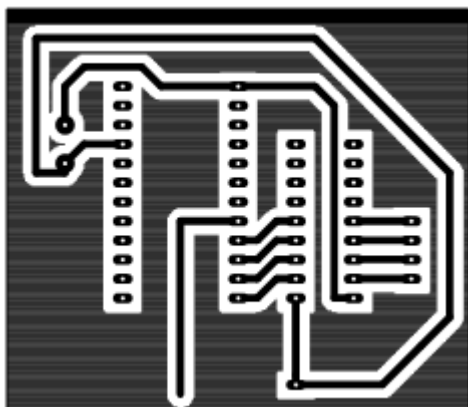


Figura 21 Diagrama eléctrico potencia.

Un diagrama detallado brinda todas las conexiones eléctricas requeridas en la Fig. 20 y 22. Las conexiones del motor paso a paso se completaron utilizando alambre calibre 20 (AWG). Todas las demás conexiones se realizaron utilizando 24 AWG.

Se diseñó una base para acoplar el microcontrolador, el ULN2803A y se instalaron terminales y conectores que se utilizan para conectar el microcontrolador al motor paso a paso. El microcontrolador también se utiliza para programar el ADF4360-0 sobre una interfaz personalizada en serie. La Fig. 22 muestra un diagrama detallado que describe las conexiones eléctricas para el control entre el

microcontrolador, la raspberry pi, la fuente de frecuencia y el motor paso a paso.



*Figura 23 Pcb montaje motor y microcontrolador.*

Se conecta un cable de SMA a la salida de ganancia del detector. El extremo opuesto del cable se conecta a la placa que contiene el microcontrolador en un conector tipo SMA hembra chasis PCB. Se conecta el blindaje y conductor interno a los pines marcados GND y A0 en el tablero del microcontrolador, respectivamente.

Se conecta el conector RFOUT de la fuente de frecuencia ADF4360-0 a la antena de transmisión usando un cable coaxial RG-316 de 2,8 m de longitud y conecta el conector RFOUT directamente al atenuador de 6 dB. Se conecta el atenuador de 6 dB con el atenuador de 20 dB usando un 0,3 m de longitud de cable coaxial.



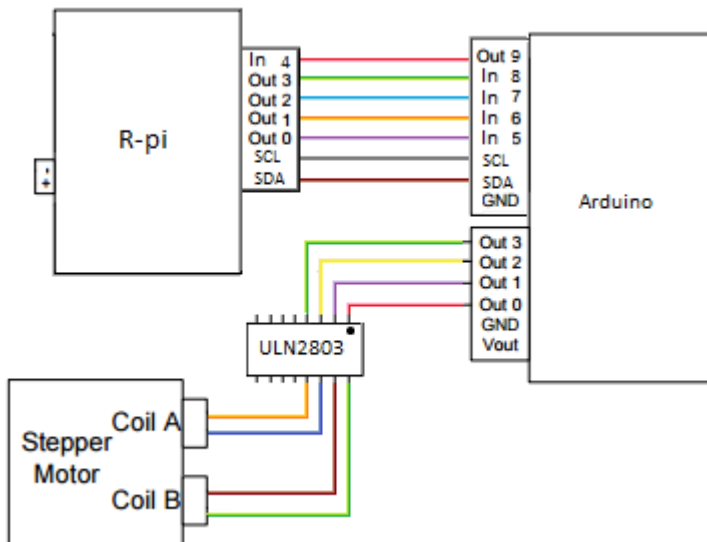


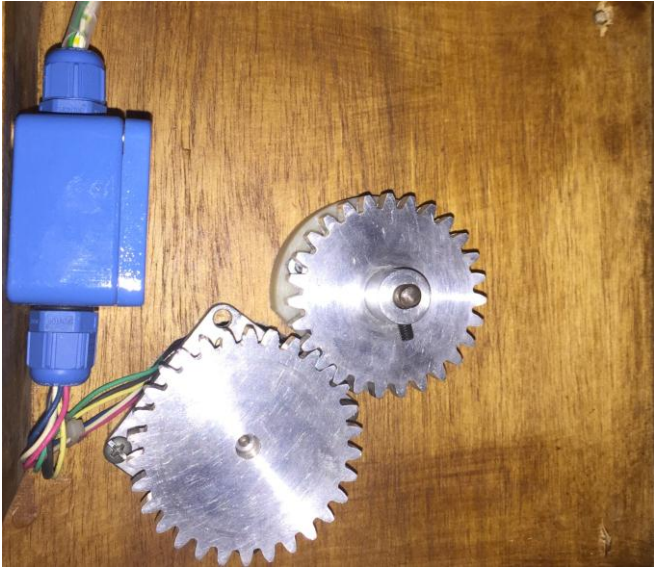
Figura 24 22 Diagrama eléctrico control

Se conecta el atenuador de 20 dB directamente a INPB en el AD8302. Se conecta la AUT a la entrada de la ZX60-272LN usando 2 m de cable coaxial. Se conecta el VBF2435 directamente a la salida de la ZX60-272LN. Se conecta el VBF2435 para INPA en el AD8302 usando una longitud de 0,3 m de cable coaxial.

## VALIDACION DEL PROTIPO

### 3.1 Construcción del prototipo.

Una vez seleccionado todos los dispositivos, se procedió al ensamblaje del sistema, iniciando con las conexiones pertinentes a potencia, pasando una vez terminado el anterior a las conexiones de control, esto con el fin de conectar las líneas de transmisión al finalizar para lograr minimizar la flexión de estos y asegurar como mínimo un ROE de 1:2, para proteger el sistema se construyó una caja para proyectos a base de acrílico, adicionando pequeñas modificaciones interiores con el fin de ajustar las tarjetas pertenecientes al radioenlace. Una vez terminado el prototipo se procedió a la realización de una tabla relacionando los gastos la cual se presentara a continuación en conjunto con fotografías finales del prototipo.



*Figura 23 Sistema de transmisión engranes rectos*

*Figura 24 Sistema para medición del patrón de radiación.*

### **3.2 Calibración.**

Para calibrar el sistema se conecta un atenuador de 20 dB entre los cables de alimentación de antena. La calibración simplemente nos mide la potencia producida por el generador de onda y verificar que los niveles de potencia sean los deseados. El sistema puede ser recalibrado repitiendo este procedimiento, sin embargo, tenga en cuenta que la única manera de borrar la calibración es apagar y encender el Arduino.

### **3.3 Medición del patrón de radiación.**

Montar una antena con 5 dBi-10 dBi de ganancia en la posición de la antena de transmisión y conectar el cable coaxial apropiado. Monte la AUT en el sistema de posicionamiento de la antena y conecte el cable coaxial apropiado. Asegurar la alineación polarización entre las dos antenas y una distancia de separación adecuada para las mediciones de campo lejano. En el bloque de "Patrón de Radiación", haga clic en el botón "Medida del patrón".

El sistema de posicionamiento de la antena debe empezar a girar la AUT. Asegúrese de que el cable coaxial que alimenta el AUT no interfiere con el funcionamiento del sistema de posicionamiento de la antena.

El diagrama de radiación se mostrará una vez a la rotación completa se ha completado. El sistema de posicionamiento de la antena se ejecutará una rotación inversa completa a desenvolver el cable de alimentación coaxial. Pueden acceder a los datos de medición haciendo clic en el enlace "Mostrar datos".

### **3.4 Ganancia.**

La capacidad del hardware del sistema para medir con precisión la ganancia entre los cables de alimentación de la antena se ensayó usando un atenuador variable en banda S. El rendimiento del atenuador se caracterizó en pasos de 5 dB de aproximadamente -15 dB a -60 dB utilizando un analizador de espectros. A continuación, el atenuador se conecta entre los cables de alimentación de la antena y las salidas de ADC se registraron como una función de atenuación. La relación entre la ganancia y la salida de ADC se determinó utilizando regresión lineal y se muestra en la Ecuación donde  $G$  es la ganancia entre los cables de alimentación de antena en dB y  $D$  es la salida del ADC.

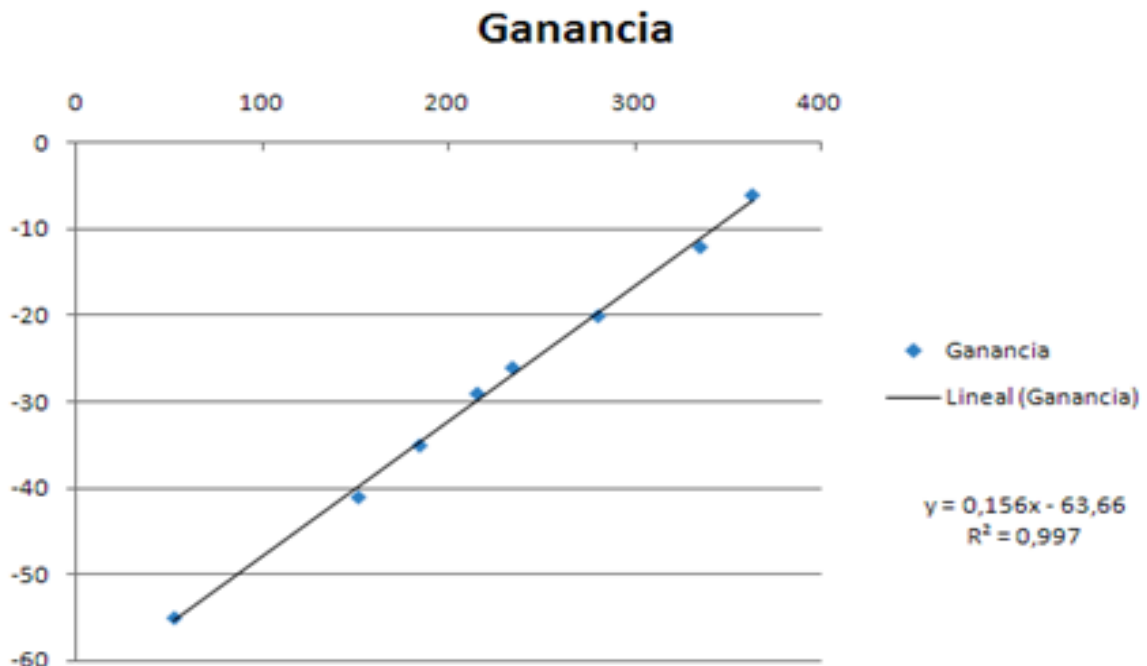


Figura 25 Regresión lineal obtención función de ganancia.

La pendiente nominal relaciona la ganancia entre INPA y INPB y la medición en el ADC. La pendiente experimental es 0,156613. Para una pérdida de propagación en el espacio libre de 42 dB y 0 dBi antenas, la gama dinámica mínima es de 13 dB. Estos resultados muestran que el sistema completo ha reducido el rendimiento dinámico y rango relativo a la AD8302. Esto se espera, como error de linealidad adicional es introducido por cada componente de hardware en el sistema, junto con los errores de cuantificación introducidos por el ADC del microcontrolador y los cálculos posteriores. Como se mencionó anteriormente, se recomienda que la antena de transmisión tenga 5 dBi-10 dBi de ganancia con el fin de mejorar el rendimiento de rango dinámico.

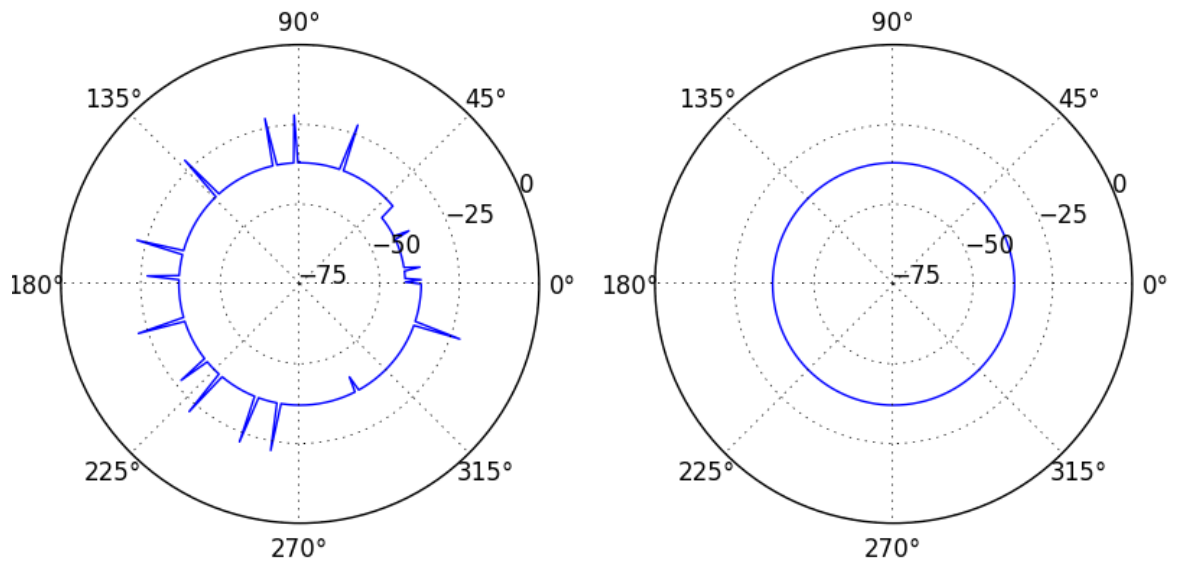


Figura 26 Diagrama de radiación monopolo prueba 1    Figura 27 Diagrama de radiación monopolo prueba 2

En las figuras mostradas anteriormente (figura 25 y figura 26) podemos hacer un contraste entre ellas, haciendo notar las diferencias y sus posibles causas. En el campo de las telecomunicaciones existen varios temas muy importantes y son la refracción, difracción, interferencia y reflexión de las ondas electromagnéticas. Primero cabe resaltar que estas dos pruebas se llevaron a cabo en repetidas ocasiones y bajo distintas condiciones, en la figura 26 podemos apreciar un diagrama de radiación de una antena monopolo con una pequeña ganancia, esta fue sometida a prueba en un ambiente abierto en el cual el ruido no afecta gracias los componentes integrados en el sistema, la medición se mostró menos

afectada que el diagrama mostrado en la figura 25, el ambiente utilizado para esta prueba fue más cerrado no olvidando que cada prueba se realizó 4 veces en cada lugar, mostrando afinidad en los resultados. Una conclusión a la que se llegó es que posiblemente ondas refractadas estén interfiriendo en la medida por eso podemos apreciar picos en la lectura del campo eléctrico. Para el caso de la antena tipo patch obtuvimos los mismos resultados. Hablar de precisión en esta sistema es un poco complejo ya que necesitaríamos de un medidor de patrón de radiación adicional para comparar los resultados obtenidos en dicha práctica, la tarjeta utilizada para la comparación de las dos señales tiene una sensibilidad de 30mV/dB, podemos añadir el error de cuantificación introducido al momento de la conversión análogo digital del conversor contenido en el micro controlador, por otra parte la atenuación brindada por las líneas de transmisión las cuales según la hoja del fabricante brinda una atenuación de 190.20 dB/100mts lo que sería igual a 1.9029dB/m la línea utilizada nos brindó una atenuación mucho menos a la brindada en la hoja del fabricante, esto por supuesto nos ayuda a la mejora de la calidad del sistema ya que los límites del rango dinámico en el cual trabajara la tarjeta no serán tan bajos y así poder tener una mejor lectura del patrón.



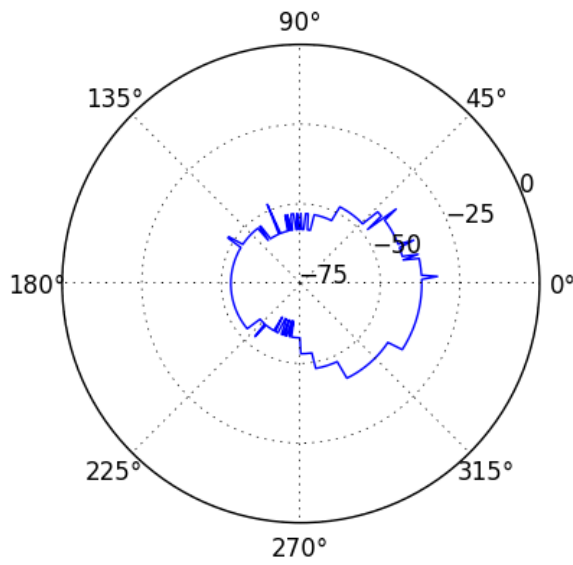


Figura 28 Diagrama de radiación prueba 2

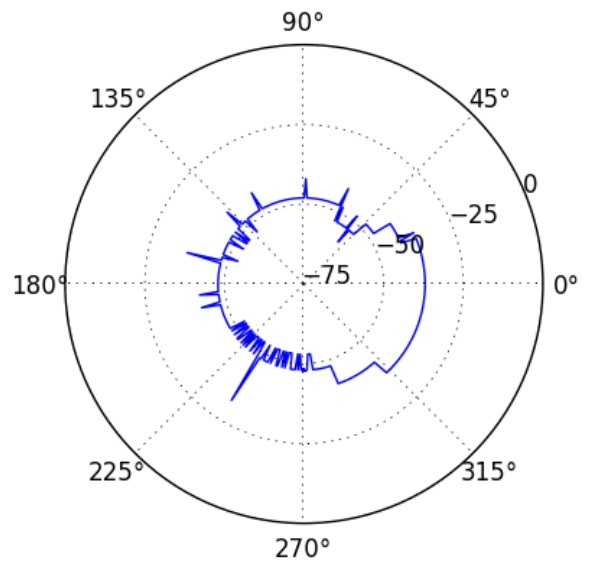


Figura 29 Diagrama de radiación prueba 1

## 4 Conclusión

La motivación de este proyecto fue diseñar y construir un sistema capaz de realizar mediciones del patrón de radiación por menos de US \$ 1 500 en el costo. Debido al hecho de que muchos de los componentes específicos son costosos, el sistema que aquí se presenta puede ser fácilmente producido, y cumple con las limitaciones presupuestarias a un costo de \$ 1077.24 adicionando la facilidad de su transporte debido a su peso pero teniendo el debido cuidado al momento de su transporte. La naturaleza flexible de la GUI permite el acceso al sistema y el control independiente del sistema operativo o plataforma de hardware para emplear lo obtenido como apoyo a las prácticas de laboratorio, se realizaron varias practicas a la hora de establecer una comunicación entre las raspberry pi y el Arduino se hicieron pruebas con distintos protocolos de comunicación como lo fue UART, SPI y I2C gracias a que el tiempo de sincronización no se alcanzaba a establecer en magnitudes iguales se procedió a construir un pequeño protocolo de comunicación en conjunto con el ya conocido I2c, otro de los puntos a tener en cuenta a la hora de proceder a enviar los datos hacia la raspberry pi es que solo recibe tramas de 8 Bits, esto nos llevó a optar por otro camino a la hora de enviar los datos, hablando en termino de tamaño y resolución, una solución simple seria escoger un convertidor análogo digital a 8 bits, pero se nos presentaría un gran inconveniente y es la perdida de datos a la hora de la conversión análogo digital, la franja

de conteo es menor y el error del sistema en general aumentara considerablemente.

El sistema ha sido utilizado para medir el patrón de radiación de antenas con diferentes parámetros, el principal problema presentado fue la adquisición de los materiales ya que en nuestro país es muy reducido el mercado de las telecomunicaciones, el procedimiento fue la importación de todos los materiales a excepto los soportes para la antena, otro de los problemas que se obtuvieron fue la reflexión de las ondas electromagnéticas al momento de la medición, esto conlleva a obtener malas formaciones de las gráficas, introducir el sistema en una cámara anecoica seria lo ideal para así medir su precisión con más exactitud. Como parte final del proceso se requieren unas mejoras buscando siempre una mejor eficiencia del sistema, para lo cual se tendrá en cuenta emplear una mejoría en cuanto al sistema de posicionamiento de las antenas, su acople es de difícil manejo, este error persistió ya que en nuestro país no contamos el comercio adecuado para la obtención de dicho elemento. A continuación se muestra una tabla donde se especifica la relación de gastos en dólares, como se mencionó anteriormente en nuestro país son pocos los elementos conseguidos, los gastos en pesos fueron pasados a la moneda extranjera.

Tabla 1 Relación de costos.

Adf 4360-0 evaluation board	X 1	130,55
Adf 8302	X 1	281,25
36" Rf coaxial	X2	46.40
48" Rf coaxial	X 2	58,50
6" Rf coaxial	X 2	53,05
Arduino mini pro	X 1	10
AC/DC converter 30 W	X 1	38,93
ULN2803	X 2	1,84
Amp bajo ruido 15 dB max	X 1	64,65
Atenuador 20 dB	X 2	45,02
Atenuador 6 dB	X 2	45,02
Filtro pasa banda	X 1	43,06
Cable (20 AWG) 3m	X1	4
Cable (24 AWG) 2m	X1	1,5
SMA conector H-H	X 3	15,30
BLKHD conector	X1	5,97
Ventilador 12 v 40mm	X 2	15,30
Conector 9 V	X 1	0,35
Caja Acrilico	X1	30,45

Engranés rectos 10:9	X 1	15,80
Soporte antenas	X 2	45,30
Envió	X1	125
Total		1077.24

## Bibliografía

Arduino. (s.f.). *Arduino Pro micro*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardProMini>

Balanis., C. A. (1938). *Antenna theory*. Arizona .

Bataller, M. F. (2002). *Antenas*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.

Device, A. (s.f.). *Analog Device*. Obtenido de <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4360-7.pdf>

Monk, S. (2013). *Raspberry Pi Cookbook*. O'Reilly Media.

Radio comunicaciones. (s.f.). *Radio comunicaciones*. Obtenido de <http://www.radiocomunicaciones.net/antenas-dipolo.html>

*Raspberry pi*. (2008). Obtenido de Raspberry pi: <https://www.raspberrypi.org>



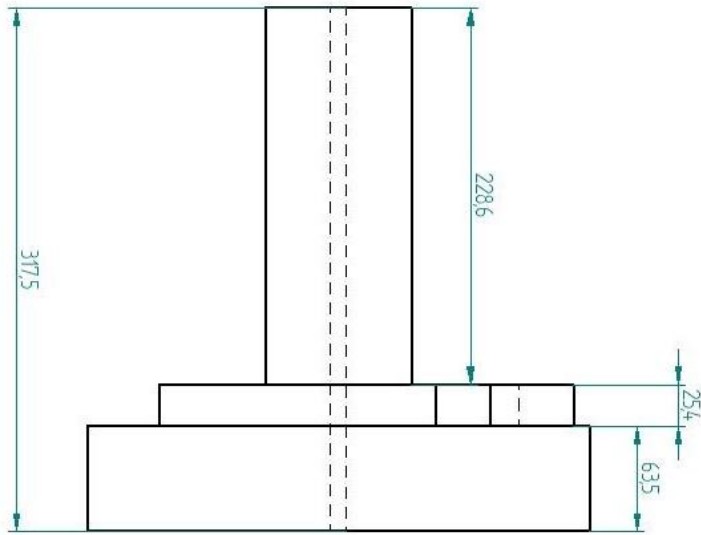


Figura 31 Vista lateral plataforma antena

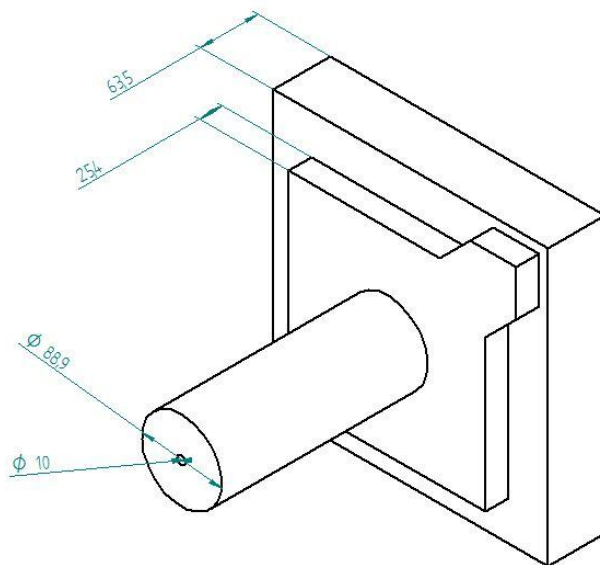


Figura 32 Vista diagonal plataforma antena

## Codigo microcontrolador

```
#include <Stepper.h>

#include <Wire.h>

const int stepsPerRevolution = 400;

Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 13, 12, 11, 10);

int b= 0;

int in=0;

#define Slave_address 7

byte Array_bits[2];

void setup()

{ Serial.begin(9600);

  pinMode(5, INPUT);//CCW

  pinMode(6, INPUT);//start

  pinMode(7, OUTPUT);//confirmacion start

  pinMode(8, OUTPUT);//reset

  pinMode(9, INPUT);//CW

  digitalWrite(8, HIGH);

  digitalWrite(6, LOW);
```



```
Wire.begin(Slave_address);  
Wire.onRequest(sendarray);  
}  
void loop()  
{ if(digitalRead(6) == HIGH)  
  { start();  
  }  
  if(digitalRead(8) == HIGH)  
  {  
    reset();  
  }  
  if(digitalRead(9) == HIGH)  
  {  
    cw();  
  }  
  if(digitalRead(5) == HIGH)  
  {  
    ccw();  
  }  
}
```

```
}  
  
void start()  
{  
    digitalWrite(7, HIGH);  
    //delay(100);  
    while(b<360)  
    {  
        Serial.println(b);  
        myStepper.step(-1);  
        in = analogRead(A0);  
        delay(300);  
        b++;  
    }  
    b=0;  
    digitalWrite(7, LOW);  
}  
  
void ccw()  
{ myStepper.step(1);  
    delay(500);
```

```
}  
  
void cw()  
{  
    myStepper.step(-1);  
    delay(500);  
}  
  
void sendarray()  
{  
    Array_bits[0] = (in >> 5) & 0xFF;  
    Array_bits[1] = in & 0xFF;  
    Wire.write(Array_bits, 2);  
}  
  
void reset()  
{  
    digitalWrite(5,LOW);  
}
```

## Codigo Raspberry pi

```
#!/usr/bin/env python

#-*- coding: utf-8 -*-

from __future__ import division

from numpy import pi

from Tkinter import *

import RPi.GPIO as GPIO

import time

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as pp

import smbus

import ttk

bus=smbus.SMBus(1)

add=7

GPIO.setmode(GPIO.BCM)

GPIO.setup(4, GPIO.OUT)

GPIO.setup(17, GPIO.IN)
```

```
GPIO.setup(27, GPIO.OUT)
GPIO.setup(22, GPIO.OUT)
GPIO.setup(23, GPIO.OUT)
GPIO.output(27,GPIO.LOW)
GPIO.output(22,GPIO.LOW)
GPIO.output(23,GPIO.LOW)
GPIO.output(4,GPIO.LOW)

global k

global m

global a

global b

global i

i=0.0

k=0.0

m=0.0

a=0.0

b=0.0

def ask_quit():
```

```
root.destroy()
```

```
root.quit()
```

```
def reset():
```

```
    GPIO.output(27,GPIO.HIGH)
```

```
    time.sleep(0.1)
```

```
    GPIO.output(27,GPIO.LOW)
```

```
def ccw():
```

```
    GPIO.output(23,GPIO.HIGH)
```

```
    GPIO.output(22,GPIO.LOW)
```

```
    time.sleep(0.1)
```

```
    GPIO.output(23,GPIO.LOW)
```

```
def cw():
```

```
    GPIO.output(22,GPIO.HIGH)
```

```
GPIO.output(23,GPIO.LOW)
```

```
time.sleep(0.1)
```

```
GPIO.output(22,GPIO.LOW)
```

```
def writeN (value):
```

```
    bus.write_byte(add, value)
```

```
    return -1
```

```
def readN():
```

```
    a=bus.read_byte_data(add,1)
```

```
    b=bus.read_byte_data(add,2)
```

```
    c=a
```

```
    c=(c<<5)|b
```

```
    return c
```

```
def refresh_intensidad():
```

```
root.after(150,refresh_intensidad)
```

```
intensidad.set(readN)
```

```
def start():
```

```
GPIO.output(4,GPIO.HIGH)
```

```
alpha = np.arange(0,360,1)
```

```
b=np.arange(360)
```

```
k=0.0
```

```
if (GPIO.input(17) == True):
```

```
    print "ready"
```

```
        GPIO.output(4,GPIO.LOW)
```

```
        for i in range (0,360):
```

```
            u=readN()
```

```
            a=(0.156613*u-60.6687)
```

```
            print a
```

```
            b[i]=a
```

```
            if(a>k):
```



```
k=a
m=i
time.sleep(0.3)
ax=pp.subplot(111, polar= True)
ax.set_theta_zero_location('E')
ax.set_theta_direction('counterclockwise')
pp.plot(np.deg2rad(alpha), b)
ax.set_ylim(-20,0)
ax.set_yticks(np.array([-60, -50, -25, 0]))
ax.set_xticks(np.array([315 , 270, 225, 180, 135, 90, 45,
0])/180*pi)
pp.show()
```

```
def showwin(window):
```

```
    window.deiconify()
```

```
def execute(f):
```

```
    root.after(200,f)
```

```
def printt(text):  
    print text  
  
global window  
  
root = Tk()  
  
v1=Toplevel(root)  
  
root.protocol("WM_DELETE_WINDOW", ask_quit)  
  
root.title('Sistema de medicion de patron de radiacion')  
  
ventana=Frame(root)  
  
ventana.pack()  
  
level=StringVar()  
  
intensidad=StringVar()  
  
posicion=StringVar()  
  
intensidad1=StringVar()  
  
posicion1=StringVar()  
  
S=Scrollbar(v1)  
  
T=Text(v1, height=50, width=51)  
  
S.pack(side=RIGHT, fill=Y)
```

```
T.pack(side=LEFT, fill=Y)
```

```
S.config(command=T.yview)
```

```
T.config(yscrollcommand=S.set)
```

```
text=""          Ayuda
```

Acontinuacion se nos informara el debido funcionamiento y cuidados que se deberan tener al momento de manipular el medidor de patrón de radiación.

Cuidado!!!!

Este sistema cuenta con elementos electronicos muy sencibles a corrientes estáticas, con el cuidado indebido podría estropearse cualquiera de estos dispositivos.

Funcionamiento:

Se basa en la detecion y comparacion de señales en alta frecuencia, mediante generadores y comparadores, de ante mano se sugiere una calibracion previa para evitar afectar los resultados del sistema.

La interfaz grafica basada en el lenguaje python nos brinda un facil diseño para su entendimiento y editaciones futuras, cuenta con

botones y etiquetas las cuales tiene funciones específicas, a continuación se realizara una breve explicacion.

Graficar: Esta funcion nos inicia el proceso para la recoleccion y graficafion del patron de radiacion en el plano E.

CW: Con funcion podremos girar la plataforma un paso hacia la derecha.

CCW: Con esta funcion podremos girar la plataforma hacia la izquierda

Diseñado por: Jhon Jairo Valle Reyes

T00026083

Estudiante Ing electronica

Universidad Tecnológica de Bolívar

```
T.insert(END, text)
```

```
l1=Label(root, textvar=intensidad, font=(16))
```

```
l1.pack()
```

```
ttk.Label(ventana, text="Intensidad =").grid(row=3, column=2)
```

```
ttk.Label(ventana, text=a).grid(row=3, column=3)
ttk.Label(ventana, text="dB").grid(row=3, column=4)
ttk.Label(ventana, text="posicion=").grid(row=4, column=2)
ttk.Label(ventana, text=i).grid(row=4, column=3)
ttk.Label(ventana, text=" Max Intensidad=").grid(row=5, column=2)
ttk.Label(ventana, text=k).grid(row=5, column=3)
ttk.Label(ventana, text="dB").grid(row=5, column=4)
ttk.Label(ventana, text="posicion=").grid(row=6, column=2)
ttk.Label(ventana, text=m).grid(row=6, column=3)

ttk.Label(ventana, text="Diseñado por: ").grid(row=6, column=0)
ttk.Label(ventana, text="Jhon Jairo Valle Reyes").grid(row=6,
column=1)

ttk.Label(ventana, text="Colaboracion: ").grid(row=7, column=0)
ttk.Label(ventana, text="David Senior Elles").grid(row=7, column=1)
ttk.Label(ventana, text="Universidad Tecnologica de Bolivar
").grid(row=8, column=1)

b1 = Button(ventana, text=" Start ", command=start)
b2 = Button(ventana, text="Reset ", command=reset)
```

```
b3 = Button(ventana, text=" CCW  ", command=ccw)
b4 = Button(ventana, text=" CW  ", command=cw)
b5      =      Button(ventana,      text="      informacion",
command=lambda:execute(showwin(v1)))
b1.grid(row=2,column=0)
b2.grid(row=3,column=0)
b3.grid(row=4,column=0)
b4.grid(row=5,column=0)
b5.grid(row=2,column=1)
v1.withdraw()
root.mainloop()
```

## Resultados adicionales

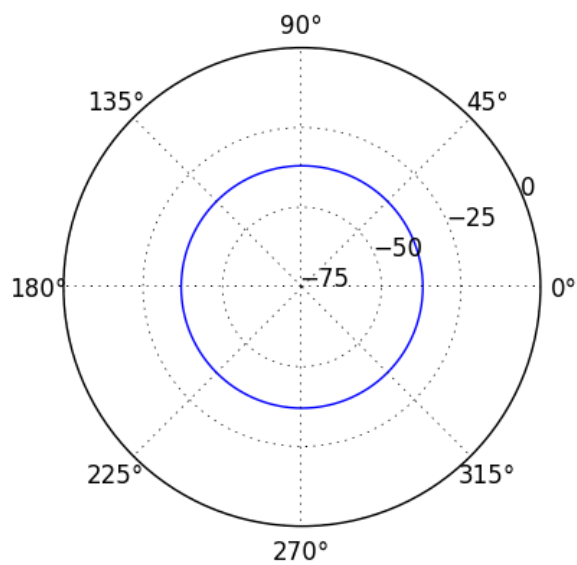


Figura 25 Diagrama de radiación monopolo

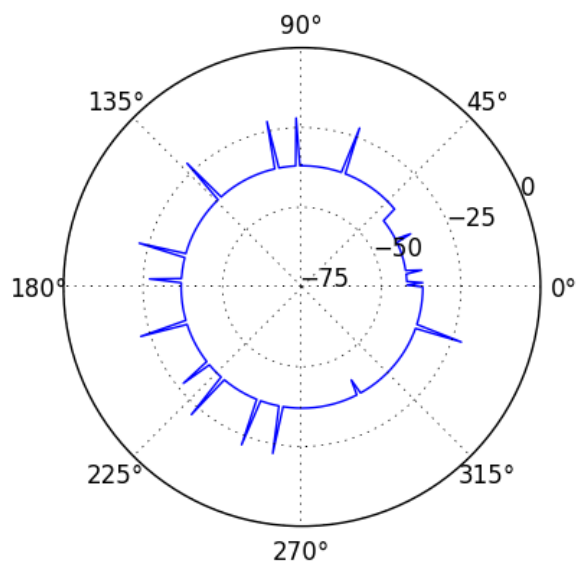


Figura 26 Diagrama de radiación monopolo

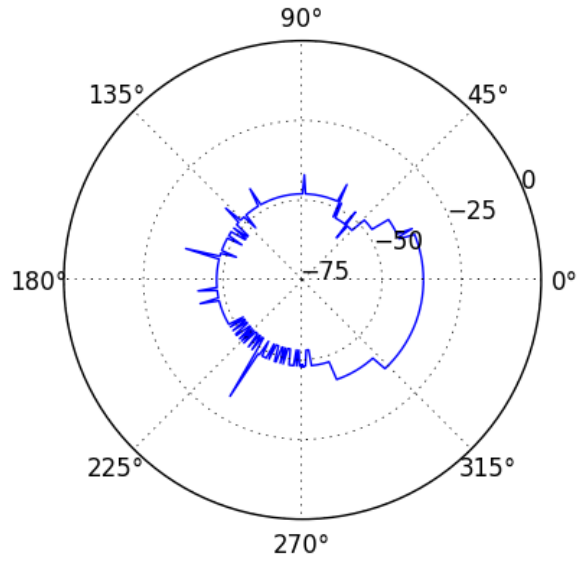


Figura 27 Diagrama de radiación patch

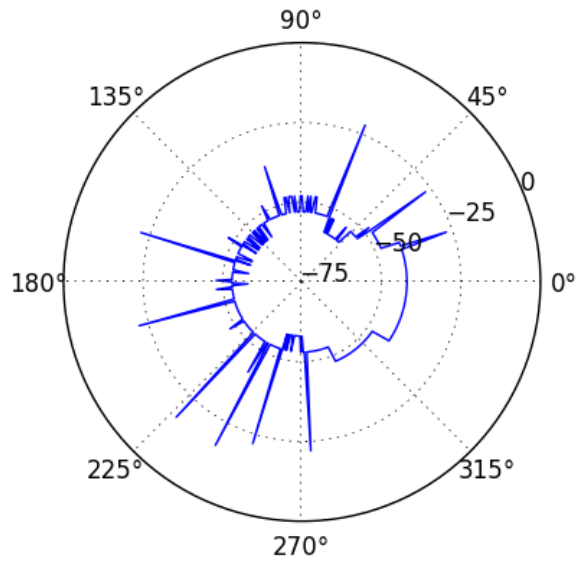


Figura 28 Diagrama de radiación patch 2



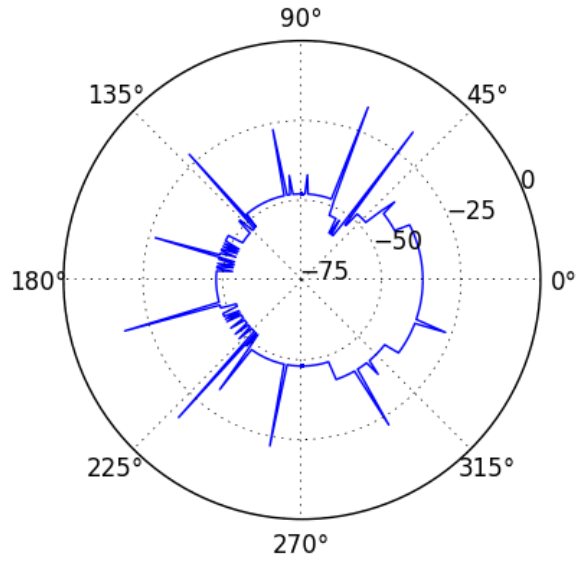


Figura 29 Diagrama de radiación patch 3

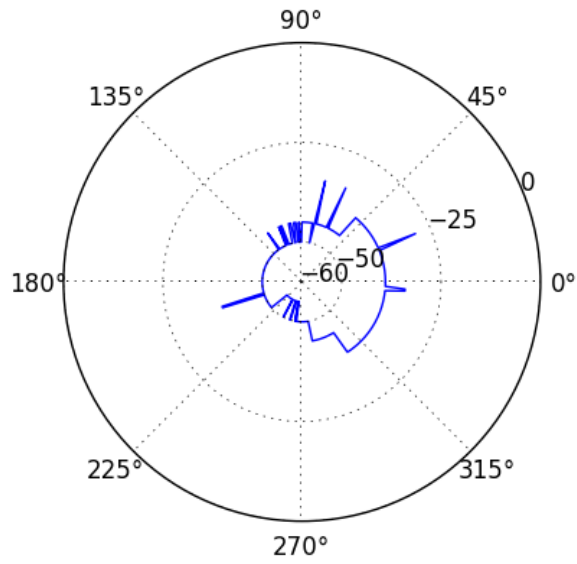


Figura 30 Diagrama de radiación patch 4

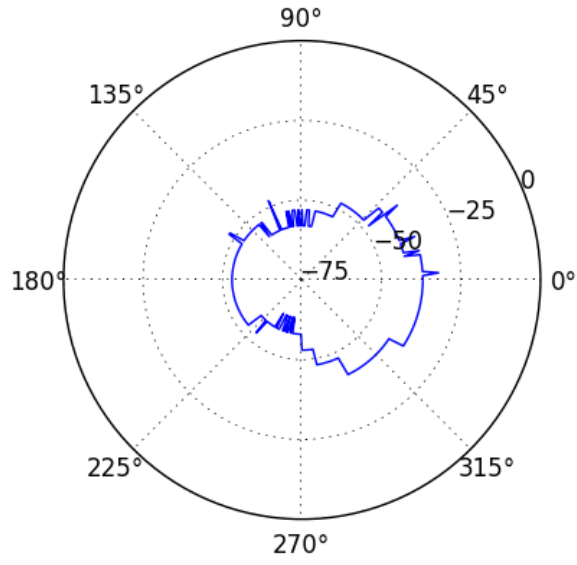


Figura 31 Diagrama de radiación patch 5

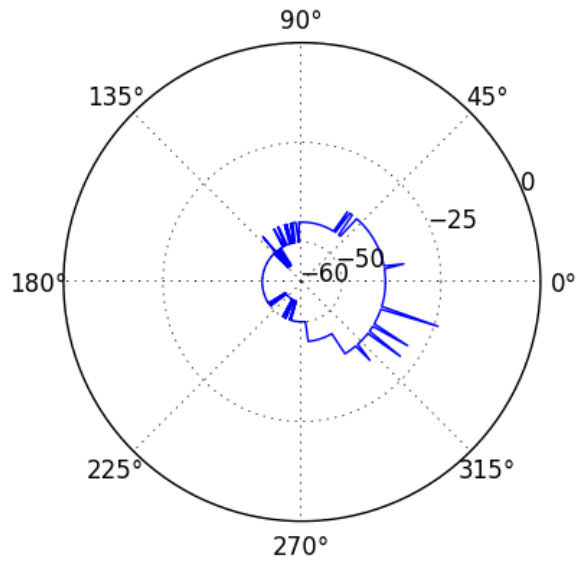


Figura 32 Diagrama de radiación patch 6