

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA TRANSFORMACIÓN DE CAMPO CERCANO A CAMPO LEJANO EN AMBIENTE NO REFLECTIVO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Núñez H, Lorena C.
Para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA TRANSFORMACIÓN DE CAMPO CERCANO A CAMPO LEJANO EN AMBIENTE NO REFLECTIVO

Profesor Guía: Lic. Msc. Franklin Martínez.
Tutor Industrial: Ing. Msc. Paolo Maragno

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Núñez H, Lorena C.
Para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2008



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES



CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 06 de junio de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Lorena C. Nuñez H., titulado:

**“DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA TRANSFORMACIÓN DE
CAMPO CERCANO A CAMPO LEJANO EN AMBIENTE NO
REFLECTIVO.”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Comunicaciones, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Luis Fernández
Jurado

Prof. Zeldívar Bruzual
Jurado

Prof. Franklin Martínez
Prof. Guía



Edificio Escuela de Ingeniería Eléctrica, piso 1, oficina 201, Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos, Caracas 1051, D.F.
TELÉFONOS. (VOZ) +58 212 6053300 (FAX) +58 212 6053105
Mail: cic-com@elecricsc.ing.ucv.ve



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
"MELCHOR CENTENO VALLENILLA"



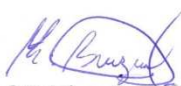
A C T A

Quienes Suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela para examinar el Trabajo de Grado presentado por la Bachiller, **LORENA C. NÚÑEZ H.** Cédula de Identidad N° 15.183.802 bajo el título **"DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA TRANSFORMACIÓN DE CAMPO CERCANO A CAMPO LEJANO EN AMBIENTE NO REFLECTIVO."**; a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de Ingeniero Electricista, dejan constancia de lo siguiente:

Considerando que el Trabajo de Grado presentado y defendido por la Bachiller en referencia, presenta un grado de originalidad y excelencia tanto en su contenido como en su presentación formal que lo convierte en una fuente referencial útil, acuerda por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORIFICA**, al Trabajo de Grado antes mencionado.

En Caracas, a los seis (06) días del mes de junio del 2008.


Prof. Luis Fernández
Jurado


Prof. Zeldivar Bruzual
Jurado


Prof. Franklin Martínez
Prof. Guía



Edificio Escuela de Ingeniería Eléctrica, piso 2, Ciudad Universitaria
Los Chaguaramos, Caracas 1051, D.F.
Teléfono: (581) 6053306 - Fax: (581) 6053105

DEDICATORIA

A mi mamá, por ser la más maravillosa del mundo

A mi hermana, por ser incondicional conmigo

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por escucharme todas las mañanas.

A mi mamá, a mi hermana Lissett, Nelson y mi tía Ely y Beatriz por su amor y todo su apoyo, sin ustedes no hubiese podido lograr hacer todas las locuras que me invento.

A mi papá, del cual estoy muy orgullosa, es un ejemplo de superación en la vida.

A mis hermanos, Carlos, Alfredo y Ana Cristina por ser una luz en mi vida.

A mi maestro Vicente Abad por enseñarme lo que es la mística del trabajo, al profesor Juan Vicente Gonzales, por inculcarme el amor a la física y las matemáticas.

A Fina, Cecilia y todas las personas que me acompañaron en Tempo, por ser una segunda familia para mi.

A todas las personas que laboran en el CENDIT: Marialex, Omar, Maribel, Elvia, Pablito, Judith, Manuel, Rafael, Otoniel y el Ing. Rolando por toda su colaboración y cariño, especialmente a Moy, Karina y Iacutone por soportarme día a día.

A mis compañeros de universidad, Nury Guarán, Alberto Varela, Edward Varela, Miguel Román, José Miguel Becerra, Gabriel Romero, Carlos Mendez, Federico Spadaro, Fabio Castro, José Luis Padilla, Jonaith Hernández, Rafael Quiroz, Carlos Veroes y muy especialmente a Gerlis Caropresse.

A la familia Caropresse Galvis, por adoptarme en esos períodos eternos de parciales, gracias Sra. Lucy, sus chocolates calientes en medio de las sesiones de estudio en la madrugada no los olvidaré nunca.

A la familia Maragno Koroschetz por su paciencia y hospitalidad.

Al profesor Freddy Brito por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

A mi tutor académico Franklin Martínez, primero por hacer magia en sus clases de Propagación y Antenas, y segundo por su gran dedicación y paciencia.

A mi tutor industrial Paolo Maragno, no existen palabras para expresar tanto agradecimiento, pues mucho de lo que soy ahora se lo debo.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, muy especialmente a María Auxiliadora por toda su colaboración y paciencia.

Gracias a todas las personas que de una u otra manera me han apoyado a lo largo de estos años.

Núñez H., Lorena C.

DISEÑO DE UN ALGORITMO DE TRANSFORMACIÓN DE CAMPO CERCANO A CAMPO LEJANO EN AMBIENTE NO REFLECTIVO

Prof. Guía: Lic. Msc. Franklin Martínez. **Tutor Industrial:** Ing. Msc. Paolo Maragno. **Tesis.** Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. **Ingeniero Electricista. Opción:** Comunicaciones. **Institución:** CENDIT. 2008. 94 h + anexos.

Palabras claves: Transformación campo cercano a campo lejano; patrón de radiación; corrientes equivalentes; método de los momentos, cámara anecoica.

Resumen: Se desarrolla una herramienta computacional basada en el uso de **fuentes equivalentes de corriente** y el **método de los momentos** para la transformación de campo cercano – campo lejano, introduciendo innovaciones que permitan adaptar el método a un número mayor de tipo de antenas.

Es necesario disponer de herramientas de cálculo computacional que permitan obtener el patrón de radiación a partir de datos de mediciones en zona de campo cercano, utilizando metodologías adecuadas de análisis que permitan determinar el valor del campo en cualquier punto, conociendo el módulo y la fase de los componentes tangenciales del campo en una superficie que envuelva a la fuente generadora.

Para comprobar la validez del algoritmo, se proporcionan resultados de la aplicación de la herramienta a varios tipo de antenas lineales, construidos a partir de datos sintéticos en campo cercano, y el análisis comparativo de estos resultados con valores teóricos del patrón de radiación.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	iii
ACTA	iv
DEDICATORIA	v
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE	4
1.1.Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación y Alcance	5
1.3 Objetivo general	6
1.4 Objetivos específicos	6
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 Los principios de unicidad y equivalencia	15
2.3 Consideraciones preliminares	16
2.4 Descripción general del método de transformación de campo cercano a campo lejano	18
CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO	27
3.1 Diagrama de Flujo General del Algoritmo	27
3.2 Generación de la Matriz de los Momentos Ω	28
3.2.1 Organización de los datos de campo eléctrico medido	28
3.2.2 Organización de los parámetros de corriente	30
3.2.3 Organización de la Matriz de los Momentos Ω	32
3.3 Resolución del sistema matricial	35
3.4 Transformación a campo lejano	37
3.5 Descripción del código	38
3.5.1 Primer bloque. Módulo de la generación de la Matriz	39
3.5.2 Segundo bloque. Módulo de la resolución del sistema	48
3.5.3 Tercer bloque. Módulo de generación del patrón de radiación	52
3.6 Lista de variables	56

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
5.1 Esquema de medición de campo cercano	59
5.2 Dipolo eléctrico de media longitud de onda ($\lambda/2$)	62
5.3 Dipolo de dos longitudes de onda (2λ)	69
5.4 Dipolo de tres medias longitudes de onda ($3\lambda/2$)	72
5.5 Aro o dipolo eléctrico	75
5.6 Arreglo de dos dipolos	77
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
BIBLIOGRAFÍA	94
[ANEXO 1. FUNDAMENTOS DE RADIACIÓN]	95
[ANEXO 2. ZONAS DE RADIACIÓN]	102
[ANEXO 3. RADIACIÓN EN CAMPO LEJANO]	104
[ANEXO 4. ECUACIONES DEL DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA GENERACIÓN DE LA MATRIZ Ω]	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Teorema Vectorial de Green.....	9
Figura 2: Sistemas coordenados asociados a la fuente y al observador.....	18
Figura 3: Modelo de medición del campo cercano.....	19
Figura 4: Esquema del sistema coordenado en campo cercano.....	21
Figura 5: Sistemas coordenados para la Transformación a campo lejano.....	23
Figura 6: Diagrama de flujo general del algoritmo.....	27
Figura 7: Numeración de las caras del paralelepípedo de campo eléctrico.....	29
Figura 8: Estructura de la fuente de corriente.....	31
Figura 9. Estructura para crear una fuente volumétrica de corriente.....	32
Figura 10: Reorganización del vector de campo eléctrico.....	34
Figura 11: Cortes espaciales del patrón de radiación $\theta = \pi/2$ plano horizontal, $\varphi = \pi/2$ plano vertical.....	37
Figura 12. Esquema del programa principal.....	38
Figura 13: Diagrama de flujo del módulo generación del volumen de corriente.....	40
Figura 14: Datos de entrada para la generación de las posiciones de las fuentes de corriente. Archivo VOL.DAT.....	41
Figura 15: Diagrama de flujo del módulo que genera la Matriz Ω	42
Figura 16: Organización de las filas de la matriz.....	44
Figura 17: Evaluación de las ecuaciones E_x	45
Figura 18: Evaluación de las ecuaciones E_y	46
Figura 19: Evaluación de las ecuaciones E_z	47
Figura 20: Esquema general del módulo de resolución del sistema.....	49
Figura 21: Diagrama de flujo de la rutina Organiza el vector de los coeficientes de corriente.....	51
Figura 22: Diagrama de flujo del cálculo de la Potencia.....	52
Figura 23: Diagrama de Flujo del Generador de la Función de Directividad.....	53
Figura 24: Diagrama de Flujo del Generador de la Función de Directividad.....	54
Figura 25. Esquema básico de montaje.....	59
Figura 26: Posicionador XY [imagen obtenida de Nearfield Systems Inc.].....	60
Figura 27. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para un dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$).....	63
Figura 28: Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi = \pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$).....	66
Figura 29: Gráfica cartesiana de la Directividad plano $\varphi = \pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$).....	66

Figura 30. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica plano $\theta=\pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$).....	67
Figura 31 Gráfica cartesiana de las curvas de Directividad experimental numérica y analítica plano $\theta=\pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda. ($\lambda/2$)	68
Figura 32 Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para un dipolo de dos longitudes de onda (2λ)	70
Figura 33. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de dos longitudes de onda (2λ).....	70
Figura 34. Gráfica cartesiana de las curvas de directividad analítica y experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de dos longitudes de onda (2λ).....	71
Figura 35. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para un dipolo de tres medias longitudes de onda ($3\lambda/2$).....	73
Figura 36. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de tres medias longitudes de onda	73
Figura 37 Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad experimental numérica y analítica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de tres medias longitudes de onda ($3\lambda/2$)	74
Figura 38. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para una antena tipo aro.	75
Figura 39. Gráfica de la Directividad experimental numérica en el plano $\theta=\pi/2$, antena tipo aro o dipolo magnético	76
Figura 40 Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad experimental numérica y analítica en el plano $\theta=\pi/2$, antena tipo aro.....	76
Figura 41. Disposición de los dipolos	78
Figura 42. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para dos dipolos de media longitud de onda	78
Figura 43 Gráfica de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, arreglo de dos dipolos	79
Figura 44. Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad experimental numérica y analítica en el plano $\varphi=\pi/2$, arreglo de dos dipolos	79
Figura 45. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\theta=\pi/2$, arreglo de dos dipolos	81
Figura 46. Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad analítica y experimental numérica en el plano $\theta=\pi/2$, arreglo de dos dipolos.....	81
Figura 47. Dimensiones del paralelepípedo de medición y volumen de corriente 1 ..	83
Figura 48. Dimensiones del paralelepípedo de medición y del tercer tipo de volumen considerado como fuente de corriente para dos dipolos de media longitud de onda..	83
Figura 49. Comparación entre las funciones de directividad arrojadas para distintas configuraciones de fuente de corriente, en el plano $\varphi=\pi/2$ para un arreglo de dos dipolos.....	84

Figura 50. Comparación entre las funciones de directividad arrojadas para distintas configuraciones de fuente de corriente, en el plano $\theta=\pi/2$ para un arreglo de dos dipolos.....84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Número de filas y columnas por cara del paralelepípedo	30
Tabla 2: Archivo DATE.DAT	43
Tabla 3: Variables Generales	56
Tabla 4: Variables del módulo genera volumen	56
Tabla 5: Variables del módulo genera matriz	56
Tabla 6: Variables del módulo de resolución del sistema.....	57
Tabla 7: Variables del módulo de potencia.....	57
Tabla 8: Variables del módulo generador de la función de directividad	58
Tabla 9: Comparación de los resultados para el dipolo $\lambda/2$	69
Tabla 10: Comparación de los resultados para el dipolo 2λ	72
Tabla 11: Comparación de los resultados para el dipolo $3\lambda/2$	75
Tabla 12: Comparación de los resultados para la antena tipo aro.....	77
Tabla 13: Comparación de los resultados para el arreglo de dipolos en el plano $\varphi=\pi/2$	80
Tabla 14: Comparación de los resultados para el arreglo de dipolos en el plano $\theta=\pi/2$	82

INTRODUCCIÓN

Una de las características más importantes de una antena es su diagrama de radiación, el cual consiste en la representación de la amplitud o de la fase de los campos radiados en función de la dirección en el espacio. Es posible hallar estos patrones en forma teórica o a través de aplicaciones de simulación, pero es de gran importancia medir las características reales de la antena una vez fabricada para validar las predicciones teóricas, especialmente en zonas lejanas a la fuente.

Para medir estas características se pueden realizar pruebas en campo abierto, las cuales están sujetas a problemas de interferencia y de implementación práctica, o se pueden realizar pruebas en espacios cerrados utilizando cámaras especiales que simulan condiciones de espacio libre, llamadas cámaras anecoicas. Entre las ventajas del uso de estas cámaras se encuentran: eliminación de las reflexiones internas y de las interferencias externas, control de las condiciones climáticas.

En efecto, los métodos de medida de parámetros característicos de las antenas pueden dividirse en dos grandes categorías:

Mediciones en instalaciones de ensayo al aire libre, tales como: [1]

- Campos de medida en reflexión
- Campos de medida elevados
- Campos de medida inclinados

Mediciones en cámaras blindadas y en ausencia de reflexiones (cámaras anecoicas), en las cuales se simulan condiciones de espacio libre.

Las cámaras anecoicas son de tamaño finito, por lo que no siempre es posible realizar las mediciones en la zona que es considerada como campo lejano, por esa razón es necesario disponer de algoritmos de transformación de los valores medidos en campo cercano a valores de campo lejano, para así obtener la caracterización completa del sistema radiante. Estas técnicas se empezaron a desarrollar en los años 60' en Alemania, Inglaterra, Estados Unidos, posteriormente Francia y actualmente en Brasil, pero a pesar de que ya se han realizado varios estudios para la transformación del campo cercano al campo lejano es interés del Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en las Telecomunicaciones (CENDIT) y de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela recorrer las etapas tecnológicas que se han demostrado más prometedoras en este campo, a fin de desarrollar en primera persona estos métodos, adueñarse de la tecnología y en el futuro poder introducir soluciones innovadoras.

El presente trabajo pretende precisamente desarrollar un algoritmo computacional que permita hacer tal transformación, dado que el CENDIT tiene entre sus planes la construcción de una cámara anecoica para caracterización de antenas. De igual manera la Escuela de Ingeniería Eléctrica a través del Departamento de Comunicaciones ya tiene establecida una línea de investigación en el área de propagación y antenas, de ahí su interés para impulsar este tipo de estudios.

El trabajo consta de cuatro capítulos, en el primero se exponen los objetivos, la justificación y el alcance de la tesis. En el segundo se realiza un resumen de las principales técnicas de transformación de campo cercano a campo lejano y de su desarrollo en el tiempo. Posteriormente, en el mismo capítulo, se presentan los fundamentos teóricos básicos necesarios para luego introducir conceptualmente el método de transformación de campo cercano a campo lejano basado en el concepto de fuentes equivalentes de corriente.

El tercer capítulo contiene el desarrollo del algoritmo, en primer lugar se elabora el sustento teórico del mismo, para lo cual éste se dividió en tres grandes bloques, a saber: generación de la matriz de los momentos, resolución del sistema de ecuaciones que deriva de la misma y generación del patrón de radiación. En segundo lugar se describe el código, en donde estos tres grandes bloques son desglosados en módulos más pequeños, explicados mediante diagramas de flujo que muestran al detalle la estructura del algoritmo, además de todos los archivos y las variables más importantes.

El cuarto capítulo consta del esquema básico de medición y de los experimentos numéricos realizados con el fin de validar el algoritmo.

Todas las unidades utilizadas en el cuerpo del trabajo pertenecen al sistema internacional de medidas MKS.

CAPÍTULO I

JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

1.1. Planteamiento del problema

Se desea determinar el patrón de radiación de una antena, realizando mediciones en una cámara anecoica, la cual tiene la ventaja de ser un ambiente controlado libre de reflexiones internas ni interferencias externas, o sea simula las condiciones de espacio libre, con la desventaja de presentar limitaciones con respecto a las distancias a las cuales se pueden realizar dichas mediciones.

Generalmente se definen tres zonas de campo, con características diferentes (ver ANEXO 2) a saber, el **campo cercano reactivo**, zona en donde la mayor cantidad de la energía entregada al ambiente por la antena es absorbida de nuevo por el sistema en el siguiente ciclo de tiempo. La segunda zona se denomina **campo cercano radiante** y su característica principal es que la distribución angular de la radiación depende de la distancia en que se encuentre el punto de medición. La tercera zona, se denomina de **campo lejano** en donde la distribución angular de la radiación ya no depende de la distancia, y se le da el nombre de “patrón de radiación”. Por otro lado, se debe tomar en consideración que en campo cercano las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento electromagnético del campo generado por una fuente son muy complicadas, mientras que en campo lejano es posible realizar aproximaciones que simplifican las citadas expresiones.

No siempre es posible obtener directamente el patrón de radiación de una antena en una cámara anecoica por razón de limitación de espacio físico, de manera que es importante disponer de una herramienta computacional que permita obtener el patrón de radiación de la antena a caracterizar a partir de mediciones de campo eléctrico en zona cercana.

1.2. Justificación y Alcance

La medición directa del campo lejano requiere de unas instalaciones y de un instrumental muy complejo y costoso, además de presentar la desventaja de no poseer un ambiente con condiciones controladas, por lo que es más eficiente utilizar el método indirecto anteriormente descrito.

Si bien es cierto que en el mercado existen sistemas completos de medición del campo cercano, incluso en cámaras anecoicas, y herramientas computacionales que permiten la obtención del campo lejano a partir de datos de medición del campo cercano, en Venezuela no ha habido proyectos de relevancia para la automatización de este tipo de mediciones, menos se han desarrollado algoritmos computacionales para la transformación campo cercano - campo lejano. Por esta razón el CENDIT tiene entre sus objetivos desarrollar tecnología propia en este sector, con los siguientes propósitos:

- Realizar investigación y desarrollo de base
- Efectuar las adaptaciones que respondan a las tecnologías en uso en el país
- Formar personal especializado en el manejo de esta tecnología
- Crear una infraestructura y unas herramientas de medición para certificar las características de las antenas fabricadas en el país.

Este trabajo viene entonces a constituir un primer paso en esta dirección.

1.3. Objetivo general

Desarrollar una herramienta computacional flexible y abierta que permita efectuar el cálculo del patrón de radiación de antenas en campo lejano a partir de datos de mediciones realizadas en campo cercano, tal que la herramienta se pueda adaptar fácilmente a diferentes configuraciones de medición.

1.4. Objetivos específicos

- Seleccionar el método de transformación campo cercano a campo lejano a utilizar en la elaboración del algoritmo
- Sugerir un esquema de montaje tal que permita mediciones de campo cercano en coordenadas cartesianas y cilíndricas, en un ambiente no reflectivo (cámara anecoica)
- Establecer la mínima cantidad de parámetros de entrada para el algoritmo que se desea diseñar: Amplitud, Fase, Tipo de Configuración (sistema cartesiano o cilíndrico) y la posición de los elementos que intervienen en la medición.
- Diseñar el algoritmo que permita la transformación de campo cercano a campo lejano, a partir de datos que no requieran un ordenamiento secuencial ni equispaciado. Este debe ser capaz de presentar los datos de cualquier plano de corte del patrón de radiación en campo lejano tal que pueda ser manipulado posteriormente por un paquete graficador.
- Validar los resultados obtenidos a partir del algoritmo y de datos de campo cercano existentes con patrones conocidos de antenas de referencia.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

2.1. Antecedentes

El problema de la determinación del patrón de radiación de un sistema radiante a partir de mediciones realizadas en campo cercano ha sido estudiado por muchos autores (Johnson, Ecker, Holis, Laroussi, Costache, Taaghol, Sarkar). En términos generales se puede indicar que hasta el momento existen cuatro vertientes principales a seguir, estas son:

- Determinación directa de distribución de campo utilizando el Teorema Vectorial de Green aplicado a las ecuaciones de onda y el principio de Huygens Fresnel en el caso de antenas tipo apertura.
- El método de expansión modal de ondas planas.
- El método de la integral exacta de dos superficies
- La técnica de las corrientes equivalentes utilizando el Método de los Momentos

En lo que sigue se describirá de forma breve la evolución de estos estudios, empezando con los dos primeros métodos [2]

Los esfuerzos iniciales se inspiraron en el hecho de que es posible determinar la configuración del campo electromagnético alrededor de la antena si se

conoce exactamente la distribución ya sea de corriente o de carga sobre la estructura de la antena [3], [4] y [5].

Para antenas de apertura, se utilizó el principio de Huygens-Fresnel para formar una fuente equivalente a partir de la distribución de campo de la apertura [6].

El principio de Huygens-Fresnel plantea que todo punto en un frente de onda puede ser considerado como una fuente secundaria que a la vez genera una onda esférica. El campo en cualquier punto exterior al frente de onda, se puede obtener de la superposición de estas ondas elementales. Schelkunoff [7] provee un tratamiento matemático riguroso del principio de Huygens-Fresnel aplicado a ondas electromagnéticas, mediante el planteamiento del Teorema de Equivalencia.

Todo esto deriva en el primer método de transformación, el cual consiste en la determinación directa de la distribución de la fuente generadora del campo. Este método se basa en el hecho que los campos eléctricos \mathbf{E} y magnéticos \mathbf{H} totales en cualquier punto del espacio, comprendido entre un volumen \mathbf{V} que encierra a la fuente y una esfera en el infinito, pueden ser expresados en términos de las densidades de corrientes de la fuente, el volumen \mathbf{V} que las encierra y los valores del campo tangencial sobre la superficie del mencionado volumen \mathbf{V} . Este resultado se obtiene al aplicar el Teorema de Green Vectorial al par de ecuaciones de onda. Los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} en el punto P son mostrados por Silver en [6, pp 80]

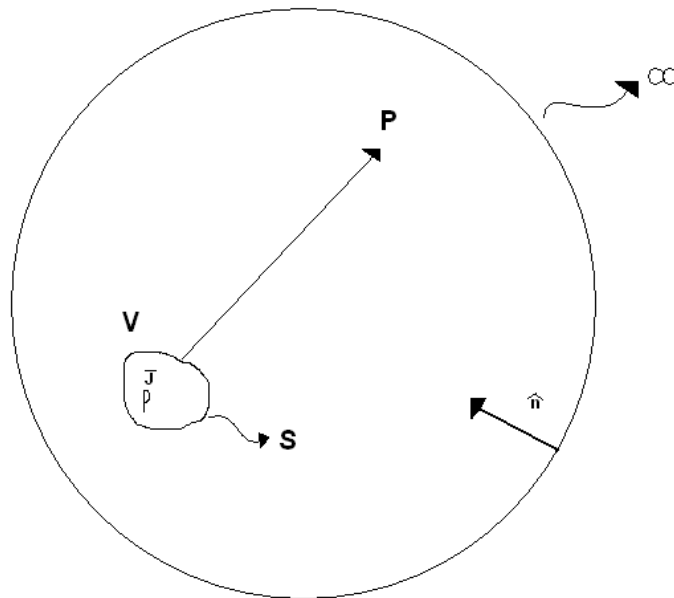


Figura 1: Teorema Vectorial de Green

Las integrales que se derivan de este método son muy difíciles o imposibles de resolver, por lo que es necesario introducir una serie de consideraciones y aproximaciones, de manera tal de poder simplificar las expresiones, como por ejemplo:

- a) toda la radiación sigue la dirección de la normal exterior a la superficie
- b) los campos eléctricos y magnéticos se relacionan en forma lineal como en una onda plana
- c) se utiliza la aproximación de variaciones pequeñas de ángulos, limitándose de esta manera la región angular donde se determina el patrón de radiación.

El segundo método para determinar el patrón de radiación consiste en expresar la totalidad del campo electromagnético en términos de una expansión

modal. El método se basa en el hecho de que el patrón de radiación de un campo electromagnético arbitrario puede expresarse como la combinación lineal de un grupo de soluciones ortogonales en un sistema apropiado que sea acorde con el sistema de mediciones.

En efecto, las amplitudes y fases de estos modos se derivan a partir del campo eléctrico medido sobre una superficie apropiada en campo cercano, por ejemplo una superficie plana para una expansión en ondas planas, una superficie cilíndrica para una expansión en ondas cilíndricas, con la ventaja de que la distancia de la superficie de medición a la fuente no es crítica. El conocimiento de la amplitud y de la fase de cada componente en la expansión modal permite la descripción del campo radiado y por supuesto de su patrón de radiación.

En el método de la expansión modal, los datos de campo cercano medidos se convierten en una sumatoria o mejor dicho, es una combinación espectral de “modos”, correspondientes a los números de onda en el sistema coordenado en el cual los datos han sido medidos, esto se hace mediante la Transformada de Fourier espacial. En este procedimiento el patrón de la sonda de prueba también debe ser transformado para así tomar en cuenta el efecto de la misma sobre la medición, pero una vez hecho esto es posible corregir los números de onda, sin necesidad de tener que tomar en cuenta un factor de corrección de sonda al final del procedimiento.

En el año 1950 Booker y Clemmow [8] analizaron el concepto del espectro de ondas planas en términos de la relación entre la distribución de una apertura y el patrón polar de la antena. De ahí se derivó la relación entre el campo cercano de una antena de apertura, la expansión de ondas planas y la condición bajo la cual el

espectro de ondas planas puede ser expresado en términos del patrón polar de radiación.

Kerns [9] y Dayhoff [10] utilizaron el método de la expansión modal en ondas planas para eliminar los efectos de la sonda de prueba en las mediciones de campo cercano para obtener el patrón de radiación. Para el caso especial de múltiples reflexiones entre la antena bajo prueba y la sonda de medición, ellos desarrollaron un método para eliminar los efectos característicos de la sonda utilizando un análisis de la matriz de dispersión, que puede ser utilizado en cualquier antena arbitraria o sonda si las características del patrón de radiación de la sonda son conocidas.

Joy y Paris [11] investigaron el criterio de muestreo espacial y las técnicas de minimización requeridas para las mediciones de campo cercano para utilizar la expansión modal plana. Utilizaron un filtrado espacial en dos dimensiones para reducir el tiempo de cálculo computacional. Sin embargo, para corregir la data medida utilizaron el factor de corrección de sonda.

Brown [12], [13] y Jull [14], [15] investigaron una técnica de expansión modal cilíndrica en dos dimensiones y sus resultados fueron verificados experimentalmente. Ellos consideraron una línea cilíndrica de corriente como fuente para obtener los 360° del patrón de radiación alrededor de la antena. Sin embargo, su trabajo estuvo limitado a dos dimensiones.

Leach [16] desarrolló un método nuevo para determinar el patrón de radiación de una antena, mediante mediciones con una sonda de prueba compensada sobre una superficie cilíndrica que envuelve o rodea a la antena. Este método se deriva de la expansión de ondas modal en coordenadas cilíndricas utilizando el

teorema de reciprocidad para resolver los campos radiados por la antena. El problema del criterio de muestreo espacial también fue estudiado para mediciones sobre superficies cilíndricas y se establecieron límites inferiores para el intervalo de muestreo angular axial y polar en el cilindro.

Jensen [17] describió un método para obtener el patrón de radiación a partir de mediciones en campo cercano realizadas sobre una esfera que encerraba la antena bajo prueba. También describe un procedimiento para compensar las características de la sonda.

Ludwig [18] utilizó una expansión modal esférica como una técnica numérica para expresar campos arbitrarios especificados por datos analíticos, experimentales o numéricos. La aplicación de esta técnica logró demostrar la precisión del método a través de las comparaciones entre los patrones obtenidos.

James y Longdon [19] describieron un método para obtener la expansión en campo lejano en ondas esféricas de una antena arbitraria partiendo de mediciones de la componente radial de los campos magnéticos y eléctricos sobre una esfera que envuelve la antena. Una desventaja de este método es que la componente radial disminuye rápidamente con la distancia a la antena; la otra desventaja es la necesidad de utilizar dos sondas de prueba distintas, una para el campo magnético y la otra para campo eléctrico. En esta investigación no se aplicaron técnicas de compensación de la sonda.

La tercera técnica de transformación de campo cercano a campo lejano [20] busca determinar el patrón de radiación partiendo de mediciones de amplitud del

campo, o sea sin conocimiento de la fase, utilizando dos superficies de medición cercanas entre si y que encierren a la fuente [21].

Es muy importante mencionar que en el trabajo de Laroussi y Costache [20] enfocan su investigación no sólo para caracterizar antenas, sino que también le dan utilidad al método en el área de EMI/EMC. Esta técnica se deriva de la segunda identidad de Green vectorial y es un desarrollo en el que no se realiza ninguna simplificación. El algoritmo asume que las mediciones de campo (amplitud) se encuentran disponibles alrededor de dos superficies concéntricas que rodean al dispositivo bajo prueba y que el campo entre las posiciones de las mediciones puede ser interpolado. El método requiere realizar mediciones sobre dos superficies que envuelvan todas las fuentes y no homogeneidades del sistema. La mayor ventaja de este método es la no necesidad de un analizador vectorial de red, es suficiente un analizador escalar, ya que no es necesario medir la fase de las componentes de campo. Por esa razón es necesario medir sobre dos superficies, esto representa una desventaja en lo referente al error que se introduce al tener que realizar más mediciones y al considerar la precisión del posicionador.

Wang [22] examinó los efectos de los diferentes parámetros en las mediciones de las antenas y cómo éstas afectan a la reconstrucción del patrón utilizando algoritmos “mode sensitive”. Este análisis fue realizado para configuraciones de medición en coordenadas cartesianas, sus conclusiones sólo son válidas para este tipo de configuración. Entre sus deducciones más importantes se encuentran criterios para determinar la tasa de muestreo y la distancia de las superficies de medición, teniendo un conocimiento a priori del radiador.

Thal y Manges [23] trabajaron en la optimización de los parámetros de medida para reducir la cantidad de data en configuraciones esféricas.

Narasimhan [24] en su artículo evalúa las integrales de transformación utilizando la Transformada Rápida de Fourier y desarrolla técnicas para mejorar la precisión y el tiempo de procesamiento.

El cuarto método se basa en el principio de equivalencia, utiliza fuentes de corriente ubicadas sobre una superficie plana, reconstruidas a partir de mediciones de campo cercano. El método utiliza las ecuaciones de Maxwell y la función de Green para relacionar el campo medido con las densidades de corriente equivalentes, de ello se forma un sistema de ecuaciones integro-diferenciales, el cual es evaluado por el Método de los Momentos [25].

La evolución de este método, empieza con el trabajo de Petre y Sarkar [26] quienes desarrollaron la técnica para una configuración de mediciones en un sistema cartesiano utilizando corrientes magnéticas.

En 1996 Taaghol y Sarkar [27] presentan otra versión del método para un sistema de medida arbitrario y utilizando corrientes magnéticas.

En el artículo de 1999 Sarkar [28] desarrolla el método de las corrientes equivalentes, para un sistema de medidas esférico pero esta vez utilizando corrientes del tipo eléctrico.

En general la fuente equivalente de corriente se modela como fuentes superficiales colocadas en un plano y teniendo como datos solamente mediciones de campo eléctrico tomadas en la zona delantera de la apertura

Cabe destacar que el cuarto método y sus evoluciones sólo han sido probados para antenas del tipo directivo y que sus resultados han sido validados únicamente en la región de mayor intensidad de radiación.

El algoritmo propuesto en este trabajo está basado en el mismo principio en que se basa el último método propuesto, es decir, en los principios de unicidad y equivalencia, con la diferencia de que se diseñó de forma tal que fuese válido para otros tipos de sistemas radiantes y no sólo para antenas de tipo apertura. La fuente se modela mediante un conjunto de fuentes puntuales del tipo tridimensional distribuidas en un volumen lo más similar posible a la estructura física de la antena. Adicionalmente, los datos de campo eléctrico tangencial deben tomarse sobre toda la superficie de un paralelepípedo, o en las caras que sea necesario, para obtener así mayor información del sistema radiante.

El método mostrado en este trabajo, fue desarrollado en coordenadas cilíndricas, recientemente por Martínez F. [29], obteniendo resultados de experimentos numéricos satisfactorios.

2.2. Los principios de unicidad y equivalencia

En primer lugar se hablará de estos principios ya que son fundamentales para el desarrollo del algoritmo. El principio de unicidad afirma que si se tiene un volumen V que no contiene fuentes ni cargas generadoras de campo, es suficiente conocer los valores del campo tangenciales a la superficie de V , para poder determinar el valor de campo en cada punto del volumen.

El principio de equivalencia nos muestra que es posible transformar un problema en otro equivalente, de manera que si se tiene una superficie que envuelve a las fuentes generadoras del campo se puede crear una fuente ficticia equivalente, siempre y cuando las condiciones de frontera, que en este caso son el valor del campo en la superficie, se mantengan inalteradas.

De estos principios se obtiene el fundamento del algoritmo, ya que la idea principal consiste en realizar mediciones de campo tangencial sobre una superficie que envuelve al sistema radiante, para luego determinar una configuración equivalente de corrientes pero que siga generando el mismo campo. Luego de haber determinado los valores de la fuente de corriente equivalente, se aplican las aproximaciones clásicas de campo lejano para obtener el patrón de radiación deseado.

2.3. Consideraciones preliminares

Las Ecuaciones de Maxwell describen el comportamiento de los campos electromagnéticos; a continuación se presentan en el dominio de la frecuencia [25 cap, 1]

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Donde:

H es la intensidad de campo magnético en A/m

E es la intensidad de campo eléctrico en V/m

B inducción magnética en weber/m² = tesla

D es vector de desplazamiento en C/m²

J es la densidad de corriente en A/m²

ρ es la densidad de carga en C/m³

ω es la frecuencia angular en radianes. $\omega = 2\pi \cdot \text{frecuencia}$

μ es la permeabilidad magnética, en el vacío $\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6}$ H/m

ϵ es la permeabilidad eléctrica, en el vacío $\epsilon_0 = 8,8541 \times 10^{-12}$ F/m

En el caso del radiador que se quiere caracterizar, se asume que se encuentra sumergido en un medio homogéneo, lineal e isótropo.

Utilizando, la función auxiliar denominada Potencial Magnético **A** y la condición de Lorentz, el campo eléctrico se puede escribir como:

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\vec{A}) \quad (5)$$

Donde el vector potencial magnético viene dado por:

$$\vec{A}(\vec{r}, \vec{r}') = \int_v \frac{\mu}{4\pi} \vec{J}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') dV' \quad (6)$$

Donde G es la función de Green para el caso de espacio libre:

$$\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (7)$$

El sistema coordenado asociado a las expresiones se muestra en la Figura 2

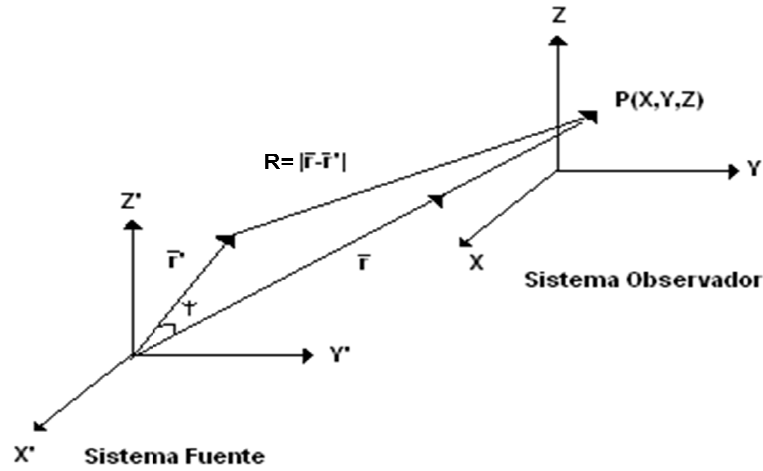


Figura 2: Sistemas coordenados asociados a la fuente y al observador

donde

$$R = |\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (8)$$

Sustituyendo (7) y (6) en (5) se obtiene la ecuación integro diferencial que relaciona el campo eléctrico en función de la fuente de corriente que lo genera

$$\vec{E}(\vec{r}, \vec{r}') = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{v'} \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' - j \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} \nabla \left(\nabla \cdot \int_{v'} \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \right) \quad (9)$$

2.4. Descripción general del método de transformación de campo cercano a campo lejano

Se tiene un sistema radiante que se desea caracterizar, este se coloca en el centro del sistema de coordenadas cartesianas y se procede a realizar mediciones de campo cercano sobre un paralelepípedo.

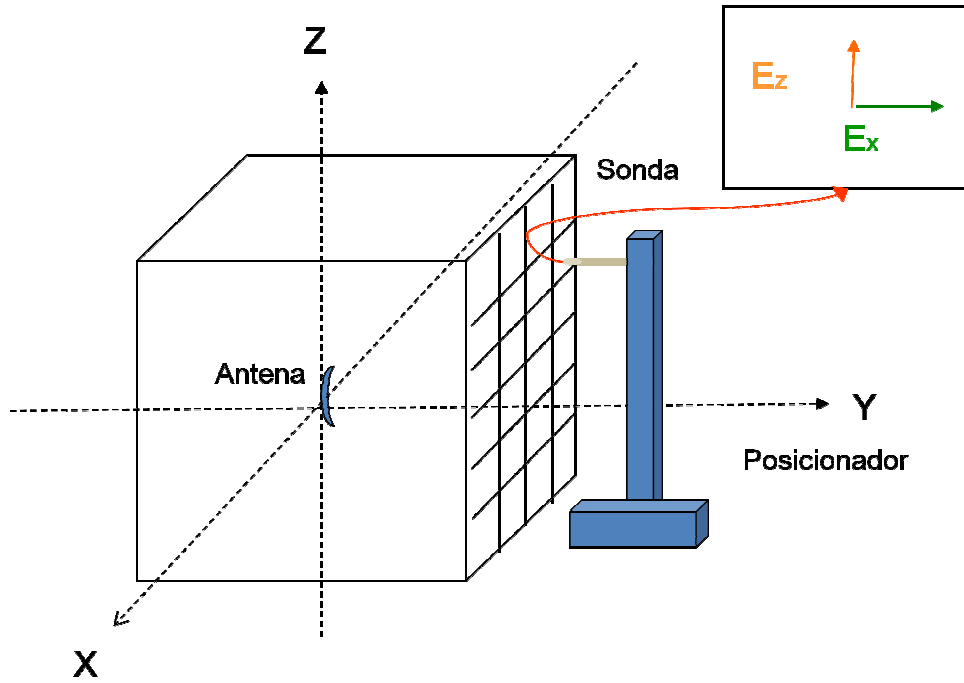


Figura 3: Modelo de medición del campo cercano

Aplicando los principios de unicidad y equivalencia se plantea que el campo medido es generado por una estructura de corriente equivalente, la relación entre el campo medido y la nueva fuente, viene dado por la expresión (9), por lo que la incógnita en la ecuación es la densidad de corriente \mathbf{J} . Para hallar la solución, se utiliza el Método de los Momentos [25, pp. 286-287] escogiendo como función base una combinación de pulsos de corriente del tipo Delta de Dirac espacial¹, de manera que la expresión matemática de la estructura de corriente equivalente, es la siguiente:

$$\begin{aligned} \vec{J}(\vec{r}') = & \sum_l I_x^l \delta(x-x_l) \delta(y-y_l) \delta(z-z_l) \hat{e}_x + \sum_m I_y^m \delta(x-x_m) \delta(y-y_m) \delta(z-z_m) \hat{e}_y + \\ & + \sum_n I_z^n \delta(x-x_n) \delta(y-y_n) \delta(z-z_n) \hat{e}_z \end{aligned} \quad (10)$$

¹ A esto se le denomina “Matching Point” o método de colocación [1, cap 8]

Se puede ver que la estructura de la densidad de corriente está formada por una serie de fuentes puntuales tridimensionales. Sustituyendo en (9) y por propiedades de la función Delta de Dirac, se obtienen las siguientes ecuaciones

$$E_x(\vec{r}, \vec{r}') = -\frac{j}{4\pi} \left\{ \sum_l I_x^l \left[\mu\omega \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_l|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_l|} + \frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_l|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_l|} \right) \right] + \right. \\ \left. + \sum_m I_y^m \left[\frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_m|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_m|} \right) \right] + \sum_n I_z^n \left[\frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_n|} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

$$E_y(\vec{r}, \vec{r}') = -\frac{j}{4\pi} \left\{ \sum_l I_x^l \left[\frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_l|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_l|} \right) \right] + \right. \\ \left. + \sum_m I_y^m \left[\mu\omega \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_m|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_m|} + \frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_m|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_m|} \right) \right] + \sum_n I_z^n \left[\frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_n|} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

$$E_z(\vec{r}, \vec{r}') = -\frac{j}{4\pi} \left\{ \sum_l I_x^l \left[\frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_l|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_l|} \right) \right] + \sum_m I_y^m \left[\frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial z \partial y} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_m|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_m|} \right) \right] + \right. \\ \left. + \sum_n I_z^n \left[\mu\omega \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_n|} + \frac{1}{\epsilon\omega} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}'_n|} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

Donde

$$|\vec{r}-\vec{r}'_\alpha| = \sqrt{(x-x'_\alpha)^2 + (y-y'_\alpha)^2 + (z-z'_\alpha)^2} \quad (14)$$

Las derivadas que aparecen en las expresiones, se calcularon de forma analítica, sus desarrollos se muestran en el anexo 4

De las ecuaciones (11), (12) y (13) se desea determinar el valor de los coeficientes I_x , I_y e I_z . Para esto se utiliza la técnica de la evaluación punto a punto sobre las muestras correspondientes al campo medido, formándose un sistema de ecuaciones lineales con coeficientes complejos. Esto también se puede interpretar como el hecho de que cada medición de campo eléctrico es debida a la contribución de todas las fuentes de corrientes puntuales, ver Figura 4. Una gran ventaja del método es que las integrales de la ecuación (9) no divergen (no presentan singularidades) porque el punto de medición no se encuentra sobre la fuente de corriente ficticia.

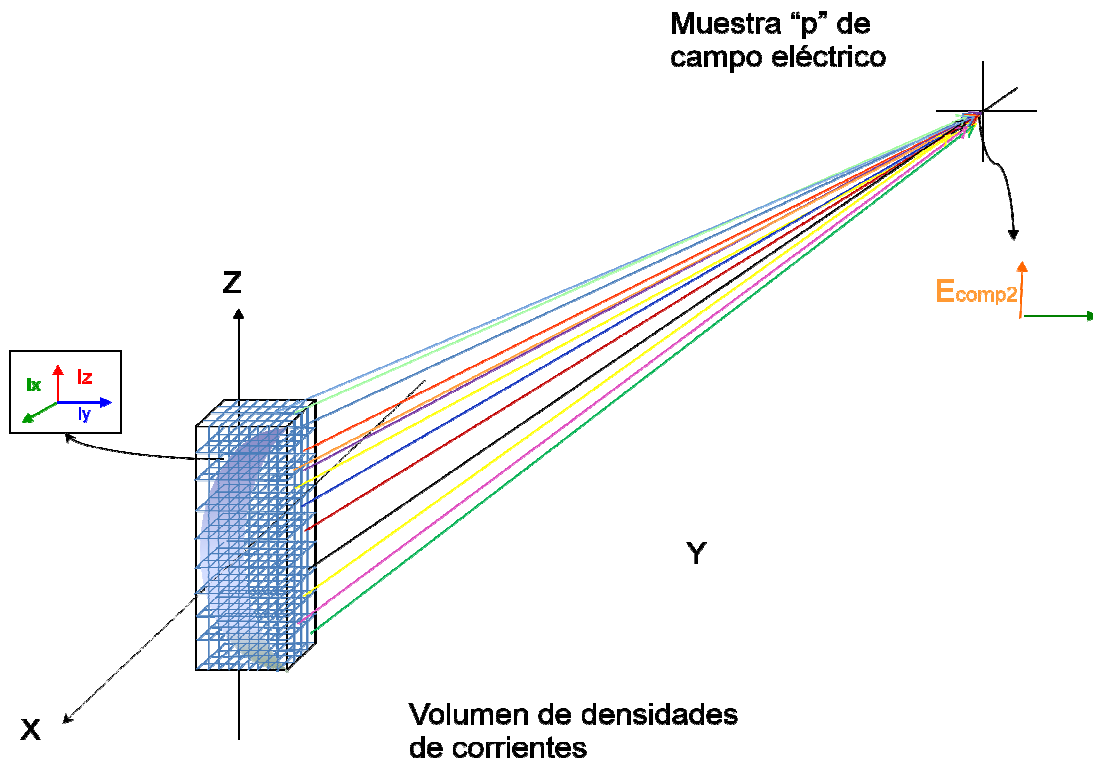


Figura 4: Esquema del sistema coordinado en campo cercano

Imponiendo la condición de evaluación del campo sobre las P muestras de E_x , las Q muestras de E_y y las R muestras de E_z , se obtiene un sistema de ecuaciones en términos de las incógnitas I_x , I_y , I_z , el cual puede ser descrito en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ E_x(\vec{r}_p) \\ \vdots \\ E_y(\vec{r}_q) \\ \vdots \\ E_z(\vec{r}_r) \end{bmatrix}_{P+Q+R} = \begin{bmatrix} \Omega_{(P+Q+R) \times (L+M+N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ I_l^x \\ \vdots \\ I_m^y \\ \vdots \\ I_n^z \end{bmatrix}_{L+M+N} \quad (15)$$

El vector de la izquierda se encuentra formado por los datos de campo eléctrico medidos organizados por componentes, y tiene una dimensión $U=P+Q+R$, que es igual a la cantidad total de muestras tomadas. El vector columna del lado derecho de la expresión es el vector de los coeficientes de las fuentes de corriente \mathbf{I} que se desean determinar y tiene una dimensión de $V=L+M+N$. La matriz $\mathbf{\Omega}$ está conformada por los coeficientes que relacionan el campo eléctrico con la densidad de corriente generada por el sistema de ecuaciones (11), (12) y (13) y tiene una dimensión de $U \times V$. En forma resumida,

$$\begin{aligned} [E]_u &= [\Omega]_{u \times v} [I]_v & P + Q + R &= U \\ & & L + M + N &= V \end{aligned} \quad (16)$$

La matriz del sistema, es en general una matriz rectangular, con coeficientes complejos, densa y no Hermítica² y que de acuerdo al dimensionamiento del problema puede ser de gran escala, lo que hace que no sea posible aplicar ninguna técnica clásica de inversión a la matriz. Aunque sí se le realiza un acondicionamiento de manera de hacerla más estable, de forma tal que fuese menos sensible a los errores propios de la aplicación del método numérico. El método numérico escogido para la resolución del sistema es el Método del Gradiente Conjugado [30] bajo el enfoque de mínimos cuadrados con acondicionamiento de Jacobi.

² Una matriz compleja A se llama Hermítica o Hermitiana si $A^* = A$ (Grossman, S. *Álgebra Lineal*, quinta edición. Mc graw Hill. Colombia. 1996).

Una vez resuelto el sistema y obtenido el valor de los coeficientes de las fuentes de corriente, junto a su ubicación, se aplican las aproximaciones de campo lejano.

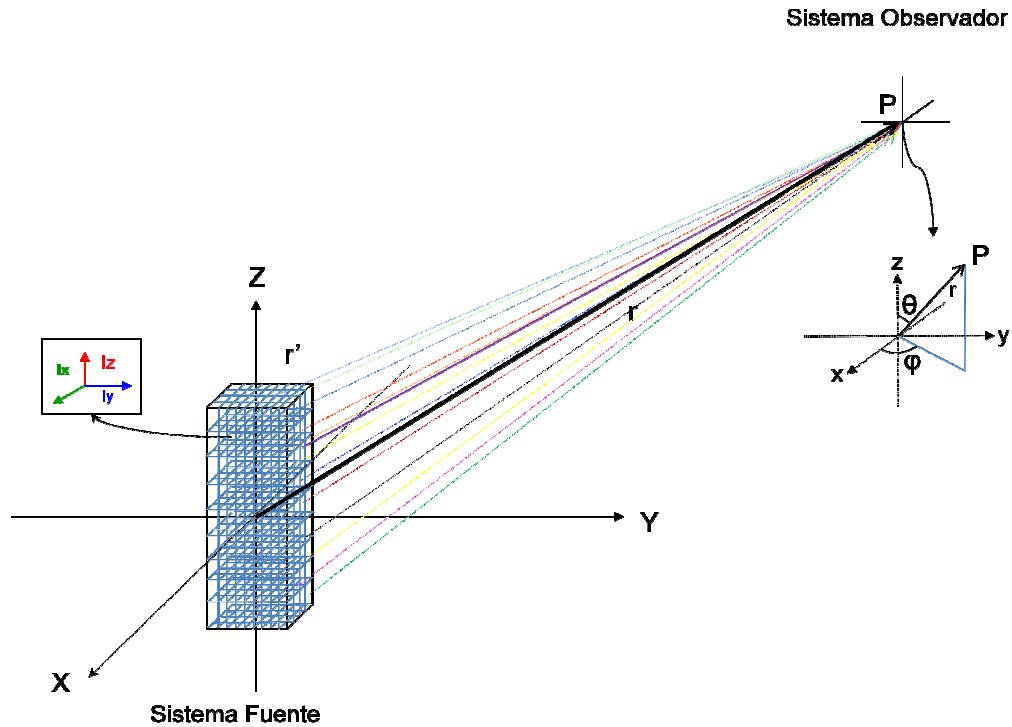


Figura 5: Sistemas coordenados para la Transformación a campo lejano

La característica principal del campo lejano es que la distribución espacial de la potencia radiada por la antena no depende de la distancia a la que se encuentre el observador de la misma, por lo que el patrón de radiación es el mismo independientemente de la distancia. Si es conocida la fuente de corriente que genera los campos, se pueden utilizar las ecuaciones de Maxwell con ciertas simplificaciones que sólo son válidas en el caso de campo lejano, para ver el desarrollo completo de estas expresiones se puede consultar el Anexo 3 ó [31,pp 125-126]

Las expresiones simplificadas son:

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \left[\int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') e^{-jk[\text{sen } \theta \cos \phi \cdot x' + \text{sen } \theta \text{sen } \phi \cdot y' + \cos \theta \cdot z]} dV' \right] \frac{e^{-jk|\vec{r}|}}{|\vec{r}|} \quad (17)$$

Campo eléctrico:

$$\begin{aligned} \vec{E}_r &\approx 0 \\ \vec{E}_\theta &\approx -j\omega \vec{A}_\theta \\ \vec{E}_\phi &\approx -j\omega \vec{A}_\phi \end{aligned} \quad \vec{E} = -j\omega \vec{A}_t \quad (18)$$

Campo magnético:

$$\begin{aligned} \vec{H}_r &\approx 0 \\ \vec{H}_\theta &\approx +j\frac{\omega}{\eta} \vec{A}_\phi = -\frac{\vec{E}_\phi}{\eta} \\ \vec{H}_\phi &\approx -j\frac{\omega}{\eta} \vec{A}_\theta = +\frac{\vec{E}_\theta}{\eta} \end{aligned} \quad \vec{H} = \frac{\hat{a}_r}{\eta} \times \vec{E} = -j\frac{\omega}{\eta} \hat{a}_r \times \vec{A}_t \quad (19)$$

$$\eta = \epsilon_o / \mu_o$$

El vector potencial magnético se puede escribir en función de sus componentes

$$\vec{A} = A_r \hat{a}_r + A_\theta \hat{a}_\theta + A_\phi \hat{a}_\phi \quad (20)$$

Pero en campo lejano sólo contribuye la parte tangencial del vector

$$\vec{A}_t = A_\theta \hat{a}_\theta + A_\phi \hat{a}_\phi$$

Una vez determinados los campos electromagnéticos en la zona lejana es necesario introducir el Vector de Poynting³, el cual se define como:

³El vector de Poynting se define como la energía promedio en tiempo radiada que atraviesa una superficie unitaria (1m²) en un segundo.

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\vec{E} \times \vec{H}^* \right] \quad (21)$$

Al sustituir las expresiones (18) y (19) se obtiene el Vector de Poynting en función de las componentes tangenciales del Vector Potencial Magnético

$$\vec{S} = \frac{\eta}{4\lambda^2 r^2} \left[|A_\theta|^2 + |A_\phi|^2 \right] \cdot \hat{e}_r \quad (22)$$

Entonces, es conveniente efectuar un ordenamiento particular de los coeficientes de corriente para escribir las componentes del Vector Potencial Magnético, las mismas se agrupan por componentes, quedando las expresiones tangenciales de \mathbf{A} de la siguiente manera:

$$A_\theta = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\cos \varphi \cos \theta \sum_{l=1}^L I_l^x e^{jk\alpha} + \text{sen} \varphi \cos \theta \sum_{m=1}^M I_m^y e^{jk\beta} - \text{sen} \theta \sum_{n=1}^N I_n^z e^{jk\gamma} \right] \quad (23)$$

$$A_\phi = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \left[-\text{sen} \varphi \sum_{l=1}^L I_l^x e^{jk\alpha} + \cos \varphi \sum_{m=1}^M I_m^y e^{jk\beta} \right] \quad (24)$$

Los coeficientes de α, β, γ vienen dados por:

$$\begin{aligned} \alpha_l &= x_l \text{sen} \theta \cos \varphi + y_l \text{sen} \theta \text{sen} \varphi + z_l \cos \theta \\ \beta_m &= x_m \text{sen} \theta \cos \varphi + y_m \text{sen} \theta \text{sen} \varphi + z_m \cos \theta \\ \gamma_n &= x_n \text{sen} \theta \cos \varphi + y_n \text{sen} \theta \text{sen} \varphi + z_n \cos \theta \end{aligned} \quad (25)$$

Para determinar el patrón de radiación de la antena se utiliza la función de Directividad, la cual se define como

$$Di(\theta, \varphi) = \frac{|\vec{S}|_{\text{antena}}}{|\vec{S}|_{\text{referencia}}} \quad (26)$$

donde el vector de Poynting de referencia es el de una antena isótropa que irradia la misma cantidad de potencia que la antena inicial. Por lo que resulta

$$Di(\theta, \varphi) = \frac{4\pi r^2 |\vec{S}|}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\vec{S}| \cdot r^2 \sin \theta d\theta} d\varphi \quad (27)$$

Al realizar la sustitución de la ecuación (22) en la expresión anterior, resulta

$$Di(\theta, \varphi) = 8\pi \frac{|A_\theta|^2 + |A_\varphi|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (|A_\theta|^2 + |A_\varphi|^2) \sin \theta d\theta} d\varphi \quad (28)$$

Finalmente, al evaluar esta ecuación para distintos valores de θ y φ se obtienen los diferentes cortes del patrón de radiación en campo lejano.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

3.1. Diagrama de Flujo General del Algoritmo

Los bloques principales del algoritmo son los siguientes

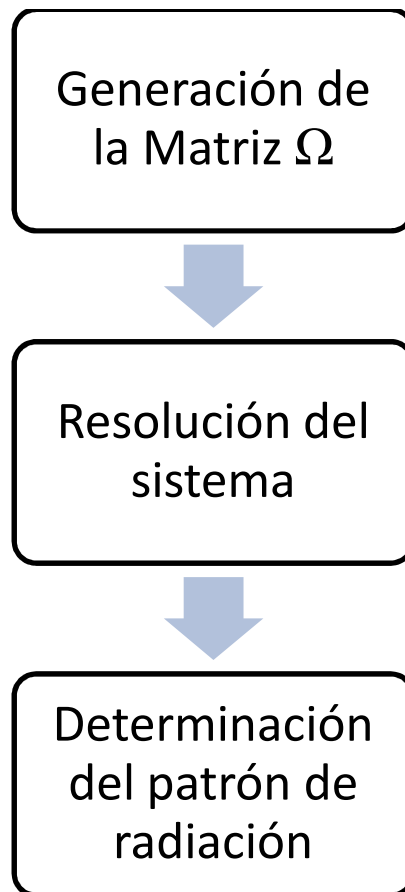


Figura 6: Diagrama de flujo general del algoritmo

A continuación se realiza una descripción de cada bloque del diagrama principal

3.2. Generación de la Matriz de los Momentos Ω

3.21. Organización de los datos de campo eléctrico medido

Para construir la Matriz de los Momentos Ω es necesario tener los siguientes datos:

Frecuencia de operación del sistema, número de mediciones de campo cercano por cara del paralelepípedo, número de fuentes de corriente y sus ubicaciones espaciales (x',y',z') , muestras de campo eléctrico, con sus respectivas ubicaciones (x,y,z)

Los valores de campo eléctrico son medidos de forma discreta sobre las caras del cubo y se especifican a través de sus dos componentes cartesianas, por lo que dependiendo de la cara en que se encuentre la muestra, el campo eléctrico poseerá un juego distinto de coordenadas.

Con relación al conteo de muestras, es necesario poseer la información de forma tal que cada muestra del campo eléctrico \mathbf{E} mantenga la correspondencia con la coordenada x,y,z de su ubicación espacial. Para ello se decidió numerar las caras del cubo como se muestra en la siguiente figura:

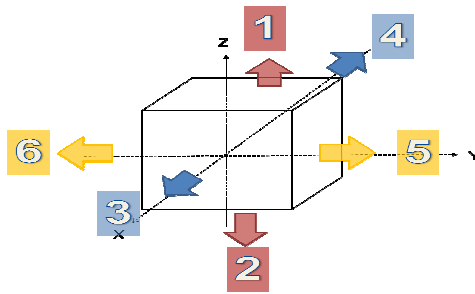


Figura 7: Numeración de las caras del paralelepípedo de campo eléctrico

Las muestras del campo eléctrico en cada cara poseen las siguientes componentes

$$\vec{E}_{1y2} = E_x \cdot \hat{e}_x + E_y \cdot \hat{e}_y \quad \begin{array}{l} \text{Plano 1 normal a Z} \\ \text{Plano 2 normal a -Z} \end{array} \quad (29)$$

$$\vec{E}_{3y4} = E_y \cdot \hat{e}_y + E_z \cdot \hat{e}_z \quad \begin{array}{l} \text{Plano 3 normal a X} \\ \text{Plano 4 normal a -X} \end{array} \quad (30)$$

$$\vec{E}_{5y6} = E_x \cdot \hat{e}_x + E_z \cdot \hat{e}_z \quad \begin{array}{l} \text{Plano 5 normal a Y} \\ \text{Plano 6 normal a -Y} \end{array} \quad (31)$$

Cabe recalcar que no importa el orden en que se tomen las muestras en cada cara, siempre y cuando se mantengan correlacionados los valores del campo con sus respectivas posiciones espaciales.

Cada cara del paralelepípedo se divide en celdas, formadas por filas y columnas, por lo que se necesitan los siguientes datos:

Tabla 1: Número de filas y columnas por cara del paralelepípedo

Cara	Número de filas	Número de columnas	Número de celdas por cara
1	F1	C1	F1xC1
2	F2	C2	F2xC2
3	F3	C3	F3xC3
4	F4	C4	F4xC4
5	F5	C5	F5xC5
6	F6	C6	F6xC6
Número total de muestras de campo eléctrico			$=F1xC1+F2xC2+F3xC3+F4xC4+F5xC5+F6xC6$

De las relaciones (29), (30) y (31) y se puede notar que el número de las tres diferentes componentes espaciales del vector de campo no necesariamente es el mismo. Estas cantidades se determinan de la siguiente manera:

$$\text{Número total de datos de campo } E_x: P= F1*C1+F2*C2+F5*C5+F6*C6$$

$$\text{Número total de datos de campo } E_y: Q= F1*C1+F2*C2+F3*C3+F4*C4$$

$$\text{Número total de datos de campo } E_z: R= F3*C3+F4*C4+ F5*C5+F6*C6$$

3.22. Organización de los parámetros de corriente

La ubicación de las fuentes de corriente es un dato necesario para la generación de la Matriz Ω y se establece de la siguiente manera:

Se crea un plano paralelo al eje xy subdividido en celdas que contienen en el centro de cada una de ellas una fuente puntual.

Este plano se extiende entre $-W_x / 2 < x < W_x / 2$ y $-W_y / 2 < y < W_y / 2$ como se muestra en la Figura 8

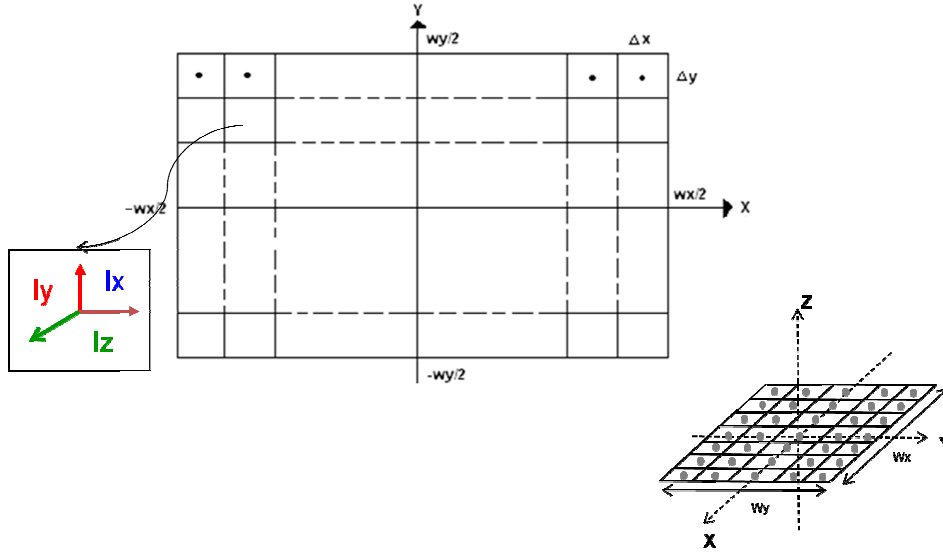


Figura 8: Estructura de la fuente de corriente

El plano es dividido en $NXV \times NYV$ losas de dimensiones

$$\begin{aligned} \Delta x &= W_x / NXV \\ \Delta y &= W_y / NYV \end{aligned} \quad (32)$$

Cada punto en el centro de cada losa se determina como

$$\begin{aligned} x'_i &= -W_x / 2 - \Delta x / 2 + i \cdot \Delta x & i &= 1 \dots NXV \\ y'_j &= -W_y / 2 - \Delta y / 2 + j \cdot \Delta y & j &= 1 \dots NYV \end{aligned} \quad (33)$$

Para crear un volumen este plano se repite para las coordenadas x, y pero cambiando la coordenada del eje z entre los valores de $-W_z / 2 < z < W_z / 2$ con un paso de $\Delta z = W_z / NZV$

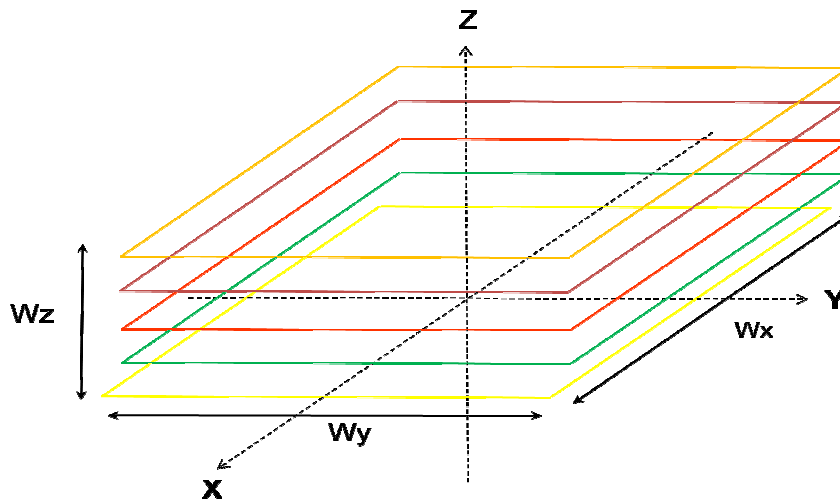


Figura 9. Estructura para crear una fuente volumétrica de corriente

Las direcciones (x',y',z') obtenidas con este procedimiento se vacían en un arreglo denominado XP

3.23. Organización de la matriz de los Momentos Ω

Basándonos en las ecuaciones (11), (12) y (13) la matriz de los Momentos Ω se organizó de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix}
\overset{1}{E}_X \\
\overset{1}{E}_X \\
\vdots \\
\overset{2}{E}_X \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{6}{E}_X \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{1}{E}_Y \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{4}{E}_Y \\
\vdots \\
\overset{3}{E}_Z \\
\vdots \\
\overset{6}{E}_Z
\end{bmatrix}_{P+Q+R}
=
\begin{bmatrix}
\overset{x}{\Omega}_{11} \overset{x}{\Omega}_{12} \dots \overset{x}{\Omega}_{1L} \overset{y}{\Omega}_{11} \overset{y}{\Omega}_{12} \dots \overset{y}{\Omega}_{1M} \overset{z}{\Omega}_{11} \overset{z}{\Omega}_{12} \dots \overset{z}{\Omega}_{1N} \\
\overset{x}{\Omega}_{21} \overset{x}{\Omega}_{22} \dots \overset{x}{\Omega}_{2L} \overset{y}{\Omega}_{21} \overset{y}{\Omega}_{22} \dots \overset{y}{\Omega}_{2M} \overset{z}{\Omega}_{21} \overset{z}{\Omega}_{22} \dots \overset{z}{\Omega}_{2N} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{x}{\Omega}_{P1} \overset{x}{\Omega}_{P2} \dots \overset{x}{\Omega}_{PL} \overset{y}{\Omega}_{P1} \overset{y}{\Omega}_{P2} \dots \overset{y}{\Omega}_{PM} \overset{z}{\Omega}_{P1} \overset{z}{\Omega}_{P2} \dots \overset{z}{\Omega}_{PN} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{x}{\Omega}_{Q1} \overset{x}{\Omega}_{Q2} \dots \overset{x}{\Omega}_{QL} \overset{y}{\Omega}_{Q1} \overset{y}{\Omega}_{Q2} \dots \overset{y}{\Omega}_{QM} \overset{z}{\Omega}_{Q1} \overset{z}{\Omega}_{Q2} \dots \overset{z}{\Omega}_{QN} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{x}{\Omega}_{R1} \overset{x}{\Omega}_{R2} \dots \overset{x}{\Omega}_{RL} \overset{y}{\Omega}_{R1} \overset{y}{\Omega}_{R2} \dots \overset{y}{\Omega}_{RM} \overset{z}{\Omega}_{R1} \overset{z}{\Omega}_{R2} \dots \overset{z}{\Omega}_{RN}
\end{bmatrix}_{(P+Q+R) \times (L+M+N)}
\begin{bmatrix}
\overset{1}{I}_X \\
\overset{1}{I}_X \\
\vdots \\
\overset{2}{I}_X \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{6}{I}_X \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{1}{I}_Y \\
\vdots \\
\vdots \\
\overset{4}{I}_Y \\
\vdots \\
\overset{3}{I}_Z \\
\vdots \\
\overset{6}{I}_Z
\end{bmatrix}_{L+M+N}
\quad (34)$$

Donde $\overset{i}{E}_j$ el índice i se refiere al plano en el cual se ubica la muestra, y el subíndice j a la dirección espacial de la muestra de campo eléctrico. Y para los elementos $\overset{s}{\Omega}_{tu}$ el índice s está asociado a la dirección espacial de la fuente de corriente, t está relacionado al número de fila, que a su vez se relaciona con el número de muestra de campo eléctrico y u corresponde al número de columna el cual se relaciona con la numeración de las muestras de corriente.

Después de obtener el archivo de las ubicaciones espaciales de la distribución de corriente XP (x',y',z') se debe efectuar una reorganización de los datos de campo eléctrico \mathbf{E} y sus coordenadas \mathbf{X} (x,y,z), porque las mediciones son tomados en orden por planos, y se requiere que se ordenen por componentes y como

no todas las muestras poseen todas las componentes espaciales, es necesario realizar una discriminación de los datos, esta se muestra esquemáticamente en la siguiente figura:

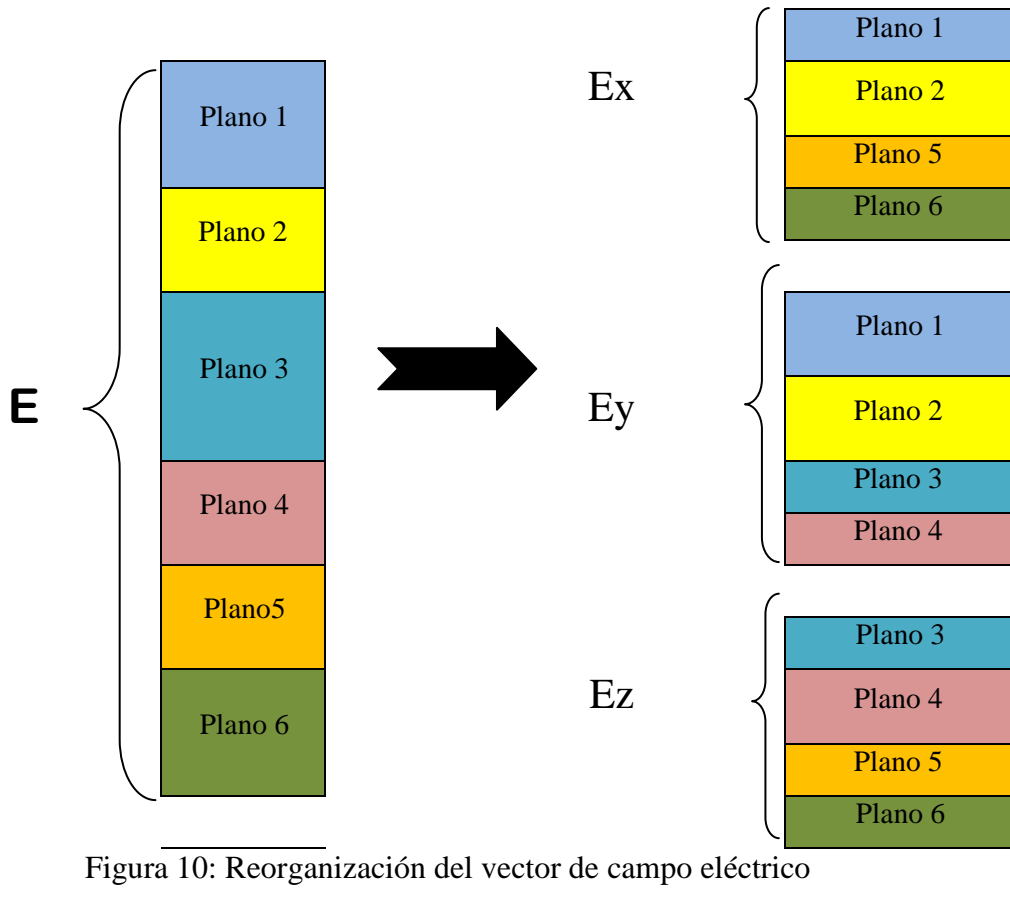


Figura 10: Reorganización del vector de campo eléctrico

De manera similar es necesario realizar una discriminación de las ubicaciones espaciales de esas muestras, por lo que se crean los arreglos XOX , XOY y XOZ , los cuales contienen las direcciones de los arreglos EX , EY y EZ . Donde los arreglos que contienen el campo y los arreglos de las posiciones deben estar organizados de manera tal que exista la correcta correspondencia entre ellos.

Después de crearse estos arreglos se procede a evaluar los parámetros de las ecuaciones (11) utilizando los datos contenidos en el arreglo XOX (arreglo que contiene todas las ubicaciones de los puntos de campo eléctrico medido que tienen dirección \mathbf{x}) y en el arreglo XP (arreglo que contiene las direcciones de todas las fuentes de corriente, que no hace falta discriminar porque estas sí poseen las tres componentes espaciales).

A continuación se evalúan los parámetros de las ecuaciones (12) con los datos de los arreglos XOY y XP y por último se evalúan los parámetros de las ecuaciones (13) con los datos de los arreglos XOZ y XP.

3.3. Resolución del sistema matricial

Para resolver el sistema matricial se realizaron pruebas con distintos métodos numéricos, entre ellos, Gauss Jordan con pivoteo completo y Descomposición en Valores Singulares basados en los paquetes IMSL (*International Mathematics and Statistics Library*), arrojando resultados erróneos. Por lo que una vez que se tiene el vector de las componentes del campo eléctrico y la matriz $\mathbf{\Omega}$, se realiza el siguiente tratamiento, para hacer que el sistema sea más estable desde el punto de vista numérico. El sistema inicial a resolver es de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 [E]_u &= [\mathbf{\Omega}]_{u \times v} [I]_v & P + Q + R &= U \\
 & & L + M + N &= V
 \end{aligned} \tag{35}$$

En primer lugar el sistema que posee coeficientes complejos es transformado a un sistema equivalente de elementos reales, esto implica que las dimensiones del sistema aumentan al doble.

$$[\tilde{E}]_{2u} = [\tilde{\Omega}]_{2u \times 2v} [\tilde{I}]_{2v} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} [\tilde{E}]_{2u} &= \begin{bmatrix} \text{Re}[E] \\ \text{Im}[E] \end{bmatrix} & [\tilde{I}]_{2v} &= \begin{bmatrix} \text{Re}[I] \\ \text{Im}[I] \end{bmatrix} \\ [\tilde{\Omega}]_{2u \times 2v} &= \begin{bmatrix} \text{Re}[\Omega] & \text{Im}[\Omega] \\ -\text{Im}[\Omega] & \text{Re}[\Omega] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

En segundo lugar la ecuación matricial es multiplicada a ambos lados de la ecuación (36) por la matriz transpuesta de $\tilde{\Omega}$ con el fin de hacer que la matriz del sistema sea cuadrada y positivamente definida.

$$[\tilde{\Omega}]_{2v \times 2u}^T [\tilde{E}]_{2u} = [\tilde{\Omega}]_{2v \times 2u}^T [\tilde{\Omega}]_{2u \times 2v} [\tilde{I}]_{2v} \quad (38)$$

Posteriormente, la ecuación anterior se multiplica por una matriz diagonal cuyos elementos son el inverso de los elementos de la diagonal de $[\tilde{\Omega}]^T \cdot [\tilde{\Omega}]$, con el fin de atenuar las inestabilidades propias del sistema (este tratamiento se llama preconditionamiento de Jacobi). El sistema a resolver es el siguiente:

$$Diag^{-1}[\tilde{\Omega}^T \tilde{\Omega}] \cdot [\tilde{\Omega}]_{2v \times 2u}^T [\tilde{E}]_{2u} = Diag^{-1}[\tilde{\Omega}^T \tilde{\Omega}] \cdot [\tilde{\Omega}]_{2v \times 2u}^T [\tilde{\Omega}]_{2u \times 2v} [\tilde{I}]_{2v} \quad (39)$$

Por último, se aplica el método numérico iterativo denominado Gradiente Conjugado para resolver el sistema. El método se seleccionó por ser el único que arrojó soluciones convergentes, este es un método iterativo que consiste en buscar el mínimo local más cercano de una función de n variables.

Una vez hallado el vector con los coeficientes de corrientes, es necesario reordenarlo nuevamente de manera de obtener los valores de corriente en forma compleja.

3.4. Transformación a campo lejano

El patrón de radiación se realiza en un corte específico, por lo cual es necesario que el usuario ingrese el parámetro que caracteriza el plano de corte en coordenadas esféricas, es decir el ángulo acimutal (φ constante: corte vertical) o el ángulo de elevación (θ constante: corte oblicuo u horizontal). Una vez seleccionado el plano, se ha diseñado un algoritmo que realiza un barrido de 360° en el mismo, con un paso de 1° .

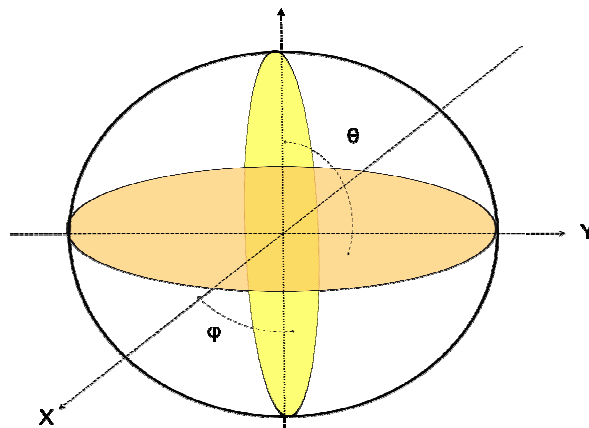


Figura 11: Cortes espaciales del patrón de radiación $\theta = \pi/2$ plano horizontal, $\varphi = \pi/2$ plano vertical

El barrido se efectúa utilizando las expresiones (23) y (24) para determinar el Vector de Poynting.

A continuación, se resuelve la integral que se encuentra en el denominador de la función de directividad (28), utilizando un algoritmo de integración numérica

basado en el Método de Gauss. Una vez obtenido el valor numérico de la integral, el cual corresponde a la potencia radiada del sistema, se determina la función de Directividad normalizando los valores del vector de Poynting entre el valor arrojado por la integral.

3.5. Descripción del código

En esta sección, cada rutina se describe detalladamente. El código fue realizado en FORTRAN 77, en forma de módulos independientes, esto con el fin de que fuese más sencillo su manejo y para que en un futuro sea mucho más sencillo realizar cambios en ciertas áreas del código sin afectar a todo el programa en general. En primer lugar se muestra el esquema principal y seguidamente cada uno de los módulos que lo componen.

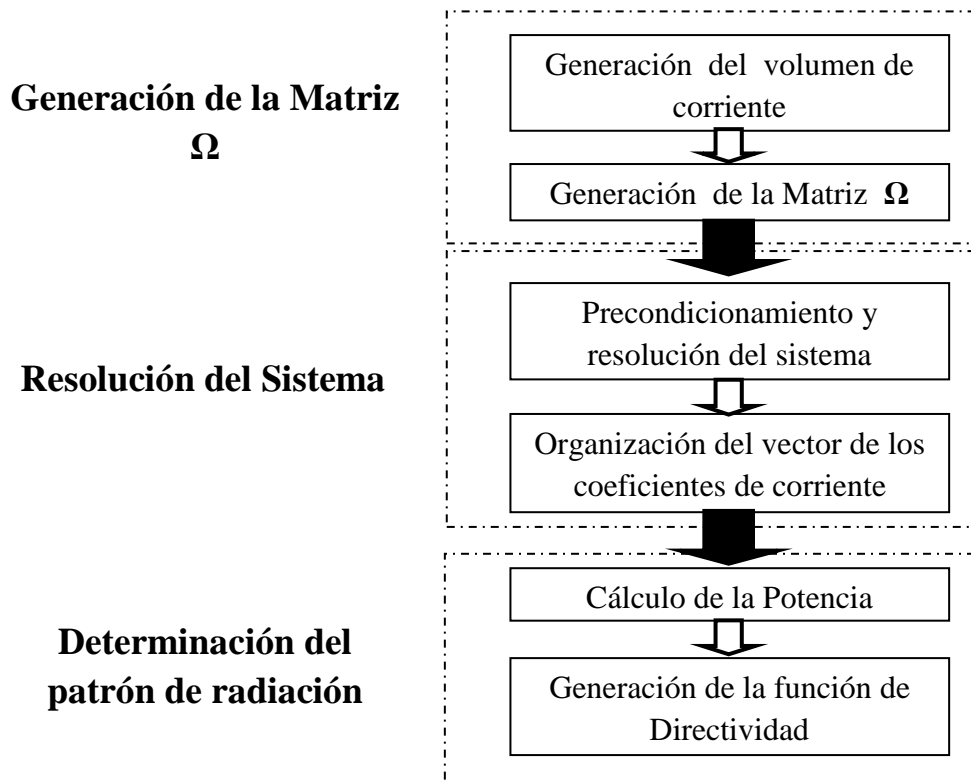


Figura 12. Esquema del programa principal

En el esquema del programa principal, los tres bloques que se han mostrado en los puntos anteriores se han subdividido en seis módulos.

- **Primer bloque:** asociado a la generación de la Matriz Ω , se divide en dos partes, en la primera se realiza una especie de mallado para construir la estructura espacial de las fuentes de corriente, para luego en la segunda etapa generar la Matriz Ω como tal.
- **Segundo bloque:** corresponde a la resolución del sistema, este se subdividió también en dos partes, la primera comprende los tratamientos de acondicionamiento numérico del sistema y la resolución del mismo utilizando una rutina de Gradiente Conjugado. La segunda parte corresponde a la reorganización del vector de coeficientes de las fuentes de corriente determinados por el módulo de resolución del sistema.
- **Tercer bloque:** es correspondiente a la determinación del patrón de radiación, éste a su vez se fraccionó en dos módulos, el primero determina la potencia y el segundo calcula el Vector de Poynting en cada punto (θ, φ) en un corte específico, para luego ser normalizado con respecto al valor de la potencia obtenida en el módulo anterior y así obtener el patrón de radiación.

3.5.1. Primer bloque. Módulo de generación de la Matriz Ω

a) Generación del volumen de corriente

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo del módulo de Generación del volumen de corriente:

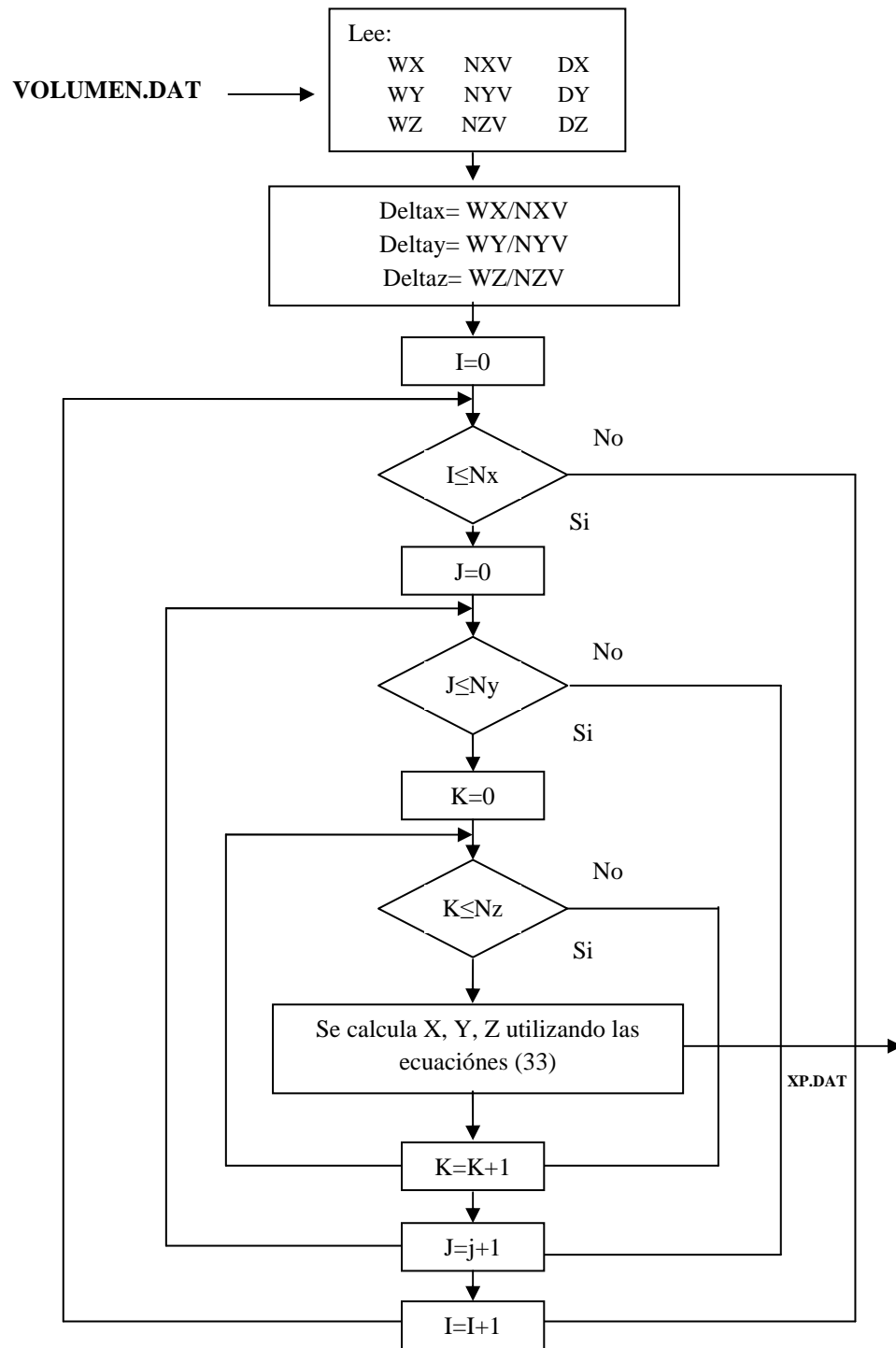


Figura 13: Diagrama de flujo del módulo generación del volumen de corriente

Este módulo requiere como entrada el archivo **VOLUMEN.DAT**, en el cual se introducen las dimensiones y el espaciamiento que se desea entre las fuentes puntuales de corriente equivalentes, también se puede introducir un desplazamiento de las muestras (si no se desea la estructura en el centro del sistema coordenado) los campos de datos de entrada deben tener el siguiente orden:

WX NXV DX

WY NYV DY

WZ NZV DZ

Donde WX, WY y WZ son las dimensiones del paralelepípedo que contiene las fuentes de corriente, NXV, NYV, NZV son el número en que se dividen los planos y DX, DY, DZ son los valores de las traslaciones en cada uno de los ejes. (En la lista de variables estos datos se vacían en un arreglo denominado **VOL**).

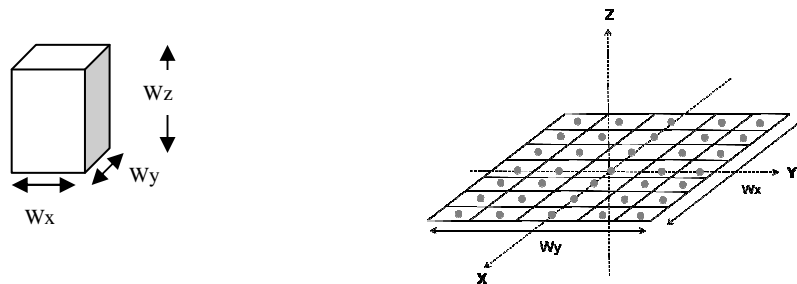


Figura 14: Datos de entrada para la generación de las posiciones de las fuentes de corriente. Archivo VOL.DAT

El archivo de salida es **XP.DAT** y debe contener todas las direcciones de cada una de las fuentes puntuales de corriente, organizadas en tres columnas donde cada una corresponde al valor del eje x, y, z.

b) Organización de la Matriz Ω

El módulo correspondiente a la generación de la Matriz Ω , se muestra desglosado en la Figura 15 a la Figura 19

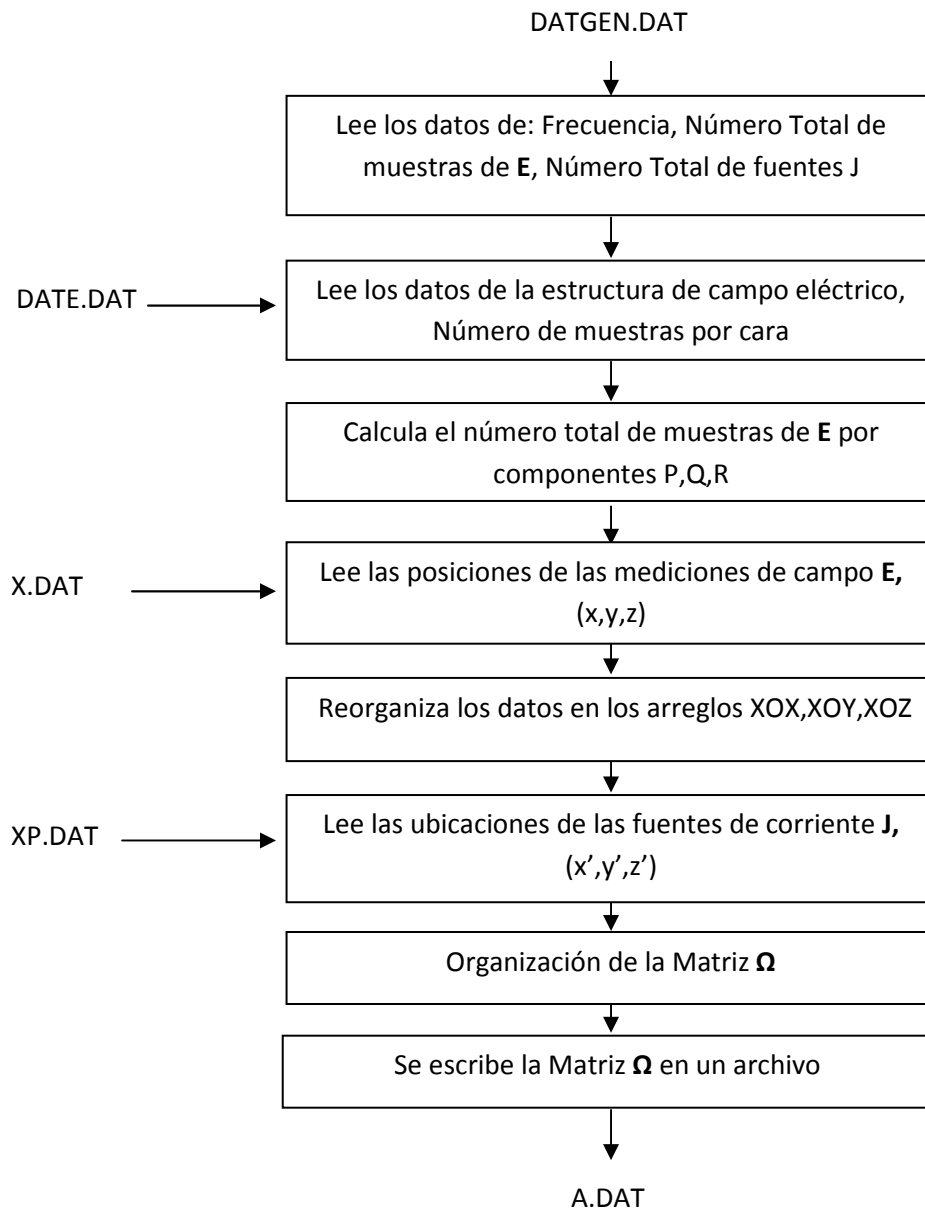


Figura 15: Diagrama de flujo del módulo que genera la Matriz Ω

Esta rutina requiere como entrada los siguientes archivos:

DATGEN.DAT: Archivo que contiene los datos generales que requiere el algoritmo, estos son:

Frecuencia N° de fuentes de corriente N° total de mediciones de campo

X.DAT Archivo que contiene las ubicaciones espaciales de los puntos de medición de campo eléctrico, esta viene dado en x,y,z y debe estar correlacionado con el archivo de las mediciones de campo eléctrico.

DATE.DAT Número de mediciones que se hacen en cada cara del paralelepípedo de campo eléctrico

Tabla 2: Archivo DATE.DAT

Cara	Filas	Columnas

Y el archivo de salida del módulo de volumen **XP.DAT**

En las figuras siguientes se muestra con detalle la organización de la Matriz Ω , la primera figura muestra la organización por filas, la cual discrimina entre la evaluación de las ecuaciones **Ex**, **Ey** y **Ez**. La Figura 17 muestra el diagrama de la evaluación de las ecuaciones **Ex**, en donde se realiza la organización de las columnas, éstas se separan por componentes **Ix**, **Iy** e **Iz**. La Figura 18 corresponde al diagrama de las ecuaciones **Ey** y la Figura 19 al diagrama de la evaluación de las ecuaciones **Ez**. Para entender las expresiones Ω_{ij} ver Anexo 3.

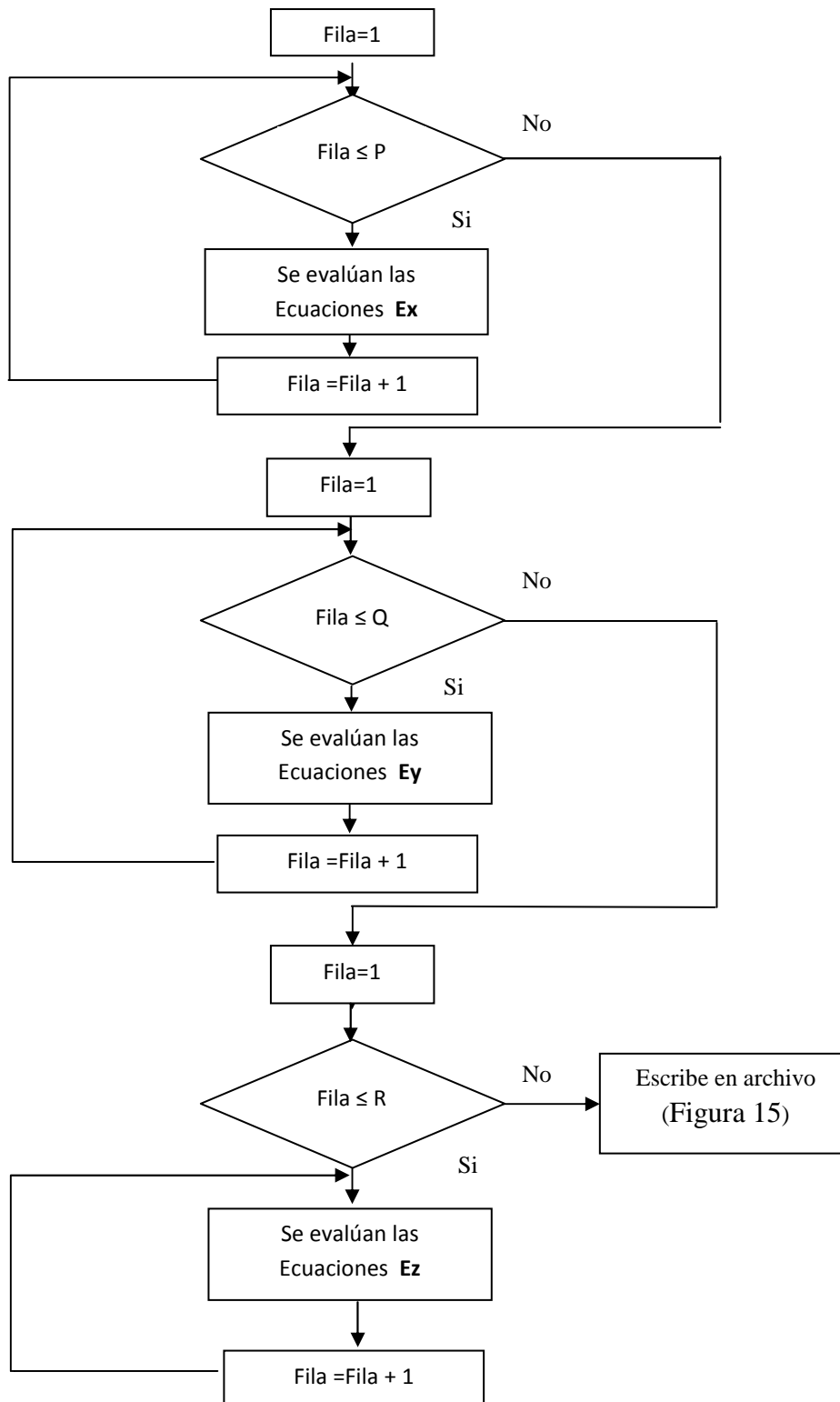


Figura 16: Organización de las filas de la matriz

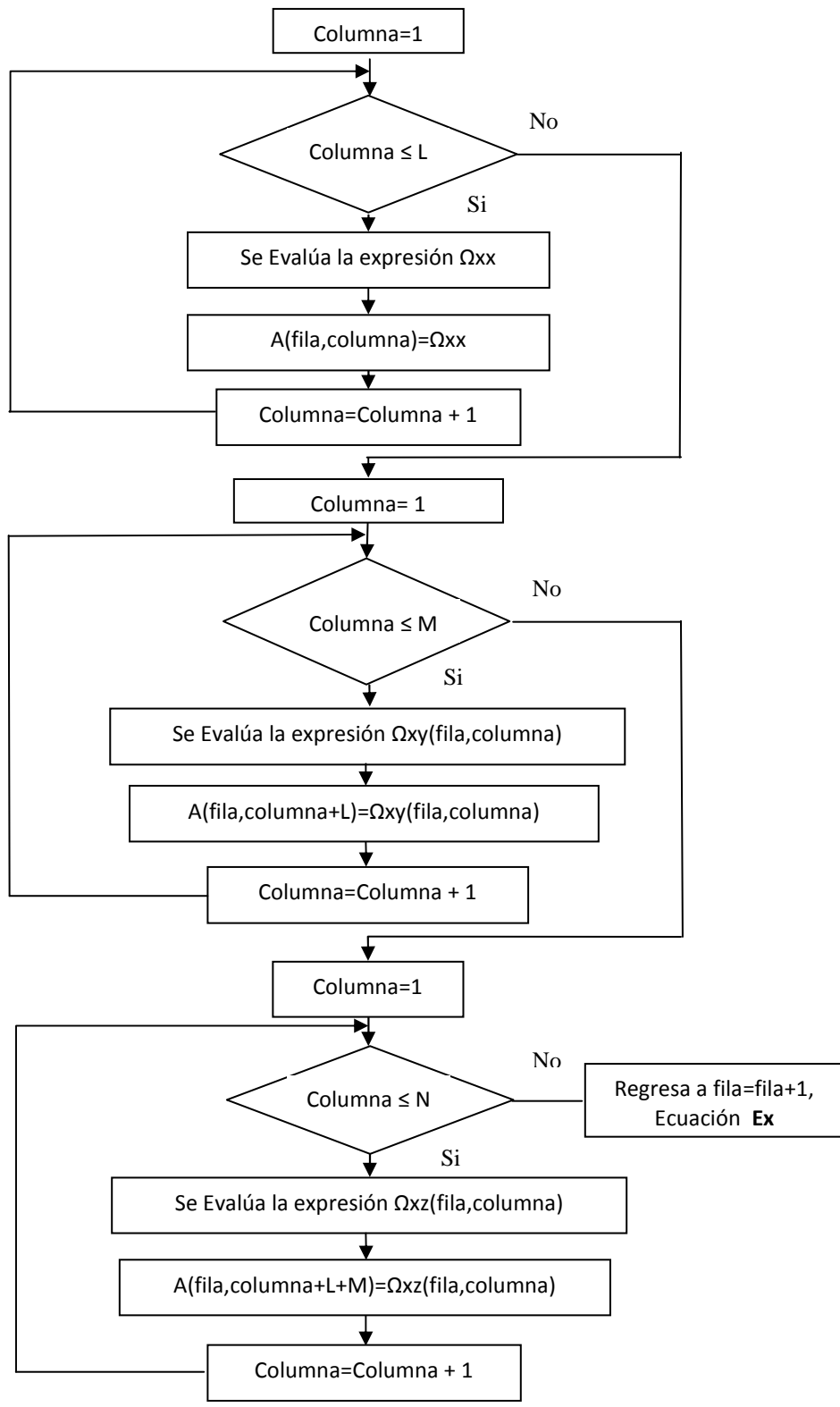


Figura 17: Evaluación de las ecuaciones Ex

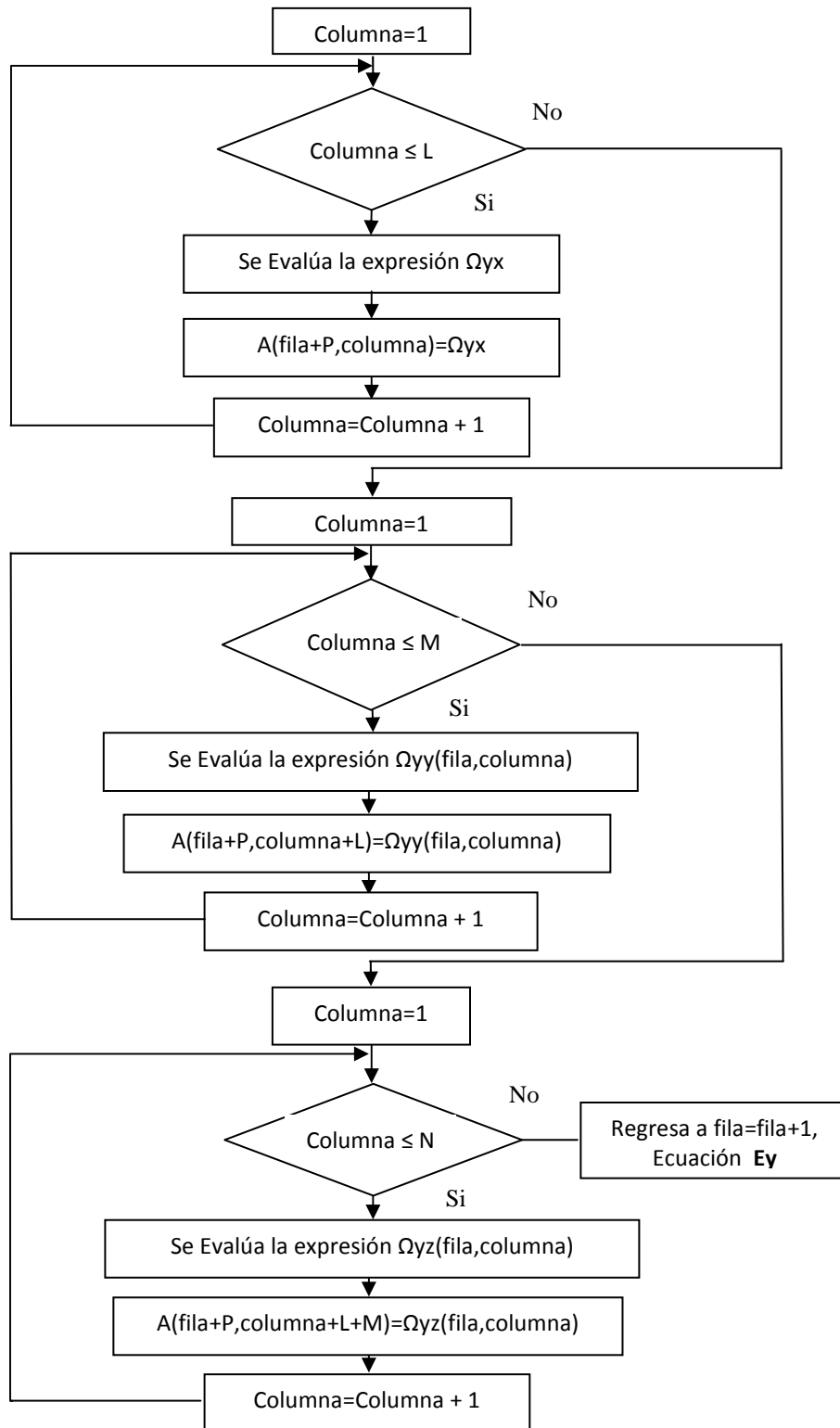


Figura 18: Evaluación de las ecuaciones E_y

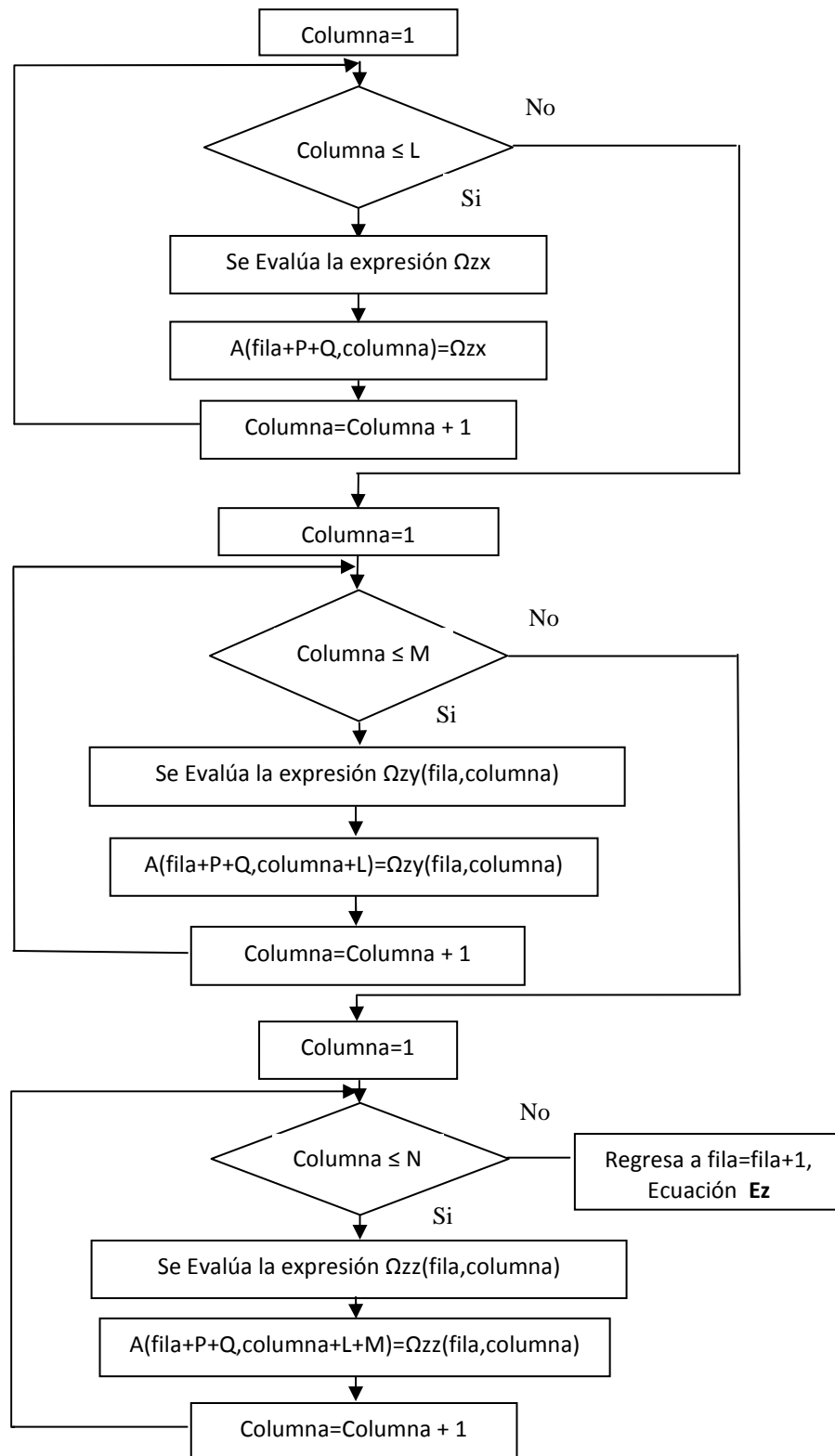


Figura 19: Evaluación de las ecuaciones Ez

El resultado del módulo antes descrito es el archivo **A.DAT** el cual contiene los datos de la Matriz Ω , la estructura de este archivo consta de tres columnas, y de un número de filas igual a tres veces el número de fuentes de corriente por el total de muestras de campo eléctrico. La primera columna indica el número de la fila en que se encuentra ubicado el elemento en la matriz, la segunda columna indica el número de la columna en el que se encuentra el elemento y en la tercera columna del archivo se ubican los elementos de la matriz. Por ejemplo, si se tiene la siguiente matriz

$$\begin{bmatrix} 4.5 & 3.2 & 1.6 \\ 2.3 & 4.0 & 5.3 \\ 1.2 & 7.6 & 2.0 \end{bmatrix}$$

El archivo **A.DAT**, tendrá la siguiente forma:

1	1	4.5
1	2	3.2
1	3	1.6
2	1	2.3
2	2	4.0
2	3	5.3
3	1	1.2
3	2	7.6
3	3	2.0

3.5.2. Segundo bloque. Módulo de la resolución del sistema

a) Precondicionamiento y resolución del sistema

El módulo de resolución del sistema consta de dos partes, en la Figura 20 se muestra el esquema general de la rutina

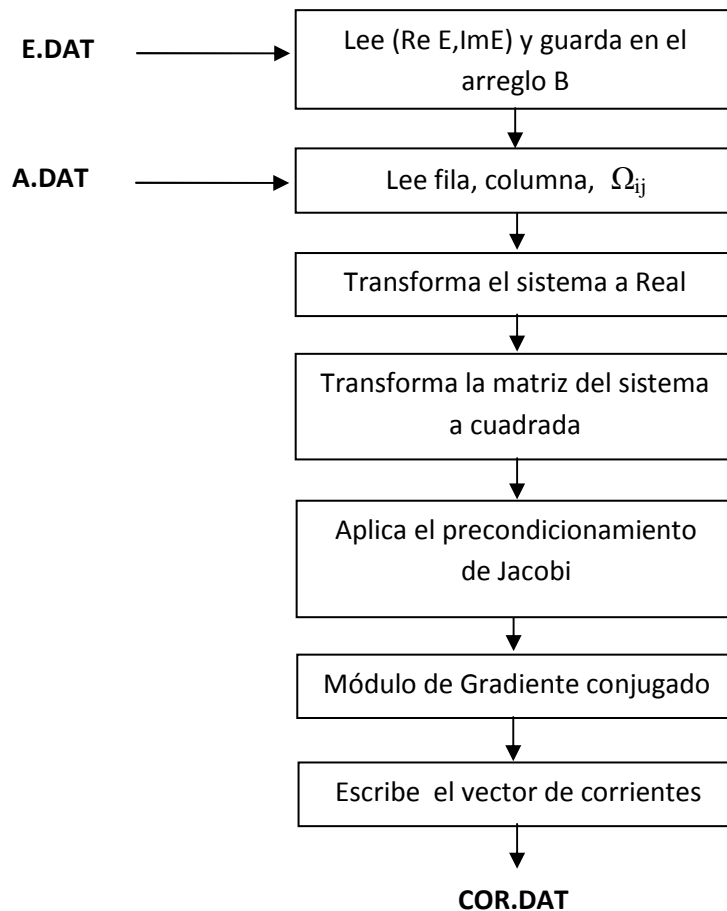


Figura 20: Esquema general del módulo de resolución del sistema

Para el módulo del Gradiente conjugado se utilizó un código disponible del IMSL. Los archivos de entrada, que requiere la rutina son:

E.DAT: Este archivo debe contener los datos de campo eléctrico medido dado en el formato (Re E_i , Im E_i) y además deben de estar agrupados por coordenadas y a su vez cada grupo debe ir ordenado por planos, (a su vez estos deben de estar

ordenados en forma ascendente), no importa si no hay datos en un determinado plano y como ya se dijo los datos de campo eléctrico de este archivo deben encontrarse correlacionados a los datos de las coordenadas del campo contenidos en el archivo **X.DAT**

COR.DAT: Este archivo contiene los valores de las fuentes de corrientes obtenidas al resolver el sistema en el módulo **CGL**. Este archivo consta de dos columnas, la primera es un contador y la segunda son los valores de corriente, estos se encuentran organizados de forma tal que primero se muestran todos los valores de la parte real de las fuentes de corriente, y después todas las partes imaginarias.

b) Organización del vector de los coeficientes de corriente

El diagrama de la organización de las corrientes se muestra a continuación en la siguiente figura.

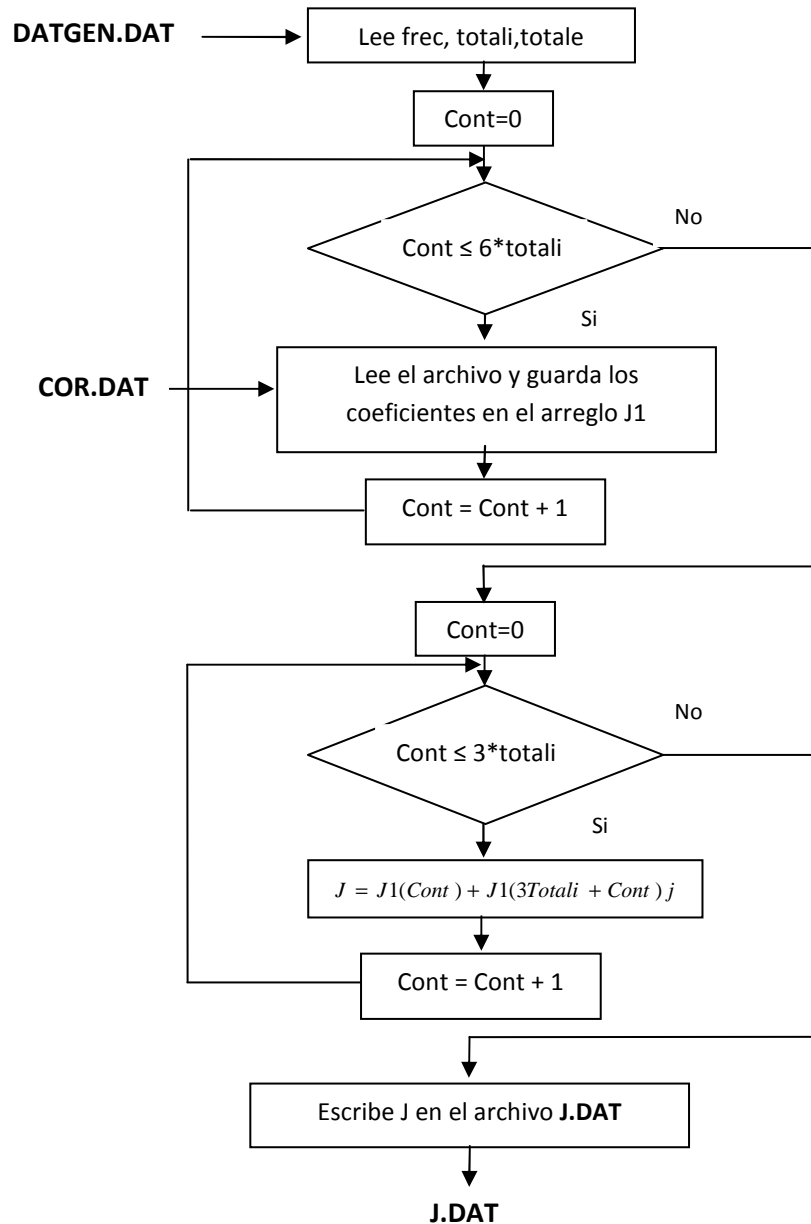


Figura 21: Diagrama de flujo de la rutina Organiza el vector de los coeficientes de corriente

El resultado obtenido se guarda en el archivo **J.DAT**, éste es producido por el módulo ORDENA, su función es la de escribir cada coeficiente de corriente en el formato adecuado (Re J, Im J) y ordenados por componente espacial.

3.5.3. Tercer bloque. Módulo de generación del patrón de radiación

El módulo de generación del patrón de radiación (ver Figura 12) consta de dos partes, la primera en donde se calcula la potencia radiada por el sistema, mientras que la segunda determina el diagrama de radiación.

a) Cálculo de la potencia radiada por el sistema

En la Figura 22 se muestra el diagrama de flujo que describe el cálculo de la potencia.

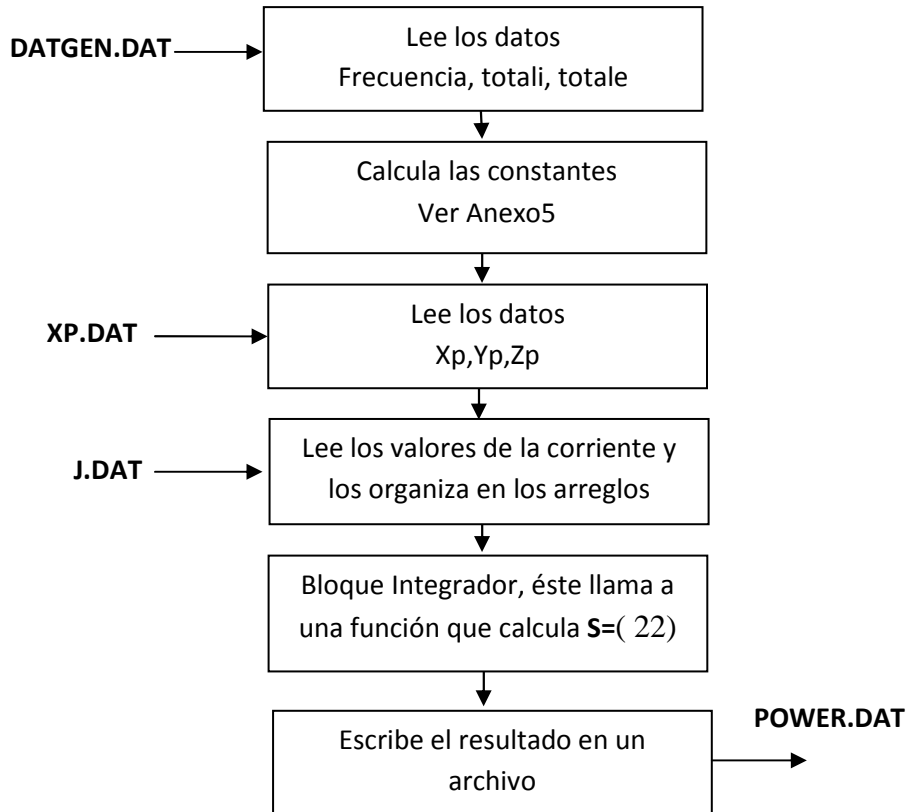


Figura 22: Diagrama de flujo del cálculo de la Potencia

La rutina que genera el valor de la potencia, requiere como entrada los archivos **DATGEN.DAT**, **XP.DAT** Y **J.DAT**. La salida del mismo, se guarda en un

archivo denominado **POWER.DAT**, el cual contiene el valor de la potencia que irradia el sistema, dato necesario para normalizar el patrón de radiación. El bloque integrador, consiste en una rutina basada en el Método de Gauss.⁴

b) Generación de la Función de Directividad

En las siguientes figuras se muestran los diagramas de flujo del módulo de generación de la Función de Directividad

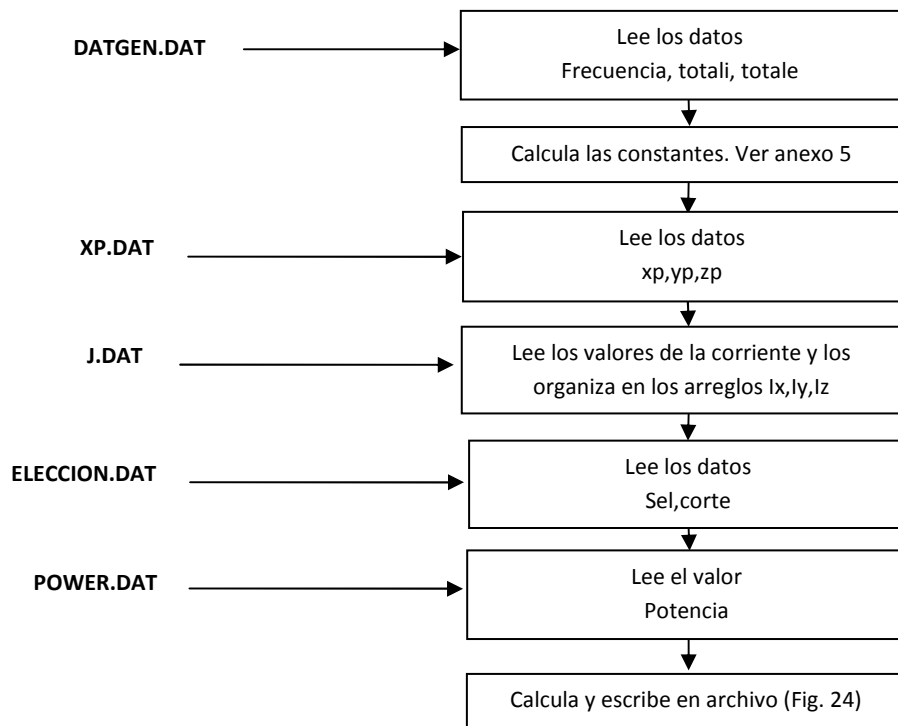


Figura 23: Diagrama de Flujo del Generador de la Función de Directividad

⁴ El código de esta rutina fue suministrado por el Dr. Freddy Brito.

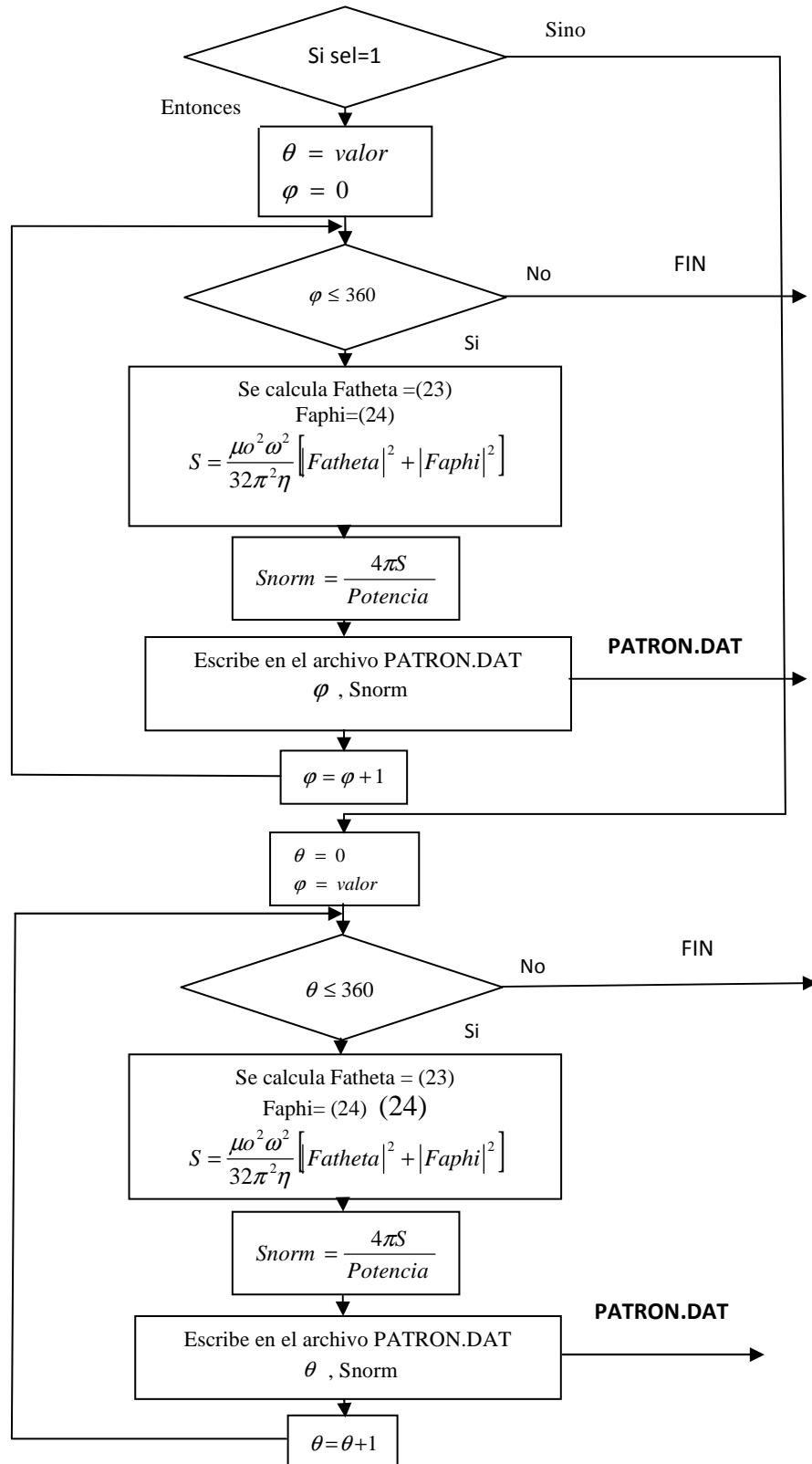


Figura 24: Diagrama de Flujo del Generador de la Función de Directividad

Aparte de los archivos **DATGEN.DAT**, **J.DAT**, **XP.DAT** y **POWER.DAT**, la rutina necesita leer el archivo **ELECCION.DAT** en este, se coloca la información del plano de corte en donde se desea el patrón de radiación. El archivo presenta la siguiente estructura:

Selector: 1 ó 2	Valor del corte
-----------------	-----------------

Si el selector se coloca en 1 se obtiene $\theta = \text{constante}$. Por ejemplo, $\theta = \pi/2$ se obtiene el patrón horizontal.

Si el selector se coloca en 2 se obtiene $\varphi = \text{constante}$. Por ejemplo, si $\varphi = \pi/2$ se obtiene el patrón de radiación vertical.

El archivo de salida **PATRON.DAT**, producido por el módulo **Generador de la Función de Directividad**, es el archivo que contiene los datos para graficar el patrón de radiación, consta de dos columnas, en la primera tiene los valores del barrido angular que van de 0,0000 a 6,2831 radianes con un paso de $1,7453 \times 10^{-2}$ radianes. Este archivo debe ser procesado por una aplicación gráfica externa para hallar el patrón de radiación gráfico.

3.6. Lista de variables

Tabla 3: Variables Generales

Generales	
FREC:	Real, dato, frecuencia de trabajo del sistema.
TOTALI:	Entero, dato. Número total de fuentes de corriente.
TOTALE:	Entero, dato. Número de puntos medidos de campo E
X,Y,Z	Real, dato. Posiciones de los puntos medidos de E
XP,YP,ZP	Real, dato. Posiciones de las fuentes de corriente

Tabla 4: Variables del módulo genera volumen

Genera volumen	
VOL(3,3):	Arreglo real, datos del archivo VOLUMEN.DAT
DELTA X, DELTA Y, DELTA Z:	Real, variables, tamaño del paso en la discretización.

Tabla 5: Variables del módulo genera matriz

Genera Matriz Ω	
NX1,NX2,NX5,NX6,NY3,NY4:	Entero, variables. Número de muestras de campo E medido en cada cara del paralelepípedo.
P,Q,R	Entero, variables. Número de muestras de campo E medido por componente. En el código P=NX, Q=NY, R=NZ
A(2*TOTALE,3*TOTALI)	Arreglo complejo, variable. Contiene los coeficientes de la matriz Ω
XEX(NX),XOY(NY),XOZ(NZ)	Arreglos reales, datos. Contienen las ubicaciones

	espaciales de las muestras medidas de E discriminadas por componentes del campo.
--	---

Tabla 6: Variables del módulo de resolución del sistema

Resolución del sistema	
B(2*TOTALE)	Arreglo complejo. Contiene las muestras medidas de campo E
J1(6*TOTALI)	Arreglo complejo. Contiene los coeficientes de la fuente de corriente

Tabla 7: Variables del módulo de potencia

Potencia	
IX(TOTALI),IY(TOTALI), IZ(TOTALI)	Arreglos complejos, variables. Contienen los coeficientes de las fuentes de corriente, organizados por componentes espaciales.
FATHETA	Real, variable. Ver ecuación (23)
FAPHI	Real, variable. Ver ecuación (24)
FAI	Real, variable. Función a integrar. Ver ecuación (28)
A,B,C,D,E,F	Real, variables. Límites de integración
IN	Entero, variable. Indicador del tipo de la integral (lineal, superficial o volumétrica)
RSUL	Real, variable. Resultado de la integral numérica

Tabla 8: Variables del módulo generador de la función de directividad

Generador de la Función de Directividad	
SEL	Entero, dato. Indica el tipo de corte que se desea realizar. SEL=1 θ =constante, SEL=2 φ =constante
VALOR	Real, dato. Valor del corte del plano en que se desea el patrón de radiación.
POTENCIA	Real, variable. Potencia calculada en el módulo anterior
SNORM	Real, variable. Valores del vector de Poynting normalizado, o valores de la Función de Directividad.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Antes de mostrar los resultados, se presenta un esquema de montaje básico para la realizar las mediciones de campo en zona cercana.

4.1. Esquema de medición del campo cercano:

Las mediciones de campo cercano deben realizarse en un ambiente controlado que simula las condiciones de espacio libre, estas condiciones se logran al utilizar una cámara completamente anecoica. En la Figura 25 se sugiere un esquema básico de montaje para realizar las mediciones. En general las características básicas tales como frecuencia de operación de los equipos y niveles de potencia dependerán de la antena que se desee medir y de la cámara anecoica que se tenga disponible.

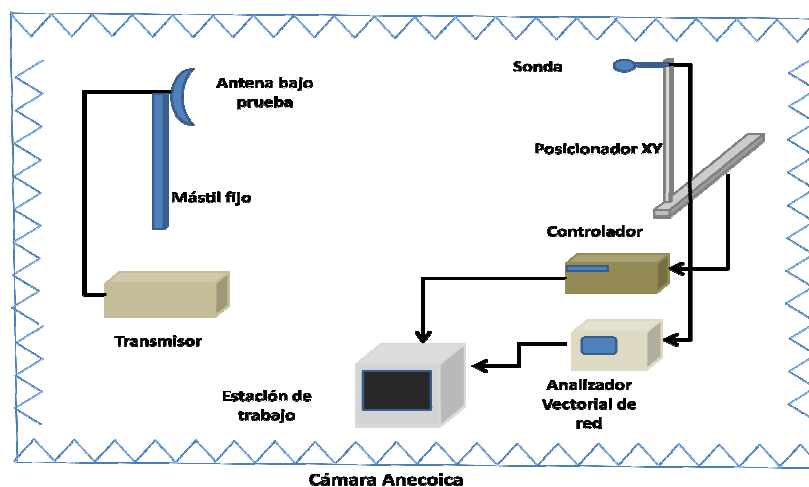


Figura 25. Esquema básico de montaje

Este esquema básico consta de:

- **Un mástil fijo**, el cual sostiene a la antena bajo prueba, este mástil debe ser capaz de sostener la antena en las seis direcciones en las cuales es posible apuntar la misma.
- **Un transmisor**, el cual alimenta a la antena bajo prueba, sus características dependerán de la antena cuyo patrón se desea medir.
- **Una sonda de prueba**, para mediciones en campo cercano. Ésta debe perturbar lo menos posible al sistema completo de medición. Se debe tomar en cuenta la precisión de la misma, ya que es un factor importante a considerar con respecto al número de muestras que se pueden tomar.
- **Un posicionador XY**, como su nombre lo indica este posicionador realiza un barrido en un plano, ubicando a la sonda de prueba en los puntos precisos de medición.



Figura 26: Posicionador XY [imagen obtenida de Nearfield Systems Inc.]

- **Un controlador**, que maneja al posicionador XY, es importante destacar que es muy recomendable que los cables que transmiten

información entre el controlador, el posicionador y los otros equipos sean de fibra óptica, para evitar interferencias en el sistema a medir.

- **Un analizador vectorial de red**, que permite medir el campo eléctrico tanto en módulo como en fase en el rango de frecuencias deseadas.
- **Una estación de trabajo**, en donde se realiza el procesamiento de los datos medidos.
- **Un sistema apuntador láser**, para ubicar con precisión la antena bajo prueba.

A grandes rasgos estos son los equipos necesarios para realizar las mediciones de campo cercano en un sistema cartesiano.

Para realizar mediciones en las seis caras del paralelepípedo propuesto en este trabajo, la antena bajo prueba debe poder posicionarse apuntando a las seis direcciones espaciales, de forma tal, que el proceso de medición se lleve a cabo de la siguiente manera: la antena se ubica en la primera posición (orientada de frente a la sonda de prueba, por ejemplo), se deja fija y el posicionador X-Y realiza el barrido completo del plano. Posteriormente se rota la antena en pasos de 90° , se deja fija en cada uno de ellos, mientras que el posicionador barre nuevamente el plano en cada uno de los pasos.

En vista, de que hasta la fecha no se dispone de la cámara anecoica ni del sistema de medición requerido, ni tampoco fue posible obtener datos experimentales de mediciones realizadas en campo cercano por otros laboratorios, incluso internacionales, se utilizaron en lugar de datos experimentales de campo cercano, datos sintéticos. A los mismos se les aplicó el algoritmo de transformación para posteriormente comparar los resultados arrojados con patrones de radiación teóricos obtenidos de fórmulas analíticas de campo lejano.

A continuación, se presentan cinco casos representativos de aplicación del método con el fin de demostrar su validez, estos resultados se obtienen de experimentos numéricos con diferentes tipos de antena. En los experimentos que se realizaron, los sistemas operan a una frecuencia de 299,79 MHz. Los datos de campo eléctrico en zona cercana se obtuvieron de utilizando las expresiones que aparecen en [25, pp 331] y [31,pp 145, 217]

4.2.Dipolo eléctrico de media longitud de onda ($\lambda/2$)

Se considera un dipolo eléctrico de media longitud de onda colocado en el centro del sistema coordenado, dispuesto en forma vertical (coincidente al eje z). Se tomaron 100 muestras en cada cara del paralelepípedo, lo que hacen 600 puntos de medición de campo eléctrico. Las dimensiones de éste se muestran en la Figura 27. Los archivos **DATGEN.DAT** y **DATE.DAT** para este caso son de la forma (el significado de los datos que se muestran, se ha explicado en el Capítulo III):

299792458	625	600
-----------	-----	-----

Archivo DATGEN.DAT

1	10	10
2	10	10
3	10	10
4	10	10
5	10	10
6	10	10

Archivo DATE.DAT

La fuente equivalente de corriente para el dipolo consistió en 625 pulsos de corriente contenidos en un volumen de 0,5 m de alto y una base de 0,01m x 0,01m. El archivo **VOLUMEN.DAT** tiene la siguiente forma:

0.01	5	0.
0.01	5	0.
0.5	25	0.

ARCHIVO VOLUMEN.DAT

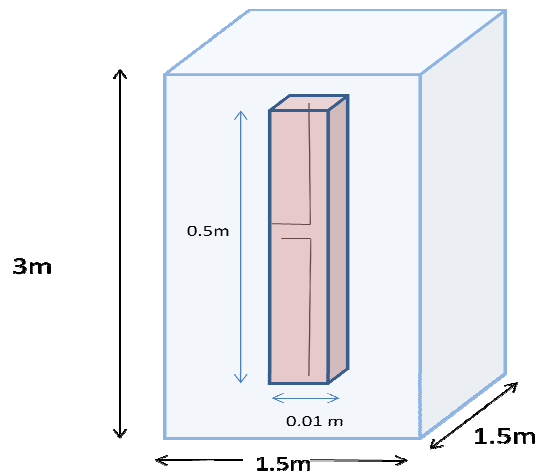


Figura 27. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para un dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$)

A manera de ejemplo, a continuación se muestran extractos de los archivos **X.DAT**, **E.DAT**, **XP.DAT**, que debido a su gran extensión no se muestran en su totalidad.

-6.749999999999999E-001	-6.749999999999999E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	-5.249999999999999E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	-3.750000000000000E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	-2.250000000000000E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	-7.499999999999996E-002	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	7.499999999999996E-002	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	2.250000000000001E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	3.750000000000000E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	5.249999999999999E-001	1.500000000000000
-6.749999999999999E-001	6.750000000000000E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	-6.749999999999999E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	-5.249999999999999E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	-3.750000000000000E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	-2.250000000000000E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	-7.499999999999996E-002	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	7.499999999999996E-002	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	2.250000000000001E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	3.750000000000000E-001	1.500000000000000
-5.249999999999999E-001	5.249999999999999E-001	1.500000000000000

Archivo X.DAT

(8.606811693840056,-3.647159127254519)
(10.102854611913000,-7.913453026851336E-001)
(10.642865771049660,1.834576497569705)
(10.639476158764780,3.765509534894361)
(10.511650780530680,4.770317038300441)
(10.511650780530680,4.770317038300441)
(10.639476158764780,3.765509534894350)
(10.642865771049660,1.834576497569705)
(10.102854611913000,-7.913453026851336E-001)
(8.606811693840056,-3.647159127254519)
(7.857775809265663,-6.154907909773261E-001)
(8.307712406435313,2.166158742988392)
(8.005226216100612,4.505779560912131)
(7.435066532854501,6.116168616396991)
(7.028134619696455,6.918091463834804)
(7.028134619696455,6.918091463834804)
(7.435066532854506,6.116168616396981)
(8.005226216100612,4.505779560912131)
(8.307712406435313,2.166158742988392)

Archivo E.DAT

```

-4.000000000000000E-003 -4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-4.000000000000000E-003 -2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-4.000000000000000E-003 0.000000000000000E+000 -2.400000000000000E-001
-4.000000000000000E-003 2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-4.000000000000000E-003 4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-2.000000000000000E-003 -4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-2.000000000000000E-003 -2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-2.000000000000000E-003 0.000000000000000E+000 -2.400000000000000E-001
-2.000000000000000E-003 2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
-2.000000000000000E-003 4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
0.000000000000000E+000 -4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
0.000000000000000E+000 -2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
0.000000000000000E+000 0.000000000000000E+000 -2.400000000000000E-001
0.000000000000000E+000 2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
0.000000000000000E+000 4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
2.000000000000000E-003 -4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
2.000000000000000E-003 -2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
2.000000000000000E-003 0.000000000000000E+000 -2.400000000000000E-001
2.000000000000000E-003 2.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001
2.000000000000000E-003 4.000000000000000E-003 -2.400000000000000E-001

```

Archivo XP.DAT

La matriz Ω del sistema tiene las dimensiones de 1200x 1800

Para obtener la Directividad en el plano de elevación $\varphi=\pi/2$, el archivo **ELECCION.DAT** debe tener la siguiente forma:

2	1.570796
---	----------

Archivo ELECCION.DAT

Los resultados obtenidos se muestran en las Figura 28 y Figura 29. Se le denomina curva experimental numérica a la obtenida mediante el algoritmo de transformación y curva analítica a la obtenida mediante ecuaciones matemáticas conocidas.

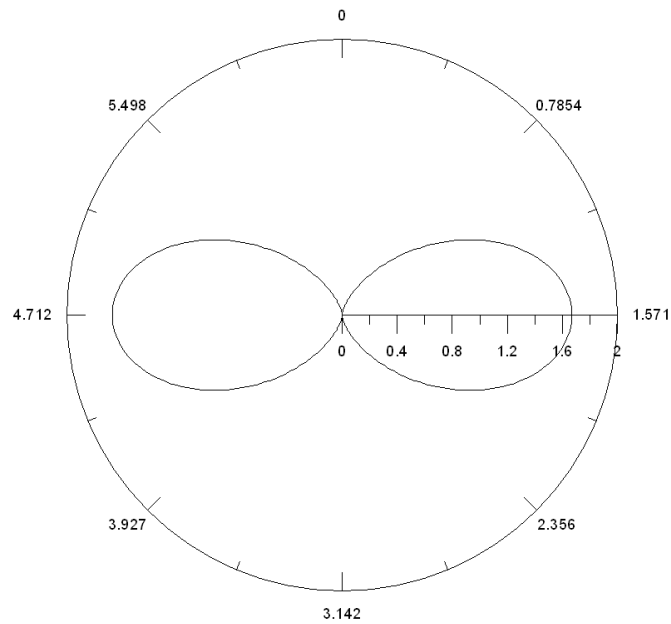


Figura 28: Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$)

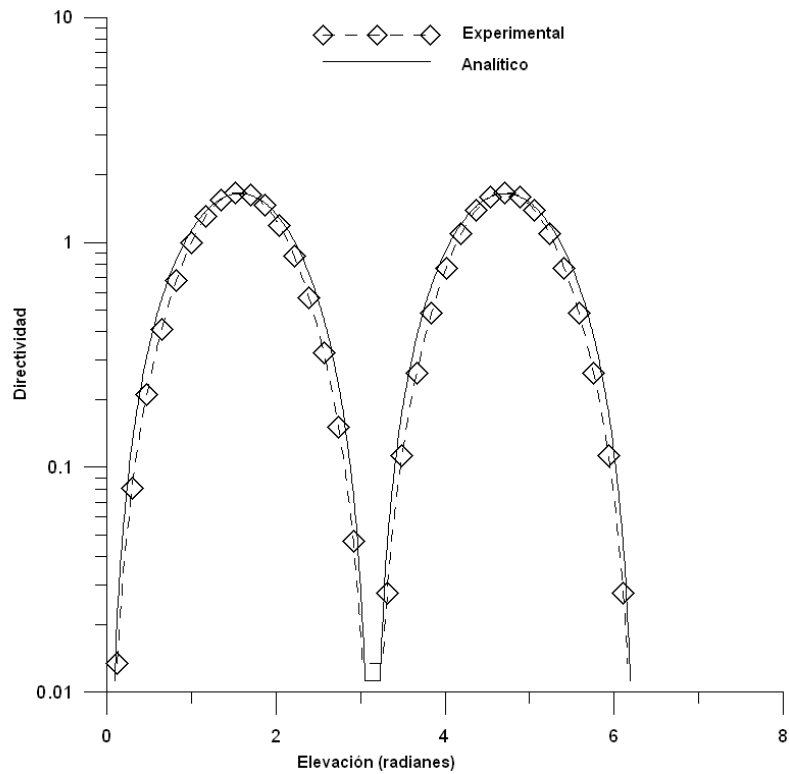


Figura 29: Gráfica cartesiana de la Directividad plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$)

Para obtener la Directividad en el plano $\theta=\pi/2$, el archivo **ELECCION.DAT** debe tener la siguiente forma:

1	1.570796
---	----------

Archivo **ELECCION.DAT**

Los resultados se muestran en la Figura 30 y 31

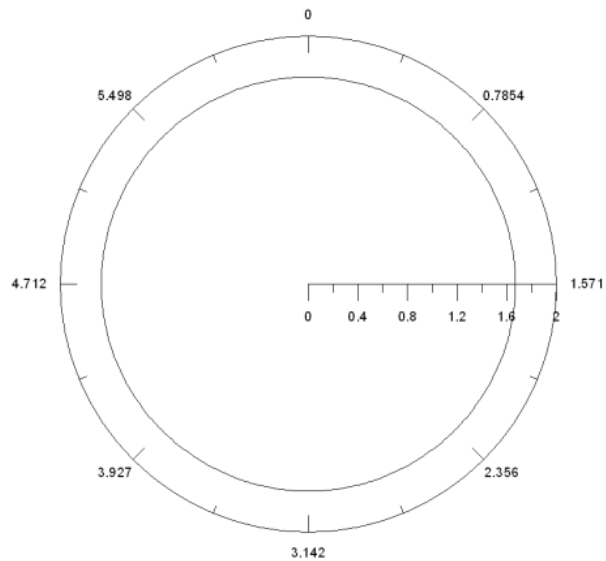


Figura 30. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica plano $\theta=\pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$)

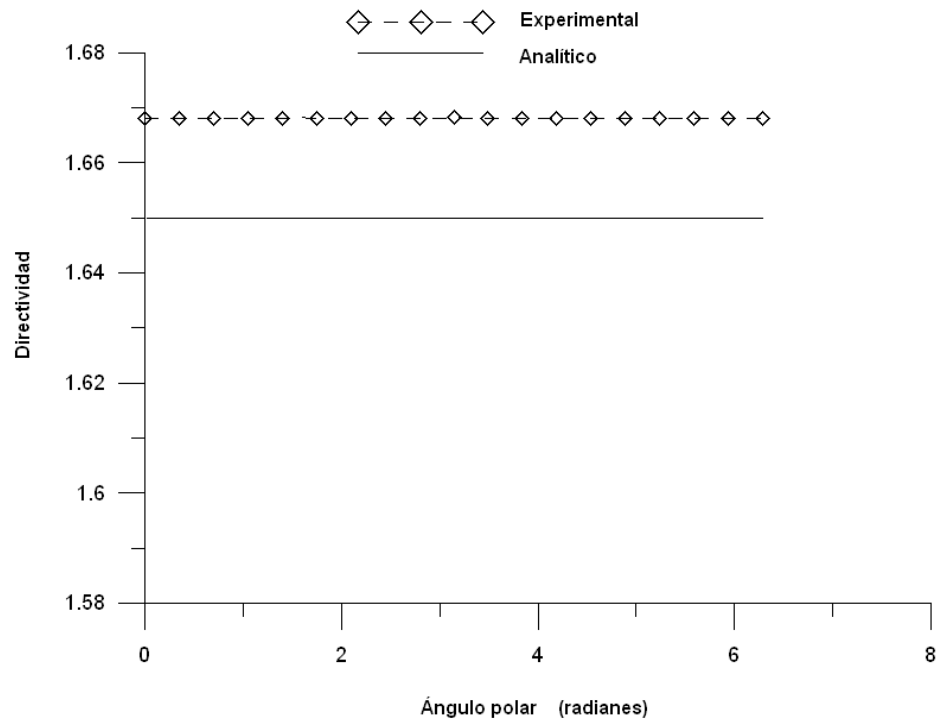


Figura 31 Gráfica cartesiana de las curvas de Directividad experimental numérica y analítica plano $\theta=\pi/2$, antena dipolo de media longitud de onda. ($\lambda/2$)

De las Figura 28 y Figura 29 se puede observar el patrón de radiación en el plano ($\varphi=\pi/2$) de la antena tipo dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$). En la primera figura se muestra el patrón en coordenadas polares obtenido a través del algoritmo de transformación, en ella se puede ver, que la forma del patrón concuerda con el comportamiento real de este tipo de antena. En la segunda figura se muestra la comparación entre la curva obtenida por el algoritmo de transformación, a la cual denominamos experimental numérica y la curva teórica obtenida directamente de forma analítica. De ellas se puede decir que el resultado es coherente con el esperado teóricamente, el valor de la directividad máxima es de 1,668, mientras que la directividad teórica máxima es de 1,65, por lo que se tiene una diferencia de 0,018. Además se puede ver de la comparación que no existe discrepancia apreciable en el ancho de los lóbulos. En la Tabla 9 se muestran los datos numéricos más relevantes:

Tabla 9: Comparación de los resultados para el dipolo $\lambda/2$

	Analítico	Experimental numérica	Error
$D_{i_{m\acute{a}x}}$	1,65	1,66	0,60 %
Ancho del lóbulo [radianes]	1,35	1,33	1,48%

En la

Figura 30 se muestra el patrón de radiación en el plano $\theta=\pi/2$ de la antena tipo dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$) en coordenadas polares, en la misma se corrobora el comportamiento omnidireccional que posee este tipo de antena en el plano de corte acimutal. En la Figura 31 se muestra la comparación entre las curvas experimental numérica y teórica en coordenadas cartesianas y en escala lineal, en ella se puede observar con mayor detalle que ambas curvas tienen la misma forma, con una error de 0,6 % en la directividad máxima.

4.3. Dipolo de dos longitudes de onda (2λ)

Se considera un dipolo eléctrico de dos longitudes de onda colocado en el centro del sistema coordenado, dispuesto en forma vertical (coincidente con el eje z). Se tomaron 100 muestras en cada cara del paralelepípedo, lo que hacen 600 puntos de medición de campo eléctrico. La fuente de corriente consta de 625 pulsos distribuidos en 25 capas horizontales de 25 fuentes cada una, en un volumen de las dimensiones que se muestran en la Figura 32.

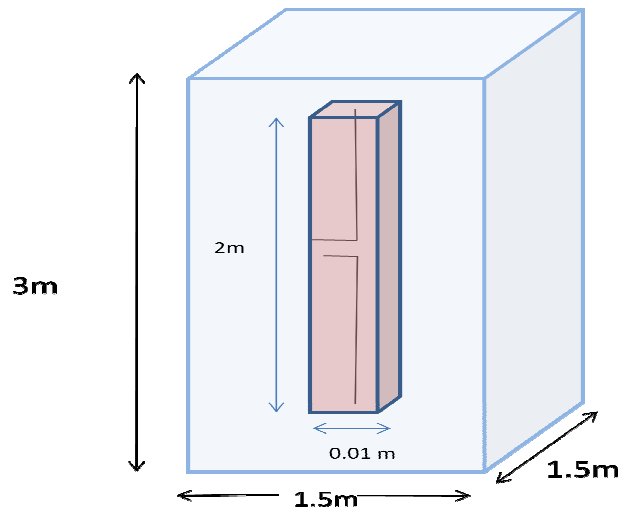


Figura 32 Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para un dipolo de dos longitudes de onda (2λ)

La matriz Ω del sistema tiene las dimensiones de 1200x 1875

Los resultados obtenidos para el plano $\varphi=\pi/2$, se muestran en las Figura 33 y Figura 34

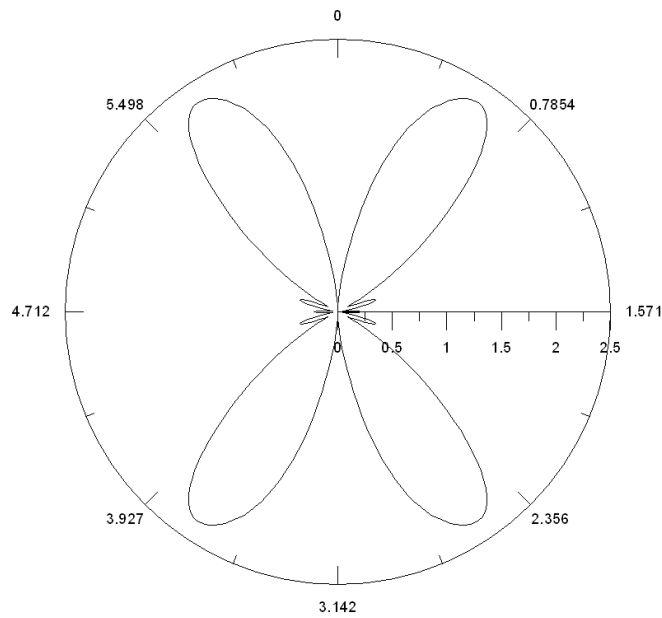


Figura 33. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de dos longitudes de onda (2λ)

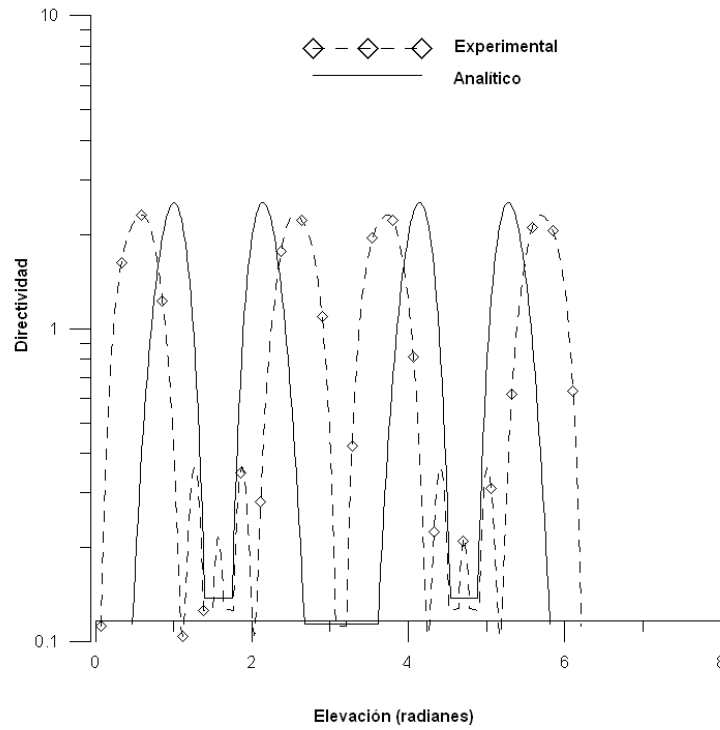


Figura 34. Gráfica cartesiana de las curvas de directividad analítica y experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de dos longitudes de onda (2λ)

En la Figura 33 se muestra el patrón de radiación en el plano $\varphi=\pi/2$ obtenido mediante el algoritmo de transformación, graficado en coordenadas polares, en la misma se puede verificar que la forma del patrón de radiación es coherente. En la Figura 34 se muestran la curva experimental numérica y la teórica, de la comparación entre ellas se puede notar que la curva experimental posee una forma similar a la curva teórica, pero desfasadas aproximadamente 0,5 radianes y con una discrepancia en el ancho de los lóbulos, siendo más anchos los de la curva experimental. Esto se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 10: Comparación de los resultados para el dipolo 2λ

	Analítico	Experimental numérica	Error
$D_{i_{m\acute{a}x}}$	2,52	2,31	8,72 %
Ancho del lóbulo [radianes]	0,59	0,65	9,23%

De la Tabla 10 se puede observar que los errores en los parámetros que se muestran no superan el 10%, por lo que las diferencias entre los valores prácticos y teóricos son aceptables.

El patrón de radiación en el plano $\theta=\pi/2$ no se muestra, ya que el resultado es muy similar al caso del dipolo de media longitud de onda, es decir, el patrón obtenido es una circunferencia lo cual es coherente con el comportamiento omnidireccional de la antena en el plano acimutal.

4.4. Dipolo de tres medias longitudes de onda ($3\lambda/2$)

El esquema del experimento es exactamente igual al punto anterior, en lo referente a la distribución y cantidad de mediciones y fuentes de corriente, lo que cambia son las dimensiones de los paralelepípedos, como se puede ver en la Figura 35.

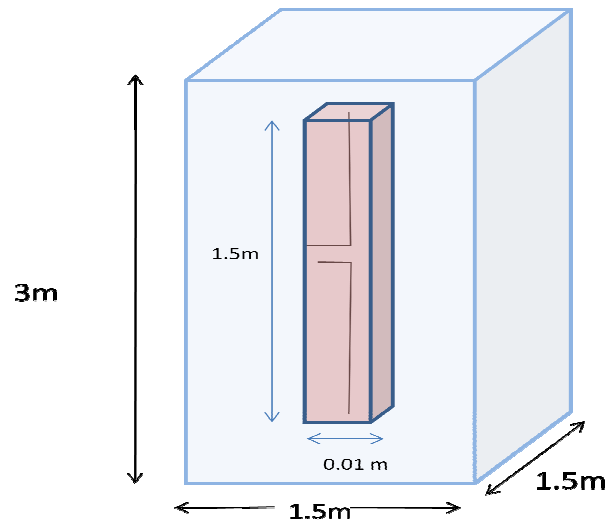


Figura 35. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para un dipolo de tres medias longitudes de onda ($3\lambda/2$)

Los resultados obtenidos para el plano $\varphi=\pi/2$, se pueden observar en las Figura 36 y Figura 37.

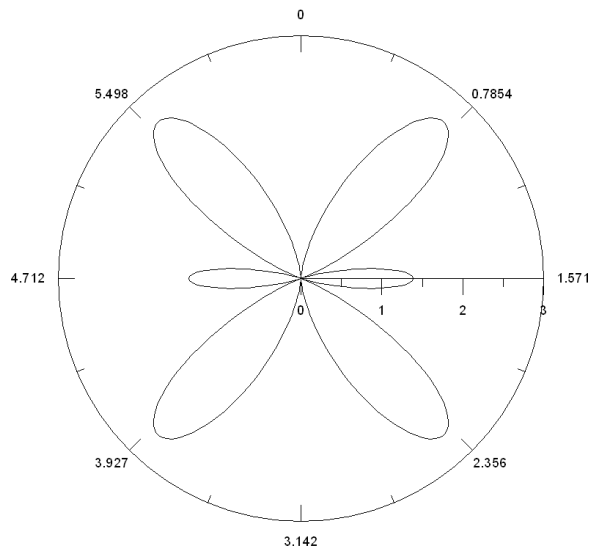


Figura 36. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de tres medias longitudes de onda

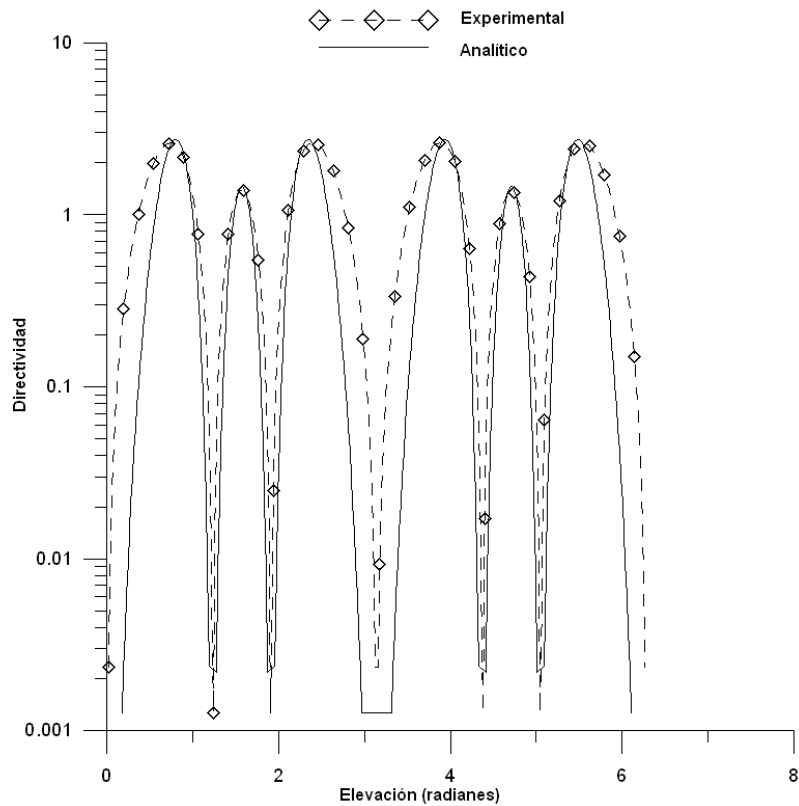


Figura 37 Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad experimental numérica y analítica en el plano $\varphi=\pi/2$, antena dipolo de tres medias longitudes de onda ($3\lambda/2$)

En la Figura 36 se muestra el patrón de radiación obtenido utilizando el método de transformación para el plano $\varphi=\pi/2$ graficado en coordenadas polares, de la cual se puede decir que el resultado obtenido concuerda con la forma del patrón de radiación teórico de este tipo de antena.

En la Figura 37 se puede ver la comparación entre las curvas teórica y experimental numérica, graficadas en coordenadas lineales, en escala logarítmica. La curva experimental numérica sigue la tendencia de la curva teórica, sin embargo se puede

notar una discrepancia en el ancho de los lóbulos, siendo más anchos los de la curva experimental. En la Tabla 11 se muestran los datos numéricos más importantes:

Tabla 11: Comparación de los resultados para el dipolo $3\lambda/2$

	Analítico	Experimental numérica	Error
$D_{i_{m\acute{a}x}}$	2,22	2,61	17,57 %
Ancho del lóbulo [radianes]	0,56	0,58	3,57%

En este caso, se observa que las curvas se encuentran en fase, pero el error en el valor de la directividad máxima es mayor que en los casos anteriores.

4.5. Aro o dipolo magnético

Se considera un dipolo magnético suficientemente pequeño de manera que la amplitud de su corriente sea constante, de 0,1 m de radio dispuesto horizontalmente en el plano xy. Se tomaron 100 muestras en cada cara del paralelepípedo, lo que hacen 600 puntos de medición de campo eléctrico. Las dimensiones de éste se muestran en la Figura 38.

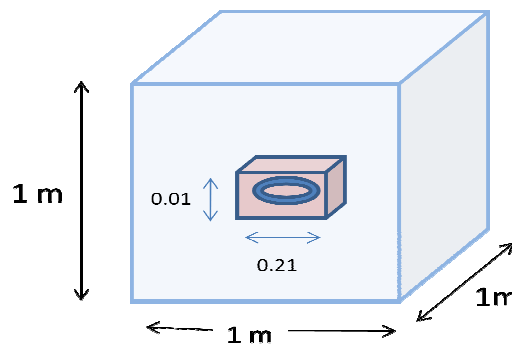


Figura 38. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para una antena tipo aro.

La fuente de corriente está formada por 720 pulsos distribuidos en 5 capas de 144 fuentes cada una, en un volumen de las dimensiones que se muestran en la Figura 38 La matriz $\mathbf{\Omega}$ del sistema tiene las dimensiones de 1200x 2160

Los resultados obtenidos para el plano $\theta=\pi/2$, se pueden observar en las Figura 39 y Figura 40

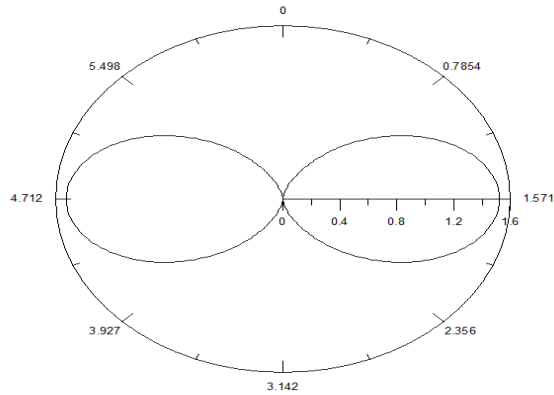


Figura 39. Gráfica de la Directividad experimental numérica en el plano $\theta=\pi/2$, antena tipo aro o dipolo magnético

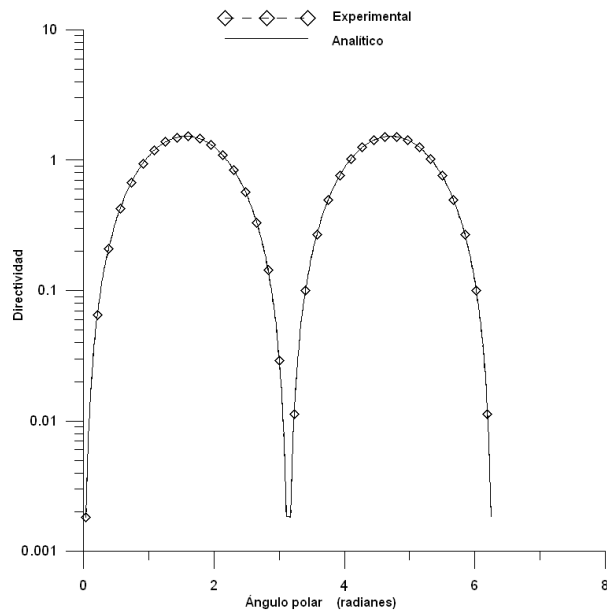


Figura 40 Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad experimental numérica y analítica en el plano $\theta=\pi/2$, antena tipo aro.

En la Figura 39 se muestra el patrón de radiación obtenido de la transformación en el plano $\theta=\pi/2$ de la antena tipo aro, en coordenadas polares, en ella se puede ver que el mismo corresponde a la forma esperada del patrón teórico. Esto se puede ver aún mejor en la Figura 40, en donde se muestran las dos curvas, la experimental numérica y la teórica en coordenadas cartesianas, en ella se puede ver como ambas curvas se solapan completamente.

Tabla 12: Comparación de los resultados para la antena tipo aro

	Analítico	Experimental numérica	Error
$D_{i_{m\acute{a}x}}$	1,65	1,52	7,76%
Ancho del lóbulo [radianes]	1,57	1,46	7,01%

De la Tabla 12 se puede observar que los valores arrojados por la transformación concuerdan con los valores teóricos, obteniéndose errores con un valor aceptable.

4.6. Arreglo de dos dipolos

Se consideran dos dipolos eléctricos de media longitud de onda cada uno ubicados verticalmente (paralelos al eje z), distanciados un cuarto de longitud de onda ($\lambda/4$) y con un desfase de 90° en la corriente de uno con respecto al otro. Se tomaron 100 muestras en cada cara de un paralelepípedo que encierra a ambos radiadores, lo que hacen 600 puntos de medición de campo eléctrico. La disposición de las antenas para la medición se puede ver en la Figura 41.

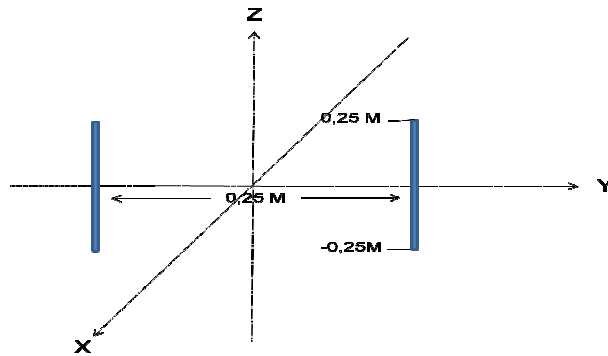


Figura 41. Disposición de los dipolos

La fuente de corriente está formada por dos volúmenes de 300 muestras cada uno, de dimensiones 0,5 m de alto y 0,1x0,1 cm de base. Las fuentes se distribuyen en el volumen en 12 capas horizontales cada una con 25 fuentes puntuales. (Ver Figura 42). La matriz Ω del sistema tiene las dimensiones de 1200x 1800.

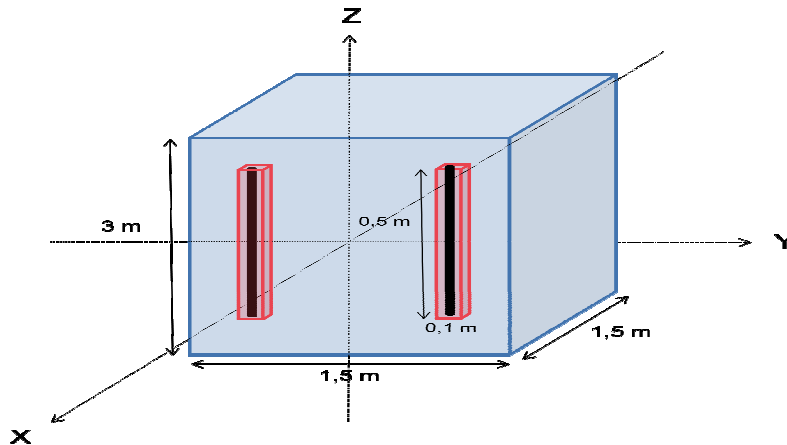


Figura 42. Dimensiones del paralelepípedo de medición y de la fuente de corriente para dos dipolos de media longitud de onda

El patrón obtenido para el corte $\varphi=\pi/2$, se muestra en la Figura 43.

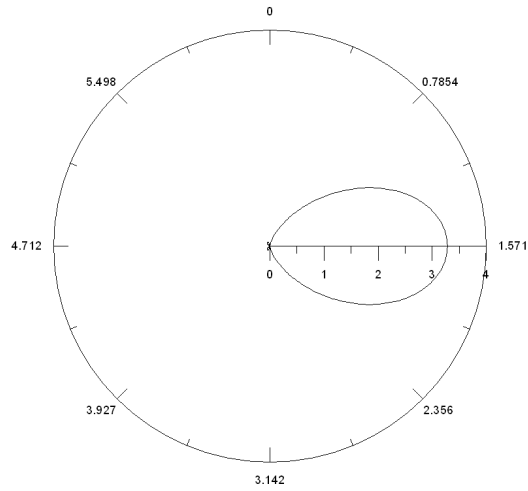


Figura 43 Gráfica de la Directividad experimental numérica en el plano $\varphi=\pi/2$, arreglo de dos dipolos

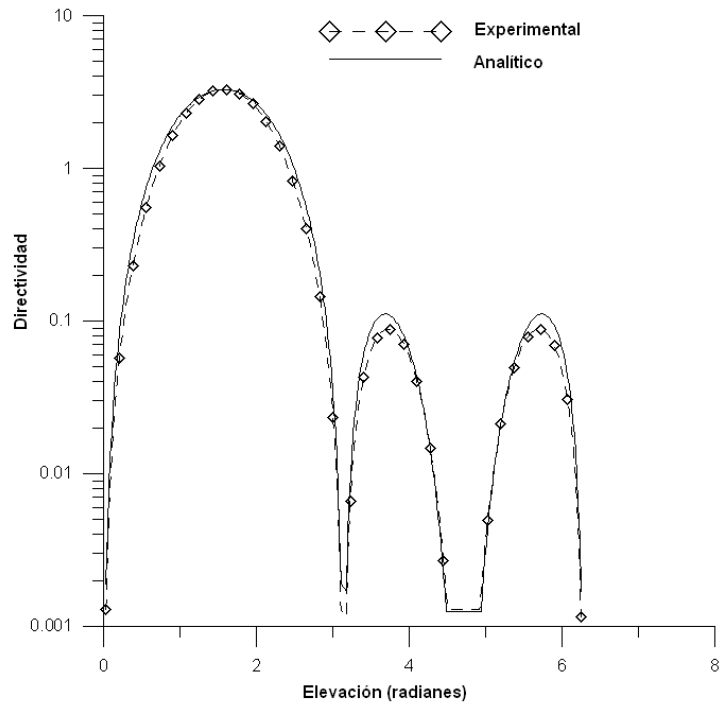


Figura 44. Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad experimental numérica y analítica en el plano $\varphi=\pi/2$, arreglo de dos dipolos

En la Figura 43 se muestra el patrón de radiación obtenido utilizando el método de transformación para el plano $\varphi=\pi/2$ graficado en coordenadas polares, de la cual se puede decir que el resultado obtenido concuerda con la forma del patrón de radiación teórico de este tipo de configuración.

En la Figura 44 se puede ver la comparación entre las curvas analítica y experimental numérica, graficadas en coordenadas lineales, en escala logarítmica. La curva experimental numérica sigue la tendencia de la curva analítica y se puede ver como se solapan casi en su totalidad. En la Tabla 13 se muestran los datos numéricos más importantes:

Tabla 13: Comparación de los resultados para el arreglo de dipolos en el plano $\varphi=\pi/2$

	Analítico	Experimental numérica	Error
$D_{i_{m\acute{a}x}}$	3,28	3,28	0%
Ancho del lóbulo [radianes]	1,46	1,32	9,6%

De la Tabla 13 se observa como no existe diferencia entre el valor analítico y el valor arrojado por la transformación de la directividad máxima, y el valor del error en el ancho del lóbulo es menor al 10 %

El patrón obtenido para el corte de elevación $\theta=\pi/2$, se muestra en la Figura 45.

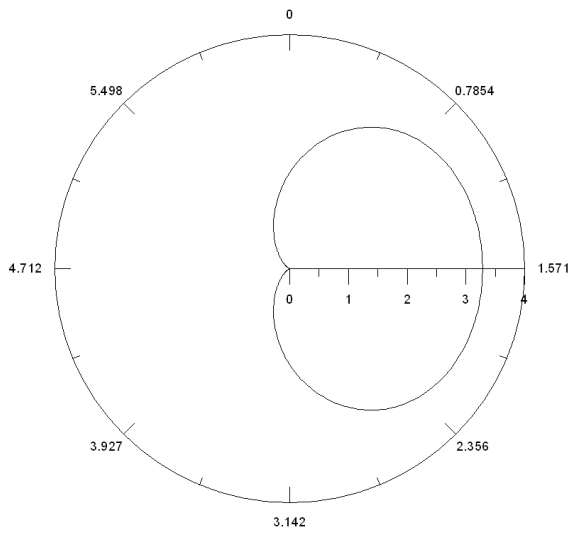


Figura 45. Gráfica polar de la Directividad experimental numérica en el plano $\theta=\pi/2$, arreglo de dos dipolos

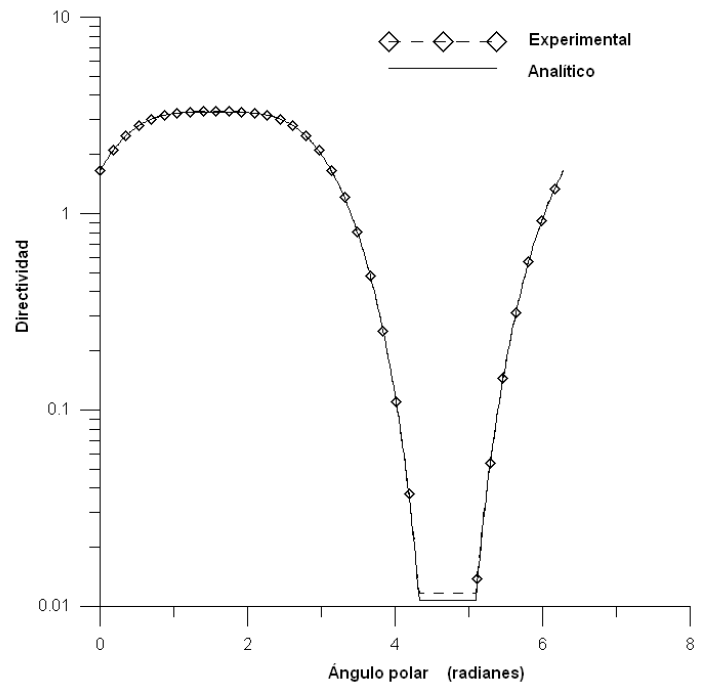


Figura 46. Gráfica cartesiana de las curvas de la Directividad analítica y experimental numérica en el plano $\theta=\pi/2$, arreglo de dos dipolos.

En la Figura 45 se muestra el patrón de radiación obtenido utilizando el método de transformación para el plano $\varphi=\pi/2$ graficado en coordenadas polares, de la cual se puede decir que el resultado obtenido concuerda con la forma del patrón de radiación teórico de este tipo de configuración.

En la Figura 46 se puede ver la comparación entre las curvas analítica y experimental numérica, graficadas en coordenadas lineales, en escala logarítmica. La curva experimental sigue la tendencia de la curva analítica y se puede ver como se solapan casi en su totalidad. En la Tabla 14 se muestran los datos numéricos más importantes:

Tabla 14: Comparación de los resultados para el arreglo de dipolos en el plano $\theta=\pi/2$

	Teórico	Práctico	Error
$D_{i_{\text{máx}}}$	3,28	3,28	0%
Ancho del lóbulo [radianes]	3,00	3,14	4,67%

De la Tabla 14 se observa como no existe diferencia entre el valor analítico y el valor experimental de la directividad máxima, y el valor del error en el ancho del lóbulo es menor al 10 %

4.7. Arreglo de dos dipolos con distintas fuentes de corrientes equivalentes

Con el fin de realizar pruebas de sensibilidad del algoritmo a distintas formas de fuente de corriente, se plantea un experimento donde la disposición de las antenas, el esquema y los datos medidos son exactamente los mismos al experimento anterior, pero se plantean dos configuraciones diferentes de fuente equivalente de corriente.

La primera configuración consiste en un volumen que abarca el espacio de ambos dipolos, de dimensiones $0,45 \times 0,1$ m de base por $0,5$ m de alto, a este volumen se le denomina “volumen de corriente 1”.(Ver Figura 47)

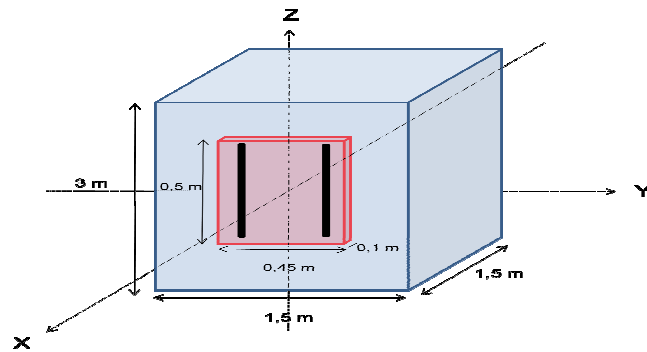


Figura 47. Dimensiones del paralelepípedo de medición y volumen de corriente 1

Posteriormente, se utilizó una segunda configuración de fuente de corriente, con las siguientes dimensiones: $0,45 \times 0,45$ m de base por $0,5$ m de alto y se le denominó “volumen de corriente 2”. (Ver Figura 48)

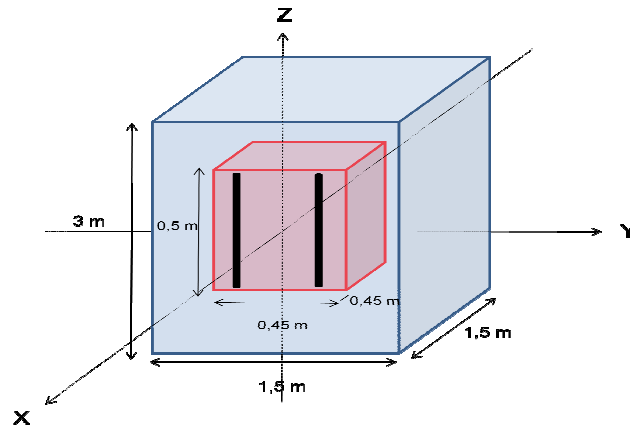


Figura 48. Dimensiones del paralelepípedo de medición y del tercer tipo de volumen considerado como fuente de corriente para dos dipolos de media longitud de onda

En la Figura 49 y Figura 50 se muestran los patrones de radiación obtenidos de la transformación utilizando los volúmenes de corriente 1 y 2, y el patrón determinado de forma analítica, denominado teórico.

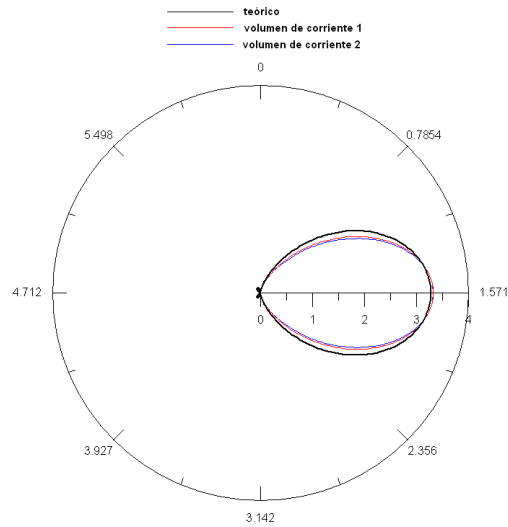


Figura 49. Comparación entre las funciones de directividad arrojadas para distintas configuraciones de fuente de corriente, en el plano $\varphi=\pi/2$ para un arreglo de dos dipolos

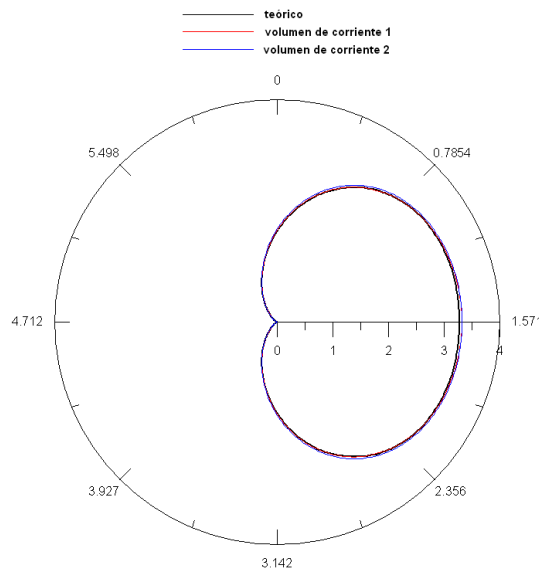


Figura 50. Comparación entre las funciones de directividad arrojadas para distintas configuraciones de fuente de corriente, en el plano $\theta=\pi/2$ para un arreglo de dos dipolos

De la Figura 49 y Figura 50 se puede observar que ambas configuraciones de fuente equivalente de corriente arrojan resultados coherentes en comparación con el patrón de radiación teórico.

CONCLUSIONES

Se diseñó una herramienta computacional que determina el patrón de radiación en campo lejano en cualquier plano de corte espacial a partir de datos sintéticos de campo cercano en coordenadas cartesianas. No es necesario que las muestras de campo se encuentren ordenadas secuencialmente ni equispaciadas entre ellas, para el correcto funcionamiento de la herramienta.

Entre las diversas técnicas que existen para realizar la transformación de campo cercano a campo lejano, la seleccionada fue la de las corrientes equivalentes utilizando el método de los momentos, pero con la variante de usar fuentes equivalentes de corriente tridimensionales distribuidas en forma volumétrica y una superficie de medición adaptable, de forma tal que sea posible obtener la cantidad adecuada de información de campo cercano. Los estudios previos que sirvieron de base para este trabajo se concentraron en aplicar el método para antenas tipo apertura muy directivas, la variante que se introdujo en este trabajo tiene el fin de hacer el método lo más general posible.

La forma de validación del algoritmo consistió en realizar experimentos numéricos, donde los datos de campo cercano se obtuvieron de forma analítica. A estos datos se le aplicó el algoritmo de transformación y el resultado del mismo se comparó con patrones de radiación también calculados analíticamente utilizando las simplificaciones clásicas de campo lejano.

Los datos de entrada necesarios para el funcionamiento del algoritmo son: frecuencia de operación del sistema, número de mediciones realizadas en cada cara

del paralelepípedo, número de fuentes equivalente de corrientes total, datos de la configuración del volumen de corriente (dimensiones, número de fuentes), datos medidos de campo eléctrico tangencial a la superficie (paralelepípedo) en zona cercana, coordenadas espaciales de las mediciones, plano de corte en que se desea el patrón.

El método arroja resultados coherentes en pruebas realizadas con antenas de tipo lineal, utilizando además un poder computacional relativamente modesto. Sin embargo, en el patrón de radiación en el plano vertical ($\varphi = \pi/2$) para el dipolo de dos longitudes de onda, se observan discrepancias en la dirección angular de los lóbulos con respecto al patrón teórico.

Con relación a los requerimientos computacionales utilizados en las pruebas experimentales, se usó una computadora de 1 GB de memoria RAM, con un procesador Pentium de doble núcleo.

Los tiempos de cálculo y la cantidad de memoria RAM son aspectos críticos para el adecuado funcionamiento del módulo de resolución del sistema. Esto se debe a que las matrices que se manejan son densas, de gran escala y no cuadradas, y a medida que se desee mayor precisión, el tamaño de las mismas aumenta y con ello, aumentan tanto el tiempo de cálculo como la cantidad de memoria requerida.

El algoritmo es flexible en cuanto al número de muestras que se pueden tomar en cada cara del paralelepípedo, e incluso se puede obviar medir en alguna de estas caras. Esto hace posible que sólo se tomen muestras en la superficie que sea de interés reduciendo los tiempos de medición. Como ya se dijo, las muestras de campo

eléctrico en una cara específica no necesariamente deben estar organizadas en filas y columnas, ni deben estar equispaciadas, sin embargo, sí se utiliza un posicionador XY, los datos de medición ya se organizan de esta forma, pero de ser el caso el algoritmo funciona de igual manera.

Intuitivamente, se supone que los resultados obtenidos por esta técnica de transformación dependen en gran medida de la manera en que se modela la fuente de corriente, lo lógico es que la misma sea lo más parecida a la fuente original. Sin embargo, las pruebas realizadas en este sentido arrojan resultados satisfactorios para diferentes configuraciones de fuente equivalente.

El algoritmo propuesto también es válido si se miden los datos en campo cercano o en campo lejano, siempre y cuando se mantenga el esquema sugerido de medición. Por lo que no existen límites con relación a lo lejos que se encuentren los puntos de medición de campo eléctrico. Sin embargo, se debe imponer un límite inferior a la zona de campo cercano donde tomar las muestras, en cuanto no es conveniente medir en la franja reactiva.

Del análisis bibliográfico y del resultado de este trabajo no se ha podido deducir una regla preestablecida con relación a la cantidad y espaciamiento de las muestras a tomar.

RECOMENDACIONES

Para desarrollos futuros de este trabajo se sugiere tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Probar el algoritmo de transformación aplicándolo a otros tipos de antenas o configuraciones, por ejemplo bocinas, antenas planares, arreglos.
- Realizar estudios en lo referente a las configuraciones de medición, que apunten a establecer un criterio válido de frecuencia de muestreo.
- Ampliar los estudios realizados sobre la sensibilidad del algoritmo a la forma de la fuente de corriente.
- Realizar pruebas con datos de campo eléctrico medidos de forma experimental en una cámara anecoica. En este caso se debe tomar en cuenta el factor de sonda, el cual es una constante que compensa la perturbación que introduce la misma al sistema de medición.
- Realizar estudios para hacer más eficiente el código del algoritmo, específicamente el módulo más crítico, el de resolución del sistema.
- Realizar pruebas de sensibilidad del algoritmo frente a errores en los datos medidos. La idea de esto es observar la manera como se propagan los errores durante el proceso de transformación de campo cercano a campo lejano, y como esto afecta el resultado final.
- Mejorar la interfaz de usuario y estudiar cómo sería en la práctica el intercambio de información entre los equipos externos de medición (posicionador y analizador vectorial de red) y la aplicación como tal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cardama A., Jofre Roca L., Rius J. Blanch S. *Antenas*. (Libro).-- Méjico: Editorial Alfaomega, 2000. Cap. 9
- [2] Richard C., Johnson H., Allen Ecker, J. Hollis S. *Determination of Far-Field Antenna Patterns from Near-Field Measurements*—**EN**: Proceedings of the IEEE-- VOL. 61, No 12, (Diciembre 1973).
- [3] Stratton. J. A. *Electromagnetic Theory*. (Libro).--Estados Unidos: Nueva York: Mac Graw Hill, (1941). cap. 8
- [4] Dyson, J.D. *Antenna near field measurements*--**EN**: in Electromagnetics and Antennas (a series of lectures from the University of Illinois College of Engineering)- (1967), pp. 57-114,
- [5] Dunn B. C., Jr., King R. *Microwave field measurements, I Measurement of surface-current and charge distributions on metal surfaces at microwave frecuencies* --**EN**: Cruft Lab., Harvard University, Tech.-- Rep. 71, Sept. 1, (1949), DDC ATI-66029
- [6] Silver S. *Microwave antenna Theory and Design*. (Libro)--(Radiation Lab. Ser.), vol 12. New York: McGraw-Hill, 1949, sec 6.9.
- [7] Schelkunoff S. A. *Electromagnetic Waves*.(Libro)-- New York: Van Nostrand, (1943), cap 6
- [8] Booker, H. G.; Clemmow, P.C. *The concept of an angular spectrum of plane waves, and its relation to that of polar diagram and aperture distribution.*—**EN**: *Proceedings of the IEEE*--, vol 97, pt III, (Enero. 1950), pp. 11-17,

- [9] Kerns, D.M. *Correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known measuring antenna*—**EN:** *Electrom. Lett.*-- vol. 6, (Mayo 28, 1970) pp. 346-347.
- [10] Dayhoff, E. S. *Theory of diffraction in microwave interferometry*,--**EN:** *J. Res. Nat. Bur. Stand.*-- vol. 64B, (Enero.- Marzo. 1960). pp. 1-13.
- [11] Joy, E. B.; Paris, D. T. *Spatial sampling and filtering in near-field measurements* –**EN:** *IEEE Trans. Antennas Propagat.*-- vol. AP-20, ,(Mayo 1972), pp. 253-261.
- [12] Brown, J. *A theoretical analysis of some errors in aerial measurements*—**EN:** *IEEE Monograph* -- No. 285 R. (Febrero 1958), pp. 343-351.
- [13] Brown, J; Jull, E. V. *The prediction of aerial radiation patterns measurements* – **EN:** *Inst. Elec. Eng (London)*--, Paper 3649 E, (Noviembre. 1961), pp. 635-644.
- [14] Jull, E. V. *An investigation of near-field radiation patterns measured with large antennas*—**EN:** *IRE Trans. Antennas Propagat.*--, vol AP-10, (Julio 1962), pp 363-369.
- [15] Jull, E. V. *The estimation of aerial radiation patterns from limited near-field measurements* —**EN:** *Proc. Inst. Elec. Eng.*-- vol. 110, (Marzo 1963),pp 501-506.
- [16] Leach, W. M. Jr. *Probe compensated near-field measurements on a cylinder*—**EN:** *Ph.D. dissertation, Georgia Inst. Technol.*-- (Agosto 1972)
- [17] Jensen, F. *Electromagnetic near-field far-field correlations*—**EN:** *PhD. Dissertation, Tech. Univ. of Denmark*-- Lyngby, (Julio 1970).
- [18] Ludwig, A. C. *Near-field far-field transformations using spherical wave expansions*—**EN:** *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol AP-19, (Marzo 1971), pp 214-220, (Marzo 1971)
- [19] James J. R., Longdon, L. W. “*Prediction of arbitrary electromagnetic fields from measured data*—**EN:** *Alta Freq.*--, vol 38, (Mayo 1969), pp 286-290.

- [20] Laroussi R., Costache G. *Far-Field Predictions from Near-Field Measurements Using an exact Integral Equation Solution* —EN: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*,-- vol 36, No 3, (Agosto 1994).
- [21] Bucci O. M., D'Elia G, Leone G., Pierri G. *Far-field pattern determination from the near-field amplitude measurements on two surfaces* —EN: *IEEE Trans. Antennas Propagat*--, vol 38, no. 11, (Noviembre 1990).
- [22] Wang, J. J. H *An examination of the theory and practices of planar near-field measurements* —EN: *IEEE Trans. Antennas Propagat*.-- vol 36, no. 6,(Junio. 1988).
- [23]Thal, Jr., Manges J. B. *Theory and practice for spherical-scan near-field antenna range* —EN: *IEEE Trans. Antennas Propagat*.-- vol 36, no 6, (Junio 1988).
- [24] Narasimhan M. S., Karthikeyan M. *Evaluation of Fourier transform integrals using FFT with improved accuracy and its applications* —EN: *IEEE Trans. Antennas Propagat*.-- vol AP-32, no 4, (Abril 1984).
- [25] Elliot, R. *Antenna Theory and Design*—(Libro) Nueva Jersey: Wiley-Interscience, edición revisada. 2003, Cap 7, pág 286-287
- [26] Petre P. Sarkar T. *Planar near field to far fiel transformation using an equivalent magnetic current approach*—EN: *IEEE Trans. Antennas Propagat*.-- vol 40, (1992), pp.302-307.
- [27] Taaghola A., Sarkar T. *Near/Far field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent magnetic current* —EN: *IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility*-- vol 38, (1996) ,pp. 536-542.
- [28] Sarkar T. *Planar near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM* —EN: *IEEE Trans. Antennas Propagat*.-- vol 47, (Nov. 1999), pp. 566-572,.
- [29]Martínez F., Arruebarrena R., Núñez L. *Un Algoritmo de Transformación de campo cercano a campo lejano aplicado a sistemas radiantes de geometría*

arbitraria utilizando fuentes de corriente equivalente del tipo magnético en sistema coordinado cilíndrico. Caracas, Venezuela. CIMENICS 2008.

[30] M Pocock, S Walker. *The Complex Bi-Conjugate Gradient Solver Applied to Large Electromagnetic Scattering Problems; Computational Costs, and Cost Scalings* –EN: IEEE Transaction on Antennas and Propagation-- vol 45, (1997), pp. 140-146.

[31] Balanis, C. *Antenna Theory, Analysis and design.*—(Libro) Estados Unidos: John Wiley and sons Inc. Segunda Edición. (1997) , pp. 125-126

BIBLIOGRAFÍA

Booton, Richard Jr. Computational Methods for Electromagnetics and Microwaves. John Wiley and sons. 1992.

Drabowitch, S. Papiernik, A. Griffiths, H. D, Encinas, J. Smith, B. L. Modern Antennas. Editorial Springer. Segunda edición. 2005.

Collin, R. Plonsey, R. Principles and Applications of Electromagnetic Fields. Mc Graw Hill. 1961.

D. Slater, Near-field Antenna Measurements. Artech House, Norwood, MA, 1991.

Hindman, G. Fooshe, D Probe Correction Effects on Planar, Cylindrical and Spherical Near-Field Measurements. Nearfield Systems Incorporated, California, Estados Unidos. Disponible en <http://www.nearfield.com/TechPapers.htm>

Orfanidis, S. Electromagnetic Waves and Antennas. Disponible en: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>

Johnk, C. Engineering Electromagnetic Fields and Waves. Editorial Wiley. 1975

Kraus, J. D. Fleisch, D. A. Electromagnetics: With Applications. Mc Graw Hill, Nueva York. 1989.

Ulaby F. T. Fundamentals of applied Electromagnetics. 1999 edition, Prentice Hall. Nueva York. 1998.

Hollis J. S. Microwave Antenna measurements. Scientific Atlanta, Inc. 1985

Hemming, L. Electromagnetic anechoic chambers: A Fundamental design and Specification Guide. John Wiley and sons. 2002