

# Antenas

---

## Experiencia electiva de Laboratorio

**Profesor:** Nelson Morales o.  
Accel Abarca

**Auxiliares:** Erik Atenas  
Sebastián Guerrero  
Nicolás Hunfan

**Alumnos:** Hernán Calderón  
Iván Huerta  
Valeria Tapia

**Fecha:** 19/04/2010

## Contenido

1.-Introducción.....	3
2. Marco Teórico .....	5
2.1 Función potencial.....	5
2.2 Vector Poynting y potencia irradiada.....	6
2.3 Antenas .....	7
2.3.1 Tipos de antenas .....	7
2.3.2 Diagramas Polares.....	13
2.3.3 Polarización .....	14
2.3.4 Eficiencia.....	15
2.3.5 Ganancia.....	15
2.3. Interferencia.....	16
2.3. Transmisión de señales y resistencia de radiación.....	16
2.3. Recepción de señales .....	17
3.-Materiales e instrumentos necesarios.....	18
4.-Procedimiento.....	19
4.1.-EXPERIENCIA 1: Antena de dos elementos como antena receptora .....	19
4.2.-EXPERIENCIA 2: Obtención de los diagramas polares.....	19
4.2.1.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición horizontal .....	19
4.2.2.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición vertical.....	20
4.2.3.- Diagrama de antena dipolo doblada en posición horizontal .....	21
4.2.4.- Diagrama polar de antena dipolo doblada con reflectores .....	21
5.- Resultados y análisis .....	23
5.1.-Experiencia 1.....	23
5.1.1.- Variación de posición de la antena receptora: .....	23
5.1.2.- Variación de la potencia de entrada .....	23

5.2.-Experiencia 2 .....	25
5.2.1.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición horizontal .....	25
5.2.2.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición vertical.....	26
5.2.3.- Diagrama polar de antena de dipolo doblado .....	28
5.2.4.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición horizontal .....	29
6.-Conclusiones .....	31
7.- Bibliografía .....	32
8.-Anexos.....	33
1.-Datos de las experiencias (extrapolados) .....	33

## 1.-Introducción

Una antena es un dispositivo metálico capaz de emitir o recibir ondas electromagnéticas. Es un instrumento indispensable en el mundo actual, pues permite el envío de información sin necesidad de una línea de transmisión, es decir, en espacios libres. Estos elementos presentan diversas características o parámetros que identifican o diferencian una antena en particular del resto. Prácticamente éstas dependen del material y de la geometría del aparato (estas características se expondrán en la sección de marco teórico).

La experiencia de laboratorio consiste en la emisión, y posterior recepción de una onda electromagnética. Los objetivos principales de la experiencia son:

- Cerciorar la importancia de la disposición geométrica coordinada entre el emisor y receptor (polarización).
- Apreciar el efecto de la potencia de la señal emitida, en la señal inducida en el receptor.
- Familiarizarse con el uso de diagramas de radiación como instrumento de análisis para la caracterización de una antena.
- Identificar los factores externos que generan interferencia o pérdida de información (pérdida de potencia) en la señal.
- Experimentar de forma directa con antenas, en particular, con antenas de dipolo doblada

## 2. Marco Teórico

Para poder comprender los conceptos básicos del funcionamiento de una antena, se debe tener conocimiento de los siguientes conceptos

### 2.1 Función potencial

Las funciones potenciales permiten calcular el campo electromagnético por medio de ecuaciones simples. Se tiene por leyes de Maxwell en materiales isotrópicos que

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2)$$

Luego como la divergencia del campo magnético  $\vec{B}$  es cero, esta puede ser representada por un potencial vectorial  $\vec{A}$ , el cual cumple que

$$\nabla(\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (3)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4)$$

Por lo que la ecuación (1) puede ser reescrita como

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{A})}{\partial t}$$

Donde si se considera el tiempo independiente de las variables espaciales y  $\vec{A}$  continua, entonces

$$\nabla \times \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

Como el rotor del campo eléctrico sumado a la derivada del potencial vectorial es cero, entonces existe una función potencial  $V$  escalar que satisface

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (6)$$

Con lo que se obtiene a partir de las ecuaciones (2), (4) y (5) que

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\epsilon \mu \left( \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \frac{\partial \nabla V}{\partial t} \right) + \mu \vec{J} \quad (7)$$

Al utilizar la identidad matemática

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (8)$$

Y considerando por Teorema de Helmholtz la condición de Lorentz

$$\nabla \cdot \vec{A} = -\epsilon\mu \frac{\partial \nabla V}{\partial t} \quad (9)$$

Entonces

$$\nabla^2 \vec{A} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{j} \quad (10)$$

Que corresponde a la ecuación de onda del potencial electromagnético, el cual depende de la densidad de corriente del sistema que se esté analizando. Si las entradas son sinusoides, entonces se puede describir fasorialmente como

$$\nabla^2 \hat{A} + \omega^2 \epsilon\mu \hat{A} = -\mu \hat{j} \quad (11)$$

Donde  $\omega$  corresponde a la frecuencia angular de la senoide. Con lo que resolviendo esta ecuación en sus variables espaciales, se obtiene que

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (6)$$

$$\hat{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_v \frac{\hat{j} e^{-j\beta r}}{r} dv \quad (12)$$

Con  $\beta = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ , y  $r$  la variable espacial que representa la distancia diferencial entre el punto de  $\hat{A}$  que se está midiendo y el resto de los puntos del volumen.

De aquí se puede obtener tanto el campo magnético como el eléctrico conociendo como se distribuye la corriente en la antena.

## 2.2 Vector Poynting y potencia irradiada

El vector Poynting permite medir la potencia irradiada de un volumen determinado en el espacio, su definición está dada por

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (13)$$

Donde la potencia irradiada de un volumen es

$$P = \oint_S \vec{S} d\vec{s} \quad (14)$$

Que representa la potencia que sale de un volumen con una superficie S. En el caso de trabajar en una representación fasorial de las potencias, el vector Poynting queda representado por

$$\hat{S} = \hat{E} \times \hat{H} \quad (15)$$

Como solo importa la potencia media  $S_{av}$ , entonces se obtiene que

$$S_{av} = \frac{1}{2} Re(\hat{E} \times \bar{\hat{H}}) \quad (16)$$

Por lo que la potencia media total irradiada en un sistema fasorial es

$$P_{rad} = \oint_S S_{av} ds \quad (17)$$

## 2.3 Antenas

Instrumento compuesto por estructuras tanto metálicas como dieléctricas, diseñadas de forma que se pueda enviar y recibir señales. Estas estructuras tienen virtualmente la capacidad de transmitir energía en forma de ondas electromagnéticas.

Las antenas envían o reciben energía electromagnética dependiendo de la orientación que estas tengan, la cual a su vez dependen básicamente de la geometría y dimensiones de esta.

Las antenas además de su armazón metálico, requieren para poder funcionar un generador de corriente alterna (en caso de querer enviar señales) y/o un receptor de señales (algún dispositivo que pueda interpretar las señales que se reciben de otra antena).

### 2.3.1 Tipos de antenas

Las antenas se diferencian por sus formas y tamaños, los que a su vez define sus rangos de operación y funcionalidades. Las antenas más comunes son:

- 1- Antenas de apertura: Las antenas de apertura son aquellas que utilizan superficies o aperturas para guiar las ondas electromagnéticas en una sola dirección. La antena más común de este tipo es la antena parabólica, utilizada generalmente en enlaces con satélites.
- 2- Antenas planas: Las antenas planas se constituyen por una placa de radiadores, los que tienen un circuito que les manda la señal. Un ejemplo de este tipo de antenas son los radares y algunas antenas de celular.

- 3- Antenas de hilo: Se diferencian de las otras dos, porque sus elementos conductores son de hilo (alambres). Ejemplos de antenas de hilo pueden ser los dipolos largo y doblado, la antena helicoidal y la antena de Yagi.

Dentro de las antenas utilizadas en el laboratorio se tiene:

1. Antena dipolo largo

Consiste en un alambre estirado, al cual se le aplica una corriente alterna en el centro (por medio de algún dispositivo), como se muestra en la figura 2.3.1

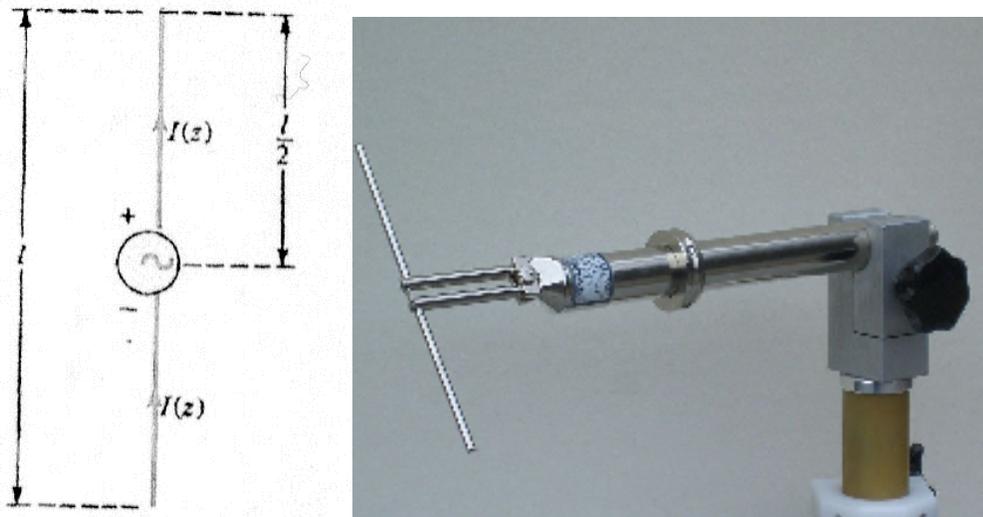


Figura 2.3.1: En el costado izquierdo se muestra como se aplica la corriente a la antena, mientras que en el derecho se muestra una antena dipolo largo real.

Como la corriente  $\hat{I}$  se mueve en direcciones contrarias desde el centro, se cumplen las condiciones de la figura 2.3.2.

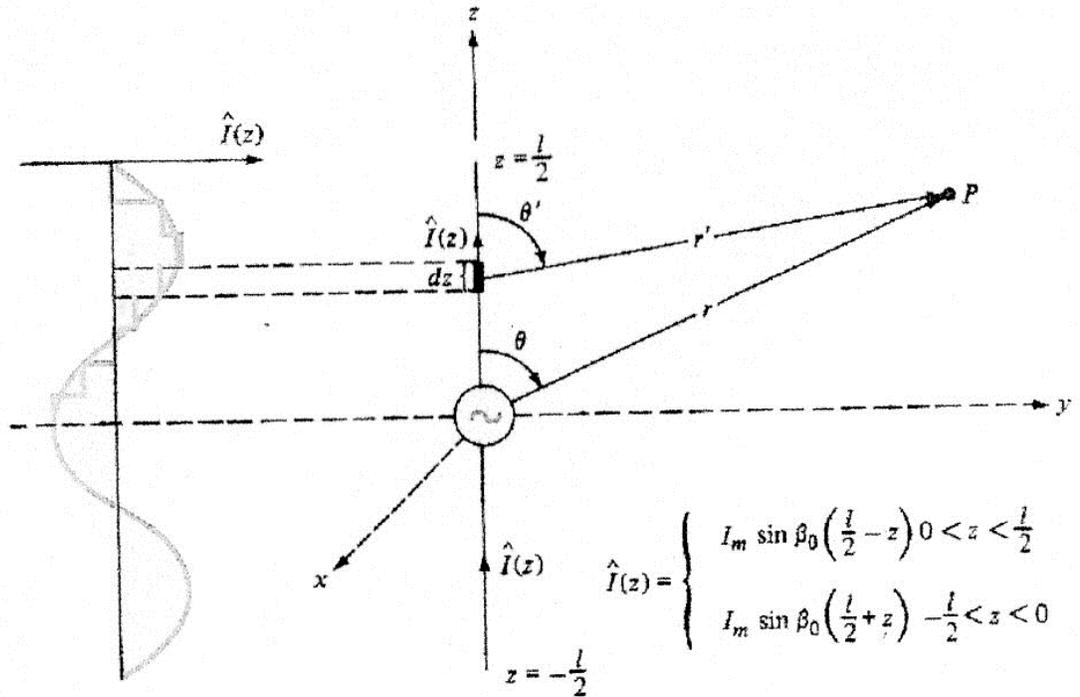


Figura 2.3.2: En el costado izquierdo se muestra la corriente en función de la posición, mientras que en el derecho se muestra la antena dipolo con sus dimensiones y la función de corriente.

De aquí, considerando las aproximaciones pertinentes y la formula (12), se puede llegar a al valor de los campos lejanos de este dipolo en el espacio libre, los que están dados por:

$$\hat{E} = j \frac{\eta_0 \hat{I}_m e^{-j\beta_0 r}}{2\pi r} \frac{\cos[\beta_0(\frac{l}{2})\cos(\theta)] - \cos\beta_0(\frac{l}{2})}{\sin(\theta)} \vec{\theta}$$

$$\hat{H} = \frac{\langle \hat{E}, \vec{\theta} \rangle}{\eta_0} \vec{\phi}$$

Esto en coordenadas esféricas, con  $\eta_0$  siendo la impedancia en el vacío y  $\beta_0$  constante que determina la velocidad en el sistema.

Si se grafica esto, queda que los campos eléctricos están determinados por el largo de  $l$ . Si se fija un radio arbitrario y se grafica en los ejes polares del radio y el ángulo theta, entonces nos queda cualitativamente el grafico de la figura 2.3.3

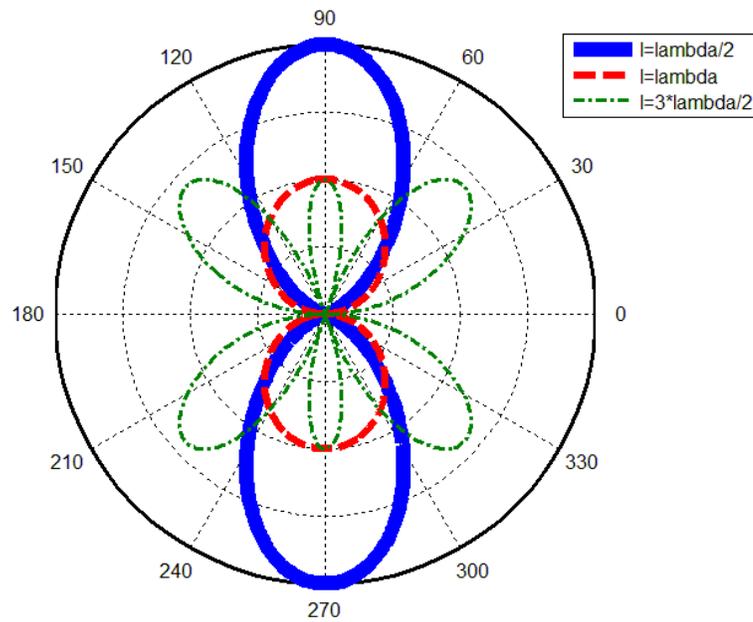


Figura 2.3.3: Se muestra la intensidad del campo eléctrico normalizado en el eje polar dado por el radio de la circunferencia en función del ángulo theta. Esto es análogo para la potencia media irradiada.

Se utilizan para transmisiones de radio, y en arreglos de antenas para transmitir las señales de telecomunicaciones (telefonía móvil).

## 2. Antena dipolo doblado:

El diseño de esta antena se basa en el de un dipolo magnético, de forma que se puede obtener la corriente de la fórmula de este mismo modelo (cuando se considera pequeño el loop). Con esto y la fórmula (12) se obtiene el potencial vectorial, que determina tanto el campo magnético como el campo eléctrico de la antena. Los que a distancias lejanas, están dados por

$$\hat{H} = \frac{\omega \hat{m} \mu_0 \beta_0 e^{-j\beta_0 r}}{4\pi \eta_0 r} \sin(\theta) \vec{\theta}$$

$$\hat{E} = \eta_0 (\hat{H}, \vec{\theta}) \vec{\phi}$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular,  $\hat{m}$  el dipolo magnético (define la corriente) y los otros términos son análogos a los de la parte anterior.

Visualmente esta antena es como se ve en la figura

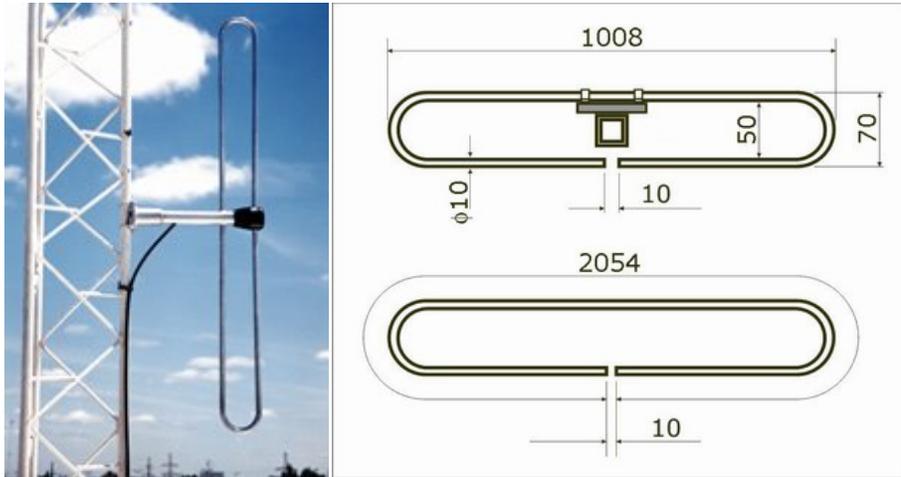


Figura 2.3.4: Antena dipolo doblado, la cual consta de un alambre doblado, con un receptor y un generador de corriente alterna.

Si se analiza su campo magnético, entonces se encontrara que su intensidad con respecto a los ejes radial y cenital está determinada como se muestra en la figura 2.3.5

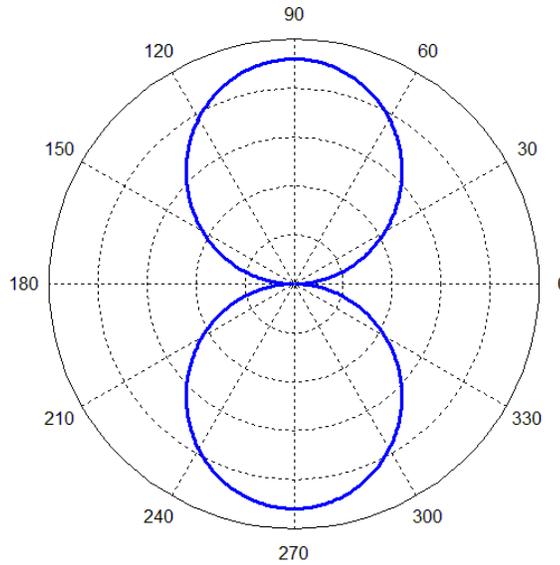


Figura 2.3.5: Se muestra la intensidad del campo magnético en el eje polar radial en dependencia del ángulo cenital. Esto es análogo para la potencia media irradiada.

Su uso más común es en antenas de televisión en conjunto con una antena dipolo largo dispuesta en V y como receptor de señales radiales.

### 3. Antena de Yagi:

La antena Yagi se compone básicamente de una antena dipolo doblado y elementos parásitos que sirven como directores y reflectores de los campos. En la figura 2.3.6 se puede observar una antena Yagi típica

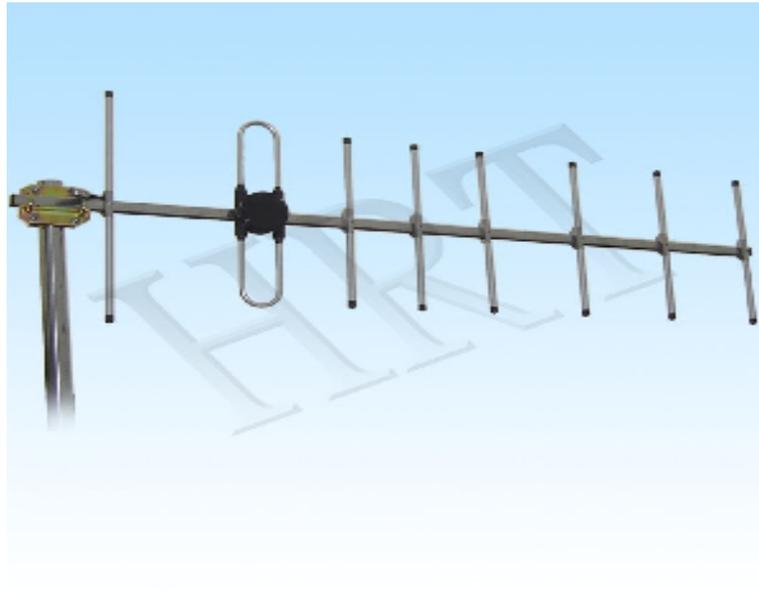


Figura 2.3.6: Antena Yagi típica, compuesta por un dipolo doblado y elementos parásitos.

Encontrar los campos es un poco más complejo, por lo que solo se puede apreciar por medio de una simulación computacional el comportamiento de esta antena, en la figura 2.3.7

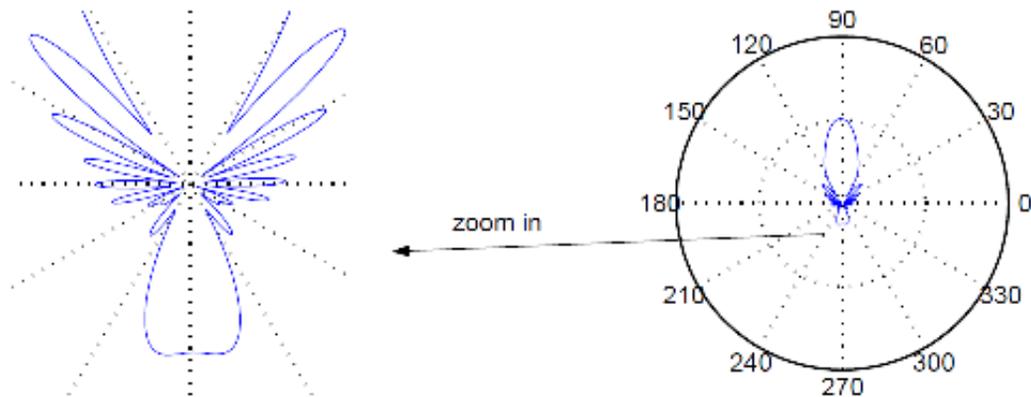


Figura 2.3.7: Simulación de una antena Yagi, la cual tiene un direccionamiento más marcado que las otras dos.

Las antenas Yagi fueron usadas por los aliados durante la segunda guerra mundial para recibir señales enviadas por radares. En la actualidad pueden ser utilizadas para recibir señales de WIFI, como antenas receptoras de señales de televisión, o comunicaciones simples (como LAN, entre otras).

### 2.3.2 Diagramas Polares

Los diagramas polares son gráficos que representan la proyección sobre un plano de un gráfico tridimensional en coordenadas esféricas, por ejemplo la figura 2.3.3. Muchos tipos de antena dependen solo de su ángulo acimutal o cenital, por lo que es posible proyectar sus campos en un plano que depende de uno de sus ángulos y de la intensidad de la señal (representada en la componente radial) para un radio de distancia fijo.

Para obtener estos diagramas, se debe ver la intensidad de la potencia irradiada o la intensidad de los campos en los distintos ángulos posibles.

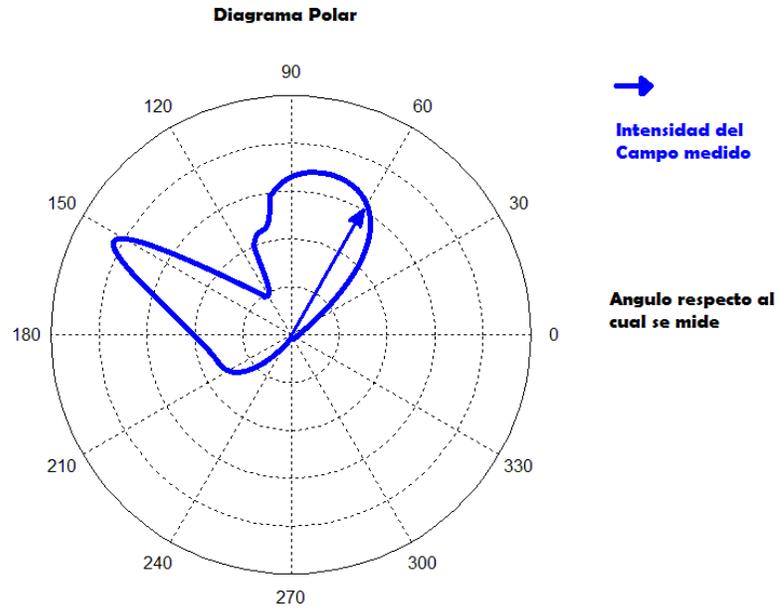


Figura 2.3.8: Ejemplo de un diagrama polar cualquiera, donde la flecha representa la intensidad del campo, donde esta varía con respecto al ángulo en que se mide (la distancia entre la antena y el receptor de la señal es fija, al igual que el otro ángulo que define sus coordenadas)

### 2.3.3 Polarización

La Polarización está determinada por la interacción temporal de las ondas con respecto al plano perpendicular a la transmisión (vector Poynting). Hay polarizaciones de las señales del tipo lineal, circular y elíptica.

Al considerar campos alternos sinusoidales (representados por fasores), entonces se cumple que el campo magnético es una ponderación del campo eléctrico y por lo tanto del campo eléctrico se pueden ver los patrones de variación temporal de la onda.

En general se tiene que si el vector Poynting apunta hacia el eje  $\vec{z}$ , entonces el campo eléctrico está dado por

$$\vec{E} = E_x(z, t)\vec{x} + E_y(z, t)\vec{y}$$

Donde al tomar  $z=0$ , se puede observar la figura que forma este sistema en el tiempo

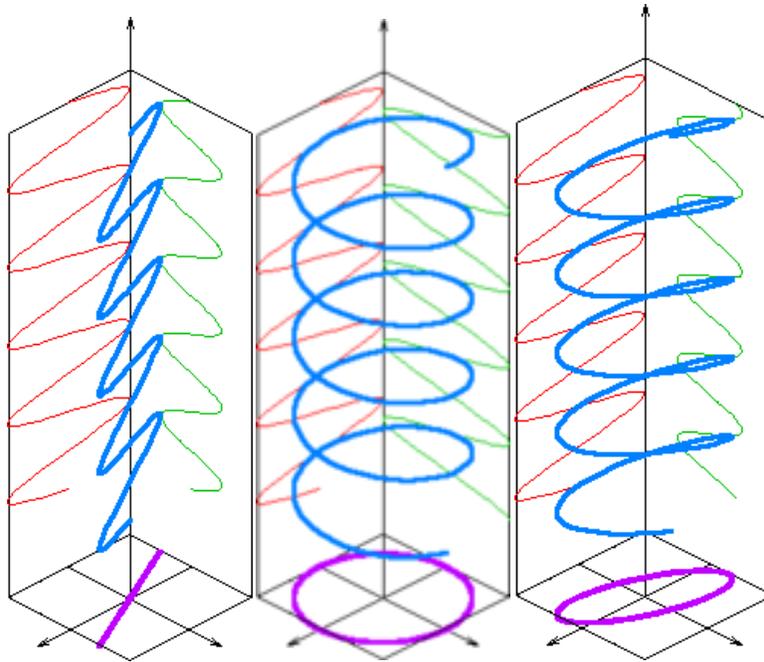


Figura 2.3.9: Tipos de polarización lineal, circular y elíptica respectivamente.

### 2.3.4 Eficiencia

Se define como la relación entre la potencia aplicada a la antena y la potencia radiada, lo que está dado por

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{app}}$$

### 2.3.5 Ganancia

Es una medida de la concentración de la potencia irradiada en un ángulo acimutal y cenital determinado para una distancia fija a la antena.

Se tiene de la ecuación (17) que si la región de integración es un casquete esférico, entonces

$$P_{rad} = \oint_S S_{av} r^2 dr d\theta d\phi$$

Como  $r$  es fijo, se define una función  $U$ , tal que

$$U(\theta, \phi) = S_{av} r^2 \rightarrow P_{rad} = \oint_S U(\theta, \phi) dr d\theta d\phi$$

Con lo que si U es considerada como la densidad de radiación, entonces la intensidad de radiación promedio está dada por

$$U_{av} = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

De aquí se puede definir ganancia de directividad como

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{av}}$$

Donde sí se maximiza esta función se encuentra la ganancia máxima, la que corresponde a la directividad de la antena. (Dirección donde transmite más)

La ganancia en potencia se denomina por una función G y se define como la ganancia de directividad por la eficiencia de la antena (se puede escribir en dB)

$$G(\theta, \phi) = eD(\theta, \phi)$$

### 2.3. Interferencia

La interferencia se produce cuando se superponen ondas que viajan en el espacio, esta interferencia puede causar pérdida de información o agregar información a las señales transmitidas. Las causas de la interferencia son variadas, pueden ser desde problemas meteorológicos (radiaciones electromagnéticas), por la ionosfera, objetos parásitos, o por el traslape de señales de distintas antenas, entre otras.

### 2.3. Transmisión de señales y resistencia de radiación

La transmisión de señales es una transmisión de energía, es decir, está determinada por la potencia; caracterizada por algún vector Poynting. Como idealmente se intenta transmitir a distancias lejanas, se considerara solo las componentes de los campos lejanos para calcular este vector. Por lo tanto se tendrá que

$$\hat{S} = \hat{E}_{far} \times \hat{H}_{far}$$

Este vector Poynting se genera por medio de un corriente alterna  $\hat{I}$  en los materiales conductores, donde la geometría de la antena determina la dirección de los campos, y por ende del vector Poynting.

En general, los campos lejanos son de la forma (ver la obtención de campos de las antenas dipolo)

$$\frac{\hat{I}f(\theta, \phi)}{r}$$

Donde  $\hat{I}$  corresponde a la corriente en la antena,  $r$  a la distancia con respecto a la antena y  $f$  una función cualquiera. Entonces la potencia media se puede representar de la forma

$$S_{av} = \frac{|\hat{I}|^2 F(\theta, \phi)}{r^2}$$

Por lo que si se integra con respecto a un manto de una esfera de radio  $r$  cualquiera, se obtiene que solo depende de  $|\hat{I}|^2$ . Por lo tanto, existe una resistencia de radiación, tal que

$$P_{rad} = |\hat{I}|^2 R_{rad}$$

La que indica cuanta corriente se necesita para poder transmitir una cantidad de potencia irradiada determinada.

### 2.3. Recepción de señales

La recepción de señales se basa en el teorema de la reciprocidad, se puede demostrar experimentalmente, y por medio de modelos como los utilizados para la ecuación de transmisión de Friis que los patrones de transmisión de la antena transmisora deben ser del mismo tipo que los de la antena receptora. Es decir, si una antena transmite sus señales por medio de una orientación vertical, entonces la antena debe recibir dispuesta de manera tal que si quisiera mandar un mensaje, entonces pueda mandarlo con una orientación vertical. (Técnicamente que las impedancias características de acoplamiento sean iguales)

### 3.-Materiales e instrumentos necesarios

Para el desarrollo de la experiencia se necesitan:

1.- Transmisor UHF



(b)

Figura 3.1: Transmisor UHF

2.-Receptor UHF



Figura 3.2: Receptor UHF

3.-Antena de dos elementos



Figura 3.3: Antena de dos elementos

4.-Antena Yagi completa



Figura 3.4: Antena Yagi completa

5.- Antena de dipolo doblado



Figura 3.5: Antena de dipolo doblado

6.- Cable BNC

7.- Multímetro

8.- Amperímetro

## 4.-Procedimiento

### 4.1.-EXPERIENCIA 1: Antena de dos elementos como antena receptora

#### 1.- Montaje de la antena transmisora:

Instalar el dipolo doblado sobre el transmisor UHF SO4100-1 la figura 2.1.b en la posición horizontal. Luego se establece una potencia de salida de 0,1[W]

#### 2.- Montaje de la antena receptora

Instalar la antena de dos elementos sobre el receptor UHF SO4100-3A en posición horizontal. Se debe conectar el receptor y la antena mediante el cable BNC: un extremo del cable conectarlo a la antena y el otro en la entrada RF IN del receptor.

Ajustar el control de sensibilidad en el receptor UHF SO4100-3A hasta que la aguja del visor alcance la mayor deflexión posible.

#### 3.- Variación de la antena receptora:

Cambiar la posición horizontal de la antena a una posición vertical, manteniendo la potencia a 0,1[W]. Observar la medición del receptor sin ajustar el control de sensibilidad.

#### 4.-Potencia de entrada del receptor versus potencia de salida del transmisor:

Incrementar la potencia de salida del transmisor, tomando nota de los valores medidos por el receptor

### 4.2.-EXPERIENCIA 2: Obtención de los diagramas polares

#### 4.2.1.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición horizontal

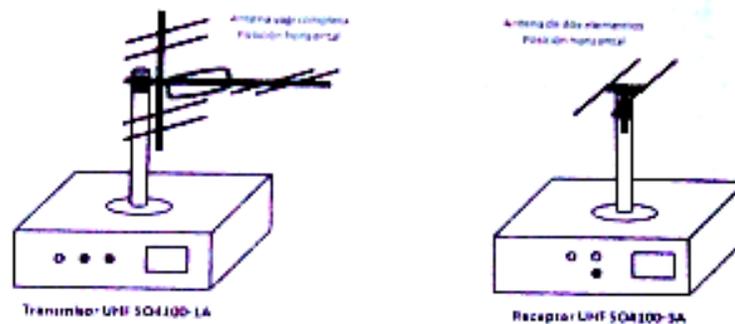


Figura 4.1: Configuración antena trasmisora Yagi, antena receptora de dos elementos, ambas horizontales

Instalar en el transmisor la antena Yagi completa en posición horizontal sobre el transmisor SO4100-1A. Luego se debe instalar la antena de dos elementos en el receptor UHF SO4100-3A en posición horizontal.

Establecer una potencia de salida del transmisor de 200[mW].

Alinear ambas antenas de forma de obtener a máxima lectura del medidor del receptor, ajustando el control de sensibilidad.

Rotar la antena receptora de 0° a 180° en pasos de 10°. Observe y tome nota del valor indicado en el medidor del receptor para cada uno de los ángulos.

Graficar estos pares en coordenadas polares para obtener el diagrama polar de la antena de dos elementos en posición horizontal.

#### 4.2.2.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición vertical

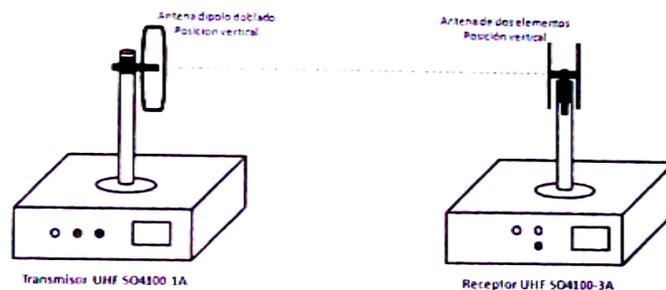


Figura 4.2: Configuración antena trasmisora dipolo doblado, antena receptora de dos elementos, ambas verticales.

Instalar en el transmisor la antena dipolo doblado en posición vertical sobre el transmisor SO4100-1A. Luego se debe instalar la antena de dos elementos en el receptor UHF SO4100-3A en posición vertical.

Establecer una potencia de salida del transmisor de 200[mW].

Alinear ambas antenas de forma de obtener a máxima lectura del medidor del receptor, ajustando el control de sensibilidad.

Rotar la antena receptora de 0° a 180° en pasos de 10°. Observe y tome nota del valor indicado en el medidor del receptor para cada uno de los ángulos.

Graficar estos pares en coordenadas polares para obtener el diagrama polar de la antena de dos elementos en posición vertical.

#### 4.2.3.- Diagrama de antena dipolo doblada en posición horizontal

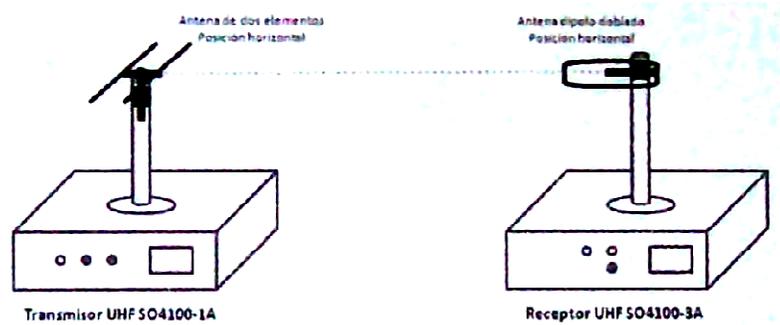


Figura 4.3: Configuración antena transmisora de dos elementos, antena receptora de dipolo doblado, horizontales

Instalar en el transmisor la antena de dos elementos en posición horizontal sobre el transmisor SO4100-1A. Luego se debe instalar la antena dipolo doblada en el receptor UHF SO4100-3A en posición horizontal.

Establecer una potencia de salida del transmisor de 200[mW].

Alinear ambas antenas de forma de obtener a máxima lectura del medidor del receptor, ajustando el control de sensibilidad.

Rotar la antena receptora de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  en pasos de  $10^\circ$ . Observe y tome nota del valor indicado en el medidor del receptor para cada uno de los ángulos.

Graficar estos pares en coordenadas polares para obtener el diagrama polar de la antena yagi en posición horizontal.

#### 4.2.4.- Diagrama polar de antena dipolo doblada con reflectores

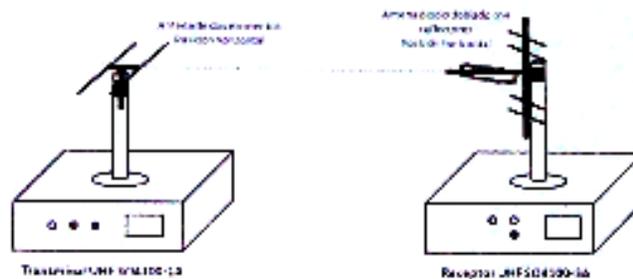


Figura 4.4: Configuración antena transmisora de dos elementos, antena receptora Yagi

Instalar en el transmisor la antena de dos elementos en posición horizontal sobre el transmisor SO4100-1A. Luego se debe instalar la antena dipolo doblada con reflectores en el receptor UHF SO4100-3A en posición horizontal.

Establecer una potencia de salida del transmisor de 200[mW].

Alinear ambas antenas de forma de obtener a máxima lectura del medidor del receptor, ajustando el control de sensibilidad.

Rotar la antena receptora de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$  en pasos de  $10^{\circ}$ . Observe y tome nota del valor indicado en el medidor del receptor para cada uno de los ángulos.

Graficar estos pares en coordenadas polares para obtener el diagrama polar de la antena dipolo doblado con reflectores en posición horizontal.

## 5.- Resultados y análisis

### 5.1.-Experiencia 1

#### 5.1.1.- Variación de posición de la antena receptora:

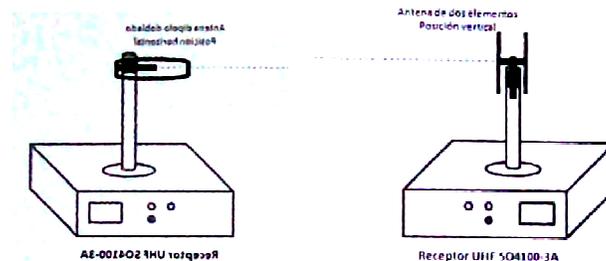


Figura 5.1: Configuración antena transmisora de dipolo doblado horizontal, antena receptora de dos elementos vertical

Al cambiar de posición horizontal a posición vertical la antena receptora de dos elementos, manteniendo la potencia en  $0,1[W]$ . El medidor del receptor mostró  $0[\mu A]$  para el recorrido completo entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .

Al estar la antena de dipolo doblado en posición horizontal, y la antena de dos elementos en posición vertical poseen un desfase entre sus planos de radiación de  $90^\circ$ , por lo cual la antena receptora no detectará a la antena transmisora.

#### 5.1.2.- Variación de la potencia de entrada

Al incrementar paulatinamente la potencia de salida del transmisor, se observó una variación en los valores de corriente entregados por el receptor. Es importante notar que se tomaron los datos con una configuración horizontal de la antena de la forma que muestra el siguiente gráfico:

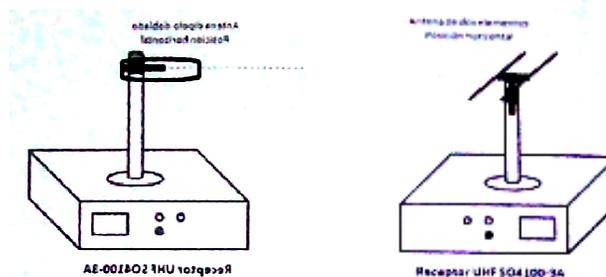


Figura 5.2: Configuración antena transmisora de dipolo doblado horizontal, antena receptora de dos elementos horizontal

Los datos obtenidos se muestran en el siguiente gráfico:

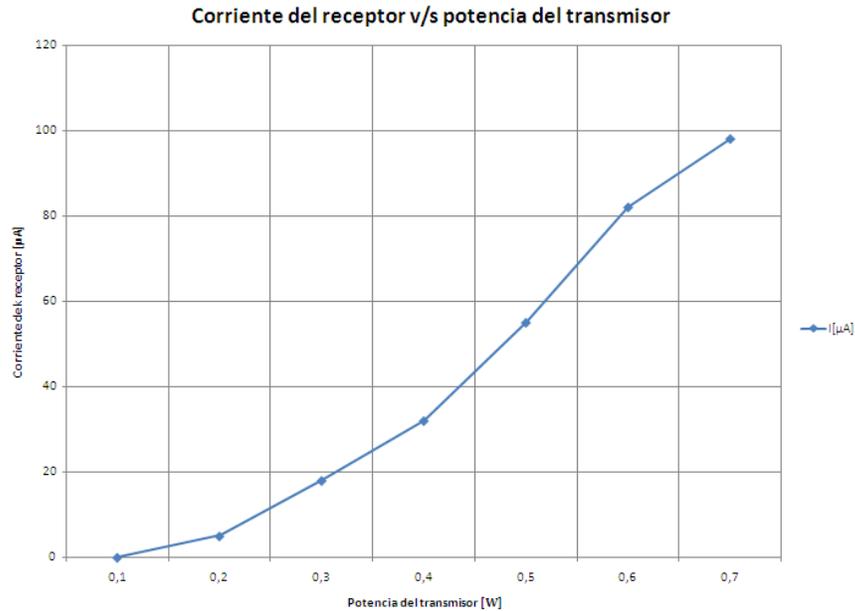


Figura 5.3: Gráfico de corriente del receptor v/s potencia del transmisor

Podemos notar la dependencia de la potencia de transmisión con respecto a la señal detectada por la antena receptora. Esto tiene sentido dado que se relaciona la transmisión con el vector Poynting, que a su vez caracteriza la potencia que radia el elemento.

Una antena trasmisora recibe energía de una fuente y emite parte de ella como energía electromagnética libre. Vista desde la fuente de energía la antena trasmisora es simplemente un receptor de energía. Idealmente entonces encontramos que la potencia irradiada está dada por:

$$P_{\text{rad}} = R_{\text{rad}} \cdot I_0^2,$$

donde  $R_{\text{rad}}$ , corresponde a la parte real de la impedancia de la antena e  $I_0$  es la corriente vista por la misma. Recordando además que la patrón de radiación de recepción de la antena es el igual que el de radiación en el modo de transmisión, podremos notar la relación cuadrática entre la potencia de transmisión y la corriente generada en la antena de recepción.

## 5.2.-Experiencia 2

### 5.2.1.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición horizontal

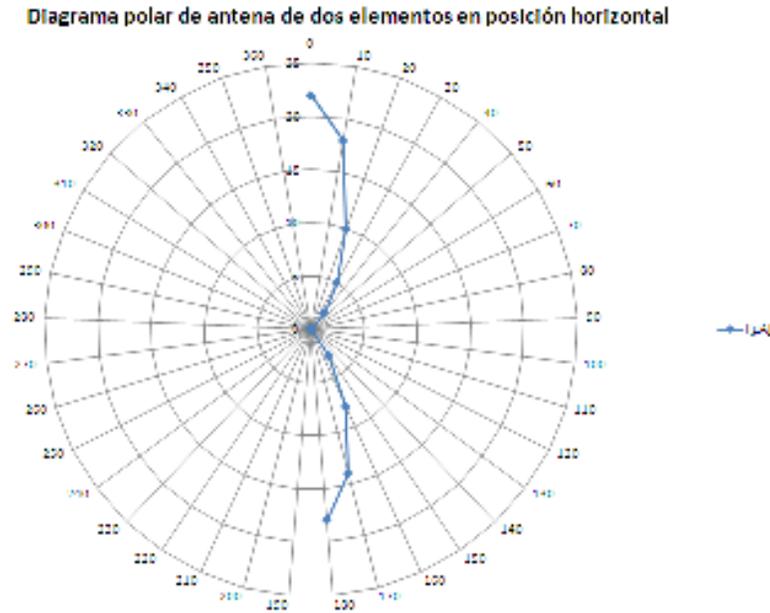


Figura 5.4: Diagrama de antena de dos elementos posición horizontal

La configuración para esta experiencia fue una antena radiando del tipo Yagi completa que se dispuso de modo horizontal, y una antena de dos elementos dispuesta del mismo modo.

Las antenas Yagi pertenecen al grupo de antenas direccionales, esta quiere decir que son dispositivos capaces de concentrar la energía radiada en de manera localizada, aumentando así la potencia emitida hacia el receptor y evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas, lo que mejora el rendimiento de las mismas. Estas mejoras considerables respecto de la antena de dipolo convencional se debe a las varillas que posee, llamadas directores y reflectores dependiendo de su función. Estas características se ven ampliamente reflejadas en los datos obtenidos, pues existe una amplia área del gráfico donde la antena receptora no detecta ninguna radiación proveniente de la antena transmisora, más aún ante el cambio de  $10^\circ$  se observan disminuciones considerables de corriente medida, que aumenta a medida que se acerca la antena a los  $90^\circ$  de desfase.

Es esperable por tanto que el diagrama polar muestre la densidad de polarización concentrada en una dirección y que esta se haga máxima cuando las antenas se encuentran alineadas pues es aquí donde se logrará la transmisión más directa de la potencia.

Podemos hacer una extrapolación de los puntos tomados para ver el diagrama polar de la antena de dos elementos completa.

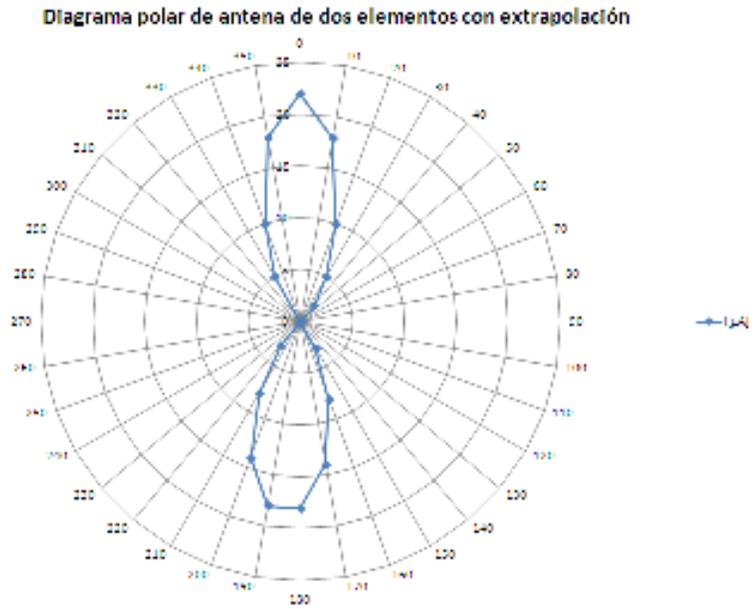


Figura 5.5: Diagrama de antena de dos elementos con extrapolación

Podemos notar claramente que la corriente detectada por la antena receptora es máxima cuando están enfrentadas ambas antenas, donde se obtiene una corriente detectada de  $22[\mu A]$ , que va disminuyendo conforme la antena se va acercando a un desfase de  $90^\circ$ , y que comienza a aumentar nuevamente cuando la antena de de dos elementos se gira alineándose pero en sentido contrario, es decir recorre desde los  $90^\circ$  a  $180^\circ$ , llegando en este caso a la detección de  $18[\mu A]$  como máximo.

### 5.2.2.- Diagrama polar de antena de dos elementos en posición vertical

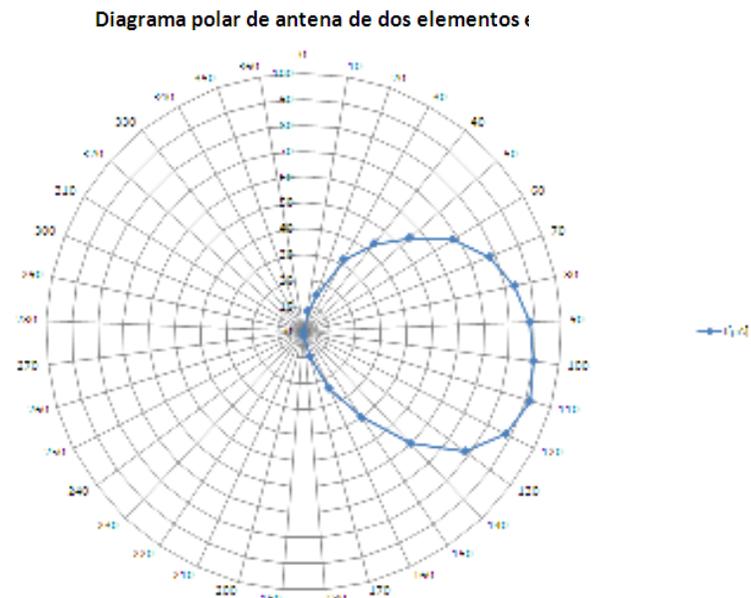


Figura 5.6: Diagrama de antena de de dos elementos vertical

La configuración de antenas ocupadas es la siguiente, como antena transmisora se utilizó la antena de dipolo doblada, mientras que como antena receptora se utilizó la antena de dos elementos. Ambas antenas se dispusieron de modo vertical.

La antena de dipolo doblado se caracteriza por tener una radiación mucho más isotrópica dado que esencialmente su configuración corresponde a una antena única formada por dos elementos notamos fácilmente esto si comparamos el diagrama de radiación obtenida con el anterior donde radiaba una antena del tipo Yagi completa. Sin embargo sigue siendo una antena direccional en cuando la potencia de radiación no se distribuye de manera uniforme en todas las orientaciones posibles. La forma de la radiación de esta antena se verá alterada por las dimensiones de su configuración, tanto el largo de los elementos cortocircuitados, como la separación entre los mismos.

respecto a la estudiada en la configuración anterior, encontrándose el máximo detectado por la antena receptora cerca de los  $90^\circ$ , específicamente en los  $110^\circ$  con una corriente de  $92[\mu A]$  detectada, siendo esta mínima cuando ambas se encontraban enfrentadas. Así regresa de manera relativamente uniforme hasta la detección cero de potencia a los  $180^\circ$ .

Hemos extrapolado los datos obtenidos para lograr una visión más completa y decidora del diagrama de polarización que se muestra a continuación:

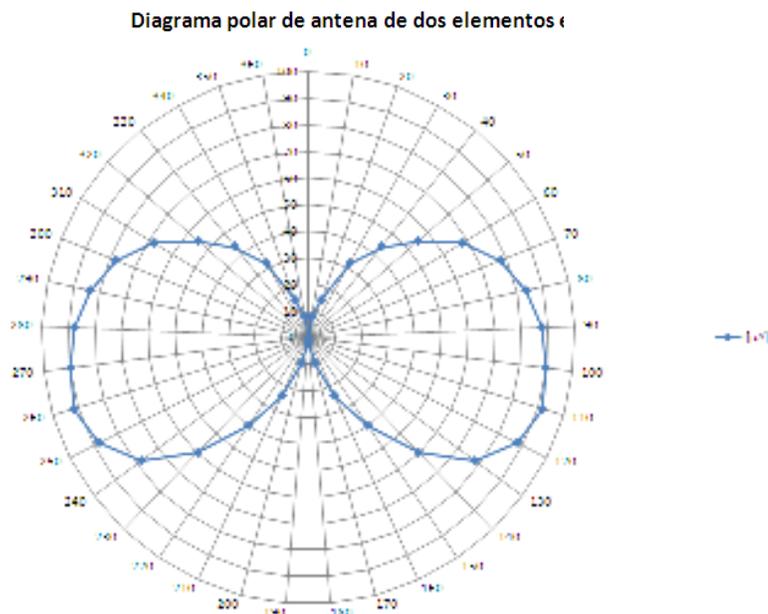


Figura 5.6: Diagrama de antena de de dos elementos vertical extrapolada

Es importante destacar que la sensibilidad de la recepción de la onda se hizo muy notoria en esta experiencia, donde cualquier objeto en un amplio radio podía afectar los registros de

corriente. Se tubo que tener especial cuidado incluso con la posición de quien registraba los datos pues , pequeños movimientos generaban alteraciones de varias decenas de  $\mu\text{A}$ .

### 5.2.3.- Diagrama polar de antena de dipolo doblado

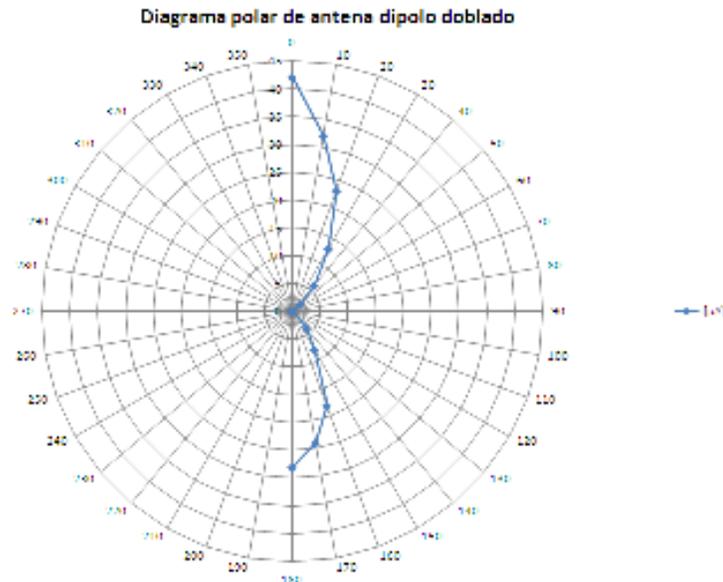


Figura 5.7: Diagrama de antena de dipolo doblado horizontal

Se puede observar que el máximo de percepción se logra para un ángulo nulo. Esto se debe a que el frente de onda viaja y llega perpendicularmente a la antena receptora. Esto se traduce en que el campo eléctrico llega de manera tangencial a ésta, por lo que se genera una corriente máxima inducida en el material del receptor (señal percibida por la antena). Esta corriente se genera por la redistribución de las cargas en el material conductor a fin de anular la componente tangencial del campo eléctrico que incide sobre la superficie (condición de borde del campo eléctrico). Esta corriente es la que genera la onda reflejada.

Si bien, la onda que se percibe cerca de la fuente generadora de la onda electromagnética (emisor) corresponde a una onda esférica, éste análisis es válido a medida de que la distancia entre las antenas aumenta, donde la aproximación por onda plana presenta un error menor.

Por lo mismo, es de esperarse que para un ángulo de  $90^\circ$ , la percepción fuese cercana a cero, resultado que se aprecia en el diagrama, pues la dirección de propagación de la onda es tangencial al receptor (superficie), por lo que no se genera onda reflejada. En consecuencia, se deduce que no existe corriente que genere esta onda, y por ende, no existe señal percibida por la antena.

Para ángulos cercanos a  $180^\circ$ , la onda comienza a incidir de manera perpendicular al detector, pero por la zona más insensible de la antenna, por lo que se percibe un aumento en la percepción, pero nunca de la misma magnitud como las cercanas a un ángulo nulo.

Presentamos finalmente un gráfico extrapolado para tener una idea acabada acerca de la forma del diagrama de polar de la antenna:

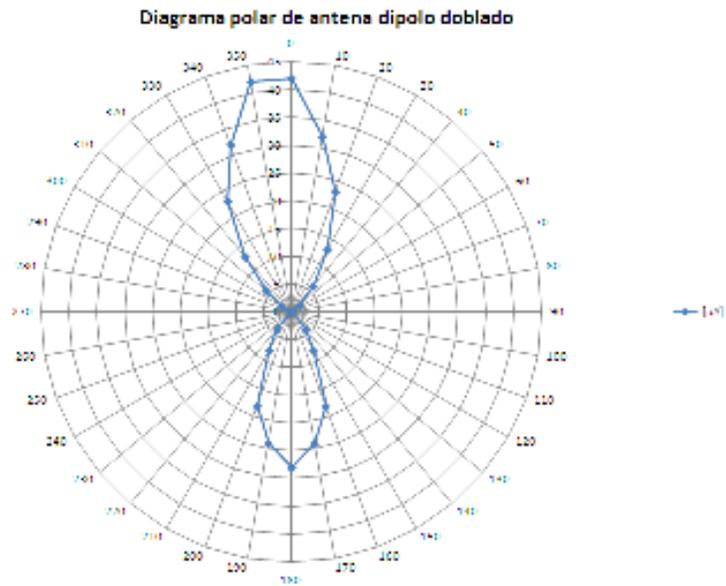


Figura 5.8: Diagrama de antenna de dipolo doblado horizontal extrapolada

#### 5.2.4.- Diagrama polar de antenna de dos elementos en posición horizontal

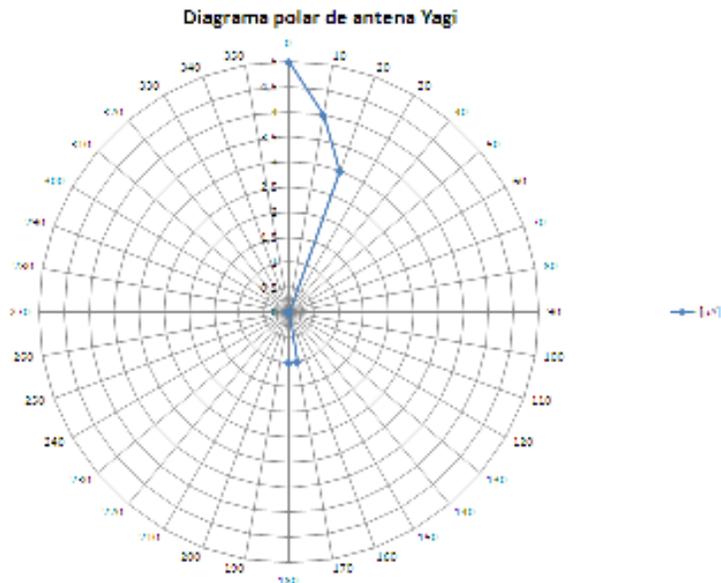


Figura 5.9: Diagrama de antenna de Yagi horizontal

Se puede observar un comportamiento similar a la experiencia anterior, con una notable diferencia en el rango de ángulos para el cual el receptor percibe la señal. Esto es debido a que los directores (varillas) ayudan a dirigir de mejor manera, y en dirección perpendicular al receptor, la onda electromagnética. Es por esto que percibe radiación para ángulos pequeños, pero rápidamente decae ya que su percepción está concentrada en torno al ángulo cero. La explicación de esta mejor percepción es la misma que para la antena de dipolo doblada.

Por último mostramos un diagrama polar extrapolado de la antena:

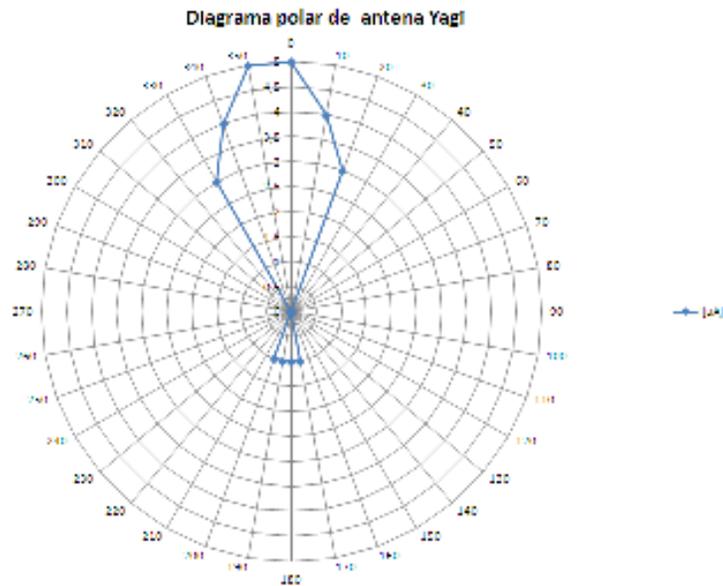


Figura 5.10: Diagrama de antena de Yagi horizontal extrapolada

## 6.-Conclusiones

Las antenas son dispositivos muy útiles, debido a que permiten el envío de información por espacios abiertos. La geometría constituye uno de los factores más importantes en el diseño, y posterior operación de ellas. Podemos notar que cambios que a primera vista pueden parecer poco significativo podemos mejorar ampliamente el rendimiento como es el caso de las antenas Yagi.

La transmisión de información no solo depende de la calidad del emisor y/o receptor, sino que también de su trabajo en conjunto, puesto que la mayor transmisión de potencia se obtiene cuando las polarizaciones de ambas antenas se encuentran en el mismo plano, es decir, que el frente de onda incide de manera perpendicular al receptor.

El diagrama de radiación es una herramienta que permite estudiar las posiciones de máxima y mínima transmisión de potencia. Técnica que también sirve para identificar y clasificar los tipos de antena (antenas direccionales y no direccionales). Una gran utilidad de los diagramas de radiación son las antenas inteligentes, las cuales consisten en una antena dotada con un procesador de señales capaz de optimizar (maximizar) la transmisión de información.

La interferencia es un gran problema, no por las soluciones que estas implican, sino que cualquier objeto es un potencial disipador de energía. Esto se pudo corroborar empíricamente en la sesión de laboratorio, ya que incluso nuestros cuerpos generaban interferencias, lo cual inducía a errores de medición.

## 7.- Bibliografía

- Introducción al electromagnetismo, Zoya Popovic, Brando D. Popovic, compañía editorial continental, pág. 492-510
- Fundamentos de la teoría electromagnética, Reitz, Milford, Christy, 4ta edición, Addison-Wesley Iberoamericana, pág. 532-548
- [http://www.analyzemath.com/antenna\\_tutorials/dipole\\_antennas.htm](http://www.analyzemath.com/antenna_tutorials/dipole_antennas.htm)

## 8.-Anexos

### 1.-Datos de las experiencias (extrapolados)

#### 1.-Experiencia 5.1.2

P[W]	I[ $\mu$ A]
0,1	0
0,2	5
0,3	18
0,4	32
0,5	55
0,6	82
0,7	98
0,8	<100
0,9	<100
1	<100
1,1	<100
1,2	<100
1,3	<100
1,4	<100
1,5	<100
1,6	<100
1,7	<100
1,8	<100

#### 2.- Experiencia 5.2.1

Ángulo [°]	I[ $\mu$ A]
0	22
10	18
20	10
30	5
40	2
50	0
60	0
70	0
80	0
90	0
100	0
110	0
120	0
130	0
140	0
150	3
160	8
170	14
180	18
190	18
200	14
210	8
220	3
230	0
240	0
250	0
260	0
270	0
280	0
290	0
300	0
310	0
320	0
330	5
340	10
350	18

3.- Experiencia 5.2.2

Ángulo [°]	I[ $\mu$ A]
0	0
10	8
20	15
30	32
40	44
50	55
60	68
70	78
80	84
90	88
100	90
110	92
120	88
130	78
140	60
150	40
160	24
170	10
180	2
190	2
200	10
210	24
220	40
230	60
240	78
250	88
260	92
270	90
280	88
290	84
300	78
310	68
320	55
330	44
340	32
350	15

4.-Experiencia 5.2.3

Ángulo [°]	I[ $\mu$ A]
0	42
10	32
20	23
30	13
40	6
50	2
60	0
70	0
80	0
90	0
100	0
110	0
120	0
130	0
140	4
150	8
160	18
170	24
180	28
190	24
200	18
210	8
220	4
230	0
240	0
250	0
260	0
270	0
280	0
290	0
300	2
310	6
320	13
330	23
340	32
350	42

5.- Experiencia 5.2.4

Ángulo [°]	I[ $\mu$ A]
0	5
10	4
20	3
30	0
40	0
50	0
60	0
70	0
80	0
90	0
100	0
110	0
120	0
130	0
140	0
150	0
160	0
170	1
180	1
190	1
200	1
210	0
220	0
230	0
240	0
250	0
260	0
270	0
280	0
290	0
300	0
310	0
320	0
330	3
340	4
350	5