

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Sistema para la Implementación de Prácticas de Laboratorio de Antenas

Autor: Carlos José Iraola Reyes

Tutor: MSc. David Beltrán Casanova

Santa Clara

2011

"Año 53 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Sistema para la Implementación de Prácticas de Laboratorio de Antenas

Autor: Carlos José Iraola Reyes

e-mail: ciraola@uclv.edu.cu

Tutor: MSc. David Beltrán Casanova

Prof. Dpto. de Electrónica y Telecomunicaciones.

Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV.

e-mail: dbeltranc@uclv.edu.cu

Santa Clara

2011

"Año 53 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

La inspiración existe, pero tiene que encontrarte trabajando

Pablo Ruiz Picasso

DEDICATORIA

A mis padres, en especial a papá que no podrá estar presente el día de mi graduación.

Por ser mis eternos guías.

A mi abuela Amada y a mi hermana Teresa.

Por su amor y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer de todo corazón a:

- Mi familia, por su apoyo incondicional.
- Todos y cada uno de mis excelentes profesores, por formarme.
- Mi excelente tutor David, por su gran ayuda y ejemplo.
- José Omar, por su oportuna colaboración.
- Mi amigos Ariel y Migdalia, ellos saben por qué.
- Mis más cercanos compañeros de estudios, que mencionaré en orden alfabético: Jorge Luis, Luis Raúl, Rolando y Yimy, y a otros más, con quienes he compartido mucho durante los cinco años de carrera.
- Abel, por su apoyo y atenciones en todo momento.
- Los miembros de la Federación de Radioaficionados de Cuba.
- La Revolución, por haberme permitido llegar hasta aquí.

Deseo agradecer además, a todas aquellas personas que de una forma u otra me brindaron su apoyo para que este trabajo llegara a feliz término, así como durante los cinco años de carrera.

A todos, Muchas Gracias.

TAREA TÉCNICA

- Realización del estudio del estado del arte acerca de los instrumentos y sistemas para la determinación automática del patrón de radiación de antenas.
- Evaluación del estado técnico de los equipos que componen el Sistema Automático de Medición de patrón de Radiación de Antenas de que se dispone para incidir sobre ellos con el objetivo de repararlos y/o ponerlos a punto.
- Selección y construcción de antenas que sean ilustrativas para su estudio mediante el referido sistema y que formarán parte del conjunto de prácticas de laboratorio que, como apéndice, será propuesto.
- Evaluación de las antenas seleccionadas con las herramientas de simulación de que se disponen con el objetivo de adquirir criterio sobre los resultados a obtener en las mediciones de patrón de radiación.
- Obtención de resultados prácticos del patrón de radiación de las antenas seleccionadas mediante la aplicación de un Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas (SAMPRA) en condiciones de campo.
- Comparación de los resultados prácticos alcanzados con las simulaciones y su correspondencia teórica.
- Evaluación de las deficiencias y limitaciones que presenta el escenario empleado.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

El presente trabajo presenta la puesta a punto y utilización de un Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas (SAMPRA) en el desarrollo de prácticas reales de la asignatura de Antenas en condiciones de campo, tomando como generador de radio frecuencias (RF) la torre de radiodifusión de TV situada en la loma Dos Hermanas, en el municipio de Santa Clara, y ubicando el sistema de recepción y medición en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV, un escenario alejado del entorno ideal en el que están presentes condiciones de ambientes electromagnéticos descontrolados. Se realiza un estudio del estado del arte sobre los sistemas de medición de patrón de radiación de antenas y se evalúan los requerimientos para las mediciones. Se describe el sistema que se aplica y se conforma un manual de prácticas de laboratorio.

ÍNDICE

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	3
CAPÍTULO 1. MEDICIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE ANTENAS	5
1.1 Las antenas y su patrón de radiación.....	5
1.2 Regiones del campo de radiación.....	8
1.3 Procedimiento para la medición del patrón de radiación de antenas	10
1.4 Estado actual de los sistemas de medición de patrón de radiación de antenas	11
1.4.1 Sistemas para condiciones normales de laboratorio	11
1.4.2 Sistemas que recrean condiciones ideales: las cámaras anecoicas	16
CAPÍTULO 2. ESCENARIO DE MEDICIÓN Y EQUIPAMIENTO	17
2.1 El escenario de medición	17
2.2 Requerimientos para realizar las mediciones	18
2.2.1 Requerimiento de distancia.....	18

2.2.2	Requerimiento de campo uniforme.....	21
2.2.3	Recomendaciones para realizar las mediciones.....	22
2.3	El sistema transmisor y el medio de transmisión.....	22
2.4	<i>Hardware</i> del sistema local.....	23
2.4.1	Bloque de posicionameinto.....	23
2.4.2	Bloque de recepción de la señal de antena	26
2.4.3	Bloque de acondicionamiento de la señal de antena.....	27
2.5	Requerimientos para ejecutar el <i>software</i> en el sistema local.....	29
2.6	Descripción del <i>software</i> que se ejecuta en el sistema local.....	30
2.6.1	El panel frontal.....	31
2.6.2	El diagrama de bloques.....	33
2.7	Mejoras que se le introducen al sistema local.....	33
CAPÍTULO 3. MONTAJE DE LAS PRÁCTICAS. RESULTADOS ALCANZADOS		34
3.1	Selección y diseño de las antenas.....	34
3.1.1	El diseño de los dipolos	35
3.1.2	El diseño de los dipolos acoplados	36
3.1.3	El diseño de la Yagi	37
3.2	Confección de las guías para las prácticas	38
3.3	Resultados de las simulaciones	38
3.3.1	Simulaciones de la práctica # 1.....	39
3.3.2	Simulaciones de la práctica # 2.....	41
3.3.3	Simulaciones de la práctica # 3.....	43
3.4	Resultados prácticos obtenidos con el SAMPRA	44
3.4.1	Resultados de la práctica # 1.....	44

3.4.2	Resultados de la práctica # 2.....	45
3.4.3	Resultados de la práctica # 3.....	46
3.5	Comparación de los resultados obtenidos en el SAMPRA con los que se obtienen en simulación y su correspondencia teórica	47
3.6	Limitaciones que impone la utilización del SAMPRA y el escenario de medición en que se aplica	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		49
Conclusiones		49
Recomendaciones		50
BIBLIOGRAFÍA		51
ANEXOS		55
Anexo # 1. Esquema eléctrico de la tarjeta de adquisición y del controlador del mecanismo rotor		56
Anexo # 2. Fuentes de alimentación de la tarjeta de adquisición y del controlador del mecanismo rotor		57
Anexo # 3. Distancia entre la torre de TV en loma Dos Hermanas y la FIE.....		58
Anexo # 4. Diagrama de flujo para la realización del <i>software</i>		59
Anexo # 5. Panel frontal del <i>software</i> que se utiliza		60
Anexo # 6. Diagrama de bloques del <i>software</i> que se utiliza		61

INTRODUCCIÓN

“La única alternativa de un país para preservar su soberanía e identidad en el mundo contemporáneo es aplicar el precepto martiano de “Ser cultos para ser libres”. Y ser cultos en los albores del tercer milenio significa incorporar, incluso a la percepción cultural general, los fundamentos esenciales de la ciencia. En este sentido, resulta imposible vivir en un mundo en el que la ciencia está presente por todas partes y no estar preparados para ello; sería como estar constantemente asombrado con lo cotidiano, sin darnos cuenta de la influencia que la propia ciencia y las nuevas tecnologías han tenido hasta en el desarrollo de nuestro lenguaje, y, en las últimas décadas, sobre el modo y los medios para trabajar, invadiendo también nuestro mundo laboral” [6].

Los continuos avances tecnológicos y la investigación aplicada al campo de la electrónica han posibilitado que en los últimos cincuenta años la ciencia de la computación haya sufrido un desarrollo exponencial. Las posibilidades de las máquinas computadoras actuales se incrementan continuamente a ritmo acelerado y los costos de las mismas ya no son tan elevados, lo que posibilita que estos equipos formen parte de la vida cotidiana. Este desarrollo continuado y en espiral ha posibilitado la aparición de sistemas de medición automáticos asistidos por computadora e instrumentos virtuales cada vez más profesionales que se destacan por su desempeño en cuanto a versatilidad y precisión, y que aplicados en diferentes ramas de la ingeniería han demostrado ser valiosas herramientas de trabajo.

Todo este desarrollo posibilita la existencia de múltiples herramientas computacionales para la simulación de antenas y de variedad de diseños de equipos profesionales para la obtención automática del patrón de radiación de antenas. La mayoría de los programas simuladores que existen actualmente son *freeware* o *shareware*, pero los equipos son difíciles de adquirir para un país subdesarrollado dado su elevado costo, razón por la que la

Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE) de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas no cuenta con estos instrumentos.

Pero la Facultad de Ingeniería Eléctrica no está ajena a todos estos avances científico-tecnológicos y realiza proyectos de esta naturaleza como alternativa a las carencias que experimenta el país y como motivación para estudiantes y profesores, donde se vinculan varias disciplinas de estudio y en ocasiones se reúnen varias ramas de la ingeniería. Por ejemplo: en el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la FIE se ha desarrollado un Instrumento Virtual que, mediante el control de dos dispositivos de *hardware*, permite obtener de forma automática el patrón de radiación cualitativo de una antena, proyecto que no ha tenido continuación por problemas técnicos en el generador de RF que lo dejaron inoperativo; a pesar de que se cuenta con el resto de los instrumentos necesarios: PC donde se ejecuta el Instrumento Virtual, Dispositivo de Posicionamiento, y Milivoltímetro de RF con Tarjeta de Adquisición de Datos incorporada. Pero, además, se cuenta en los laboratorios con máquinas computadoras con prestaciones suficientes para desarrollar las simulaciones de antenas, así como las herramientas computacionales necesarias para tales fines.

Dado que existe el problema relacionado con el estado técnico del generador de RF, una alternativa para superarlo es aplicar el sistema de medición de patrón en condiciones de campo, o sea, utilizar la planta transmisora de TV de la ciudad de Santa Clara como fuente generadora de RF.

Toda esta situación y las alternativas que se proponen, unidas a la necesidad que existe de sistematizar y ampliar la relación de prácticas de antenas con que se cuenta en la facultad así como de incorporar las mediciones y los resultados prácticos al desarrollo de las mismas, forman el aliciente apropiado para resolver el siguiente problema: ¿Cómo contribuir al mejoramiento de la enseñanza de la asignatura de Antenas con los medios técnicos con que cuenta actualmente el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la FIE?

En disposición de resolver el problema enunciado anteriormente, se procede a plantear los objetivos para cumplimentar su solución, así como la estructura de la presente investigación:

Objetivo general:

Implementar un sistema de prácticas de laboratorio que tributen a la asignatura de Antenas, así como a la calidad del graduado en Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, mediante simulaciones y prácticas reales en condiciones de campo que se complementen entre sí.

Objetivos específicos:

- Analizar los fundamentos necesarios para la medición del patrón de radiación de antenas.
- Caracterizar el estado del arte de los Sistemas Automáticos de Medición de Patrón de Radiación de Antenas.
- Describir el Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas (SAMPRA) que se utiliza y realizar las modificaciones que resulten pertinentes tanto en el *hardware* como en el *software*.
- Analizar los requisitos que exigen los escenarios de medición.
- Montar prácticas de laboratorio para la asignatura de Antenas.
- Diseñar y construir las antenas que se utilizarán en las prácticas.
- Comparar los resultados prácticos alcanzados con las simulaciones y su correspondencia teórica.
- Evaluar las limitaciones del sistema y del escenario de medición que se emplean.

Organización del informe

El informe está conformado por tres capítulos:

CAPITULO I: “Medición del Patrón de Radiación de Antenas”. Se realiza un breve estudio sobre el patrón de radiación de antenas y la obtención experimental del mismo. Se realiza, además, un estudio del estado del arte sobre los equipos necesarios para realizar mediciones del patrón de radiación de antenas, así como referencias a las principales características de los medios que se emplean para estos fines en el mundo actual.

CAPITULO II: “Escenario de Medición y Equipamiento”. Se realiza el estudio y descripción del escenario de medición y del equipamiento que se utiliza. Se analizan, de acuerdo al escenario en que se realizan las mediciones, los requerimientos necesarios para

realizar correctamente las mismas. Además, se abordan los procedimientos necesarios para poner a punto el SAMPRA, así como las mejoras que se le introducen para su mayor y mejor utilización.

CAPITULO III: “Montaje de las Prácticas. Resultados Alcanzados”. Se expresan los resultados obtenidos luego de la puesta en marcha del sistema de medición para el desarrollo de las prácticas. También se realiza una comparación de los ejemplos teóricos con los resultados prácticos obtenidos para así valorar la efectividad de los métodos y medios empleados, y de la solución técnica que se propuso en cuanto al generador de RF. Se lleva a cabo el análisis de los resultados que arrojan algunas configuraciones de antenas, así como de las limitaciones que presentan el escenario y los instrumentos de medición que se emplean. Se deja constancia escrita de los resultados de las simulaciones y de los experimentos realizados en las mediciones del patrón de radiación de antenas.

La investigación además está conformada por: Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos.

Impacto de la presente investigación:

El mayor impacto de la presente investigación es educativo. La aplicación de este sistema de prácticas contribuye a elevar la calidad del graduado en Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, al incentivar en el mismo interés por la experimentación práctica en el marco de la asignatura de Antenas. Se contribuye así a que esta asignatura, que tradicionalmente ha sido valorada como abstracta, se transforme en atractiva e interesante.

Los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica podrán comparar los resultados de simulación y los conocimientos teóricos que reciben en la asignatura de Antenas con los resultados que se obtienen en las prácticas reales. Además, el sistema de prácticas soporta su enriquecimiento con el estudio, simulación y análisis práctico de otros tipos de antenas.

CAPÍTULO 1. MEDICIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE ANTENAS

Las últimas décadas han sido testigo de la implementación de numerosos métodos analíticos para sintetizar y calcular numéricamente las características de radiación de las antenas, aunque existen casos en los que las antenas no pueden estudiarse analíticamente debido a su compleja configuración o excitación. Por otro lado en la actualidad se emplean con mayor ahínco los métodos y las experiencias prácticas con fines didácticos con el objetivo de demostrar a los educandos la existencia de fenómenos así como para corroborar teorías y postulados. Se recurre entonces a los resultados experimentales para validar los resultados teóricos de investigaciones, lográndose, en el marco de la práctica, resultados cuya solución analítica queda en el campo de lo abstracto y representa un arduo trabajo, incluso con la utilización de los medios con que se cuenta hoy en día. Por todo esto, el presente capítulo se dedica al estudio de los fundamentos y medios que se emplean para una correcta medición del patrón de radiación de antenas.

1.1 Las antenas y su patrón de radiación

El estándar *IEEE “Definitions of Terms for Antennas”* [19] especifica que una antena es “un medio para radiar o recibir ondas de radio”. Esto conlleva a que una antena sea una estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo de guía [7], [30], por lo que hace posible la transformación de ondas electromagnéticas libres en ondas acopladas [36], motivos por los cuales se dice que desempeña el papel de un transductor.

Para describir el comportamiento de una antena se han de estudiar sus parámetros, muchos de los cuales están interrelacionados, y aunque no todos son necesarios para hacer una descripción completa del desempeño de la misma, existen algunos que sí son

imprescindibles, como el patrón de radiación, del cual se derivan otros parámetros muy importantes, como son: ancho del lóbulo entre puntos de mitad de potencia (HPBW), ancho del lóbulo entre primeros nulos (FNBW), y la ganancia.

El patrón de radiación de una antena se define como la representación gráfica de una función matemática que caracteriza las propiedades de radiación del referido transductor en función de coordenadas espaciales.

El patrón de radiación normalmente se mide sobre una superficie de radio constante, en la que cada posición o punto se identifica mediante el uso del sistema de coordenadas esférico, y como el radio permanece constante, se necesitan sólo dos de las coordenadas polares (θ , ϕ) para el posicionamiento del citado punto.

Para especificar completamente el patrón de radiación con relación a la intensidad del campo y polarización se requieren tres patrones.

- a) La componente θ del campo eléctrico en función de los ángulos θ y ϕ , o sea $E_\theta(\theta, \phi)$ [V/m].
- b) La componente ϕ del campo eléctrico en función de los ángulos θ y ϕ , o sea $E_\phi(\theta, \phi)$ [V/m].
- c) Las fases de estos campos en función de θ y ϕ , es decir $\delta_\theta(\theta, \phi)$ y $\delta_\phi(\theta, \phi)$ [rad].

Las representaciones más importantes son las correspondientes a los apartados a y b; cualquiera de estos campos puede representarse en coordenadas esféricas tridimensionales [24].

En general el patrón de radiación de una antena es tridimensional, pero resulta impráctico medir un patrón tridimensional; normalmente se obtienen dos patrones bidimensionales que se utilizan para construir entonces el patrón tridimensional. El número de patrones bidimensionales que se necesitan para construir fielmente el gráfico tridimensional depende de los requerimientos funcionales, del tiempo de que se dispone, así como de los fondos o recursos con que se cuentan; aunque el número mínimo de patrones bidimensionales que se requieren para construir el citado gráfico es dos, y usualmente se escogen de modo que sea posible representar los planos de radiación E y H que son ortogonales entre sí.

Un patrón bidimensional normalmente se conoce como un corte del gráfico tridimensional, y se logra fijando uno de los ángulos (θ ó φ) mientras se hace variar el otro. Los patrones que se alcanzan fijando φ y haciendo variar θ ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) se denominan patrones de elevación. De forma similar, con θ constante y haciendo variar φ ($0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$) se obtienen los patrones azimutales. En la práctica, el patrón tridimensional se mide y se registra en una serie de patrones bidimensionales. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones prácticas una pequeña cantidad de patrones bidimensionales es lo que se necesita.

El patrón de radiación se compone de diferentes lóbulos clasificados como: lóbulo principal o mayor, lóbulos laterales y lóbulos traseros. Un lóbulo de radiación es una porción del patrón de radiación limitada por regiones de intensidad de radiación relativamente débiles.

Las propiedades de radiación de una antena incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación y polarización. La propiedad de radiación es la distribución espacial en dos o tres dimensiones de la energía radiada en función de la posición de un observador sobre una superficie de radio constante, o sea, sobre una esfera. El trazo de la potencia recibida sobre un radio constante se denomina patrón de potencia. Y por otro lado, el gráfico de la variación espacial del campo eléctrico (o magnético) sobre un radio constante se denomina patrón de intensidad de campo o de amplitud. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región de campo lejano y se representa mayormente en coordenadas polares porque es el sistema de coordenadas que más ilustra la concentración espacial de la energía por la antena.

Existen muchas maneras de representar el patrón de radiación de una antena. Por ejemplo, puede ser trazado en forma polar o rectangular. Además, la escala podría ser lineal o logarítmica. En la práctica se utilizan todas las combinaciones posibles de trazo y escala: polar-lineal, polar-logarítmica, rectangular-lineal y rectangular-logarítmica. Generalmente, los trazos logarítmicos se utilizan para alta ganancia y lóbulos laterales pequeños y los diagramas lineales se utilizan cuando la estructura del lóbulo principal es de interés primario. [54]

Las antenas, de acuerdo con la orientación de los máximos absolutos de su patrón de radiación, se clasifican en: *broadside* o *endfire*. Una antena *broadside* es aquella en la cual el máximo del lóbulo principal está en dirección normal al plano que la contiene y una

endfire es aquella en la cual el máximo del lóbulo principal está en dirección paralela al plano que la contiene. Para una distribución lineal de corrientes en el eje z , la dirección *broadside* es $\theta=\pm 90^\circ$ y las direcciones *endfire* son $\theta=0^\circ$ y $\theta=180^\circ$. Por ejemplo, el dipolo ideal es una antena de tipo *broadside*, y la antena Yagi es un arreglo de tipo *endfire*.

1.2 Regiones del campo de radiación

El espacio que rodea a una antena usualmente se divide en tres regiones: campo cercano reactivo, campo cercano de radiación (zona de Fresnel) y la región de campo lejano (zona de Fraunhofer), tal como se muestran en la figura 1.1.

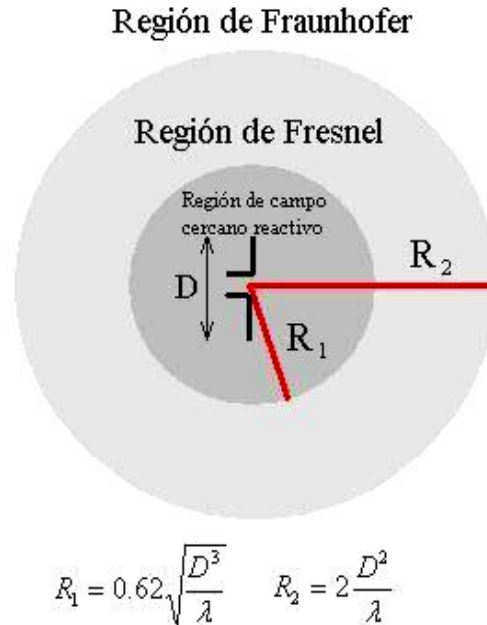


Figura 1.1. Regiones del campo radiado por una antena.

La clasificación de estas regiones está asociada a las distribuciones de los campos en cada una de ellas. Aunque no se notan cambios abruptos para las configuraciones de los campos al cruzar los límites de las zonas, existen diferencias entre estos. Cabe destacar que los límites que separan estas regiones no son únicos, por lo que se han establecido varios criterios que se usan habitualmente para identificar las regiones del campo radiado.

La región de campo cercano reactivo se define como “aquella porción de la región del campo cercano inmediato a la antena donde predomina el campo reactivo” [7], [30]. Para la mayoría de las antenas, la existencia del límite exterior de esta región se toma comúnmente

a la distancia $R < 0.62\sqrt{(D^3/\lambda)}$ de la superficie de la antena, donde λ es la longitud de onda y D es la dimensión mayor de la antena. Para un dipolo muy corto (infinitesimal), o radiador equivalente, la existencia del límite exterior se toma comúnmente a la distancia de $\lambda/(2\pi)$ de la superficie de la antena [7].

La región denominada como campo cercano de radiación (zona de Fresnel) se define como la región del campo que produce una antena entre la región de campo cercano reactivo y la región de campo lejano, predominando los campos de radiación donde la distribución angular de los campos es muy dependiente de la distancia a la antena [7], [30]. Si la antena tiene una dimensión máxima que no es grande comparada con la longitud de onda, es posible que esta región no exista. Para una antena enfocada en el infinito, la región de campo cercano de radiación a veces es referenciada como región o zona de Fresnel. Si la antena tiene una dimensión global máxima que es muy pequeña comparada con la longitud de onda, esta región del campo puede no existir. El límite interior se toma como la distancia $R \geq 0.62\sqrt{(D^3/\lambda)}$ y el límite exterior a la distancia $R < 2D^2/\lambda$ donde D es la mayor de las dimensiones de la antena. Este criterio se basa en el error de fase máximo ($\pi/8$) que se puede cometer [30]. En esta región el patrón de campo es, en general, una función de la distancia radial, y la componente radial del campo puede ser apreciable.

La región de campo lejano (zona de Fraunhofer) se define como la región del campo que radia la antena donde la distribución angular del campo es esencialmente independiente de la distancia a la antena. Si la antena tiene una máxima dimensión global D , la existencia de la región de campo lejano se toma comúnmente a partir de la distancia $R \geq 2D^2/\lambda$ de la antena.

Los patrones de campo lejano de ciertas antenas, como la reflector multihaz, son sensibles a variaciones de fase sobre sus aperturas. Para estas antenas $2D^2/\lambda$ puede resultar inadecuado. En un medio de comunicación físico, si la antena tiene una dimensión global máxima D , que es grande comparada con $\pi/|\gamma|$, la región de campo lejano puede tomarse como existente a partir de $|\gamma|D^2/\pi$ de la antena, con γ como la constante de propagación del medio físico donde se desempeña la antena [7].

Para una antena enfocada en el infinito, la región de campo lejano es a veces referenciada como zona de Fraunhofer [7], [30], en analogía básica a la terminología de la óptica. En

esta región, los componentes del campo son esencialmente transversales y la distribución angular es independiente de la distancia radial donde se realizan las mediciones. El límite interior se toma como la distancia $R=2D^2/\lambda$ y el infinito como el límite exterior [7], [30].

1.3 Procedimiento para la medición del patrón de radiación de antenas

La mayoría de los procedimientos de medición de antenas fueron desarrollados antes y durante la Segunda Guerra Mundial. Los métodos básicos para la medición de patrón de radiación de campo lejano, polarización, impedancia, ganancia y directividad fueron desarrollados durante el período anterior a dicha guerra, de conjunto con el diseño de novedosas estructuras radiantes para la época, que fueron necesitadas y utilizadas rápidamente en la tecnología de radar y telecomunicaciones que venía en expansión [37].

El procedimiento que más se utiliza para la obtención de los patrones de radiación bidimensionales de antenas consiste en la utilización de la antena bajo prueba (ABP) en régimen de recepción y la ubicación de la misma en un lugar en que pueda ser suficientemente “iluminada” por la antena transmisora. La antena transmisora se ubica en una posición fija y la ABP se hace rotar sobre el eje vertical mediante un vástago soporte y el mecanismo rotor o de posicionamiento que se implemente. La indicación de las mediciones debe ser mediante lecturas directas con un metro de intensidad de campo calibrado [30].

Con la aplicación de este método, tomar muchas muestras de campo para obtener un único patrón con una calidad aceptable provoca que el protocolo de medición sea un proceso lento y vulnerable a las interferencias que se pueden derivar de la interacción humana sobre las mediciones y hasta de los errores humanos. Por ejemplo, si una persona hace rotar el vástago que soporta la antena sobre una plataforma graduada [47] y realiza mediciones por cada paso de la plataforma, si se divide el círculo en pasos de 10° hay que realizar 36 mediciones y si se divide en pasos de 5° ; 3° ; 2° ó 1° habría que realizar 72; 120; 180 ó 360 mediciones, respectivamente. El procedimiento se facilita mucho mediante la utilización de un sistema que posibilite el control automático de la posición de la antena y el registro de las lecturas de intensidad de campo para cada posición en que se mide.

1.4 Estado actual de los sistemas de medición de patrón de radiación de antenas

Los desarrolladores de la teoría de medición de parámetros de antenas llegaron a comprender rápidamente que las mediciones de éstas requerían no solo el fondo teórico legítimo para desarrollar técnicas de medición eficientes, sino también equipamiento sofisticado (y muy costoso) capaz de proveer la exactitud necesaria y la pureza de los datos medidos. El equipo comercial especialmente diseñado para las mediciones de antenas fue introducido en la década de 1960, mucho después de que naciera la teoría que los demandaba, debido en parte a los requerimientos de la industria de defensa y del espacio, donde nace la necesidad de medir con métodos cada vez más precisos. Para satisfacer dichos requisitos se han desarrollado varias técnicas de medida e instrumentación mejorada que incluyen cámaras anecoicas, rangos compactos y de exploración [27], técnicas de medida en campo cercano [27], [10], métodos mejorados de polarización y medidas de barrido en frecuencia [17], y, medidas indirectas de antenas [37].

La infraestructura básica necesaria para realizar mediciones de antena incluye posicionadores de antena, trazadores de patrón, generadores de señal y antenas estándares o patrón. En la actualidad, con las máquinas computadoras insertadas en todas las ramas de la ingeniería, se implementan sistemas computarizados sofisticados para proveer control automático a las mediciones del patrón de radiación de antenas, así como cálculos más rápidos relacionados con la directividad de las mismas, conversión de patrón $2d$ - $3d$ y transformaciones campo lejano-campo cercano.

De forma general, hoy se distinguen dos grandes grupos de sistemas de medición de parámetros de antenas, que tienen muchas características comunes salvo cómo tratan las condiciones electromagnéticas del ambiente o escenario de medición. Estos pueden clasificarse como: sistemas para condiciones normales de laboratorio y sistemas que recrean condiciones ideales o de espacio libre: las cámaras anecoicas.

1.4.1 Sistemas para condiciones normales de laboratorio

Existen Sistemas Didácticos de Medición de Antenas (SDMA) para laboratorios de antenas que forman parte de los sistemas de capacitación en telecomunicaciones que ofertan al mercado varias empresas. Estos modelos completos cuentan con el equipamiento y el

material pedagógico necesario para que los educandos realicen el estudio experimental de los principios de base de varias configuraciones de antenas.

Estos sistemas permiten obtener de forma automática el patrón de radiación de antenas, y algunos incorporan también herramientas de simulación y diseño para realizar evaluaciones de lo que se debe esperar en las mediciones y para analizar configuraciones nuevas, componente que refuerza el valor didáctico del producto. Estos productos incluyen las alimentaciones, la instrumentación y los componentes de microondas, así como los accesorios indispensables para llevar a cabo las experiencias en este campo. Por eso puede decirse que son sistemas de notable complejidad dado que comprenden tanto el *hardware* como el *software* de control y visualización; además, implementan interfaces de comunicación y visualización cada vez más complejas e interactivas.

Algunos de estos sistemas han evolucionado y ya no se comunican vía puerto paralelo, sino que lo hacen por interfaz USB. De esta manera desarrollan un mayor nivel tecnológico y hacen que el equipo sea cada vez más portátil y de fácil manejo para el usuario, todo esto con la finalidad de ofrecer mayores prestaciones. En algunos casos estos sistemas, que constituyen interfaces para la medición de patrón de radiación de antenas, pueden estar vinculados a *hardware* agregado que aumenta las prestaciones de los mismos. Es preciso tener en cuenta, además, que estos sistemas están compuestos por instrumentos y piezas o partes que son caras dado que se utilizan en aplicaciones de tecnología sofisticada.

Existen múltiples ejemplos de equipos y sistemas de medición de parámetros de antenas que comercializan varias empresas, muchos de los cuales se han difundido y son aceptados mundialmente. Entre los que más longevos en el mercado están: el 8091 y el 8092, de la empresa Lab-Volt, y el 57-200-USB-0S, de AntennaLab. Entre los más novedosos se encuentran: de la firma Man&Tel Co., Ltd. radicada en Korea: el WATS-2002 y el MATS-1000, y de la firma Omega Electronics, radicada en India, los modelos AT-1003, AT-1004 y AT-1005; entre otros.

El WATS-2002 (figura 1.2) es un equipamiento diseñado para realizar experimentos con fines didácticos en las ramas de propagación de ondas electromagnéticas en las comunicaciones móviles y de características de antenas, como por ejemplo: patrón de

radiación, ondas estacionarias, desvanecimiento (por retardo de fase y atenuación) y pérdidas de propagación.

Este producto cuenta con los accesorios necesarios para realizar experimentos de la característica de radiación de antenas como: dipolo, Yagi, monopolo, *loop*, *F* invertida y chip cerámico. Opera en la gama de frecuencias de 914 MHz a 2.45 GHz. La frecuencia del transmisor, cuya potencia máxima es de +4.5 dBm, se controla mediante PLL. La torre receptora está montada sobre un motor paso a paso que se gobierna por un microcontrolador, lo que permite que la misma realice una vuelta completa en 400 pasos del motor, por lo que rota 0.9° en cada paso del motor [35].

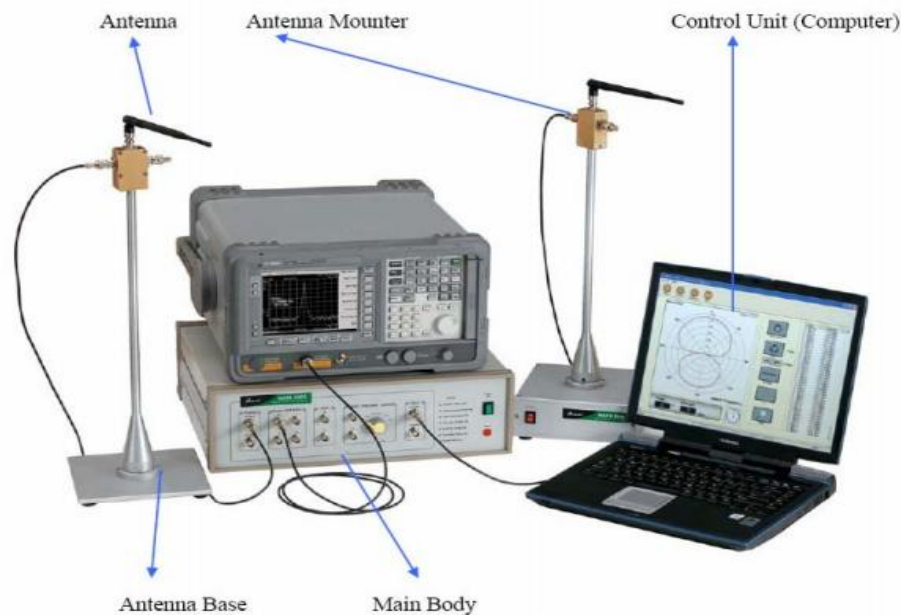


Figura 1.2. SDMA WATS-2002.

Por otro lado, el sistema AT-1005 (figura 1.3) ha sido diseñado para proveer las herramientas necesarias para la enseñanza y la experimentación con antenas que se usan comúnmente en las bandas de VHF-UHF y microondas. Normalmente se emplea en condiciones de laboratorio, para estudiantes de todos los niveles de enseñanza. Puede utilizarse en modo autónomo o en conexión con una computadora vía interfaz RS-232. La antena receptora se hace rotar 360° con ayuda de un motor paso a paso y se registran las lecturas de la intensidad de campo que la misma recibe. El sistema está conformado por dos trípodes, uno para montar la antena transmisora y la otra, con un motor paso a paso

incorporado, es giratoria y controla la orientación de la antena receptora. Este sistema cuenta además con 22 antenas para realizar las experiencias de medición del patrón de radiación, un transmisor y un receptor de RF, el controlador del motor paso a paso, accesorios y cables, así como el *software* encargado de procesar y mostrar los resultados al usuario [12].



Figura 1.3. SDMA AT-1005.

Por su parte, el AntennaLab 57-200-USB-0S (figura 1.4) también está concebido fundamentalmente para ser utilizado en ambientes de exteriores o de laboratorio, para empleos mayormente didácticos. Este sistema ofrece la posibilidad de analizar y experimentar con las configuraciones de antenas más conocidas así como de estudiar y sintetizar nuevos prototipos [2].

Dentro de las características principales de este sistema están: frecuencia de operación de 1200 a 1800 MHz, interfaz de comunicación con la PC vía USB, el *software* de control se ejecuta sobre *Windows*, y cuenta con dos torres de aproximadamente un metro de altura cada una. La primera es giratoria y se ubica sobre un motor paso a paso mediante el cual se controla la posición angular del apunte de un transmisor de baja potencia controlado por un sintetizador de frecuencias. Sobre la segunda, que es fija, se ubica el receptor, también controlado por un sintetizador de frecuencias.

El AntennaLab 57-200-USB-0S cuenta, dentro de sus agregados, con las siguientes antenas: monopolos, dipolos, log-periódicas, Yagis y arreglos de fase. Mediante el mismo se pueden medir los siguientes parámetros: patrón de radiación en forma polar, ganancia respecto al dipolo, relación *front to back* (F/B), ancho del lóbulo principal entre puntos de mitad de potencia (HPBW), respuesta de frecuencias y ancho de banda.



Figura 1.4. SDMA AntennaLab 57-200-USB-0S.

Este tipo de sistema de medición, al igual que sus similares, está sujeto a las condiciones del ambiente donde se desempeña, donde pueden estar presentes la interferencia electromagnética, el ruido, etc. Los resultados que se obtienen en las mediciones son una aproximación de lo que se debe esperar pero con ligeras distorsiones. Por ejemplo, con el AntennaLab 57-200-USB-0S, se logra para un dipolo de media lambda con orientación horizontal el siguiente patrón de radiación:

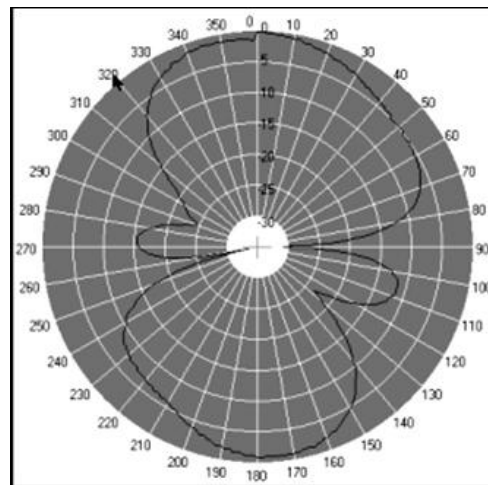


Figura 1.5. Patrón de radiación que se logra con el AntennaLab 57-200-USB-0S para un dipolo de media lambda con polarización horizontal.

1.4.2 Sistemas que recrean condiciones ideales: las cámaras anecoicas

Las cámaras anecoicas se han desarrollado como alternativa a los sistemas diseñados para pruebas en exteriores y su proliferación se debe a las mejoras constantes y a ritmo de mercado de las características eléctricas de los materiales que la componen. Estas son los sitios más populares para la medición de parámetros de antenas, especialmente en el rango de frecuencias de microondas. Las cámaras anecoicas proveen ambientes electromagnéticos convenientemente controlados. Sin embargo, tienen como desventaja su elevado precio.

Una cámara anecoica es típicamente una gran habitación, cuyas paredes, piso y techo están aislados electromagnéticamente lo que la convierte en una enorme jaula de Faraday que provee seguridad ideal contra el ruido y la interferencia electromagnética tanto interna como externa, así como funcionalidad bajo cualquier clima [7], [55]. Todas las superficies internas de la cámara están cubiertas de absorbentes de RF/micro-ondas en forma de pirámides o de cuñas, cuya geometría está en función de la aplicación para la que fue diseñada la cámara, lo que le permite exhibir un coeficiente de reflexión típico de -50 dB.

La clave del material anecoico es que absorba la energía electromagnética [44], [55]. El material anecoico mejor conocido es la espuma de poliuretano cargada de partículas de carbón. [44].

Los laboratorios Benefield son la mayor cámara anecoica del mundo, y está ubicada en el Desierto de Mojave, California, Estados Unidos. Sus paredes, el piso y el techo están cubiertos de alrededor de 816.000 conos de espuma. En ella se realizan pruebas con aviones de combate a escala natural, lo que aporta criterio de magnitud en cuanto a sus dimensiones: 76.2 m de ancho, 80.47 m de largo y 21.34 m de alto. Para estos fines la cámara está equipada con una plataforma de 24.38 m capaz de hacer girar 250000 libras en pasos de 0.1 a 0.6° [22].

CAPÍTULO 2. ESCENARIO DE MEDICIÓN Y EQUIPAMIENTO

Bajo la premisa de que se hace necesario suplir la no existencia de generadores de RF en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV para realizar prácticas de Antenas, y dado que se persigue que las mismas sean atractivas e interesantes, se toma la idea de utilizar un sistema de medición de patrón de radiación de antenas con la planta de radiodifusión de TV, que brinda cobertura a la ciudad de Santa Clara, como fuente generadora de radio frecuencia. Este es el motivo por el cual en este capítulo se analizan las condiciones y los requerimientos de medición en el nuevo escenario, así como las partes que componen el Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas, tanto en el *hardware* como en el *software*.

2.1 El escenario de medición

El escenario de medición en su totalidad está compuesto por:

1. Sistema transmisor.
2. Medio de transmisión.
3. Bloque de posicionamiento.
4. Bloque de recepción y acondicionamiento de señal.
5. Bloque de procesamiento, control y visualización de los datos.

Estos tres últimos conforman el sistema local, donde se incide en la presente investigación y se realizan las mediciones. Los bloques, agrupados funcionalmente, pueden observarse en la figura 2.1:

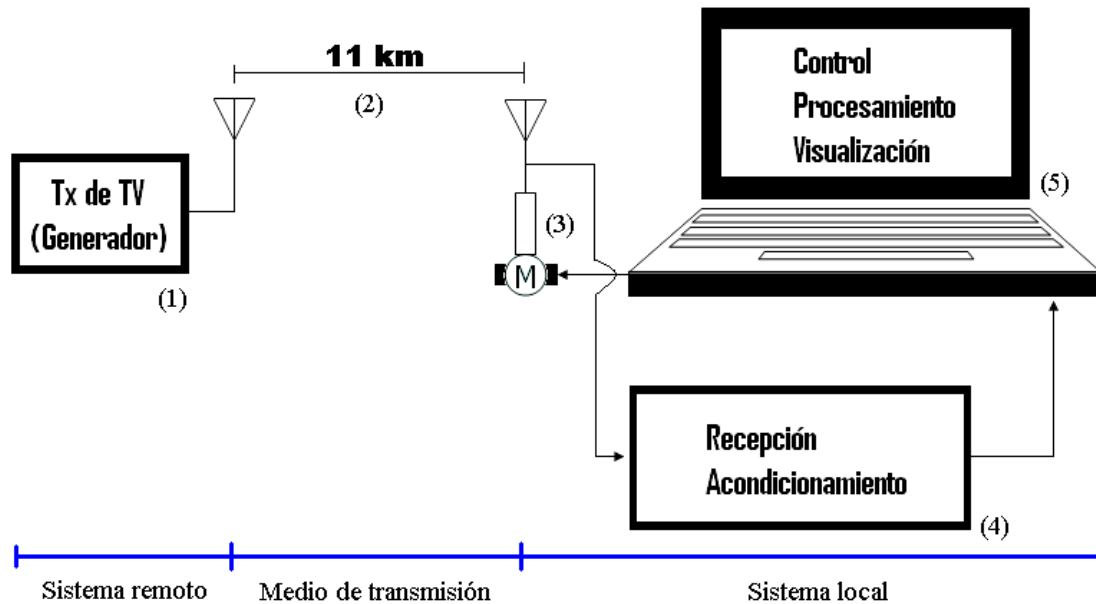


Figura 2.1. Representación del escenario de medición.

2.2 Requerimientos para realizar las mediciones

El análisis y el cálculo de las características de antenas normalmente se utilizan como el primer paso para evaluar los resultados a esperar en las mediciones experimentales de las mismas. Todo el esfuerzo y la complejidad matemática pueden verse convertidos en frutos cuando se obtiene el patrón de radiación o de campo lejano de una antena; pero para lograr resultados fidedignos, libres de distorsiones de cualquier naturaleza, es preciso cumplimentar determinados requerimientos:

2.2.1 Requerimiento de distancia

Para una correcta medición del patrón de radiación de campo lejano el primer requerimiento que se debe cumplir es que las mediciones se realicen a una distancia suficientemente alejada de la fuente (epígrafe 1.2).

Si la distancia a la que se trabaja resulta insuficiente, el campo cercano o de Fresnel es lo que se obtiene. En general, este patrón está en función de la distancia a la cual es medido, y en definitiva llega a transformarse en campo de zona lejana cuando la distancia aumenta suficientemente.

Si se supone que la antena a medir es un arreglo del tipo *broadside* consistente en un número de elementos lineales en fase y que el ancho de apertura física del arreglo es D y la distancia al centro del arreglo es R , como se muestra en la figura 2.2, se puede deducir lo siguiente: a distancia infinita, normal al centro del arreglo, los campos procedentes de todas las partes de la apertura llegarán con la misma fase. Sin embargo, a cualquier distancia finita R , el campo en el borde del arreglo debe viajar una distancia $R+\delta$ y, entonces, se retarda en fase en $(360^\circ/\lambda)*\delta$ con respecto al campo que llega al centro del arreglo. Si δ es una fracción suficientemente grande de λ , el patrón medido, se alejará apreciablemente del patrón de radiación de campo lejano verdadero.

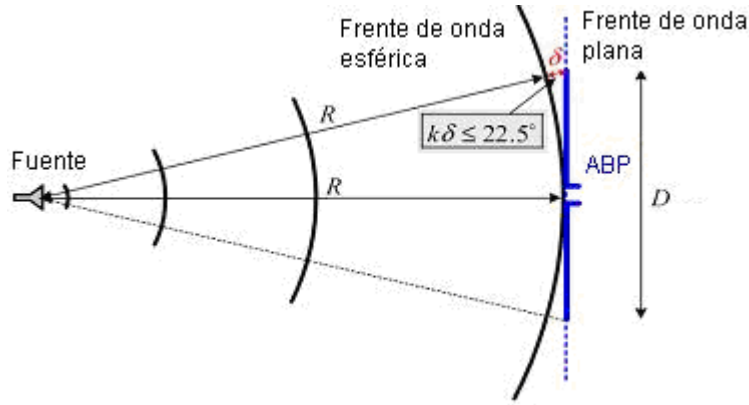


Figura 2.2. Modelación de la recepción de señal en la ABP.

Aplicando el teorema de Pitágoras se tiene:

$$R^2 + 2R\delta + \delta^2 = R^2 + \frac{D^2}{4} \quad (2.1)$$

Al despejar R queda:

$$R = \frac{D^2}{4} \times \frac{1}{\left(2\delta + \frac{\delta^2}{R}\right)} \quad (2.2)$$

Si $R \gg \delta \ll D$ el aporte del segundo miembro dentro del paréntesis en el denominador de la ecuación 2.2 es despreciable.

Luego:

$$R \approx \frac{D^2}{8\delta} \quad (2.3)$$

Entonces, la mínima distancia R depende del máximo valor de δ que puede ser tolerado. Algunos experimentadores [9] recomiendan que δ debe ser menor o igual que $\lambda/16$. Luego:

$$R \geq \frac{D^2}{8 \times \left(\frac{\lambda}{16}\right)} \quad (2.4)$$

$$R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}$$

Y la diferencia de fase para $\delta=\lambda/16$ es $22,5^\circ$. En casos especiales pueden tolerarse diferencias de fase mayores de $22,5^\circ$ y en otros casos debe ser menor.

En general, el parámetro igual a dos en la inecuación 2.4, puede ser representado por k . Entonces:

$$R \geq k \frac{D^2}{\lambda} \quad (2.5)$$

La siguiente tabla recoge el parámetro k para tres valores de diferencia de fase tolerables:

Tabla 2.1 Relación de desfases tolerables en función del parámetro k .

Máxima diferencia de fase tolerable	δ	k
10°	$\lambda/36$	4.5
22.5°	$\lambda/16$	2
30°	$\lambda/12$	1.5

De acuerdo con la inecuación 2.5, la mínima distancia para efectuar las mediciones está en función de la apertura D de la antena y de la longitud de onda en la que se trabaja. En el caso de antenas con apertura física muy grande y pequeñas longitudes de onda, se requieren grandes distancias.

Por ejemplo, si se considera una antena de haz *broadside* para una frecuencia de trabajo de 543.25 MHz con apertura física de 26.71 cm, de acuerdo con la inecuación 2.5, se tiene:

Tabla 2.2 Cálculo de R para las condiciones de trabajo.

k	R_{\min} (m)
4.5	0.581
2	0.258
1.5	0.194

Como es de apreciar, incluso para el peor caso, la distancia a partir de la cual se considera la zona de Fraunhofer, es despreciable.

2.2.2 Requerimiento de campo uniforme

Un segundo requerimiento para una correcta medición del patrón de radiación es que la antena transmisora produzca, tan cerca como sea posible, una onda plana de amplitud y fase uniforme sobre una región al menos tan grande como la ocupada por la antena bajo prueba. Variaciones del gradiente de campo pueden estar dadas por la interferencia de la onda directa con la onda reflejada en tierra o en otros objetos que la rodean. Las reflexiones en paredes y edificios pueden evitarse mediante la selección de un campo abierto o de un techo plano donde colocar el sistema de medición.

El efecto de reflexiones en tierra puede minimizarse mediante el uso de una antena transmisora direccional y colocando ambas antenas en torres o cerca de los bordes de edificios adyacentes. En tal escenario la amplitud de la onda reflejada se reduce dado que la radiación de la antena transmisora también se reduce y la longitud del trayecto de la onda reflejada es apreciablemente más grande que el trayecto de la onda directa.

En ocasiones, los requerimientos de distancia (inecuación 2.5) son tan grandes que la altura de las torres o edificios soportes para las antenas es totalmente impráctica. En este caso la ABP puede situarse en una región de máximo de intensidad de campo como las alturas h_1 y h_2 de la figura 2.3. Este escenario tiene la limitación de que la ABP debe ser ajustada para cambios de frecuencia, requerimiento que puede resultar un inconveniente cuando se realizan mediciones con antenas de banda ancha.

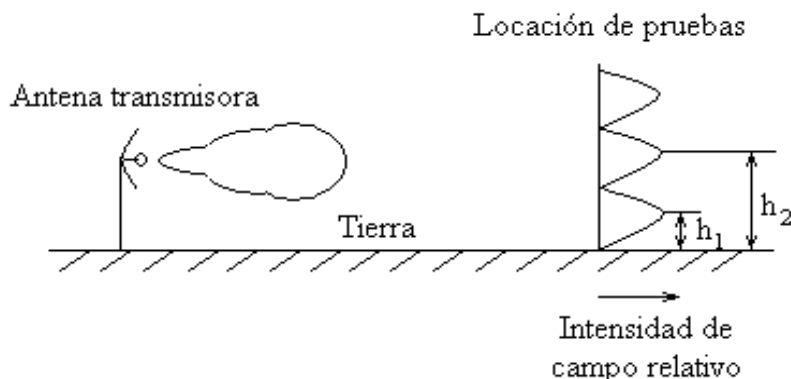


Figura 2.3. Variaciones de la intensidad de campo con la altura en la locación de pruebas cuando la antena transmisora está suficientemente alejada.

Otras causas de campo no uniforme en la locación de medición son las antenas transmisoras dirigidas inadecuadamente o una antena con dos haces muy estrechos.

2.2.3 Recomendaciones para realizar las mediciones

Durante la medición de patrón de radiación de antenas es buena práctica lo siguiente:

- Explorar todo el volumen que será ocupado por la antena bajo pruebas con antenas de media longitud de onda en la frecuencia de operación mientras se observa la intensidad de campo que reciben estas últimas. Las variaciones máximas tolerables de intensidad de campo no deben exceder los 0,25 dB.
- Buscar la altura relativa donde existe mayor intensidad de campo, acción perfectamente realizable dada la longitud de onda donde se trabaja.

2.3 El sistema transmisor y el medio de transmisión

La cobertura del servicio de TV para la ciudad de Santa Clara la brinda la Planta Transmisora de TV ubicada en loma Dos Hermanas que transmite bajo la norma NTSC, cinco canales de televisión: 3; 5; 14; 20 y 26; y, adicionalmente para la capital provincial se difunde el canal 57 de forma local y bajo la misma norma, pero desde otro emplazamiento y con mucha menos potencia. Como elemento transmisor se selecciona el canal 26 (en 543.25 MHz la portadora de video y en 547.75 MHz la portadora de audio [3]), con una potencia de 1 kW, señal que corresponde al canal Multivisión, por lo que tiene, salvo

alguna afectación puntual, 24 horas de transmisión al día. Esto último justifica su elección, por lo tanto, las antenas a medir están sintonizadas a la frecuencia de portadora de video que corresponde a este canal.

La distancia que existe en línea recta entre la loma Dos Hermanas, donde se encuentra emplazada la torre de radiodifusión de TV, y la FIE, en la UCLV, es de aproximadamente 10.80 km, dato que se obtuvo mediante el servicio Google Earth, como se muestra en el Anexo # 3.

2.4 Hardware del sistema local

El subsistema local cuenta con un dispositivo rotor controlado por computadora y un metro de intensidad de campo eléctrico. Al mismo se le incorpora una tarjeta de adquisición de datos cuya función es acondicionar las mediciones analógicas del metro de RF para luego convertirlas a digitales para entregar estos datos a la máquina computadora.

Todo el proceso de adquisición de datos y control de periféricos es ejecutado por la computadora a través de su puerto paralelo.

2.4.1 Bloque de posicionamiento

El bloque de posicionamiento o mecanismo rotor está compuesto por: el motor paso a paso, los transistores que manejan la carga que representan los bobinados del motor, la fuente que alimenta al motor, así como el circuito de control cuya función es evitar que el rotor del motor realice más de una vuelta completa sobre su eje. Sobre este se coloca la ABP en un vástago soporte.

Durante los experimentos se tiene en cuenta que la altura de la antena que se coloca sobre el vástago cumpla con el criterio de medición que se plantea en el epígrafe 2.2.2 en cuanto a altura relativa sobre el suelo.

Todo esto se implementa con un motor paso a paso unipolar (figura 2.4), de 6 cables terminales, modelo 23LM-C701-01, fabricado en Japón por la firma ASTROSYN. Al mismo se le incorpora un reductor, lo que incrementa suficientemente su poder para mover el vástago con una antena sin trabajar a plena carga. Este motor trabaja con 5.2 V, consume 1.4 A y su paso de giro es de 1.8° y para la presente aplicación se utiliza bajo secuencia

normal, que es la más usada y la que recomienda su fabricante ya que es donde tiene mayor torque de paso y retención, al tener al menos dos bobinas activadas en todo momento.

Este motor paso a paso, como cualquier otro, es un dispositivo mecánico y como tal debe vencer la inercia. Luego, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados a sus bobinas es un factor muy importante a tener en cuenta: el motor debe alcanzar el paso de giro antes que la siguiente secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor no logra alinear los torques por lo que puede reaccionar de modo que no realice movimiento en absoluto o que comience a vibrar pero sin llegar a girar, puede girar erráticamente o puede girar en sentido opuesto al deseado. Para que el motor tenga un arranque suave y preciso, la implementación del *software* comienza con una frecuencia de pulsos baja y gradualmente va aumentándola hasta la velocidad deseada sin superar la máxima que tolera el dispositivo.



Figura 2.4. Motor con que trabaja el bloque de posicionamiento.

Como se observa en la figura 2.5, los *drivers* o controladores del motor son transistores bipolares Darlington de potencia de tipo NPN, 2SC3987, especialmente diseñados para manejar cargas inductivas [48], están en configuración de colector abierto, y su excitación se realiza estimulando las bases que reciben los pulsos procedentes de las líneas 2; 3; 4 y 5 del puerto paralelo de la PC [45], llevándolos a saturación y corte para suministrarle y retirarle la alimentación a los campos del motor.

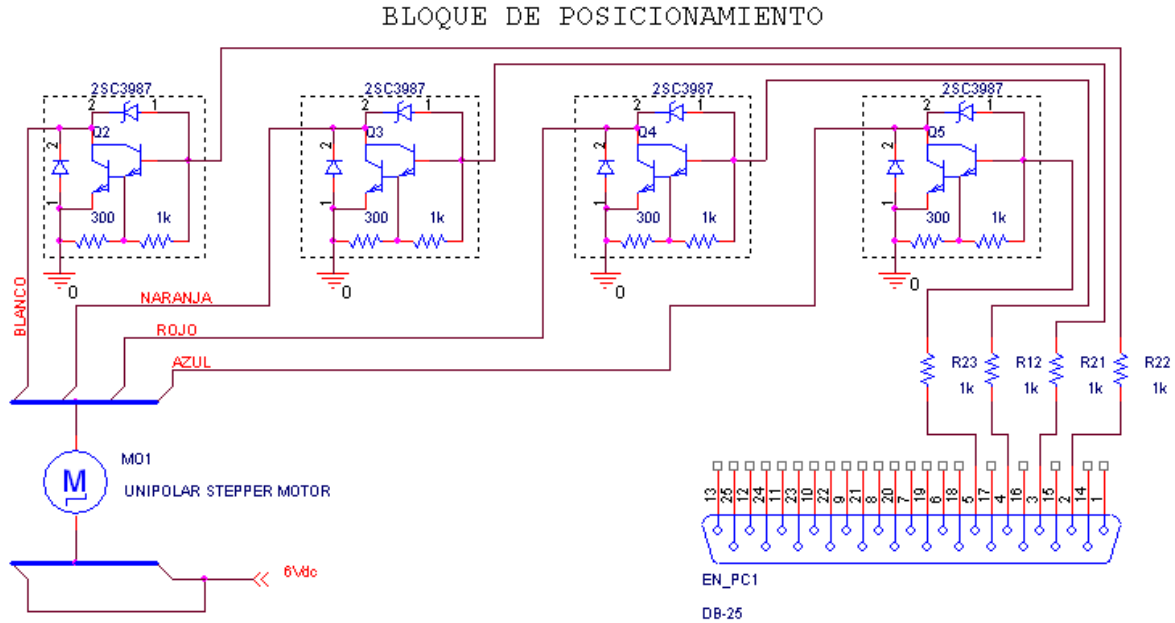


Figura 2.5. Excitación de los campos del motor paso a paso.

Los resistores de $1\text{ k}\Omega$ limitan la corriente que circula por las bases de los transistores, evitando cargar el puerto de la PC que puede manejar no más de 25 mA [42], [21]. En la figura 2.5 se representa, además del cableado correcto para la secuencia que se maneja en la presente aplicación, la estructura interna de los transistores con el fin de apreciar el funcionamiento de la excitación del motor.

La fuente de alimentación que se implementa para este fin se muestra en el Anexo # 2. La misma entrega 6 V que se obtienen a partir de una LM7805 con una combinación de resistores para elevar el voltaje regulado [50]. Se utiliza una alimentación de 6 V en lugar de 5.2 V para contrarrestar la caída de voltaje que ocasiona el consumo que representa el motor.

En este bloque se implementa, además, un sencillo mecanismo de control para evitar que el motor realice más de una vuelta sobre su eje. Como se observa en el esquema de la figura 2.6, cuando el motor no ha realizado una vuelta completa el transistor que compone el foto-interruptor ON1105 se mantiene saturado, estado que conserva mientras no se corte la luz que emite su fotodiodo asociado [43]; y al estar saturado este transistor, su carga, el transistor bipolar BC548 de tipo NPN se mantiene en corte, dado que su base está a casi 0 V con respecto a tierra (0,2 V aproximadamente), y se le entrega al terminal 11 del puerto

paralelo de la PC los 5 V de la fuente de alimentación ya que no existe circulación de corriente por el BC548 y, por tanto, no hay caída de voltaje en R_7 , que es de 1 k Ω . Cuando se interrumpe el paso de la luz a través del foto-interruptor, su transistor interno se corta. Esto conlleva a que el BC548 se sature y se logre colocar un nivel bajo de voltaje en el pin 11 del puerto LPT, estado necesario porque el mismo se activa en nivel bajo [42], [21], lo que provoca la activación del bloque de control del *software* para realizar el posicionamiento manual (epígrafe 2.6.1).

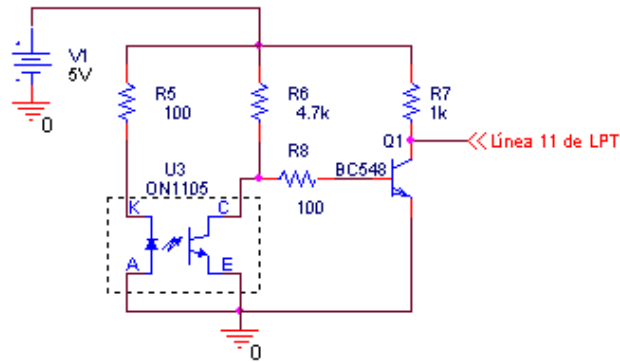


Figura 2.6. Bloque de control del posicionamiento del motor.

2.4.2 Bloque de recepción de la señal de antena

Para medir las tensiones que se inducen en la ABP se utiliza un equipo especialmente diseñado para estos fines. Se trata de un milivoltímetro de RF, conocido como metro de intensidad de campo. Su función consiste en detectar la señal que proviene de la antena y entregarle un nivel de corriente directa proporcional a la señal de la entrada a su mecanismo D'Arsonval.

El referido equipo es de la firma china ZHINAN, modelo ZN2270, fabricado en 1987. Su rango de frecuencias de operación es de 10 kHz a 1 GHz, lo que permite cubrir, incluso con bandas de guarda laterales superior e inferior, todas las frecuencias correspondientes a los canales de TV. Tiene siete escalas para efectuar las mediciones que conforman un rango desde 1 mV hasta 10 V, con una impedancia de entrada de alrededor 510 k Ω y menor que 2 pF en toda la banda de trabajo. Su respuesta de frecuencias no es lineal, y en el rango donde se trabaja en la presente investigación experimenta variaciones de un 15%. Consume unos 15 W, se alimenta con 220 V, y todos sus voltajes DC (+6; -6; +24; +50) son regulados [14].

Este instrumento cuenta con un juego de conectores adaptadores de impedancias, lo que permite trabajar con antenas de impedancia $50\ \Omega$ y $75\ \Omega$ con varios formatos de conexión sin necesidad de intercalar ningún otro elemento adaptador, salvo que se empleen líneas de impedancia característica distinta de 50 o $75\ \Omega$. Otra característica positiva de este instrumento es que su señal de salida es notablemente limpia de ruido, debido a todo el procesamiento a que es sometida la señal de RF que el mismo adquiere.

Entre los aspectos negativos de este instrumento está que el fabricante recomienda unos 30 minutos de encendido previo a la realización de las mediciones para que el equipo se caliente y alcance la estabilidad térmica, período de tiempo que debe ser algo mayor en días nublados o lluviosos, o cuando ha estado durante un tiempo prolongado en ocio o almacenado [14]. Otro de los aspectos negativos del instrumento es que genera un estado transitorio en los terminales de su mecanismo D'Arsonval cuando la señal de entrada varía de súbito. Esto significa que para realizar las mediciones en la circunferencia completa se necesitan largos períodos de tiempo ya que es necesario emplear un intervalo de tiempo para que cada lectura se estabilice antes de efectuar la adquisición del dato de la medición; razón por la cual se ha tomado la alternativa de aplicar en el *software* un ajuste de curva polinomial que permite suprimir los picos transitorios, para disponer de un protocolo de medición relativamente corto.

Trabajar solo con este instrumento conforme lo produce la fábrica significaría emplearlo bajo las condiciones descritas en el epígrafe 1.3. Por este motivo al instrumento se le ha incorporado una Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) que automatiza el proceso de lecturas y entrega las mismas en formato digital, dejando solamente margen al error de cuantificación que ocurre en el proceso de conversión análogo-digital, que es despreciable frente a los errores que se cometen en las mediciones normales o tradicionales considerando solamente el error de paralaje.

2.4.3 Bloque de acondicionamiento de la señal de antena

La implementación del sistema de acondicionamiento de señal y de adquisición de datos para la PC que se ha incorporado al milivoltímetro de RF tiene la estructura circuital que se muestra en la figura 2.7.

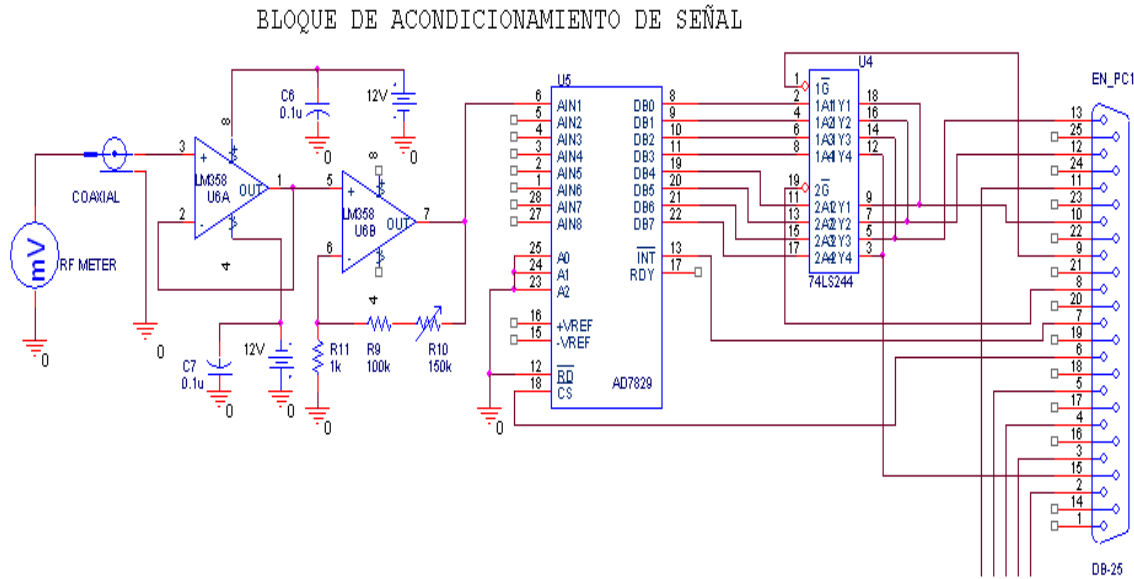


Figura 2.7. Esquema circuital del bloque de acondicionamiento de señal.

Este bloque cuenta a la entrada con un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje [52], [39], [49], que se utiliza como buffer aislador cuyo propósito es no cargar el milivoltímetro y que las lecturas del mismo no se vean alteradas por la presencia de este elemento de carga adicional. Esto se realiza con uno de los dos operacionales que conforman la LM358 [51]. Le sigue un amplificador cuya ganancia máxima es de 250, posibilitando acondicionar, mediante el control R_{11} , la señal que llega al convertidor AD7829, cuyo nivel no debe ser superior a 2,5 V [11], lo que se implementa con el otro operacional que conforma la LM358.

Debido a que para efectuar mediciones correctas el metro de intensidad de campo debe estabilizarse, tardando poco menos de tres segundos en cada medición [14], las lecturas de los datos provenientes del proceso de conversión se realizan por tiempo y no por interrupción. O sea, no se utiliza el pin EOC del convertidor A/D 7829, dispositivo que realiza el proceso de conversión en 420 ns como máximo [11]. Luego, la lógica de control que se implementa en este escenario para el referido convertidor A/D se plantea como sigue: la línea RD se mantiene a nivel bajo (tierra), el proceso de conversión se inicia con un nivel bajo en el terminal CONVST por el pin 7 del puerto paralelo y se captura el dato con un nivel bajo en el pin CS por el terminal 6 del puerto paralelo. El *byte* proveniente de la conversión se le pasa al IC 74LS244 que se utiliza en configuración de buffer de ocho

entradas [40], para luego entregarlo *nibble* a *nibble* al puerto paralelo, que trabaja en el modo básico que está presente en todas las máquinas tipo PC, independientemente de la generación de que forme parte [41], [52], [21].

La fuente de alimentación que se implementa para la tarjeta de adquisición, como se muestra en el Anexo # 2, entrega los tres voltajes necesarios para el funcionamiento de la misma: +5 V, +12 V y -12 V. Los ± 12 V son para alimentar los amplificadores operacionales y se obtienen estabilizados a partir de dos diodos zener con $V_z=12$ V. Los 5 V que se necesitan para el convertidor se obtienen regulados a partir de una LM7805.

2.5 Requerimientos para ejecutar el *software* en el sistema local

A modo de referencia se hace necesario notar que para controlar los periféricos del SAMPRA se utiliza una computadora tipo PC, cuyas características más importantes son: motherboard AsRock 775i65G, procesador tipo Dual Core, y 256 MB de memoria RAM tipo DDR 400.

Para ejecutar exitosamente el *software* es necesario activar en el *setup* de la máquina el uso del puerto paralelo en modo estándar (SPP) [5].

A partir de la tecnología NT la corporación de *software*, Microsoft, cambia su concepción en cuanto a la seguridad de las PC por lo que el sistema operativo se hace con el control total sobre los puertos físicos en aras de evitar vulnerabilidades o brechas de seguridad. Es por esto que bajo Windows XP, que se basa en la tecnología NT, se hace necesario liberar el puerto LPT, acción que se realiza con un *software* llamado UserPort al que se introducen las direcciones de recurso que tienen asignadas los puertos físicos que se desean liberar; para el caso de LPT1 en modo estándar son: 378h-37Ah, donde se encuentran los registros de datos, estado y control del puerto paralelo [21] [41].

Con lo que se consigue hasta aquí es suficiente para ejecutar satisfactoriamente el *software* de control; pero la PC que se describió anteriormente, con Windows XP Service Pack 3 Compilación 2600 como sistema operativo y con sus *drivers* instalados, no libera el puerto LPT1 luego de realizar los pasos antes expuestos; ni siquiera permite correr con éxito un compilador de Borland C ya que el mismo se muestra en pantalla con una interfaz gráfica estática y no permite mover el *mouse*. Luego de experimentar con esta situación

reinstalando el sistema operativo mencionado con los *drivers* uno tras otro, y con el precedente de lo que sucede con el compilador de C, se comprueba cuál era la fuente del problema: el *driver* de video. Entonces se propuso trabajar la PC sin los controladores de video para poder tener control sobre los puertos físicos.

Cuando estas dificultades son superadas, lo que resta es ejecutar un *software* realizado en LabVIEW 8.5, especialmente diseñado para la tarea de las mediciones de patrón de radiación de antenas: adquirir y procesar las lecturas provenientes del milivoltímetro de RF, controlar el sistema de posicionamiento, así como mostrar los resultados, que consisten en graficar el patrón de radiación en coordenadas polares y rectangulares, y mostrar una tabla con las mediciones de campo eléctrico correspondientes a cada fase en el giro del motor.

2.6 Descripción del *software* que se ejecuta en el sistema local

El *software* que se ejecuta en el sistema local se realiza en LabVIEW, que es reconocido como una herramienta de desarrollo de aplicaciones, muy fácil de utilizar, idóneo para crear rápidamente prototipos de sistemas de adquisición de datos y de instrumentos virtuales.

Un programa creado en LabVIEW se denomina Instrumento Virtual (VI) y consta de tres partes:

Panel Frontal: Es donde se ubican todos los indicadores y controles que el usuario podrá ver cuando el programa está en funcionamiento, como por ejemplo: botones y gráficas. Esta es la ventana con la cual el usuario interacciona con el programa.

Diagrama de Bloques: Contiene el código fuente del VI. El diagrama de bloques equivale a las líneas de texto que se usan en los lenguajes de programación como el C o BASIC; es el código actual ejecutable. El diagrama de bloques se construye uniendo mediante cables objetos que realizan funciones específicas. Esta representación tan gráfica, que se asemeja a los diagramas de flujo utilizados en la programación convencional como algoritmos, es el programa en LabVIEW.

Icono de Conexión: Son para utilizar el programa creado como subrutina en otro programa donde el ícono será la caja negra. Esta es la idea esencial que permite crear un sistema de programación modular, donde cada rutina creada llame a otras rutinas, y estas a su vez a otras de menor nivel, en una cadena jerárquica con cualquier límite deseado.

Todos los indicadores y controles ubicados en el panel frontal están respaldados por un terminal de conexión en el diagrama de bloques, tal y como si se tuviese un tablero de control de una máquina o un avión, donde por el frente se ven los indicadores y por el lado posterior se aprecian todos los cables y terminales de conexión.

2.6.1 El panel frontal

El panel frontal se diseña para que resulte agradable al usuario y, a la vez, brinde la mayor cantidad de datos posibles para el control del posicionamiento del bloque rotor, así como para la interpretación del patrón de radiación de la antena que se mide. Para esto se incluye la gráfica del patrón de radiación en coordenadas polares y cartesianas, y una tabla con los valores de las mediciones en cada punto; con la posibilidad de exportarlo como imagen. Además, se brinda constantemente al usuario la posición angular de la antena y, al final de la ejecución, la máxima lectura y la posición que le corresponde a la misma. Durante la medición se le muestra al usuario un indicador del progreso del proceso.

Como se ilustra en el Anexo # 4, el panel frontal cuenta con:

Botón INICIAR PROCESO: Da comienzo a la ejecución del proceso, primero con el posicionamiento automático, y, una vez terminado este, continúa con la adquisición y rotación de la antena receptora partiendo de 0°. El posicionamiento se efectúa en sentido contrario al de la medición (a favor de las manecillas del reloj) para evitar que el cable por el cual se adquiere la señal de la antena se enrolle en el vástago que la soporta. Si al comenzar el proceso el posicionamiento automático no responde o no funciona correctamente, el *software* despliega un mensaje preguntando si el usuario desea hacer el posicionamiento de forma manual, y, de seleccionar una respuesta positiva, el usuario tiene acceso al bloque de control manual, manipulando el posicionamiento hasta llegar a 0°, punto en el que se oprime el botón de continuar para que el *software* inicie nuevamente el proceso [45].

Resolución: Es el paso de giro para el motor. El usuario accede a esta opción mediante una lista desplegable con cuatro posibilidades de selección (0.5°, 1°, 3° y 5°) y una posibilidad adicional para definir este parámetro de acuerdo a sus intereses. Antes de iniciar el proceso de medición el usuario debe escoger la posibilidad que desea. De no ser así, por defecto se toma la mayor de todas, que en este caso es de 5°. Mientras más pequeño es el paso de giro

mejor serán las gráficas del patrón obtenido dado que se adquiere un número mayor de muestras en los 360°, aunque el proceso resulta más largo. Por ejemplo, para 5° de resolución tarda alrededor de 5 minutos, mientras que para 1° tarda 18 minutos.

Posicionamiento manual: Es una opción de emergencia en caso de detectarse algún tipo de falla en el posicionamiento automático, posiblemente producto a un mal funcionamiento del circuito dedicado a esta acción. Si todo el sistema funciona correctamente en el transcurso del proceso, esta opción se encuentra visible, pero desactivada, siempre que no ocurra el mencionado error. Cuando existe algún problema en el posicionamiento, el *software* lo detecta y le muestra un mensaje al usuario, informando de un problema en el sensor y le pregunta si desea realizar el posicionamiento en forma manual para así continuar la ejecución del proceso; si la respuesta es afirmativa, queda activado este bloque, que ofrece las opciones de mover la antena en las dos direcciones (izquierda o derecha) y de continuar el proceso una vez que se tenga ubicada la antena en el lugar deseado [45].

Abortar (adquisición y posicionamiento): Ofrece al usuario la opción de interrumpir el proceso en el momento que estime conveniente. Como las partes principales de esta aplicación son el posicionamiento de la antena y el proceso de adquisición y manejo de los datos, existen por tanto dos opciones de finalizar: una para abortar el posicionamiento y la otra para abortar la adquisición. El posicionamiento puede concluirse, por ejemplo, por la opción del usuario de comenzar la medición de la antena desplazada de la posición de 0° definida en el sistema para así tomar otra posición de inicio. Por otra parte, la adquisición puede ser terminada cuando algún proceso de medición es interrumpido por la aparición repentina de algún tipo de interferencia no deseada para la medición, ya sea provocada por una persona o por determinado fenómeno, brindando de esta forma la opción de no estar obligados a continuar con una medición con resultados que no son esperados o deseados. Cuando el usuario, por cualquier motivo, interrumpe el proceso, el *software* despliega un mensaje que brinda la opción de guardar los resultados obtenidos hasta el momento [45].

Cuando se finaliza toda la ejecución, se despliegan dos gráficas: una en coordenadas polares y la otra en rectangulares. Conjuntamente con las gráficas, se brinda una tabla con los datos de las mediciones, indicando en cada uno la posición angular y la amplitud medida en ese punto.

2.6.2 El diagrama de bloques

La lógica de programación que se sigue para el desarrollo de la aplicación se representa en el diagrama de estados que se muestra en el Anexo # 4.

El desarrollo del código fuente del *software*, que incluye los Instrumentos Virtuales (VI) y las funciones que están asociadas al mismo, pueden apreciarse en el Anexo # 5. Este se divide en tres bloques:

1. Se encarga del posicionamiento de la antena, que puede ser automático o manual en dependencia de los factores explicados en 2.6.1.
2. Se hace cargo de la adquisición de los datos y ejerce el control adecuado sobre la tarjeta de adquisición insertada en el milivoltímetro de RF y sobre el bloque de posicionamiento para desplazar la antena en los incrementos constantes que indique la resolución escogida por el usuario. En este bloque se realiza el tratamiento al ruido.
3. Se ocupa del procesamiento y visualización de los datos, así como de todos los procesos de cálculo y de la opción de salvar las gráficas o la tabla.

2.7 Mejoras que se le introducen al sistema local

En el hardware: Se concibe el sistema de medición de patrón como instrumento que puede prescindir de generador de RF propio, lo que le imprime un mayor sentido práctico a las mediciones ya que se trabaja en condiciones de campo.

En el software: Actualmente se cuenta con un instrumento virtual con el *software* de control del SAMPRA, pero para ejecutarlo se requiere instalar en la máquina que se utiliza para las mediciones una versión de LabVIEW (8.5 o superior). Este inconveniente se supera con la realización de un ejecutable llamado VI_SAMPRA.exe que solo requiere como plataforma el motor de ejecución de LabVIEW 8.5 (*LabVIEW Runtime Engine 8.5*). Si esto todavía resulta un inconveniente, se elabora un instalador con el mismo nombre que el ejecutable, que porta en su directorio todo lo necesario para que el VI de medición pueda ejecutarse satisfactoriamente. Además, se realizan mejoras en la interfaz de usuario, o sea, en el panel frontal, con el fin de lograr una interacción más amena con el usuario.

CAPÍTULO 3. MONTAJE DE LAS PRÁCTICAS. RESULTADOS ALCANZADOS

Para realizar prácticas de laboratorio de medición del patrón de radiación de antenas es necesario contar, además de la infraestructura o el equipamiento necesario, con una guía o técnica operatoria que oriente al binomio estudiante-profesor acerca de los requerimientos y los pasos a realizar para alcanzar los resultados que se esperan y para conseguir cumplimentar los objetivos que se proponen con el desarrollo de la misma. Es por ello que en este capítulo se realiza y se describe la estructura de las prácticas de laboratorio que se proponen, así como el diseño de las antenas que se seleccionan para el desarrollo de las mismas. Se concluye con el análisis de los resultados alcanzados en las mediciones y con las comparaciones de los mismos con las simulaciones y su correspondencia teórica en cada caso. Además, se enuncian las limitaciones que presentan el escenario de medición y el equipamiento que se utiliza.

3.1 Selección y diseño de las antenas

Para el desarrollo de las prácticas se seleccionan tres tipos de antenas que permiten afianzar los conocimientos teóricos adquiridos por los estudiantes en conferencias y clases prácticas por la posibilidad de integrar en otros tipos de antenas los resultados obtenidos que tienen mucha utilidad práctica. Estas son: el dipolo simétrico simple (de media λ y de λ y media), dos dipolos simétricos acoplados en paralelo (con alimentación cofásica y en oposición de fase), y una Yagi de cinco elementos con el elemento excitado plegado.

Estas antenas se sintonizan a la frecuencia que corresponde a la portadora de video del canal 26 (543.25 MHz) y los elementos con que se construyen, en todos los casos, son

aluminio macizo de 4 mm de diámetro, dimensión que tiene en cuenta el criterio para que los dipolos se consideren finos [30]:

$$D \leq \frac{\lambda}{100} \quad (3.1)$$

Por lo tanto, para este caso particular se tiene:

$$D = 4mm$$

$$\frac{\lambda}{100} = \frac{\left(\frac{300}{543.25} \right)}{100} = 5.52mm$$

$$D < \frac{\lambda}{100}$$

La geometría con que se construye cada antena se muestra en la figura 3.1:

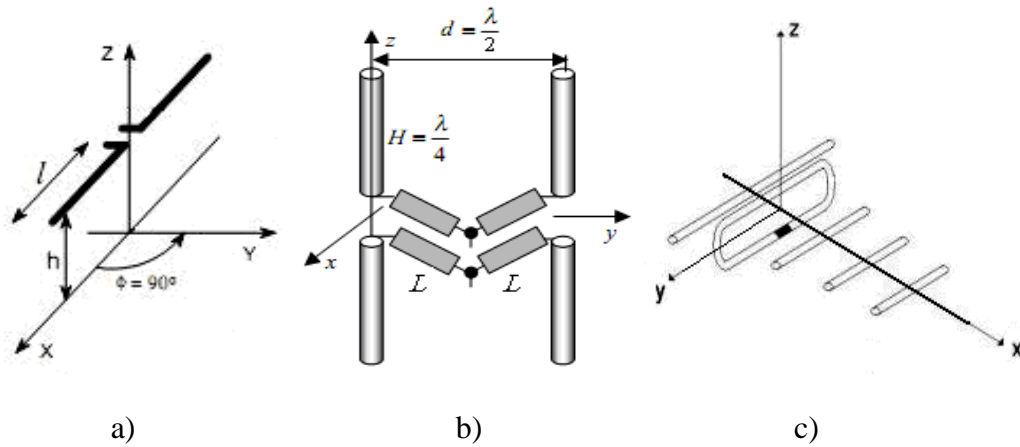


Figura 3.1. Geometría de las antenas seleccionadas. a) El dipolo simétrico simple. b) Dos dipolos acoplados en paralelo. c) Una Yagi de cinco elementos.

3.1.1 El diseño de los dipolos

Dipolo de media lambda: Se diseña para que su impedancia en el punto de alimentación sea de 75Ω con la parte reactiva minimizada, y con la frecuencia de operación como dato conocido se obtiene que su longitud teórica es de 27.61 cm, que en la práctica tiene que ser de alrededor de 25.36 cm, un 8% menor que la teórica debido al efecto de extremos.

Puesto que la estación de radiodifusión que garantiza el servicio de TV en Santa Clara transmite, además del canal 26, los canales 3; 5; 14 y 20, se hace necesario diseñar un filtro

o sintonizador con el objetivo de atenuar el contenido de frecuencias que no corresponde al canal de interés. Se propone una solución sencilla e ingeniosa, construida a partir de la propia línea de transmisión, un *stub*, cuyo diseño es el siguiente:

La línea que se utiliza es cable coaxial RG-59, que tiene las siguientes características:

$$R_o=75\Omega;$$

$$\alpha=9.05 \times 10^{-3} \text{ Np/m};$$

$$c_v=0.67;$$

$$f_o=543.25 \text{ MHz};$$

Con estos datos se calcula la longitud necesaria para el *stub* tal y como sigue:

$$\lambda = \frac{c \times c_v}{f} = \frac{300 \times 0.67}{543.25} = 0.370m$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 16.98 \text{ rad/m}$$

$$Q = \frac{\beta}{2\alpha} = 938.1$$

$$\Delta f = \frac{f_o}{Q} = 578 \text{ kHz}$$

$$l = \frac{\lambda}{4} = 9.25 \text{ cm}$$

Dipolo de lambda y media: Su dimensión total teórica para la frecuencia de trabajo (543.25 MHz) es de 82.84 cm, pero en la realización del mismo se toma como 81.10 cm para minimizar la parte imaginaria de la impedancia en el punto de alimentación, cuyo valor aproximado en simulación en Mmana llega a ser de $117.59 + j0.015 \Omega$. Este diseño también requiere un *stub* sintonizador como el que se diseña en el presente epígrafe.

3.1.2 El diseño de los dipolos acoplados

Este conjunto se conforma con dos dipolos de media lambda, como el que se diseña en el epígrafe anterior, acoplados en paralelo a la distancia de un cuarto de longitud de onda. La dimensión total teórica de los dipolos para la frecuencia de trabajo es de 27.61 cm, pero cada dipolo se corta a 27.44 cm, un 0.7% menor, para minimizar la parte imaginaria de la

impedancia en el punto de alimentación, cuyo valor en simulación en Mmana llega a ser $124.059 + j0.595 \Omega$.

La alimentación para que el arreglo se comporte como un radiador *broadside* consiste en cortocircuitar los brazos de cada dipolo que se encuentran a un mismo lado, y, para que se comporte como un radiador *endfire* es necesario cortocircuitar los brazos que están en cruz.

Para minimizar la influencia de las señales radioeléctricas no deseadas sobre las mediciones, también se tiene en cuenta la idea del *stub* como sintonizador, pero en este caso se realiza con otro tipo de línea de transmisión: cinta bifilar. Con los datos correspondientes a la impedancia característica, factor de velocidad y coeficiente de atenuación, se puede proceder, al igual que en 3.1.2, a calcular la longitud necesaria para el referido *stub*.

3.1.3 El diseño de la Yagi

La antena Yagi se diseña como un conjunto de cinco elementos, tal y como se muestra en la figura 3.2.

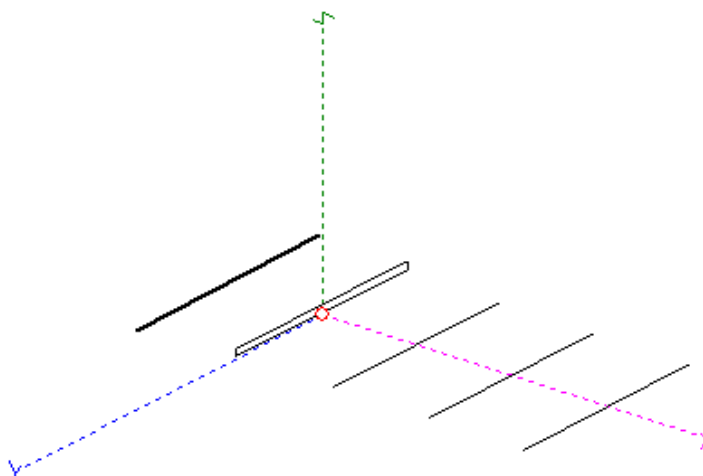


Figura 3.2. Geometría de la antena Yagi que se construye.

Para que la impedancia de la misma en el punto de alimentación sea de alrededor de 75Ω , sus elementos se disponen de la forma que se expresa en la tabla 3.1, donde todas las dimensiones están en función de λ :

Tabla 3.1 Disposición de los elementos de la antena Yagi que se simula e implementa.

X1 (λ)	Y1 (λ)	Z1 (λ)	X2 (λ)	Y2 (λ)	Z2 (λ)	R (λ)
-0.200138	0.242668	0.0	-0.200138	-0.242668	0.0	0.002482
0.0	0.227511	0.0	0.0	-0.227511	0.0	0.002483
0.200138	0.220152	0.0	0.200138	-0.220152	0.0	0.002484
0.400277	0.218151	0.0	0.400277	-0.218151	0.0	0.002485
0.600415	0.220152	0.0	0.600415	-0.220152	0.0	0.002486
0.0	0.227511	0.0	0.0	0.227511	0.015511	0.002487
0.0	-0.227511	0.0	0.0	-0.227511	0.015511	0.002488
0.0	0.227511	0.015511	0.0	-0.227511	0.015511	0.002489

3.2 Confección de las guías para las prácticas

Se elaboran tres guías, una para cada práctica, cuyo cuerpo se estructura como sigue:

Título: Nombre de la práctica, el cual está en estrecha relación con el tipo de antena que se aborda en la misma.

Preparación previa: Se enuncian los temas que deben ser recapitulados antes de abordar la práctica.

Objetivos: Se enuncian las finalidades que se persiguen con el desarrollo de la práctica.

Marco teórico: Se aborda la teoría asociada a la antena que se trata en la práctica. Aparecen las formulaciones y las demostraciones matemáticas que describen el comportamiento del patrón de radiación de la antena en cuestión.

Desarrollo de la práctica: Se nombran los equipos y medios a utilizar; se enuncian los procedimientos para la práctica y para el trabajo independiente con los resultados a obtener en el SAMPRA, y se realiza una serie de preguntas teóricas con la finalidad de comprobar la preparación del estudiante en el tema. Las respuestas a las preguntas teóricas están en el cuerpo de la práctica.

Bibliografía: Se listan las principales fuentes consultadas para el desarrollo de la práctica.

3.3 Resultados de las simulaciones

Estos resultados se obtienen mediante los siguientes componentes de *software*: MATLAB 6.5 y Mmana 2.03.

En MATLAB 6.5 se plotean las gráficas del campo eléctrico en el plano ecuatorial, dadas por la ecuación de campo específica para la antena en cuestión. MATLAB es un *software* propietario que se puede caracterizar como sistema interactivo para cálculos científicos y de ingeniería, basado en matrices, con el que se pueden resolver complejos problemas numéricos sin necesidad de programar.

En Mmana se obtiene el patrón de campo eléctrico en los planos xy y xz , así como el patrón de radiación tridimensional. Este *software* es *freeware* y se utiliza para el análisis y diseño de antenas; su algoritmo de cálculo se basa en el método de momentos y es muy aceptado en la actualidad.

3.3.1 Simulaciones de la práctica # 1

Se simulan las dos antenas que se estudian en esta práctica: el dipolo de media λ y el dipolo de λ y media, que se diseñan en el epígrafe 3.1.1.

Dipolo de media λ

La ecuación del factor de forma para el campo eléctrico en el plano ecuatorial para el dipolo de media λ con orientación horizontal es:

$$E(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\varphi\right)}{\sin\varphi} \quad (3.2)$$

Se plotea la ecuación anterior en MATLAB y se simula la antena en Mmana. Los resultados se pueden observar en la figura 3.3:

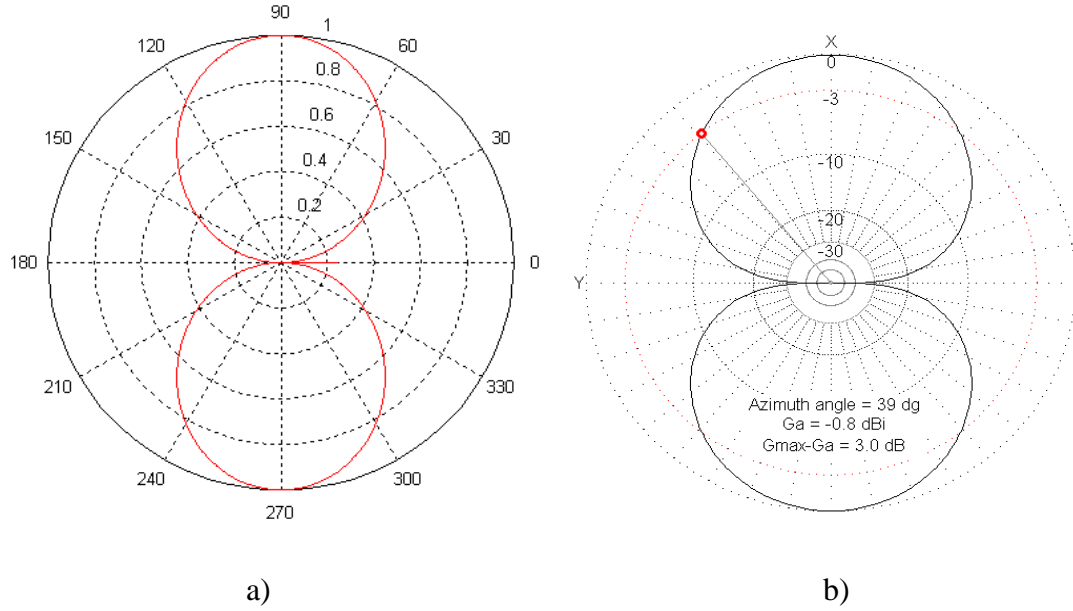


Figura 3.3. Campo eléctrico en el plano ecuatorial para la antena dipolo de media lambda con polarización horizontal. a) Representación en MATLAB b) Simulación en Mmana.

Como puede apreciarse en la figura 3.3. b) el ángulo de azimuth para el cual la ganancia máxima cae 3 dB es de 39°, lo que se corresponde con los cálculos y deducciones teóricas de que para este dipolo el ancho del lóbulo entre puntos de mitad de potencia (HPBW) es de 78° [7], [30], [53].

Dipolo de lambda y media.

La ecuación del factor de forma del campo eléctrico en el plano ecuatorial para el dipolo de lambda y media con orientación horizontal es:

$$E(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{3\pi}{2} \cos\varphi\right)}{\sin\varphi} \quad (3.3)$$

Se plotea la ecuación anterior en MATLAB y se simula la antena en Mmana. Los resultados se pueden observar en la figura 3.4:

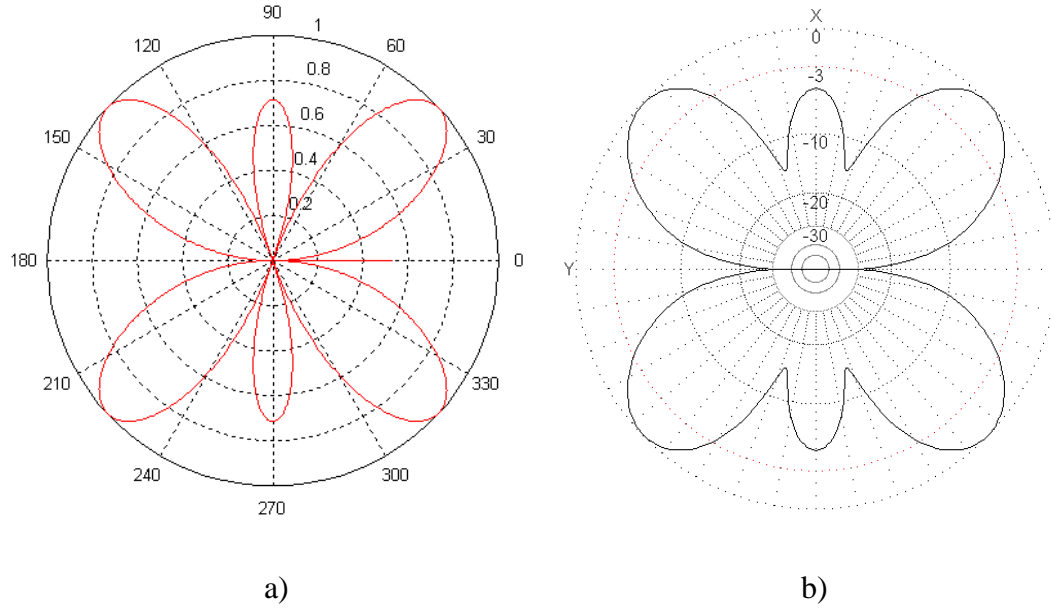


Figura 3.4. Campo eléctrico en el plano ecuatorial para la antena dipolo de $\lambda/2$ con polarización horizontal. a) Representación en MATLAB b) Simulación en Mmana.

3.3.2 Simulaciones de la práctica # 2

Se simula el conjunto que se estudia en esta práctica en distintas configuraciones de alimentación, con desfase 0° y 180° , casos que se denominan *Broadside* y *Endfire*, respectivamente.

Caso *Broadside*.

La ecuación del factor de forma del campo eléctrico en el plano ecuatorial para este conjunto con orientación horizontal y alimentación cofásica es la que sigue:

$$E(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right) \quad (3.4)$$

Se plotea la ecuación en MATLAB y se simula la antena en Mmana. Los resultados se pueden observar en la figura 3.5:

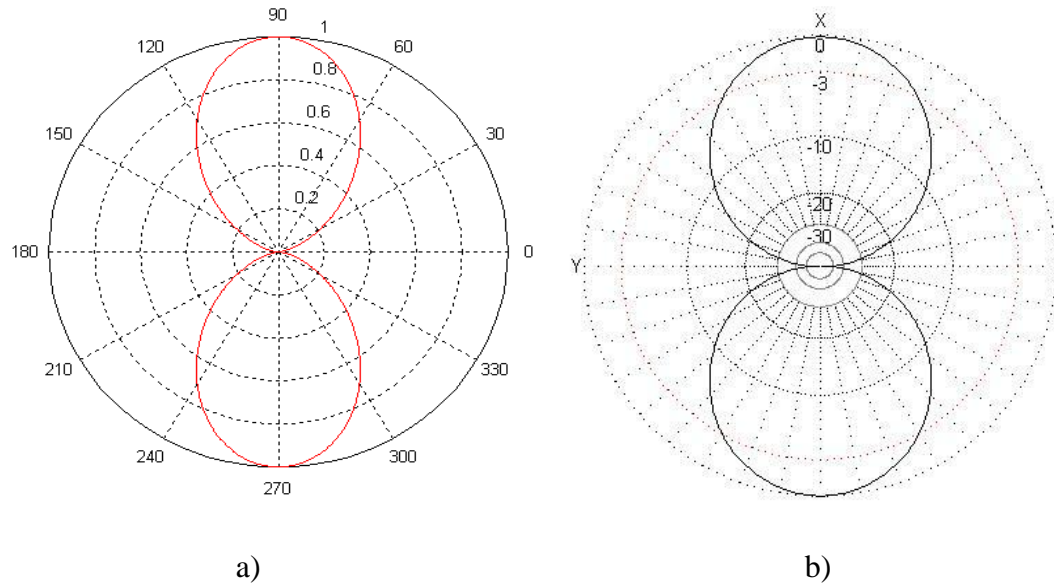


Figura 3.5. Campo eléctrico en el plano ecuatorial para el conjunto de dos dipolos activos con polarización vertical y alimentación cofásica. a) Representación en MATLAB. b) Simulación en Mmana.

Caso *Endfire*.

La ecuación del factor de forma para el campo eléctrico en el plano ecuatorial para este conjunto con polarización horizontal y alimentación en oposición de fase es:

$$E(\varphi) = \text{sen} \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \cos \varphi \right] \quad (3.5)$$

Se plotea la ecuación en MATLAB y se simula la antena en Mmana. Los resultados se pueden observar en la figura 3.6:

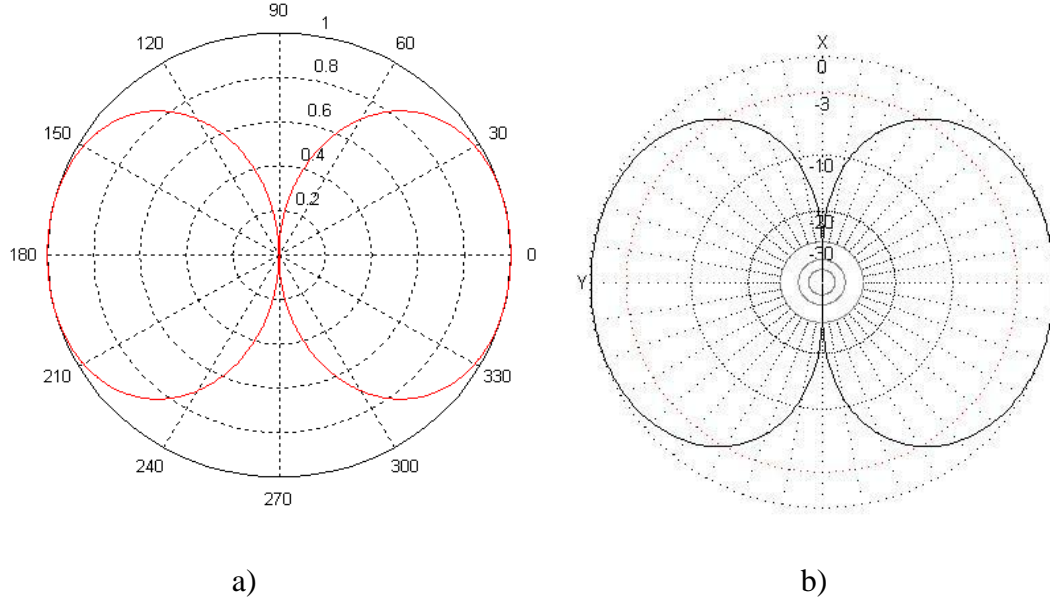


Figura 3.6. Campo eléctrico en el plano ecuatorial para el conjunto de dos dipolos activos con polarización vertical y alimentación en oposición de fase. a) Representación en MATLAB. b) Simulación en Mmana.

Como se puede observar en las figuras 3.5 y 3.6 el conjunto en configuración *broadside* es más directivo que en configuración *endfire*: el primero tiene los lóbulos más estrechos por lo que se infiere que concentra más el haz de radiación. Desde el punto de vista analítico se demuestra que la configuración *broadside* tiene el doble de ganancia que la configuración *endfire* [7].

3.3.3 Simulaciones de la práctica # 3

Debido a la complejidad que representa obtener analíticamente la ecuación del factor de forma para una Yagi cuando el número de elementos que la compone es mayor que dos, lo que se plotea en MATLAB es un esbozo del factor de forma del campo eléctrico en el plano horizontal, que se aplica al conjunto más elemental, el de dos elementos, compuesto por el dipolo excitado y un elemento parásito como director. Para este conjunto la ecuación para el factor de forma del patrón de campo eléctrico en el plano ecuatorial queda como sigue:

$$E(\varphi) = \cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\sin\varphi\right] \times \sqrt{2.42 + 2.38\cos\left(\frac{2\pi}{10}\cos\varphi - \frac{8\pi}{10}\right)} \quad (3.6)$$

Se plotea la ecuación 3.6 en MATLAB y en Mmana se simula el conjunto que representa la antena Yagi de cinco elementos que se diseña en el epígrafe 3.1.3. Los resultados se pueden observar en la figura 3.7:

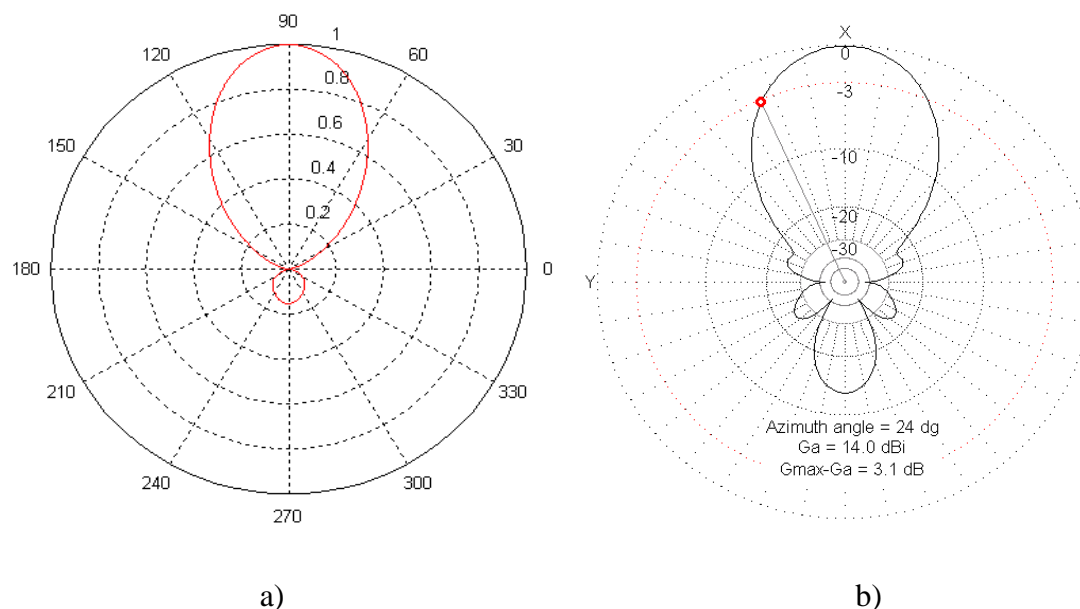


Figura 3.7. Campo eléctrico en el plano ecuatorial para la antena Yagi más elemental con polarización horizontal. a) Representación en MATLAB b) Simulación en Mmana.

3.4 Resultados prácticos obtenidos con el SAMPRA

Todo el equipamiento que se analiza en el capítulo anterior se coloca en disposición de realizar las mediciones.

El Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas se pone a prueba en el cuarto piso de la FIE con los tres tipos de antenas diseñados en el epígrafe 3.1.

3.4.1 Resultados de la práctica # 1

Se ponen a prueba en el SAMPRA los dipolos que se diseñan en el epígrafe 3.1.1, se realizan las mediciones y se obtienen los siguientes resultados:

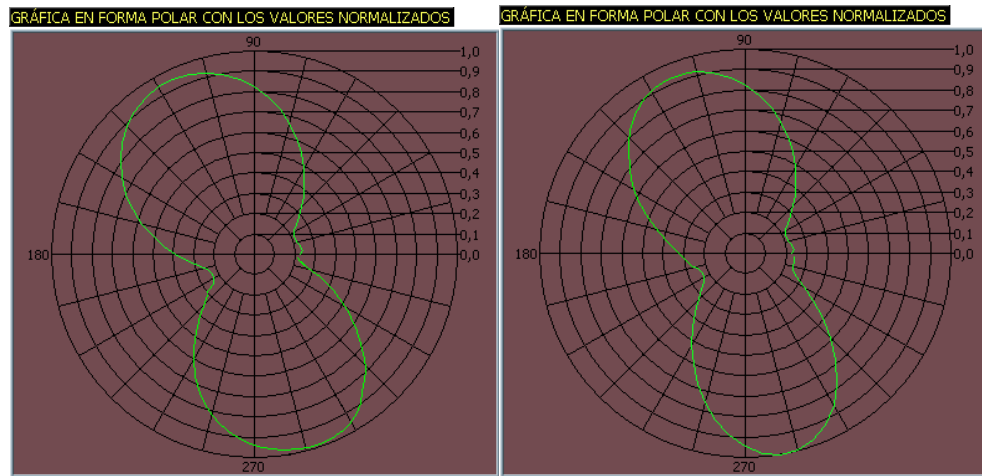
Dipolo de media lambda.

Figura 3.8. Dos muestras del patrón de radiación que se obtiene en el SAMPRA para el dipolo simétrico simple de media lambda con polarización horizontal.

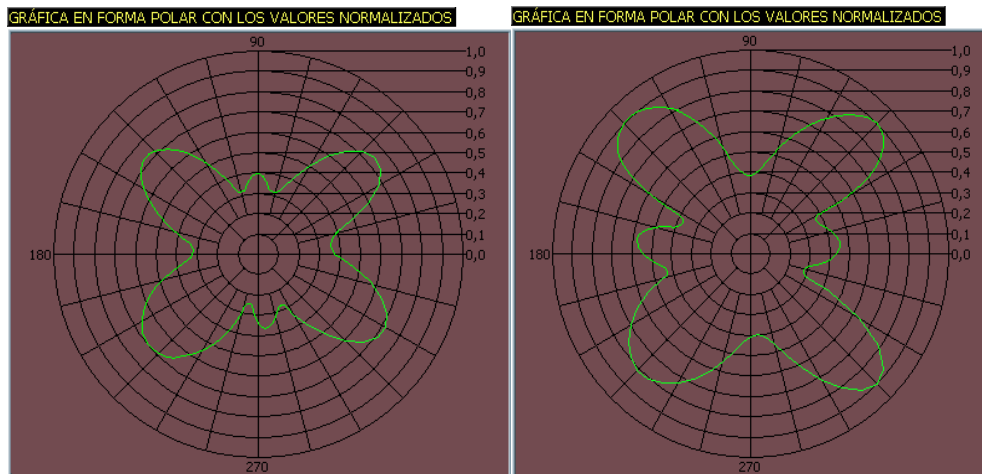
Dipolo de lambda y media.

Figura 3.9. Dos muestras del patrón de radiación que se obtiene en el SAMPRA para el dipolo simétrico simple de lambda y media con polarización horizontal.

3.4.2 Resultados de la práctica # 2

El conjunto de dipolos que se diseña en el epígrafe 3.1.2 se pone a prueba bajo sus dos configuraciones más conocidas:

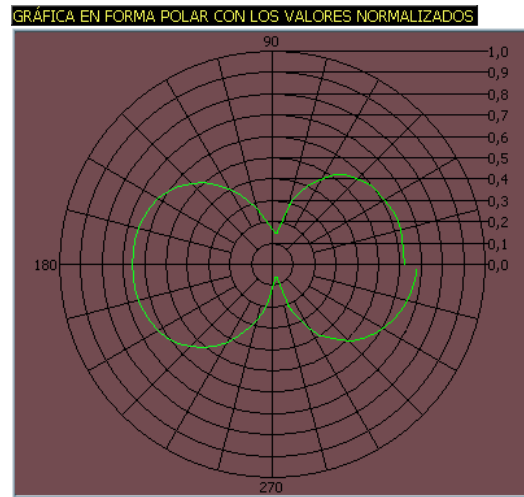
Configuración *Endfire*.

Figura 3.10. Patrón de radiación que se obtiene en el SAMPRA para los dos dipolos acoplados alimentados en oposición de fase con polarización vertical.

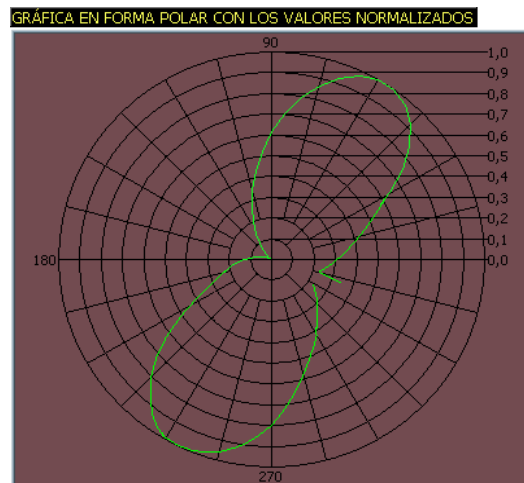
Configuración *Broadside*

Figura 3.11. Patrón de radiación que se obtiene en el SAMPRA para los dos dipolos acoplados alimentados en fase con polarización vertical.

3.4.3 Resultados de la práctica # 3

La antena Yagi que se diseña en el epígrafe 3.1.3 se construye y luego se pone a prueba en el SAMPRA descrito en el capítulo anterior. Los resultados se pueden observar en la figura 3.12:

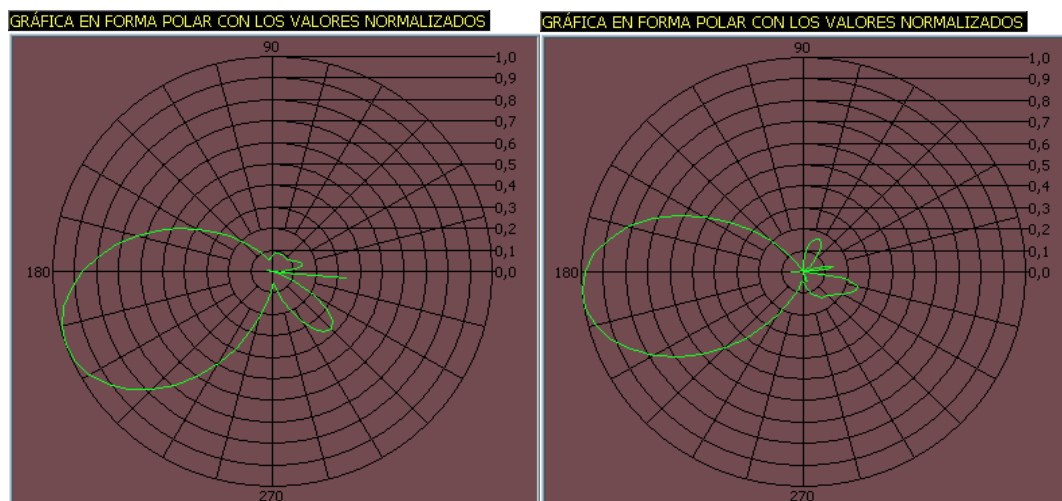


Figura 3.12. Dos muestras del patrón de radiación obtenidos en el SAMPRA para la antena Yagi con polarización horizontal.

3.5 Comparación de los resultados obtenidos en el SAMPRA con los que se obtienen en simulación y su correspondencia teórica

Como se aprecia, los resultados obtenidos con el SAMPRA para cada antena mantienen aproximadamente el mismo factor de forma que las simulaciones en Mmana y su correspondencia teórica. Es necesario acotar que los mínimos que se deben obtener no se alcanzan con total claridad, en muchos casos no tocan el cero de la gráfica, aunque se aproximan significativamente; esto se debe al escenario donde se realizan las mediciones que, además de ser bombardeado por la RF de los canales de televisión 3; 5; 14 y 20 y estaciones de ondas medias muy cercanas, está muy influenciado por las reflexiones en las paredes del inmueble donde se realizan las mediciones. Otro rasgo negativo en las gráficas que se obtienen con el SAMPRA es la no simetría de los mínimos, efecto que encuentra su explicación en la presencia del *stub* sintonizador que irradia la energía del contenido de frecuencia que atenúa.

3.6 Limitaciones que impone la utilización del SAMPRA y el escenario de medición en que se aplica

1. Se hace difícil mantener bajo niveles aceptables las reflexiones indeseadas que provienen de tierra y de objetos circundantes.

2. Las mediciones se realizan en exteriores donde priman los ambientes descontrolados electromagnéticamente.
3. El sistema no es adecuado bajo cualquier condición climatológica, por ejemplo, no es funcional bajo fuertes lluvias.
4. Los resultados que se obtienen están influenciados por la presencia del *stub*, que resuelve un gran problema pero plantea otro.
5. Parte del equipamiento que se utiliza es sensible a la humedad y a los largos períodos de almacenamiento.
6. Cualquier sistema de medición, independientemente del protocolo y los equipos que utilice, es caro.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de los estudios, análisis y experimentaciones realizadas durante la presente investigación se puede arribar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones

- La práctica es esencial para el aprendizaje de toda ciencia, y su complemento con la teoría debe ser fundamental para la comprensión a fondo de la asignatura de Antenas.
- Se logró poner a punto el Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas después de haber realizado los ajustes necesarios en los bloques de posicionamiento y acondicionamiento de señal así como en el Instrumento Virtual que controla todo el proceso de la medición.
- Se diseñaron, simularon y construyeron los tres tipos de antenas que se utilizan en las prácticas y se ponen a prueba en Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas.
- Se implementó el Sistema Automático de Medición de Patrón de Radiación de Antenas en condiciones de campo, resolviéndose el problema del generador aunque esto requirió la implementación de un filtro pasa banda, con la obtención de resultados prácticos que se corresponden con las simulaciones y con las deducciones teóricas.
- Se elaboró un folleto que puede ser utilizado como guía de prácticas de laboratorio para la asignatura de Antenas, el cual incluye el estudio de un grupo de antenas simuladas y probadas, con buenos resultados al establecer comparación entre los resultados teóricos con los prácticos.

Recomendaciones

- Utilizar el conjunto de prácticas que se elaboró y que se ha validado mediante simulaciones y pruebas prácticas, como apoyo en la enseñanza de la asignatura de Antenas.
- Implementar un circuito sintonizador electrónico para eliminar el *stub* y la influencia del mismo sobre los patrones de radiación que se obtienen. El sintonizador puede colocarse en la tarjeta de adquisición que se le ha incorporado al bloque de acondicionamiento de señal, justo después del amplificador aislador.
- Modificar el protocolo de comunicación que se emplea, y en consecuencia parte del *software* y del *hardware* para conseguir que la comunicación entre la PC y los periféricos del SAMPRA sea por vía USB, lo que le imprime al sistema mayor funcionalidad así como mayores prestaciones y nivel tecnológico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anónimo. (15 de marzo de 2011). *Stepper Motor 23LM-C701-01*. Disponible en: <http://www.trademe.co.nz/Business-farming-industry/Industrial/Engines-motors/Electric/auction-379976227.htm>
- [2] AntennaLab. (22 de marzo de 2011). *AntennaLab Student's Workbook 57-200-USB-0S*. Disponible en: http://academic.cankaya.edu.tr/~basdemir/downloads/lab_manual.pdf
- [3] D. ANTENNAS and M. EQUIPMENT, "International TV Standard," ed, pp. 57-58.
- [4] ARRL. (2011). *The ARRL Antenna Book (88th ed.)*.
- [5] AsRock. (2006, 15 de marzo de 2011). *775i65G User Manual*. Disponible en: <ftp://174.142.97.10/manual/775i65G.pdf>
- [6] C. d. Autores, "Curso de Universidad para Todos: Fundamentos de la Ciencia Moderna," ed. La Habana, 2000.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory. Analysis and Design*, Second ed.: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [8] J. C. J. Savant, *et al.*, *Diseño electrónico. Circuitos y sistemas.*: Prentice Hall, 1994.
- [9] C. C. Cutler, *et al.*, *Microwave Antenna Measurements*: Proc. I. R. E.
- [10] D. T. Paris, *et al.*, "Basic Theory of Probe-Compensated Near-Field Measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-26, No. 3, pp. 373-389, May 1978.
- [11] A. DEVICES. (2001, 19 de abril de 2011). AD7829 Sampling ADC. Disponible en: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-5/DSA-80174.html>
- [12] O. Electronics. (10 de mayo de 2011). *Antenna Training System AT-1005*. Disponible en: <http://www.indiamart.com/omegaelectronics/training-systems.html>
- [13] A. B. Elías, *Electrodinámica y propagación de ondas de radio*. Moscú: Mir.
- [14] B. R. I. Factory, "RF mV Voltmeter Operating Manual," ed, 1987.
- [15] R. Feick, *et al.* Criterios y procedimientos para mediciones de propagación electromagnética en espacios confinados.

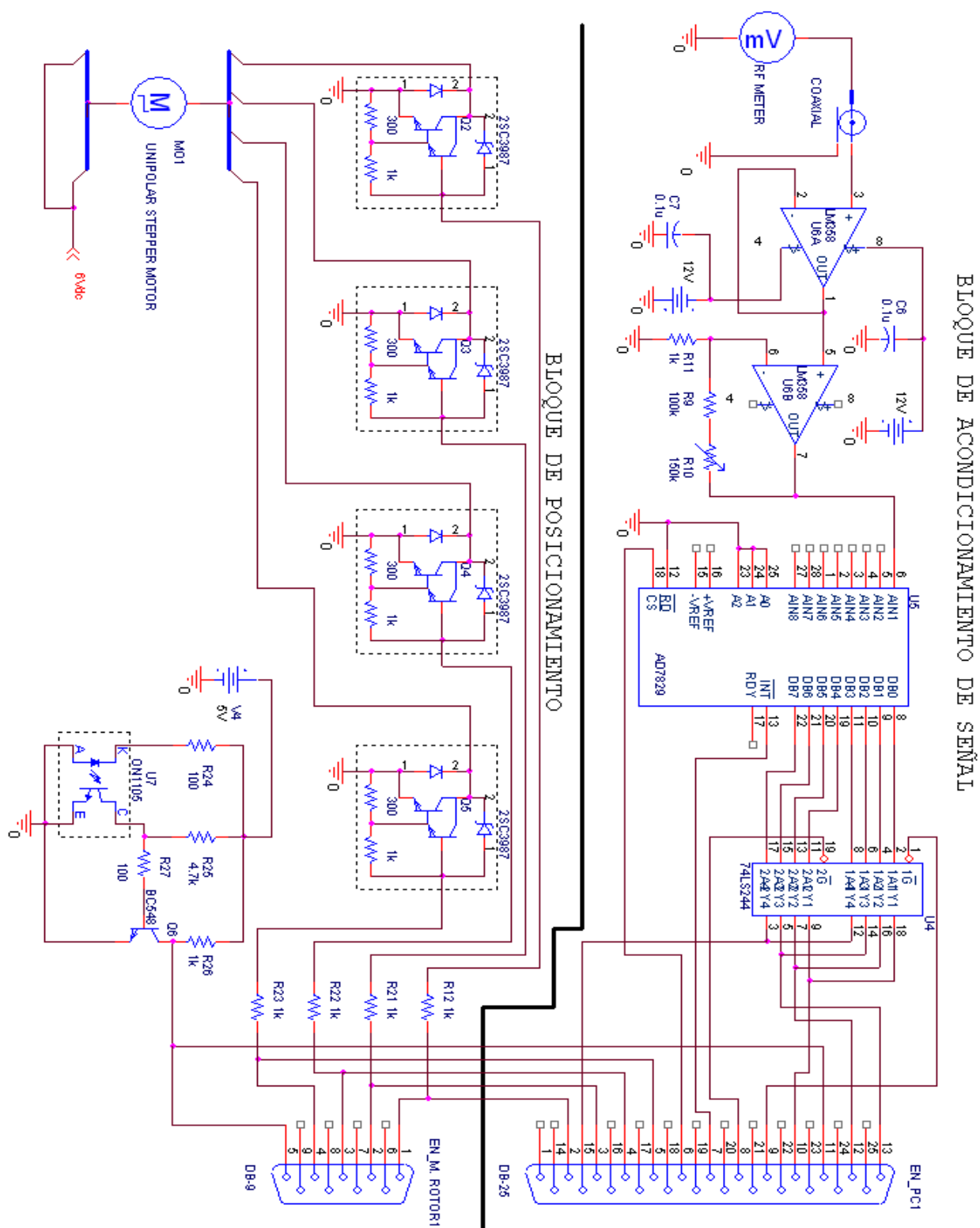
-
- [16] F. Hall. (2000, 25 de mayo de 2011). Medios de Transmisión. Cámaras Anecoicas. Disponible en: <http://www.angelfire.com/electronic/pfierro/docs/anecoicas.pdf>
- [17] J. S. Hollis, *et al.*, *Microwave Antenna Measurements*. Atlanta, Georgia: Scientific Atlanta, Inc., 1970.
- [18] C. A. Holt, *Introduction to Electromagnetic Fields and Waves*, ed. La Habana, 1968.
- [19] IEEE, "Standard Test Procedures for Antennas," ed, 1979.
- [20] IEEE, "Standard Definitions of Terms for Antennas," ed, 1983.
- [21] IEEE, "Standard Signaling Method for a Bidirectional Parallel Peripheral Interface for Personal Computers," ed, 1994.
- [22] IEEE. 1997, Automated Data Acquisition and Analysis at the Benefield Anechoic Facility. (25 de mayo de 2011). Disponible en: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA319104>
- [23] H. Jasik, *ANTENNA ENGINEERING HANDBOOK*, 1961.
- [24] R. Jiménez, "Características direccionales de las antenas," Presentado en la Conferencia # 1 del plan de estudios D de la asignatura Antenas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de la Villas, Santa Clara, 2010.
- [25] R. Jiménez, "Conjuntos de dipolos alimentados y parásitos," Presentado en la Conferencia # 7 de Antenas para el plan de estudios D de la asignatura Antenas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de la Villas, Santa Clara, 2010.
- [26] R. Jiménez, "Antena Uda-Yagi. Métodos de diseño," Presentado en la Conferencia # 8 del plan de estudio de la asignatura Antenas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de la Villas, Santa Clara 2010.
- [27] R. C. Johnson, *et al.*, "Determination of Far-Field Antenna Patterns from Near-Field Measurements," *Proc. IEEE*, vol. 61 No. 12, pp. 1668-1694, December 1973.
- [28] E. C. Jordan y K. G. Balmain, *Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes*, Segunda ed. Madrid: PARANINFO S. A., 1978.
- [29] J. Karakash, *Líneas de Transmisión y Filtros Eléctricos*, 1962.
- [30] J. D. Kraus, *ANTENNAS*. La Habana, 1966.
- [31] LabVolt. (2010, 22 de marzo de 2011). Lab-Volt Antenna Training and Measuring System Model 8092. Disponible en: <http://www1.labvolt.com/publications/Datasheets/Current2/dse8092.pdf>
- [32] LabVolt. (2010, 22 de marzo de 2011). Lab-Volt Antenna Training and Measuring System Model 8091. Disponible en: <http://www1.labvolt.com/publications/Datasheets/Current2/dsa8091.pdf>
- [33] E. A. Laport, *Radio Antenna Engineering*, 1952.

- [34] A. Lima, "Sistema de adquisición y control de datos por puerto paralelo," Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 2002.
- [35] L. Man&Tel Co. (10 de mayo de 2011). *Wave and Antenna Training System WATS-2002*. Disponible en: www.testequipmentdepot.com/unisource/pdf/wats2002_ds.pdf
- [36] G. Markov y D. Sazonov, *Antenas*. Moscú, 1989.
- [37] S. B. Martínez, "Contribución a la evaluación de la incertidumbre en la medición de los principales parámetros de antenas," Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [38] T. A. Milligan. (2005). *Modern Antenna Design*.
- [39] J. Millman, *Microelectronics. Digital and Analog Circuits and Systems*, 1982.
- [40] MITSUBISHI. (1990, 19 de abril de 2011). M74LS244P. Disponible en: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-20/DSA-397183.html>
- [41] D. Morales, "Comunicación serie y paralelo de la PC," Presentado en la Conferencia # 11 del plan de estudios D de la asignatura Sistemas con Microprocesadores, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de la Villas, Santa Clara, 2010.
- [42] S. Mueller. (2010). *Upgrading and Repairing PCs (19th ed.)*.
- [43] Panasonic. (2001, 19 de abril de 2011). CNZ1105 Photo Interrupter. Disponible en: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-24/DSA-474599.html>
- [44] V. R. Pereyra. (2004, 25 de mayo de 2011). Introducción a las cámaras anecoicas para mediciones de campo electromagnético. Disponible en: <http://www.cenam.mx/simposio2004/memorias/TA-026.pdf>
- [45] M. M. Pérez y N. B. Sánchez, "Interfaz para la medición de patrones de radiación de antenas," Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2006.
- [46] J. M. H. Rábanos, *Transmisión por Radio*. La Habana, 2002.
- [47] E. G. R. Rives, "Prácticas de Laboratorio de Antenas," Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2010.
- [48] SANYO. (2003, 19 de abril de 2011). 2SC3987 Driver Applications. Disponible en: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-30/DSA-580540.html>
- [49] P. Scherz. (2000). *Practical Electronics for Inventors*.
- [50] F. SEMICONDUCTOR. (2001, 19 de abril de 2011). LM7805 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator. Disponible en: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-11/DSA-211848.html>
- [51] O. Semiconductor. (2006, 19 de abril de 2011). LM358 Single Supply Dual Operational Amplifier. Disponible en: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-10/DSA-198608.html>
- [52] I. R. Sinclair y J. Dunton. (2007). *Practical Electronics Handbook (Sixth ed.)*.

-
- [53] E. P. Stincer, *Antenas. Teoría General*. La Habana, 2001.
 - [54] W. L. Stutzman y G. A. Thiele, *ANTENNA THEORY AND DESIGN*, 1981.
 - [55] P. H. F. Vitola. (2000). *Medios de Transmisión. Cámaras Anecoicas*.

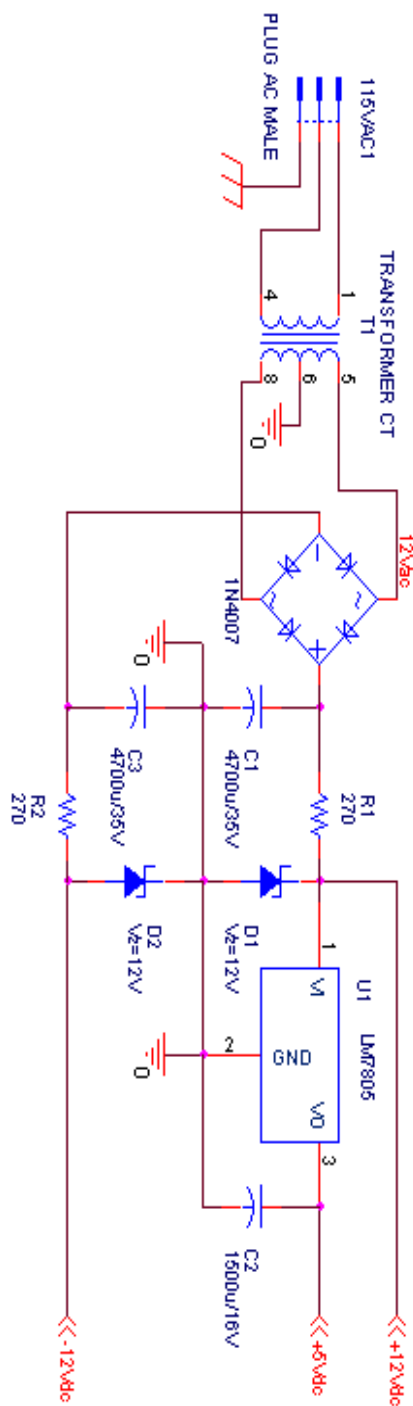
ANEXOS

Anexo # 1. Esquema eléctrico de la tarjeta de adquisición y del controlador del mecanismo rotor

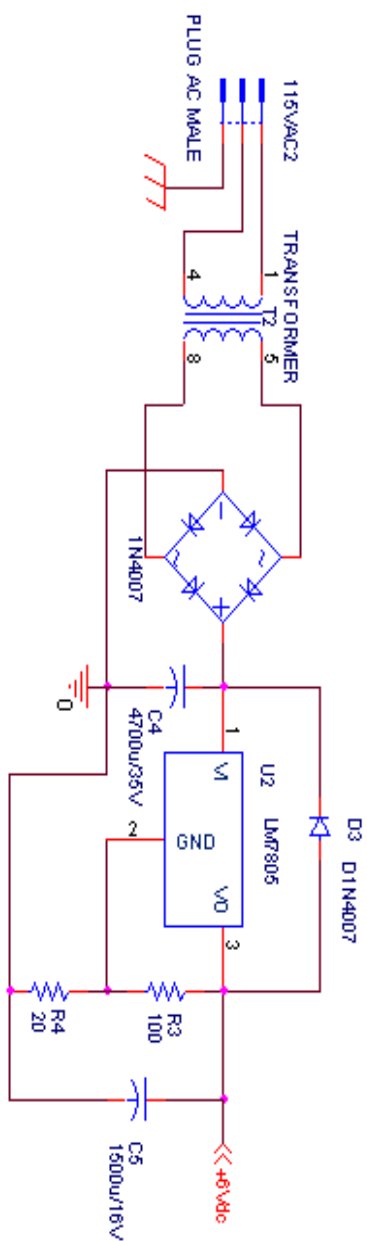


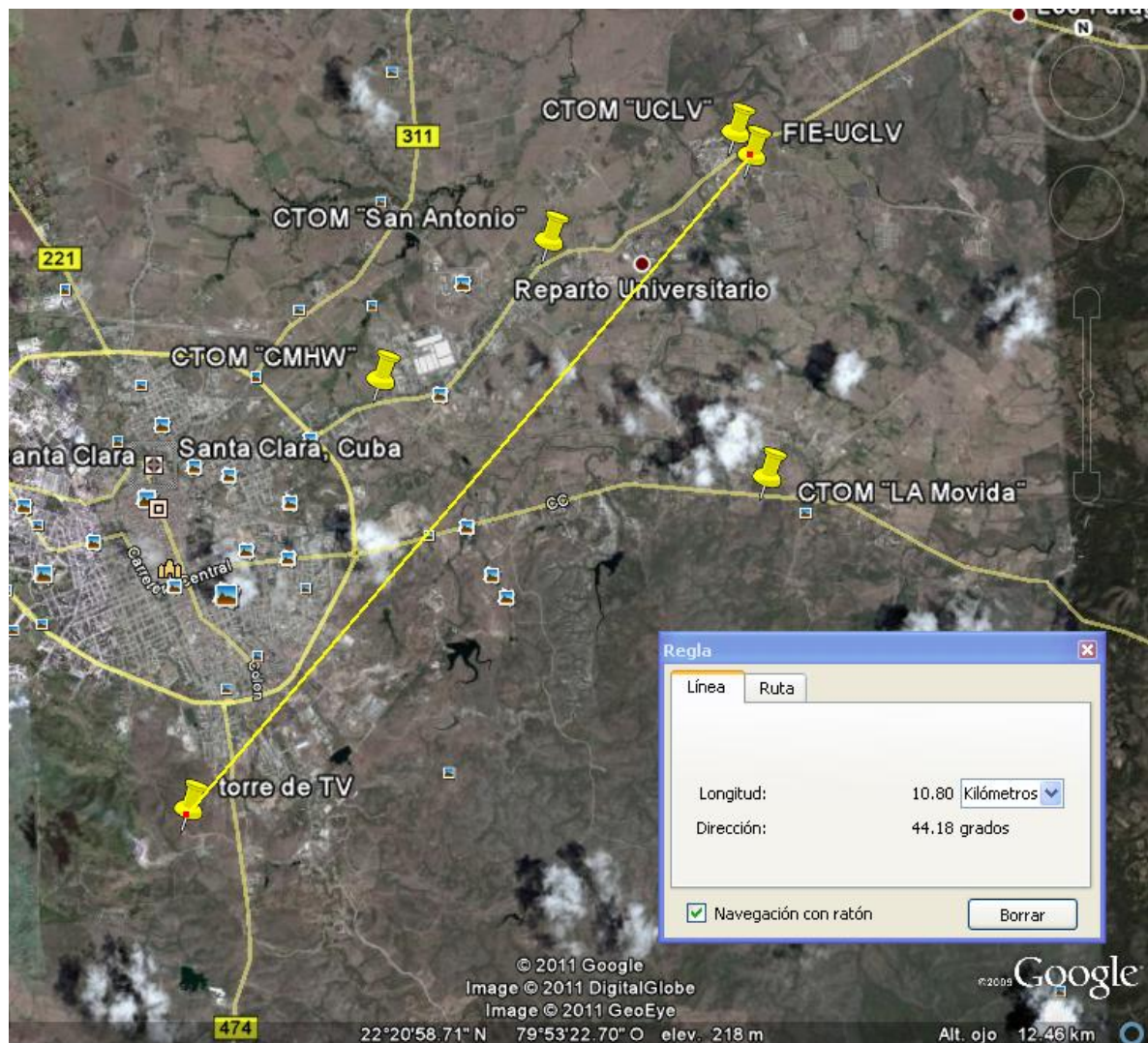
Anexo # 2. Fuentes de alimentación de la tarjeta de adquisición y del controlador del mecanismo rotor

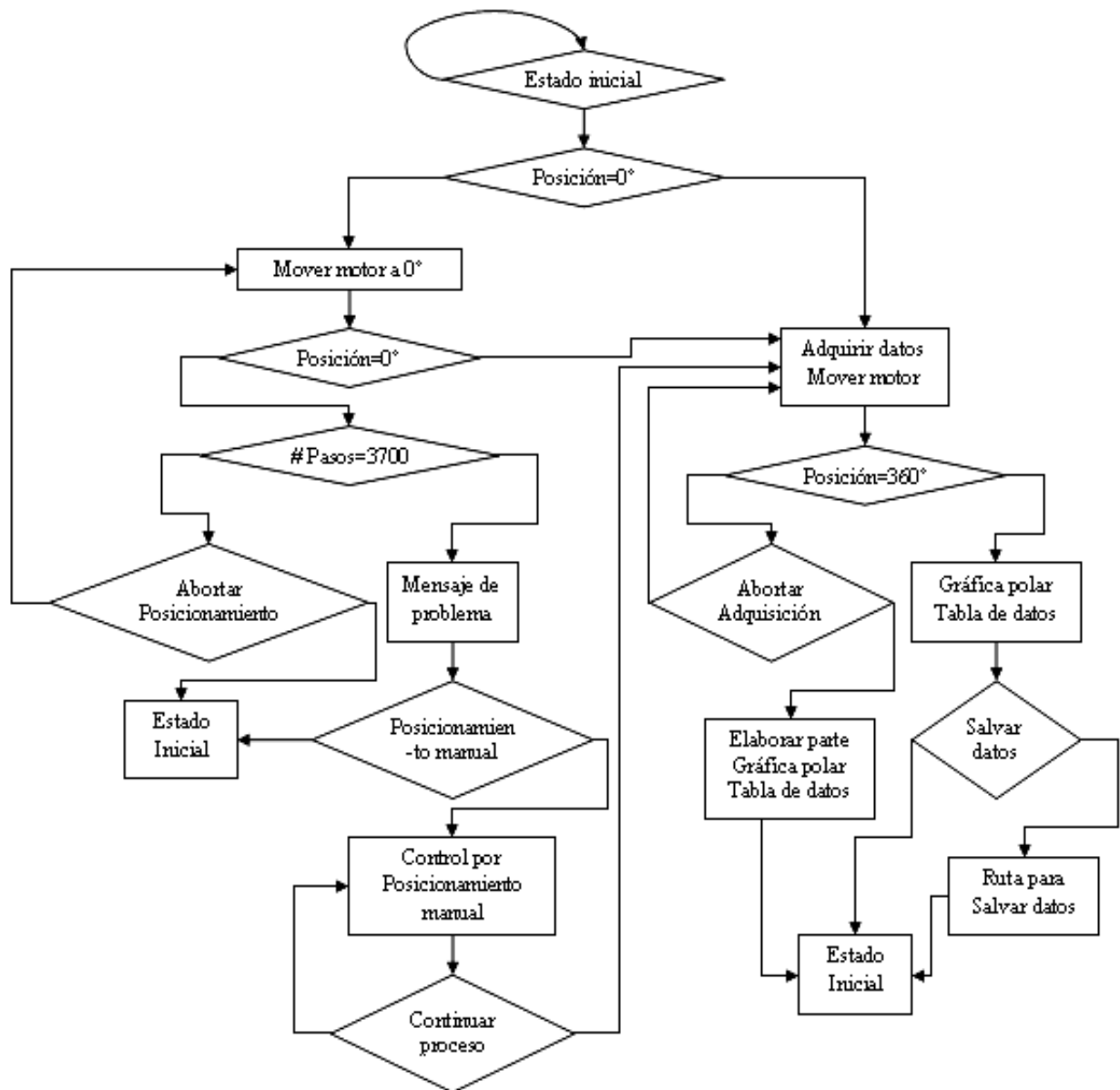
FUENTE DEL BLOQUE DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL



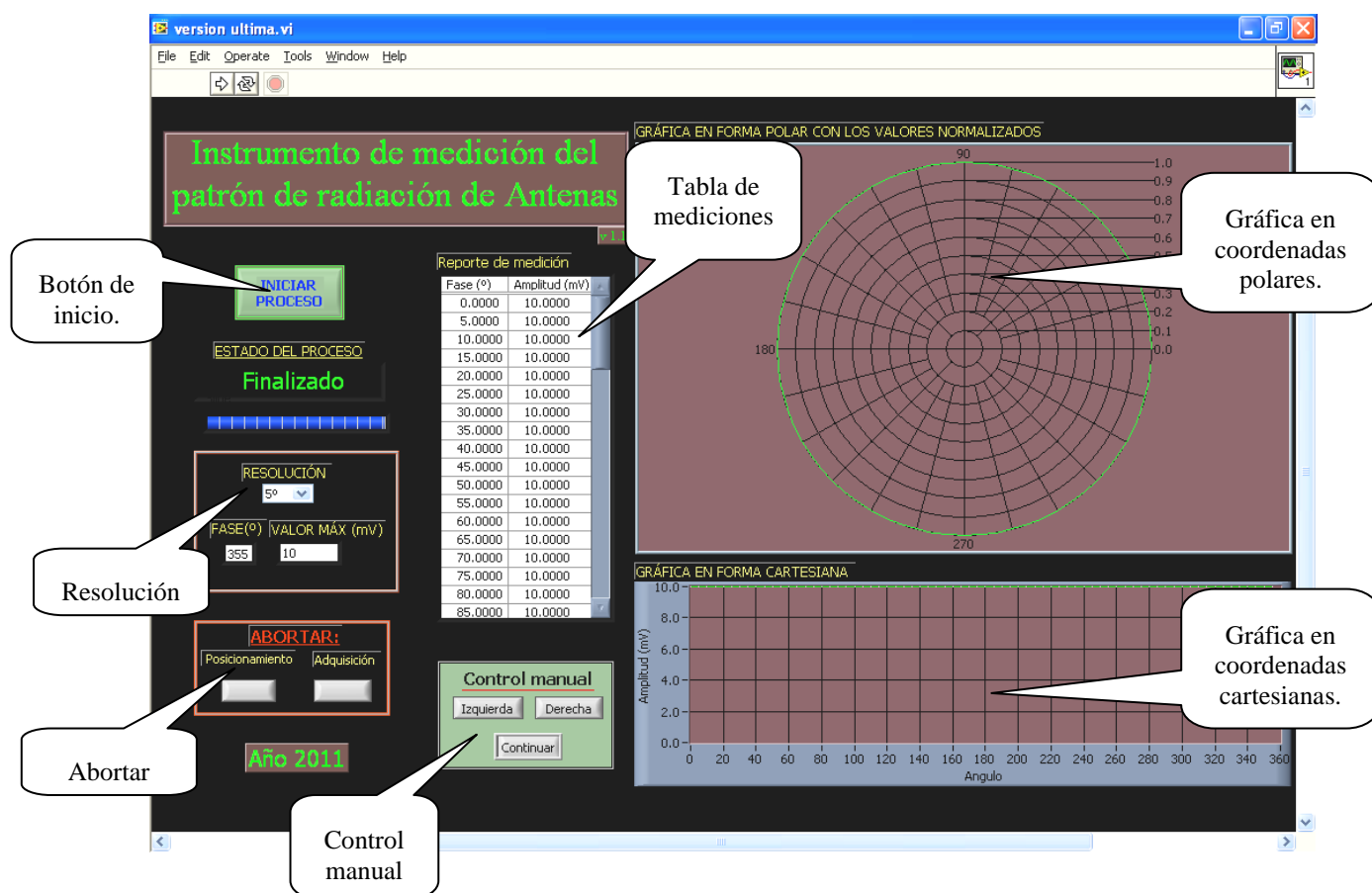
FUENTE DEL BLOQUE DE POSICIONAMIENTO



Anexo # 3. Distancia entre la torre de TV en loma Dos Hermanas y la FIE

Anexo # 4. Diagrama de flujo para la realización del *software*

Anexo # 5. Panel frontal del software que se utiliza



Anexo # 6. Diagrama de bloques del *software* que se utiliza

