

UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES DEPARTAMENTO DE ELECTROMAGNETISMO Y RADIACIÓN



### DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIDÁCTICA BASADA EN EL CÓDIGO NEC2 PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS RADIANTES (UCNEC)

GÓMEZ LEONCIO NÚÑEZ JHOANDER

Bárbula, 14 de noviembre del 2017



UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES DEPARTAMENTO DE ELECTROMAGNETISMO Y RADIACIÓN



### DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIDÁCTICA BASADA EN EL CÓDIGO NEC2 PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS RADIANTES (UCNEC)

### TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

GÓMEZ LEONCIO NÚÑEZ JHOANDER

Bárbula, 14 de noviembre del 2017



UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES DEPARTAMENTO DE ELECTROMAGNETISMO Y RADIACIÓN



#### **CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado «DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIDÁCTICA BASADA EN EL CÓDIGO NEC2 PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS RADIANTES (UCNEC)», realizado por los bachilleres GÓMEZ LEONCIO, cédula de identidad 19.697.560, NÚÑEZ JHOANDER, cédula de identidad 20.467.639, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

> **Firma** Prof. César Ruiz TUTOR

**Firma** Prof. Paulino Del Pino JURADO **Firma** Prof. Enrique Alvarado JURADO

Bárbula, 14 de noviembre del 2017

# Dedicatoria

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional para la culminación de este proyecto, A todos aquellos que me acompañaron física y espiritualmente a lo largo de mis estudios universitarios, A todos los héroes anónimos que se esfuerzan día a día por ser la mejor versión de sí mismos.

GÓMEZ LEONCIO

Al Único Dios verdadero Porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas. A El sea la gloria para siempre. Amén NÚÑEZ JHOANDER

# Agradecimientos

A Dios Todopoderoso, Señor al que va nuestro eterno destino, por darme la fuerza, el sosiego y el conocimiento para poder ver culminada esta última etapa de un largo camino que tanto significa para muchos.

A mis padres Leoncio Gómez e Irene Aldana por inculcarme los valores de la honradez, la constancia, el trabajo duro y el poder del conocimiento, por todo el soporte moral, espiritual y material que me brindaron en cada una de las etapas de mi formación académica y personal.

A Isabel Villamizar por su cariño, apoyo, comprensión y complicidad incondicionales que hicieron más agradables cada uno de los momentos vividos durante este recorrido.

A David y Diana Matheus por creer en mi potencial, enseñarme a estudiar eficientemente y haberme brindado su valioso apoyo desinteresado y sostén moral para no desistir ante la adversidad.

Al profesor César Ruiz por apoyar desde el principio esta iniciativa académica y brindar todo su soporte durante el proceso de desarrollo de la misma.

A la Universidad de Carabobo y al cuerpo docente de la escuela de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería por su labor en pos de la formación de profesionales competentes, productivos e íntegros.

Al Servicio Nacional de Aprendizaje de Colombia por haberme brindado las herramientas y los conocimientos necesarios para caminar con pie firme en el mundo de la programación en Java, sin pedir nada a cambio.

Leoncio Gómez

A Dios por ser el sustentador de mi vida, quien en su soberana voluntad me ha permitido y ayudado a culminar este trabajo.

A mi amada madre, Yoleida Quiróz por ser mi máximo apoyo terrenal, dándome su amor incondicional, sustento diario, por haberme inculcado los valores de respeto, responsabilidad, disciplina, necesarios para llegar hasta aquí.

A la IBRY por ser esa familia que me apoyó espiritualmente en los últimos años de mi carrera con sus oraciones ante nuestro Padre Celestial.

A Leoncio Gómez por haber sido un gran apoyo en mi formación profesional a lo largo de realización de este trabajo y en la culminación nuestra carrera universitaria. ¡Muchas gracias!

A mi tutor Cesar Ruiz por prestar su valioso apoyo y orientación en la realización de este trabajo.

A mis amigos de la universidad, Alto Refugio, "El Sindicato" y todos aquellos que compartieron conmigo estos años, gracias a ustedes porque lejos de mi familia y de mi pueblo, no me sentí solo.

A la Sra. Omaira Cabrera, quien me recibió en su hogar como a un hijo y brindo apoyo en momentos difíciles. ¡Muchas gracias!

A la Universidad de Carabobo y a todos los profesores que formaron en mi un carácter profesional, el cual seguramente será de gran provecho el resto de mi vida.

#### Jhoander Núñez

# Índice general

| Ín  | dice o              | e Figuras  |  |   | XI  |
|-----|---------------------|--|--|---|-----|
| Ín  | Índice de Tablas xv |  |  |   |     |
| Ac  | rónir               | 05   |  | х | VII |
| Co  | nstar               | tes Físicas  |  |   | хіх |
| Re  | sume                | 1  |  |   | XXI |
| I.  | Intro               | ducción  |  |   | 1   |
|     | 1.1.                | Motivación   |  |   | 1   |
|     | 1.2.                | OBJETIVOS  |  |   | 4   |
|     |                     | 1.2.1. Objetivo general  |  |   | 4   |
|     |                     | 1.2.2. Objetivos específicos   |  |   | 4   |
|     | 1.3.                | ALCANCE  |  | • | 4   |
| II. | Mar                 | o conceptual   |  |   | 7   |
|     | 2.1.                | Parámetros de antenas  |  |   | 7   |
|     |                     | 2.1.1. Patrón de radiación   |  |   | 7   |
|     |                     | 2.1.2. Directividad  |  |   | 8   |
|     |                     | 2.1.3. Polarización  |  |   | 9   |
|     |                     | 2.1.4. Impedancia de entrada   |  |   | 11  |
|     | 2.2.                | Técnicas de medición   |  |   | 12  |
|     |                     | 2.2.1. Rangos de antena  |  |   | 12  |
|     |                     | 2.2.2. Rangos de reflexión   |  |   | 13  |
|     |                     | 2.2.3. Rangos de espacio libre   |  |   | 13  |
|     | 2.3.                | Vétodo de los momentos   |  |   | 13  |
|     | 2.4.                | Código electromagnético numérico   |  |   | 15  |
|     |                     | 2.4.1. Ecuación integral de campo eléctrico (EFIE)   |  |   | 16  |
|     | 2.5.                | IAVA     IAVA |  | • | 22  |
| III | .Proc               | dimientos de la investigación  |  |   | 23  |

#### III. Procedimientos de la investigación

VII

| 3.1.    | Exploración Bibliográfica   | 3  |
|---------|---|----|
| 3.2.    | Análisis del código NEC   | 4  |
| 3.3.    | Comandos de NEC-2 (Cartas NEC)  | 5  |
| 3.4.    | Entrada al programa 2   | 6  |
|         | 3.4.1. Líneas comentadas  | 6  |
|         | 3.4.2. Tarjeta de entrada de la geometría de la estructura 2          | 7  |
|         | 3.4.2.1. Final de entrada de geometría (GE) 2                         | 7  |
|         | 3.4.2.2. Especificación de alambre (GW)                               | 8  |
| 3.5.    | Pruebas unitarias de NEC2 3   | 0  |
| 3.6.    | Elección de las librerías de JAVA para la visualización de datos 3    | 3  |
| 3.7.    | Representación de la salida en las librerías de graficación de JAVA 3 | 5  |
|         | 3.7.1. Librería de Graficación JZY3D 3                                | 5  |
|         | 3.7.2. Librería de Graficación jFreeChart                             | 7  |
| 3.8.    | Diseño y Estructura de la Aplicación                                  | 8  |
|         | 3.8.1.Módulo de Simulación de Antenas3                                | 8  |
|         | 3.8.2. Módulo de Prácticas de Laboratorio                             | 3  |
|         | 3.8.2.1. Apartado I: Medición de Impedancia de Entrada de             |    |
|         | una Antena  | 4  |
|         | 3.8.2.2. Apartado II: Medición de la Polarización de una An-          |    |
|         | tena  | 5  |
|         | 3.8.2.3. Apartado III: Medición del Diagrama de Radiación             |    |
|         | de una Antena   | 6  |
| • •     | 3.8.2.4. Apartado IV: Medición de la Ganancia de una Antena 7         | 7  |
| 3.9.    | Diseño de Interfaz de Usuario   | 8  |
|         | 3.9.1. Lienzo para la disposición de componentes                      | 1  |
| IV. Aná | lisis, interpretación y presentación de los resultados 8              | 3  |
| 4.1.    | Ventana de inicio del programa  | 3  |
| 4.2.    | Interfaz del usuario  | 3  |
|         | 4.2.1. Ventana principal  | 4  |
| 4.3.    | Ventana de Simulación de Antenas                                      | 5  |
|         | 4.3.1. Descripción de la ventana de generación de alambres 9          | 9  |
| 4.4.    | Ventana de Prácticas de laboratorio                                   | 13 |
|         | 4.4.1. Laboratorio 1: Medición de la ganancia de una antena 10        | 4  |
|         | 4.4.2. Laboratorio 2: Medición de la polarización de una antena 10    | 8  |
|         | 4.4.3. Laboratorio 3: Medición del diagrama de radiación de una       |    |
|         | antena  | 0  |
|         | 4.4.4. Laboratorio 4: Medición de la ganancia de una antena 11        | 2  |
| 4.5.    | Controles especiales para el programa y las gráficas generadas 11     | 3  |
| 4.6.    | Experimentos realizados en UCNEC                                      | 4  |
|         | 4.6.1. Simulación de un Dipolo $\lambda/2$                            | 4  |
|         | 4.6.2. Simulación de una antena Yagi a 208 MHz 12                     | 2  |
|         |   |    |

|    | 4.7. | Medic   | ión de pa  | rámetros usando las prácticas de laboratorio         | 131 |
|----|------|---------|------------|--|-----|
|    |      | 4.7.1.  | Medició    | n de la impedancia de una antena                     | 131 |
|    |      |         | 4.7.1.1.   | Medición de la impedancia y relación de onda esta-   |     |
|    |      |         |            | cionaria de una antena lineal cilíndrica tipo dipolo |     |
|    |      |         |            | en función del diámetro de la misma                  | 132 |
|    |      |         | 4.7.1.2.   | Medición de la impedancia y relación de onda esta-   |     |
|    |      |         |            | cionaria de una antena lineal cilíndrica tipo dipolo |     |
|    |      |         |            | en función de su acortamiento                        | 135 |
|    |      |         | 4.7.1.3.   | Medición de la impedancia propia y mutua de una      |     |
|    |      |         |            | antena bajo prueba en presencia de otra antena ubi-  |     |
|    |      |         |            | cada en la zona cercana, intermedia y lejana de la   |     |
|    |      |         |            | antena bajo prueba.                                  | 136 |
|    |      |         | 4.7.1.4.   | Medición de la impedancia de entrada de una ante-    |     |
|    |      |         |            | na cuando existe la presencia de la tierra, con una  |     |
|    |      |         |            | conductividad y permitividad especificada            | 138 |
|    |      | 4.7.2.  | Polariza   | ción de una antena                                   | 141 |
|    |      | 4.7.3.  | Diagran    | na de radiación de una antena                        | 144 |
|    |      | 4.7.4.  | Medició    | n de la ganancia de una antena                       | 148 |
|    |      |         | 4.7.4.1.   | Medición de la ganancia absoluta                     | 148 |
|    |      |         | 4.7.4.2.   | Medición de la ganancia por comparación de antenas   | 151 |
|    | 4.8. | Reque   | rimientos  | de Hardware  | 158 |
|    | 4.9. | Reque   | rimientos  | de Software  | 159 |
| v. | Con  | clusior | ies y reco | mendaciones  | 161 |
|    | 5.1. | Conclu  | usiones .  |  | 161 |
|    | 5.2. | Recon   | nendacior  | nes  | 163 |
|    |      |         |            |  |     |

| <b>A</b> . | Tarjetas de entrada16 |         |   |     |
|------------|-----------------------|---------|---|-----|
|            | 1.1.                  | Tarjeta | s de control del programa                   | 165 |
|            |                       | 1.1.1.  | Excitación                                  | 165 |
|            |                       | 1.1.2.  | Especificación de frecuencia (FR)           | 168 |
|            |                       | 1.1.3.  | Especificación de parámetros de tierra (GN) | 170 |
|            |                       | 1.1.4.  | Estructura de impedancia de carga (LD)      | 173 |
|            |                       | 1.1.5.  | Especificación de línea de transmisión (TL) | 176 |
|            |                       | 1.1.6.  | Parámetros de patrón de radiación (RP)      | 178 |
|            |                       | 1.1.7.  | Bandera de final de datos (EN)              | 184 |
|            |                       |         |   |     |

#### **Referencias Bibliográficas**

185

Anexos

A. Manual de ayuda para la realización de las prácticas de laboratorio

# Índice de figuras

| 2.1.  | Sistema de coordenadas para el análisis de antenas.                        | 8  |
|-------|--|----|
| 2.2.  | Rotación de una onda electromagnética plana.                               | 10 |
| 2.3.  | Elipse de polarización en $z = 0$ como una función del tiempo              | 10 |
| 2.4.  | Antena en régimen de transmisión   | 11 |
| 2.5.  | Circuito equivalente de Thevenin.  | 12 |
| 3.1.  | Tarjeta de comentarios [20].   | 26 |
| 3.2.  | Tarjeta de terminación de lectura de geometría [20]                        | 27 |
| 3.3.  | Tarjeta de generación de alambres [20]                                     | 28 |
| 3.4.  | Diagrama de bloques que describe la generación de alambres                 | 40 |
| 3.5.  | Diagrama de bloques que describe la generación de arcos.                   | 42 |
| 3.6.  | Diagrama de bloques que describe la generación de círculos                 | 43 |
| 3.7.  | Diagrama de bloques que describe la generación de dipolos de $\lambda/2$ . | 44 |
| 3.8.  | Diagrama de bloques que describe el escalamiento de los alambres.          | 45 |
| 3.9.  | Diagrama de bloques que describe la traslación de los alambres             | 46 |
| 3.10. | Diagrama de bloques que describe la rotacion de los alambres               | 47 |
| 3.11. | Diagrama de bloques que describe la generación de fuentes.                 | 48 |
| 3.12. | Diagrama de bloques que describe la generación de cargas                   | 49 |
| 3.13. | Diagrama de bloques que describe la generación de líneas de trans-         |    |
|       | misión   | 50 |
| 3.14. | Diagrama de bloques que describe la generación de plano de tierra.         | 50 |
| 3.15. | Diagrama de bloques que describe la configuración de las unidades.         | 51 |
| 3.16. | Diagrama de bloques que describe la configuración del patrón de            |    |
|       | radiación  | 52 |
| 3.17. | Diagrama de bloques que describe la función abrir.                         | 53 |
| 3.18. | Diagrama de bloques que describe la función guardar como.                  | 54 |
| 3.19. | Diagrama de bloques que describe la función captura de datos de            |    |
|       | fuentes  | 55 |
| 3.20. | Diagrama de bloques que describe la función captura de datos de            | -  |
|       | cargas.  | 56 |
| 3.21. | Diagrama de bloques que describe la función captura de datos de potencia.  | 57 |
| 3.22. | Diagrama de bloques que describe la generación de ROE                      | 58 |

| 3.23.<br>3.24 | Diagrama de bloques que describe el cálculo de ROE.   | 59 |
|---------------|---|----|
| 5.27.         | cuencia de mínima ROE.  | 60 |
| 3.25.         | Diagrama de bloques que describe el cálculo del ancho de banda al rededor de la frecuencia ROE de mínima.     | 61 |
| 3.26.         | Diagrama de bloques que describe la visualización de las antenas  | 62 |
| 3.27.         | Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radia-<br>ción.                                   | 63 |
| 3.28.         | Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radia-<br>ción.                                   | 64 |
| 3.29.         | Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radia-<br>ción.                                   | 65 |
| 3.30.         | Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radia-<br>ción                                    | 66 |
| 3.31.         | Diagrama de bloques que describe el cálculo de la apertura de haz<br>en un patrón de radiación bidimensional. | 68 |
| 3.32.         | Diagrama de bloques que describe el proceso de obtención del valor de ángulo de máximo de radiación.          | 70 |
| 3.33.         | Diagrama de bloques que describe el proceso de obtención del valor  |    |
|               | de ángulo de lóbulos secundarios.   | 72 |
| 4.1.          | Ventana de inicio del programa con el logo de UCNEC   | 84 |
| 4.2.          | Ventana de principal de UCNEC.  | 85 |
| 4.3.          | Ventana de Simulación de Antenas.   | 87 |
| 4.4.          | Ventana de parámetros de entrada para la construcción del gráfico<br>de ROE                                   | 87 |
| 4.5.          | Explorador de archivos del Directorio.  | 88 |
| 4.6.          | Ventana auxiliar para la introducción del parámetro de frecuencia de simulación en MHz.                       | 89 |
| 4.7.          | Ventana auxiliar para la introducción del parámetro de longitud de<br>onda en metros.                         | 90 |
| 4.8.          | Ventana de generación de alambres.  | 91 |
| 4.9.          | Ventana de configuración de fuentes   | 92 |
| 4.10.         | Ventana de configuración de cargas del tipo R+jX  | 93 |
| 4.11.         | Ventana de configuración de cargas del tipo RLC.  | 93 |
| 4.12.         | Ventana de configuración de líneas de transmisión.  | 94 |
| 4.13.         | Ventana de configuración del plano de tierra.   | 95 |
| 4.14.         | Ventana de configuración de unidades.   | 95 |
| 4.15.         | Ventana de configuración para el patrón de radiación en 2D para ele-<br>vación.                               | 96 |
| 4.16.         | Ventana de configuración para el patrón de radiación en 2D para azi-<br>muth.                                 | 97 |
| 4.17.         | Ventana de configuración para el patrón de radiación en 3D  | 97 |

| 4.18. Ventana de configuración de una impedancia característica alternativa para SWR.               | 98  |
|---|-----|
| 4.19. Código QR generado por UCNEC.   | 99  |
| 4.20. Ventana de generación de alambre.   | 100 |
| 4.21. Generación de Figuras: Circunferencia.  | 102 |
| 4.22. Generación de Figuras: Arco.  | 102 |
| 4.23. Generación de Figuras: Dipolo de $\lambda/2$ .  | 103 |
| 4.24. Ventana principal de las Prácticas de Laboratorio.  | 104 |
| 4.25. Práctica 1: Experimento 1   | 105 |
| 4.26. Práctica 1: Experimento 2   | 106 |
| 4.27. Práctica 1: Experimento 3   | 107 |
| 4.28. Práctica 1: Experimento 4   | 108 |
| 4.29. Práctica 2: Polarización de una antena.   | 110 |
| 4.30. Práctica 3: Diagrama de radiación de una antena.  | 111 |
| 4.31. Práctica 4: Experimento 1   | 112 |
| 4.32. Práctica 4: Experimento 2   | 113 |
| 4.33. Visualización de la antena en UCNEC   | 115 |
| 4.34. Diagrama de radiación 3D en UCNEC   | 116 |
| 4.35. Diagrama de radiación 3D en EZNEC   | 116 |
| 4.36. Diagrama de radiación 2D elevación en UCNEC   | 117 |
| 4.37. Diagrama de radiación 2D elevación en EZNEC.  | 118 |
| 4.38. Diagrama de radiación 2D elevación en UCNEC   | 119 |
| 4.39. Diagrama de radiación 2D elevación en EZNEC.  | 120 |
| 4.40. Gráfico de la ROE vs frecuencia en UCNEC  | 121 |
| 4.41. Gráfico de la ROE vs frecuencia en EZNEC  | 122 |
| 4.42. Visualización de la antena en UCNEC   | 123 |
| 4.43. Diagrama de radiación 3D en UCNEC   | 124 |
| 4.44. Diagrama de radiación 3D en EZNEC   | 125 |
| 4.45. Diagrama de radiación 2D elevación en UCNEC   | 126 |
| 4.46. Diagrama de radiación 2D elevación en EZNEC   | 127 |
| 4.47. Diagrama de radiación 2D azimuth en UCNEC.  | 128 |
| 4.48. Diagrama de radiación 2D azimuth en EZNEC   | 129 |
| 4.49. Gráfico de la ROE vs frecuencia en UCNEC  | 130 |
| 4.50. Gráfico de la ROE vs frecuencia en EZNEC  | 131 |
| 4.51. Antena dipolo de $\lambda/2$ a 208 Mhz. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ | 132 |
| 4.52. Datos introducidos en el experimento 1 de la práctica 1                                       | 133 |
| 4.53. ROE obtenido para una relación L/D=20   | 133 |
| 4.54. ROE obtenido para cada relación L/D configurada.  | 134 |
| 4.55. ROE para el dipolo no escalado  | 135 |
| 4.56. ROE para el dipolo con acortamiento de 6 %  | 136 |
| 4.57. Disposición de las antenas del experimento  | 137 |
| 4.58. Valores calculados para zona cercana.   | 138 |

| 4.59. Antena Yagi estudiada para la medición de su impedancia.   | 139   |
|--|---|
| 4.60. Patrón de radiación de la antena Yagi estudiada.   | 140   |
| 4.61. Antena de dipolos cruzados estudiada con dipolo sensor.  | 142   |
| 4.62. Patrón de polarización obtenido.   | 143   |
| 4.63. Elipse de polarización.  | 144   |
| 4.64. Diagrama de radiación del plano E  | 145   |
| 4.65. Antena Yagi estudiada con dipolo sensor.   | 146   |
| 4.66. Diagrama de radiación del plano E  | 147   |
| 4.67. Antena Yagi (Antena A).  | 148   |
| 4.68. Antena Dipolo de $\lambda/2$ (Antena B).   | 149   |
| 4.69. Antena Yagi (Antena C.   | 150   |
| 4.70. Resultados de los cálculos para la medición de la ganancia.  | 151   |
| 4.71. Antena transmisora.  | 152   |
| 4.72. Antena sensor  | 153   |
| 4.73. Antena bajo prueba.  | 154   |
|  |   |
| 4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figu-<br>ras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por<br>la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para  |   |
| 4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figu-<br>ras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por<br>la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para<br>todos los ejes.   | 155   |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> </ul>  | 155<br>156  |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> </ul>  | 155<br>156<br>157   |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> </ul>   | 155<br>156<br>157<br>158  |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarieta de excitación [20].</li> </ul>   | 155<br>156<br>157<br>158<br>166   |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarieta de frecuencia [20].</li> </ul>   | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169  |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarjeta de frecuencia [20].</li> <li>1.3. Tarieta de especificación de parámetros de tierra [20].</li> </ul>   | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169<br>170                                     |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarjeta de frecuencia [20].</li> <li>1.3. Tarjeta de especificación de parámetros de tierra [20].</li> <li>1.4. Tarieta de generación de cargas [20].</li> </ul>   | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169<br>170<br>173                              |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarjeta de frecuencia [20].</li> <li>1.3. Tarjeta de especificación de parámetros de tierra [20].</li> <li>1.4. Tarjeta de generación de cargas [20].</li> <li>1.5. Tarjeta de generación de líneas de transmisión [20].</li> </ul>  | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169<br>170<br>173<br>176                       |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarjeta de frecuencia [20].</li> <li>1.3. Tarjeta de especificación de parámetros de tierra [20].</li> <li>1.4. Tarjeta de generación de cargas [20].</li> <li>1.5. Tarjeta de generación de líneas de transmisión [20].</li> <li>1.6. Tarjeta de especificaciones para el patrón de radiación [20].</li> </ul>  | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169<br>170<br>173<br>176<br>179                |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarjeta de frecuencia [20].</li> <li>1.3. Tarjeta de especificación de parámetros de tierra [20].</li> <li>1.4. Tarjeta de generación de cargas [20].</li> <li>1.5. Tarjeta de generación de líneas de transmisión [20].</li> <li>1.6. Tarjeta de especificaciones para el patrón de radiación [20].</li> </ul>  | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169<br>170<br>173<br>176<br>179<br>0.181       |
| <ul> <li>4.74. Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.</li> <li>4.75. Antena transmisora con antena bajo prueba.</li> <li>4.76. Resultados de la medición.</li> <li>4.77. Patrón de radiación de la antena bajo prueba.</li> <li>1.1. Tarjeta de excitación [20].</li> <li>1.2. Tarjeta de frecuencia [20].</li> <li>1.3. Tarjeta de especificación de parámetros de tierra [20].</li> <li>1.4. Tarjeta de generación de cargas [20].</li> <li>1.5. Tarjeta de generación de líneas de transmisión [20].</li> <li>1.6. Tarjeta de especificaciones para el patrón de radiación [20].</li> <li>1.7. Sistema de coordenadas cartesiano y cilíndrico para el campo radiado al antena bajo y cilíndrico para el campo radiado de la ejecución [20].</li> </ul> | 155<br>156<br>157<br>158<br>166<br>169<br>170<br>173<br>176<br>179<br>.181<br>184 |

# Indice de tablas

| 3.1.  | Lineas del archivo de entrada a NEC.                               | 25  |
|-------|--|-----|
| 3.2.  | Lineas del archivo de entrada a NEC.                               | 31  |
| 4.1.  | Atajos de los módulos de UCNEC.                                    | 114 |
| 4.2.  | Parámetros de simulación.  | 114 |
| 4.3.  | Resultados de la simulación  | 118 |
| 4.4.  | Parámetros de simulación.  | 123 |
| 4.5.  | Resultados de la simulación en elevación.                          | 127 |
| 4.6.  | Resultados de la simulación en azimuth                             | 129 |
| 4.7.  | Resultados de la medición de la impedancia en función de la varia- |     |
|       | ción de la relación L/D.   | 134 |
| 4.8.  | Resultados de la medición de la impedancia en función de la varia- |     |
|       | ción ed la relación L/D  | 135 |
| 4.9.  | Resultados de la medición de la impedancia en función de la varia- |     |
|       | ción ed la relación L/D  | 137 |
| 4.10. | Resultados de la medición de la impedancia en función de la varia- |     |
|       | ción de la altura de la antena respecto al plano de tierra         | 141 |
| 4.11. | Resultados de la medición de la impedancia en función de la varia- |     |
|       | ción de la altura de la antena respecto al plano de tierra         | 151 |
|       |  |     |

# Acrónimos

| AMP     | Antenna Modeling Program                                      |
|---------|---|
| DISANT  | DISeño de ANTenas   |
| EFIE    | Electric Field Integral Equation                              |
| MFIE    | Magnetic Field Integral Equation                              |
| MOM     | Method Of Moments   |
| SEDISOG | Software Educativo Interactivo para Sistemas de Ondas Guiadas |
| UC      | Universidad de Carabobo                                       |
| UHF     | Ultra High Frequency  |
| PEC     | Perfect Electric Conductor                                    |
| ROE     | Relación de Onda Estacionaria                                 |

# **Constantes Físicas**

Velocidad de la luz c $=2,997~924~58\times 10^8~ms^{-1}$ 

### DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIDÁCTICA BASADA EN EL CÓDIGO NEC2 PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS RADIANTES (UCNEC)

por

#### GÓMEZ LEONCIO y NÚÑEZ JHOANDER

Presentado en el Departamento de Electromagnetismo y Radiación de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones el 14 de noviembre del 2017 para optar al Título de Ingeniero de Telecomunicaciones

#### RESUMEN

El estudio de estructuras radiantes amerita la aplicación de las ecuaciones de Maxwell sobre sus elementos constitutivos; de esta forma, es posible determinar su comportamiento en condiciones concretas y caracterizarlas mediante el cálculo de parámetros electromagnéticos; sin embargo, en estos cálculos la obtención de un resultado cerrado a través del desarrollo matemático convencional no es siempre factible; debido a esto, el estudiante se encuentra en la necesidad de utilizar programas informáticos que le permitan caracterizar cuantitativamente la funcionalidad de las diferentes estructuras que requiera examinar. Aunado a esto, las herramientas disponibles para tal fin; por lo general, no son de licencia libre ni proporcionan una interfaz didáctica que facilite su uso en el ámbito educacional; adicionalmente, suponen una inversión monetaria por parte del usuario. En este contexto, se propone desarrollar una aplicación didáctica, basada en el código NEC2, que permita el estudio del comportamiento de estructuras radiantes, la cual esté ajustada a los requerimientos de la asignatura de Antenas y Propagación a nivel de pregrado y aporte un recurso novedoso para consolidar los conocimientos adquiridos sobre la materia. La metodología de esta investigación está constituida por etapas sucesivas, comenzando por el abordaje de los fundamentos de la teoría de antenas, métodos numéricos y el código electromagnético numérico; seguidamente, se lleva a cabo el diseño de la interfaz de usuario del programa y la integración de prácticas de laboratorio de la cátedra de Antenas y Propagación de la escuela de telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo.

Palabras Claves: Antenas, Parámetros, Didáctico, Simulación, NEC

Tutor: CÉSAR RUIZ

Profesor del Departamento de Electromagnetismo y Radiación Escuela de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería

### Capítulo I

## Introducción

#### 1.1. Motivación

El estudio de estructuras radiantes amerita la aplicación de las ecuaciones de Maxwell sobre sus elementos constitutivos [1] de esta forma, es posible determinar su comportamiento en condiciones concretas y caracterizarlas mediante el cálculo de parámetros electromagnéticos; sin embargo en estos cálculos la obtención de un resultado cerrado a través del desarrollo matemático convencional no es siempre factible; debido a esto, existe la necesidad de utilizar programas computacionales que permitan caracterizar cuantitativamente la funcionalidad de las diferentes estructuras a examinar. Aunado a esto, los programas disponibles para tal fin, tales como EZNEC, Nittany Scientific, Ansoft, 4NEC2 o Matlab; por lo general, no proporcionan una interfaz didáctica que facilite su uso en el ámbito educacional y constituyen software propietarios que no pueden ser utilizados en diferentes sistemas operativos. [2]

En consecuencia, el estudiante debe recurrir a aplicaciones de licencia pública general (GNU) que presentan la limitación de no permitir el diseño y simulación de antenas muy complejas, ralentizando así el trabajo experimental y forzando al usuario a recurrir a varios programas que, en su conjunto, le ayuden a resolver el problema presentado. A partir de esto, es posible afirmar que en la actualidad no está disponible ningún software de código abierto, que opere en múltiples plataformas, cuyas características y funcionalidades estén adaptadas para emplearse en la simulación de la aplicación de técnicas de medición de parámetros de antenas tanto en rango de espacios libres como en espacios reflexivos; por lo tanto, se deben emplear varios software de distintas características para llevar a cabo los cálculos matemáticos inherentes al fenómeno electromagnético bajo análisis, obstaculizando así un aprendizaje enfocado tanto al fenómeno como a la técnica de medición empleada, toda vez que se debe invertir determinada cantidad de tiempo en adquirir destreza en el manejo de estos programas.

Hasta la fecha, se han desarrollado recursos computacionales orientados a facilitar el estudio de las asignaturas propias de la escuela de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, tales como *SEDISOG* [3], la *Aplicación para el Control, Análisis y Adquisición de Datos del Analizador HP 4396B* [4], *NEC2++* (la adaptación del código NEC, desarrollado originalmente en FORTRAN, al lenguaje de programación C++) [5] y DISANT [6], este último emplea el código NEC-2 a través de una interfaz gráfica diseñada en Matlab, para la obtención de parámetros electromagnéticos relacionados, fundamentalmente, al estudio de arreglos de antenas filamentales (involucrando una restricción en cuanto a la geometría de los sistemas radiantes bajo análisis).

En consecuencia, el propósito de la presente investigación, es el cómo se puede desarrollar una aplicación didáctica, basada en el código NEC2 a través de software de licencia abierta y multiplataforma, que permita la simulación y el estudio del comportamiento de sistemas radiantes y proporcione al usuario información relacionada a la obtención y medición de los parámetros electromagnéticos inherentes a la antena bajo evaluación, eliminando las limitaciones relacionadas al modelado geométrico de la antena que se desee analizar. La factibilidad de la propuesta radica en la posibilidad técnica de integrar la versión adaptada del código electromagnético numérico en una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación JAVA, el cual es uno de los más utilizados para el desarrollo de aplicaciones web y de escritorio[2].

La importancia de este proyecto de investigación radica en dar respuesta a la

constante búsqueda de herramientas funcionales y actualizadas que faciliten el estudio de los diferentes tópicos relacionados a la teoría de antenas; por otro lado, su aporte académico consiste en proporcionar un recurso de modelado y simulación de estructuras radiantes, bajo el esquema de software libre, cuyas funcionalidades permitan consolidar los conocimientos en el área de aplicación de métodos de medición de parámetros de antenas; del mismo modo, la conveniencia del programa propuesto subyace en el hecho de que ahorraría la necesidad de adquirir, por ejemplo, una cámara anecoica para la ejecución de las referidas técnicas de medición o el pago de las licencias necesarias para el aprovechamiento de las prestaciones de los software propietarios empleados para la simulación de tales experimentos. El criterio para la selección de JAVA por sobre otras alternativas, tales como C++ o Python, se sustenta en una serie de características tales como la disponibilidad de un entorno integrado de desarrollo (IDE) de carácter oficial y gratuito (NetBeans) [7] que facilita el diseño de la interfaz de usuario del programa sin la necesidad de recurrir a software adicionales, la compatibilidad entre distintas versiones de Java [8]) (el cual es un principio inherente al lenguaje), adicionalmente; el aprendizaje del lenguaje de programación Java constituye uno de los contenidos del pensum de estudios de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo y por último, el uso de Java facilita la migración del programa propuesto a la plataforma Android para teléfonos inteligentes [9]. Estudios han demostrado que la velocidad de ejecución de los programas escritos en Java es superior a la de aquellos implementados en C++ [10] y éste último lenguaje no proporciona mayores facilidades para el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (requiriéndose el empleo de un IDE adicional para este fin, tal como ocurre con los programas escritos en Python [11]). En otro orden de ideas, resulta relevante destacar que el presente trabajo de investigación constituye una contribución a la línea de investigación Telecomunicaciones de la escuela de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, toda vez que comprende tópicos concernientes al uso de métodos numéricos aplicados al electromagnetismo computacional.

#### **1.2. OBJETIVOS**

#### 1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una aplicación didáctica basada en el código NEC2, que permita la simulación y estudio del comportamiento de sistemas radiantes.

#### 1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar la estructura de los archivos generados a partir del núcleo de NEC2 para adaptarlo a un sistema de procesamiento de datos construído a partir del lenguaje de programación Java.
- Efectuar la conversión de los parámetros geométricos y electromagnéticos de simulación de antenas en comandos interpretables por el código NEC2 para la implementación de estudios de su comportamiento según los criterios introducidos por el usuario del software didáctico.
- Examinar las prácticas de laboratorio diseñadas por la cátedra de Antenas y Propagación para su integración en el entorno virtual desarrollado.
- Diseñar una interfaz de usuario didáctica para el modelado, simulación y medición de los parámetros de antenas, implementando las funcionalidades ofrecidas por el código NEC2, bajo el lenguaje de programación JAVA.

#### **1.3. ALCANCE**

El presente trabajo contempla el desarrollo e implementación de una aplicación, desarrollada bajo el lenguaje de programación JAVA y empleando el código abierto NEC2, para el modelado y simulación de antenas lineales; del mismo modo, este software estará integrado con las prácticas de laboratorio de la cátedra de Antenas y Propagación de la escuela de Telecomunicaciones. Debido a las características del código de desarrollo escogido, el programa podrá ser ejecutado indistintamente bajo sistemas operativos propietarios (Windows, iOS) o en las numerosas distribuciones de Linux (Debian, Fedora, SUSE, Ubuntu, etc.) En este mismo orden de ideas, la aplicación ofrecerá las herramientas de modelado y simulación de antenas propias del Código Electromagnético Numérico, así como un entorno didáctico a partir del cual se podrán aplicar técnicas de medición de parámetros de antenas estudiadas en las prácticas de laboratorio de Antenas y Propagación de la escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones.

El tratamiento de este proyecto comenzará con una aproximación didáctica a los principios teóricos relacionados al método de los momentos, los cuales serán abordados como una continuación natural del programa académico de la escuela de telecomunicaciones; como resultado, se deducirá el mecanismo empleado por el código electromagnético numérico para poder llevar a cabo el análisis inherente a la simulación de sistemas radiantes.

### Capítulo II

## Marco conceptual

#### 2.1. Parámetros de antenas

Para describir el rendimiento de una antena, es necesaria la definición de varios parámetros. Algunos de ellos están interrelacionados y no necesariamente todos deben ser especificados por completo para describir a las estructuras radiantes. [12]

#### 2.1.1. Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena es una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena como una función de espacios de coordenadas. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación es determinado para la región de campo lejano. La propiedad de radiación que más interesa es la distribución bidimensional o tridimensional de la energía radiada como función de la posición de un observador a lo largo de un radio constante. Un conjunto conveniente de coordenadas se muestra en la Figura 2.1. Un trazo de la potencia recibida en un radio constante se denomina *patrón de potencia*. Por otra parte, una gráfica la variación espacial del campo eléctrico (o magnético) a lo largo del radio constante es llamada amplitud del patrón de campo. En la práctica el patrón tridimensional es medido y registrado en series de patrones de dos dimensiones. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones prácticas, algunos trazos del patrón como una función de  $\theta$  para algunos valores particulares de  $\phi$ , más algunos trazos como una función de  $\phi$  para algunos valores particulares de  $\theta$ , ofrece la mayor parte de la información útil y necesaria[12].



Figura 2.1: Sistema de coordenadas para el análisis de antenas.

#### 2.1.2. Directividad

Se define la directividad de una antena como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones. La intensidad de radiación promedio es igual a la razón entre la potencia total radiada por la antena y  $4\pi$ . Si la dirección no es especificada, se toma implícitamente la dirección de intensidad máxima de radiación. De manera llana, la directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada entre la intensidad de radiación de una fuente

isotrópica. Matemáticamente puede ser escrita de la siguiente manera[12]:

$$\mathsf{D} = \frac{\mathsf{U}}{\mathsf{U}_0} = \frac{4\pi\mathsf{U}}{\mathsf{P}_{rad}} \tag{2.1}$$

Si no se especifica la dirección, esto implica la dirección de intensidad máxima de radiación (directividad máxima) expresada como:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U|_{max}}{U_0} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$
(2.2)

D = Directividad

 $D_0$  = Directividad máxima

U = Intensidad de radiación (W/unidad de ángulo sólido)

 $U_{max}$  = Intensidad máxima de radiación (W/unidad de ángulo sólido)

 $U_0$  = Intensidad de radiación de una fuente isotrópica

 $P_{rad}$  = Potencia total radiada (W)

#### 2.1.3. Polarización

La polarización de una antena en una dirección es definida como la polarización de la onda transmitida por la antena. Generalmente es tomada en dirección del máximo de radiación. Cuando no se indica la dirección, la polarización se toma en la dirección de máxima ganancia. En la práctica, la polarización de la energía radiada varia con la dirección desde centro de la antena, de modo que diferentes partes del patrón pueden tener diferentes polarizaciones. La polarización de una onda radiada es definida como la propiedad de una onda electromagnética que describe la variación en el tiempo de la dirección y la magnitud relativa del vector de campo eléctrico; especialmente la figura trazada como una función del tiempo por la extremidad del vector en un lugar fijo del espacio y el sentido en el que se traza, como se observa a lo largo de la dirección de propagación. La polarización entonces es la curva trazada por el extremo final del vector representando el campo eléctrico instantáneo. El campo puede ser observado a lo largo de la dirección de



propagación. Una función trazada en el tiempo típica se muestra en la Figuras 2.2 y 2.3 [12].

Figura 2.2: Rotación de una onda electromagnética plana.



**Figura 2.3:** Elipse de polarización en z = 0 como una función del tiempo.

#### 2.1.4. Impedancia de entrada

Se define como la impedancia medida en los terminales de la antena o la relación de voltaje a corriente en un par de terminales. En las Figuras 2.4 y 2.5 los terminales de entrada son designados como *a-b*. La relación entre el voltaje y la corriente en esos terminales sin una carga adjunta define la impedancia de la antena como [12]:

$$Z_A = R_A + j X_A \tag{2.3}$$

Donde

 $Z_A$  = Impedancia de la antena vista en los terminales *a*-*b* (ohmios)

 $R_A$  = Resistencia de la antena vista en los terminales *a*-*b* (ohmios)

 $X_A$  = Reactancia de la antena vista en los terminales *a*-*b* (ohmios)



Figura 2.4: Antena en régimen de transmisión.

En general la parte resistiva de 2.3 consiste en dos componentes, esto es:

$$R_A = R_r + R_L \tag{2.4}$$

Donde

- $R_r$  = Resistencia a la radiación de la antena
- $R_L$  = Resistencia de perdida de la antena



Figura 2.5: Circuito equivalente de Thevenin.

Asumiendo que la antena esta alimentada por un generador con impedancia interna y la antena es usada en su régimen de transmisión, podemos representar la antena y el generador por un circuito equivalente mostrado en la Figura 2.5.

#### 2.2. Técnicas de medición

#### 2.2.1. Rangos de antena

Las pruebas y evaluaciones de las estructuras radiantes se realizan en rangos de antena, los cuales se clasifican en exteriores e interiores y comprenden respectivamente una serie de limitaciones; por ejemplo, los rangos exteriores no están protegidos de las condiciones ambientales mientras que los rangos interiores están limitados por restricciones espaciales; debido a que algunos parámetros de antenas se miden en régimen de recepción y requieren del empleo del criterio de zona lejana, el campo incidente debe, idealmente, ser una onda plana y para tal fin, se necesita un gran espacio que limita el valor de las instalaciones interiores. [12].

#### 2.2.2. Rangos de reflexión

Son un tipo de rango exterior, involucra la obtención intencional de interferencia constructiva en la región denominada *zona quieta* de la antena bajo prueba. Este comportamiento se logra al ajustar las distancias de forma tal que las reflexiones especulares de la tierra se combinen constructivamente con las incidencias directas. Estos métodos de medición son empleados, por lo general, en la región UHF para la obtención de patrones de radiación de antenas moderadamente abiertas; así mismo; así mismo, se utilizan para sistemas que operan entre la región de frecuencia UHF hasta los 16 GHz. [12]

#### 2.2.3. Rangos de espacio libre

Están diseñados para suprimir la contribución del espacio circundante y comprenden a los *rangos elevados, rangos inclinados* [13], *cámaras anecoicas, rangos compactos* [14] y los *rangos de campo cercano* [15].

El uso de las diferentes técnicas mencionadas estará condicionado, fundamentalmente, a las condiciones del entorno en el cual se realizará el estudio de las características electromagnéticas de las antenas, las dimensiones de estas últimas y el nivel de contribución del espacio circundante tolerable en los resultados obtenidos. [16]

#### 2.3. Método de los momentos

El método de los momentos es un procedimiento matemático que permite el cálculo de problemas de campos a través de expresiones matriciales. La idea básica consiste en reducir una ecuación funcional a una ecuación matricial y obtener la solución de la ecuación matricial a través de técnicas conocidas [17].

En el electromagnetismo el método de los momentos es una técnica utilizada para resolver las ecuaciones integrales superficiales o volumétricas en el dominio de la frecuencia. Debido a que las fuentes electromagnéticas son las cantidades de interés[18]

Considérese la siguiente ecuación:

$$L(f) = g \tag{2.5}$$

Donde L es un operador , g es la fuente o excitación (conocida como función), f es el campo o respuesta (función desconocida a determinar). Por el término con condición determinista, se puede decir que la solución para 2.5 es única; esto es, solamente un f asociado con un g dado. Un problema de análisis implica la determinación de f cuando L y g son dados. Un problema de síntesis implica la determinación de L cuando f y g son especificados [17].

Ahora bien de la ecuación 2.5, se tiene que L es un operador lineal, g es conocida y f la función a determinar. Expandiendo f en una serie de funciones  $f_1, f_2, f_3$ ...en el dominio de L, tal que [17]:

$$f = \sum_{n} \alpha_{n} f_{n}$$
(2.6)

Donde las  $\alpha_n$  son constantes y las  $f_n$  se llaman funciones de expansión o funciones bases. Para soluciones exactas de la ecuación 2.6 usualmente es una sumatoria infinita y las  $f_n$  forman un conjunto completo de funciones base. Para soluciones aproximadas, 2.6 es usualmente una sumatoria finita. Sustituyendo 2.6 en 2.5 y haciendo uso de la linealidad de L se tiene [17]:

$$\sum_{n} \alpha_{n} L(f_{n}) = g$$
(2.7)

Ahora se asume que se ha determinado un apropiado producto interno  $\langle f, g \rangle$  para el problema. Ahora se define un conjunto de funciones peso, o funciones de

prueba,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ ... en el rango de L y se toma el producto interno de 2.7 con cada  $w_m$ . El resultado es [17]:

$$\sum_{n} \alpha_{n} \langle w_{m}, Lf_{n} \rangle = \langle w_{m}, g \rangle$$
(2.8)

 $\mathfrak{m} = 1, 2, 3....$  Este conjunto de ecuaciones pueden ser escritas en forma matricial como:

$$[l_{mn}][\alpha_n] = [g_m] \tag{2.9}$$

donde:

$$[l_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, Lf_1 \rangle & \langle w_1, Lf_2 \rangle & \dots \\ \langle w_2, Lf_1 \rangle & \langle w_2, Lf_2 \rangle & \dots \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{bmatrix}$$
(2.10)

$$[\alpha_{n}] = \begin{bmatrix} \alpha_{1} \\ \alpha_{2} \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad [g_{m}] = \begin{bmatrix} \langle w_{1}, g \rangle \\ \langle w_{2}, g \rangle \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad (2.11)$$

#### 2.4. Código electromagnético numérico

El código electromagnético numérico (NEC) fue desarrollado por el laboratorio Lawrence Livermore, el mismo constituye una versión mejorada del programa de modelaje de antenas (AMP) creado en la década de 1970 por MBAssociates con el patrocinio del Ejército de los Estados Unidos. Consiste en un código de computadora, orientado al usuario, para el análisis de la respuesta electromagnética de antenas y otras estructuras metálicas. Está construido alrededor de la solución numérica de ecuaciones integrales para la obtención de corrientes inducidas en estructuras debido a fuentes impresas o campos incidentes. [19] El código NEC combina una ecuación integral, para el análisis de superficies lisas, con una especializada en alambres para proporcionar una metodología conveniente y exacta para el modelado de un amplio rango de estructuras. Un modelo puede incluir redes no radiantes y líneas de transmisión que conecten partes de la estructura, conductores perfectos o imperfectos y cargas de elementos concentrados; así mismo, pueden ser modelado sobre un plano de tierra que a su vez, puede ser un conductor perfecto o imperfecto. [19]

La excitación de las antenas puede consistir tanto en fuentes de voltaje impresas en la estructura como una onda plana incidente de polarización lineal o elíptica; a su vez, el resultado generado por la aplicación del código puede incluir a las corrientes y cargas inducidas, campos eléctricos o magnéticos en zona cercana y zona lejana. El código NEC puede ser empleado tanto para el análisis de antenas como para el estudio de dispersión y pulso electromagnético. [20]

El programa NEC usa la ecuación integral de campo eléctrico (EFIE) así como la ecuación integral de campo magnético (MFIE) para modelar la respuesta electromagnética de estructuras generales, cada ecuación comprende ventajas para ciertos tipos de estructuras; concretamente, el EFIE es la opción más adecuada para geometrías de alambre delgado de conductores pequeños o de volumen reducido, mientras que MFIE, el cual falla para ese tipo de antenas, resulta más atractivo para estructuras voluminosas, especialmente en aquellas que comprenden grandes superficies lisas. [19]

#### 2.4.1. Ecuación integral de campo eléctrico (EFIE)

La forma de la EFIE usada en NEC parte de una representación integral para el campo eléctrico de una distribución de corriente en un volumen  $\vec{J}$ ,

$$\vec{\mathsf{E}}(\vec{\mathsf{r}}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_{\mathcal{V}} \vec{\mathsf{J}}(\vec{\mathsf{r}'}) \cdot \overline{\mathsf{G}}(\vec{\mathsf{r}},\vec{\mathsf{r}'}) d\mathsf{V}'$$
(2.12)

donde:

$$\begin{split} \overline{G}(\vec{r},\vec{r}') &= (k^2 \overline{I} + \nabla \nabla) g(\vec{r},\vec{r}'), \\ g(\vec{r},\vec{r}') &= exp\left(-jk\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|\right)/\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|, \\ k &= \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}, \\ \eta &= \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \end{split}$$

y la convención de tiempo es  $exp(j\omega t)$ . Ī es la identidad diádica  $(\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z})$ . Cuando la distribución de corriente es limitada a la superficie del cuerpo conductor perfecto, la ecuación 2.32 se convierte en:

$$\vec{\mathsf{E}}(\vec{\mathsf{r}}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_{\mathsf{S}} \vec{\mathsf{J}_s}(\vec{\mathsf{r}'}) \cdot \overline{\mathsf{G}}(\vec{\mathsf{r}},\vec{\mathsf{r}'}) ds', \qquad (2.13)$$

con la densidad de corriente de superficie  $\vec{J_s}$ . El punto de observación  $\vec{r}'$  está restringido a estar fuera de la superficie S de forma que de tal forma que  $\vec{r} \neq \vec{r}'$ .

Si r se aproxima a S como limite, la ecuación 2.31 se convierte en

$$\vec{\mathsf{E}}(\vec{\mathsf{r}}) = \frac{-\mathsf{j}\eta}{4\pi\mathsf{k}} \int_{\mathsf{S}} \vec{\mathsf{J}_{\mathsf{s}}}(\vec{\mathsf{r}'}) \cdot \overline{\mathsf{G}}(\vec{\mathsf{r}},\vec{\mathsf{r}'}) \mathsf{d}\mathsf{s'}, \qquad (2.14)$$

donde el principal valor integral,  $\oint$  está indicado ya que  $g(\vec{r}, \vec{r}')$  es ahora ilimitado.

Una ecuación integral para la corriente inducida en S por un campo incidente  $\vec{E}^{I}$  puede ser obtenida a partir de la ecuación 2.14 y la condición de contorno para  $\vec{r} \in S$ .

$$\hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \left[\vec{\mathsf{E}}^{\mathsf{S}} + \vec{\mathsf{E}}^{\mathsf{I}}\right] = 0, \qquad (2.15)$$

donde  $\hat{n}(\vec{r})$  es vector unitario normal a la superficie en  $\vec{r}$  y  $\vec{E}^S$  es el campo debido a la corriente inducida  $\vec{J_s}$  (denominado también campo disperso). Sustituyendo en la ecuación 2.14 para  $\vec{E}^S$  se produce la ecuación integral,

$$-\hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \vec{\mathsf{E}}^{\mathrm{I}} = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \int_{\mathrm{S}} \vec{\mathsf{J}_{\mathrm{s}}}(\vec{\mathbf{r}}') \dot{(k^{2}\overline{\mathrm{I}} + \nabla\nabla)} g(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{r}}') ds'$$
(2.16)

donde k es el número de onda

El vector integral en la ecuación 2.16 puede ser reducido a una ecuación integral escalar cuando la superficie conductora S es la de un alambre fino cilíndrico, de este modo haciendo la solución mucho más fácil. La suposiciones aplicadas para un alambre fino, conocidas como aproximaciones de alambre fino, son las siguientes:

- a. La corrientes transversales puede ser despreciadas en relación con las corrientes axiales en el alambre.
- b. La variación circunferencial en la corriente axial puede ser despreciada.
- c. La corriente puede ser representada por un filamento en el eje del alambre
- d. La condición de contorno en el campo eléctrico necesita ser forzada en la dirección axial únicamente.

Estas aproximaciones ampliamente usadas son válidas siempre y cuando el radio del alambre sea mucho menor que la longitud de onda y mucho menor que la longitud del alambre [19].

Dado que las suposiciones a., b. y c. y la corriente superficial  $\vec{J_s}(\vec{r})$  sobre un alambre de radio *a* se puede reemplazar por una corriente filamentaria *I* donde

 $I(s)\hat{s} = 2\pi \alpha \vec{J_s}(\vec{r}),$   $s = \text{parámetro de distancia a lo largo del eje de alambre en \vec{r}}$  $\hat{s} = \text{vector unitario tangente al eje del alambre en \vec{r}.}$ 

La ecuación 2.16 entonces se convierte en

$$-\hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \vec{\mathsf{E}}^{\mathrm{I}} = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \int_{\mathrm{L}} \mathrm{I}(s') \left(k^2 \hat{s}' - \nabla \frac{\partial}{\partial s'}\right) g(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{r}}') \mathrm{d}s', \qquad (2.17)$$

donde se hace sobre la longitud del alambre. Haciendo cumplir la condición de frontera en la dirección axial reduce la ecuación 2.17 a una ecuación escalar,

$$-\hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \vec{\mathsf{E}}^{\mathrm{I}} = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{r}}) \times \int_{\mathrm{L}} \mathrm{I}(s') \left(k^2 \hat{s} \cdot \hat{s}' - \frac{\partial}{\partial s'}\right) g(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{r}}') \mathrm{d}s', \qquad (2.18)$$
Dado que  $\vec{r}'$  es ahora el punto en s' en el eje del alambre, mientras que  $\vec{r}$  es un punto en s en la superficie del alambre  $|\vec{r} - \vec{r}'| \ge a$  y el integrando está limitado.

Debido a que hay muchas antenas con curvas y uniones de alambres, necesitamos considerar la EFIE para el alambre fino de una forma apropiada para estas geometrías. En este sentido, la corriente de alambre será una función vectorial de posición; por lo tanto, la base y las funciones de prueba también serán vectores. Sea la corriente de línea un función dependiente a la posición

$$I(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r})\hat{\mathbf{t}}(\mathbf{r}) \tag{2.19}$$

donde  $\hat{t}(r)$  es el vector tangente al alambre en r. Sustituyendo lo anterior en la EFIE resulta

$$-\frac{j}{\omega\mu}\left[\hat{t}(\mathbf{r})\cdot\mathsf{E}^{i}(\mathbf{r})\right] = \left[1 + \frac{1}{k^{2}}\nabla\nabla\right]\int_{L}I(\mathbf{r}')\hat{t}(\mathbf{r}')G(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'$$
(2.20)

al cual nos referiremos como la EFIE para alambres finos de forma arbitraria. A continuación se aproxima la corriente como una suma de N funciones de base vectorial ponderada [18]:

$$I(\mathbf{r}')\hat{\mathbf{t}} \approx \sum_{n=1}^{N} a_n f_n(\mathbf{r})$$
(2.21)

donde  $f_n(r)$  esta a lo largo de todo el alambre. Sustituyendo lo anterior en la EFIE resulta

$$-\frac{j}{\omega\mu}\left[\hat{t}(r)\cdot E^{i}(r)\right] = \left[1 + \frac{1}{k^{2}}\nabla\nabla\right]\sum_{n=1}^{N}a_{n}\int_{f_{n}}f_{n}(r')G(r,r')dr'$$
(2.22)

Evaluando lo anterior por N funciones de prueba  $f_m$  se obtiene un sistema lineal con elementos de matriz dado por

$$z_{mn} = \int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \int_{f_n} f_n(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' d\mathbf{r} + \frac{1}{k^2} \int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \left[ \nabla \nabla \cdot \int_{f_n} f_n(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \right] d\mathbf{r}$$
(2.23)

y elementos de vector de excitación  $b_m$  dado por

$$b_{\rm m} = -\frac{\rm j}{\omega\mu} \int_{f_{\rm m}} f_{\rm m}(r) \cdot E^{\rm i} dr \qquad (2.24)$$

Analizando ahora en el segundo término del lado derecho de 2.32. Si redistribuimos los operadores diferenciales para que funcionen sobre la base y las funciones de prueba, simplificará el cálculo de los elementos de la matriz [18].

$$\int_{f_m} f_m \cdot \left[ \nabla \nabla \cdot \int_{f_n} f_n(r') G(r,r') dr' \right] dr$$
(2.25)

$$\int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \nabla S(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \left[ \nabla \int_{f_n} \nabla' \cdot f(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \right] d\mathbf{r}$$
(2.26)

Usando el vector identidad

$$\mathbf{f}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \mathbf{S}(\mathbf{r}) = \nabla \cdot [\mathbf{f}(\mathbf{r})\mathbf{S}(\mathbf{r})] - [\nabla \cdot \mathbf{f}(\mathbf{r})]\mathbf{S}(\mathbf{r})(2.27)$$

se puede escribir lo anterior de la siguiente manera:

$$\int_{f_m} f_m \cdot \nabla S(r) dr = \int_{f_m} \nabla \cdot [f_m(r)S(r)] dr - \int_{f_m} [\nabla \cdot f_m(r)]S(r) dr$$
(2.28)

Se convierte el primer término en el lado derecho en una integral de superficie utilizando el teorema de la divergencia

$$\iint \int_{V} \nabla \cdot [f_{m}(r)S(r)] \, dr = \iint_{S} \hat{n} \cdot [f_{m}(r)S(r)] \, dr$$
(2.29)

Puesto que la superficie de delimitación puede hacerse suficientemente grande para que  $f_m(r)$  desaparezca, lo anterior es cancelado dejando sólo el segundo término que es [18]:

$$\int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \nabla S(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = -\int_{f_m} \nabla \cdot f_m(\mathbf{r}) \int_n \nabla' \cdot f(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' d\mathbf{r}$$
(2.30)

sustituyendo en 2.32 en la siguiente expresión para los elementos de la matriz EFIE.

$$z_{mn} = \int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \int_{f_n} f_n(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' d\mathbf{r} + \frac{1}{k^2} \int_{f_m} \nabla \cdot f_m(\mathbf{r}) \int_{f_n} \nabla' \cdot f(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' d\mathbf{r}$$

(2.31)

$$z_{mn} = \int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \int_{f_n} f_n(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' d\mathbf{r} + \frac{1}{k^2} \int_{f_m} f_m(\mathbf{r}) \cdot \left[ \nabla \nabla \cdot \int_{f_n} f_n(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \right] d\mathbf{r}$$
(2.32)

## 2.5. JAVA

JAVA fue diseñado para ser un lenguaje de programación independiente de la máquina donde se ejecute, proporcionando un nivel de seguridad adecuado para operar a través de redes informáticas y lo suficientemente poderoso como para reemplazar código nativo ejecutable. Se define tanto como un lenguaje compilado e interpretado, toda vez que su código fuente se convierte en instrucciones binarias simples (Código máquina o *bytecode*) sin embargo; a diferencia de C o C++, donde estas instrucciones se reducen a un modelo particular de procesador, el código Java es compilado a un formato universal de instrucciones para una máquina virtual. [2].

# Capítulo III

# Procedimientos de la investigación

## 3.1. Exploración Bibliográfica

Durante esta etapa de la investigación se recopiló información acerca de los procedimientos y estándares pertinentes al estudio de las características electromagnéticas de las estructuras radiantes; concretamente, aquellos referentes a los parámetros de antenas y técnicas de medición aplicadas a estructuras radiantes. Esta información fue obtenida a través de diferentes documentos, siendo el texto Teoría de Antenas: Análisis y Diseño, de Constantine A. Balanis [12] la fuente principal para la documentación referente a los temas antes mencionados.

Para el análisis del principio de funcionamiento del código NEC y el procedimiento matemático que requiere el cálculo de parámetros con la herramienta computacional, se hizo uso del libro *Field Computation by Moment Methods* del autor Roger F. Harrington [17] donde se pudo conocer mas acerca del Método de los Momentos y su aplicación en el cálculo electromagnético, asimismo, para el conocimiento de la arquitectura e implementación de NEC, fue de gran utilidad el estudio del manual NEC-2 de J. Rockway [20] con el cual se analizaron los archivos de entrada y salida del código NEC.

El desarrollo de la aplicación se realizó partir de la exploración y estudio acerca de los diferentes paradigmas de programación, de los cuales se seleccionó el paradigma orientado a objetos aprovechando las capacidades que en este ámbito el lenguaje JAVA ofrece, lo cual se deriva en una programación mas ordenada y sistemática. Contando con todas estas herramientas bibliográficas después de un estudio exhaustivo, se inició proceso de pruebas unitarias y diseño de la aplicación.

## 3.2. Análisis del código NEC

El código electromagnético numérico constituye una iniciativa para emplear la capacidad de procesamiento de las computadoras en el estudio de las características y comportamiento de antenas, luego de más de 40 años de investigación continua, se presenta como una herramienta de acceso libre que hace abstracción de su núcleo desarrollado en FORTRAN, haciéndolo fácilmente integrable con nuevos lenguajes y paradigmas de programación; durante esta fase, obtenidas las fuentes bibliográficas pertinentes, se procedió a estudiar la forma en la cual el código NEC puede ser implementado, así que se realizó una exploración a través de algunos programas basados en el motor NEC encontrados en la red, así como el realizado en la Universidad de Carabobo, DISANT [6], de tal modo que se pudo comprobar la factibilidad del desarrollo de la aplicación y a su vez, las características consideradas para ser añadidas, partiendo de las observadas en los programas anteriores.

A través de la exploración del programa NEC se obtuvo conocimiento acerca de las características que posee esta herramienta de simulación de estructuras radiantes, destacándose entre ellas la capacidad de modelado de antenas, fijación de un plano de tierra en el diseño, un archivo de salida de texto con información de los resultados de la simulación donde se encuentran los valores de las impedancias asociadas a las fuentes, así como su tensión y corriente con magnitud y fase, la potencia del diagrama de radiación en las tres dimensiones en función de los ángulos  $\phi$  y  $\theta$ . No obstante, cabe destacar que el motor NEC por sí solo no es capaz de generar figuras de diagramas de radiación, descripción gráfica de los alambres de un diseño de antena y no posee una interfaz amigable con el usuario; su alcance se extiende hasta el cálculo de los parámetros electromagnéticos del diseño descrito en un archivo de texto, realizando los procedimientos necesarios (utilizando el Método de los Momentos) para generar una salida con los resultados del cómputo. También es posible encontrar limitaciones en las simulaciones, las cuales dependerán tanto del diseño de la geometría de la antena (un ejemplo es la restricción para el cruce de alambres), de la máquina donde es ejecutado el programa, aunque esta última es menos frecuente el día de hoy debido a los hardwares avanzados con los que cuentan las computadoras.

## 3.3. Comandos de NEC-2 (Cartas NEC)

Los comandos de NEC o cartas de NEC representan los datos leídos por el programa para realizar el cálculo, los cuales son escritos en una archivo de texto dispuestos de la siguiente manera:

| Carta | Descripción   |
|-------|---|
| СМ    | Tarjeta de comentarios  |
| CE    | Tarjeta de final de comentarios   |
| GW    | Tarjeta de descripción de alambre                                       |
| GE    | Tarjeta de culminación de datos de geometría                            |
| FR    | Tarjeta de especificación de frecuencia (o frecuencias)                 |
| GN    | Tarjeta de especificación de parámetros de tierra                       |
| EX    | Tarjeta de especificación de excitación de la estructura                |
| LD    | Tarjeta de especificación de carga                                      |
| TL    | Tarjeta de descripción de lineas de transmisión                         |
| NT    | Tarjeta de especificación de redes                                      |
| RP    | Tarjeta de especificaciones para la realización del patrón de radiación |
| EN    | Tarjeta de final de datos   |

Tabla 3.1: Lineas del archivo de entrada a NEC.

A continuación se mostrará una descripción de las primeras lineas del archivo para su aplicación.

## 3.4. Entrada al programa

#### 3.4.1. Líneas comentadas

El archivo de entrada al NEC2 debe comenzar con al menos una o mas líneas de comentarios que pueden contener una breve descripción de la antena y parámetros de estructuras para la ejecución. Las tarjetas son impresas en el inicio de la salida de la simulación solo como identificación y no tienen ningún efecto en el cálculo. Cualquier carácter alfabético y numérico puede ser escrito en estas líneas. La tarjeta de comentarios, así como las otras tarjetas de datos, poseen dos letras identificadoras en la columna 1 y 2. Los comentarios deben ubicarse siempre entre las tarjetas: CM y CE.



Figura 3.1: Tarjeta de comentarios [20].

Cuando se lee la tarjeta CM, el contenido de la columna 3 hasta la 80 son impresas en la salida y la siguiente tarjeta es leída como una tarjeta de comentario.

Cuando se lee la tarjeta CE, las columnas desde la 3 hasta la 80 se imprimen y la lectura de comentarios es finalizada. La siguiente tarjeta debe ser la carta de geometría. Por lo tanto, una tarjeta CE debe siempre ocurrir después de todos los datos de comentarios y puede ser precedida por tantas tarjetas CM como se necesiten para describir la ejecución [20].

#### 3.4.2. Tarjeta de entrada de la geometría de la estructura

#### 3.4.2.1. Final de entrada de geometría (GE)

Card:

El propósito de esta tarjeta es terminar la lectura de tarjetas de datos de geometría y restablecer datos de geometría si se utiliza un plano de tierra.

| Field      | Parameter | Last column in each field |
|------------|-----------|---------------------------|
|            |           |                           |
| GE         |           | 2                         |
| <b>I</b> 1 | gpflag    | 5                         |
| blank      |           | 10                        |
| blank      |           | 20                        |
| blank      |           | 30                        |
| blank      |           | 40                        |
| blank      |           | 50                        |
| blank      |           | 60                        |
| blank      |           | 70                        |
| blank      |           | 80                        |
|            |           |                           |

Figura 3.2: Tarjeta de terminación de lectura de geometría [20].

Parámetros:

gpflag - Bandera de geometría del plano de tierra.

- **gpflag = 0:** Plano de tierra no presente.
- gpflag = 1: Indica que el plano de tierra está presente. La simetría de estructura es modificada según sea necesario y la expansión de las corrientes se modifican tal que las corrientes de un segmento que toca la tierra son interpoladas a sus imágenes por debajo de la tierra (la carga en la base es cero).
- gpflag = -1: Indica que el plano de tierra está presente. La simetría de estructura es modificada según sea necesario. La expansión actual, sin embargo, no se modifica, por lo tanto, las corrientes en los segmentos que tocan la tierra irán a cero en la tierra.

Esta tarjeta solo admite números enteros.

Notas:

- La función básica de la tarjeta GE es terminar la lectura de tarjetas de datos de geometría. Al hacer esto, hace que el programa busque a través de los datos de segmento que han sido generados por las tarjetas anteriores para determinar qué hilos están conectados para la expansión actual.
- En el momento en que se lee la tarjeta GE, las dimensiones de la estructura deben estar en unidades de metros.
- Un valor positivo o negativo de I1 (gpflag) no causa que se incluya un terreno en el cálculo. Sólo modifica los datos de geometría según se requiera cuando hay un terreno. Los parámetros de tierra se deben especificar en una tarjeta de control de programa que sigue a las tarjetas de geometría [20].

#### 3.4.2.2. Especificación de alambre (GW)

El propósito de esta tarjeta es la generación de una cadena de segmentos para representar alambres rectos.

```
Card:

Cols. Parameter

1-2 GW

3-5 I1 - ITG

6-10 I2 - NS

11-20 F1 - XW1

21-30 F2 - YW1

31-40 F3 - ZW1

41-50 F4 - XW2

51-60 F5 - YW2

61-70 F6 - ZW2

71-80 F7 - RAD
```

Figura 3.3: Tarjeta de generación de alambres [20].

Los parámetros incluidos en esta tarjeta son:

Enteros

- ITG (I1) Número de etiqueta asignado a todos los segmentos del alambre.
- NS (I2) Número de segmentos en los que se dividirá el alambre.

#### Números decimales

- XW1 (F1) Coordenada X extremo 1.
- YW1 (F2) Coordenada Y extremo 1.
- ZW1 (F3) Coordenada Z extremo 1.
- XW2 (F4) Coordenada X extremo 2.
- YW2 (F5) Coordenada Y extremo 2.
- ZW2 (F6) Coordenada Z extremo 2.
- RAD (F7) Radio del alambre, cero para la opción de segmento cónico.

#### Notas

- El número de etiqueta es para uso posterior cuando se debe identificar un segmento, por ejemplo cuando se conecta una fuente de voltaje o carga agrupada al segmento. Cualquier número excepto cero se puede usar como una etiqueta. Cuando se identifica un segmento por su etiqueta, se da el número de etiqueta y el número del segmento en el conjunto de segmentos que tienen esa etiqueta. Por lo tanto, la etiqueta de un segmento no necesita ser única. Si no se prevé ninguna necesidad de referirse a ningún segmento de un hilo por etiqueta, el campo de etiqueta puede quedar en blanco. Esto da como resultado una etiqueta de cero que no se puede referenciar como una etiqueta válida.
- Si dos alambres están conectados eléctricamente en sus extremos, se deben usar las coordenadas idénticas para los extremos conectados para asegurar que los cables sean tratados como conectados para la interpolación de corriente. Si los cables se cortan lejos de sus extremos, el punto de intersección

debe ocurrir en los extremos del segmento dentro de cada alambre para que se produzca la interpolación. Generalmente, los alambres deben interceptarse solamente en sus extremos a menos que la ubicación de los extremos del segmento se conozca con exactitud.

- El único significado de diferenciar el extremo uno del extremo dos de un alambre es que la dirección de referencia positiva para la corriente estará en la dirección del extremo uno al extremo dos en cada segmento que forma el alambre.
- Como regla general, las longitudes de los segmentos deben ser inferiores a 0,1 longitudes de onda a la frecuencia deseada. Se pueden utilizar segmentos algo más largos en cables largos sin cambios abruptos, mientras que segmentos más cortos, de longitud de onda 0,05 o menos, pueden ser necesarios en el modelado de regiones críticas de una antena [20].

Las cartas restantes utilizadas en el desarrollo de UCNEC se muestran en el Apéndice A.

## 3.5. Pruebas unitarias de NEC2

En el proceso de exploración acerca del uso de las cartas NEC, fue necesaria la realización de pruebas unitarias modelando sistemas radiantes en archivos de textos planos con extensión .nec, los cuales fueron cargados por consola al código NEC-2, de esta manera se pudo generar un archivo de salida con el resultado del cómputo generado por el programa, verificando así la comprensión y el empleo de los comandos en el código. El procedimiento a seguir para realizar esta comprobación en el sistema operativo Windows es el siguiente:

a. Se debe buscar el directorio donde se encuentra el archivo del motor NEC, este archivo es un ejecutable .exe para el sistema operativo Windows y su nombre es "nec2++.exe".

- b. Luego de abrir el directorio, debe crearse un fichero .nec, con el nombre deseado, por ejemplo: input.nec, el cual es un archivo de texto plano que contiene la información acerca de los datos de entrada descritos de acuerdo a lo indicado por las Cartas NEC, donde se especificarán cada uno de los parámetros de simulación y geometría de la antena. Los datos se deben escribir en el orden mostrado en la tabla 3.1.
- c. La escritura debe realizarse como se muestra en el ejemplo a continuación:

| СМ | ESCRIBA COMENTARIOS EN ESTA LINEA                    |
|----|--|
| СМ | ESCRIBA OTRO COMENTARIO EN ESTA LINEA                |
| CE |  |
| GW | 1,20,-0.3,0.0,0.0,0.3,0.0,0.0,0.003                  |
| GW | 2,1,5.9958,5.9958,5.9958,5.9968,5.9968,5.9968,1.0E-4 |
| GE |  |
| FR | 0,600,0,0,400.0,1.001669449081803                    |
| GN | -1,  |
| :  |  |
| •  |  |

Tabla 3.2: Lineas del archivo de entrada a NEC.

como se muestra en la tabla 3.2, los datos numéricos deben estar separados por una "coma" (,) para su correcta lectura.

- d. Haciendo uso de la combinación shift + Botón derecho del mouse, se selecciona la opción del menú "Abrir ventada de comandos aquí", de esta forma la cónsola es abierta en el directorio actual.
- e. En la ventana de comando se escribirá nec2++ -i input.nec -o output.nec.
  Esta linea ejecuta la instrucción de cargar los datos contenidos en el archivo de entrada "input.nec" y a partir de la simulación hecha por el motor NEC, se genera un fichero de nombre "output.nec". El nombre de este archivo de salida también es opcional y puede ser decidido por el usuario.

De esta forma, se realizó exitosamente la simulación de una antena sin el uso de una interfaz de usuario y se obtuvo la salida con los resultados de la simulación como texto plano. Las pruebas unitarias para el sistema operativo Linux, en sus versiones Lubuntu 17.04 y Ubuntu 16.03.3 LTS se realizaron de forma similar, sin embargo antes de poder introducir los comandos en el terminal fue necesario realizar los siguientes pasos:

- a. Descomprimir la carpeta necpp en la ubicación de preferencia para su uso. Esta carpeta contiene el programa en lenguaje C, el cual envuelve el codigo de nec2 en Fortran. Este código pertenece al profesor Tim Molteno de la Universidad de Otago en Nueva Zelanda y se consigue en https://github.com/ tmolteno/necpp.
- b. Abrir el terminal en la carpeta donde fue descomprimida la carpeta necpp.
- c. Acceder a la carpeta necpp-master [cd necpp-master] desde el terminal.
- d. Nec2++ requiere un compilador C++ y utiliza paquetes GNU autoconf para mantener el registro de las dependencias, en distribuciones DEBIAN o derivadas de esta, se pueden instalar estos paquetes con el siguiente comando: para Debian:

[aptitude install g++ make automake autoconf libtool libatlas-base-dev]

para Ubuntu:

e. En la carpeta necpp abrir un terminal y ejecutar:

```
[make -f Makefile.git]
[./configure --without-lapack]
```

[make -j 4]
[sudo make install]

Una vez finalizados estos pasos, será posible la ejecución de NEC2++ en su entorno Linux con los comandos utilizados en la consola de Windows descritos anteriormente.

## 3.6. Elección de las librerías de JAVA para la visualización de datos

Luego de la realización de las pruebas unitarias del código NEC, se inició la exploración a través de las diferentes librerías que existen en la web para la visualización de los datos en JAVA, con el fin de mostrar la salida de manera gráfica obtenida en la simulación. Entre las librerías encontradas se examinaron las capacidades de JMonkey, Java3D, JZY3D, JFreeChart.

JMonkey es un motor de código abierto y gratuito, hecho especialmente para desarrolladores de Java que quieren crear juegos 3D usando tecnología moderna. El software está completamente programado en Java disponible para las plataformas Mac OS, Windows, Linux, Solaris. Sin embargo, para la utilización de esta librería, es necesario que el hardware donde se ejecuta el programa cuente con una tarjeta de vídeo con soporte para OpenGL 2.0.

La API de Java3D es un conjunto de clases que sirven como interfaz a un sistema para desplegar gráficos tridimensionales y sonidos. Los programas de Java3D pueden ser escritos para ser corridos con programas independientes o como applets para ser mostrados en browsers. Esta librería corre sobre OpenGL y Direct3D, lo cual lo hace poco compatible con sistemas operativos como Linux.

Jzy3d es una librería de Java de código abierto que permite dibujar fácilmente los datos científicos 3D: Superficies, diagramas de dispersión, gráficos de barras, entre otros. La API proporciona soporte para gráficos interactivos, ricos, con barras de colores, información sobre herramientas y superposiciones. Los ejes y el diseño gráfico puede ser totalmente personalizado y mejorado. Basándose en JOGL 2, Jzy3d se puede implementar fácilmente en gráficos de OpenGL en Windows, Unix, MacOS e integrar en Swing, AWT, SWT o JavaFX. Varias contribuciones también han hecho Jzy3d disponible para otros lenguajes y plataformas como Sa, Groovy, Matlab, C.

JFreeChart es una librería gratuita que permite mostrar gráficos, con soporte para varios formatos de archivos de imagen. La biblioteca tiene la capacidad de generar gráficos circulares (2D y 3D), gráficos de barras (horizontales y verticales, regulares y apilados), de líneas, gráficos de dispersión, gráficos de series de tiempo, diagramas de Gantt, plots combinados, termómetros y más.

Cada una de estas librerías tienen en particular una aplicación a la cual están orientadas, de este modo fue posible descartar dos de ellas (JMonkey y Java3D), aun cuando éstas ofrecían capacidades que pudieron ser útiles para el desarrollo del programa, no eran las más adecuadas debido que están orientadas al desarrollo de gráficos de alto nivel, comunes en videojuegos y experiencias en 3D, requiriendo un estudio riguroso de sus manuales y una inversión de tiempo extensa para su aplicación y correcto funcionamiento, además, para su implementación es necesaria ciertas especificaciones de hardware y software que no contribuyen a la orientación multiplataforma de la aplicación.

En cuanto a la documentación de las librerías identificadas, JZY3D posee un manual disponible en su pagina web, donde se encuentran los tutoriales, códigos de ejemplo, documentación de la API. Sin embargo, para acceder a alguno de ellos, es necesario contactar a los desarrolladores y realizar un pago determinado, según el caso, por los desarrolladores de la API. Pero esto no es un impedimento para su implementación, puesto que el documento del API ofrece suficiente ayuda para desarrollar gráficos científicos adecuados para la aplicación UCNEC sin demandar recursos de sistema elevados.

La documentación disponible para JFreeChart es amplia debido a su popularidad, es una herramienta libre y ofrece una documentación gratis en su pagina web. Esta librería tiene la capacidad de realizar diferente gráficos, sin embargo, no es posible realizar gráficos en 3D, lo que limita su uso solo en representaciones bidimensionales.

Teniendo en cuenta cada uno de estos aspectos en cuanto a documentación y la orientación multiplataforma del software, se selecionaron las librerias JZY3D y JFreeChart.

# 3.7. Representación de la salida en las librerías de graficación de JAVA

#### 3.7.1. Librería de Graficación JZY3D

La información relativa a la geometría y características electromagnéticas de un sistema radiante modelado y simulado con el script NEC2++ está disponible en el archivo de salida generado en formato de texto; no obstante, esta disposición no facilita el análisis de los resultados y puede volverse tedioso al trabajar con numerosos segmentos; en este sentido, se hace necesario el uso de una librería que permita visualizar los datos susceptibles a ser representados en forma gráfica. Considerando que la geometría de una antena, así como su diagrama de radiación, pueden estar definidos en un espacio tridimensional, se requiere de un recurso que permita (desde Java y respetando las premisas de diseño de UCNEC) mostrar este tipo de gráficos. Un estudio detallado de las diferentes opciones de código abierto y multiplataforma disponibles para Java arrojó como resultado que la librería JZY3D proporcionaba las características requeridas para la implementación deseada. Una vez decidida cual librería sería la utilizada, se requiere diseñar algunas pruebas que demuestren la viabilidad de la conversión del valor proporcionado por el archivo de entrada o salida del script NEC2++ a su respectiva representación gráfica; en este orden de ideas, se parte de la definición de geometría de un alambre de ejemplo como el mostrado a continuación:

GW 1,20,0.0,0.0,-0.3,0.0,0.0,0.3,0.003

A partir de la interpretación de la carta de geometría, es fácil deducir que las coordenadas de los extremos del alambre descritas por el comando son:

- X1 = 0
- Y1 = 0
- ZI = -0.3
- X2 = 0
- Y2 = 0
- Z2 = 0.3

El uso de JZY3D para la graficación de segmentos no es lo suficientemente intuitiva y la documentación sobre su uso es relativamente escasa; no obstante, se logró identificar que los alambres a ser graficados por la librería, deben ser creados como objetos de la clase CroppableLineStrip, cuyos parámetros de construcción corresponden a los extremos inicial y final del segmento que se desea graficar, para el caso de ejemplo:

- CroppableLineStrip = linea
- PuntoInicial = X1, Y1, Z1
- PuntoFinal = X2, Y2, Z2
- Agregar\_a\_linea (PuntoInicial)
- Agregar\_a\_linea (PuntoFinal)

De esta forma, se ha determinado el mecanismo a través del cual los datos de entrada y salida del proyecto UCNEC, susceptibles a ser representados como una sucesión de segmentos, pueden ser visualizados utilizando la librería JZY3D.

#### 3.7.2. Librería de Graficación jFreeChart

Si bien el desempeño de la librería JZY3D cubre la necesidad de representación de datos como segmentos en un espacio tridimensional, para las gráficas representadas en 2D es deficiente y carece de herramientas necesarias para el análisis posterior de los datos de coordenadas que se desean desplegar en la misma; por esta razón, se recurre a la librería de código abierto jFreeChart, multiplataforma, intuitiva y muy bien documentada para solventar las debilidades de la primera librería en la graficación de este tipo de datos. Es fácil identificar que el proceso de generación de datos a ser graficados por la librería consiste en la creación de un objeto del tipo XYSeriesCollection cuyo parámetro de construcción es otro objeto, de la clase XYSeries, al cual debe agregarse una sucesión de coordenadas X,Y. En este sentido:

- XYSeriesCollection = datos\_de\_grafica
- XYSeries = serie\_de\_datos
- X = Coordenada X
- Y = Coordenada Y
- Agrega\_a\_serie\_de\_datos(X,Y)
- Agrega\_a\_datos\_de\_grafica(serie\_de\_datos)

Repitiendo el procedimiento iterativamente para cada par de valores X,Y se genera una gráfica 2D que incluye un cursor que indica el valor de la muestra sobre la cual se ubique el mouse.

De esta forma se comprobó el mecanismo, viabilidad y conveniencia del uso de la librería jFreeChart para la representación de la ROE a partir de los datos del archivo de salida del script NEC2++ para ser visualizados en una gráfica bidimensional.

## 3.8. Diseño y Estructura de la Aplicación

UCNEC está constituido principalmente por dos grandes módulos, los cuales son:

- Módulo de Simulación de Antenas: Presenta las funcionalidades necesarias para la obtención de los parámetros electromagnéticos de los sistemas radiantes bajo estudio; en líneas generales, implementa una metodología de trabajo similar a otras aplicaciones desarrolladas bajo el código NEC tales como 4NEC2 y EZNEC.
- Módulo de Prácticas de Laboratorio: Constituye una iniciativa de integración de las funcionalidades del módulo de Simulación de Antenas con las prácticas virtuales del laboratorio de Antenas y Propagación de la escuela de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo; en este sentido, se parte de la premisa de simplificar la realización de las mismas, haciendo énfasis en una rápida obtención de resultados, proporcionando un mayor tiempo para el análisis de los datos y la profundización de los objetivos de cada una de las prácticas.

#### 3.8.1. Módulo de Simulación de Antenas

Se ofrece el espacio de trabajo orientado a la ejecución secuencial de una serie de pasos dirigidos al ingreso, por parte del usuario, de valores geométricos y electromagnéticos para la obtención de los parámetros de las estructuras radiantes bajo estudio, dicho orden no es arbitrario, sino que responde a la dependencia entre unos parámetros y otros; por ejemplo, para poder modelar un dipolo de media longitud de onda en el apartado "Alambres" se requiere haber definido el valor de dicha longitud de onda o bien la frecuencia de simulación.

El módulo de Simulación de Antenas está constituido, a su vez, por una serie de apartados que, en su conjunto, le proporcionan todas sus diferentes funcionalidades, cabe destacar que existe una relación entre estos apartados y una determinada carta NEC (sección 3.3).

El diseño de cada apartado se realizó como se describe a continuación:

Apartado Frecuencia: Define la frecuencia de diseño de la antena bajo estudio, este módulo está ligado a la carta NEC de frecuencia (FR) y relacionado con el apartado Longitud de Onda, una vez que se define un valor de frecuencia en Megahertz, se calcula su correspondiente longitud de onda mediante la relación f = c/λ donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

El apartado de frecuencia se implementó usando un JOptionPane para mostrar una ventana de diálogo solicitando el ingreso del valor de la frecuencia de diseño en MHz, en caso de ingresar un valor no numérico, desecha el valor introducido y arroja un mensaje de error.

 Apartado Longitud de Onda: Establece el valor de la longitud de onda e indirectamente, la frecuencia de diseño de la simulación en virtud de la razón "λ = c/f". Este apartado está relacionado indirectamente con la carta NEC de frecuencia (FR).

El apartado de longitud de onda se implementó usando un JOptionPane para mostrar una ventana de diálogo solicitando el ingreso del valor de la longitud de onda en metros, en caso de ingresar un valor no numérico, desecha el valor introducido y arroja un mensaje de error.

 Apartado Alambres: Constituye un submódulo que ofrece una serie de herramientas destinadas al modelado de antenas a través de secciones filamentales, cada uno de estos tramos está definido por un extremo inicial y uno final localizado en coordenadas cartesianas, su valor de diámetro y segmentación. El módulo de alambres está estrechamente relacionado con la carta NEC de geometría (CW).



Figura 3.4: Diagrama de bloques que describe la generación de alambres.

El diseño de este apartado parte del estudio de la tarjeta NEC de geometría; a partir del mismo, se deduce que se requiere la introducción de valores de punto flotante para las coordenadas de los extremos del alambre y su diámetro así como también valores enteros para el número de segmentos. La generación de los parámetros de geometría en el programa puede llevarse a cabo de forma manual; es decir, introduciendo estos parámetros en la ventana diseñada para tal fin, o bien, de manera automatizada a partir de los parámetros inherentes a un modelo geométrico predefinido (Círculo, Arco, o Dipolo) si bien estas geometrías pueden ser igualmente generadas de forma manual, las herramientas de construcción automatizada permiten hacerlo más rápido; no obstante, la forma en la cual ambos modelos son manejados por el programa y transformados posteriormente a un comando interpretable por NEC2 es la misma; concretamente, se define una clase en JAVA con tantas variables como elementos tenga la respectiva carta NEC y se crea un objeto de esta clase por cada uno de los alambres definidos en el módulo; seguidamente, el conjunto de alambres introducidos son agrupados en un arreglo tipo lista que es almacenado, a su vez, en una clase de ámbito global desde donde pueden ser aprovechados por otros apartados dentro del programa, la edición de los objetos tipo "Alambre" (Wire) guardados en memoria se lleva a cabo al invocar a los métodos tipo get de las variables de la clase, una vez más, la edición puede llevarse a cabo de forma manual, modificando el parámetro de interés a través de una ventana de edición o de manera automática utilizando herramientas que ejecuten la traslación, rotación y el escalamiento de un alambre o grupo de alambres de interés. Los diagramas que describen la generación de figura son los siguientes:



**Figura 3.5:** Diagrama de bloques que describe la generación de arcos.



Figura 3.6: Diagrama de bloques que describe la generación de círculos.



**Figura 3.7:** Diagrama de bloques que describe la generación de dipolos de  $\lambda/2$ .

Los diagramas que describen la transformación de coordenadas son los siguientes:



Figura 3.8: Diagrama de bloques que describe el escalamiento de los alambres.



Figura 3.9: Diagrama de bloques que describe la traslación de los alambres.



Figura 3.10: Diagrama de bloques que describe la rotacion de los alambres.

 Apartado Fuentes: Consiste en una sección destinada a la definición de las fuentes de excitación de la antena, está relacionada con la carta NEC de fuentes (EX) y presenta dependencia lógica con la variable global de geometría.



Figura 3.11: Diagrama de bloques que describe la generación de fuentes.

A partir del análisis de la carta NEC de fuentes se identifican cuantas variables son requeridas para su construcción y cuales son de tipo flotante o valores enteros; posteriormente, se crea una clase que mapea esa estructura por medio de las variables de tipo correspondiente, por cada una de las fuentes definidas por el usuario, se crea un objeto de la clase fuentes 3.11 y el mismo es agregada a un arreglo tipo lista de ámbito global de forma tal que pueda ser usado o editado en otro apartado, este tipo de parámetros no amerita del diseño de herramientas adicionales de construcción ya que su definición, a partir de valores de entrada introducidos en la ventana correspondiente, es lo suficientemente directa.

 Apartado Cargas: Consiste en una sección destinada a la definición de las cargas presentes en la antena; a diferencia de los alambres, que de acuerdo a NEC
 [20] constituyen modelos físicos que inciden en el patrón de radiación de la antena, las cargas son interpretadas como modelos matemáticos. Este apartado guarda dependencia lógica con el arreglo tipo lista global de geometría y corresponde con la carta NEC de cargas (LD).



Figura 3.12: Diagrama de bloques que describe la generación de cargas.

Para la implementación del apartado de cargas, se identificaron la cantidad y la categoría de variables que constituyen a la carta NEC "LD" a fin de definir cuántos y cuales controles serían necesarios para su construcción a través de este apartado; al igual que el apartado de cargas, no requiere de la implementación de mecanismos de generación automática, toda vez que en una única carta LD queda definida la funcionalidad de su respectiva carga en el esquema de simulación

 Apartado Líneas de Transmisión: Describe una línea de transmisión ubicada entre una fuente y una antena o incluso entre dos segmentos de una o dos antenas, de allí se deduce su dependencia lógica con las variables de geometría. Este apartado es el encargado de generar las cartas NEC TL en el esquema de simulación.



**Figura 3.13:** Diagrama de bloques que describe la generación de líneas de transmisión.

Un análisis de la respectiva carta NEC TL permite deducir que se trata de un parámetro con numerosos elementos constitutivos (véase el apéndice A); en consecuencia, se diseña la respectiva clase en Java que permita mapearlos a todos de forma adecuada. Por cada línea de transmisión agregada en la interfaz se crea un objeto de la clase Tl; finalmente, todos los objetos de esta clase son almacenados dentro de un arreglo tipo lista de ámbito global.

 Apartado Tipo de Tierra: Establece las características electromagnéticas del plano de tierra sobre el cual se lleva a cabo la simulación (O bien indica que no existe tal plano), no presenta dependencia lógica con ninguna otra variable.



Figura 3.14: Diagrama de bloques que describe la generación de plano de tierra.

Una lectura de las características de su carta NEC correspondiente (GN) per-

mite deducir que se trata de un parámetro que requiere pocos valores de entrada por parte del usuario, salvo en los casos donde se requiera definir un tipo de tierra de parámetros electromagnéticos determinados; no obstante, se determinó la conveniencia de la creación de una clase de tipo tierra (GROUND) que fuera creada y almacenada como variable de ámbito global al momento de acceder a este apartado.

Apartado Unidades: Si bien existe una carta NEC de escalamiento (GS), el estudio del funcionamiento de otras implementaciones basadas en NEC (4NEC2, EZNEC) permitió determinar que su uso es poco extendido; en su lugar, se prefiere utilizar métodos propios del lenguaje de programación para llevar a cabo la función de conversión de unidades en los parámetros geométricos del esquema de simulación; no obstante, es importante destacar que el código NEC asume que la geometría de los modelos ingresados está definida en metros. Es el único apartado que no guarda relación funcional con alguna carta NEC ni dependencia lógica con variable alguna.



Figura 3.15: Diagrama de bloques que describe la configuración de las unidades.

Al identificar la particularidad del manejo de la conversión de unidades en diferentes implementaciones NEC; así como la necesidad técnica de definir todos los parámetros geométricos en metros, se decidió crear un mapa de factores de conversión empleando un método público, estático y de acceso global que devolviera el factor adecuado tanto para la visualización de los parámetros geométricos en la escala deseada, así como para su posterior conversión a metros de cara a su procesamiento; en ese sentido, se implementó una variable global que almacenara el factor de conversión a ser considerado en el esquema de simulación.

 Apartado Gráficas: Establece las características del patrón de radiación que será eventualmente generado en otro apartado. No presenta dependencia lógica con otra variable pero sí correspondencia con la carta NEC de patrón de radiación (RP).



**Figura 3.16:** Diagrama de bloques que describe la configuración del patrón de radiación.

Para la implementación del apartado de gráficas se desarrolló en Java una clase que modela los elementos de la carta NEC RP, cuyas variables sean congruentes en tipo con los parámetros mapeados para ser posteriormente almacenada como instancia única de alcance global.

- Apartado Z0 Alternativo para SWR (Ohm): No representa a ninguna carta NEC ni tiene dependencia lógica con algún apartado, su función consiste en definir un valor de impedancia alternativo para el cálculo de la relación de onda estacionaria. Se utilizó un JOptionPane para mostrar una ventana de diálogo solicitando el ingreso del valor del Z0 Alternativo para ROE (En Ohm), en caso de ingresar un valor no numérico, desecha el valor introducido y arroja un mensaje de error.
- Función Abrir: Realiza una operación inversa a la de los apartados, inicializa un cuadro de diálogo en el cual se requiere ubicar un archivo de entrada NEC

de extensión .nec que posteriormente será leído línea por línea en Java y convertido en variables globales de tipos correspondientes a las cartas definidas en el documento. Vale acotar que un archivo de entrada NEC es aquel donde están definidas las cartas que constituyen un esquema de simulación.



Figura 3.17: Diagrama de bloques que describe la función abrir.

La búsqueda del archivo de extensión .nec se lleva a cabo a través de la clase JFileChooser, la cual gestiona aspectos funcionales y gráficos del proceso sin mayor intervención por parte del programador; seguidamente, la clase BufferedReader se encarga de la lectura del archivo de entrada línea por línea, de forma tal que se puede identificar la etiqueta de la carta NEC que describe y crea objetos de las clases y alcances correspondientes.

 Función Guardar Como: Analiza los valores de las variables-objeto de alcance global que corresponden a modelados de cartas NEC, para generar líneas de texto a partir de la información contenida e integrarlas en un archivo de entrada NEC de extensión .nec



Figura 3.18: Diagrama de bloques que describe la función guardar como.

La clase JFileChooser también puede ser empleada para ubicar el directorio en el cual se almacenará el archivo de extensión .nec, se utiliza la clase BufferedWriter para generar el documento a partir del análisis de las variables de alcance global que para entonces hayan sido inicializadas.

Funciones Corrientes, Datos Fuentes, Datos Cargas, Datos Potencia: Consisten en búsquedas especializadas en el archivo de salida de extensión .nec, con el objetivo de capturar información relacionada a un apartado en particular para ser procesada posteriormente por el programa, ya sea para su visualización o para el cálculo de parámetros adicionales.


**Figura 3.19:** Diagrama de bloques que describe la función captura de datos de fuentes.



**Figura 3.20:** Diagrama de bloques que describe la función captura de datos de cargas.



**Figura 3.21:** Diagrama de bloques que describe la función captura de datos de potencia.

 Función ROE: Consiste en un ejemplo de refinación de resultados obtenidos a partir de las funciones descritas en el apartado anterior; concretamente, aquellos relacionados a las fuentes del esquema de simulación (Parámetros de entrada de antenas).



Figura 3.22: Diagrama de bloques que describe la generación de ROE.

A partir de la información suministrada por la función de fuentes y haciendo uso de la clase para el manejo de números complejos (Complex.java) se obtiene el valor de la ROE para una serie de frecuencias definidas por el usuario, las cuales son posteriormente graficadas en función de los valores de frecuencia donde fueron capturados por el código lector de Java. El diagrama que describe el cálculo del valor de ROE para cada frecuencia es el siguiente:



Figura 3.23: Diagrama de bloques que describe el cálculo de ROE.

Para el entorno del laboratorio virtual, la generación de gráficos de ROE cuenta con dos cálculos adicionales, que ofrecen la automatización del proceso de encontrar y estimar el ancho de banda de una antena y la frecuencia de ROE mínima. Los diagramas se muestran a continuación:



**Figura 3.24:** Diagrama de bloques que describe el proceso de localización de frecuencia de mínima ROE.



**Figura 3.25:** Diagrama de bloques que describe el cálculo del ancho de banda al rededor de la frecuencia ROE de mínima.

Función Ver Antena: Esta funcionalidad no depende directamente de los valores obtenidos a través del archivo de salida OUTPUT.NEC sino de las variables de ámbito global relacionadas a la geometría de la antena; más concretamente, alambres, fuentes, cargas y líneas de transmisión; la información presente en cada una de ellas es representada en un esquema de alambres de acuerdo a los requerimientos del API de graficación JZY3D, más concretamente, de acuerdo a lo exigido por el constructor de la clase "CroppableLineStrip".



Figura 3.26: Diagrama de bloques que describe la visualización de las antenas.

 Función Patrón de Radiación: Se basa en la obtención de los datos contenidos en el apartado "Radiation Pattern" del código de salida NEC para mostrarlos en un esquema 2D o 3D según lo solicitado en el archivo de entrada; así mismo, de acuerdo a las características propias de los datos obtenidos, la función es capaz de deducir parámetros adicionales en el patrón de radiación y mostrarlos como parte de una salida gráfica.



**Figura 3.27:** Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radiación.



**Figura 3.28:** Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radiación.



**Figura 3.29:** Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radiación.



**Figura 3.30:** Diagrama de bloques que describe la generación de patrón de radiación.

El patrón de radiación en dos dimensiones se caracterizó numéricamente a partir del valor de la apertura de haz en grados, ganancia, máximo de radiación, lóbulos secundarios, relación Front to Back y Front to Side, para lo cual se realizó la programación de rutinas que utilizan los datos de patrón de radiación obtenidos en el archivo de salida de NEC2 en un barrido de ángulos configurados como se muestra en las figuras 3.28 y 3.29.

La apertura de haz devuelve el valor del intervalo angular al rededor del ángulo de potencia máxima, el cual es calculado como el ancho de haz entre los puntos de -3dB, es decir, donde la potencia de radiación es igual a la mitad de la potencia máxima radiada, el diagrama que describe el proceso se muestra a continuación:



**Figura 3.31:** Diagrama de bloques que describe el cálculo de la apertura de haz en un patrón de radiación bidimensional.

El valor del ángulo de máxima radiación se obtiene a partir de la rutina descrita en la figura 3.32, este valor es importante porque permite obtener los datos de potencia del patrón de radiación con el fin de obtener la relación Front to Back.



**Figura 3.32:** Diagrama de bloques que describe el proceso de obtención del valor de ángulo de máximo de radiación.

La ecuación para el cálculo de la relación Front to Back es la siguiente:

$$F/B(dB) = P_{\rho_{max}}(dBW) - P_{\rho_{max+180^{\circ}}}(dBW)$$
(3.1)

Donde

 $\begin{array}{lll} F/B(dB) &= & \mbox{Relación Front to Back en dB} \\ P_{\rho_{max}}(dBW) &= & \mbox{Potencia del máximo de radiación en dBW} \\ P_{\rho_{max-180^o}}(dBW) &= & \mbox{Potencia de radiación a 180 grados del máximo en dBW} \end{array}$ 

El valor del ángulo de los lóbulos secundarios se obtiene como lo describe la figura 3.33. Con esta función se puede localizar los lóbulos más relevantes después del máximo de radiación y permite conseguir los valores necesarios para el cálculo de la relación Front to Side.



**Figura 3.33:** Diagrama de bloques que describe el proceso de obtención del valor de ángulo de lóbulos secundarios.

La ecuación para el cálculo de la relación Front to Side es la siguiente:

$$F/S(dB) = P_{\rho_{max}}(dBW) - P_{\rho_{side}}(dBW)$$
(3.2)

Donde

 $\begin{array}{lll} F/B(dB) &= & Relación \ Front \ to \ Side \ en \ dB \\ P_{\rho_{max}}(dBW) &= & Potencia \ del \ máximo \ de \ radiación \ en \ dBW \\ P_{\rho_{side}}(dBW) &= & Potencia \ de \ radiación \ del \ lóbulo \ secundario \ en \ dBW \end{array}$ 

El cálculo de la ganancia de la antena se realizó a partir de la siguiente ecuación [12]:

$$G = \frac{4\pi * U}{P_{in}}$$
(3.3)

Donde

$$U = e/2\eta$$
$$e = E_{total}^{2}$$
$$\eta = 120\pi$$

P<sub>in</sub> = Potencia de entrada (obtenida en los datos del archivo de salida)

## 3.8.2. Módulo de Prácticas de Laboratorio

Para el diseño del módulo de prácticas de laboratorio se parte de una revisión sistemática de las prácticas de Laboratorio a partir de la bibliografía especializada [21] en dicho análisis se identifican los objetivos generales y específicos de la práctica, los cálculos requeridos en la misma, las funcionalidades del módulo de Simulación de Antenas necesarias para la obtención de tales parámetros y los puntos de mejora en la ejecución de la práctica, previos a la implementación de UCNEC.

Un primer punto de mejora identificado consiste en la necesidad de optimizar el acceso a los contenidos bibliográficos concernientes a la actividad que se va a ejecutar; en ese sentido se incluyen, en el apartado de selección de prácticas, enlaces directos a los documentos con el contenido teórico del módulo a desarrollar. La implementación de esta funcionalidad se lleva a cabo, desde Java, a través del uso de las librerías de IcePDF para la visualización de documentos PDF desde un entorno multiplataforma; de forma similar, se incluye un enlace para la visualización documental de los objetivos de la práctica a realizar.

## 3.8.2.1. Apartado I: Medición de Impedancia de Entrada de una Antena

Este laboratorio está constituido por 4 experimentos de características variables que están orientados a la deducción del efecto de la variación de algunos parámetros geométricos (longitud y diámetro de un dipolo de  $\lambda/2$ ) y de la influencia que tiene la presencia de otras antenas o del plano de tierra en el valor de la impedancia de las estructuras radiantes. Los objetivos de esta práctica se listan a continuación [21]:

- Verificar el comportamiento de la impedancia de entrada y relación de onda estacionaria (ROE) de una antena lineal cilíndrica tipo dipolo en función de la variación del diámetro de la misma.
- Verificar el comportamiento de la impedancia de entrada y relación de onda estacionaria (ROE) de una antena lineal cilíndrica tipo dipolo en función del acortamiento de su longitud para un diámetro constante.
- Determinar la impedancia de entrada de una antena en presencia de otra antena ubicada en la zona cercana, intermedia y lejana de la antena.
- Determinar la impedancia mutua entre una antena bajo prueba con otra ubicada en zona cercana, intermedia, lejana de ambas.
- Verificar la variación de la impedancia de entrada de una antena tomando en cuenta la tierra como medio conductor.

Para delimitar adecuadamente el espacio de trabajo de cada experimento, se decidió implementar, desde el código Java, el contenedor JTabbedPanel ya que proporciona una ventana con pestañas correspondientes a cada experimento. Las funcionalidades del módulo de Simulación de Antenas requeridas para la realización de los experimentos de la práctica I son:

- Experimento 1, funcionalidades requeridas:
  - Generación automática de geometría (Dipolo de  $\lambda/2$ )
  - Obtención de datos de fuente
  - Obtención de datos de ROE
- Experimento 2, funcionalidades requeridas:
  - Edición automática de geometría (Escalamiento)
  - Obtención de datos de fuente
  - Obtención de datos ROE
- Experimento 3, funcionalidades requeridas:
  - Edición automática de geometría (Traslación)
  - Obtención de datos de fuente
- Experimento 4, funcionalidades requeridas:
  - Edición automática de geometría (Traslación)
  - Obtención de datos de fuente

## 3.8.2.2. Apartado II: Medición de la Polarización de una Antena

Está constituido por un único experimento en el que se analiza, fundamentalmente, la variación del voltaje inducido en un dipolo como función de su orientación relativa con respecto a otra estructura radiante. La técnica de medición empleada en esta práctica es la denominada método del diagrama de polarización parcial, el cual consiste en realizar un sondeo de la tensión inducida por una antena a otra antena sonda (dipolo), girando la antena sonda hasta 180° en pasos de ángulo determinado, los valores de voltaje obtenidos serán suficiente para poder construir el diagrama de polarización. De éste último se deducirán parámetros como " $\tau$ " ángulo de orientación del eje mayor, o *tilt angle*) y "AR" razón axial (relación entre el eje mayor al menor). De estos dos parámetros se podrán deducir parámetros como :  $\alpha$  (magnitud relativa de la componente principal de polarización o componente copolar, CP),  $\alpha_{par}$  (componente relativa de la polarización parásita o cruzada , *cross polarization* o componente contrapolar XP) y la diferencia de fase entre las componentes de polarización principal y parásita " $\phi$ " [21]. Los objetivos de esta práctica se listan a continuación:

- Medir el patrón de polarización de una antena.
- Estimar parámetros del patrón de polarización como lo son: El ángulo de orientación del eje mayor "τ" y la razón axial "AR".
- Determinar magnitud relativa de la componente principal de polarización (α)
   y la componente de polarización cruzada (α<sub>par</sub>)

Las funcionalidades del módulo de Simulación de Antenas necesarias para la implementación se desglosan a continuación:

- Experimento 1, funcionalidades requeridas:
  - Edición automática de geometría (Rotación)
  - Obtención de datos de fuente

## 3.8.2.3. Apartado III: Medición del Diagrama de Radiación de una Antena

En su experimento único se requiere censar el valor del módulo de voltaje inducido en un dipolo por una antena bajo prueba, la cual es girada en su propio eje, el cual se ubica en el centro de fase de la misma, realizando así la medición de los diagramas de radiación de amplitud bidimensionales a través de la configuración de línea de vista fija. De los diagramas medidos, se determinará figuras de mérito tales como: Apertura de haz principal entre puntos de -3dB ( $\Theta_{3dB}$ ) o (B $W_{3dB}$ ), nivel de lóbulos secundarios, relación delante-atrás (F/B, Front to back ratio) y directividad aproximada para configuraciones altamente directivas [21]. Los objetivos de esta práctica son:

- Medir y graficar el patrón de radiación de configuraciones de antenas con distinta polarización en los planos E y H [22].
- Determinar los parámetros: Apertura del haz principal entre puntos de -3dB (Θ<sub>3dB</sub>) o (BW<sub>3dB</sub>), nivel de lóbulos secundarios, relación delante-atrás (F/B, Front to back ratio) y directividad aproximada para configuraciones altamente directivas.
- Experimento 1, funcionalidades requeridas:
  - Edición automática de geometría (Rotación)
  - Obtención de datos de fuente

## 3.8.2.4. Apartado IV: Medición de la Ganancia de una Antena

Está constituido por dos experimentos, en cada uno se aplica un método diferente para la obtención de la ganancia de los sistemas radiantes involucrados a partir del análisis de diferentes parámetros electromagnéticos censados. En el Experimento 1 se determinará la ganancia de una antena por el método de comparación (utilizando una antena de ganancia conocida) y en el Experimento 2 por el método de ganancia absoluta (utilizando tres antenas) [21]. Debido a las características particulares de este laboratorio, el módulo implementado se encarga de la automatización del cálculo de resultados a partir de los valores obtenidos a través del uso directo del módulo de Simulación de Antenas.

Los objetivos específicos de esta práctica son [21]:

Medir la ganancia de una antena por el método comparación.

- Medir la ganancia de una antena por el método de ganancia absoluta.
- Determinar la eficiencia de la antena bajo prueba.

Las funcionalidades requeridas para la ejecución de estos experimentos se detalla a continuación:

- Experimento 1, funcionalidades requeridas:
  - Obtención de datos de carga
  - Obtención de datos de fuente
- Experimento 2, funcionalidades requeridas:
  - Obtención de datos de carga
  - Obtención de datos de fuente

## 3.9. Diseño de Interfaz de Usuario

El propósito de la interfaz de usuario de UCNEC es proporcionar un medio intuitivo y funcional para la introducción, por parte del usuario, de los parámetros geométricos y electromagnéticos del esquema de desarrollo que será posteriormente traducido en diferentes cartas NEC, agrupadas en un documento de extensión .nec y procesadas así por el script NEC2++. En ese sentido, se establece un criterio de selección de componentes SWING de interfaz gráfica de Java que está fuertemente ligado a la carta que se está editando a través de una determinada ventana. A continuación se presenta un lista de características de interfaz de usuario y el componente utilizado:

 Valores numéricos sin rango (Enteros, Punto Flotante, etc): Se prefiere el uso del componente jFormattedTextField el cual es visualizado en pantalla como un cuadro de texto convencional; sin embargo, cuenta con la propiedad formatterFactory que permite definir, a nivel de diseño, el tipo de dato que se espera sea introducido en el componente, aplicando el formato requerido y limpiando el cuadro cuando se introducen valores inválidos (Por ejemplo, letras); en consecuencia, el uso de este componente en la interfaz de usuario para manejo de entradas numéricas proporciona una primera línea de validación de datos de entrada que permite reducir la cantidad de errores de procesamiento suscitados por el manejo erróneo de tipos de datos. Ejemplo de parámetros pertenecientes a esta categoría son las coordenadas X,Y,Z de los puntos inicial y final de un alambre y la amplitud de las fuentes.

- Valores numéricos definidos entre rangos (Enteros): En aquellos casos donde el parámetro de entrada consiste en un número entero comprendido entre un rango bien definido, o que varía de forma predecible, se emplean los componentes SWING jComboBox o lista desplegable, el código Java es capaz de reconocer el valor seleccionado en determinado jComboBox o bien su posición relativa al conjunto de valores contenidos en el mismo; de esta forma, es posible manipular de forma segura estos parámetros de entrada, toda vez que se asegura coherencia entre el tipo de dato numérico esperado por el algoritmo y el recibido. Ejemplo parámetros de cartas NEC donde sería pertinente el uso de jComboBox son el número de alambre donde se instala una carga o el tipo de fuente que se está creando o editando, vale la pena la mencionar que si bien este parámetro es desplegado como un carácter "V" e "I", tanto el código Java con la carta NEC de fuentes (EX) interpretan este parámetro como un valor numérico de tipo entero.
- Valores lógicos interdependientes (Booleanos): En no pocas ocasiones es requerido, durante la definición del esquema de simulación, escoger uno entre dos o más valores posibles para un determinado parámetro; en tales casos, preferiblemente cuando la cantidad de opciones es reducida, se recomienda el uso simultáneo de los componentes jRadioButton y jButtonGroup, el primero constituye un botón de opción que responde al clic del usuario y es interpretado como una selección de la alternativa enunciada en su etiqueta de texto mientras que el segundo es un control invisible al usuario que gestiona la selección de un único elemento entre todos los componentes jRadioButton

asociados a él. Entre las situaciones donde el uso de jRadioButton sería recomendable están la selección de un eje de rotación o del tipo de diagrama de radiación.

- Valores lógicos independientes (Booleanos): En otras circunstancias existen parámetros lógicos que pueden ser establecidos, según el criterio del usuario, sin ninguna incidencia en alguna otra opción, generalmente gestionan la activación de cierta característica o el uso opcional de algún parámetro, en estos casos se prefiere el empleo del jCheckBox o casilla de verificación. Ejemplo de uso de este componente son la definición y uso de la impedancia alternativa para el cálculo de la ROE y las opciones para visualizar o no el patrón de radiación durante las simulaciones iteradas de las prácticas de laboratorio.
- Valores relacionados de distinto tipo: Para la visualización de resultados que, aún relacionados a determinado experimento, no sean todos del mismo tipo, se recomienda el uso del componente jTable el cual consiste una tabla cuyos valores en fila y columna están definidos por diseño como objetos del tipo Object (Del cual descienden el resto de clases en Java) permitiendo manipularlos en forma conjunta sin incurrir en un error de tipos de datos erróneos. Los resultados de las prácticas de laboratorio son visualizados, en su gran mayoría, dentro de componentes del tipo jTable.
- Valores Alfanuméricos y de Etiquetado (Texto): Para el manejo de las etiquetas que introducen a algún otro componente o grupo de componentes o bien para la visualización de resultados que no serán modificados por el usuario, se utilizan componentes jLabel debidamente configurados para tal fin, constituyen uno de los elementos más utilizados a lo largo de la interfaz de usuario y al no requerir ningún tipo de validación, son bastante seguros en lo que respecta al manejo de las variables.
- Valores agrupados en listas: En aquellos casos donde se necesita visualizar o manipular un arreglo de objetos de una clase no primitiva (Por ejemplo, una clase definida en el programa para la representación de las fuentes) se decidió utilizar el componente jList o lista, el cual proporciona un comportamiento adecuado para el acceso eficiente y seguro a cada uno de los elementos que

conforman un arreglo de listas de determinada clase. Este componente es utilizado para la visualización y selección de los elementos que constituyen las listas de fuentes, cargas y líneas de transmisión almacenadas como variables de ámbito global.

Entrada de Valor Único: Existen circunstancias en las cuales se requiere la introducción de un valor numérico o textual único cuya simplicidad no justifica el diseño de toda una ventana para tal fin; en tales caso, se prefiere el uso del componente JOptionPane para solicitar al usuario la introducción, por medio del teclado, del valor de variable especificado. Al no contar con un método propio de validación, esta debe ser llevada a cabo por el programador, a fin de evitar errores por incongruencias en los tipos de datos. La introducción de los valores de frecuencia, longitud de onda y Z0 alternativa para el cálculo de ROE, se realizan a través de un JOptionPane.

## 3.9.1. Lienzo para la disposición de componentes

Una vez definidos los componentes que serán utilizados para el diseño de la interfaz de usuario en determinado módulo, se debe utilizar el componente JPanel como lienzo para la disposición espacial de los mismos. En Netbeans, este procedimiento se realiza de forma similar a la de otros lenguajes de programación como Visual Basic (Mediante arrastrar y soltar) generando el código fuente correspondiente y pudiéndose visualizar el resultado a medida que se va diseñando; no obstante, en otros entornos integrados de desarrollo como Eclipse, la creación y ordenamiento de componentes debe llevarse a cabo exclusivamente a través del código.

# Capítulo IV

# Análisis, interpretación y presentación de los resultados

En este capítulo se muestran las ventanas del programa UCNEC y la descripción de cada una de ellas. De igual forma, se analizan los resultados de la simulación de dos antenas seleccionadas para la comprobación del funcionamiento del programa y la medición de parámetros de antenas en el entorno del laboratorio virtual.

# 4.1. Ventana de inicio del programa

En la figura 4.1 se muestra la pantalla inicial del programa y el logo que lo identifica.

## 4.2. Interfaz del usuario

En esta sección se muestra el diseño de la interfaz del usuario y la descripción de sus botones, cajas de texto y menú.



Figura 4.1: Ventana de inicio del programa con el logo de UCNEC.

## 4.2.1. Ventana principal

La ventana principal aparece después de la pantalla de inicio del programa (figura 4.1), donde el usuario puede seleccionar el módulo con el cual estará interactuando y acceder a más información acerca del programa. La figura 4.2 muestra la disposición de la ventana principal.

En la pantalla se tienen los siguientes botones:

- El botón Simulación de Antenas: Éste botón provee el acceso a la ventana donde el usuario procede a modelar antenas, generar diagramas de radiación, gráfico del comportamiento de la ROE en función de la frecuencia y los parámetros electromagnéticos obtenidos a partir de la simulación.
- El botón Prácticas de Laboratorio: Acceso al entorno de laboratorio virtual, donde se realizan simulaciones y recolección de datos para los parámetros electromagnéticos estudiados en el Laboratorio de Antenas y Propagación.

- UCNEC C X
- El botón Acerca De: Ofrece acceso a la información acerca de UCNEC y la licencia de uso.

Figura 4.2: Ventana de principal de UCNEC.

# 4.3. Ventana de Simulación de Antenas

La ventana de Simulación de Antenas se divide en cuatro secciones como se muestra en la figura 4.3, la sección de acción, botones de selección, ventana de descripción y la barra de herramientas.

En el apartado de selección de una acción se listan las siguientes opciones:

- Abrir: Ofrece la función de abrir un archivo de extensión .nec para su posterior simulación.
- Guardar como: Guardar el archivo actual de extensión .nec con el nombre deseado por el usuario.

- Corrientes: Muestra la corriente presente en cada segmento de cada alambre de la antena expresada en parte real, imaginaria, magnitud y fase.
- Datos de fuentes: Muestra la amplitud de tensión real e imaginaria, la corriente real e imaginaria, la impedancia y admitancia y la potencia de la fuente.
- Datos de cargas: Muestra los datos de los valores para las cargas configuradas (si las hay), el tipo de configuración, la potencia consumida, el valor de la corriente y el voltaje.
- Datos de potencia: Se accede a la información de la potencia de entrada en la antena, potencia radiada, pérdida de la estructura, pérdida en la red y la eficiencia.
- ROE: Abre la ventana de ejecución del gráfico de la relación de onda estacionaria para una fuente determinada. En la figura 4.4 se muestran los datos necesarios para realizar la construcción de la gráfica, los cuales son la frecuencia inicial del barrido, frecuencia final, pasos de frecuencias, la impedancia característica alternativa para el sistema y el tipo de representación utilizada (veces o decibelios).
- Ver antena: Muestra en una gráfica 3D la antena diseñada.
- Patrón de Radiación: Muestra el diagrama de radiación producido por la antena, los datos de entrada necesarios para realizar esta gráfica se especificarán más adelante.

| Barra de Herramient | as |     |                           |                                |  |  |  |
|---------------------|----|-----|---------------------------|--------------------------------|--|--|--|
| ABRIR               | 1  | >   | Directorio                | ~\UCNECGUI.jar                 |  |  |  |
|                     | 2  | >   | Frecuencia (MHz)          | 14.2                           |  |  |  |
| GUADAR COMO         | 3  | >   | Longitud de Onda (m)      | 21.112144929577465             |  |  |  |
| CORRIENTES          | 4  | >   | Alambres                  | 55 alambre(s) , 95 segmento(s) |  |  |  |
| DATOS DE FUENTES    | 5  | >   | Fuentes                   | 1 fuente(s)                    |  |  |  |
|                     | 6  | >   | Cargas                    |                                |  |  |  |
| DATOS DE CARGAS     | 7  | >   | Líneas de Transmisión     |                                |  |  |  |
| DATOS DE POTENCIA   | 8  | >   | Tipo de Tierra            | Espacio Libre                  |  |  |  |
| ROE                 | 9  | >   | Pérdidas en el Alambre    | Sin Pérdidas                   |  |  |  |
|                     | 10 | >   | Unidades                  | Metros                         |  |  |  |
| VER ANTENA          | 11 | >   | Gráfica                   | Tridimensional (Veces)         |  |  |  |
| PATRÓN DE RADIACIÓN | 12 | > Z | Alternativo para SWR (Ohn | 0                              |  |  |  |
|                     |    |     |                           |                                |  |  |  |

Figura 4.3: Ventana de Simulación de Antenas.

| Archivo Descripción Lab | oratorio |                             |   |  |   |        |      |   |
|-------------------------|----------|-----------------------------|---|--|---|--------|------|---|
|                         | 👶 SWR    |                             |   | - 0  | × |        |      |   |
| ABRIR                   | _        |                             | ROE   |  |   |        |      |   |
| GUADAR COMO             | Fre      | ecuencia Inicial (MI        | łz)   | 10,00  |   |        |      |   |
| CORRIENTES              | Fr       | ecuencia Final (MH          | z)  | 500,00<br>2.5<br>1 ▼<br>20 alternativa<br>© Veces © dB |   |        |      | _ |
| DATOS DE FUENTES        |          | Paso (MHz)                  |   |  |   |        | <br> |   |
| DATOS DE CARGAS         |          | Fuente                      | 1   |  |   |        |      |   |
| DATOS DE POTENCIA       |          | Mostrar en                  | <ul> <li>Zu alterna</li> <li>Veces</li> </ul> |  |   |        |      |   |
| ROE                     |          |                             |   |  |   |        |      |   |
| VER ANTENA              | 10       | >                           | Unidades                                      | metros   |   |        |      |   |
|                         | 11       | 11 > Gráfica Tridimensional |   |  |   | Veces) |      |   |
| PATRÓN DE RADIACIÓN     | 12       | > Z0 /                      | Alternativo para SWR                          | (Ohm)  |   |        |      |   |

**Figura 4.4:** Ventana de parámetros de entrada para la construcción del gráfico de ROE.

La lista de botones de selección de una acción posee una enumeración a la izquierda cuya finalidad es la de indicar el procedimiento sistemático para la realización de la simulación de manera ordenada y guiada, dichos botones se describen a continuación:

 Directorio: Muestra el directorio actual del programa UCNEC, en la ventana de descripción puede verse el archivo. Al presionar el botón, se accede al explorador donde puede seleccionarse otra carpeta, como se muestra en figura 4.5.

| 🚓 UCNEC               |            |  |                      |               |           | _      |        | $\times$ |
|-----------------------|------------|--|----------------------|---------------|-----------|--------|--------|----------|
| Archivo Descripción I | aboratorio |  |                      |               |           |        |        |          |
|                       |            | 🕌 Abrir  |                      |               |           |        | ×      |          |
| ABRIR                 | 1          | Buscar en: 📑 Bibli   | iotecas              |               | • 6 2     |        | D<br>D |          |
| GUADAR COMO           | 2<br>3     | <ul> <li>Álbum de cámara</li> <li>Documentos</li> <li>Imágenes guarda</li> </ul> | a<br>adas            |               |           |        |        |          |
| CORRIENTES            | 4          | 📑 Imágenes<br>📑 Música   |                      |               |           |        |        |          |
| DATOS DE FUENTES      | 5          | C Videos   |                      |               |           |        |        |          |
| DATOS DE CARGAS       | 6<br>7     | Nombre de archivo:   |                      |               |           |        |        | _        |
| DATOS DE POTENCIA     | 8          | –<br>Archivos de <u>t</u> ipo:   | NEC Files            |               |           |        | •      |          |
| ROE                   | 9          |  |                      |               | Abrir     | Cancel | ar     |          |
| VER ANTENA            | 10         | >  | Unidades             | Metros        |           |        |        |          |
| PATRÓN DE RADIACIÓN   | 11         | > 70 Altor   | Gráfica              | Tridimensiona | I (Veces) |        |        |          |
|                       | 12         | 20 Alter   | nauvo para SVVR (Onn | )             |           |        |        |          |

Figura 4.5: Explorador de archivos del Directorio.

Frecuencia (MHz): Abre la ventana de configuración de la frecuencia de operación para las fuentes y la simulación en general. En la figura 4.6 se muestra la ventana auxiliar para la introducción del parámetro, el cual posee una unidad fija en MHz.



**Figura 4.6:** Ventana auxiliar para la introducción del parámetro de frecuencia de simulación en MHz.

 Longitud de Onda (m): Abre una ventana auxiliar similar a la ventana de frecuencia y cumple la misma función que ésta. El dato introducido en la caja de texto de longitud de onda en unidades de metros, influye directamente en el valor de la frecuencia y viceversa. La figura 4.7 muestra la ventana auxiliar.



**Figura 4.7:** Ventana auxiliar para la introducción del parámetro de longitud de onda en metros.

 Alambres: Este botón permite el acceso a la ventana dedicada a la generación de alambres que constituirán la antena, la figura 4.8 muestra la ventana de geometría. Esta ventana será analizada con más detalle posteriormente en este capítulo.

| Generador de Figuras |                    |                  |                |                  | Transformación de Coordenadas |                |                |      |   |  |  |
|----------------------|--------------------|------------------|----------------|------------------|-------------------------------|----------------|----------------|------|---|--|--|
|                      | Gen                | erador de rigura | 13             |                  |                               | Tansformación  | de coordenadas |      |   |  |  |
| Nro                  | X1 (m)             | Y1 (m)           | 71 (m)         | X2 (m)           | Y2 (m)                        | 72 (m)         | Diámetro (mm)  | Seas |   |  |  |
|                      | -1.8288            | -1 2192          | 0.0            | -1.8288          | 1 2192                        | 0.0            | 31.75          | 3    | _ |  |  |
| ,<br>)               | -1.8288            | 1 2192           | 0.0            | -1.8288          | 1 8288                        | 0.0            | 25.4           | 1    |   |  |  |
|                      | -1.8288            | 1.8288           | 0.0            | -1.8288          | 2.3368                        | 0.0            | 22.225         | 1    |   |  |  |
|                      | -1.8288            | 2.3368           | 0.0            | -1.8288          | 3,4036                        | 0.0            | 19.05          | 2    | _ |  |  |
|                      | -1.8288            | 3,4036           | 0.0            | -1.8288          | 3.9116                        | 0.0            | 15.875         | 1    | _ |  |  |
|                      | -1.8288            | -1.2192          | 0.0            | -1.8288          | -1.8288                       | 0.0            | 25.4           | 1    |   |  |  |
|                      | -1.8288            | -1.8288          | 0.0            | -1.8288          | -2.3368                       | 0.0            | 22.225         | 1    |   |  |  |
|                      | -1.8288            | -2.3368          | 0.0            | -1.8288          | -3.4036                       | 0.0            | 19.05          | 2    |   |  |  |
| )                    | -1.8288            | -3.4036          | 0.0            | -1.8288          | -3.9116                       | 0.0            | 15.875         | 1    |   |  |  |
| 0                    | -1.8288            | 3.9116           | 0.0            | -1.8288          | 5.648325                      | 0.0            | 12.7           | 3    |   |  |  |
| 1                    | -1.8288            | -3.9116          | 0.0            | -1.8288          | -5.648325                     | 0.0            | 12.7           | 3    |   |  |  |
| 2                    | 0.0                | -1.2192          | 0.0            | 0.0              | 1.2192                        | 0.0            | 31.75          | 3    |   |  |  |
| 3                    | 0.0                | 1.2192           | 0.0            | 0.0              | 1.8288                        | 0.0            | 25.4           | 1    |   |  |  |
| 4                    | 0.0                | 1.8288           | 0.0            | 0.0              | 2.3368                        | 0.0            | 22.225         | 1    | _ |  |  |
| 5                    | 0.0                | 2.3368           | 0.0            | 0.0              | 3.4036                        | 0.0            | 19.05          | 2    | _ |  |  |
| 6                    | 0.0                | 3.4036           | 0.0            | 0.0              | 3.9116                        | 0.0            | 15.875         | 1    |   |  |  |
| 7                    | 0.0                | -1.2192          | 0.0            | 0.0              | -1.8288                       | 0.0            | 25.4           | 1    | _ |  |  |
| 8                    | 0.0                | -1.8288          | 0.0            | 0.0              | -2.3368                       | 0.0            | 22.225         | 1    | _ |  |  |
| 9                    | 0.0                | -2.3368          | 0.0            | 0.0              | -3.4036                       | 0.0            | 19.05          | 2    |   |  |  |
| 0                    | 0.0                | -3.4036          | 0.0            | 0.0              | -3.9116                       | 0.0            | 15.875         | 1    | _ |  |  |
| 1                    | 0.0                | 3.9116           | 0.0            | 0.0              | 5.2705                        | 0.0            | 12.7           | 3    |   |  |  |
| 2                    | 0.0                | -3.9116          | 0.0            | 0.0              | -5.2705                       | 0.0            | 12.7           | 3    |   |  |  |
| 3                    | 1.8288             | -1.2192          | 0.0            | 1.8288           | 1.2192                        | 0.0            | 31.75          | 3    |   |  |  |
| 24                   | 1.8288             | 1.2192           | 0.0            | 1.8288           | 1.8288                        | 0.0            | 25.4           | 1    |   |  |  |
| !5                   | 1.8288             | 1.8288           | 0.0            | 1.8288           | 2.3368                        | 0.0            | 22.225         | 1    |   |  |  |
| 26                   | 1.8288             | 2.3368           | 0.0            | 1.8288           | 3.4036                        | 0.0            | 19.05          | 2    |   |  |  |
| 7                    | 1.8288             | 3.4036           | 0.0            | 1.8288           | 3.9116                        | 0.0            | 15.875         | 1    | _ |  |  |
| 8                    | 1.8288             | -1.2192          | 0.0            | 1.8288           | -1.8288                       | 0.0            | 25.4           | 1    | _ |  |  |
| 9                    | 1.8288             | -1.8288          | 0.0            | 1.8288           | -2.3368                       | 0.0            | 22.225         | 1    | _ |  |  |
| 0                    | 1.8288             | -2.3368          | 0.0            | 1.8288           | -3.4036                       | 0.0            | 19.05          | 2    | _ |  |  |
| 1                    | 1.8288             | -3.4036          | 0.0            | 1.8288           | -3.9116                       | 0.0            | 15.875         | 1    | _ |  |  |
| 2                    | 1.8288             | 3.9116           | 0.0            | 1.8288           | 5.2197                        | 0.0            | 12.7           | 3    |   |  |  |
| 3                    | 1.8288             | -3.9116          | 0.0            | 1.8288           | -5.2197                       | 0.0            | 12.7           | 3    |   |  |  |
|                      | C 0004             | 4.0400           | 0.0            | C 0004           | 4.0400                        | 0.0            | 04.75          | 2    |   |  |  |
|                      |                    |                  |                |                  |                               |                |                |      | Ľ |  |  |
| Informació           | n del Alambre      | 1 🔻 Alambre      | número: 1   Lo | ngitud: 2.4384 m | Diámetro: 31                  | .75 mm   Razón | L/D: 76.8      |      |   |  |  |
|                      | 4. <i>4</i> - 41 - |                  | -              | <b>F</b> 12      |                               | -              | 0.7            |      |   |  |  |

Figura 4.8: Ventana de generación de alambres.

Fuentes: En este botón se accede a la ventana de configuración de fuentes. La figura 4.9 muestra tres botones inferiores que sirven para agregar, editar o quitar una fuente, a su vez, en la parte derecha se muestran los detalles de ubicación de la fuente en un alambre determinado, detalle del segmento al cual fue posicionada, su amplitud, fase y tipo de fuente que puede ser seleccionada entre una fuente de voltaje o una fuente de corriente. Es importante destacar que la implementación de fuente de corriente ocasionará la creación de un alambre extra, con el fin de poder obtener los resultados correctos.


Figura 4.9: Ventana de configuración de fuentes.

Cargas: Esta ventana consta de dos secciones de configuración de cargas como se muestra en las figuras 4.10 y 4.11, la primera denominada R+jX determina una carga introduciendo valores en ohmios de su componente real y su componente imaginaria, la ventana de RLC determina una carga en base a elementos concentrados, esto es, capacitancia, inductancia y resistencia. La posición de la carga se configura de la misma forma que en la ventana de fuentes.

| rchivo Descripción La | aboratorio   |            |                     |         |                |          |   |       |
|-----------------------|--------------|------------|---------------------|---------|----------------|----------|---|-------|
|                       |              |            |                     |         |                |          |   |       |
| ABRIR                 | 1            | >          | Director            | io      |                | CGUI.jar |   |       |
|                       | 🚓 Cargas     |            | 1                   |         |                | – 🗆 X    |   |       |
| GUADAR COMO           |              |            | Car                 | gas     |                |          |   |       |
| CORRIENTES            | Nro Ala      | umbre 1    | •                   |         |                |          |   |       |
|                       | % de         | E1         |                     |         |                |          | - | _     |
| DATOS DE FUENTES      | Segm         | ento       |                     |         |                |          |   |       |
| DATOS DE CARGAS       | R (O<br>X (O | hm)<br>hm) |                     |         |                |          | L |       |
|                       |              | Agrega     | ır                  | Edita   | ar             | Quitar   |   |       |
| DATOS DE POTENCIA     | R+jX         | RLC        |                     |         |                |          |   |       |
| ROE                   | 9            | >          | Pérdidas en el      | Alambre | Sin Pérd       | idas     |   |       |
|                       | 10           | >          | Unidades            |         | Metros         |          |   |       |
| VER ANTENA            | 11           | >          | Gráfica Tridimensio |         | sional (Veces) |          | _ |       |
| PATRÓN DE RADIACIÓN   | 40           |            |                     |         |                |          |   | <br>- |

**Figura 4.10:** Ventana de configuración de cargas del tipo R+jX.

| rchivo Descripción La | aboratorio          |                  |                     |            |          |                |   |   |
|-----------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------|----------|----------------|---|---|
|                       |                     |                  |                     |            |          |                |   |   |
| ABRIR                 | 1                   | >                | Directo             | rio        |          | CGUI.jar       |   |   |
| GUADAR COMO           | 🚓 Cargas            |                  |                     |            |          | – 🗆 X          |   |   |
|                       |                     |                  | Car                 | gas        |          |                |   |   |
| CORRIENTES            | Nro Ala<br>% de     | ambre 1<br>e E1  | •                   |            |          |                |   |   |
| DATOS DE FUENTES      | Segm<br>R (O        | Segmento R (Ohm) |                     |            |          |                |   |   |
| DATOS DE CARGAS       | С ()<br>С ()<br>Тір | DF) S            | erie 💌              |            |          |                | - |   |
| DATOS DE DOTENCIA     |                     | Agreg            | ar                  | Edita      | ar       | Quitar         | - | _ |
| DATOS DE POTENCIA     | R+jX                | RLC              |                     |            |          |                |   |   |
| ROE                   | 9                   | >                | Pérdidas en el      | Alambre    | Sin Pérd | idas           |   |   |
|                       | 10                  | >                | Unidades            |            | Metros   |                |   |   |
| VERANTENA             | 11                  | >                | Gráfica Tridim      |            | Tridimen | sional (Veces) |   |   |
| PATRÓN DE RADIACIÓN   | 12                  | >                | Z0 Alternativo para | a SWR (Ohm | )        |                |   |   |

Figura 4.11: Ventana de configuración de cargas del tipo RLC.

 Líneas de transmisión: Acceso a la opción de añadir líneas de transmisión a la estructura, donde se especifican los dos alambres en un segmento determinado, que serán interconectados por la aplicación de una línea de transmisión. De igual forma, la ventana exhibe las cajas de texto dedicadas para la configuración de la impedancia característica de la línea y su longitud.

| 🚓 UCNEC             |             |        |                    |                 |            |          |        |   | — | $\times$ |
|---------------------|-------------|--------|--------------------|-----------------|------------|----------|--------|---|---|----------|
| Archivo Descripción | Laboratorio |        |                    |                 |            |          |        |   |   |          |
|                     | 🚓 Líneas TX |        |                    |                 |            | -        |        | × |   |          |
|                     |             |        | Líne               | as TX           |            |          |        |   |   |          |
| ABRIR               | Nro Alami   | bre 1  | -                  |                 |            |          |        |   |   |          |
|                     | % de E1     |        |                    |                 |            |          |        |   |   |          |
| GUADAR COMO         | Segment     | to     |                    |                 |            |          |        |   | - |          |
|                     | Nro Alamb   | re 2 1 |                    |                 |            |          |        |   | _ |          |
| CORRIENTES          | % de E1     |        |                    |                 |            |          |        |   |   |          |
|                     | Segment     | to     |                    |                 |            |          |        |   |   |          |
| DATUS DE FUENTES    | ZO          |        |                    |                 |            |          |        |   | - | <br>     |
| DATOS DE CARGAS     | Longitud (  | (m)    |                    |                 |            |          |        |   | _ |          |
|                     | Re Y Shur   | nt 1   |                    |                 |            |          |        |   |   |          |
| DATOS DE POTENCIA   | lm Y Shun   | it 1   |                    |                 |            |          |        |   |   |          |
|                     | Re Y Shur   | nt 2   |                    |                 |            |          |        |   | - |          |
| ROE                 | lm Y Shun   | it 2   |                    |                 |            |          |        |   | _ |          |
|                     |             | Agrega | ır                 | Edit            | ar         |          | Quitar |   |   |          |
| VER ANTENA          | 11          | >      | Gráfic             | a               | Tridimensi | onal (Ve | eces)  |   |   |          |
| PATRÓN DE RADIACIÓI | 12          |        | 70 Alternativo par | a SM/R (Ohm)    |            |          |        |   |   |          |
|                     | 12          | -      | 20 Alternativo par | a swit (Olilli) |            |          |        |   |   |          |

Figura 4.12: Ventana de configuración de líneas de transmisión.

• Tipo de Tierra: Este botón permite acceder a la ventana auxiliar de configuración del plano de tierra ubicado en z = 0. El usuario tiene como opciones la colocación de un conductor perfecto (PEC) o establecer una tierra a partir de los parámetros de conductividad y constante dieléctrica. La opción alternativa a estas dos modalidades es la simulación en espacio libre. La ventana se muestra en la figura 4.13. Cuando un plano de tierra está configurado, la geometría de la antena debe estar por encima del plano XY, esto es, a una altura mayor a cero, esto implica que las componentes en z de cada alambre deben estar por encima de éste valor, no pudiendo ser colocadas en el mismo plano de tierra o por debajo de él (valores negativos de z).

| rchivo Descripción La | aboratorio |     |                                |                        |   |
|-----------------------|------------|-----|--------------------------------|------------------------|---|
|                       |            |     |                                |                        |   |
| ABRIR                 | 1          | >   | Directorio                     | ~\UCNECGUI.jar         |   |
|                       | 2          | >   | Frecuencia (MHz)               | 14.2                   |   |
| GUADAR COMO           | 3          | > 👶 | Tipo de Tierra                 | – 🗆 X                  |   |
| CORRIENTES            | 4          | >   | Espacio Libre                  | PEC      Real          |   |
|                       | 5          | >   | Conductividad (S/M)            |                        |   |
| DATOS DE FUENTES      |            |     | Const. Dieléctrica             |                        |   |
| DATOS DE CARGAS       | 6          | >   | Aceptar                        | Cancelar               | _ |
|                       | 7          | >   |                                |                        |   |
| DATOS DE POTENCIA     | 8          | >   | Tipo de Tierra                 | Espacio Libre          |   |
| ROE                   | 9          | >   | Pérdidas en el Alambre         | Sin Pérdidas           |   |
|                       | 10         | >   | Unidades                       | Metros                 |   |
| VER ANTENA            | 11         | >   | Gráfica                        | Tridimensional (Veces) |   |
| ATRÓN DE RADIACIÓN    | 40         |     | 70 Alternative para SIMD (Ohm) |                        |   |

Figura 4.13: Ventana de configuración del plano de tierra.

 Unidades: Este botón da acceso a la modificación de las unidades de longitud en la simulación, las opciones disponibles se muestran en la figura 4.14. Las unidades influyen sólo en la generación de alambres.

| 🖧 UCNEC               |            |               |                   |              |                   |           | _ | $\times$ |
|-----------------------|------------|---------------|-------------------|--------------|-------------------|-----------|---|----------|
| Archivo Descripción L | aboratorio |               |                   |              |                   |           |   |          |
|                       |            |               |                   |              |                   |           |   |          |
|                       |            |               |                   |              |                   |           |   |          |
| ABRIR                 | 1          | >             | Direct            | orio         | ~\UCNECGUI.jar    |           |   |          |
|                       | 2          | >             | Frecuenci         | ia (MHz)     | 14.2              |           |   |          |
| GUADAR COMO           | 🚓 Un       | idades        |                   |              | ×                 | < .       |   |          |
| CODDIENTER            | Me         | tros          |                   | O Milímetros | 3                 |           |   | <br>     |
| CORRIENTES            | O Pie      | s             |                   | Pulgadas     |                   | gmento(s) |   |          |
| DATOS DE FUENTES      | O LOI      | ngitud de Ond | a                 |              |                   |           |   |          |
|                       |            |               | _                 |              |                   |           |   |          |
| DATOS DE CARGAS       |            | Acept         | ar                |              | Cancelar          |           |   |          |
|                       | _          |               |                   |              |                   |           |   |          |
| DATOS DE POTENCIA     | 8          | >             | Tipo de           | Tierra       | Espacio Libre     |           |   |          |
| ROE                   | 9          | >             | Pérdidas en       | el Alambre   | Sin Pérdidas      |           |   |          |
|                       | 10         | >             | Unida             | des          | Metros            |           |   |          |
| VER ANTENA            | 11         |               | Gráfi             | ica          | Tridimensional (V | (2020     |   |          |
|                       |            |               | . Jan             | icu          | rindimensional (v | 66637     |   |          |
| PATRON DE RADIACIÓN   | 12         | >             | Z0 Alternativo pa | ira SWR (Ohn | 1)                |           |   |          |
|                       |            |               |                   |              |                   |           |   |          |

Figura 4.14: Ventana de configuración de unidades.

Gráfica: Esta ventana tiene como finalidad la introducción de los datos de configuración para la generación de la gráfica de patrón de radiación, para ello se tienen tres opciones: Patrón de radiación en 2D en azimuth con ángulo de elevación constante, patrón de radiación en 2D de elevación con ángulo azimutal constante y patrón de radiación en 3D. Las opciones de ángulos constante sólo están disponibles para la gráfica en dos dimensiones y asigna el valor constante de ángulo de θ o φ según sea el caso. En las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se observan las opciones de la ventana.

| chivo Descripción La | boratorio |                  |                     |          |              |       |         |      |
|----------------------|-----------|------------------|---------------------|----------|--------------|-------|---------|------|
|                      |           |                  |                     |          |              |       |         |      |
|                      |           |                  |                     |          |              |       |         |      |
| ABRIR                | 1         | 🚓 Patrón de Radi | ación               | _        |              | ×     |         |      |
|                      | 2         |                  | Azimut              | th       |              |       |         |      |
| GUADAR COMO          | 3         | Tipo de Gráfica  | Elevac              | ión      |              |       |         |      |
| CORRIENTES           | 4         |                  | ) 3D                |          |              |       | ento(s) |      |
|                      |           | Angulo de        | Elevación           |          | Grados       |       |         | <br> |
| ATOS DE FUENTES      | 5         |                  |                     |          |              |       | _       |      |
| ATOS DE CARGAS       | 6         | Paso             | 1                   |          | Grados       |       |         |      |
|                      | 7         |                  |                     |          |              |       |         |      |
| ATOS DE POTENCIA     | 8         |                  |                     |          |              |       |         |      |
| ROE                  | 9         | Ace              | ptar                | Ca       | ncelar       |       |         |      |
|                      | 10        | >                | Unidades            | Metro    | S            |       |         |      |
| VER ANTENA           | 11        | >                | Gráfica             | Tridin   | nensional (V | eces) |         |      |
| TRÓN DE RADIACIÓN    | 42        | > 70             | Alternative para Cl | MB (Ohm) |              |       |         | _    |

**Figura 4.15:** Ventana de configuración para el patrón de radiación en 2D para elevación.



**Figura 4.16:** Ventana de configuración para el patrón de radiación en 2D para azimuth.

| rchivo Descripción La | boratorio    |                |  |            |                |               |      |
|-----------------------|--------------|----------------|--|------------|----------------|---------------|------|
| ABRIR                 | 4<br>🚓 Patró | n de Radiación | Diractori                                      |            |                |               |      |
| GUADAR COMO           | Tipo de G    | ráfica         | <ul> <li>Azimuth</li> <li>Elevación</li> </ul> |            | ,              | 7465          |      |
| CORRIENTES            |              |                | ③ 3D   |            | )              | 5 segmento(s) |      |
| DATOS DE FUENTES      |              |                |  |            |                |               |      |
| DATOS DE CARGAS       | Pa           | aso            | 5  | G          | rados          | -             | <br> |
| DATOS DE POTENCIA     |              |                |  |            |                | -             | <br> |
| ROE                   |              | Aceptar        |  | Cancela    | ,              |               |      |
|                       | 10           | >              | Unidade  | s Me       | tros           |               |      |
| VER ANTENA            | 11           | >              | Gráfica  | Tri        | dimensional (\ | /eces)        |      |
| ATRÓN DE RADIACIÓN    | 42           |                | 70 Alternative para                            | SIMP (Ohm) |                |               |      |

Figura 4.17: Ventana de configuración para el patrón de radiación en 3D.

 Z0 Alternativo para SWR (Ohm): Configura una impedancia alternativa para la realización de la gráfica de ROE. La impedancia característica predeter-

| Archivo Descripción La | aboratorio |            |                                 |                        |
|------------------------|------------|------------|---------------------------------|------------------------|
|                        |            |            |                                 |                        |
|                        |            |            | 1                               |                        |
| ABRIR                  | 1          | >          | Directorio                      | ~\UCNECGUI.jar         |
|                        | 2          | >          | Frecuencia (MHz)                | 14.2                   |
| GUADAR COMO            | 3          | >          | Longitud de Onda (m)            | 21.112144929577465     |
| CORRIENTES             | Entrada    |            |                                 | × segmento(s)          |
| DATOS DE FUENTES       | ?          | Introduzca | un valor alternativo de Z0 para | el cálculo del ROE     |
| DATOS DE CARGAS        |            |            | Aceptar Cancelar                |                        |
| DATOS DE POTENCIA      | 8          | >          | Tipo de Tierra                  | Espacio Libre          |
| ROE                    | 9          | >          | Pérdidas en el Alambre          | Sin Pérdidas           |
|                        | 10         | >          | Unidades                        | Metros                 |
| VER ANTENA             | 11         | >          | Gráfica                         | Tridimensional (Veces) |
| PATRÓN DE RADIACIÓN    | 12         | >          | 70 Alternativo para SWR (Ohm    |                        |

minada es de  $50\Omega$  y en esta sección se puede ajustar una diferente. Véase la figura 4.18.



La ventana principal de Simulación de Antenas cuenta con una barra de herramientas donde se tienen tres menús alternativos descritos a continuación:

- Archivo: Este menú desplegable muestra las opciones de abrir un archivo, guardar archivo, exportar un archivo como código QR (véase la figura 4.19) y salir del programa.
- Descripción: Abre la opción de importar una descripción de un archivo .nec para montarlo en el archivo actual.
- Laboratorio: Acceso directo a las prácticas del laboratorio virtual.



Figura 4.19: Código QR generado por UCNEC.

#### 4.3.1. Descripción de la ventana de generación de alambres

La ventana de alambres (figura 4.8) permite la creación de una antena a partir alambres rectos que son determinados a través de la especificación de las coordenadas de sus extremos, el diámetro de los mismos y la segmentación utilizada, esta última característica es importante debido a que de ella depende una correcta simulación y obtención de los parámetros electromagnéticos.

Para insertar un alambre se debe seleccionar la opción de añadir, luego de esto aparece la ventana mostrada en la figura 4.20, especificar las coordenadas del punto inicial y punto final, su diámetro y especificar número de segmentos o autosegmentar para elegir la segmentación más apropiada.

| 🚓 Añadir Alambre |           | — |            | $\times$ |
|------------------|-----------|---|------------|----------|
|                  | Geometría |   |            |          |
| Punto Inicial    |           |   |            |          |
| X1               |           |   | Metros     |          |
| Y1               |           |   | Metros     |          |
| Z1               |           |   | Metros     |          |
| Punto Final      |           |   |            |          |
| X2               |           |   | Metros     |          |
| Y2               |           |   | Metros     |          |
| Z2               |           |   | Metros     |          |
| Alambre          |           |   |            |          |
| Diámetro         |           | I | Milímetros |          |
| Segs             | Auto      |   | Unidades   |          |
|                  | Agregar   |   |            |          |

Figura 4.20: Ventana de generación de alambre.

La creación de alambres también puede realizarse a partir de las herramientas de Generador de Figuras, donde se exhiben tres opciones para la generación de figuras:

- Circunferencia: Esta sección tiene la funcionalidad de generar una circunferencia a partir de segmentos rectos de alambres (véase la figura 4.21), especificando las características necesarias para tal fin. Los datos necesarios para la realización de una circunferencia son los siguientes:
  - Plano: Se debe seleccionar uno de los tres planos posibles, éste contendrá la circunferencia que se desea realizar, las opciones posibles son el plano XY, YZ y XZ.
  - Centro: Especifica el centro de la circunferencia, para ello se introduce el valor de las coordenadas en un sistema cartesiano.
  - Radio: Determina el radio de la circunferencia.
  - Alambres: Especifica el número de alambres multiplicado por 2 que poseerá la circunferencia. A mayor número de alambres la figura será más cercana a una circunferencia real. El valor mínimo que puede ser seleccionado es 4 y el máximo 500.
  - Diámetro: Especifica el diámetro de cada alambre.

- Dibujar radios: Provee la opción de dibujar alambres desde el centro hasta cada extremo de cada alambre, esta opción viene sin seleccionar por defecto.
- Arco: Permite generar un arco a partir de segmentos rectos de alambres, similar a la generación de circunferencias, sin la posibilidad de graficar las líneas de radio. La cantidad máxima de alambres usados es de 500 y la mínima de 4. Véase la figura 4.22
- Dipolo Lambda/2: Es la opción que posee el programa para generar un dipolo de λ/2 a partir de las siguientes especificaciones:
  - Centro: Especifica las coordenadas del centro del dipolo (véase la figura 4.23), esto es, la mitad del alambre, determinando la posición en el espacio.
  - L/D: Indica la relación que existe entre la longitud del dipolo y el diámetro del filamento del mismo.
  - Segmentos: Define la segmentación del alambre.
  - Ejes: Define la orientación del alambre, ya sea paralelo al eje X, Y o Z.

La disposición de los controles se muestran en la figura 4.23.

| 🚓 UCNEC  |         |                    | -        |   | × |  |  |
|--|---------|--------------------|----------|---|---|--|--|
|  | Gene    | eración de Figuras |          |   |   |  |  |
| C(A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> ) |         |                    |          |   |   |  |  |
|  | Plano ( | XY 0 YZ 0.2        | ٨Z       |   |   |  |  |
|  | Centro  |                    | X, Y, Z] |   |   |  |  |
|  | Rad     | io Metros          |          |   |   |  |  |
| Ala  | mbres   | 4 – Diámetro       | m        | m |   |  |  |
|  |         | Dibujar radios     |          |   |   |  |  |
|  |         | Aceptar            |          |   |   |  |  |
| Cincurferencia                                       | Aree    | Dipolo Lambda/2    | 1        |   |   |  |  |

Figura 4.21: Generación de Figuras: Circunferencia.

| 🚓 UCNEC     | – 🗆 🗙  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
|             | Generación de Figuras                                |  |  |  |  |  |  |  |
|             | C(A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> ) |  |  |  |  |  |  |  |
|             | Plano 🖲 XY 🔘 YZ 🔘 XZ                                 |  |  |  |  |  |  |  |
|             | Centro [X, Y, Z]                                     |  |  |  |  |  |  |  |
|             | Radio Metros   |  |  |  |  |  |  |  |
|             | Alambres 4 Diámetro mm                               |  |  |  |  |  |  |  |
|             | Aceptar  |  |  |  |  |  |  |  |
| Circunferer | ncia Arco Dipolo Lambda/2                            |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 4.22: Generación de Figuras: Arco.

| 👶 UCNEC               |                    | – 🗆 X    |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|--------------------|----------|--|--|--|--|--|--|
| Generación de Figuras |                    |          |  |  |  |  |  |  |
| Lamb                  | da/2 C(x,y,        | z)       |  |  |  |  |  |  |
| Centro                |                    | Metros   |  |  |  |  |  |  |
| Y                     |                    | Metros   |  |  |  |  |  |  |
| z                     |                    | Metros   |  |  |  |  |  |  |
| L/D                   |                    |          |  |  |  |  |  |  |
| Segmentos             |                    | Unidades |  |  |  |  |  |  |
| Eje                   | ®x ○y ○z           |          |  |  |  |  |  |  |
| Aceptar               |                    |          |  |  |  |  |  |  |
| Circunferencia Ar     | co Dipolo Lambda/2 |          |  |  |  |  |  |  |

**Figura 4.23:** Generación de Figuras: Dipolo de  $\lambda/2$ .

## 4.4. Ventana de Prácticas de laboratorio

El módulo de las Prácticas de Laboratorio ofrece las herramientas necesarias para llevar a cabo cada una de las prácticas virtuales establecidas en la asignatura de Antenas y Propagación [21]. En la ventana principal de esta sección se encuentran distribuidos cada uno de los experimentos y mediciones a realizar, con un manual teórico que se ofrece en formato de documento PDF, donde el usuario puede acceder al estudio de los métodos de medición de los diferentes parámetros electromagnéticos que se requieran realizar. Cada práctica del laboratorio cuenta además con un resumen de los objetivos a cumplir, de esta forma se orienta al usuario de manera introductoria acerca de los experimentos que realizará.

En la figura 4.24 se muestra la distribución de botones de acceso a las diferentes prácticas de laboratorio.

| llador Ayuda       |                                 |                |                            |
|--------------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|
| MEDICIÓN DE IMPED  | ANCIA DE ENTRADA DE UNA ANTENA  | MEDICIÓN DE LA | POLARIZACIÓN DE UNA ANTENA |
| OBJETIVOS          |                                 | OBJETIVOS      |                            |
| TEORÍA             | ACCEDER                         | TEORÍA         | ACCEDER                    |
| MEDICIÓN DEL DIAGR | RAMA DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA | MEDICIÓN DE    | LA GANANCIA DE UNA ANTENA  |
| OBJETIVOS          |                                 | OBJETIVOS      |                            |
| TEORÍA             | ACCEDER                         | TEORÍA         | ACCEDER                    |

Figura 4.24: Ventana principal de las Prácticas de Laboratorio.

Esta ventana cuenta con las siguientes características:

- Los títulos de las prácticas con su respectivo acceso.
- Introducción a las prácticas mediante el documento de los objetivos a cumplir.
- El material teórico necesario para cada práctica en particular.
- Acceso directo al Simulador de Antenas.
- Acceso al manual de ayuda para cada experimento.

## 4.4.1. Laboratorio 1: Medición de la ganancia de una antena

Esta práctica se divide en cuatro experimentos en los cuales se realiza la medición de la impedancia de una antena en diferentes casos, como se describe a continuación: Experimento 1: Se realiza la medición de la impedancia de un dipolo en base a la modificación de su diámetro a partir de una relación L/D (longitud/diámetro), en la ventana de esta sección se encuentra la opción de modificar la relación antes mencionada y la de mostrar la antena simulada. Con la opción de Agregar Resultado, el usuario guardará de manera automática los valores de L/D, Diámetro del dipolo, Frecuencia, Za (impedancia de la antena), ROE en la frecuencia de diseño y Ancho de banda después de realizar la ejecución del ROE en la ventana de simulación presionando la opción Añadir Resultados. El usuario también podrá eliminar resultados si lo desea con el uso del botón Eliminar Resultado y exportarlos con Exportar Resultados donde generará un archivo de texto con los datos obtenidos. La ventana se muestra en la figura 4.25.

| 🚓 Laboratorio 1: MEDICIÓN DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DE U                          | NA ANTENA                  |                       |           |              | ×        |
|--|----------------------------|-----------------------|-----------|--------------|----------|
| Instrucciones  |                            | ir ai                 | Simulador |              |          |
| Dipolo Lambda / 2  | L/D                        | Diámetro ( Frecuencia | Za        | Frecuencia   | Menor SW |
| L/D Actual   |                            |                       |           |              |          |
| L/D  |                            |                       |           |              |          |
| Opciones de Simulación   |                            |                       |           |              |          |
| Mostrar Antena   |                            |                       |           |              |          |
| ROE Frecuencia Operación (MHz) Frecuencia Inicial (MHz) Frecuencia Inicial (MHz) |                            |                       |           |              |          |
| Frecuencia Final (MHz) Paso (MHz) Fuente 1                                       |                            |                       |           |              |          |
| Usar Z0 alternativa 🗌 Z0 alternativa<br>Mostrar en 💿 Veces 🔾 dB                  | 4                          |                       |           |              | •        |
| Agregar Resultado E<br>Experimento 1 Experimento 2 Experimento 3 Experimento 3   | liminar Resul<br>rimento 4 | Itado                 | Exporta   | r Resultados |          |

Figura 4.25: Práctica 1: Experimento 1.

 Experimento 2: Se realiza la medición de la impedancia de un dipolo en base a la modificación de su escala, la cual se cambia a partir del uso de una caja de texto. Con la opción de Agregar Resultado, el usuario guardará de manera automática en una tabla los valores de Escala, Longitud del dipolo, diámetro, Za (impedancia de la antena) y ROE en la frecuencia de diseño después de realizar la ejecución del ROE en la ventana de simulación presionando la opción Añadir Resultados. El usuario también podrá eliminar resultados si lo desea con el uso del botón Eliminar Resultado y exportarlos con Exportar Resultados donde generará un archivo de texto con los datos obtenidos. La ventana se muestra en la figura 4.26

| 😞 Laboratorio 1: MEDICIÓN DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DE | UNA ANTENA - 🗆 🗙                                  |
|---|---|
| Instrucciones   | Ir al Simulador                                   |
| Dipolo Lambda / 2                                     | Escala Longitud L Diámetro ( Za para Fre SWR para |
| Escala Actual   | _   |
| Escala  |   |
| Opciones de Simulación                                |   |
| Mostrar Antena  |   |
| ROE   |   |
| Frecuencia Operación (MHz)                            |   |
| Frecuencia Inicial (MHz)                              | _   |
| Paso (MHz)  | -   |
| Fuente 1  | ↓   |
| Usar Z0 alternativa                                   | -   |
| Mostrar en 🛛 🔾 Veces 🔾 dB                             |   |
| Agregar Resultado                                     | Eliminar Resultado Exportar Resultados            |
| Experimento 1 Experimento 2 Experimento 3 Ex          | perimento 4                                       |

Figura 4.26: Práctica 1: Experimento 2.

Experimento 3: Consiste en medir la impedancia de entrada de una antena a partir de la impedancia propia y mutua de dos antenas que interactúan en un mismo medio, con el uso de las ecuaciones para tal fin [21]. Para esto el programa cuenta con una serie de cajas de texto donde el usuario introduce los valores de las impedancias que allí se le presentan, así como de las corrientes en magnitud y fase, con el fin de obtener el valor de la impedancia de entrada expresada en forma polar y el grado de acoplamiento entre las antenas. Para la obtención de los valores de impedancia el usuario cuenta con la herramienta de simulación, donde diseñará las antenas a estudiar y desde la ventana del experimento indicará el intervalo de alambres que describen la Antena 1 y la Antena 2; además, se cuenta con la opción de trasladar una antena respecto a la otra en base al valor en metros que se introduzca en la caja de texto dedicada y el eje de traslación. Se tiene la función de agregar en una tabla los resultados de distancia, voltaje de la fuente, corriente de la fuente e impedancia de fuente para cada antena. La figura 4.27 muestra la ventana anteriormente descrita.



Figura 4.27: Práctica 1: Experimento 3.

 Experimento 4: Se realiza la medición de una antena en presencia de un plano de tierra con conductividad y constante dieléctrica especificas los cuales son determinados en la opción Editar Tierra. El usuario fijará la antena a una distancia de factor de λ respecto al plano de tierra mediante el ingreso del valor en una caja de texto, para posteriormente agregar resultados, quitarlos o exportarlos como un archivo de texto. Los resultados obtenidos en esta simulación son tabulados en columnas de factor de distanciamiento, distancia

| 🚓 Laboratorio 1: MEDICIÓN | N DE IMPEDANCIA | DE ENTRADA DE UNA ANTENA —           |     | ĸ |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----|---|
|                           | Instrucciones   | Ir al Simulador                      |     |   |
| Antena Bajo P             | rueba           | Factor de di Distancia c Impedanci   |     |   |
| Cargar Antena             |                 |                                      |     |   |
| Editar Antena             | >               |                                      |     |   |
| Configuración d           | e Tierra        |                                      |     |   |
| Editar Tierra             |                 |                                      |     |   |
| Distancia con Respec      | to a la Tierra  |                                      |     |   |
| Factor Distancia Actual   |                 |                                      |     |   |
| Factor Distancia: Lambda  |                 |                                      |     |   |
| Opciones de Sin           | nulación        |                                      |     |   |
| Mostrar Antena            |                 |                                      |     |   |
|                           |                 |                                      |     |   |
|                           |                 |                                      |     |   |
|                           |                 | •                                    |     | • |
| Agregar Res               | ultado          | Eliminar Resultado Exportar Resultad | los |   |
| Experimento 1 Experi      | mento 2 Expe    | imento 3 Experimento 4               |     |   |

respecto a la tierra y la impedancia de entrada obtenida. La ventana de este experimento se muestra en la figura 4.28.

Figura 4.28: Práctica 1: Experimento 4.

## 4.4.2. Laboratorio 2: Medición de la polarización de una antena

La práctica de medición de polarización consta de un solo experimento, para ello la ventana (véase la figura 4.29) cuenta con las siguientes herramientas y opciones:

- Especificación del intervalo de alambres de cada antena involucrada en el experimento.
- Rotación en pasos de grados de la antena sensora.
- Sentido de rotación antihorario respecto al eje seleccionado.
- Eje de rotación de la antena.

- Selección de fuente a sensar de la lista.
- Información del tipo de fuente.
- Opciones de gráfica de patrón y elipse de polarización, especificando el paso de grados de las líneas radiales.
- Colores de la gráfica de patrón de polarización.
- Opción para mostrar las antenas.
- Opción para mostrar el patrón de radiación de la antena sensada.
- Tabulación de los resultados de los ángulos y sus respectivas magnitudes de voltaje.
- Casilla de texto donde el usuario insertará el valor del ángulo de inclinación τ deducido a partir de los resultados tabulados.
- Botón para realizar el cálculo de la Razón axial, Razón de elipticidad, Coeficiente de elipticidad, magnitud de la componente principal y cruzada, Relación crosspolar.

|                          | Instrucciones |                  |                     | Ir al Simulador         |             |
|--------------------------|---------------|------------------|---------------------|-------------------------|-------------|
| Antena Ba                | jo Prueba     | Ángulo en Grados | Magnitud de Voltaje | Elipse de P             | olarización |
| Desde alambre            |               |                  |                     | Ánnula de la elimentión |             |
| Hasta alambre            |               |                  |                     | Angulo de Inclinacion   |             |
| Antena S                 | Sensora       |                  |                     | Calc                    | ular        |
| Desde alambre            | -             |                  |                     |                         |             |
| Hasta alambre            | ▼             |                  |                     | Razón Axial (Veces)     |             |
| Rota                     | ción          |                  |                     |                         |             |
| Paso                     | Grados        |                  |                     |                         |             |
| Sentido Antihorario      |               |                  |                     | Razón Axial (dB)        |             |
| Eje de R                 | otación       |                  |                     |                         |             |
| ⊇X ©Y                    | ○ z           |                  |                     | Pazón Elipticidad       |             |
| Fuente a                 | Sensar        |                  |                     | hazon zapaolada         |             |
| Número de Fuente         | -             |                  |                     | Coeficiente Elipticidad |             |
| Tipo de Fuente           |               |                  |                     | Mag. Comp. Ppal.        |             |
| Opciones de              | Simulación    |                  |                     |                         |             |
| Paso de Ángulo Pola      | ar 5 🔻 Grados |                  |                     | Mag. Comp. Cruzada      |             |
| Color de Gráfica         | AZUL 👻        |                  |                     | _                       |             |
| Mostrar Antena           |               |                  |                     |                         |             |
|                          |               |                  |                     | CPR (dB)                |             |
| wostrar Patrón de Radiad | ion           | •                | •                   |                         |             |

Figura 4.29: Práctica 2: Polarización de una antena.

## 4.4.3. Laboratorio 3: Medición del diagrama de radiación de una antena

La práctica de medición del diagrama de radiación esta formada por un sólo experimento, para ello la ventana (véase la figura 4.30) cuenta con las siguientes herramientas y opciones:

- Especificación del intervalo de alambres de cada antena involucrada en el experimento.
- Rotación en pasos de grados de la antena bajo prueba.
- Sentido de rotación antihorario respecto al eje seleccionado.
- Eje de rotación de la antena.
- Selección del campo medido a fin de tomar datos para la tabla, en E se escriben los datos en la tabla izquierda y en H se escriben en la tabla derecha.

- Selección del tipo de gráfica del patrón de radiación.
- Selección de fuente a sensar de la lista.
- Información del tipo de fuente.
- Opciones de gráfica de diagrama de radiación, especificando el paso de grados de las líneas radiales.
- Colores de la gráfica del diagrama de radiación.
- Opción para mostrar las antenas.
- Opción para mostrar el patrón de radiación de la antena sensada.
- Tabulación de los resultados de los ángulos y sus respectivas magnitudes de voltaje para campo E y campo H.

|                             | Instrucciones |         |             | Ir al Simulador |            |  |
|-----------------------------|---------------|---------|-------------|-----------------|------------|--|
| Antena Sens                 | бога          | Ángulo  | Vi          | Ángulo          | Vi         |  |
| Desde alambre               | <b>•</b>      |         |             |                 |            |  |
| Antena Baio D               | rueba         |         |             |                 |            |  |
| Desde alambre               | <b>▼</b>      |         |             |                 |            |  |
| Hasta alambre               | <b>•</b>      |         |             |                 |            |  |
| Rotación                    |               |         |             |                 |            |  |
| Paso                        | Grados        |         |             |                 |            |  |
| Sentido Antihorario         |               |         |             |                 |            |  |
| Eje de Rotac                | ción          |         |             |                 |            |  |
| €X ÖΥ                       | ⊖ z           |         |             |                 |            |  |
| Plano                       |               |         |             |                 |            |  |
| DE OI                       | н             |         |             |                 |            |  |
| Tipo deGraf                 | ïca           |         |             |                 |            |  |
| /I veces (Normalizado)      | <b>_</b>      |         |             |                 |            |  |
| (Teees (Tormaizado)         |               |         |             |                 |            |  |
| Fuente a Ser                | ısar          |         |             |                 |            |  |
| Número de Euente            | _             |         |             |                 |            |  |
| Numero de Fuente            | · ·           |         |             |                 |            |  |
| Tipo de Fuente              |               |         |             |                 |            |  |
| Opciones de Sin             | nulación      |         |             |                 |            |  |
| Paso de Ángulo Polar        | 5 🔻 Grados    |         |             |                 |            |  |
| Color de Gráfica            | AZUL 🔻        |         |             |                 |            |  |
| Mostrar Antena              |               |         |             |                 |            |  |
| Mostrar Patrón de Radiación |               | •       | •           | •               |            |  |
| Agrogar Ros                 | ultado        | Elimina | r Dogultado | Exporter        | Dogultadoo |  |

Figura 4.30: Práctica 3: Diagrama de radiación de una antena.

#### 4.4.4. Laboratorio 4: Medición de la ganancia de una antena

Esta práctica se divide en dos experimentos en los cuales se realiza la medición de la ganancia de una antena con dos métodos como se describe a continuación:

Experimento 1: Se debe medir la ganancia de una antena a partir del método de comparación, donde se usará el valor de la ganancia de una antena, el cual ya es conocido y por medio de la implementación de una ecuación se calculará la ganancia desconocida. Para ello el usuario debe obtener los datos en el entorno de simulación e ingresarlos donde corresponda y así la misma herramienta del laboratorio virtual, accionando el botón de calcular, mostrará el resultado que podrá ser exportado como texto plano. La figura 4.31 muestra la disposición de esta ventana

|            | Instruccion                  | nes Ir al Simulador   |  |
|------------|------------------------------|---|--|
| ) Gsi      | Variables                    | $G_{ai(dB)} = 10.Log_{10}(G_{si}) + 10.Log_{10}\left(\frac{P_{dma}}{P_{dms}}\right) [dB_i]$ |  |
| ) Gsi (dB) |                              | $G_{ai(dB)} = G_{si(dB)} + 10.Log_{10} \left(\frac{P_{dma}}{P_{dms}}\right)  [dB_i]$        |  |
| Pdma (W)   |                              |   |  |
| Pdms (W)   |                              |   |  |
|            |                              |   |  |
|            |                              |   |  |
|            |                              |   |  |
|            |                              |   |  |
|            |                              |   |  |
|            |                              |   |  |
|            |                              | Gai (dBi)   |  |
|            |                              | Gai (dBl)   |  |
|            |                              | Gai (dBi)   |  |
|            | Calcular                     | Gai (dBi)<br>   |  |
| Expo       | Calcular<br>ırtar Resultados | Gai (dBi)<br>   |  |

Figura 4.31: Práctica 4: Experimento 1.

 Experimento 2: Se debe medir la ganancia absoluta de una antena a partir del método de las tres antenas, para esto el usuario cuenta con el simulador de antenas donde serán diseñadas dos de ellas y así obtener parcialmente los parámetros que deben ser introducidos en el sistema de ecuaciones, de igual forma repetirá este experimento alternando las antenas, de modo que cada una de ellas haya sido simulada junto a las otras dos. Al obtener los parámetros, el usuario ingresa los resultados en unas cajas de texto y al usar la herramienta calcular, obtendrá el valor de la ganancia de cada antena en decibelios. La ventana de esta práctica se muestra en la figura 4.32



Figura 4.32: Práctica 4: Experimento 2.

# 4.5. Controles especiales para el programa y las gráficas generadas

A continuación se muestra en la tabla 4.1 los controles y combinación de teclas para la realización de acciones en el programa UCNEC.

| Windows y Linux       | Descripción   |
|-----------------------|---|
| Ctrl + A              | Abrir archivo de descripción .nec                                     |
| Ctrl + S              | Guardar simulación como archivo .nec                                  |
| Ctrl + Q              | Exportar simulación como código QR                                    |
| Ctrl + I              | Importar archivo de descripción .nec                                  |
| Ctrl + S              | Ir al módulo de Simulación (Desde módulo de Laboratorio)              |
| Ctrl + L              | Ir al módulo Laboratorio (Desde módulo Simulación)                    |
| F1                    | Ver manual de ayuda (Desde módulo Laboratorio)                        |
| F4                    | Salir de UCNEC  |
| S                     | Guardar gráfica de Partón de Radiación o Antena en ~/data/screenshots |
| $\leftarrow$          | Girar gráfica 3D a la izquierda                                       |
| $\rightarrow$         | Girar gráfica 3D a la derecha   |
| ↑                     | Girar gráfica 3D hacia arriba   |
| ↓                     | Girar gráfica 3D hacia abajo  |
| Shift + $\leftarrow$  | Acercar la gráfica 3D   |
| Shift + $\rightarrow$ | Alejar la gráfica 3D  |
| Shift + ↑             | Desplazar hacia arriba la gráfica 3D                                  |
| Shift +↓              | Desplazar hacia abajo la gráfica 3D                                   |
| Doble click derecho   | Rotar gráfica 3D  |

**Tabla 4.1:** Atajos de los módulos de UCNEC.

## 4.6. Experimentos realizados en UCNEC

## **4.6.1.** Simulación de un Dipolo $\lambda/2$

Se diseñó una antena dipolo de  $\lambda/2$  en el programa UCNEC con los siguientes parámetros:

| Parámetro             | Valor         |
|-----------------------|---------------|
| Frecuencia            | 299,79 MHz    |
| Longitud de onda      | 1 m           |
| Fuente                | 1∠0° V        |
| Tierra                | Espacio libre |
| Pérdida en el alambre | Sin pérdidas  |
| Z0 Alternativo        | 75 Ω          |

Tabla 4.2: Parámetros de simulación.

La visualización de la antena generada se muestra en la figura 4.33



Figura 4.33: Visualización de la antena en UCNEC.

El resultado obtenido en el diagrama de radiación tridimensional realizado con UCNEC, se muestra en la figura 4.34. Esta figura fue hecha a partir de un diagrama donde los datos están normalizados. La figura 4.35 generada en EZNEC muestra los datos en una escala de decibelios. Realizando la comparación entre las figuras 4.34 y 4.35, se puede apreciar la discrepancia entre sus formas debido al modo de representación; sin embargo esto no constituye un error en el resultado de la simulación, sino más bien una diferencia que poseen estos dos programas a la hora de representar y procesar los datos que entrega el archivo de salida del motor NEC.



Figura 4.34: Diagrama de radiación 3D en UCNEC.



Figura 4.35: Diagrama de radiación 3D en EZNEC.

La figura 4.36 muestra la representación del diagrama de radiación en eleva-

ción, con un ángulo de azimuth constante a 0 grados (esto es  $F(\theta, \phi = 0)$ ). La representación de EZNEC se muestra en la figura 4.37.



Figura 4.36: Diagrama de radiación 2D elevación en UCNEC.



Figura 4.37: Diagrama de radiación 2D elevación en EZNEC.

Ambas gráficas describen un máximo de radiación en el ángulo  $0^{\circ}$  o lo que es igual a  $\theta = 90^{\circ}$ . A continuación se muestra una tabla con los resultados numéricos obtenidos en ambos programas:

| Parámetro       | Valor UCNEC             | Valor EZNEC |
|-----------------|-------------------------|-------------|
| Mámixa ganancia | 10Log(1,6493)=2,173 dBi | 2,16 dBi    |
| Apertura de haz | 78° m                   | 77, 2°      |
| Front to Back   | 0 dB                    | 0 dB        |

Tabla 4.3: Resultados de la simulación.

La figura 4.38 muestra la representación del diagrama de radiación en el azimuth, con un ángulo de elevación constante a 0 grados (esto es  $F(\theta = 0, \phi)$ ). La representación de EZNEC se muestra en la figura 4.39.



Figura 4.38: Diagrama de radiación 2D elevación en UCNEC.



Figura 4.39: Diagrama de radiación 2D elevación en EZNEC.

En la tabla 4.6 puede visualizarse que los datos obtenidos en ambos programas son iguales (o muy cercanos), esto debido a las diferentes formas en que se procesan los datos a través del cálculo matemático en la programación de cada aplicación (número de decimales, por ejemplo), sin embargo se demuestra con estos resultados que la programación realizada para la representación gráfica y la obtención de los datos en el patrón de radiación 2D azimuth fue realizada correctamente.

El parámetro de ROE para la simulación se muestra a continuación. Se realizó el cálculo a partir de un barrido desde 100 MHz hasta 400 MHz en pasos de 5 MHz y se posicionó el cursor en la frecuencia 285MHz, véase la figura 4.40



Figura 4.40: Gráfico de la ROE vs frecuencia en UCNEC.

Para la ROE en EZNEC se hizo de la misma forma. Quedando como muestra la figura.



Figura 4.41: Gráfico de la ROE vs frecuencia en EZNEC.

Si llevamos el valor de ROE de la figura 4.41 a dB, esto es, 3,1 dB y lo comparamos con 3,125 dB, se puede notar una leve diferencia, que se debe a la imprecisión del cursor de la librería de graficación. Sin embargo, ambas gráficas tienen el mismo comportamiento y muestran una zona de bajas reflexiones de ondas al rededor de 285 MHz, comprobando así que el cálculo realizado y la representación gráfica se realizó de manera correcta.

### 4.6.2. Simulación de una antena Yagi a 208 MHz

Se diseñó una antena Yagi en el programa UCNEC con los siguientes parámetros:

| Parámetro             | Valor         |
|-----------------------|---------------|
| Frecuencia            | 208 MHz       |
| Longitud de onda      | 1,44 m        |
| Fuente                | 5∠0° V        |
| Tierra                | Espacio libre |
| Pérdida en el alambre | Sin pérdidas  |
| Z0 Alternativo        | 75 Ω          |

Tabla 4.4: Parámetros de simulación.





Figura 4.42: Visualización de la antena en UCNEC.

El resultado obtenido en el diagrama de radiación tridimensional realizado con UCNEC, se muestra en la figura 4.43. Esta figura fue hecha a partir de un diagrama donde los datos están normalizados. La figura 4.44 generada en EZNEC muestra los datos en una escala de decibelios. Realizando la comparación entre las figuras 4.43 y 4.35.



Figura 4.43: Diagrama de radiación 3D en UCNEC.



Figura 4.44: Diagrama de radiación 3D en EZNEC.

La figura 4.45 muestra la representación del diagrama de radiación en elevación, con un ángulo de azimuth constante a 0 grados (esto es  $F(\theta, \phi = 0)$ ). La representación de EZNEC se muestra en la figura 4.46.



Figura 4.45: Diagrama de radiación 2D elevación en UCNEC.



Figura 4.46: Diagrama de radiación 2D elevación en EZNEC.

Ambas gráficas describen un máximo de radiación en el ángulo  $0^{\circ}$  o lo que es igual a  $\theta = 90^{\circ}$ . A continuación se muestra una tabla con los resultados numéricos obtenidos en ambos programas:

| Parámetro       | Valor UCNEC | Valor EZNEC |
|-----------------|-------------|-------------|
| Mámixa ganancia | 12.05 dBi   | 12.05 dBi   |
| Apertura de haz | 54° m       | 52,6°       |
| Front to Back   | 26,2335 dB  | 26,24 dB    |

Tabla 4.5: Resultados de la simulación en elevación.

La figura 4.47 muestra la representación del diagrama de radiación en azimuth, con un ángulo de elevación constante a 0 grados (esto es  $F(\theta = 0, \phi)$ ). La representación de EZNEC se muestra en la figura 4.48.


Figura 4.47: Diagrama de radiación 2D azimuth en UCNEC.



Figura 4.48: Diagrama de radiación 2D azimuth en EZNEC.

| Parámetro       | Valor UCNEC | Valor EZNEC |
|-----------------|-------------|-------------|
| Mámixa ganancia | 12.05 dBi   | 12.05 dBi   |
| Apertura de haz | 46° m       | $45, 2^{o}$ |
| Front to Back   | 26,2335 dB  | 26,24 dB    |

Tabla 4.6: Resultados de la simulación en azimuth.

El parámetro de ROE para la simulación se muestra a continuación. Se realizó el cálculo a partir de un barrido desde 100 MHz hasta 400 MHz en pasos de 5 MHz y se posicionó el cursor en la frecuencia 210 MHz, véase la figura 4.40.



Figura 4.49: Gráfico de la ROE vs frecuencia en UCNEC.

Para la ROE en EZNEC se hizo de la misma forma. Quedando como muestra la figura.



Figura 4.50: Gráfico de la ROE vs frecuencia en EZNEC.

Si llevamos el valor de ROE de la figura 4.50 a dB, esto es, 5,58 dB y lo comparamos con 5,576 dB, se puede notar una leve diferencia, que se debe, como en el caso anterior cuando se simuló el dipolo de  $\lambda/2$ , a la imprecisión del cursor de la librería de graficación. Sin embargo, ambas gráficas tienen el mismo comportamiento y muestran una zona de bajas reflexiones de ondas al rededor de 210 MHz, comprobando así la correcta implementación.

## 4.7. Medición de parámetros usando las prácticas de laboratorio

#### 4.7.1. Medición de la impedancia de una antena

Para la medición de impedancia se cuenta con cuatro experimentos, la realización de cada uno de ellos se muestran a continuación:

## 4.7.1.1. Medición de la impedancia y relación de onda estacionaria de una antena lineal cilíndrica tipo dipolo en función del diámetro de la misma

La realización de esta práctica se hizo a partir de la variación de la relación longitud/diámetro de la antena, la figura 4.51 muestra el dipolo utilizado.



**Figura 4.51:** Antena dipolo de  $\lambda/2$  a 208 Mhz.

La relación L/D seleccionada en primer lugar fue de 20 y los datos introducidos se muestran en la figura 4.52.

|                         | Instrucciones     |  |     |            | Ir al S      | imulador |                 |
|-------------------------|-------------------|--|-----|------------|--------------|----------|-----------------|
| Dipo                    | o Lambda / 2      |  | L/D | Diámetro ( | . Frecuencia | Za       | Frecuencia Meno |
| L/D Actual              | Actual 20         |  |     |            |              |          |                 |
| L/D                     | 20.00             |  |     |            |              |          |                 |
| Opcion                  | es de Simulación  |  |     |            |              |          |                 |
| Mostrar Antena          | K                 |  |     |            |              |          |                 |
|                         | ROE               |  |     |            |              |          |                 |
| recuencia Operación (M  | <b>Iz)</b> 208.00 |  |     |            |              |          |                 |
| Frecuencia Inicial (MHz | 145.60            |  |     |            |              |          |                 |
| Frecuencia Final (MHz)  | 270.40            |  |     |            |              |          |                 |
| Paso (MHz)              | 0.50              |  |     |            |              |          |                 |
| Fuente                  | 1                 |  |     |            |              |          |                 |
| Usar Z0 alternativa     | Z0 alternativa    |  |     |            |              |          |                 |
| Mostrar en              | Veces I dB        |  | •   |            | III          |          |                 |
|                         |                   |  |     |            |              |          |                 |

Figura 4.52: Datos introducidos en el experimento 1 de la práctica 1.

el resultado de la gráfica de ROE obtenida para esta primera dimensión fue la siguiente:



**Figura 4.53:** ROE obtenido para una relación L/D=20.

El programa tiene la capacidad de obtener los valores del ancho de banda, el valor de menor ROE, el valor del ROE a la frecuencia de operación y la impedancia de la antena, los cuales obtiene a partir del archivo de salida de NEC2. La figura 4.54 muestra las diferentes funciones de ROE respecto a la frecuencia superpuestas para cada relación L/D.



Figura 4.54: ROE obtenido para cada relación L/D configurada.

| L | os datos numéri | cos obtenic | los en el | programa | se muestra a | continuación. |
|---|-----------------|-------------|-----------|----------|--------------|---------------|
|   | Jo autos munici | cos obierne |           | programa | oc macona a  | continuación. |

| L/D | Diámetro | Frecuencia (MHz) | Za para la           | Menor  | SWR para             | Ancho de    |
|-----|----------|------------------|----------------------|--------|----------------------|-------------|
|     | (mm)     | para menor ROE   | frecuencia de diseño | SWR    | frecuencia de diseño | banda (MHz) |
| 20  | 36       | 182,6            | 133,71 - j18,348     | 1,5559 | 2,7393               | 10          |
| 50  | 14,41    | 189,1            | 102,12 + j49,166     | 1,425  | 2,6339               | 6,5         |
| 100 | 7,21     | 193,1            | 92,136 + j50,447     | 1,4231 | 2,5563               | 6           |
| 200 | 3,6      | 195,6            | 87,079 + j49,291     | 1,4252 | 2,482                | 5           |
| 300 | 2,4      | 197,1            | 85,131 + j48,419     | 1,4276 | 2,4433               | 5           |
| 400 | 1,8      | 197,6            | 84,036 + j47,838     | 1,4283 | 2,4195               | 4,5         |

**Tabla 4.7:** Resultados de la medición de la impedancia en función de la variación de la relación L/D.

### 4.7.1.2. Medición de la impedancia y relación de onda estacionaria de una antena lineal cilíndrica tipo dipolo en función de su acortamiento.

La realización de esta práctica se hizo a partir de la variación de escala del dipolo de  $\lambda/2$ , sin modificar el diámetro del mismo (L/D = 100), los datos obtenidos de la simulación fueron los siguientes:

| Acortamiento | Longitud | Diámetro | Za para la           | SWR para la                  |
|--------------|----------|----------|----------------------|------------------------------|
| en %         | (m)      | (mm)     | frecuencia de diseño | frecuencia de diseño (veces) |
| 0            | 0,7206   | 7,21     | 92,136 + j50,447     | 2,5449                       |
| 1            | 0,713394 | 7,21     | 88,816 + j42,692     | 2,3184                       |
| 2            | 0,699126 | 7,21     | 82,618 + j27,565     | 1,9209                       |
| 3            | 0,678152 | 7,21     | 74,231 + j5,5691     | 1,4998                       |
| 4            | 0,651026 | 7,21     | 64,592 - j22,332     | 1,5923                       |
| 5            | 0,606105 | 7,21     | 51,246 - j67,126     | 3,471                        |
| 6            | 0,569739 | 7,21     | 42,307 - j102,77     | 6,8754                       |

**Tabla 4.8:** Resultados de la medición de la impedancia en función de la variación ed la relación L/D.

La figura 4.55 muestra la ROE para el dipolo cuando no ha sido escalado y la figura 4.56 para un acortamiento de 6%.



Figura 4.55: ROE para el dipolo no escalado.



Figura 4.56: ROE para el dipolo con acortamiento de 6%.

En estas gráficas se puede observar como la zona de ROE mínimo se desplaza hacia frecuencias mayores, de tal forma que la variación del valor en la frecuencia de diseño disminuye y luego aumenta.

## 4.7.1.3. Medición de la impedancia propia y mutua de una antena bajo prueba en presencia de otra antena ubicada en la zona cercana, intermedia y lejana de la antena bajo prueba.

Para la realización de este experimento se utilizaron dos antenas dipolos plegados los cuales fueron posicionados a distancias especificadas por la zona cercana, zona intermedia, zona lejana y diez veces la zona lejana. La figura 4.57 muestra las antenas posicionadas a 0,5 m lo cual representa la zona cercana.



Figura 4.57: Disposición de las antenas del experimento.

Se midió la impedancia de la antena 1 en ausencia de la antena 2, resultando en un valor de  $276,50 - j26,961 \Omega$ . Las distancias establecidas fueron de 0,1 m, 0,5 m, 33,5 m y 333,5 m tomando en cuenta el criterio de zona lejana [22].

| Zona               | Impedan                | cia propia             | Impedancia       | Impedancia            | Impedancia de     | Grado de     |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|--------------|
|                    | Z <sub>11</sub> medida | Z <sub>22</sub> medida | Z2               | Mutua Z <sub>12</sub> | Entrada           | acoplamiento |
| Cercana            | 340,78 - j33,899       | 221,68 - j40.412       | 23,420 - j105,07 | 265,381 + j28,7566    | 193,913 - j210,31 | 0,9275       |
| Intermedia         | 269,77 - j28,138       | 277,6 - j19,095        | 337,93 + j49,184 | 57,081 - j146,475     | 300,587 - j2,4778 | 0,3274       |
| Lejana             | 276,5 - j26,963        | 276,5 - j26,963        | 276,47 - j26,962 | 2,881 - j0,188        | 276,5 - j26.963   | 0,0001       |
| 10 veces la lejana | 276,5 - j26,961        | 276,5 - j26,960        | 276,50 - j26,960 | 0                     | 276,5 - j26,961   | 0            |

Los resultados obtenidos para las simulaciones se muestran en la tabla 4.9

**Tabla 4.9:** Resultados de la medición de la impedancia en función de la variación ed la relación L/D.

| Laboratorio 1: MEDICIC | IN DE IMPEDANCIA | DE ENTRADA DE UNA ANTENA                   | >                           |
|------------------------|------------------|--|-----------------------------|
|                        | Instrucciones    |  | Ir al Simulador             |
|                        |                  | Distancia Voltaje Fue Corriente F Impedanc | Impedancia Propia ABP1      |
| Antena Bajo P          | rueba 1          |  | Re: 340.78 lm: +j -33.90    |
|                        |                  |  | Impedancia Propia ABP2      |
| Desde alambre          | <b>•</b>         |  | Re: 221.68 lm: +j -40.41    |
|                        |                  |  | Impedancia de Z2            |
| Hasta alambre          | -                |  | Re: 23.40 Im: +j -105.07    |
|                        |                  |  | Impedancia Mutua Z12        |
| Antena Bajo P          | rueba 2          |  | Re: 265.98 lm: +j 28.76     |
|                        |                  |  | I1 Mag / Fase (grados)      |
| Desde alambre          | •                |  | Mag: 0.01 Fase: 9.52        |
|                        | -                |  | I2 Mag / Fase (grados)      |
| Hasta alambre          | -                |  | Mag: 0.01 Fase: 3.50        |
| Traslada               | аг               |  | Impedancia de Entrada       |
|                        | m                |  | Mag: 378.3514 Fase: -0.0832 |
| Fie de Trael           | ación            |  | Grado de Acoplamiento       |
| Eje de Masi            | acion            |  | 0.9275                      |
| x or                   | © z              |  | Coloular                    |
|                        |                  |  | Calcular                    |
| Agregar Re             | sultado          | Eliminar Resultado                         | Exportar Resultados         |
| Experimento 1 Exper    | imento 2 Exper   | imento 3 Experimento 4                     |                             |

La figura 4.58 muestra los valores ingresados para calcular la impedancia de entrada y el grado de acoplamiento de las antenas en zona cercana.

Figura 4.58: Valores calculados para zona cercana.

4.7.1.4. Medición de la impedancia de entrada de una antena cuando existe la presencia de la tierra, con una conductividad y permitividad especificada.

Para la realización de esta simulación, se utilizó la antena mostrada en la figura 4.59, con polarización horizontal, la cual se ubicó en principio en el plano z=0.



Figura 4.59: Antena Yagi estudiada para la medición de su impedancia.

El diagrama de radiación de esta antena posee su máxima potencia en el eje X. La figura 4.60 muestra el patrón tridimensional.



Figura 4.60: Patrón de radiación de la antena Yagi estudiada.

A partir de esta posición, se desplazó la antena a alturas a factores de  $\lambda$ , con una frecuencia de 208 MHz, la longitud de onda es 1,44131. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

| r                       |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| Distancia con respecto  | Impedancia Z <sub>e</sub> 1 |
| a la tierra $(\lambda)$ | (Ω)                         |
| Sin tierra              | 26,085 - j3,5598            |
| λ                       | 26,62 - j3,4912             |
| 2λ                      | 26,056 - j3,4734            |
| 3λ                      | 26,058 - j3,539             |
| $4\lambda$              | 26,068 - j3,5528            |
| 5λ                      | 26,073 - j3,5569            |
| 6λ                      | 26,077 - j3,5584            |
| 7λ                      | 26,079 - j3,559             |
| 8λ                      | 26,08 - j3,5593             |
| 9λ                      | 26,081 - j3,5595            |
| 10λ                     | 26,082 - j3,5596            |

**Tabla 4.10:** Resultados de la medición de la impedancia en función de la variación de la altura de la antena respecto al plano de tierra.

#### 4.7.2. Polarización de una antena

La medición de la polarización se realiza en UCNEC utilizando el método del diagrama de polarización parcial. Se seleccionó una antena de dipolos cruzados a 208 MHz, alimentados con fuentes de voltaje de 1 y 2 voltios, separados a una distancia de 0.1 m, siguiendo los pasos descritos en el Anexo A. La figura 4.61 muestra el arreglo de las antenas para la medición, realizando la rotación del dipolo sensor a pasos de ángulos de  $5^{\circ}$ .



Figura 4.61: Antena de dipolos cruzados estudiada con dipolo sensor.

El patrón de polarización obtenido se muestra en la figura 4.62



Figura 4.62: Patrón de polarización obtenido.

La polarización resultante fue una polarización lineal, de la cual se obtienen los siguientes parámetros:

- Ángulo de Inclinación: 90,0
- Razón Axial (Veces):  $9,33 \times 10^{12}$
- Razón Axial (dB): 259,4004
- Razón de Elipticidad:  $1,07146 \times 10^{-13}$
- Coeficiente de Elipticidad (dB): -259,4004
- Magnitud del Componente Principal: 1,0
- Magnitud del Componente Cruzado:  $1,07146 \times 10^{-13}$



Figura 4.63: Elipse de polarización.

Este resultado fue el esperado debido a la geometría de esta antena, esto es porque la disposición y forma de la misma dan idea de la manera como el campo eléctrico se propaga en el medio. Por consiguiente, es demostrado que se llevó a cabo de manera correcta la aplicación de los códigos [21] para la graficación del diagrama de polarización y la adquisición de los datos de voltaje obtenidos a partir del archivo de salida NEC2.

#### 4.7.3. Diagrama de radiación de una antena

Se realizó la medición del diagrama de radiación de la antena Yagi del apartado anterior por el método de la línea de vista fija [12]. Para ello se realizó la rotación sobre el propio eje de la antena bajo prueba con pasos de 10 grados, midiendo así en primer lugar el plano E. El resultado de la medición se muestra a continuación:



Patrón de Radiación

Figura 4.64: Diagrama de radiación del plano E.

De igual forma se realizó la medición del plano H, disponiendo de las antenas como se muestra en la figura 4.65 y seguidamente rotando la antena bajo prueba respecto al eje z con pasos de 10° obteniendo así el diagrama de radiación mostrado en la figura 4.66



Figura 4.65: Antena Yagi estudiada con dipolo sensor.



Patrón de Radiación

Figura 4.66: Diagrama de radiación del plano E.

Estos resultados pueden ser comparados con los obtenidos en las figuras 4.47 y 4.45, de manera que puede corroborarse en primer lugar, que el método de medición se realizó de manera correcta y que la aplicación obtuvo los datos necesarios proporcionados por el archivo de salida de NEC2 para la formación del diagrama de radiación (magnitud del voltaje inducido en una antena por otra).

#### 4.7.4. Medición de la ganancia de una antena

Como se pudo ver anteriormente 3.8.2.1, esta práctica está constituida por dos experimentos: Medición de la ganancia a partir del método de comparación y por el método de ganancia absoluta.

#### 4.7.4.1. Medición de la ganancia absoluta

Se realizó la práctica por el método de las tres antenas, para lo cual se utilizaron dos antenas yagi y un dipolo de  $\lambda/2$ . La figuras 4.67, 4.68 y 4.69 muestran las antenas utilizadas para la simulación.



Figura 4.67: Antena Yagi (Antena A).



**Figura 4.68:** Antena Dipolo de  $\lambda/2$  (Antena B).



Figura 4.69: Antena Yagi (Antena C.

Luego de estudiar los enlaces A-B, A-C y B-C, se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.70, los cuales se comparan con los obtenidos directamente desde el apartado de simulación de antenas del programa como se muestra en la tabla 4.11

|               | Instrucciones<br>Variables |                | Ir al Simulad  | lor   |
|---------------|----------------------------|----------------|--|---|
| )istancia (m) | 120.00                     |                |  |   |
| Lambda (m)    | 1.4413098900               | Enlace $a - b$ | $(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20.Log\left(\frac{4\pi\pi}{\lambda}\right)$   | $\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) + 10.Log\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right)$ |
|               | Enlace a - b               |                |  |   |
| Prb (W)       | 0.0006446300               |                | (4===  | (P)   |
| Pta (W)       | 26.1160000000              | Enlace $a - c$ | $(G_a)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20.Log \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$   | $\left( + 10.Log \left( \frac{\Gamma_{rc}}{P_{c}} \right) \right)$              |
|               | Enlace a - c               |                |  | ) ( <i>r</i> <sub>ta</sub> )  |
| Prc (W)       | 0.0063127000               |                |  |   |
| Pta (W)       | 26.1120000000              | Enlace $b - c$ | $(G_b)_{AB} + (G_c)_{AB} = 20.Log \left(\frac{4\pi r}{4\pi r}\right)$  | $+10.Log\left(\frac{P_{rc}}{T}\right)$  |
|               | Enlace b - c               |                | $(-)_{ab} + (-)_{ab} $ | ) $(P_{tb})$  |
| Prc (W)       | 0.0006446300               |                |  |   |
| Ptb (VV)      | 26.1160000000              |                |  |   |
|               |                            |                |  |   |
|               |                            | Ga (dB)        | Gb (dB)  | Gc (dB)   |
|               |                            |                |  |   |
|               | Calcular                   | 12.1132        | 2.2035   | 12.1132   |
|               |                            |                |  |   |
| Expo          | rtar Resultados            |                |  |   |

Figura 4.70: Resultados de los cálculos para la medición de la ganancia.

| Antena | Ganancia Medida directamente | Ganancia Medida en el experimento |
|--------|------------------------------|-----------------------------------|
| A      | 12,05 dBi                    | 12,1132 dBi                       |
| В      | 2.19 dBi                     | 2,2035 dBi                        |
| С      | 12.05 dBi                    | 12,1132 dBi                       |

**Tabla 4.11:** Resultados de la medición de la impedancia en función de la variación de la altura de la antena respecto al plano de tierra.

#### 4.7.4.2. Medición de la ganancia por comparación de antenas

Las antenas involucradas en esta medición se muestran a continuación:



Figura 4.71: Antena transmisora.



Figura 4.72: Antena sensor.



Figura 4.73: Antena bajo prueba.



**Figura 4.74:** Antena transmisora con sensor. La visualización en esta y otras figuras de antenas se ve desproporcional debido al zoom aplicado por la librería de graficación, la cual no mantiene las dimensiones para todos los ejes.



Figura 4.75: Antena transmisora con antena bajo prueba.

Se introdujeron los datos requeridos por la ecuación, sabiendo que la ganancia del dipolo es de 1.6722 dBi, obteniendo así los resultados mostrados en la figura 4.76.

|          | Instrucci                    | ones Ir al Simulador   |
|----------|------------------------------|--|
|          | Variables                    | (Ptro)   |
| ) Gsi    |                              | $G_{ai(dB)} = 10.Log_{10}(G_{si}) + 10.Log_{10}\left(\frac{2}{P_{dms}}\right)  [dB_i]$ |
| Gsi (dB) | 1.6722000000                 | $G_{ai(dB)} = G_{si(dB)} + 10.Log_{10} \left(\frac{P_{dma}}{P_{dma}}\right)  [dB_i]$   |
| Pdma (W) | 0.0020865000                 | (* uns /   |
| Pdms (W) | 0.0001645000                 |  |
|          |                              |  |
|          |                              |  |
|          |                              |  |
|          |                              |  |
|          |                              |  |
|          |                              |  |
|          |                              | Gai (dBi)  |
|          |                              |  |
|          |                              |  |
|          |                              | 12.7047  |
|          |                              |  |
|          | Calcular                     |  |
| Ехр      | Calcular<br>ortar Resultados |  |

Figura 4.76: Resultados de la medición.

A partir de este resultado, se pudo realizar la comparación con el obtenido directamente del simulador. La figura 4.77 muestra el valor de la ganancia y el patrón de radiación tridimensional.



Figura 4.77: Patrón de radiación de la antena bajo prueba.

El valor de la ganancia resultante de la simulación es 12.0505 dBi y el obtenido en la medición fue 12,7047 dBi, lo cual demuestra un funcionamiento correcto del laboratorio y realización de la práctica.

### 4.8. Requerimientos de Hardware

Los requerimientos mínimos recomendados para la ejecución de UCNEC son los siguientes:

- Procesador a 1GHz
- 1 GB memoria RAM
- 150 MB disponibles en el disco duro
- Teclado y mouse.

## 4.9. Requerimientos de Software

Para el software se requieren las siguientes características:

- Windows 7 o superior, compatible con Java SDK 1.8, arquitectura 32bits
- Linux Ubuntu o Debian compatible con Java SDK 1.8, arquitectura 32bits

## Capítulo V

# **Conclusiones y recomendaciones**

#### 5.1. Conclusiones

- El uso del código NEC2 hizo posible el desarrollo de la aplicación UCNEC, siendo el motor para el cálculo matemático de los parámetros electromagnéticos de las estructuras radiantes allí modeladas. Su implementación garantiza la obtención de resultados numéricos correctos bajo ciertas condiciones (criterios de simulación del motor NEC, como los geométricos) y estos resultados a su vez son aprovechados por el software desarrollado a fin de lograr la caracterización requerida para cada antena allí simulada.
- El lenguaje de programación JAVA permitió el desarrollo sistemático y ordenado del código gracias a su paradigma orientado a objetos, lo cual facilitó el procesamiento de datos obtenidos a través de la simulación. De igual manera, con el uso del entorno de programación Netbeans, la creación de la interfaz de usuario se realiza de forma sencilla, evitando así la necesidad de aprender a programar la interfaz gráfica de usuario mediante el empleo códigos que la describan, en cambio, solamente es necesaria la configuración por códigos del funcionamiento de cada elemento que compone dicha interfaz.
- Las librerías de visualización seleccionadas llevaron a cabo la representación correcta de los parámetros obtenidos a través de las simulación por el motor

NEC. Usando los datos numéricos obtenidos a través del cómputo, mediante el cálculo matemático, se realizó la representación gráfica de otros parámetros que no ofrece por defecto el archivo de salida del código NEC.

- La característica de independencia de plataforma de los programas codificados en JAVA, posibilitó que la aplicación pudiese ser ejecutada tanto en el sistema operativo Windows como en distribuciones Linux.
- El diseño de las prácticas de laboratorio virtual garantizará la ejecución de cada práctica en un tiempo menor, debido a la inclusión de las herramientas anteriormente utilizadas para el cumplimiento de los objetivos, de esta manera, se facilita el procedimiento para la realización de las practicas, haciendo posible el poder invertir mas tiempo en la compresión de los fenómenos físicos y el análisis de resultados.
- Las prácticas de laboratorio virtual tienen como finalidad ayudar al aprendizaje de los métodos de medición de parámetros electromagnéticos de estructuras radiantes, mediante la ejecución de procedimientos similares a los utilizados en la realidad, tales como la rotación manual de antenas con selección de pasos de ángulos, desplazamiento de antenas e identificación de zonas de radiación de las mismas, recolección de datos para su posterior procesamiento, entre otros.
- El programa UCNEC en su primera versión, ofrece al usuario una experiencia agradable y sencilla gracias al diseño modular que posee y al idioma en el cual fue desarrollado (la mayoría de programas similares están disponibles en idiomas como el inglés) y a su vez constituye una herramienta útil que está a la par con software comerciales, siendo así una alternativa libre pero con suficientes capacidades para el estudio de parámetros de antenas y de métodos de medición experimental.

### 5.2. Recomendaciones

- Desarrollar el programa UCNEC para su ejecución en el sistema operativo de teléfonos inteligentes Android.
- Mejorar la simulación de excitación con fuentes de corriente a fin de posibilitar su uso extendido en las simulaciones de antenas y en las prácticas de laboratorio.
- Garantizar la plena portabilidad del programa UCNEC, sustituyendo la envoltura en lenguaje C++ del código NEC en FORTRAN por una versión escrita en lenguaje JAVA.
- Mejorar la experiencia de las ventanas, introduciendo la funcionalidad de maximizar las mismas y mantener una dependencia entre ellas para bloquear la selección en ventanas principales cuando se acceden a ventanas secundarias.
- Añadir al programa una ventana auxiliar que indique la espera del proceso que se esté realizando (gráfica de patrón de radiación, ROE, entre otros).

## **Apéndice** A

# Tarjetas de entrada

#### 1.1. Tarjetas de control del programa

Las tarjetas de control de programa van después de las tarjetas de geometría de la estructura. Establecen parámetros eléctricos para el modelo, seleccionan opciones para el procedimiento de solución y solicitan el cálculo de datos.

#### 1.1.1. Excitación

El propósito de esta carta es el de especificar la excitación para la estructura. La excitación puede ser una fuente de voltaje en la estructura, una fuente de corriente elemental o una onda plana incidente sobre la estructura.

Los parámetros incluidos en esta tarjeta son: Enteros

- I1 Determina cual tipo de excitación será usada.
  - 0 Fuente de voltaje
  - 1 Onda plana incidente, polarización lineal
  - 2 Onda plana incidente, polarización elíptica derecha.
  - 3 Onda plana incidente, polarización elíptica izquierda.
| /21 | 5  1 | 0  15<br> | 20 <br> | 30 <br> | 401      | 50  <br> | 60 I | 70     | 801 |
|-----|------|-----------|---------|---------|----------|----------|------|--------|-----|
|     |      | I3<br>    |         | F1      | F2  <br> | F3       | F4   | F5     | F6  |
|     |      | ļ         |         |         |          |          |      |        |     |
|     |      |           |         | l<br>l  | , the l  |          |      | onch f |     |
|     | l    | l         |         | leter t |          |          |      | each   |     |

Figura 1.1: Tarjeta de excitación [20].

- 4 Fuente de corriente elemental.
- 5 Fuente de voltaje (discontinuidad de pendiente de corriente)

Los enteros restantes dependen del tipo de excitación.

La aplicación de esta carta se hizo sin tomar en cuenta la excitación por onda plana incidente, de este modo sólo se describen a continuación las opciones para las otras dos formas de alimentación de la antena.

a. Fuente de voltaje (I1 =  $0 \circ 5$ )

- I2 Número de etiqueta del segmento de la fuente. Este número de etiqueta junto con el número que debe darse en (I3), que identifica la posición del segmento en un conjunto de números de etiquetas iguales, define únicamente el segmento de la fuente. El campo en blanco o cero (I2) implica que el segmento de la fuente se identificará utilizando el número de segmento absoluto en el siguiente campo.
- I3 = M, especifica el m-ésimo segmento del conjunto de segmentos cuyos números de etiqueta son iguales al número establecido por el parámetro anterior. Si el parámetro anterior es cero, el número en (I3) debe ser el número de segmento absoluto de la fuente.

- I4 Las columnas 19 y 20 de este campo se usan por separado. Las opciones para la columna 19 son:
  - 1 Se calculará e imprimirá la asimetría máxima de matriz de admitancia relativa para el segmento fuente y la conexión de red.
  - 0 Ninguna acción.

Las opciones para la columna 20 son:

- 1 La impedancia de entrada en las fuentes de tensión siempre se imprime directamente antes de las corrientes de segmento en la salida. Mediante el establecimiento de esta bandera, la impedancia de un solo segmento de la fuente en un bucle de frecuencia se recopilará y se imprimirá en una tabla (en una forma normalizada y una no normalizada) después de que se haya impreso la información a todas las frecuencias. La normalización al valor máximo es un valor por defecto, pero se puede especificar el valor de normalización. Cuando hay más de una fuente en la estructura, sólo se recopilará la impedancia de la última fuente especificada.
- 0 Ninguna acción.
- b. Fuente de corriente elemental (I1 = 4)
- I2 e I3 Vacío.
- I4 Sólo es usada la columna 19 y las opciones son:
  - 1 Máxima asimetría matriz de admitancias relativas para las conexiones de red se calcularán y serán impresas.
  - 0 Ninguna acción

#### Punto Flotante

a. Fuente de voltaje (I1 =  $0 \circ 5$ )

- F1 Parte real de la tensión de la fuente en voltios.
- F2 Parte imaginaria de la tensión de la fuente en voltios.
- F3 Si se coloca un uno en la columna 20, este campo puede usarse para especificar constantes de normalización para la impedancia impresa en la tabla de impedancia opcional. Este campo vacío produce la normalización al valor máximo.
- F4, F5 y F6 Vacíos.

b. Fuente de corriente elemental (I1 = 4). La fuente de corriente se caracteriza por su posición de coordenadas cartesianas, su orientación y su magnitud.

- F1 Posición en X en metros.
- F2 Posición en Y en metros.
- F3 Posición en Z en metros.
- F4 Alfa (α) en grados. Alfa es el ángulo que la fuente de corriente hace con el plano XY.
- F5 Beta (β) en grados. Beta es el ángulo que la proyección de la fuente de corriente en el plano XY hace con el eje X.
- F6 Corriente actual de la fuente.

#### 1.1.2. Especificación de frecuencia (FR)

El propósito de esta carta es el de especificar la frecuencia (o frecuencias en MHz).

Los parámetros incluidos en esta tarjeta son: Enteros

 IFRQ (I1) - Determina el tipo de pasos de frecuencias, 0 para pasos de frecuencia lineal y 1 para paso multiplicativo.

| /  | 21 | 51  | 10   |    | 15  |     | 201 | 30    | 40     | 50     | I 60     | 1 70     | 80     |
|----|----|-----|------|----|-----|-----|-----|-------|--------|--------|----------|----------|--------|
| Ĺ  | i  | i   |      | i. |     | i   | i   |       | i      | i      | i        | i        |        |
| F  | R  | 111 | 12   | 1  | 13  | 11  | 4 1 | F1    | F2     | F3     | F4       | F5       | F6     |
|    | ł  | I   | Ν    | i. | в   | ł   | BI  | FMHZ  | DELFRQ | BLANK  | BLANK    | BLANK    | BLANK  |
| 1  | 1  | F   | F    | 1  | L   | 1   | LI  |       |        | 1      | 1        | 1        |        |
| 1  | 1  | R   | R    | 1  | A   | 1   | A   |       | 1      | 1      | 1        | 1        |        |
| 1  | 1  | QI  | Q    | 1  | N   | 1   | N   |       | 1      |        | 1        | 1        |        |
| 1  | 1  | 1   |      | 1  | K   | 1   | K   |       | 1      | 1      | 1        | 1        |        |
| 1  | 1  | 1   |      | 1  |     | 1   | 1   |       | 1      |        | 1        | 1        |        |
| IT | he | num | bers | al | ong | the | top | refer | to the | last c | olumn in | n each t | field. |
| 1  | 1  | 1   |      | 1  |     | 1   | Ĩ   |       | 1      | 1      | 1        | 1        |        |

| Figura 1.2: Tarjeta de frecuencia [2 | 0] | • |
|--------------------------------------|----|---|
|--------------------------------------|----|---|

- NFRQ (I2) Número de pasos de frecuencia, si el campo esta en blanco, se asume 1.
- (I3), (I4) Vacíos.

Punto Flotante

- FMHZ (F1) Frecuencia (MHz).
- DELFRQ (F2) Incremento gradual de la frecuencia. Si el escalonamiento de frecuencia es lineal, esta cantidad se añade a la frecuencia cada vez. Si el escalonamiento es multiplicativo, éste es el factor de multiplicación.
- (F3)...(F6) Vacíos.

#### Notas

- Si una tarjeta de frecuencia no aparece en la plataforma de datos, se supone una frecuencia única de 299,8 MHz. Dado que la longitud de onda a 299,8 MHz es de un metro, la geometría está en unidades de longitudes de onda para este caso.
- Las tarjetas de frecuencia no pueden agruparse. Si lo están, solo se utilizará la información de la última carta del grupo.

 Después de que se haya completado un bucle de frecuencia para NFRQ > 1, no se repetirá para una segunda petición de ejecución. La tarjeta FR debe repetirse en este caso.

#### 1.1.3. Especificación de parámetros de tierra (GN)

El propósito de esta tarjeta es el de especificar la constante dieléctrica relativa y la conductividad del terreno en la proximidad de la antena. Adicionalmente, Se puede especificar un segundo conjunto de parámetros de tierra para un segundo medio o se puede modelar una pantalla de tierra de alambre radial utilizando una aproximación de coeficiente de reflexión.

Card:

| /21 | 51  | 10   | )   | 15   | 201    | 30    | 40     | 1 50   | 0 60     | 1 70   | 80     |
|-----|-----|------|-----|------|--------|-------|--------|--------|----------|--------|--------|
| / 1 | 1   |      | 1   | 1    | 1      |       | 1      | i i    | 1        | 1      | 1      |
| 1   | 1   |      | 1   | 1    | 1      |       | 1      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| GN  | I1  | 12   | I.  | 3    | I4     | F1    | F2     | F3     | F4       | F5     | F6     |
| 1 1 | 1   |      | 1   | 1    | 1      |       | 1      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| I I | II  | N    | ]   | o I  | b      | E     | S      | 1      | 1        | 1      | 1      |
|     | P   | R    | 1   | 1    | 1      | P     | I      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| 1 1 | E   | A    | 1 0 | a    | a      | S     | G      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| 1 1 | R   | D    | 1   | n I  | n      | E     | 1      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| 1 1 | F   | L    | 1 1 | k    | k      |       | 1      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| 1 1 | 1   |      | 1   | 1    | 1      |       | 1      | 1      | 1        | 1      | 1      |
| The | num | bers | alo | ng t | he top | refer | to the | last ( | column i | n each | field. |
| I I | 1   |      | 1   | 1    | 1      |       | 1      | 1      | 1        | 1      | 1      |
|     |     |      |     |      |        |       |        |        |          |        |        |

Figura 1.3: Tarjeta de especificación de parámetros de tierra [20].

Los parámetros incluidos en esta tarjeta son: Enteros

IPERF (I1) - Bandera del tipo de tierra. Cuando su valor es -1, Anula los parámetros de tierra utilizados anteriormente y establece la condición de espacio libre. El resto de la tarjeta se deja en blanco en este caso. Cuando el valor es 0 se establece una tierra finita, aproximación del coeficiente de reflexión. Cuando el valor es 1 se configura una tierra conductora perfecta y con el valor 2, tierra finita con el método de Sommerfeld/Norton.

- NRADL (I2) Número de alambres radiales en la aproximación de la pantalla de tierra; vacío o 0 no implica ninguna pantalla de tierra.
- (I3), (I4) Vacíos.

#### Punto Flotante

- EPSE (F1) Constante dieléctrica relativa de la tierra en la proximidad de la antena. Se deja vacío en caso de un terreno perfecto.
- SIG (F2) Conductividad en S/m de la tierra en la proximidad de la antena. Si se deja en blanco se produce el caso de un terreno perfecto. Si se introduce SIG como un número negativo, la constante dieléctrica compleja ε<sub>c</sub> = ε<sub>r</sub> jσ/(ω \* ε<sub>0</sub>) se establece en EPSR |SIG|.

Opción para los campos punto flotantes restantes:

- Para un plano infinito, los campos desde F3 hasta F6 estarán en blanco.
- Aproximación de la pantalla de tierra del cable radial (NRADL distinto de cero). La pantalla de tierra está siempre centrada en el origen, es decir, en (0,0,0) y se encuentra en el plano XY.
  - (F3) Radio de la pantalla en metros.
  - (F4) Radio de los alambres usados en la pantalla, en metros.
  - (F5), (F6) Vacíos.
- Segundo parámetro medio (NRADL = O) para el medio fuera de la región del primer medio (problema del acantilado). Estos parámetros alteran los patrones de campo lejano pero no afectan la impedancia o distribución de corriente de la antena.
  - (F3) Constante dieléctrica relativa del medio 2.
  - (F4) Conductividad del medio 2 en §/m.
  - (F5) Distancia en metros desde el origen del sistema de coordenadas hasta la unión entre el medio 1 y 2. Esta distancia es el radio del

círculo donde se unen los dos medios o la distancia del eje X positivo a donde los dos medios se unen en una línea paralela al eje Y. La especificación de la opción circular o lineal está en la tarjeta RP.

 (F6) - Distancia en metros (positiva o cero) por la cual la superficie del medio 2 está por debajo del medio 1.

Notas:

- Las tarjetas GN no se pueden agrupar. Si lo están, sólo se conservará la información de la última tarjeta.
- El uso de una tarjeta GN después de cualquier forma de ejecución determina la regeneración de la matriz de la estructura.
- Sólo se utilizan los parámetros del primer medio cuando se calculan las corrientes de antena; los parámetros asociados con el segundo medio no se utilizan hasta el cálculo de los campos lejanos. Es posible entonces calcular las corrientes sobre un conjunto de parámetros de tierra (medio uno), pero calcular los campos lejanos sobre otro conjunto (medio dos) ajustando la distancia al comienzo del medio dos a cero. Medio uno puede incluso ser un terreno perfectamente conductor especificado por IPERF = 1.
- Cuando se especifica una pantalla de tierra de cable radial o un segundo medio, es necesario indicar su presencia por el primer parámetro en la tarjeta RP para generar los patrones de radiación apropiados.
- Cuando se especifica un plano de tierra, este hecho también debe indicarse en la tarjeta GE. Consulte la tarjeta GE para obtener más detalles.
- Cuando un modelo incluye parches de superficie, los campos debido a los parches se calcularán utilizando sólo los parámetros de tierra primarios. Por lo tanto, un segundo medio de tierra no debe utilizarse con parches. La aproximación de la pantalla de tierra del alambre radial tampoco es implementada para parches.

# 1.1.4. Estructura de impedancia de carga (LD)

El propósito de esta carta es el de especificar la carga de impedancia en un segmento o en un número de segmentos. Se pueden generar circuitos RLC en serie y en paralelo. Además, se puede especificar una conductividad finita para segmentos.

Card:

| /21 | 51  | 10   |     | 15  | 5   | 201 | 30    |    | 401 |      | 501 | (   | 501 | 7(   | )  | 80   |
|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-------|----|-----|------|-----|-----|-----|------|----|------|
| / 1 | 1   |      | 1   |     | 1   | 1   |       | 1  | 1   |      | 1   |     | 1   |      | 1  |      |
| I I | 1   |      | 1   |     | 1   | 1   |       | I  | 1   |      | 1   |     | 1   |      | 1  |      |
| LD  | I1  | 12   | 1 : | 13  | II  | 1 1 | F1    | F  | 2 1 | F3   | 1   | F4  | 1   | F5   | 1  | F6   |
| I I | 1   |      | 1   |     | 1   | 1   |       | 1  | 1   |      | 1   |     | 1   |      | 1  |      |
| 1 1 | LI  | L    | 1   | L   | L   | 1   | ZLR   | ZL | II  | ZLC  | 1   | В   |     | В    |    | В    |
| I I | DI  | D    | 1   | D   | D   | 1   |       |    |     |      | 1   | L   | 1   | L    | 1  | L    |
| I I | TI  | т    | 1   | т   | T   | 1   |       | 1  | 1   |      | 1   | A   | 1   | A    | 1  | A    |
| I I | YI  | A    | 1   | A   | A   | 1   |       | 1  | 1   |      | 1   | Ν   | 1   | N    | 1  | N    |
| 1 1 | PI  | G    | 1   | G   | G   | 1   |       | 1  | 1   |      | 1   | K   |     | K    | 1  | K    |
| 1   | 1   |      | 1   | F   | T   | 1   |       | 1  | 1   |      | 1   |     | 1   |      | 1  |      |
| The | num | bers | ald | ong | the | top | refer | to | the | last | col | umn | in  | each | fi | eld. |
| 1   | 1   |      | 1   | -   | 1   | Î   |       | 1  | 1   |      | 1   |     | 1   |      | 1  |      |

Figura 1.4: Tarjeta de generación de cargas [20].

Los parámetros incluidos en esta tarjeta son:

#### Enteros

- LDTYP (I1) Determina el tipo de carga que será utilizada.
  - -1 Corta todas las cargas (usadas para anular cargas anteriores). El resto de la tarjeta se deja en blanco.
  - 0 Se configura una red RLC en serie, con entradas en ohm, henrios, faradios.
  - 1 Se configura una red RLC en paralelo, con entradas en ohm, henrios, faradios.
  - 2 Se configura una red RLC en serie, con entradas en ohm/metros, henrios/metros, faradios/metros.
  - 3 Se configura una red RLC en paralelo, con entradas en ohm/metros, henrios/metros, faradios/metros.

- 4 Impedancia, resistencia de entrada y reactancia en ohmios.
- 5 Conductividad del alambre en S/m.
- LDTAG (I2) Número de etiqueta; identifica la(s) sección(es) de alambre a ser cargada(s) por sus números de etiqueta. Los siguientes dos parámetros se pueden usar para especificar más segmentos en la sección de cables. En blanco o cero aquí implica que los números de segmento absoluto se están utilizando en los dos siguientes parámetros para identificar segmentos. Si los dos parámetros siguientes están en blanco o cero, se cargan todos los segmentos con la etiqueta LDTAG.
- LDTAGF (I3) Se carga el valor a de "m", especificando el m-ésimo segmento del conjunto de segmentos cuyos números de etiqueta son iguales al número de etiqueta especificado en el parámetro anterior. Si el parámetro anterior (LDTAG) es cero, LDTAGF especifica un número de segmento absoluto. Si ambos LDTAG y LDTAGF son cero, se cargarán todos los segmentos.
- LDTAGT (I4) Se carga el valor de "n", especifica el n-ésimo segmento del conjunto de segmentos cuyos números de etiqueta son iguales al número de etiqueta especificado en el parámetro LDTAG. Este parámetro debe ser mayor o igual al parámetro anterior. La carga especificada se aplica a cada uno de los segmentos de noveno a décimo del conjunto de segmentos que tienen etiquetas iguales a LDTAG. De nuevo, si LDTAG es cero, estos parámetros se refieren a números de segmentos absolutos. Si LDTAGT se deja en blanco, se establece igual al parámetro anterior (LDTAGF).

Punto Flotante, entrada para los diferentes tipos de cargas.

#### A. RLC Serie (LDTYP = 0)

- ZLR (F1) Resistencia en ohmios; si no hay, dejar en blanco.
- ZLI (F2) Inductancia en henrios; si no hay, dejar en blanco.
- ZLC (F3) Capacitancia en faradios; si no hay, dejar en blanco.
- B. RLC Paralelo (LDTYP = 1), datos iguales que en el caso anterior.

- C. RLC Serie (LDTYP = 2), entrada de parámetros por unidad de longitud.
  - ZLR Resistencia en ohmios/metros; si no hay, dejar en blanco.
  - ZLI Inductancia en henrios/metros; si no hay, dejar en blanco.
  - ZLC Capacitancia en faradios/metros; si no hay, dejar en blanco.
- D. RLC Paralelo (LDTYP = 3), entrada de parámetros por unidad de longitud, datos iguales que en el caso anterior.
- E. Impedancia (LDTYP = 4)
  - ZLR Resistencia en ohmios.
  - ZLI Reactancia en ohmios.
- F. Conductividad del alambre (LDTYP = 5)
  - ZLR Conductividad en Siemens/metro.

#### Notas:

- Las tarjetas de carga se pueden introducir en grupos para lograr una carga de estructura deseada. El número máximo de tarjetas de carga en un grupo está determinado por las dimensiones del programa. El límite es actualmente 30.
- Si un segmento es cargado más de una vez por un grupo de tarjetas de carga, se supone que las cargas están en serie (impedancias agregadas) y un comentario se imprime en la salida alertando al usuario sobre este hecho.
- Cuando se introduce resistencia y reactancia (LDTYP = 4), la impedancia no escala automáticamente con la frecuencia.
- Tarjetas de cargas utilizadas después de cualquier forma de ejecución, requieren la regeneración de la matriz de la estructura.

#### 1.1.5. Especificación de línea de transmisión (TL)

El propósito de esta tarjeta es el de generar una línea de transmisión entre dos puntos cualquiera de la estructura. La impedancia característica, la longitud y la admitancia de derivación son los parámetros que definen.

```
Card:
      Cols. Parameter
        1-2
                     TL
        3- 5
                     I1
        6-10
                     12
       11-15
                     13
       16-20
                     I4
       21-30
                     F1
       31 - 40
                     F2
       41-50
                     F3
       51-60
                     F4
       61-70
                     F5
       71-80
                     F6
```



Los parámetros incluidos en esta tarjeta son: Enteros

- (I1) Número de etiqueta del segmento al que está conectado el puerto uno de la línea de transmisión. Este número de etiqueta junto con el número que debe darse en (I2), que identifica la posición del segmento en un conjunto de números de etiquetas iguales, define únicamente el segmento para el puerto uno. En blanco o cero aquí implica que el segmento se identificará utilizando el número de segmento absoluto en la siguiente ubicación (I2).
- NFRQ (I2) Define el valor de "m", especifica el m-ésimo segmento del conjunto de segmentos cuyos números de etiqueta son iguales al número establecido por el parámetro anterior. Si el parámetro anterior es cero, el número en (I2) es el número de segmento absoluto correspondiente al extremo uno de la

línea de transmisión. Un menos uno en este campo anulará todas las conexiones de red y de línea de transmisión anteriores. El resto de la tarjeta se deja en blanco en este caso.

• (I3), (I4) - Se utiliza exactamente de la misma manera que (I1) y (I2) para especificar el segmento correspondiente al puerto dos de la conexión de red.

Punto Flotante

- (F1) La impedancia característica de la línea de transmisión en ohms. Un signo negativo frente a la impedancia característica actuará como un indicador para generar la línea de transmisión con una inversión de fase de 180 grados (línea cruzada) si se desea.
- (F2) La longitud de la línea de transmisión en metros. Si este campo se deja en blanco, el programa utilizará la distancia recta entre los puntos de conexión especificados

Los cuatro campos de punto flotante restantes se utilizan para especificar las partes real e imaginaria de las admitancias de derivación en el extremo uno y dos, respectivamente.

- (F3) Parte real de la entrada del shunt en Siemens en el extremo uno.
- (F4) Parte imaginaria de la entrada del shunt en Siemens en el extremo uno.
- (F5) Parte real de la entrada del shunt en Siemens en el extremo dos.
- (F6) Parte imaginaria de la entrada del shunt en Siemens en el extremo dos.

#### Notas:

 Las reglas para las tarjetas de línea de transmisión son las mismas que para las tarjetas de red. Todas las tarjetas de línea de transmisión para una configuración de línea de transmisión particular deben ocurrir junto con ninguna otra tarjeta (excepto las tarjetas NT) que las separa. Cuando se lee la primera tarjeta TL o NT después de una tarjeta que no sea una tarjeta TL o NT, se destruyen todos los datos anteriores de la red o de la línea de transmisión. Por lo tanto, si se va a modificar un conjunto de tarjetas TL, todos los datos de línea de transmisión y de red se deben introducir de nuevo en la forma modificada. Las dimensiones del programa limitan el número de tarjetas en un grupo que se pueden especificar. En la plataforma de demostración de NEC, el número de redes de dos puertos (especificado por las tarjetas NT y las tarjetas TL) está limitado a treinta y el número de segmentos diferentes que tienen puertos de red conectados a ellos está limitado a treinta.

- Una o más redes (incluidas las líneas de transmisión) pueden estar conectadas a cualquier segmento dado. Varios puertos de red conectados a un segmento están conectados en paralelo.
- Si una línea de transmisión está conectada a un segmento que ha sido cargado de impedancia, la carga actúa en serie con la línea.
- El uso de una tarjeta de línea de transmisión (TL) después de cualquier forma de ejecución requiere recalcular solamente la corriente y no requiere recalcular la matriz.

### 1.1.6. Parámetros de patrón de radiación (RP)

El propósito de esta tarjeta es el de especificar los parámetros de muestreo del patrón de radiación y causar la ejecución del programa. Las opciones para un cálculo de campo incluyen una pantalla de tierra de cable radial, un acantilado o campos de onda de superficie. Condo

| /21 | 51  | 10   |       | 51              | 201  | 301   | 40     | 5    |        | 60  <br> | 70   |       |
|-----|-----|------|-------|-----------------|------|-------|--------|------|--------|----------|------|-------|
| RP  | 11  | 12   | 13    | 14<br> <br> "XN | IDA" | F1    | F2     | F3   | F4     | i        | F5   | F6    |
| ł   | i   |      | į –   |                 |      |       |        |      |        | İ        |      | į     |
|     | ļ   |      |       | ł               | ļ    |       |        |      | 1      |          |      |       |
| The | num | bers | along | the             | top  | refer | to the | last | column | in       | each | field |
| L   | 1   |      | 1     | 1               | 1    | 1     | 1      |      | 1      | 1        |      | 1     |

Figura 1.6: Tarjeta de especificaciones para el patrón de radiación [20].

Los parámetros incluidos en esta tarjeta son: Enteros

- (I1) Este entero selecciona el modo de cálculo para el campo radiado. Algunos valores de (I1) afectarán el significado de los restantes parámetros en la tarjeta. Las opciones disponibles para I1 son:
  - 0 Modo normal. Se calculan campos de ondas espaciales. Se incluye un plano de tierra infinito si se ha especificado previamente en una tarjeta GN; de lo contrario, la antena está en espacio libre.
  - 1 La onda superficial que se propaga a lo largo de la tierra se añade a la onda espacial normal. Esta opción cambia el significado de algunos de los otros parámetros en la tarjeta RP como se explica a continuación y los resultados aparecen en un formato de salida especial. Los parámetros de tierra deben haber sido introducidos en una tarjeta GN.

Las siguientes opciones causan el cálculo de sólo la onda espacial pero con condiciones de tierra especiales. Las condiciones del terreno incluyen un terreno de dos medios (acantilado donde los medios se unen en un círculo o una línea) y una pantalla de tierra de alambre radial. Parámetros de tierra y dimensiones deben introducirse en una tarjeta GN o GD antes de leer la tarjeta RP. La tarjeta RP sólo selecciona la opción para su inclusión en el cálculo de campo. (Refiérase a las tarjetas GN y GD para más explicaciones).

- 2 Acantilado líneal con antena por encima del nivel superior. Los parámetros medios inferiores son los especificados para el segundo medio en la tarjeta GN o en la tarjeta GD.
- 3 Acantilado circular centrado en el origen del sistema de coordenadas: Con antena por encima del nivel superior. Los parámetros medios inferiores son los especificados para el segundo medio en la tarjeta GN o en la tarjeta GD.
- 4 Pantalla de tierra de alambre radial centrada en el origen.
- 5 La pantalla de tierra del alambre radial y acantilado líneal.
- 6 La pantalla de tierra del alambre radial y acantilado circular.

El punto de campo se especifica en coordenadas esféricas (R, Sigma, theta) como se ilustra en la Figura 1.7, excepto cuando se calcula la onda superficial. Para calcular el campo de ondas de superficie (I1 = 1), se utilizan coordenadas cilíndricas (phi, theta, z) para definir con precisión puntos cerca del plano de tierra a grandes distancias radiales. La tarjeta RP permite el escalonamiento automático del punto de campo para calcular el campo sobre una región alrededor de la antena en puntos uniformemente espaciados. Los números enteros I2 e I3 y los números de punto flotante F1, F2, F3 y F4 controlan el escalonamiento del punto de campo.



Figura 1.7: Sistema de coordenadas cartesiano y cilíndrico para el campo radiado.

- NTH (I2) Número de valores de theta (Θ) en los que se va a calcular el campo (o número de valores de z, para I1 = 1.
- NPH (I3)- Número de valores de phi (Φ) en los que se va a calcular el campo.
  El número total de puntos de campo solicitados por la tarjeta es NTH x NPH.
  Si I2 o I3 se deja en blanco, se asumirá un valor de uno.
- Este número entero opcional consta de cuatro dígitos independientes en las columnas 17, 18, 19 y 20, cada uno de los cuales tiene una función diferente. El mnemónico XNDA no es un nombre de variable en el programa. Más bien, cada letra representa una mnemotécnica para el dígito correspondiente en I4. Si I1 = 1, entonces I4 no tiene efecto y debe dejarse en blanco.
  - X (Columna 17) controla el formato de salida.
    - X = 0, eje mayor, eje menor y ganancia total impresa.
    - X = 1, ganancia vertical, horizontal y total impresa.
  - N (columna 18) hace que la ganancia normalizada para los puntos de campo especificados se impriman después de la salida de ganancia estándar. El número de puntos de campo para los que se puede imprimir la ganancia normalizada está limitado por una dimensión de matriz en el programa. En el programa de demostración, el límite es de 600 puntos. Si el número de puntos de campo excede este límite, los puntos restantes se omitirán de la ganancia normalizada. La ganancia puede normalizarse a

este máximo o a la entrada de valor en el campo F6. El tipo de ganancia que se normaliza se determina por el valor de N como sigue:

- N = 0, ganancia no normalizada
- N = 1, ganancia del eje mayor normalizada.
- N = 2, ganancia del eje menor normalizada.
- N = 3, ganancia del eje vertical normalizada.
- N = 4, ganancia del eje horizontal normalizada.
- N = 5, ganancia total normalizada.
- D (Columna 19) selecciona tanto la ganancia de potencia como la ganancia directiva tanto para la impresión estándar como para la normalización. Si la excitación de la estructura es una onda plana incidente, las cantidades impresas bajo el encabezado "ganancia" serán realmente la sección transversal de dispersión (α/λ<sup>2</sup>) y no se verán afectadas por el valor de D. El encabezado de columna para la salida seguirá siendo leyendo "potencia" o "ganancia directiva", sin embargo si D = 0 se denomina ganancia de potencia y si D = 1, ganancia directiva.
- A (Columna 20) solicita el cálculo de la ganancia de potencia media en la región cubierta por puntos de campo.
  - A = 0, sin promediar.
  - A = 1, ganancia promedio calculada.

A = 2, ganancia promedio calculada; se suprime la impresión de ganancia en los puntos de campo usados para promediar. Si NTH o NPH es igual a uno, la ganancia media no será calculada para ningún valor de A, ya que el área de la región cubierta por puntos de campo desaparece.

Punto Flotante

- THETS (F1) Ángulo theta inicial en grados (coordenada z inicial en metros si I1 = 1).
- PHIS (F2) Ángulo phi inicial en grados.

- DTH (F3) Incremento para theta en grados (incremento para z en metros si I1 = 1).
- DPH (F4) Incremento para phi en grados.
- RFLD (F5) Distancia radial (R) del punto de campo desde el origen en metros. RFLD es opcional. Si está en blanco, el campo eléctrico irradiado tendrá el factor exp(-jkR) / R omitido. Si se especifica un valor de R, debería representar un punto en la región de campo lejano ya que no se pueden obtener componentes cercanos del campo con una tarjeta RP. (Si I1 = 1, entonces RFLD representa la coordenada cilíndrica phi en metros y no es opcional, debe ser mayor que aproximadamente una longitud de onda).
- GNOR (F6) Determina el factor de normalización de ganancia si se ha solicitado la normalización en el campo I4. Si GNOR es blanco o cero, la ganancia será normalizada a su valor máximo. Si GNOR no es cero, la ganancia sera normalizada al valor de GNOR.

#### Notas

- La tarjeta RP iniciará la ejecución del programa, haciendo que la matriz de interacción sea computada y factorizada y que las corrientes de la estructura sean calculadas si estas operaciones aún no se han realizado. Por lo tanto, todos los parámetros de entrada necesarios deben configurarse antes de leer la tarjeta RP.
- A una sola frecuencia, cualquier número de tarjetas RP puede ocurrir en secuencia de manera que diferentes punto de campo espaciados puedan ser utilizados en diferentes regiones del espacio. Si se está utilizando escalonamiento automático de frecuencia (es decir, NFRQ en la tarjeta FR es mayor que uno), sólo una tarjeta RP actuará como datos dentro del bucle. Las cartas subsiguientes calcularán los patrones en la frecuencia final.
- Cuando ambos NTH y NPH son mayores que uno, el ángulo theta (o Z) tendrá un paso más rápido que phi.

 Cuando se ha especificado un plano de tierra, los puntos de campo no deben ser solicitados debajo de la tierra (theta mayor de 90 grados o Z menor que cero).

## 1.1.7. Bandera de final de datos (EN)

El propósito de esta tarjeta es el de indicar al programa el final de toda la ejecución.

Card:

|   | /21 | 5  | 51  | 1   | 01 | 15  | 51  | 201 | 301   | 40     |        | 501 | 601    | 70     | 80     |
|---|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
| 1 | 1   |    | 1   |     | 1  |     | 1   | 1   | 1     |        | 1      | 1   | 1      |        | I I    |
|   | 1   |    | L   |     | 1  |     | 1   | 1   | 1     |        | 1      | 1   | 1      |        | I I    |
|   | EN  |    | L   |     | 1  |     | 1   | 1   | blank | blan   | bla    | nkl | blank  | blank  | blank  |
|   |     |    | 1   |     |    |     | 1   |     |       |        |        | 1   | 1      |        |        |
|   |     | b  |     | b   |    | b   |     | b   | 1     |        | 1      |     | 1      |        | I I    |
|   | 1   | 1  | 1   | 1   |    | 1   | 1   | 1   | 1     |        | 1      |     | 1      |        | I I    |
|   | 1   | а  | 1   | a   | 1  | а   | 1   | a   | 1     |        | 1      |     | 1      |        | I I    |
| 1 | 1   | n  | 1   | n   | 1  | n   | 1   | n   | 1     |        | 1      | 1   | 1      |        | I I    |
| 1 | 1   | k  | 1   | k   | 1  | k   | 1   | k   | 1     |        | 1      | 1   | 1      |        | I I    |
|   | 1   |    | L   |     | 1  |     | 1   | 1   | 1     |        | 1      | 1   | 1      |        | I I    |
|   | 1   |    | 1   |     |    |     | 1   | 1   | 1     |        | 1      | 1   | 1      |        | I I    |
|   | The | nu | ımb | ers | al | ong | the | top | refer | to the | a last | col | umn in | each : | field. |
| I | 1   |    | L   |     | I  |     | I   | I   | I     |        | L      | I   | I      |        | I I    |

Figura 1.8: Tarjeta de finalización de la ejecución [20].

# **Referencias Bibliográficas**

- David K. Cheng. *Field and Wave Electromagnetics*. 2.<sup>a</sup> ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1983.
- [2] Niemeyer P y Leuck D. Learning Java. 3.ª ed. O'Reilly, 1978.
- [3] C. Mejías y O Hernández. Desarrollo de un software didáctico interactivo para Sistemas de Ondas Guiadas SEDISOG v2.0. Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo. Ago. de 2008.
- [4] E. Parada y A. Tavera. Diseño de una Aplicación para el Control, Análisis y Adquisición de Datos del Analizador HP 4396B. Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo. Oct. de 2016.
- [5] Timothy C.A. Molteno. NEC2++: An NEC-2 compatible Numerical Electromagnetics Code. Inf. téc. 2014-3. University of Otago. URL: http://www.physics. otago.ac.nz/reports/electronics/ETR2014-3.pdf.
- [6] Luis E. López O. Software para el Análisis y Diseño de Antenas, DISANT Versión
  3. Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo. Mayo de 2008.
- [7] Glick J. Boudreau T. y col. *NetBeans: The Definitive Guide*. 1.<sup>a</sup> ed. O'Reilly, 2002.
- [8] Daniel Y. Liang. Introduction to JAVA Programming. Comprehensive Version. 10.<sup>a</sup> ed. Pearson Education Inc., 2015.
- [9] Mark L. Murphy. *The Busy Coders Guide to Android Development*. 3.<sup>a</sup> ed. CommonWare, 2011.
- [10] Peter Sestoft. Numeric performance in C, C# and Java. IT University of Copenhagen, Denmark. Feb. de 2010.

- [11] Mark Summerfield. Rapid GUI Programming with Python and Qt. 1.<sup>a</sup> ed. Prentice Hall, 2007.
- [12] Constantine A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design. 4.<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, 2012.
- [13] Arnold P. *The Slant Antenna Range*. 5.<sup>a</sup> ed. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1966.
- [14] Johnson R., Ecker H y J. Hollis. Determination of Far-Field Antenna Patterns from Near-Field Measurements. 9.<sup>a</sup> ed. IEEE Proceeding, 1973.
- [15] Joy E., Leach W., Rodrigue G. y col. Applications of Probe-Compensated Near-Field Measurements. 4.<sup>a</sup> ed. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013.
- [16] IEEE Std 149-1979. IEEE Standard Test Procedures for Antennas. 1.<sup>a</sup> ed. Wiley-Interscience, 1979.
- [17] Roger F. Harrington y Jan L. Harrington. Field Computation by Moment Methods. 2.<sup>a</sup> ed. Oxford University Press, 1996.
- [18] Walton C. Gibson. *The Method of Moments in Electromagnetics*. 1.<sup>a</sup> ed. Chapman & Hall/CRC, 2008.
- [19] G. J. Burke y A. J. Poggio. Numerical Electromagnetics Code (NEC) Method of Moments. Part I: Program Description - Code. 1.<sup>a</sup> ed. Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
- [20] J. Rockway y J. Logan. NEC-2 Manual. Part III: Users Guide. 1.<sup>a</sup> ed. Lawrence Livermore Laboratory, 1996.
- [21] Cesar C. Ruiz P. Diseño de Prácticas del Laboratorio de Antenas y Propagación bajo ambiente simulado utilizando Código Electromagnético Numérico. 1.ª ed. Universidad de Carabobo, 2015.
- [22] Rafael J. Albornoz. Trabajo Práctico del Laboratorio De antenas. 1.ª ed. Universidad de Carabobo, 1982.

Anexo A

# Manual de ayuda para la realización de las prácticas de laboratorio