

LABORATORIO II

Caracterización de Emisión de Antenas en Campo Lejano

ROQUETA, MATÍAS DANIEL

GARCÍA FERNANDEZ, RAMIRO

Centro Atómico Bariloche y Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica

Resumen

Se construyó un canal de comunicaciones inalámbrico intercambiando cuatro emisoras diferentes transmitiendo a 432,5 MHz. Con este canal y un analizador de redes se trazaron los diagramas de emisión de las antenas y se estudiaron los siguientes parámetros, presentando los valores obtenidos del dipolo $\frac{\lambda}{2}$ como ejemplo.

Ganancia del canal: $A_{Max} = (-15 \pm 2) \text{ dB}$
 Impedancia de entrada: $Z_{in} = 26,5 \pm 0,5 \Omega$
 Coeficiente de reflexión: $\Gamma = -9.7 \pm 0.3 \text{ dB}$
 Frecuencia de resonancia: $f_0 = 356,3 \pm 0,3 \text{ MHz}$

Durante el experimento se detectaron los efectos inesperados que tienen la presencia de elementos resonantes en el entorno sobre el funcionamiento de un canal de comunicaciones inalámbrico, y se discuten formas de minimizar su impacto.

Introducción

Las antenas son estructuras físicas diseñadas para radiar y recibir energía electromagnética de forma eficaz. Son estructuras eléctricamente resonantes, por lo que tienen un funcionamiento óptimo a su frecuencia de resonancia y son utilizadas para operar cerca de esa frecuencia. La frecuencia de resonancia es consecuencia de la longitud física de la antena. Por ejemplo una antena muy frecuentemente usada es el dipolo $\frac{\lambda}{2}$. [1]

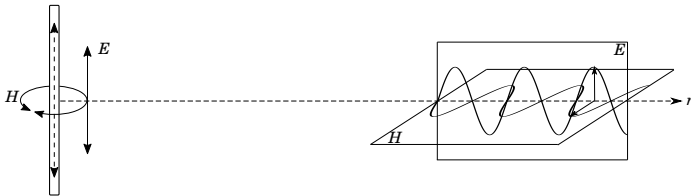


Figura 1: Diagrama de una antena dipolo $\frac{\lambda}{2}$ ilustrando la geometría del campo EM generado en campo cercano y lejano. A los planos ortogonales donde se propagan el campo eléctrico y magnético se los llama planos E y H .

Para hacer funcionar una antena como emisora se hace circular una corriente variante en el tiempo por la misma. En concordancia con las ecuaciones de Maxwell,

esto genera un campo magnético variante en el tiempo, el cual genera a su vez un campo eléctrico perpendicular al mismo, generando una onda electromagnética. Todos estos procesos son reversibles, por lo que la misma antena puede actuar como receptora cuando una onda electromagnética induce una corriente sobre ella.

Como es visto en la figura 1, próximo a la fuente la geometría de la onda generada depende de la forma de la antena, lejos de la fuente la onda se puede aproximar bien a una onda plana. La región del espacio en la cual la aproximación a un frente de onda plano es válida se define como campo lejano.

Aplicando un desarrollo matemático presentado en el apéndice 1 se determina la siguiente ecuación

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

Donde D es la longitud de la antena, λ la longitud de onda transmitida, y R la distancia de la fuente a partir de la cual inicia el campo lejano.

Las antenas funcionan correctamente como receptoras cuando se ven expuestas a frentes de onda planos, y además el propósito de una antena es transmitir información a grandes distancias. Por estos motivos el estudio de antenas se centra en el estudio de su comportamiento en campo lejano.

La onda plana presente en campo lejano permite definir dos planos bien definidos. Uno el plano H , perpendicular al eje de la antena, donde se propaga el campo magnético. El otro el plano E , perpendicular al plano H , donde se propaga el campo eléctrico. La figura 1 ilustra estos dos planos.

La transmisión es óptima cuando los planos característicos de la receptora están alineados con los de la emisora, condición que se llama de máximo acoplamiento. Se llama pérdida por polarización a la pérdida de señal causada por una desviación de este estado.

En campo lejano se puede definir la *característica de emisión* de la antena, que es la potencia transmitida al

espacio medida a una distancia radial fija $P(\theta, \phi)$. La característica de emisión se expresa normalizada. Para caracterizar una antena se trazan sus diagramas de emisión sobre el plano E a ángulo azimutal constante obteniendo $P(\theta)$, y sobre el plano H a ángulo polar constante, obteniendo $P(\phi)$.

Estos diagramas de emisión dan una noción de que tan directiva es la antena, es decir si emite la mayor parte su potencia transmitida en una o más direcciones en particular, o si la emite en toda dirección y sentido de manera uniforme. En particular, una antena con una característica de emisión perfectamente esférica se llama antena *isótropa*.

Las antenas son elementos circuitales, por lo que cada antena tiene una impedancia de entrada Z_{in} y puede considerarse un transductor para adaptar la impedancia característica de una línea de transmisión a la impedancia intrínseca del medio circundante.¹

En caso de que la impedancia de entrada de una antena no esté correctamente adaptada a su línea de transmisión, esta no transmitiría toda la potencia que se le entrega al aire, sino que una parte se verá reflejada sobre la línea de transmisión que la alimenta. A la relación entre el valor eficaz de la potencia entregada a la antena y la potencia reflejada por esta se le llama el coeficiente de reflexión Γ .

Un arreglo de antenas transmisora y receptora, junto un medio de propagación, forman un canal de comunicaciones. Como en todo canal de comunicación existen pérdidas, se define la ganancia (o atenuación) del canal utilizando la escala de decibeles.

$$A = 10 \ln \frac{P_r}{P_t} \quad (2)$$

Con A la ganancia del canal, P_r la potencia recibida por la antena receptora y P_t la potencia transmitida por la antena transmisora.

La ganancia del canal se maximiza cuando se usan antenas en máximo acoplamiento y que resuenan a la frecuencia de la señal que se desea transmitir, y cuando se adapta la impedancia de las mismas a la línea de transmisión minimizando el valor de Γ . En caso de que el objetivo sea fabricar un radioenlace estático, también se puede mejorar la ganancia del canal usando antenas con característica directiva.

¹La impedancia intrínseca del aire se aproxima igual a la del vacío, $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \simeq 120\pi \Omega$.

Los cables coaxiales de uso general típicamente usan una impedancia característica estandarizada de $Z_0 = 50 \Omega$

Método Experimental

El método utilizado consiste en hacer girar una antena emisora con un motor paso a paso manteniendo fija una antena receptora simulando así la emisión en distintas direcciones. La antena receptora es una tipo dipolo $\frac{\lambda}{2}$ situada siempre a 3,6 m de la emisora en cumplimiento de la condición de campo lejano. Un esquema del método experimental se presenta en la figura 2

Las antenas que se usan como emisoras en el experimento son un dipolo $\frac{\lambda}{2}$, una yagi-uda, una antena semihelicoidal, y una antena helicoidal.

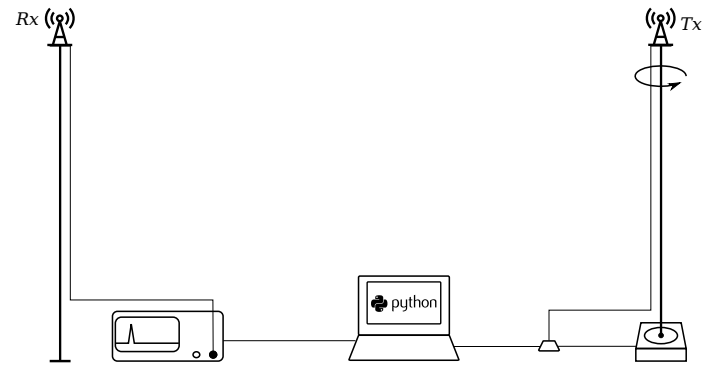


Figura 2: Esquema del método experimental empleado. Se observa como una antena emisora gira mientras una receptora fija capta la señal y es enviada a un analizador de espectros que posteriormente envía la información a la computadora.

La antena emisora es conectada a una placa que envía una señal a una frecuencia de 432,5 MHz. Esta señal es captada por una antena receptora que se encuentra en las condiciones de campo lejano. La señal recibida es medida en dBm por medio de un analizador de espectros Rigol DSA 815.

De cada antena se traza su característica de emisión en el plano H haciéndola girar en su plano azimutal con la antena receptora en máximo acoplamiento, y su característica de emisión en el plano E haciéndola girar en su plano polar con la antena receptora en máximo acoplamiento. Para medir las pérdidas por polarización, se repite el experimento desfasando las antenas emisora y receptora 90° de su posición de máximo acoplamiento. El criterio usado para definir los planos E y H de las cuatro antenas usadas en el experimento es presentado en el apéndice 2.

Los datos son registrados utilizando Python, donde se procesa la media de los valores junto con su desviación

estándar. Estos valores se normalizan, y se genera el diagrama de emisión de la antena. Un diagrama de flujo del algoritmo desarrollado en Python se presenta en el apéndice 3.

A partir de los diagramas de emisión de las antenas se adquiere la ganancia máxima y mínima que pueden llegar a tener un canal de comunicaciones a esa distancia. Debido a la presencia de ruido, los datos adquiridos se procesan con un filtro de media móvil antes de buscar el máximo, también presentado en el apéndice 3.

Durante el experimento cada antena medida da 3 vueltas sobre su eje, tomando 14 mediciones de intensidad de señal por paso por vuelta para un total de 42 mediciones por posición angular. Debido que al girar la antena se producen vibraciones que pueden afectar la medición se agrega un retraso de 2 s antes de comenzar a registrar la intensidad de señal recibida luego de realizar un paso.

Una vez generadas las características de emisión de las antenas, se usa un analizador de redes Agilent 4395A para medir la impedancia de entrada Z_{in} de la antena así como el coeficiente de reflexión Γ que genera sobre la línea de transmisión a la cual está acoplada. Las líneas de transmisión usadas durante todo el experimento son cables coaxiales de impedancia característica 50Ω .

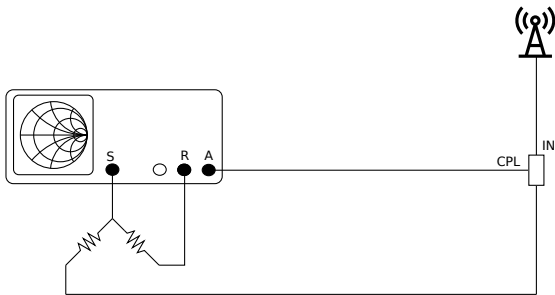


Figura 3: Esquema del segundo arreglo experimental. El analizador de redes genera una señal en la terminal S que es pasada por un divisor de potencia, generando dos señales idénticas. Una entra en la terminal de referencia R y la otra es enviada a transmitir por la antena. La componente de la señal reflejada es recibida por la terminal IN de el acoplador direccional ZFDC-15-5, el cual duplica la señal y la alimenta a la terminal de entrada A.

El analizador de redes opera en un rango de frecuencias de $[10 \text{ Hz}, 500 \text{ MHz}]$, y realiza un barrido en frecuencia sobre la antena, permitiendo encontrar frecuencias óptimas de operación de cada antena dentro del rango de análisis del instrumento. Se detecta la frecuencia óptima cuando se observa un mínimo en $\Gamma(f)$.

Resultados

Todos los diagramas generados así como las atenuaciones (o ganancias) máximas y mínimas del canal de comunicación fueron medidas a una distancia entre las antenas de $L = (3,6 \pm 0,1) \text{ m}$.

Se presentan los diagramas de emisión en planos H y E de las cuatro antenas, seguidos de las ganancias máximas y mínimas de canal estando las antenas en esos planos, y finalmente las ganancias máximas y mínimas registradas estando las antenas desacopladas.

Dipolo $\frac{\lambda}{2}$

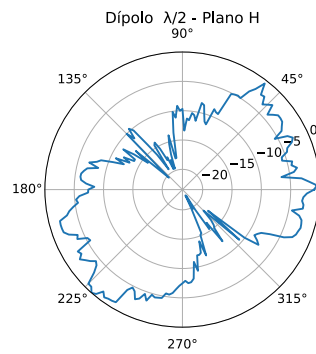


Figura 4: Diagrama en plano H del dipolo $\frac{\lambda}{2}$.

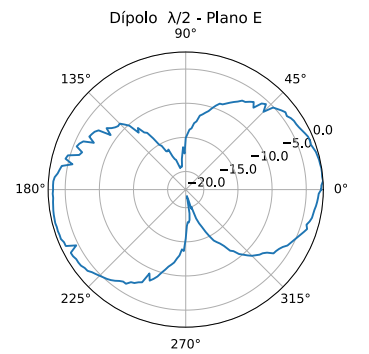


Figura 5: Diagrama en plano E del dipolo $\frac{\lambda}{2}$.

$$\begin{aligned} A_{H_{Max}} &= (-15 \pm 2) \text{ dB} \\ A_{H_{Min}} &= (-64 \pm 2) \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{E_{Max}} &= (-12 \pm 1) \text{ dB} \\ A_{E_{Min}} &= (-53 \pm 1) \text{ dB} \end{aligned}$$

En condiciones de máximo desacoplamiento.

$$A_{\perp_{Max}} = (-19 \pm 2) \text{ dB}$$

$$A_{\perp_{Min}} = (-75 \pm 2) \text{ dB}$$

Semi Helicoidal

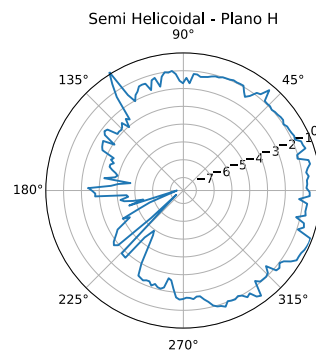


Figura 6: Diagrama H de la antena semihelicoidal.

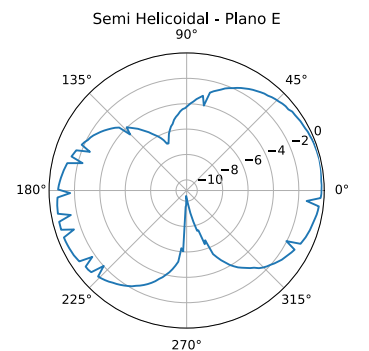


Figura 7: Diagrama E de la antena semihelicoidal.

$$A_{H_{Max}} = (-20 \pm 10) \text{ dB} \quad A_{E_{Max}} = (-20 \pm 10) \text{ dB}$$

$$A_{H_{Min}} = (-80 \pm 20) \text{ dB} \quad A_{E_{Min}} = (-70 \pm 10) \text{ dB}$$

En condiciones de máximo desacoplamiento.

$$A_{\perp_{Max}} = (-20 \pm 11) \text{ dB} \quad A_{\perp_{Min}} = (-59 \pm 12) \text{ dB}$$

Helicoidal

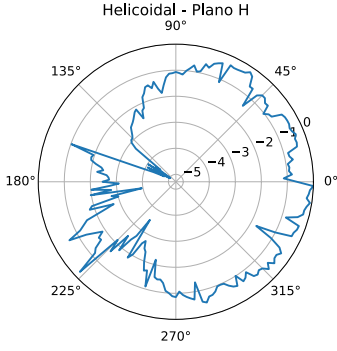


Figura 8: Diagrama H de la antena helicoidal.

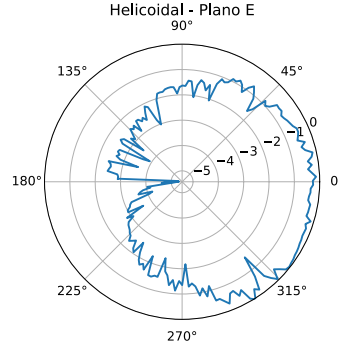


Figura 9: Diagrama E de la antena helicoidal.

$$A_{H_{Max}} = (-20 \pm 10) \text{ dB} \quad A_{E_{Max}} = (-20 \pm 10) \text{ dB}$$

$$A_{H_{Min}} = (-70 \pm 20) \text{ dB} \quad A_{E_{Min}} = (-60 \pm 10) \text{ dB}$$

En condiciones de máximo desacoplamiento.

$$A_{\perp_{Max}} = (-20 \pm 12) \text{ dB} \quad A_{\perp_{Min}} = (-64 \pm 14) \text{ dB}$$

Yagi-Uda

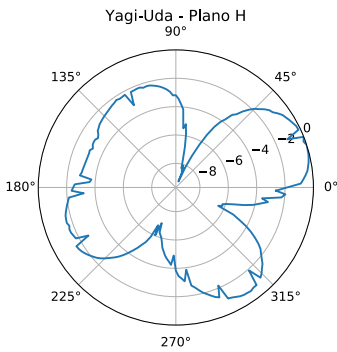


Figura 10: Diagrama H de la antena Yagi-Uda.

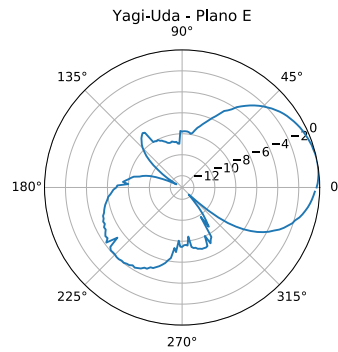


Figura 11: Diagrama E de la antena Yagi-Uda.

$$A_{H_{Max}} = (-15 \pm 5) \text{ dB} \quad A_{E_{Max}} = (-12 \pm 2) \text{ dB}$$

$$A_{H_{Min}} = (-52 \pm 9) \text{ dB} \quad A_{E_{Min}} = (-47 \pm 8) \text{ dB}$$

En condiciones de máximo desacoplamiento.

$$A_{\perp_{Max}} = (-19 \pm 8) \text{ dB} \quad A_{\perp_{Min}} = (-60 \pm 10) \text{ dB}$$

Analizador de Redes

Se usó el analizador de redes para medir Γ y Z_{in} de las antenas en la frecuencia de operación 432,5 MHz, y luego se buscó la frecuencia óptima encontrando la frecuencia que minimiza el coeficiente de reflexión.

Se encontró que la frecuencia óptima de operación del dipolo $\frac{\lambda}{2}$ es de $365,3 \pm 0,3$ MHz, y que la de la antena Yagi-Uda es de $462,4 \pm 0,3$ MHz. Estas frecuencias encontradas son mínimos absolutos de Γ , consistentes con el comportamiento de una antena en su frecuencia de resonancia.

Al medir el coeficiente de reflexión de la antena semi-helicoidal este disminuía mientras f aumentaba, por esto se asume que la frecuencia óptima de esta antena es mayor a los 500 MHz. La antena helicoidal presenta un comportamiento similar, por esto se asume que la frecuencia óptima de esta antena es también mayor a los 500 MHz. Sin embargo para la helicoidal encontró y midió un mínimo local de Γ en los $431,8 \pm 0,3$ Hz.

Las tablas 1, 3, 2, y 4 presentan los valores del coeficiente de reflexión y de impedancia de entrada de las antenas medidas.

f [MHz]	Γ [dB]	Z_{in} [Ω]
432,5	$-9,7 \pm 0,3$	$26,5 \pm 0,5 + j(5,5 \pm 0,5)$
365,3	-29 ± 1	$46 \pm 1 + j(0 \pm 1)$

Cuadro 1: Γ y Z_{in} de la antena $\frac{\lambda}{2}$ en la frecuencia de operación y en su frecuencia óptima.

f [MHz]	Γ [dB]	Z_{in} [Ω]
432,5	$-9,2 \pm 0,1$	$85,5 \pm 0,5 + j(32,7 \pm 0,5)$
431,8	$-11,5 \pm 0,1$	$32,7 \pm 0,1 + j(14,1 \pm 0,2)$

Cuadro 2: Γ y Z_{in} de la antena helicoidal en la frecuencia de operación y en el mínimo local encontrado.

f [MHz]	Γ [dB]	Z_{in} [Ω]
432,5	-5 ± 1	$85 \pm 1 + j(80 \pm 1)$

Cuadro 3: Γ y Z_{in} medidos de la antena semihelicoidal en la frecuencia de operación.

f [MHz]	Γ [dB]	Z_{in} [Ω]
432,5	$-9,7 \pm 0,3$	$17,7 \pm 0,3 + j(2,7 \pm 0,1)$
462,4	$-14,0 \pm 0,2$	$35,5 \pm 0,1 + j(9,2 \pm 0,1)$

Cuadro 4: Γ y Z_{in} de la antena yagi-uda en la frecuencia de operación y en su frecuencia óptima.

Discusión

El entorno en el cual se realizaron las mediciones afectó los resultados. Había presentes columnas metálicas en la zona las cuales se concluyen responsables del aspecto ruidoso de los diagramas de emisión obtenidos.

En particular, eran las medidas en el plano H las que presentaban muchísimo ruido. Estos datos fueron medidos con las antenas en posición vertical, paralelas a las columnas. Se concluye que las columnas metálicas entraban en resonancia con la señal generada. Las gráficas realizadas en el plano E con las antenas perpendiculares a las columnas no se veían afectadas.

El entorno ideal para realizar este experimento es una cámara anecoica para evitar estos efectos, pero en su ausencia, realizar las mediciones en un ambiente abierto y despejado ayudaría a obtener mediciones más regulares por la ausencia de elementos resonantes.

Se tomó la decisión de desarrollar un algoritmo que genere el diagrama de emisión y en función de eso calcule la ganancia máxima y mínima del canal a partir de los valores normalizados. Esto es una cuenta innecesaria que duplica el error experimental. Una mínima modificación al algoritmo retornaría mediciones de la ganancia del canal más precisas.

Conclusiones

Las antenas que mayores ganancias presentaron en el canal fueron el dipolo $\frac{\lambda}{2}$ y la yagi-uda. Pero considerando los resultados de las mediciones realizadas con el analizador de espectro, esto no es suficiente para decir que esas antenas son "mejores" que la helicoidal y semihelicoidal en ese aspecto. La antena helicoidal y semihelicoidal estaban trabajando muy lejos de su frecuencia óptima, lo que provocaba una impedancia desadaptada y un coeficiente de reflexión muy alto.

Lo que si se puede asegurar es que las antenas dipolo y yagi-uda tienen un diagrama de emisión mucho más directivo mientras que la helicoidal y la semihelicoidal son más próximas al isotrópico.

Nótese como en las figuras 4 y 5 la ganancia normalizada alcanzaba mínimos de -20, mientras que en las figuras 9 y 8 estas alcanzaban mínimos de apenas -5. De ser graficadas sobre los mismos ejes los diagramas de la antena helicoidal tendrían una apariencia casi circular, como se ve en las figuras 12 y 13.

Comparación Dipolo y Helicoidal - Plano H

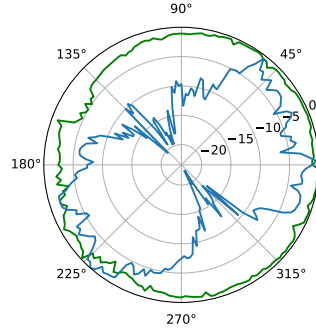


Figura 12: Comparación de planos H de dipolo $\frac{\lambda}{2}$ y helicoidal en misma escala.

Comparación Dipolo y Helicoidal - Plano E

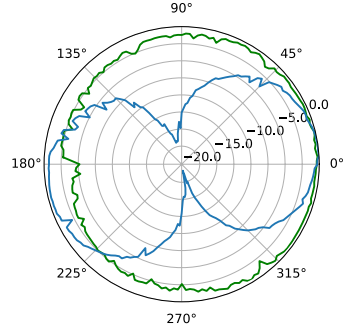


Figura 13: Comparación de planos E de dipolo $\frac{\lambda}{2}$ y helicoidal en misma escala.

La característica similar a la isotrópica de la antena helicoidal, en particular, hacen que su plano E y su plano H se vean muy similares, esta antena no se vio apreciablemente afectada por las pérdidas por polarización en el experimento. Esta isotropía y su tamaño pequeño relativo a las demás hacen concluir que sería una buena receptora portátil.

La antena semihelicoidal, como es de esperarse por su forma, parece tener un comportamiento intermedio entre la helicoidal y el dipolo.

Usando el analizador de espectros, se validó que el coeficiente de reflexión depende de que tan bien adaptada está la antena a la impedancia de la línea. Nótese que los coeficientes de reflexión bajos en las tablas 1, 2, y 4 corresponden a valores de Z_{in} más próximos a los 50Ω . En particular, en la tabla 1, el dipolo $\frac{\lambda}{2}$ presenta una impedancia de entrada de $Z_{in} = 46 \pm 1 + j(0 \pm 1) \Omega$ y un coeficiente de reflexión extremadamente bajo.

En base a lo medido, ante un requisito de establecer un enlace de comunicación con las antenas presentadas que requiera transmitir próximo a los 430 MHz, la mejor antena es el dipolo $\frac{\lambda}{2}$ por su directividad y su impedancia adaptada a la de un cable coaxial estándar. Si se cuenta con un adaptador de impedancias como lo sería un stub, la yagi-uda seguramente presentaría una mejor ganancia en el canal ya que mostró ganancias similares al dipolo a pesar de tener una impedancia de entrada más desadaptada.

Referencias

- [1] D. K. Cheng, *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. Addison Wesley Longman, 1999.

Apéndices

Apéndice 1 - Condición de Campo Lejano

En las aplicaciones de Ondas de radio, el objetivo suele ser captar una onda electromagnética cuando se encuentra lejos de la fuente de radiación, como es el caso de una antena transmisora. En estas condiciones se define la *condición de campo lejano* de la antena, que depende de la longitud de onda de la señal portadora.

En el experimento se emplea una frecuencia de 432,5 MHz lo que corresponde una longitud de onda $\lambda \simeq 0,7m$ tomando velocidad de la onda la velocidad de la luz.

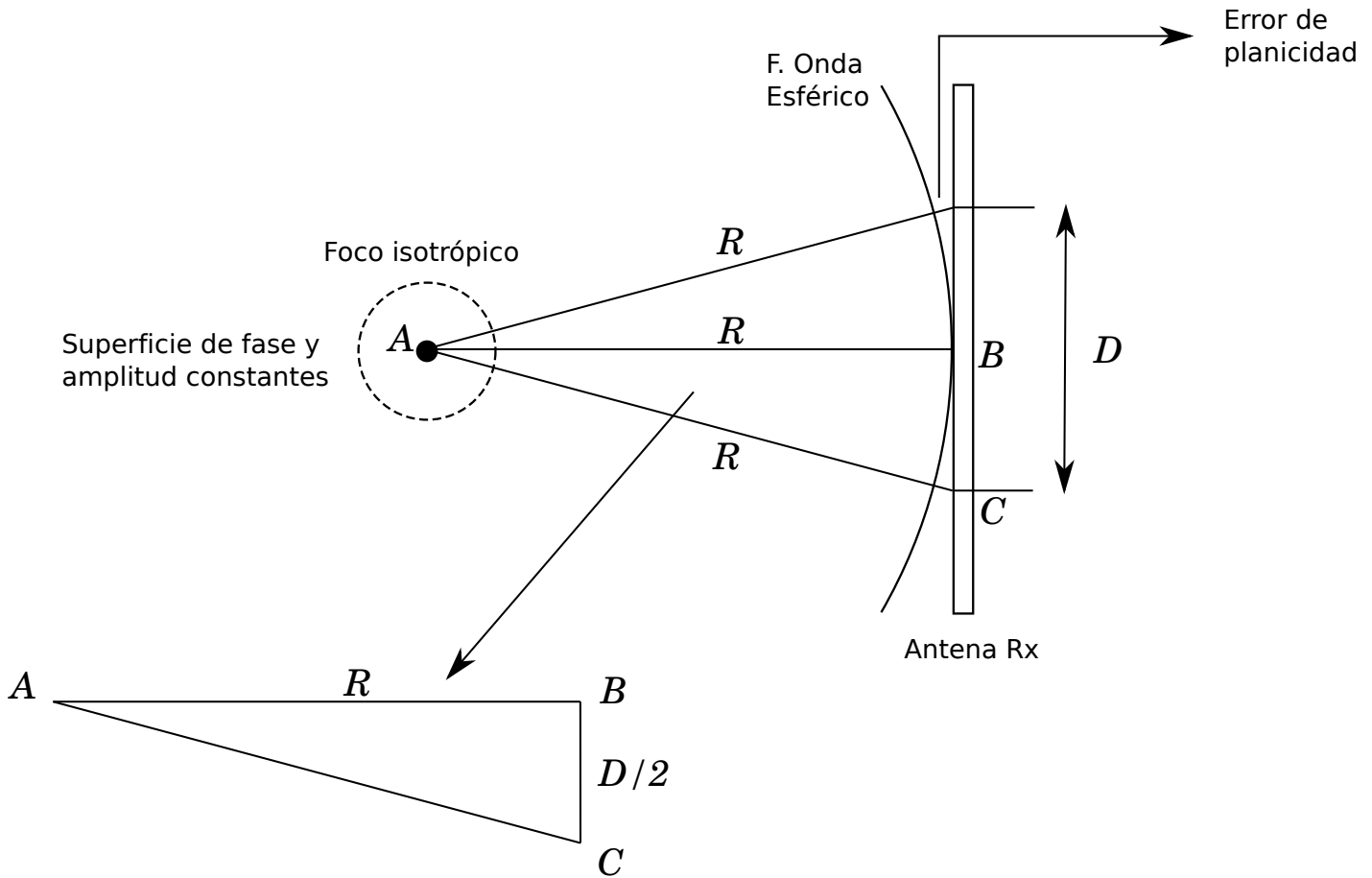


Figura 14

Considere la situación que se observa en la Figura 14. Donde la onda electromagnética esférica se propaga desde una fuente y a medida que avanza, para radios mayores, la esfera se va aproximando cada vez mas a un plano.

Cuando la diferencia entre el plano y la esfera es de $\lambda/16$ o $\pi/8$ radianes, que será el error en el camino de los rayos indicados en la Figura, que habitualmente se acepta, se puede plantear el teorema de Pitágoras en el triángulo ABC y realizando una secuencia de pasos matemáticos se llega a la relación

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

Apéndice 2 - Planos Característicos de Antenas Utilizadas

A continuación se presentan figuras de las antenas utilizadas en el experimento y las formas en que fueron definidos sus planos característicos E y H , así como el ángulo azimutal ϕ y el ángulo polar θ .

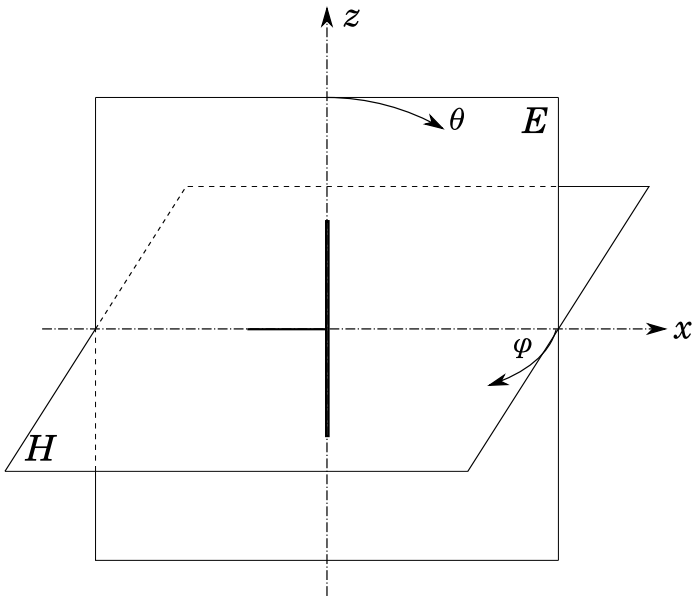


Figura 15: Planos característicos de la antena Dipolo $\frac{\lambda}{2}$

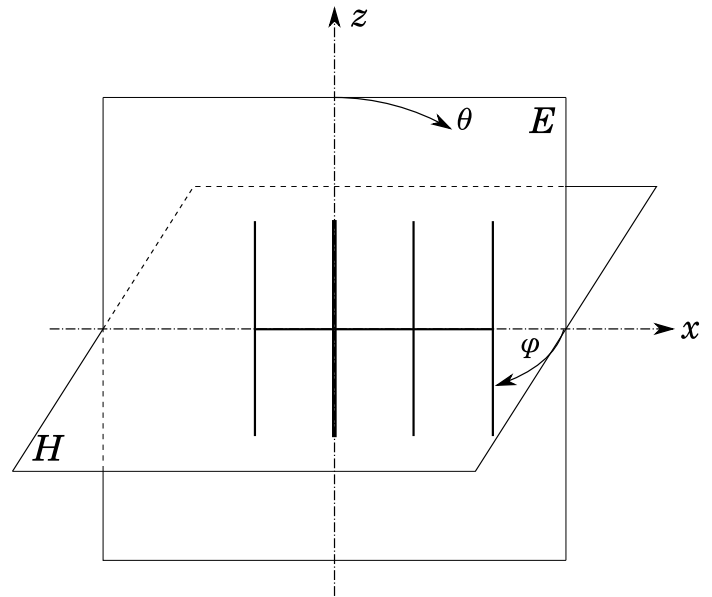


Figura 17: Planos característicos de la antena Yagi-Uda

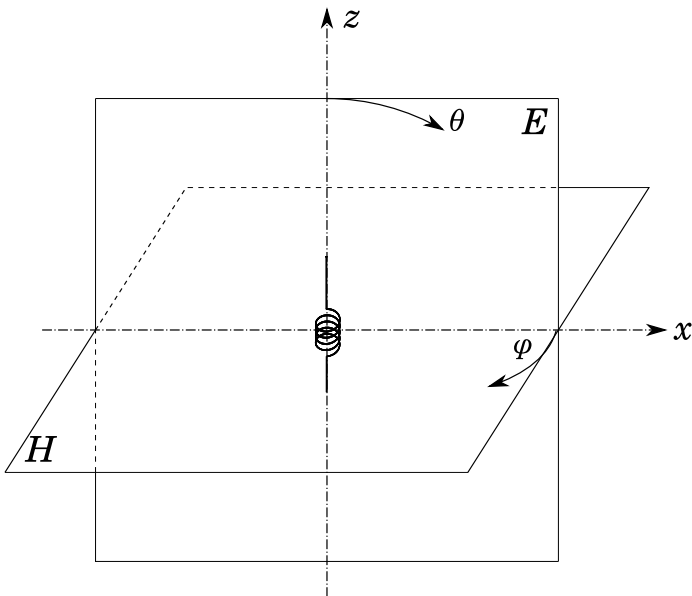


Figura 16: Planos característicos de la antena Semihelicoidal

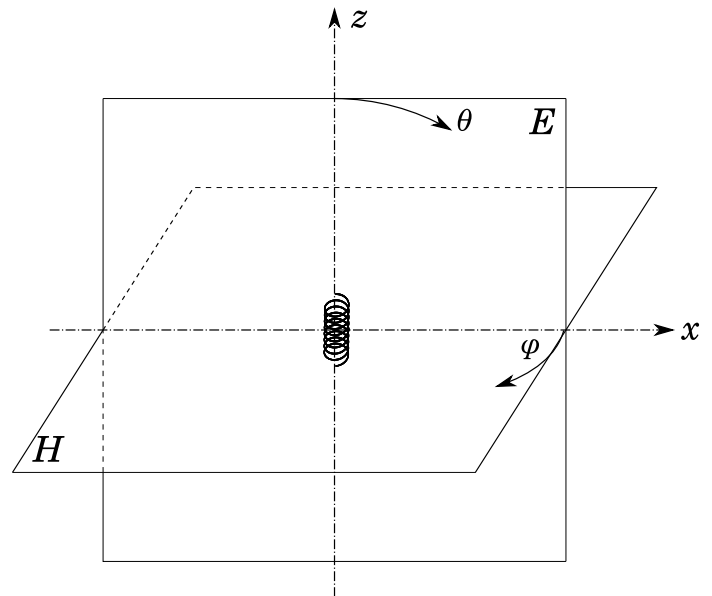


Figura 18: Planos característicos de la antena Helicoidal

Apéndice 3 - Algoritmos de Adquisición y Procesamiento

La adquisición de datos se realiza utilizando Python en el entorno Spyder, utilizando comunicación en serie para adquirir los datos desde el analizador de espectro Rigol DSA 815 y para comandar el motor paso a paso con un Arduino Uno como interfaz.

El funcionamiento del algoritmo de adquisición y procesamiento de datos se presenta a continuación.

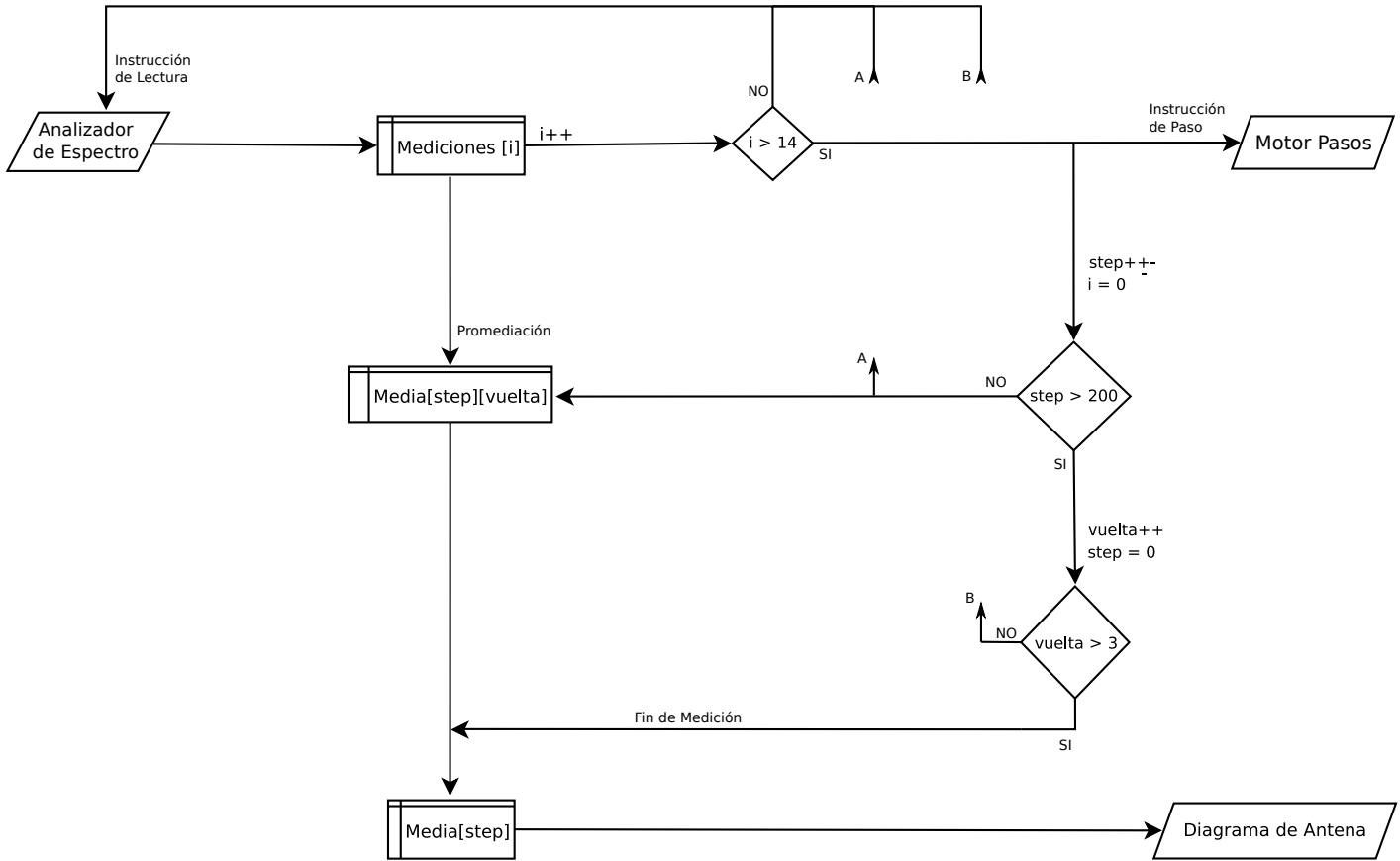


Figura 19: Diagrama de flujo del proceso de adquisición y procesamiento de datos. Mediciones es un arreglo de 14 elementos registrando las mediciones de una serie actual. Media es un arreglo de 200x3 elementos registrando pares media-desvío por posición angular por vuelta. Al terminar las tres vueltas Media colapsa en un arreglo de 200 elementos registrando la media y desvío de la potencia de señal por posición angular.

Debido a la gran cantidad de ruido presente en las gráficas $P(\phi)$, antes de calcular la ganancia máxima y mínima estas se procesan en Matlab con un filtro pasa bajos de media móvil caracterizado por la respuesta al impulso $h[\phi] = u[\phi + 1] - u[\phi - 1]$ de acuerdo a la ecuación 4.

$$\begin{aligned} A_{Max} &= \text{máx} \{A[\phi] * h[\phi]\} \\ A_{Min} &= \text{mín} \{A[\phi] * h[\phi]\} \end{aligned} \quad (4)$$

Esto evita que el máximo y mínimo registrados sean producto de ruido aumentando o disminuyendo el valor de la señal respecto su valor real.