

Análisis de algoritmos de resolución del problema
directo en reconstrucción de imágenes de tomografía
por impedancia eléctrica



Carlos Manuel Gonzalez Arias
Edinson Ivan Ortega Urbano

Director: MSc. Víctor Hugo Mosquera Leyton

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Popayán, 2018

**Análisis de algoritmos de resolución del problema
directo en reconstrucción de imágenes de tomografía
por impedancia eléctrica**

Carlos Manuel Gonzalez Arias
Edinson Ivan Ortega Urbano

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del Título de:
Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Director: MSc. Víctor Hugo Mosquera Leyton

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán, 2018

Agradecimientos

Gracias a Dios, a nuestros padres por darnos la vida y siempre guiarnos de la mejor manera para poder culminar esta meta.

Gracias a nuestras familias, amigos y compañeros por brindarnos su tiempo, esfuerzo y ayuda. Siempre estuvieron en los momentos difíciles y de duda en nuestra carrera, dando apoyo y animo para alcanzar nuestros sueños.

Gracias Ingeniero Víctor Hugo Mosquera Leyton por la ayuda y paciencia que nos brindó a lo largo del proyecto. Por compartir su conocimiento para así lograr un muy buen trabajo.

Índice general

Lista de figuras	IV
Lista de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Estado del Arte	3
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo General	5
1.2.2. Objetivo Específicos	5
2. Conceptos Generales	7
2.1. Tomografía por Impedancia Eléctrica (TIE)	7
2.2. Problema directo	8
2.3. Reconstrucción de imágenes con EIDORS	10
2.4. Metodología SCRUM	11
2.5. Indicadores de Desempeño	12
3. Interfaz Gráfica de Usuario EIDORS (GUI-EIDORS)	15
3.1. Solucionadores del problema directo	15

3.2. Sistemas Matemáticos y Jacobianas	16
3.3. Diseño de GUI-EIDORS	17
3.3.1. Ventana Inicial	19
3.3.2. Componente modelo FEM 2D	22
3.3.3. Componente para modelos FEM 3D	26
3.3.4. Componente para modificación de distribución de conductividad en modelos FEM 2D	28
3.3.5. Ventana de solucionadores:	36
3.3.6. Componente de comparación:	39
3.3.7. Componente de comparación con datos reales:	44
4. Resultados	51
4.1. Comparación entre algoritmos	52
4.2. Caso 1: Con objeto no conductor	53
4.3. Caso 2: Con objeto conductor	58
4.4. Caso 3: Con objeto conductor y no conductor	63
4.5. Caso 4: Con objeto no conductor irregular e inyección opuesta 2D	63
4.6. Caso 5: Con modelo 3D inyección adyacente	68
4.7. Caso 6: Con modelo 3D inyección opuesta	73
4.8. Caso 7: Objeto no conductor en 3D, un anillo, dos anillos y zig-zag	77
4.9. Análisis de resultados de simulación	91
5. Conclusiones y Trabajos Futuros	99
5.1. Conclusiones	99
5.2. Trabajos Futuros	100

Índice de figuras

2.1. Diagrama problema directo.	10
3.1. Diagrama de usuario aplicación.	17
3.2. Diagrama de flujo aplicación.	18
3.3. Diagrama de usuario datos reales.	19
3.4. Interfaz inicial.	19
3.5. Tipo de mallas 2D, (A) Cuadrada, (B) Tórax, (C) Circular y (D) Precargada.	20
3.6. Tipo de mallas 3D, (E) Tórax, (F) Circular y (G) Precargada	21
3.7. Interfaz comparar datos reales vs simulación.	22
3.8. Resultados comparación datos reales vs simulación.	22
3.9. Diagrama de flujo malla 2D.	23
3.10. Configuración malla 2D.	25
3.11. Diagrama de flujo malla 3D.	26
3.12. Configuración malla 3D.	28
3.13. Diagrama de flujo componente de modificación de distribución de conduc- tividad 2D.	29
3.14. Malla enumerada.	30
3.15. Interfaz <i>help</i>	30

3.16. Ejemplo uno elemento por elemento.	31
3.17. Ejemplo dos elemento por elemento.	31
3.18. Modelo FEM 2D con objeto no conductor.	32
3.19. Interfaz perturbación 2D precargada.	33
3.20. Diagrama de flujo del componente de modificación de distribución de conductividad 3D.	34
3.21. Modelo de tórax 3D con objeto esférico conductor.	35
3.22. Modelo de tórax 3D con pulmones.	35
3.23. Diagrama de flujo solucionadores.	36
3.24. Métodos de inyección.	37
3.25. Interfaz solucionadores 1.	38
3.26. Interfaz solucionadores 2.	38
3.27. Interfaz solucionadores 3.	39
3.28. Interfaz comparadores.	40
3.29. Gráfica vista FEM.	41
3.30. Gráfica vista <i>slices</i>	42
3.31. Gráfica opción <i>current</i>	42
3.32. Gráfica de error.	43
3.33. Diagrama de flujo componente datos reales.	44
3.34. Montaje con objeto conductor.	45
3.35. Simulación con objeto conductor.	45
3.36. Montaje con objeto no conductor.	46
3.37. Simulación con objeto no conductor.	46
3.38. Montaje con objeto conductor y no conductor.	47

3.39. Simulación con objeto conductor y no conductor.	47
3.40. Interfaz de comparación datos reales vs simulación.	48
3.41. Interfaz comparación datos reales vs simulación, ya cargada.	48
3.42. Gráficas de voltaje.	49
4.1. Casos de comparación entre solucionadores.	52
4.2. Corriente en cada electrodo objeto no onductor.	53
4.3. Solución <i>default</i>	54
4.4. Solución primer orden.	54
4.5. Solución alto orden.	54
4.6. Solución <i>halfspace</i>	54
4.7. Solución aparente resistividad.	55
4.8. Error absoluto individual.	55
4.9. Error relativo individual.	56
4.10. Tiempo solucionadores.	57
4.11. Corriente en cada electrodo objeto conductor.	58
4.12. Solución <i>default</i> Conductor.	59
4.13. Solución primer orden conductor.	59
4.14. Solución alto orden conductor.	59
4.15. Solución <i>halfSpace</i> conductor.	59
4.16. Solución aparente resistividad conductor.	60
4.17. Error absoluto individual conductor.	60
4.18. Error relativo individual conductor.	61
4.19. Tiempo solucionadores conductor.	61

4.20. Malla diseñada con objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	64
4.21. Corriente en cada electrodo objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	64
4.22. Solución <i>default</i> objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	65
4.23. Solución primer orden objeto irregular no conductor e inyección opuesta. . .	65
4.24. Solución alto orden objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	65
4.25. Solución <i>halfSpace</i> objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	65
4.26. Solución aparente resistividad objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	66
4.27. Error absoluto individual objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	66
4.28. Error relativo individual objeto irregular no conductor e inyección opuesta.	67
4.29. Tiempo solucionadores objeto irregular no conductor e inyección opuesta. . .	67
4.30. Malla precargada.	68
4.31. Corriente en cada electrodo con modelo precargado 3D.	69
4.32. Solución <i>default</i> precargado.	69
4.33. Solución primer orden precargado.	69
4.34. Solución alto orden precargado.	70
4.35. Solución <i>halfspace</i> precargado.	70
4.36. Solución aparente resistividad precargado.	70
4.37. Error absoluto individual precargado.	71
4.38. Error relativo individual precargado.	71
4.39. Tiempo solucionadores precargado.	72
4.40. Corriente en cada electrodo con modelo precargado 3D inyección opuesta. . .	73
4.41. Solución <i>default</i> precargado inyección opuesta.	73
4.42. Solución primer orden 3D inyección opuesta.	74

4.43. Solución alto orden 3D inyección opuesta.	74
4.44. Solución <i>halfspace</i> precargado inyección opuesta.	74
4.45. Solución aparente resistividad precargado inyección opuesta.	74
4.46. Error absoluto individual precargado inyección opuesta.	75
4.47. Error relativo 3D inyección opuesta.	75
4.48. Tiempo solucionadores 3D inyección opuesta.	76
4.49. Corriente en cada electrodo, 1 anillo.	77
4.50. Corriente en cada electrodo, 2 anillos.	78
4.51. Corriente en cada electrodo, anillo zig zag.	78
4.52. Malla diseñada con perturbación en 3D.	78
4.53. Solución con 1 anillo.	79
4.54. Solución con 2 anillos.	79
4.55. Solución con anillo en zig-zag.	79
4.56. Solución con 1 anillo.	80
4.57. Solución con 2 anillos.	80
4.58. Solución con anillo en zig-zag.	80
4.59. Solución con 1 anillo.	80
4.60. Solución con 2 anillos.	81
4.61. Solución con anillo en zig zag.	81
4.62. Solución con 1 anillo.	81
4.63. Solución con 2 anillos.	81
4.64. Solución con anillo en zig-zag.	82
4.65. Solución con 1 anillo.	82

4.66. Solución con 2 anillos.	82
4.67. Solución con anillo en zig-zag.	82
4.68. Error absoluto 1 anillo.	83
4.69. Error absoluto 2 anillos.	83
4.70. Error absoluto anillo zig-zag.	84
4.71. Error absoluto total 1 anillo.	84
4.72. Error absoluto total 2 anillos.	85
4.73. Error absoluto total anillo zig-zag	85
4.74. Error relativo individual con 1 anillo.	86
4.75. Error relativo individual con 2 anillos.	86
4.76. Error relativo individual con zig-zag.	87
4.77. Error relativo total con 1 anillo.	87
4.78. Error relativo total con 1 anillo.	88
4.79. Error relativo total con anillo zig-zag.	88
4.80. Gráfica de tiempos total con 1 anillo.	89
4.81. Gráfica de tiempos total con 2 anillos.	90
4.82. Gráfica de tiempos total con anillo zig-zag.	90
4.83. Interfaz comparación simulación con datos reales objeto no conductor.	93
4.84. Comparación <i>frame</i> homogéneo (1) vs <i>frame</i> con artefacto (11).	93
4.85. Gráficas de voltaje simulación vs datos reales objeto no conductor.	94
4.86. Interfaz comparación simulación con datos reales objeto conductor.	95
4.87. Comparación <i>frame</i> homogéneo (1) vs <i>frame</i> con artefacto (15).	95
4.88. Gráficas de voltaje simulación vs datos reales objeto conductor.	96

4.89. Interfaz comparación simulación con datos reales con dos objetos, conductor y no conductor.	97
4.90. Comparación <i>frame</i> homogéneo (1) vs <i>frame</i> con artefacto (7).	97
4.91. Gráficas de voltaje simulación vs datos reales con dos objetos, conductor y no conductor.	98
5.1. Corriente en cada electrodo objeto no conductor 3D.	107
5.2. Malla diseñada con perturbación en 3D.	108
5.3. Solución <i>default</i> 3D.	108
5.4. Solución primer orden 3D.	108
5.5. Solución alto orden 3D.	108
5.6. Solución <i>halfspace</i> 3D.	109
5.7. Solución aparente resistividad 3D.	109
5.8. Error absoluto individual.	109
5.9. Error relativo individual.	110
5.10. Gráfica de tiempos total.	110
5.11. Corriente en cada electrodo objeto conductor 3D.	111
5.12. Malla diseñada con perturbación en 3D.	112
5.13. Solución <i>default</i> conductor 3D.	112
5.14. Solución primer orden conductor 3D.	112
5.15. Solución alto orden conductor 3D.	112
5.16. Solución <i>halfspace</i> conductor 3D.	113
5.17. Solución aparente resistividad conductor 3D.	113
5.18. Error absoluto individual.	113
5.19. Error relativo individual conductor 3D.	114

5.20. Gráfica de tiempos total conductor 3D.	114
5.21. Corriente en cada electrodo con dos objetos 3D.	115
5.22. Malla diseñada con dos perturbaciones en 3D.	115
5.23. Solución <i>default</i> con dos objetos 3D.	116
5.24. Solución primer orden con dos objetos 3D.	116
5.25. Solución alto orden con dos objetos 3D.	116
5.26. Solución <i>halfspace</i> con dos objetos 3D.	116
5.27. Solución aparente resistividad con dos objetos 3D.	116
5.28. Error absoluto individual.	117
5.29. Error relativo individual con dos objetos.	117
5.30. Gráfica de tiempos total con dos objetos.	118

Índice de tablas

1.1. Características de los métodos	4
4.1. Resultados de algoritmos de solución del problema directo.	52
4.2. Tabla comparativa solucionadores caso conductor.	58
4.3. Tabla comparativa solucionadores caso no conductor.	62
4.4. Tabla comparativa solucionadores caso conductor y no conductor.	63
4.5. Tabla comparativa solucionadores caso irregular.	68
4.6. Tabla comparativa solucionadores caso irregular 1.	72
4.7. Tabla comparativa solucionadores caso irregular 2.	76
4.8. Tabla comparativa solucionadores error absoluto (%).	85
4.9. Tabla comparativa solucionadores error relativo (%).	88
4.10. Tabla comparativa solucionadores tiempo procesamiento en segundos.	91
4.11. Tabla elección solucionadores.	91

Capítulo 1

Introducción

En el presente proyecto se diseñó una Interfaz de Guía de Usuario (GUI) desarrollada en Matlab, la cual permite la integración de los diversos algoritmos de solución del problema directo en tomografía por impedancia eléctrica disponibles en la plataforma EIDORS, permitiendo así, la creación de modelos, adición de perturbaciones y elección de algoritmos de solución. Con lo anterior se hace posible mostrar las gráficas resultantes en cuanto a los criterios cuantitativos estipulados para el problema directo.

La GUI permite realizar una comparación entre los diversos algoritmos de solución; el algoritmo con mejor desempeño es empleado para comparación entre modelos simulados de un tanque con perturbaciones conductoras y no conductoras y datos tomados de un tanque con solución salina mediante el equipo de tomografía diseñado por Mosquera y sus colegas [1].

La tomografía por impedancia eléctrica (TIE) es una técnica que permite obtener la imagen de la distribución de admitividad eléctrica al interior de un objeto, mediante la inyección de una señal de corriente y la medición, por medio de electrodos de superficie, de los potenciales generados por esta. La reconstrucción de las imágenes de TIE tienen la dificultad de solucionar un sistema de ecuaciones mal propuesto y mal condicionado, que relaciona la distribución de la conductividad al interior del objeto bajo estudio con los píxeles de la imagen [2, 3].

Uno de los aspectos importantes de la reconstrucción de imágenes de TIE es la solución del problema directo, que busca estimar los potenciales sobre los electrodos de superficie del sistema TIE, considerando conocida la señal de corriente aplicada y suponiendo un

modelo de distribución de conductividad [4, 5]. Existen muchos métodos orientados a la solución de este problema, el más común es el modelo de elementos finitos (FEM), el cual afronta el problema en el dominio discreto mediante una malla de segmentación del área de estudio, con la limitante que a mayor refinamiento de la malla de segmentación, el costo computacional se incrementa [6]. Para mejorar la limitante del costo computacional Zhang y sus colegas [7] proponen el método FEM generalizado (GFEM), el cual reduce los costos computacionales disminuyendo el refinamiento de la malla y obteniendo la misma precisión que el método FEM, aunque solo se han realizado pruebas de simulación. Otra alternativa para la solución del problema directo es el modelo completo del electrodo (CEM) que considera dos aspectos importantes en la solución del problema directo, que son: i) el cambio de dirección de la corriente debido a la alta conductividad de los electrodos y ii) la caída de tensión debido a la impedancia entre los electrodos y la superficie de contacto, aspectos que afectan la exactitud en el proceso de reconstrucción de las imágenes [8].

Existen algoritmos que buscan la solución del problema directo para objetos cuya forma varía con el tiempo, una alternativa de este tipo de algoritmos denominado método de libre de malla basado en Wavelet (WMF) que muestra resultados prometedores, con un exigente costo computacional [9]. Otros métodos como el modelo de bloques mejorado (IBM) y extendido (EBM) [10, 11] muestran resultados bajo simulación únicamente y basan su efectividad en la exactitud de estimación de la distribución de potencial, pero no presentan un estudio comparativo con los otros métodos, al igual que el algoritmo de mínimo residual (MINRES), que resuelve el sistema de ecuaciones mediante matrices simétricas [12].

En algunos trabajos se presentan análisis comparativos entre dos algoritmos como se puede evidenciar en [13, 14, 8]; pero no existe un estudio que muestre el desempeño de varios métodos de solución del problema directo.

Considerando que la calidad de la imagen de la conductividad depende del desempeño del algoritmo de solución del problema directo [4] y observando las alternativas de solución presentadas anteriormente, este proyecto busca desarrollar una aplicación que facilite un proceso comparativo entre diferentes algoritmos de solución del problema directo; lo cual genera la siguiente pregunta a responder ¿Qué características se deben considerar para desarrollar un proceso comparativo entre algoritmos de solución del problema directo en la reconstrucción de imágenes de TIE?

1.1. Estado del Arte

La TIE es una técnica de reconstrucción de imágenes no invasiva, que ofrece un gran campo de acción debido a su bajo costo, portabilidad y seguridad en el manejo [3]. En el campo médico, esta técnica permite el estudio de múltiples afecciones que puedan tener órganos que se encuentran ubicados en la caja torácica; uno de los órganos más estudiados es el pulmón, donde los resultados de la TIE son promisorios en el diagnóstico de diversas patologías [15].

El principal problema en la reconstrucción de imágenes en la TIE, es la representación matemática de la distribución del potencial eléctrico, el cual es un sistema de ecuaciones no lineales mal condicionadas [3]. La reconstrucción de imágenes de TIE requiere la solución de este sistema de ecuaciones que se encuentra dividido en el problema directo y problema inverso [2]. La calidad de la imagen reconstruida depende de la exactitud del modelo de distribución de conductividad (*Forward Model*) y de la solución del problema directo.

Uno de los métodos más empleados para la resolución del problema directo, es el FEM [16], aunque posee algunas desventajas, como la baja Relación Señal a Ruido (SNR) y la exigencia de una gran capacidad tanto de procesamiento como de almacenamiento en memoria [7]. Con el fin de mejorar estos aspectos, se han realizado investigaciones para mejorar este método, creando el FEM generalizado (GFEM), el cual muestra un mejor desempeño en cuanto a costo computacional y SNR, por ello el GFEM es un método prometedor para estudios futuros en TIE.

También se han explorado alternativas como: el Método de Elementos de Frontera (BEM) [17] y el Domain Embedding Method [*Domain Embedding Method*] (DEM) [18] donde el primero sobresale con resultados prometedores y el segundo combina las características de los métodos FEM y BEM, mejorando la solución del problema directo en 3D, pero solo se presentan resultados a nivel de simulación.

Otra alternativa para la solución del problema directo en TIE es el denominado Modelo de Electrodo Completo (CEM), que es estudiado por Markus Jehl y sus colegas [8]. Este presenta muy buenos resultados en cuanto a costo computacional, no obstante, no se han efectuado comparaciones con otros métodos, dejando así un vacío para futuras investigaciones.

Los algoritmos mencionados en su gran mayoría son analizados bajo simulación, a diferencia del método FEM, el cual Zhang y sus colaboradores [19] emplean para analizar las

imágenes de TIE de los pulmones en el proceso respiratorio, siendo este método el único validado en seres humanos.

A continuación en la tabla 1.1 se muestran las características de los métodos de solución al problema directo en la TIE, en ella se pueden observar sus ventajas y desventajas. Cabe resaltar que no se han encontrado estudios comparativos entre ellos.

Método	Evaluación	Ventajas	Desventajas
FEM	in-vivo y simulación	Utiliza una malla para discretizar el dominio [6], validado en humanos [2, 4, 6, 12, 20, 16, 17, 19, 21, 22, 23].	Exige gran capacidad de memoria para el procesamiento.
G-FEM	Simulación	Mejora el desempeño en comparación con el FEM, esto se debe a que utiliza diferentes órdenes de interpolación nodal.	Debido a que es una variación del FEM, creado por Zhang [7].
CEM	Simulación	Buena resolución de las imágenes, lo cual es directamente proporcional con el costo computacional [8].	Alta afectación en la medición de potencial de la impedancia de contacto, limitaciones en entornos con geometrías heterogéneas como el tórax.
DEM	Simulación	Emplea la transformada wavelet para la solución [18].	No presenta análisis comparativo con otros métodos.
Híbrido FEM-BEM	Simulación	Para contornos pequeños, reduce la relación de la exactitud en la reconstrucción con el tamaño de la sección de estudio, buena resolución de imágenes a bajo costo computacional con buena relación señal a ruido [17].	Este es uno de los métodos más recientes, por este motivo se encuentra poca información como pocos estudios.
WMF	Simulación	Alta eficiencia en contornos irregulares y artefactos en movimiento [9, 24].	Limitado a reconstrucciones 2D.

Tabla 1.1: Características de los métodos

Se resalta de la información consignada en la tabla 1.1, que en su gran mayoría, los

algoritmos propuestos por la comunidad científica aún se encuentran en proceso de análisis bajo simulación, pero no permiten realizar un estudio comparativo debido que los índices de desempeño no son unificados; los que se busca con este proyecto es el desarrollo de una herramienta que permita evaluar el desempeño de diferentes algoritmos bajo unos criterios cuantitativos unificados y facilitar la selección de un algoritmo de solución del problema directo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar el desempeño de diferentes algoritmos para la solución del problema directo en la reconstrucción de imágenes de tomografía por impedancia eléctrica.

1.2.2. Objetivo Específicos

- Definir criterios cuantitativos para la comparación en la reconstrucción de imágenes de distribución de potencial, en tomografía por impedancia eléctrica.
- Desarrollar una aplicación en Matlab para la aplicación de los criterios definidos aplicados a los algoritmos de solución del problema directo.
- Evaluar los algoritmos de solución del problema directo, disponibles en EIDORS bajos los criterios definidos.

Capítulo 2

Conceptos Generales

2.1. Tomografía por Impedancia Eléctrica (TIE)

La TIE inició hace aproximadamente 85 años con la finalidad de medir propiedades geológicas, sin embargo, la aplicación clínica tan solo lleva 35 años. En el caso médico la TIE permite estimar la conductividad interna de un objeto, el procedimiento consiste en aplicar una corriente eléctrica y medir el potencial eléctrico generado mediante un arreglo de electrodos en la superficie del objeto bajo estudio; es un método de bajo costo y no invasivo [25].

Por su característica no invasiva y como solución frente a las técnicas de reconstrucción de imágenes basadas en ionización, la TIE se proyecta como una técnica con grandes expectativas hacia el futuro. Algunas de las aplicaciones que sobresalen son: análisis del sistema respiratorio (pulmones) [26] [27], del corazón [23], de actividades neuronales [28] y de las glándulas mamarias [29].

La reconstrucción de imágenes de TIE busca la solución de dos problemas: el problema inverso, que consiste en calcular la distribución de impedancia conociendo el voltaje en los electrodos y la corriente inyectada, y el problema directo, que estima el potencial sobre los electrodos de superficie conocida la corriente inyectada y el modelo de distribución de conductividad. Para solucionar el problema inverso, es necesario resolver el problema directo [16, 30].

Como lo sugieren Zhang y sus colegas [19], la TIE puede brindar información médica importante sobre el paciente, estando en la capacidad de detectar afecciones del sistema

respiratorio como por ejemplo la detección de coágulos en los pulmones, entre otras afecciones. El procedimiento a realizar en este caso es: conectar un collar de electrodos de electrocardiograma (ECG) directamente a la piel, sin recurrir a la aplicación de lubricantes. Teniendo en cuenta los diferentes patrones de inyección, se determina que electrodos serán los encargados de inyectar y drenar la corriente alterna aplicada, sabiendo que en los electrodos restantes se medirá el voltaje generado por la corriente de inyección, es necesario recalcar que dichas funciones de inyección, drenaje y medición se alternan constantemente, también hay que aclarar que la corriente inyectada habitualmente es menor a 10 mA y su frecuencia oscila entre 10kHz y 1MHz, ya que con estos valores dicha corriente no genera molestias ni daños al paciente. La señal habitualmente es suministrada por una fuente de corriente, la cual es alimentada por una señal de voltaje generada por un Sintetizador Digital Directo (DDS), esta pasa por un conversor DAC y por un filtro pasa bajas, siendo el DAC el encargado de convertir la señal digital en analógica, mientras que el filtro se encarga de reducir el ruido; finalmente esta corriente es inyectada al objeto de estudio, en donde se medirán los voltajes sobre los electrodos, dichos valores pasan por un amplificador diferencial y por dos filtros, uno pasa altas y otro pasa bajas, para minimizar las distorsiones. Posteriormente como dichas señales obtenidas son analógicas, deben pasar por un conversor ADC que se encarga de convertirlas en señales digitales, las cuales son procesadas por un demodulador para obtener la magnitud y fase de las señales de voltaje medidas. Una vez realizado lo anterior, se procede a dar solución a los problemas directo e inverso para obtener una reconstrucción gráfica apropiada [31].

2.2. Problema directo

En el presente trabajo se aborda el problema directo, que parte de la creación de un modelo de distribución de conductividad, y conocida la corriente inyectada a este modelo se estiman los potenciales sobre los electrodos [16].

El algoritmo más empleado para solucionar el problema directo es el FEM, que primero discretiza el entorno bajo análisis, en un número finito de elementos o malla. Dentro de cada elemento la variable de campo eléctrico, se aproxima mediante funciones de interpolación en puntos específicos denominados nodos, la gran mayoría de trabajos en TIE emplean funciones de forma lineal [4].

La reconstrucción de imágenes de TIE se basa en la ecuaciones de Maxwell, donde dado un dominio (Ω), encerrado por un contorno o frontera ($\partial\Omega$) le es inyectada una corriente

constante de baja frecuencia (entre $10kHz$ y $1MHz$) [32], a través de un arreglo de electrodos de superficie determinado por $8 \cdot 2^n$ ($n=0,1,2,4,\dots$) y los potenciales (ϕ) generados en los electrodos por la corriente inyectada son medidos. El potencial eléctrico (ϕ) se puede representar como: [33]

$$E = -\nabla\phi(x, y) \quad (2.1)$$

La forma puntual de la ley de Ohm muestra que:

$$J = \sigma E(x, y) \quad (2.2)$$

Donde J es la densidad de corriente, σ es la conductividad. Si no hay una fuente de corriente dentro del dominio se tiene:

$$\nabla \bullet J = 0 \quad (2.3)$$

Combinando las ecuaciones 2.1-2.3 se obtiene que:

$$\nabla \bullet \sigma \nabla \phi(x, y) = 0 \quad (2.4)$$

Esta ecuación diferencial parcial no lineal que representa la electrodinámica de la TIE, se conoce como la ecuación de gobierno (2.4) [4] [34] y tiene un número infinito de soluciones. Las condiciones de frontera requeridas para restringir estas soluciones, se pueden aplicar para especificar el valor de ciertos parámetros en la superficie, estos pueden ser el potencial en la superficie (condiciones de Dirichlet), la densidad de corriente que cruza el límite (condiciones de Neumann) o las condiciones mixtas.

1. Condiciones de frontera de Dirichlet:

$$\phi = \phi_i \quad (2.5)$$

Donde $i=1,2,\dots,m$. Son los potenciales medidos en los electrodos (m =número de electrodos).

2. Condiciones de frontera de Neumann:

$$\int_{\partial\Omega} \sigma \frac{\partial\phi}{\partial\eta} = \begin{cases} +i & \text{para el electrodo inyector} \\ -i & \text{para el electrodo drenador} \\ 0 & \text{para otros valores limítrofes} \end{cases} \quad (2.6)$$

Donde η es el vector unitario normal externo a la superficie del electrodo.

En el problema directo se determina una relación entre los potenciales en los electrodos y el dominio de conductividad [35] a partir de la ecuación (2.5):

$$[\phi] = [K][\sigma] \quad (2.7)$$

Donde $[\sigma]$ es el vector de los valores de conductividad, $[\phi]$ es el vector de mediciones de voltaje y $[K]$ es la matriz de transformación que relaciona ϕ con σ . Si K y σ son conocidos, la ecuación puede resolverse numéricamente para calcular los potenciales nodales del dominio de conductividad conocida la corriente inyectada. En la figura 2.1 se puede observar de forma esquemática el problema directo.

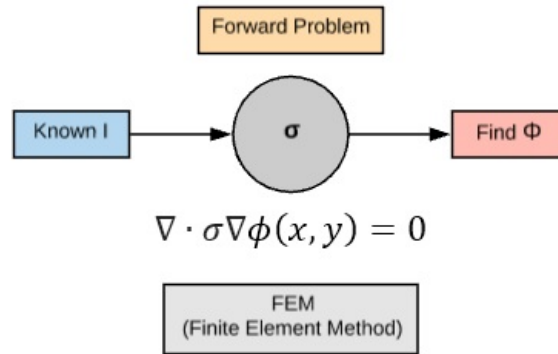


Figura 2.1: Diagrama problema directo.

2.3. Reconstrucción de imágenes con EIDORS

Para la reconstrucción de imágenes en tomografía por impedancia eléctrica, se emplea el software de código abierto EIDORS (*Electrical Impedance and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software*). Dicho software fue presentado originalmente como una

tesis de Ph.D. por Marko Vauhkonen en la Universidad de Kuopio, Finlandia [36]; en 2002, Lionheart y Polydorides desarrollaron la versión tridimensional de EIDORS en la Universidad de Manchester, Reino Unido [37].

El software EIDORS se ha reestructurado con el objetivo de proporcionar una base de software extensible diseñada para el uso, modificación y contribución de la comunidad académica. Lo que hace que esta plataforma albergue la experiencia colectiva y facilite la innovación en el campo de la TIE [38].

Para la reconstrucción de imágenes y solución del problema directo en TIE, tanto en los tutoriales de EIDORS como en múltiples artículos recopilados, es utilizado comúnmente el método FEM debido a su simplicidad y efectividad en cuanto a implementación. Este transforma un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto, lo cual es conocido como discretización del modelo. El diseño del modelo interno se obtiene mediante la interpolación de valores conocidos en los nodos, lo que indica que es una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número finito de puntos [39].

2.4. Metodología SCRUM

La metodología que se empleó para el desarrollo del trabajo de grado fue SCRUM, ya que esta permite tener un desarrollo incremental y de ser necesario, también regresar a cualquier etapa y realizar modificaciones (garantizando flexibilidad). A continuación se describen las etapas de desarrollo del proyecto:

- **Product Backlog:** Es la lista de funcionalidades del producto a desarrollar, teniendo en cuenta la prioridad y el orden de implementación de cada una de ellas. Para el presente trabajo de grado las funcionalidades son las siguientes:
 - Diseñar modelos FEM 2D y 3D.
 - Adicionar perturbaciones de distintas conductividades en Modelos FEM 2D y 3D.
 - Seleccionar el solucionador, sistema matemático y jacobiana.
 - Configurar los parámetros de inyección.
 - Indicar el tiempo empleado en solucionar las imágenes y mostrar las gráficas de corriente por electrodo, voltaje por medida, variación de voltaje por medida, vista FEM, vista *slices* y vista *current*.

- Comparar medidas de voltaje de datos reales y de simulación.
- **Stand up meeting:** Son básicamente las reuniones que se llevan a cabo cuando un *sprint* está en proceso, con el fin de identificar lo que se ha realizado anteriormente y qué es lo siguiente a realizar, en ello el *scrum master* juega un papel fundamental; en este caso el *scrum master* es el ingeniero Víctor Hugo Mosquera Leyton (usuario) y se realiza un *stand up meeting* cada semana.
- **Roles y responsabilidades en Scrum:**
 - **Product Owner (cliente):** Es el encargado del proyecto y verificar que todo se lleve a cabo cumpliendo con las expectativas. El usuario será quien cumplirá con este rol.
 - **Scrum Master:** Es la persona que lidera cada reunión, ayudando a solucionar los inconvenientes que se presentan en cada *sprint*, por lo anterior debe ser una persona con conocimiento y experiencia en el tema. El usuario será quien cumplirá con este rol.
 - **Scrum Team:** Es el personal encargado del desarrollo y la codificación del software para cumplir con los objetivos propuestos por el *product owner*.

El ingeniero Víctor Hugo Mosquera Leyton, de acuerdo a la metodología, se encargó de los roles de *Product Owner* y *Scrum Master*, mientras que los estudiantes Edinson Ivan Ortega y Carlos Manuel González se encargaron de ser el *Scrum Team*.

2.5. Indicadores de Desempeño

Los grupos de investigación que trabajan en la TIE, definen índices de desempeño, como el coeficiente de correlación, error absoluto, error relativo y exactitud, que indican el desempeño del proceso de reconstrucción. Para el caso del desempeño en la solución del problema directo y de la aplicación, los índices empleados son:

- **Tiempo de Solución:** Es el tiempo que tarda cada solucionador en resolver la imagen indicada.

- **Error Absoluto:** Indica el porcentaje de variación de voltaje entre la malla homogénea y la heterogénea, se obtuvo con la fórmula que se muestra a continuación [40].

$$Err_{abs}(\%) = \frac{|V_{HT} - V_{HM}|}{N_{med}} * 100 \quad (2.8)$$

Donde:

Err_{abs} : Error absoluto por medida.

V_{HT} : Voltaje de la malla heterogénea.

V_{HM} : Voltaje de la malla homogénea.

N_{med} : Número de medidas.

- **Error Relativo:** Compara el error absoluto con el valor que se tiene como referencia (malla homogénea), está dada por la fórmula de error relativo [40], que es:

$$Err_{rel}(\%) = \frac{|\frac{V_{HT}}{V_{HM}} - 1|}{N_{med}} * 100 \quad (2.9)$$

Donde:

Err_{rel} : Error relativo por medida.

V_{HT} : Voltaje de la malla heterogénea.

V_{HM} : Voltaje de la malla homogénea.

N_{med} : Número de medidas.

Hay que tener en cuenta que el número de medidas varía de acuerdo al número de electrodos y anillos presentes en el modelo y también con el método de inyección.

- **Distribución de Potencial:** Hace referencia al resultado gráfico que se obtiene al solucionar las imágenes, es decir, cual reconstrucción permite identificar más fácilmente la perturbación, para ello se dispone de las vistas FEM, *slices* y distribución de corriente.

Capítulo 3

Interfaz Gráfica de Usuario EIDORS (GUI-EIDORS)

En este capítulo se detallan los pasos para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario para EIDORS (GUI-EDORS), que permite la generación de modelos de conductividad o modelos FEM, además de comparar los diferentes solucionadores, sistemas matemáticos y jacobianas que se encuentran disponibles en EIDORS, para solucionar el problema directo.

3.1. Solucionadores del problema directo

Los solucionadores del problema directo presentan diferencias entre ellos, por ejemplo, el de *Alto Orden* requiere un modelo FEM de aproximación tanto en 2D como en 3D, el *Halfspace* admite solo algunas configuraciones respecto a los parámetros de inyección, a diferencia de los otros. Sin embargo, la entrada de la imagen (mallado y perturbación) para la reconstrucción y la posterior obtención de resultados, no difiere entre uno y otro. El solucionador “*2p5d_1st_order*” no se implementó puesto que no permite obtener resultados de voltaje impidiendo realizar la gráfica de distribución de potencial. Los algoritmos de solución del problema directo disponibles en este trabajo son:

- *Default* (implementado)
- Primer orden (implementado)
- 2p5d primer orden (NO implementado)

- Aparente resistividad (implementado)
- *Halfspace* (implementado)
- Alto orden (implementado)

3.2. Sistemas Matemáticos y Jacobianas

Cabe resaltar que todos los sistemas matemáticos reciben como argumentos de entrada el modelo directo y la imagen a resolver, excepto *system_mat_fields* y *system_mat_2p5d_fields*, que reciben como argumento de entrada simplemente el modelo directo.

Sistemas matemáticos

- Primer orden
- 2p5d primer orden
- 2p5d campos
- Campos
- Alto orden

Jacobianas

- Adjunta (implementada)
- Adjunta 2p5d primer orden (implementada)
- Adjunta alto orden (implementada)
- Aparente resistividad (implementada)
- Elementos a nodos (implementada)
- Filtrada (implementada)
- Movimiento (implementada)

- Movimiento 2p5d primer orden (implementada)
- Movimiento *halfspace* (NO implementada)
- Movimiento perturbación (implementada)
- Perturbación (implementada)

3.3. Diseño de GUI-EIDORS

En las figuras 3.2, 3.1, 3.3, se puede observar el diagrama de flujo de la GUI-EIDORS y los diagramas de uso, que se detallaran en el transcurso de esta sección.

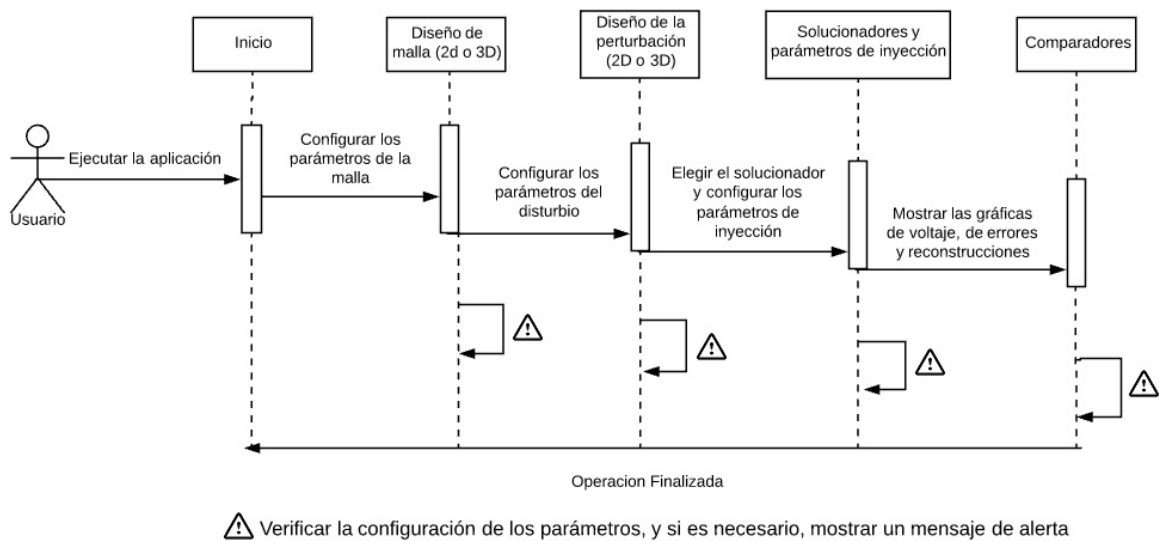
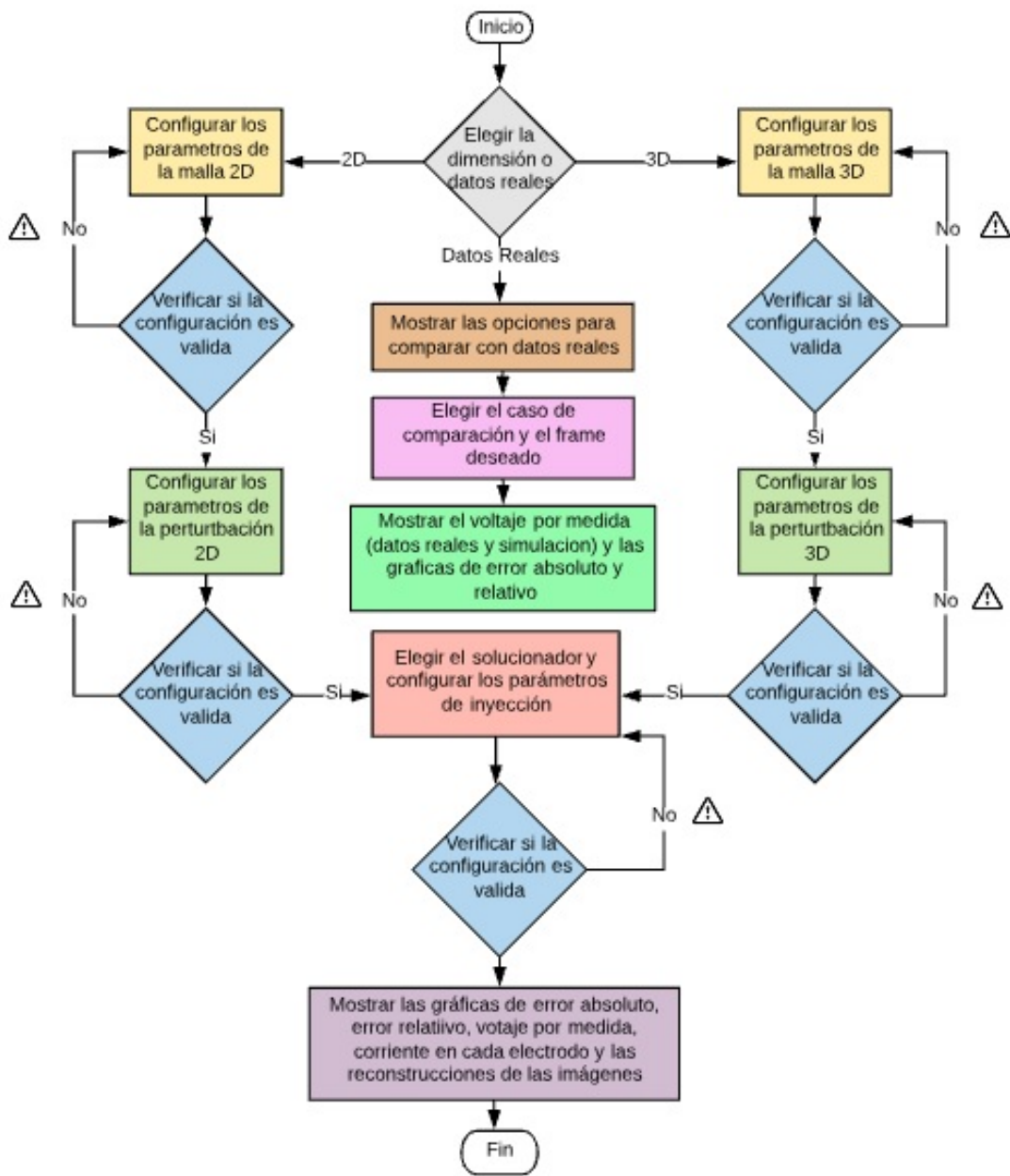


Figura 3.1: Diagrama de usuario aplicación. [Elaboración Propia]



⚠ Verificar la configuración de los parámetros, y si es necesario, mostrar un mensaje de alerta

Figura 3.2: Diagrama de flujo aplicación. [Elaboración Propia]

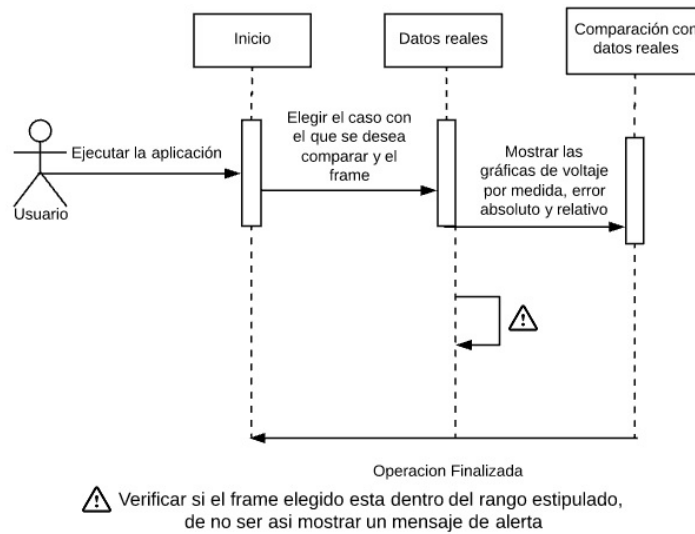


Figura 3.3: Diagrama de usuario datos reales. [Elaboración Propia]

3.3.1. Ventana Inicial

En la interfaz inicial se elige la dimensión en la cual se pretende trabajar o si se desea ver la comparación entre datos reales y simulados en modelos previamente diseñados.

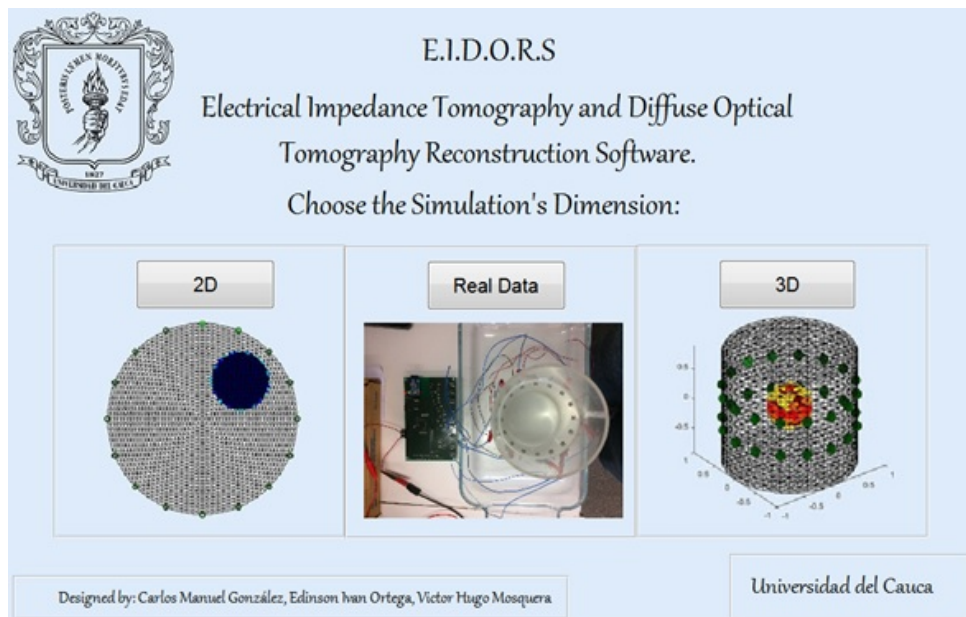


Figura 3.4: Interfaz inicial. [Elaboración Propia]

Una vez seleccionado el caso en el cual se desea trabajar, se abre una ventana para 2D, 3D o para datos reales, según corresponda; en las interfaces para 2D y 3D el usuario debe seleccionar los parámetros de la generación del modelo de distribución de conductividad o modelo FEM. Los modelos disponibles en 2D son: cuadrado, torácico, circular y precargados, ver imagen 3.5, mientras que en 3D son: cilíndrico, torácico y precargados, ver imagen 3.6; dentro de los parámetros a seleccionar se encuentran:

- Modelo FEM (estructura geométrica del contorno a crear).
- Densidad de la malla (número de elementos en los que se dividirá la malla).
- Número de electrodos.
- *Distmesh* únicamente disponible en las mallas torácica en 2D y circular (divide la malla en elementos más grandes hacia el centro y más finos en los bordes).
- Refinamiento de los elementos (se encuentra relacionado al *Distmesh*), con este se logra hacer una mayor discretización cerca de los electrodos.
- Sección transversal del tórax.
- Número de anillos de electrodos (únicamente en 3D).
- Distribución de los electrodos (únicamente en 3D).

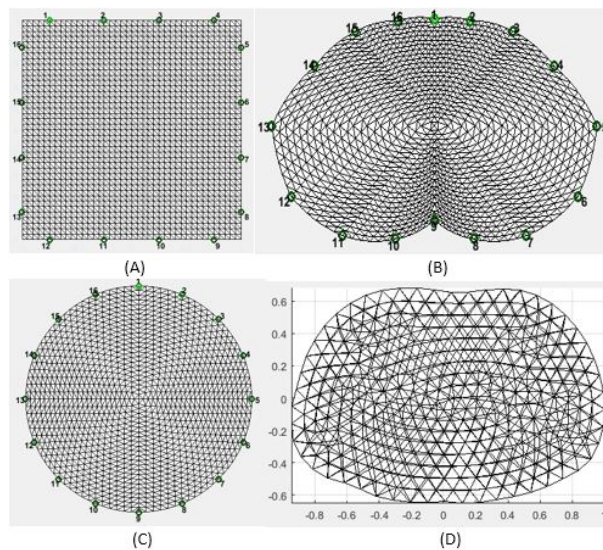


Figura 3.5: Tipo de mallas 2D, (A) Cuadrada, (B) Tórax, (C) Circular y (D) Precargada. [Elaboración Propia]

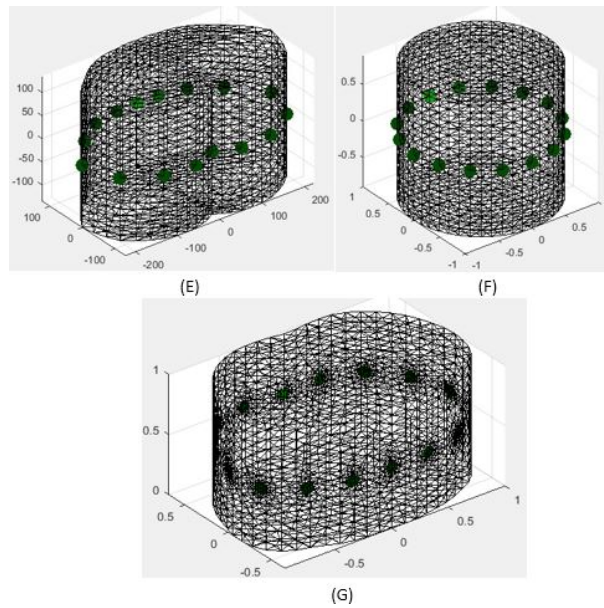


Figura 3.6: Tipo de mallas 3D, (E) Tórax, (F) Circular y (G) Precargada. [Elaboración Propia]

En cuanto a los modelos FEM precargados ya se encuentran diseñados, por lo que los parámetros anteriores no influyen sobre ellos.

Si se elige *Real Data*, se ingresa a una ventana en la cual se muestran los datos de:

- La simulación (el tipo de mallado, el número de electrodos, entre otros).
- El tanque (el radio de los materiales conductor y no conductor, entre otros).
- El tomógrafo (la versión y el proveedor).
- El equipo en el cual se realizaron las simulaciones (versión, memoria RAM y procesador).
- Casos de comparación (con elemento conductor, con elemento no conductor o ambos).

Cuando se selecciona alguno de los casos, se carga el modelo del tanque, previamente elaborado, adicionalmente se muestra cuántos *frames* posee dicha configuración y se solicita al usuario digitar el número del *frame* con el que desea realizar la comparación, como se muestra en la imagen 3.7; cuando se ha seleccionado la opción de comparar, se despliega

las gráficas de voltaje por toma de datos, error relativo y absoluto, como se observa en la imagen 3.8.

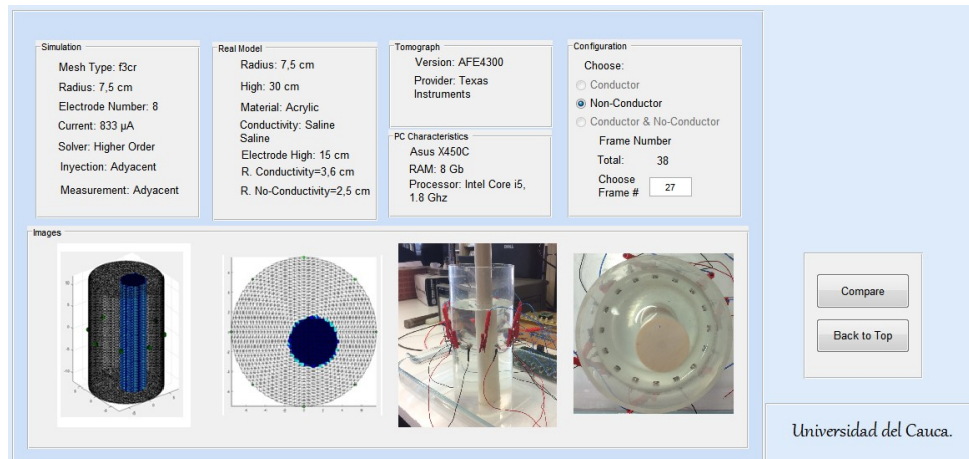


Figura 3.7: Interfaz comparar datos reales vs simulación. [Elaboración Propia]

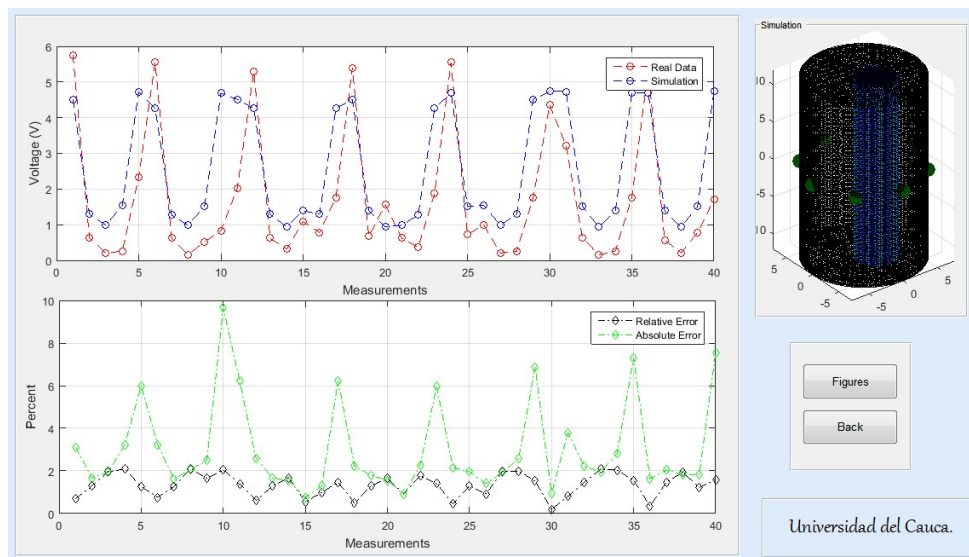


Figura 3.8: Resultados comparación datos reales vs simulación. [Elaboración Propia]

3.3.2. Componente modelo FEM 2D

El componente para el estudio en 2D se cuenta con diferentes opciones que permiten crear los modelos FEM cuadrados, torácicos, circulares o precargados. La figura 3.9 muestra el diagrama que permite la creación de los mencionados modelos FEM.

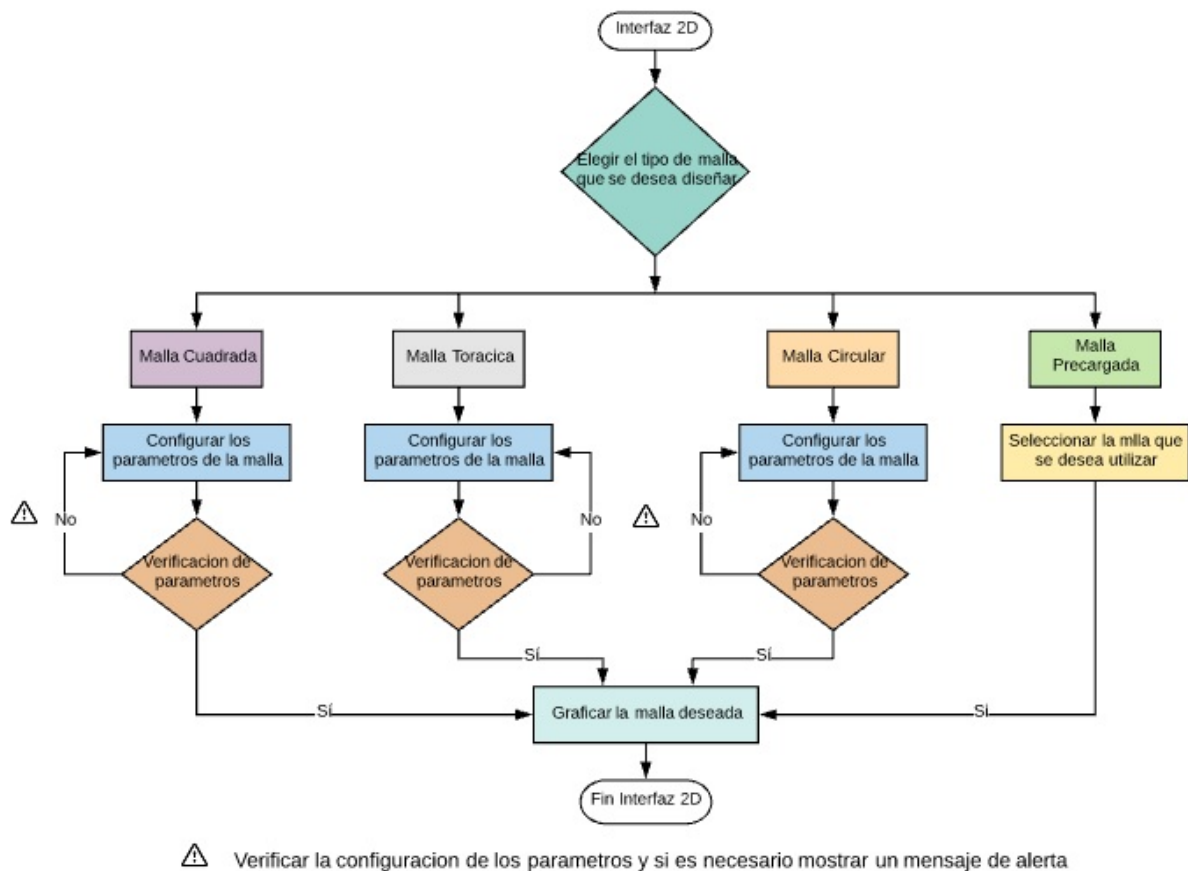


Figura 3.9: Diagrama de flujo malla 2D. [Elaboración Propia]

Modelo Cuadrado:

Para generar el modelo FEM se requiere configurar 2 parámetros:

- **Densidad:** Varía desde a (menor densidad) hasta k (mayor densidad).
- **Número de electrodos:** Cuyos valores pueden ser: 8, 16, 32 o 64.

Modelo Torácico:

Los parámetros requeridos son:

- **Densidad:** Varía desde a (menor densidad) hasta j (mayor densidad).

- ***Distmesh***: Se puede omitir o elegir entre d y D , la diferencia entre estas es que en la última se genera un movimiento previo a la estabilización de la discretización de la malla, sin embargo el resultado es el mismo.
- **Refinamiento de los electrodos**: Este parámetro se activa únicamente si se ha seleccionado *distmesh*, cuando se encuentra activado las opciones que se pueden elegir van de 0 (sin refinamiento) a 5 (mejor refinamiento).
- **Sección transversal del tórax**: Permite elegir la sección a estudiar del tórax, las opciones van desde 1 (pecho) hasta 5 (abdomen bajo).
- **Número de electrodos**: Cuyos valores pueden ser: 8, 16, 32 o 64.

Modelo Circular:

Los parámetros a configurar son:

- **Densidad**: Varía desde a (menor densidad) hasta j (mayor densidad).
- ***Distmesh***: Se puede omitir o elegir entre d y D , la diferencia entre estas es que en la última se genera un movimiento previo a la estabilización de la discretización de la malla, sin embargo el resultado es el mismo.
- **Refinamiento de los electrodos**: Este parámetro se activa únicamente si se ha seleccionado *distmesh*, cuando se encuentra activado las opciones que se pueden elegir van de 0 (sin refinamiento) a 5 (mejor refinamiento).
- **Modelo**: Permite elegir entre un modelo circular o uno de punto fijo, este último se puede seleccionar siempre y cuando el *distmesh* se encuentre activado, la diferencia entre estos dos es que el modelo de punto fijo es más rápido pero tiene un peor refinamiento.
- **Ángulo de rotación**: Como su nombre lo indica, permite rotar la malla, los ángulos permitidos son 22.5, 45 y 67.5.
- **Número de electrodos**: Cuyos valores pueden ser: 8, 16, 32 o 64.

En los tres modelos anteriores se realizan verificaciones pues ciertas densidades solo tienen capacidad hasta determinado número de electrodos, por ejemplo la malla cuadrada con

densidad a permite solo 8 electrodos máximo, en caso de que se elija un número mayor de electrodos se muestra un mensaje advirtiéndolo que dicha densidad no soporta el número seleccionado. Un mensaje de alerta se despliega cuando se selecciona *distmesh* y no se elige un nivel de refinamiento de los electrodos, ya que el refinamiento depende de esta funcionalidad. Otro mensaje de alerta se muestra en la malla circular cuando se selecciona el modelo de punto fijo (gráfica electrodos en forma de línea, mientras que en el circular los electrodos son representados por un punto) y contrario a *distmesh*, ya que el modelo de punto fijo es una opción de este, para la malla circular únicamente. Para graficar cualquier configuración de estos modelos, los parámetros seleccionados y concatenados se envían a una función llamada *graficar total.m*, la cual se encarga de crear el modelo y desplegarlo.

Modelo precargado:

Como estas mallas se encuentran diseñadas previamente, no requieren configuración de parámetros, simplemente se elige el modelo a estudiar, entre las opciones se encuentran: modelo de tórax de adulto con 16 o 32 electrodos, neonato con 16 o 32 electrodos, cerdo de 23 kilogramos con 16 o de 32 electrodos, o cordero recién nacido con 16 electrodos.

En la figura 3.10, se muestra el diseño del un modelo FEM 2D. Como se puede observar, se diseñó una malla circular, con densidad c , sin *distmesh*, por ende sin refinamiento de los electrodos, con ángulo de rotación de 0 grados y con 16 electrodos.

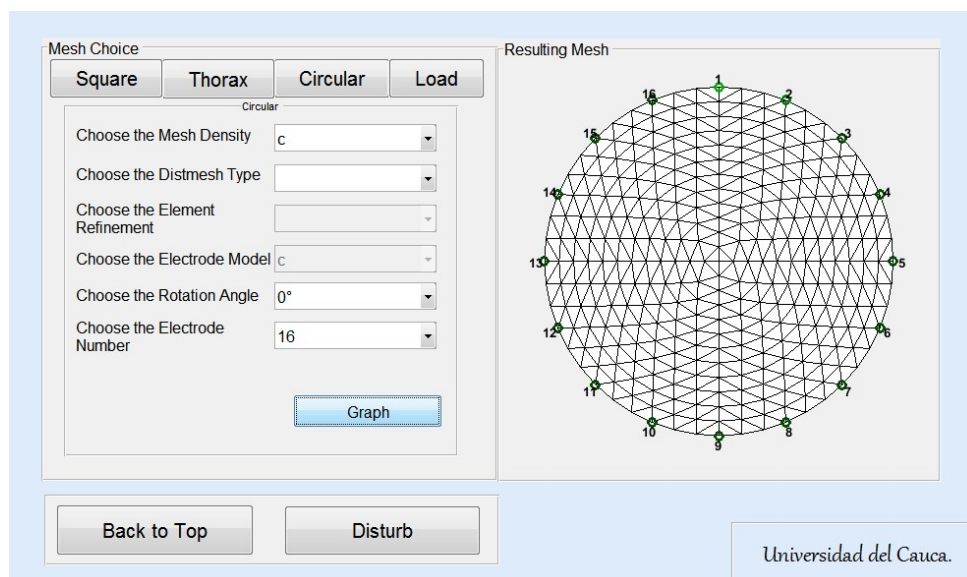


Figura 3.10: Configuración malla 2D. [Elaboración Propia]

3.3.3. Componente para modelos FEM 3D

El componente para modelos 3D cuenta únicamente con 2 opciones, una para seleccionar el modelo geométrico, el cual puede ser cilíndrico o torácico, y otra para seleccionar un modelo precargado. En la figura 3.11 se muestra el diagrama para el diseño de este componente.

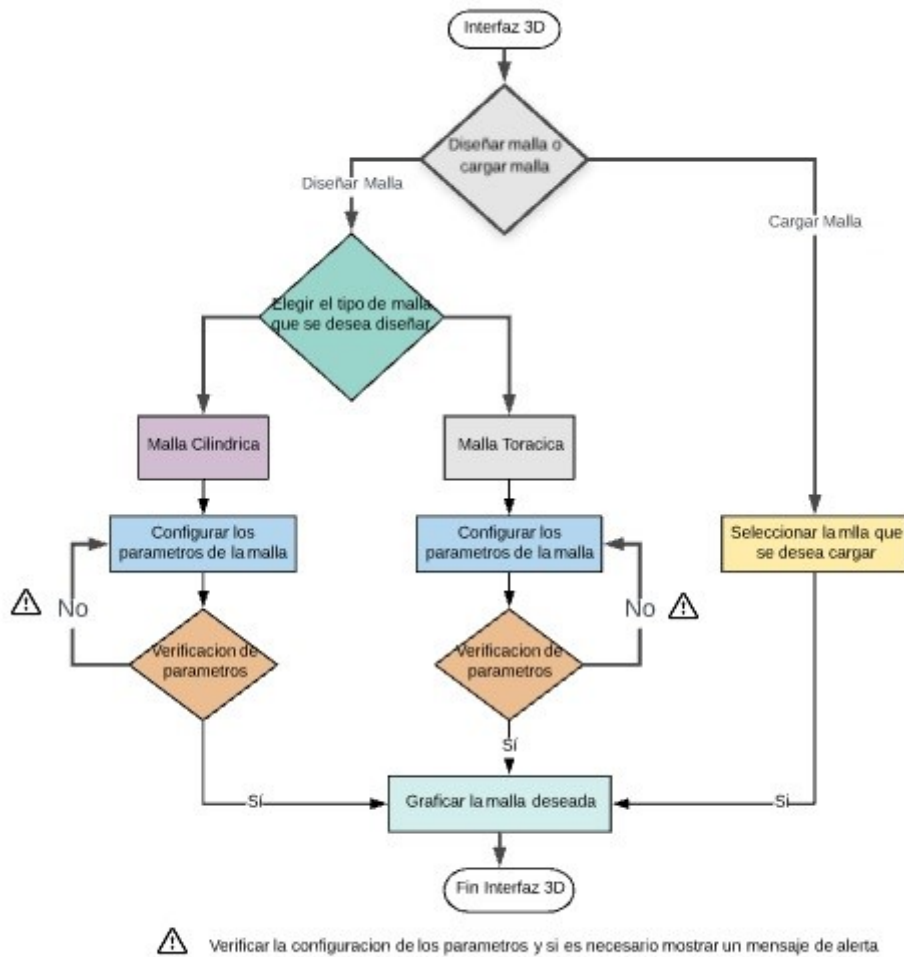


Figura 3.11: Diagrama de flujo malla 3D. [Elaboración Propia]

Modelo cilíndrico:

Los parámetros para crear este modelo son:

- **Densidad:**Varía desde a (menor densidad) hasta f (mayor densidad).

- **Distribución de los electrodos:** Permite elegir entre una distribución recta o una en zig-zag.
- **Número de anillos:** Permite elegir el número de electrodos que tendrá el modelo, si se opta por una distribución recta, se puede seleccionar mínimo 1 y máximo 5, por otra parte si se escoge la distribución en zig-zag, únicamente se puede elegir el mínimo de anillos (1).
- **Número de electrodos:** Cuyos valores pueden ser: 8, 16 o 32.

Modelo torácico:

Los parámetros para esta opción son:

- **Densidad:**Varía desde a (menor densidad) hasta f (mayor densidad).
- **Sección transversal del tórax:** Permite elegir la sección a estudiar del tórax, las opciones van desde 1 (pecho) hasta 5 (abdomen bajo).
- **Distribución de los electrodos:** Permite elegir entre una distribución recta o una en zig-zag.
- **Número de anillos:** Permite elegir el número de electrodos que tendrá el modelo, si se opta por una distribución recta, se puede seleccionar mínimo 1 y máximo 5, por otra parte si se escoge la distribución en zig-zag, únicamente se puede elegir el mínimo de anillos (1).
- **Número de electrodos:** Cuyos valores pueden ser: 8, 16 o 32.

Para estos modelos se realizan verificaciones, ya que ciertas densidades solo tienen capacidad hasta determinado número de electrodos, por ejemplo, la malla cilíndrica con densidad a permite 16 electrodos máximo, en caso de que se elija un número mayor, se muestra un mensaje advirtiendo que dicha densidad no soporta el número seleccionado.

Modelo precargado:

Como se explicó anteriormente en los modelos precargados 2D, estos se encuentran diseñados previamente, no requieren configuración de parámetros, simplemente se elige el

modelo a estudiar, entre las opciones se encuentran: modelo de tórax de adulto con 16 o 32 electrodos, neonato con 16 o 32 electrodos, cerdo de 23 kilogramos con 16 o 32 electrodos, o cordero recién nacido con 16 electrodos.

En la figura 3.12, se muestra el componente que permite el diseño de modelos FEM 3D. Como se puede observar, se diseña un modelo torácico, cuya sección transversal es la número 3, con distribución recta de los electrodos y con 2 anillos, cada uno con 16 electrodos.

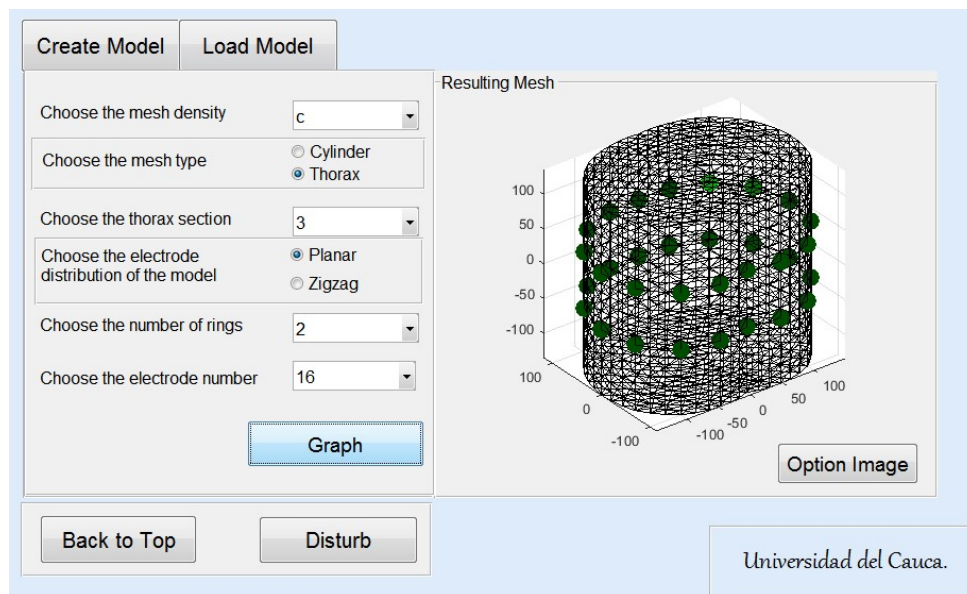


Figura 3.12: Configuración malla 3D. [Elaboración Propia]

3.3.4. Componente para modificación de distribución de conductividad en modelos FEM 2D

Este componente permite la adición de elementos perturbadores en un modelo FEM 2D diseñado, cuenta con 3 métodos para modificar la distribución de conductividad: i) modo manual (elemento por elemento), ii) perturbación diseñada (creación de perturbaciones por coordenadas y radios o lados (círculo y elipse)), y iii) objetos precargados. El diagrama de la figura 3.13 presenta el diseño de este componente.

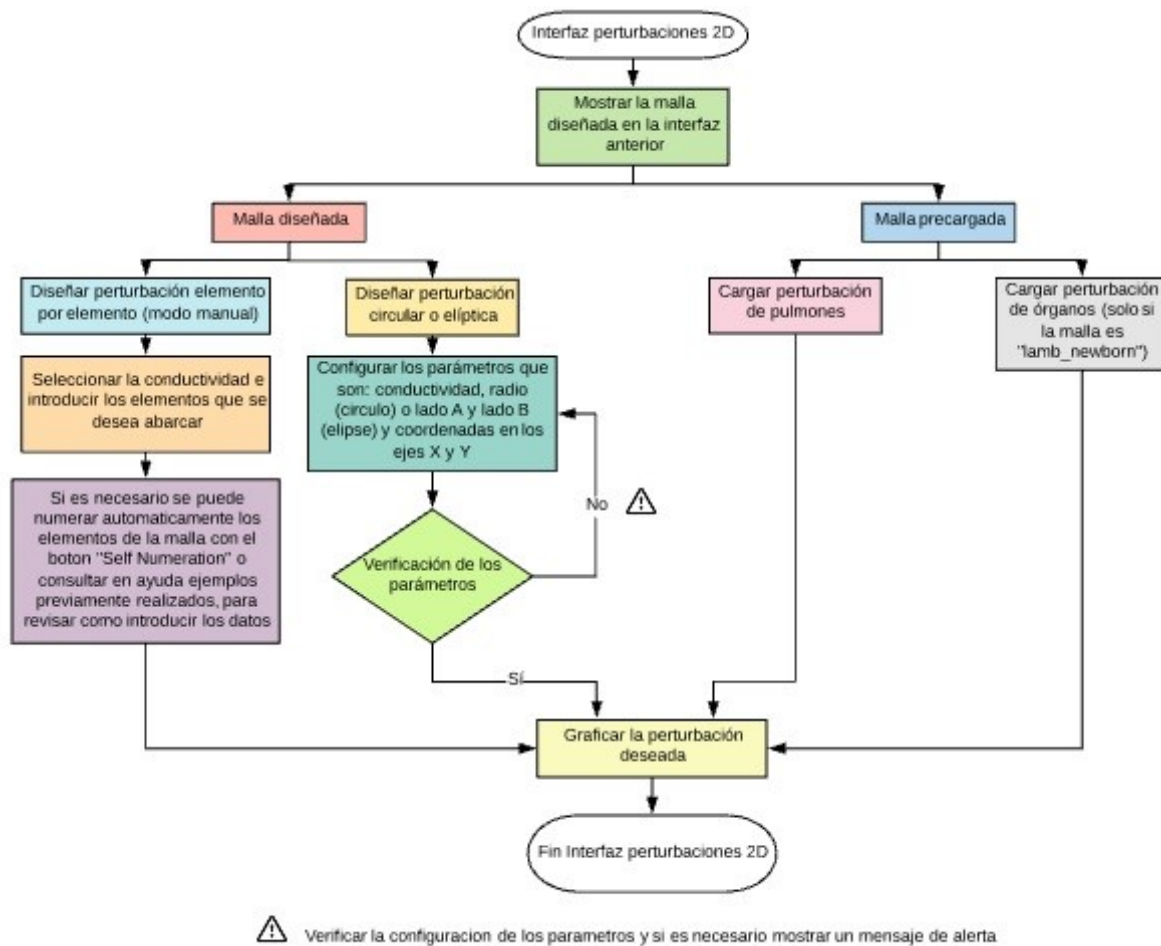


Figura 3.13: Diagrama de flujo componente de modificación de distribución de conductividad 2D. [Elaboración Propia]

Modo manual (elemento por elemento):

Permite cambiar la conductividad de cada elemento seleccionado dentro de la malla del modelo FEM diseñado, este componente tiene la opción de numeración automática de elementos que componen la malla (Figura 3.14) y otra de ayuda, que contiene ejemplos de cambios de conductividad y explica cómo seleccionar los elementos que se desean modificar de la malla.

En la figura 3.14 se muestra la malla circular con densidad c y 16 electrodos, cuando se presiona el botón de *Self Numeration*, como se puede ver, se abre una pestaña emergente con la malla y cada elemento enumerado.

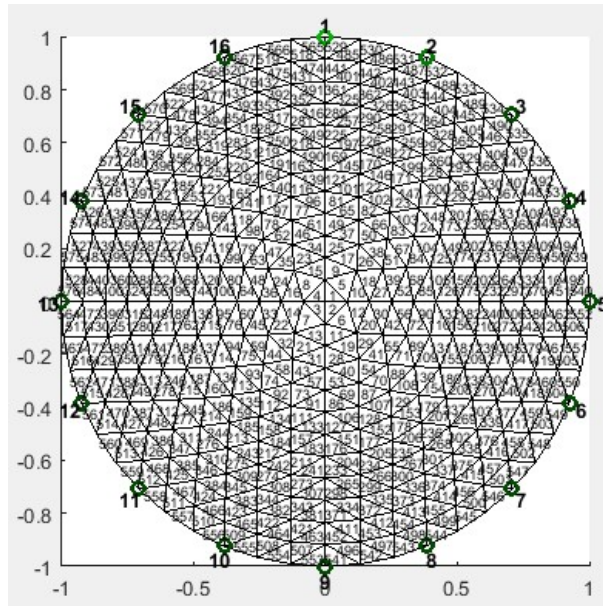


Figura 3.14: Malla enumerada. [Elaboración Propia]

En la figura 3.15 se muestra la ventana que se abre cuando se presiona el botón *Help*, donde en primera instancia se puede ver una malla con los elementos enumerados automáticamente; dentro de las pestañas ejemplo 1 y ejemplo 2 se muestran perturbaciones y cuáles son los elementos que se seleccionaron para crearlas, como se indica en las figuras 3.16 y 3.17.

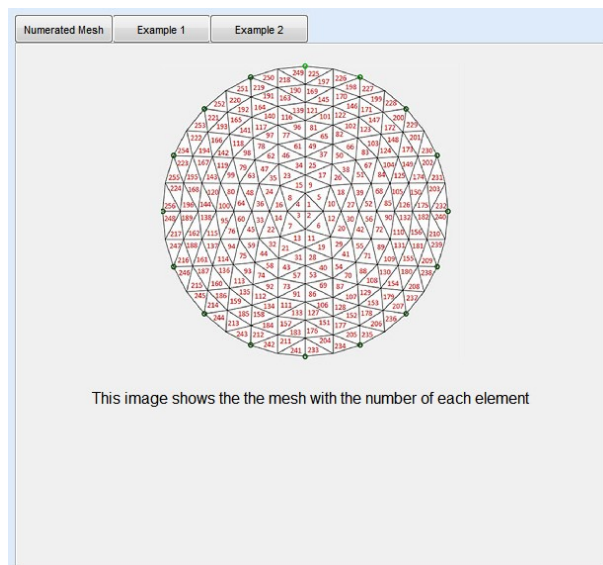


Figura 3.15: Interfaz *help*. [Elaboración Propia]

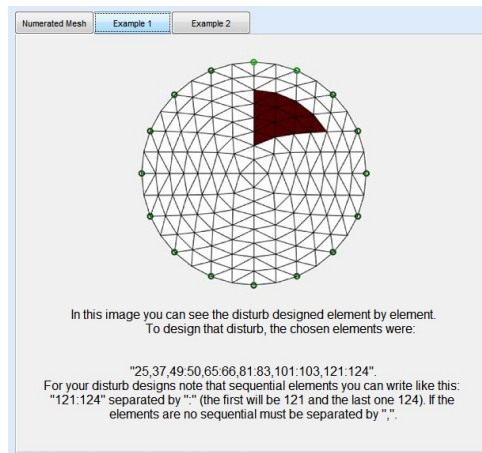


Figura 3.16: Ejemplo uno elemento por elemento. [Elaboración Propia]

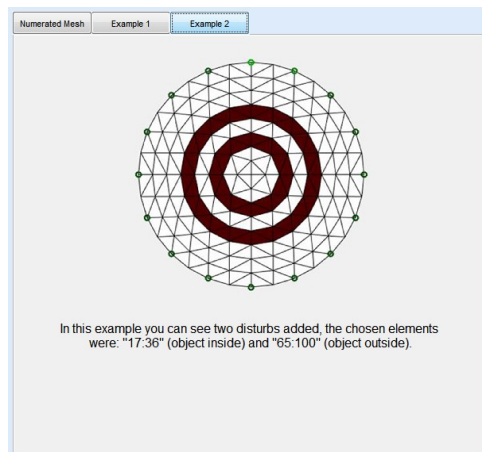


Figura 3.17: Ejemplo dos elemento por elemento. [Elaboración Propia]

Perturbación diseñada:

Los parámetros para modificar la conductividad de los elementos son:

- **Forma de objeto a insertar:** Se puede elegir entre circular, elíptica o ambas.
- **Conductividad:** Brinda la posibilidad de elegir entre si la perturbación será conductora o aislante.
- **Radio, lado A (horizontal) y lado B (vertical):** Determina el tamaño que poseerá el círculo; los lados A y B son los semi-ejes para la creación de la elipse.

Es necesario tener en cuenta que el radio y los lados pueden variar de acuerdo al tamaño de la malla, por ejemplo para el caso de las mallas torácicas usualmente el eje Y va desde -100 hasta 100 y el eje X desde -200 hasta 200, pero para el caso de las mallas cuadrada y circular el tamaño va desde -1 a 1 en ambos ejes. En caso de que el radio o los lados excedan los límites de los ejes, se muestra un mensaje de alerta.

- **Coordenadas en X e Y:** Son necesarias para la ubicación de la perturbación. Al igual que el radio y los lados, las coordenadas deben encontrarse entre los valores de -100 a 100 en el eje Y y de -200 a 200 en el eje X si es una malla torácica, si es una malla circular o una cuadrada deben estar entre -1 y 1 en los ejes X e Y. En caso de que las coordenadas excedan los límites se muestra un mensaje de alerta.

Una vez ingresados los datos, la función *Comprobar*, se encarga de verificar que los parámetros no se encuentren vacíos y que no sobrepasen los límites de los ejes, los mensajes de advertencia, en caso de que los parámetros excedan los límites, también son configurados en esta función. En el caso de que los parámetros se encuentren debidamente configurados, son enviados a la función *add* que se encarga de crear el nuevo modelo FEM que incluye los elementos u objetos de diferente conductividad.

En la figura 3.18, se muestra la inserción a un modelo FEM circular, de un objeto no conductor de radio 0.3 con centro en (0.2, 0).

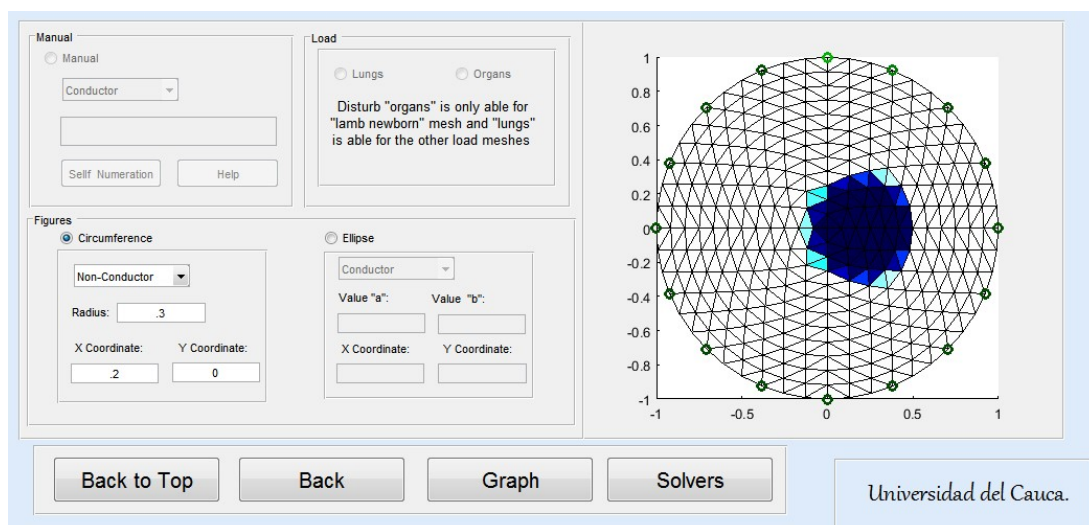


Figura 3.18: Modelo FEM 2D con objeto no conductor. [Elaboración Propia]

Objetos precargados:

Estos tienen lugar en los modelos de su mismo nombre y permiten elegir entre órganos o pulmones, según sea el modelo seleccionado, es decir, la adición de objetos con forma de órganos dentro del tórax solo se puede seleccionar si el modelo es *lamb_newborn*, para los demás únicamente se permite la inserción de objetos simulando los pulmones, ello debido a que son diseños establecidos en EIDORS.

En la figura 3.19, se muestra la adición de pulmones prediseñados, en este caso el modelo del tórax con los pulmones en 2D.

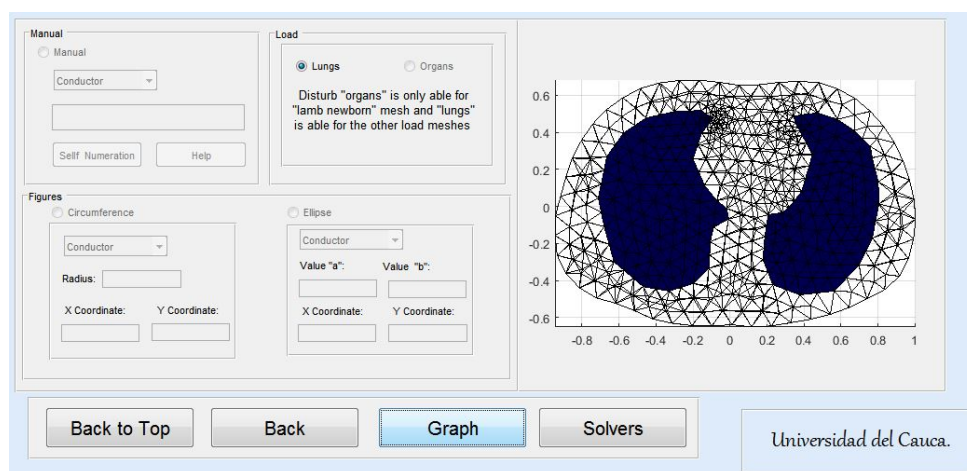


Figura 3.19: Interfaz perturbación 2D precargada. [Elaboración Propia]

Componente para modificación de distribución de conductividad en modelos FEM 3D:

El componente para modificación de distribución de conductividad en modelos 3D cuenta con 3 métodos para añadir o modificar las mallas, estos son el modo manual (elemento por elemento), objeto diseñado (creación de objetos por coordenadas y radios o lados (cilindro y elipsoide)), y objetos prediseñados para modelos precargados. A continuación se muestra el diagrama que se siguió para el diseño de esta interfaz (Figura 3.20).

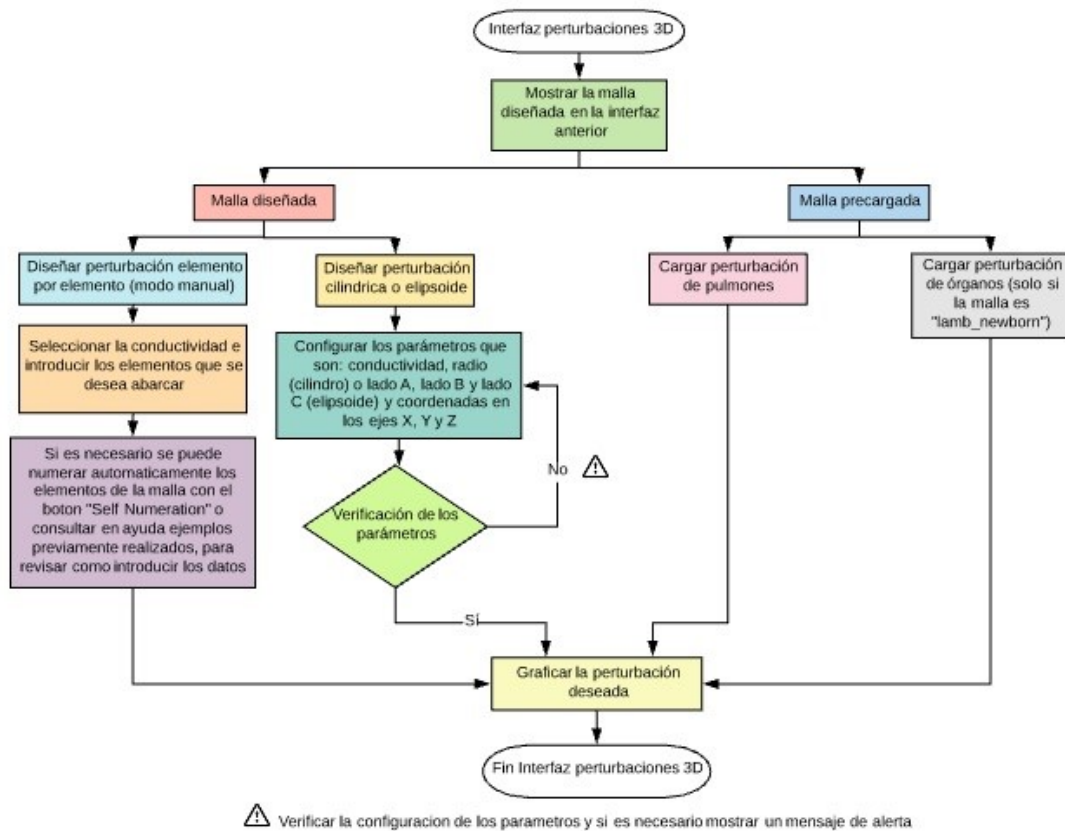


Figura 3.20: Diagrama de flujo del componente de modificación de distribución de conductividad 3D. [Elaboración Propia]

Como se explicó anteriormente, este componente permite diseñar objetos 3D, se requieren los mismos parámetros que el componente 2D, las únicas diferencias son: lado C el cual se requiere para graficar el elipsoide, y la coordenada en el eje Z, estos parámetros deben encontrarse entre los límites de los ejes, en caso contrario aparecerá un mensaje de alerta.

Los parámetros definidos se envían a la función *comprobar3d*, esta se encarga de verificar que las cajas de texto no se encuentren vacías y que los parámetros no sobrepasen los límites dados por los ejes, los mensajes de advertencia en caso de que se excedan los límites también son establecidos en esta función. Si los parámetros están debidamente configurados, son enviados a la función *graficar3D*, en donde se agregan los cambios de conductividad mediante los objetos 3D insertados.

En la figura 3.21, se muestra la ventana correspondiente al diseño de la objetos 3D; los parámetros para crear la esfera presente en la imagen son: conductor, 35 centímetros de radio y 30 centímetros en los ejes X, Y y Z.

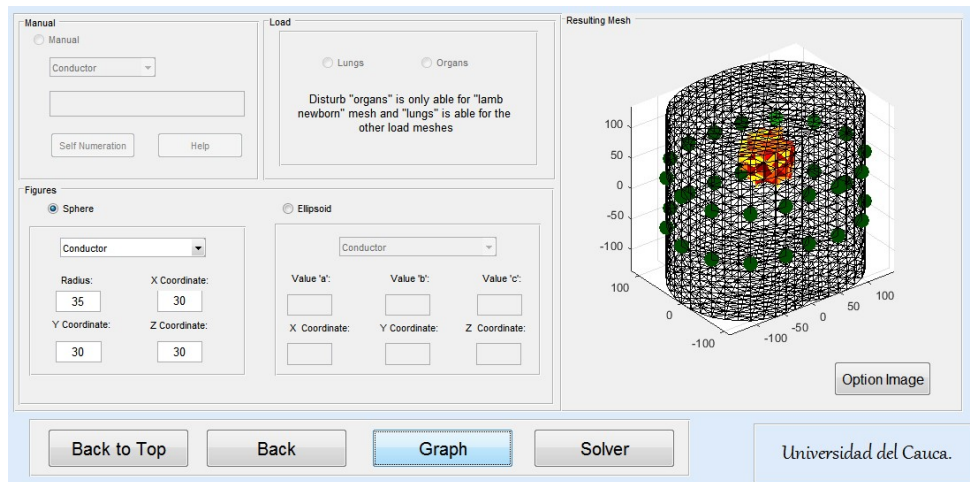


Figura 3.21: Modelo de tórax 3D con objeto esférico conductor. [Elaboración Propia]

Modificación de distribución de conductividad mediante objetos precargados:

Al igual que los objetos precargados para 2D, en el componente en 3D, diversos órganos se encuentran disponibles si el modelo seleccionado es: *lamb_newborn*, para los demás modelos únicamente es posible elegir los pulmones.

En la figura 3.22, se muestra la ventana que permite graficar perturbaciones precargadas, en este caso el tórax con los pulmones en 3D.

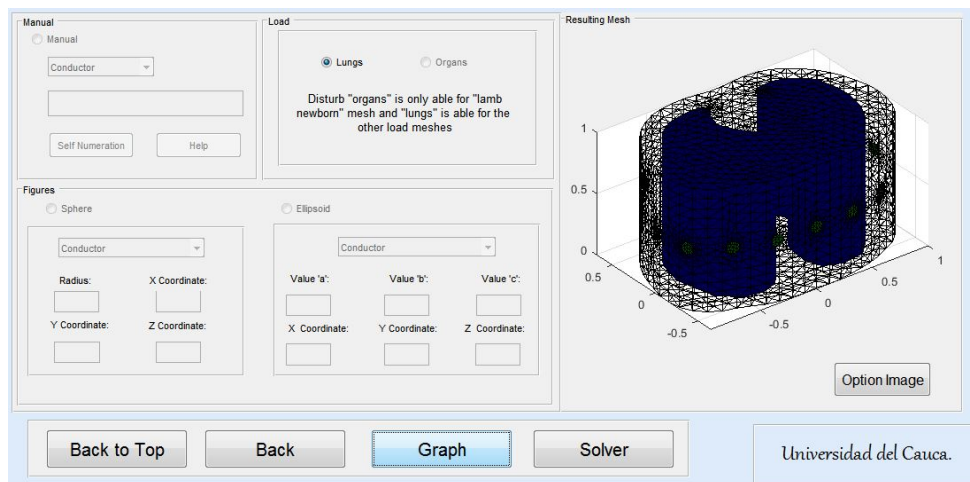


Figura 3.22: Modelo de tórax 3D con pulmones. [Elaboración Propia]

3.3.5. Ventana de solucionadores:

Este componente es igual para 2D y 3D, permite al usuario elegir el solucionador, el sistema matemático y la jacobiana, configurar los parámetros de inyección y amplitud de corriente y una vez solucionado el problema directo del modelo FEM permite desplegar las vistas FEM, *slices* o *current*. A continuación se muestra el diagrama que representa el diseño de este componente.

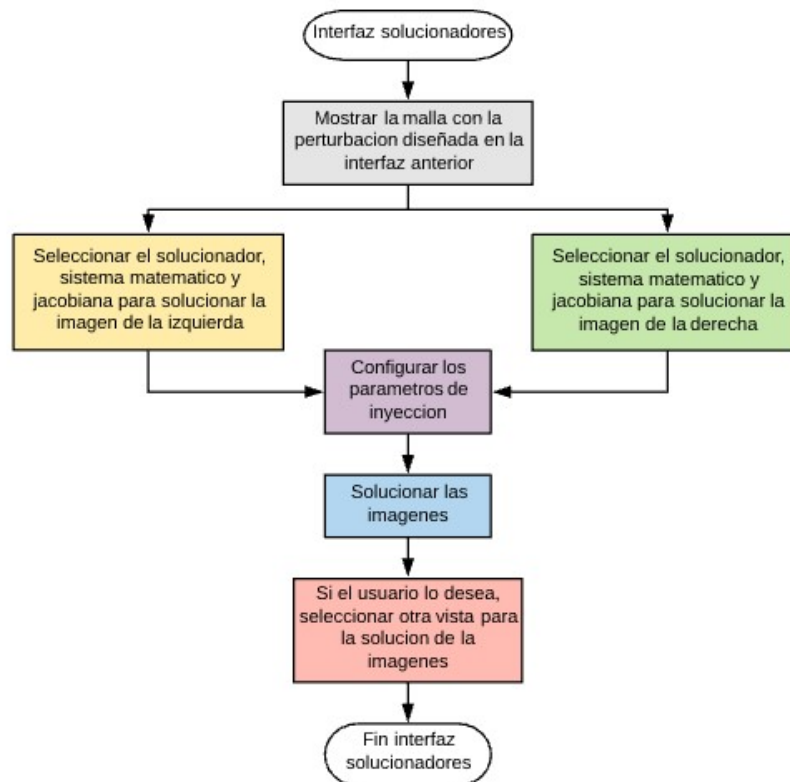


Figura 3.23: Diagrama de flujo solucionadores. [Elaboración Propia]

Solucionadores, sistemas matemáticos y jacobianas:

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, es necesario elegir el solucionador, sistema Matemático y jacobiana para la imagen de la izquierda y nuevamente para la de la derecha.

Parámetros de inyección:

Estos parámetros son:

- **Patrón de inyección:** Indica cómo se inyectará y drenará la corriente, ofreciendo como opciones el método opuesto (Figura 3.24a), adyacente (Figura 3.24b) y trigonométrico (Figura 3.24c), o también se puede seleccionar por cuales electrodos se desea inyectar y drenar, teniendo en cuenta cuántos electrodos posee el modelo, por ejemplo, si el modelo consta de 8 electrodos y el usuario elige el electrodo 12, se muestra un mensaje para alertar al usuario del error cometido.

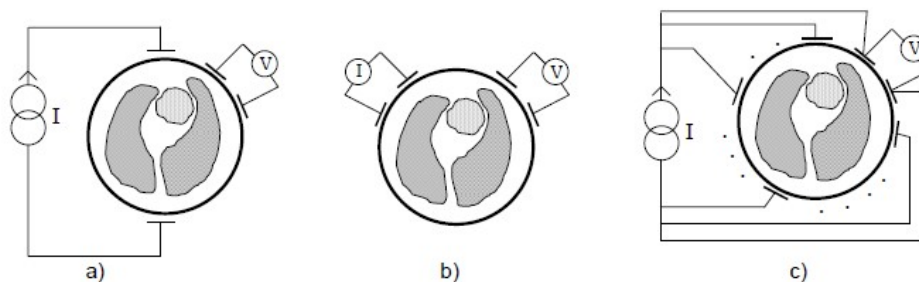


Figura 3.24: Métodos de inyección: a) Opuesto, b) Adyacente, c) Trigonométrico [Tomada [41]]

- **Patrón de medida:** Estos, al igual que los patrones de inyección, presentan las opciones de opuesto, adyacente o la posibilidad de elegir qué electrodos tomarán las medidas.
- **Amplitud:** Indica el valor de corriente que se inyectará al modelo. Por defecto la corriente es $10\mu A$.

En la figura 3.25, se muestra la interfaz de los solucionadores, como se puede observar, inicia mostrando el modelo con la perturbación que se ha diseñado previamente, luego en los recuadros rojo y azul se muestran los menús para seleccionar los solucionadores, los sistemas matemáticos y las jacobianas, que solucionarán el problema directo. En el recuadro amarillo se muestran los parámetros de inyección en donde es necesario definir la amplitud de la corriente. Finalmente en el recuadro púrpura se muestran los tiempos que se tarda en solucionar el problema directo, donde la imagen y parámetros de la izquierda determinan el tiempo de los solucionadores seleccionados.

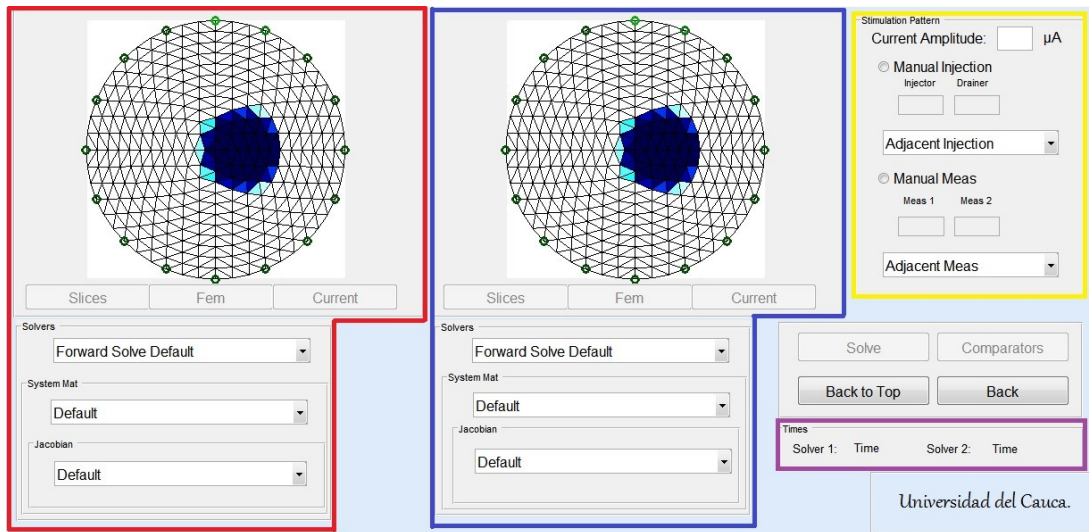


Figura 3.25: Interfaz solucionadores 1.[Elaboración Propia]

En la figura 3.26, se muestran las imágenes de distribución de potencial del modelo FEM, los parámetros fueron: para la imagen izquierda se eligió el solucionador de resistividad aparente, el sistema matemático de primer orden y la jacobiana adjunta, mientras que para la de la derecha se escogió el solucionador y sistema matemático de primer orden y la jacobiana filtrada. En cuanto a los parámetros de inyección: esta fue opuesta, la medición adyacente y la amplitud de corriente fue de $40 \mu A$.

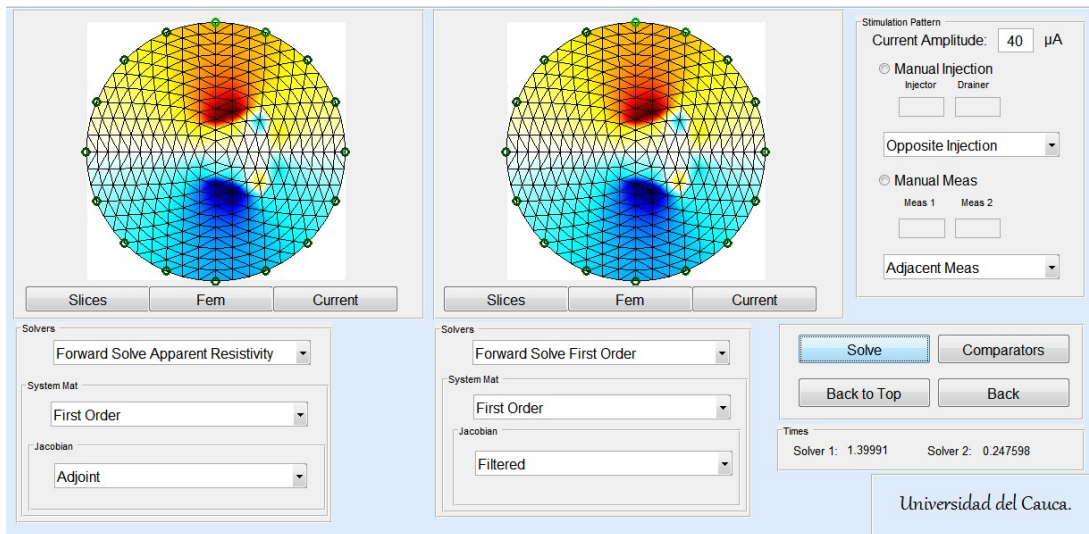


Figura 3.26: Interfaz solucionadores 2.[Elaboración Propia]

Para los tiempos de solución, se observa que el *solver* 1 se tardó aproximadamente 0.4248 segundos, mientras que el *solver* 2 cerca de 0.24 segundos, ver figura 3.27.

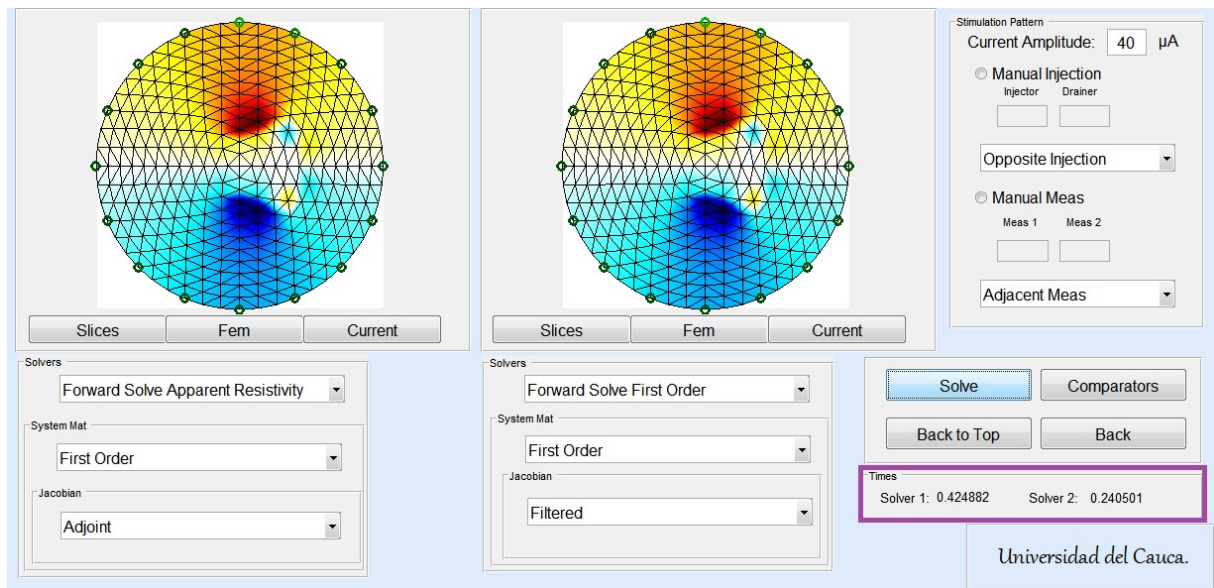


Figura 3.27: Interfaz solucionadores 3.[Elaboración Propia]

Como indica la figura 3.27, en el recuadro púrpura, los tiempos disminuyen considerablemente al solucionar por segunda vez las imágenes con las mismas configuraciones de los parámetros, al punto que no alcanzan a tardar ni siquiera 0.5 segundos, ello se debe a que una vez creado el modelo FEM, EIDORS lo almacena para próximas iteraciones.

3.3.6. Componente de comparación:

Esta interfaz se encarga de desplegar en los diferentes *axes* las gráficas que faciliten la comparación entre solucionadores.

En la figura 3.28, se presenta en el recuadro verde las gráficas de corriente homogénea y heterogénea, en el naranja se muestran las gráficas de voltaje por medida y qué solucionador se seleccionó para resolver el problema directo, el café contiene las opciones que permiten seleccionar las gráficas a mostrar (estas se exhibirán en la parte inferior, es decir, en el recuadro naranja), y en el recuadro azul claro se encuentran los botones para regresar a la ventana anterior o al inicio de la interfaz.

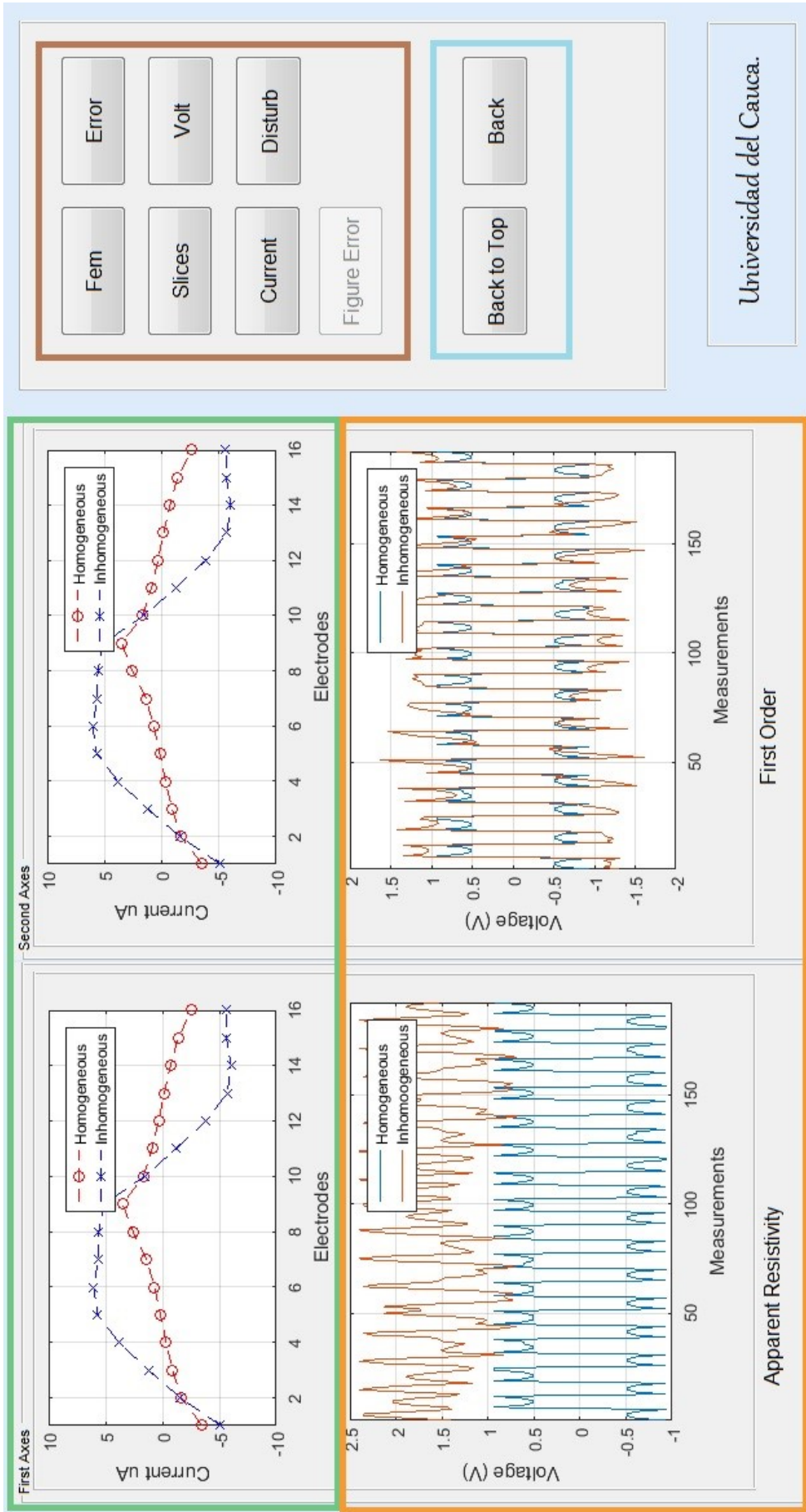


Figura 3.28: Interfaz comparadores. [Elaboración Propia]

Gráfica corriente por electrodo:

Estas gráficas se muestran en la parte superior de la interfaz (recuadro verde figura 3.28) e indican las medidas de corriente en cada uno de los electrodos. El modelo homogéneo o de referencia presenta la malla del objeto bajo estudio sin objetos de diferentes conductividades, mientras que el modelo heterogéneo es la imagen con los objetos de diferentes conductividades.

Opción *volt*:

Estas gráficas se encuentran en la parte inferior de la interfaz y muestran el voltaje que se ha registrado en cada medida realizada (recuadro naranja figura 3.28).

Opción FEM:

Muestra la distribución de potenciales del modelo FEM a partir de la diferencia de potencial entre la imagen homogénea y la heterogénea, con las respectiva configuración de parámetros.

En la figura 3.29, se presentan las gráficas FEM con la misma configuración que se indicó en la sección de la interfaz de solucionadores, la cual se empleará en adelante para ejemplificar las posteriores gráficas.

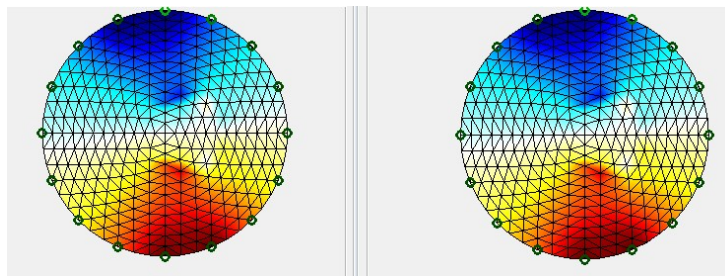


Figura 3.29: Gráfica vista FEM.[Elaboración Propia]

Opción *slices*:

Al igual que lo opción FEM, esta muestra la reconstrucción a partir de la diferencia de potenciales entre la imagen homogénea y la heterogénea. La diferencia radica en que esta

no permite ver la malla del modelo, únicamente se distinguen los sectores de inyección y drenado así como la variación de los mismos, lo que facilita notar dónde se encuentra la perturbación.

En la figura 3.30, se muestra la vista de *slices* para la configuración ya explicada anteriormente.

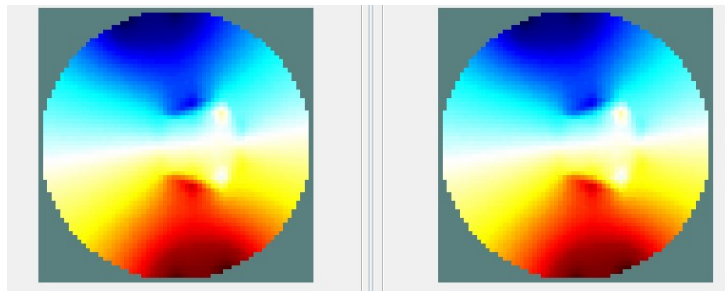


Figura 3.30: Gráfica vista *slices*. [Elaboración Propia]

Opción *current*:

Muestra la distribución de corriente del modelo para cada uno de los solucionadores, en este caso debido a que la inyección es opuesta, se inyecta por el electrodo 1 y se drena por el electrodo 8. La gráfica contiene unas pequeñas flechas azules que muestran el sentido de la corriente.

En la figura 3.31, se muestra la distribución de corriente con la configuración explicada previamente, se puede notar que la corriente se inyecta a través del electrodo número 1 (polar norte) y se drena por el electrodo diametralmente opuesto (polar sur) observando que la perturbación altera el flujo de corriente.

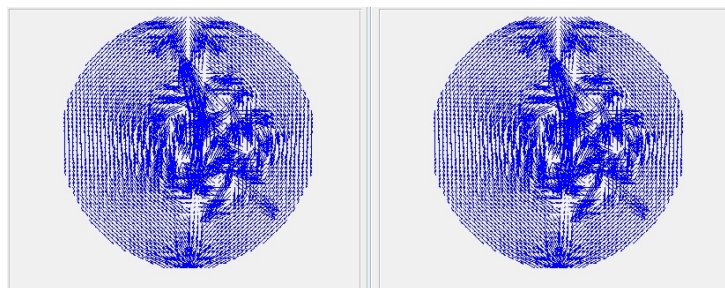


Figura 3.31: Gráfica opción *current*. [Elaboración Propia]

Opción error:

La opción de error indica, el error relativo y absoluto de los potenciales estimados mediante la solución del problema directo para los solucionadores seleccionados, los errores se calculan comparando los potenciales del modelo homogéneo y heterogéneo. Como se puede notar en la gráfica de la figura 3.32, en la cual se encuentran los resultados de error absoluto y relativo, el solucionador de resistividad aparente presenta cambios más significativos de voltaje, lo cual indica que nota mejor la perturbación que el solucionador de primer orden.

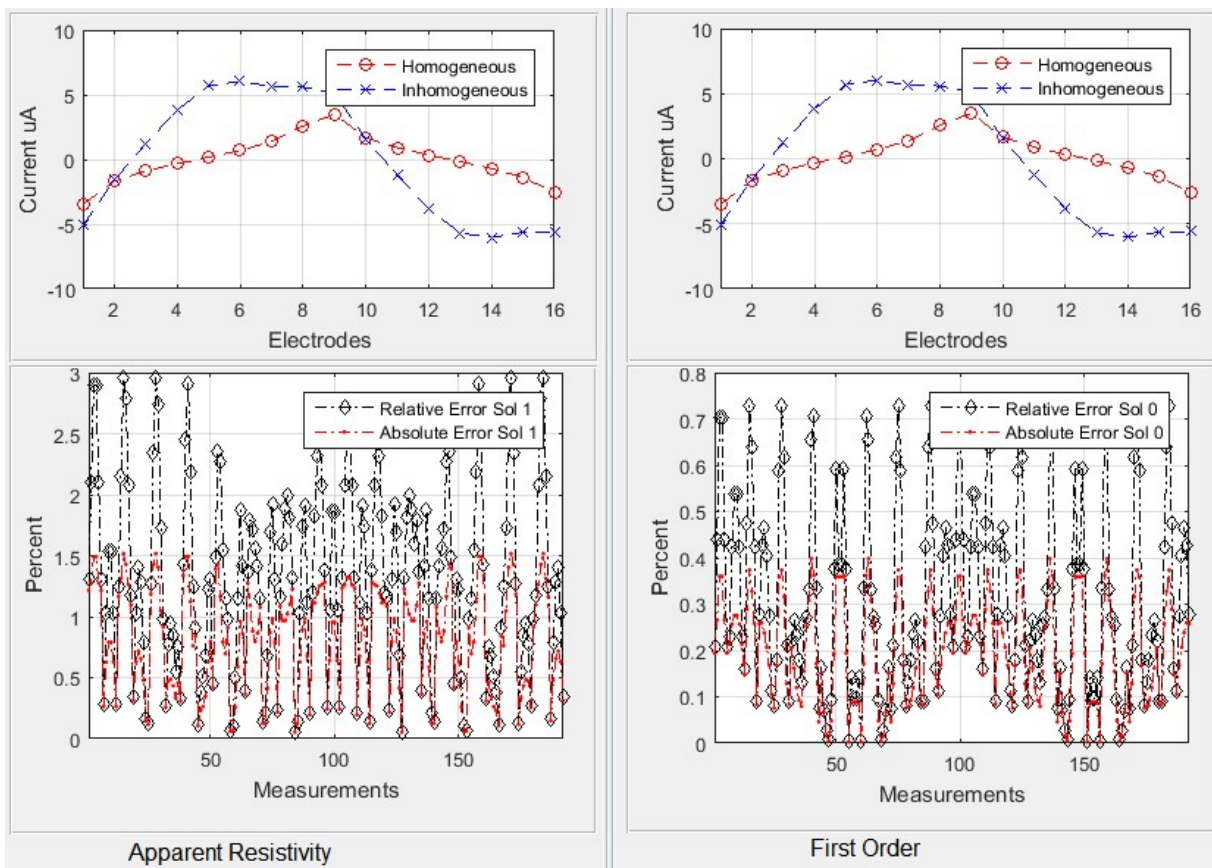


Figura 3.32: Gráfica de error.[Elaboración Propia]

Opción *disturb*:

Esta opción se encarga de mostrar en una ventana externa el modelo diseñado con su perturbación, en caso de que se desee comparar con la vista FEM, *slices* o *current distribution*.

3.3.7. Componente de comparación con datos reales:

Este componente permite hacer una comparación entre los datos recolectados con el tomógrafo diseñado en el trabajo de Mosquera y sus colegas [1], y los resultados simulados mediante un modelo FEM el cual fue diseñado con base en dicho trabajo. A continuación se muestra el diagrama para el diseño de este componente.

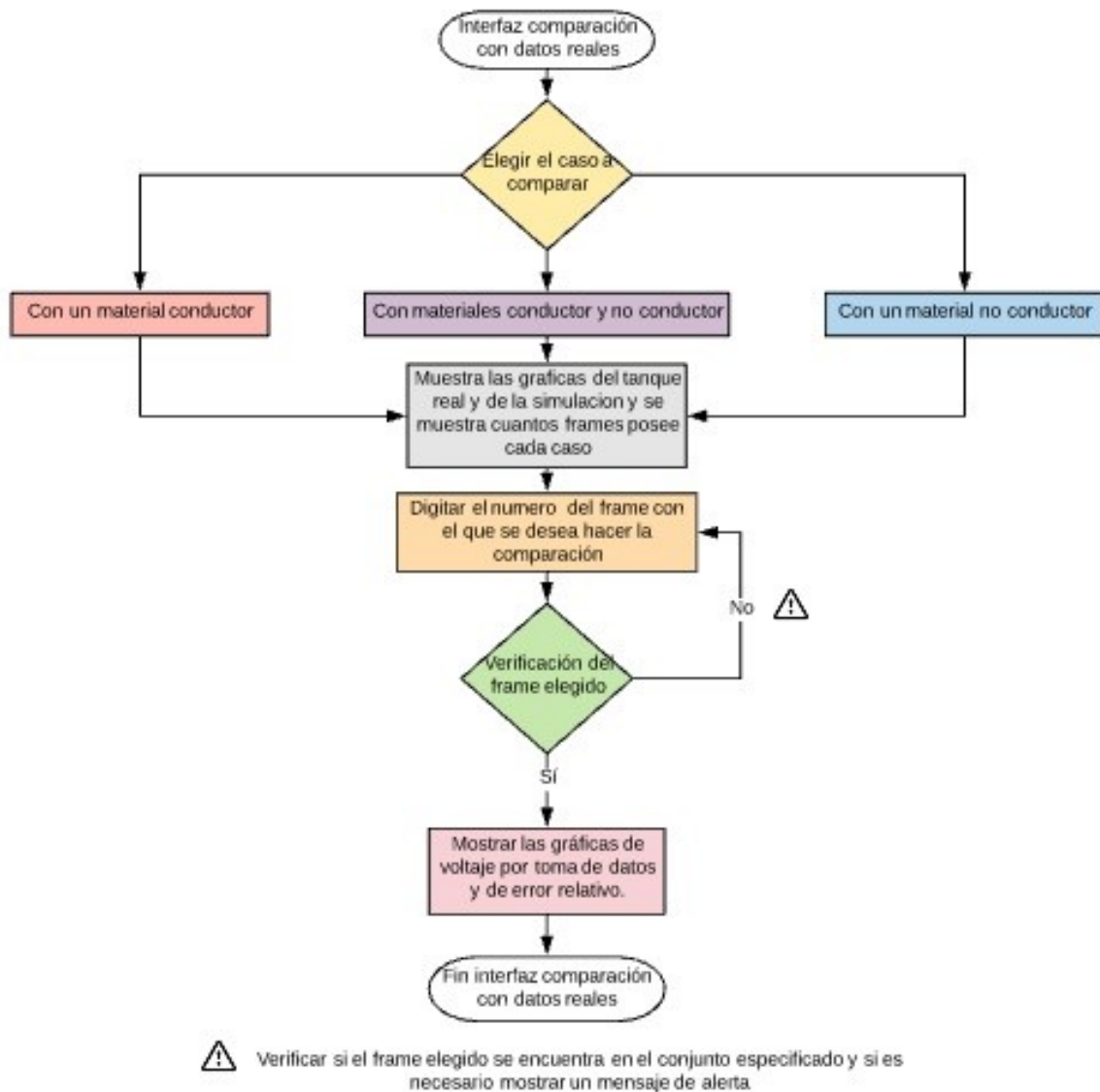


Figura 3.33: Diagrama de flujo componente datos reales.[Elaboración Propia]

Este componente presenta tres modelos que permiten estimar los potenciales sobre los

electrodos de un tanque con solución salina al cual se le introducen objetos cilíndricos, uno conductor, uno no conductor, y ambos objetos simultáneamente.

Con objeto conductor:

El elemento conductor presenta una forma cilíndrica, con 3.6 centímetros de radio y aproximadamente 40 centímetros de alto.

En la figura 3.34, se muestra el montaje realizado (vista superior y lateral respectivamente).

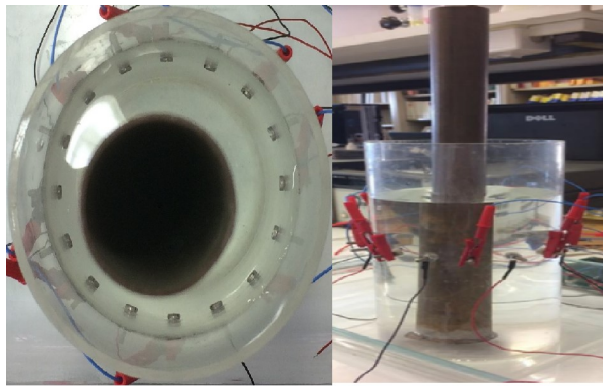


Figura 3.34: Montaje con objeto conductor.[Tomada [42].]

En la figura 3.35 se muestra el diseño realizado para la simulación (vista superior y lateral respectivamente).

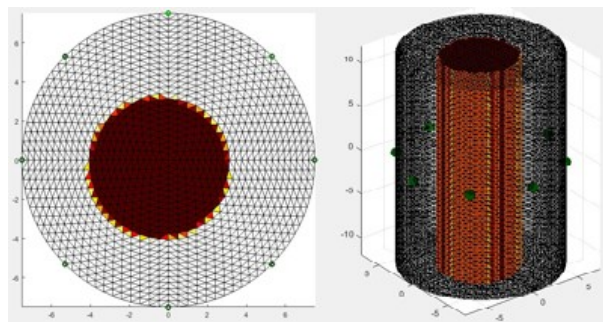


Figura 3.35: Simulación con objeto conductor.[Elaboración Propia.]

Con objeto no conductor:

El elemento no conductor presenta una forma cilíndrica, con 2.5 centímetros de radio y aproximadamente 40 centímetros de alto. A continuación se muestran las imágenes del montaje realizado y el tanque simulado.

En la figura 3.36, se muestra el montaje realizado (vista superior y lateral respectivamente).

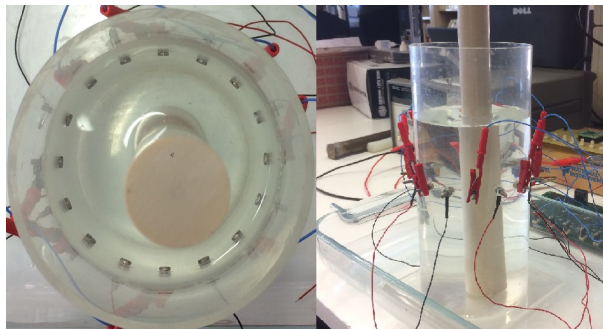


Figura 3.36: Montaje con objeto no conductor.[Tomada [42].]

En la figura 3.37, se muestra el diseño realizado para la simulación (vista superior y lateral respectivamente).

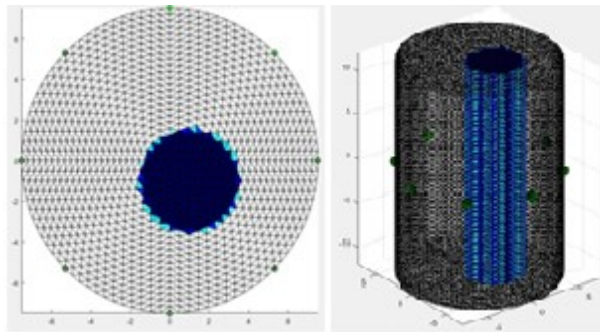


Figura 3.37: Simulación con objeto no conductor.[Elaboración Propia.]

Con objeto conductor y no conductor:

Combina los elementos que se mencionaron anteriormente y se muestran las imágenes del montaje realizado y el tanque simulado.

En la figura 3.38, se muestra el montaje realizado (únicamente se posee la vista lateral).

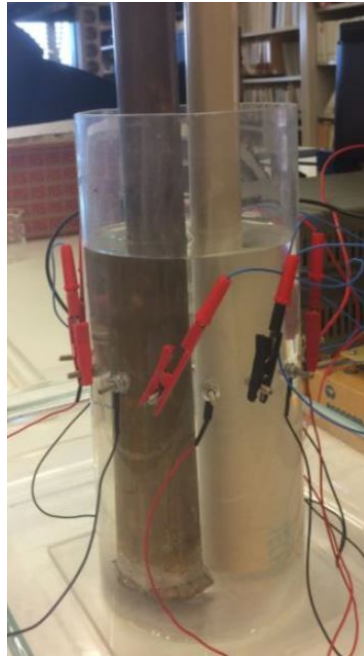


Figura 3.38: Montaje con objeto conductor y no conductor.[Tomada [42]]

En la figura 3.39 se observa el diseño realizado para la simulación (vista superior y lateral respectivamente).

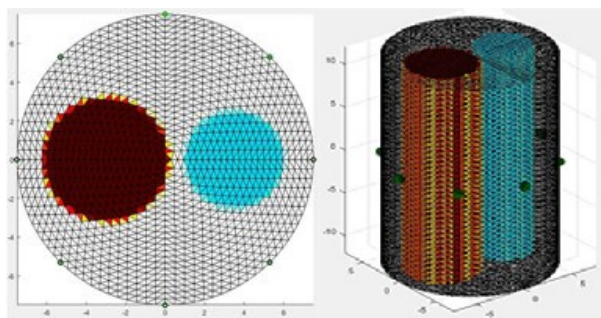


Figura 3.39: Simulación con objeto conductor y no conductor.[Elaboración Propia.]

En la figura 3.40, se muestra la ventana de inicio de este componente.

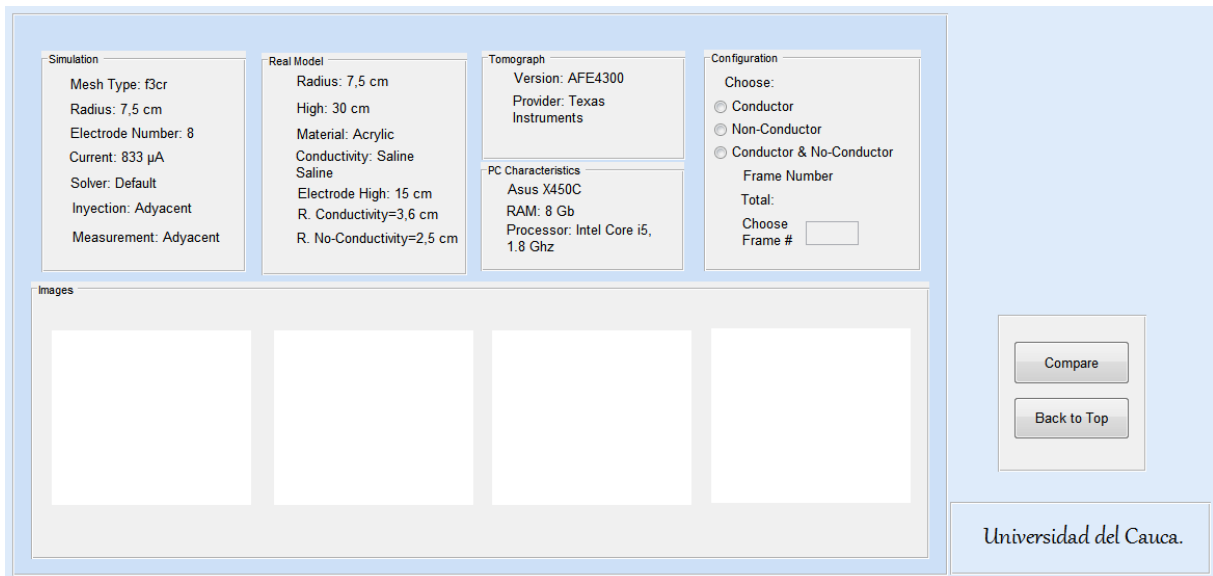


Figura 3.40: Interfaz comparación datos reales vs simulación.[Elaboración Propia.]

En la figura 3.41, se evidencia que las imágenes ya se han cargado debido a que ha sido seleccionado el caso a comparar, lo siguiente es seleccionar el *frame* y presionar el botón de comparar para ver los resultados.

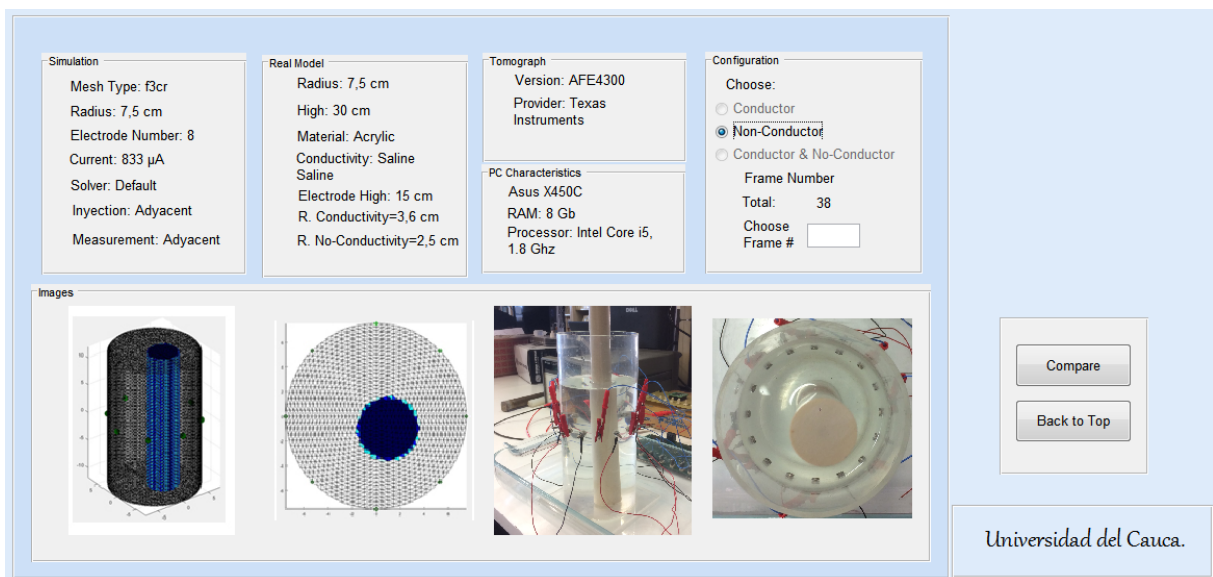


Figura 3.41: Interfaz Comparación Datos Reales vs Simulación, ya cargada.[Elaboración Propia.]

En la figura 3.42, en la parte superior se muestra la comparación de las medidas de voltaje

obtenidas por el usuario (datos reales) y las simuladas, y en la parte inferior los errores absoluto y relativo de estas mediciones.

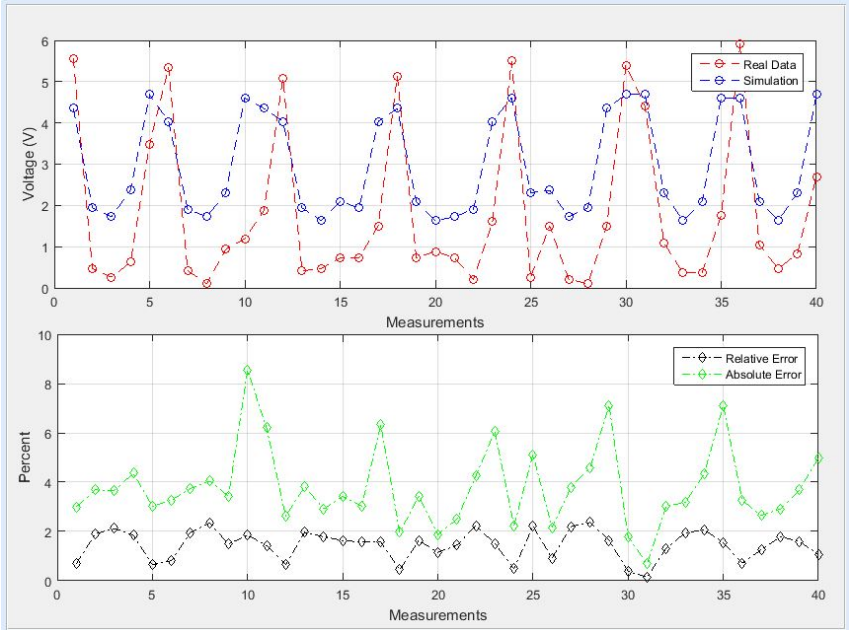


Figura 3.42: Gráficas de voltaje.[Elaboración Propia.]

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la solución del problema directo, teniendo en cuenta los indicadores de desempeño, para así elegir el mejor solucionador y su posterior utilización en una prueba con datos reales. Para la comparación de los resultados se empleó la inyección adyacente y opuesta, centrándose en la primera ya que esta fue la utilizada para la toma de los datos reales con el tomógrafo AFE4300 [1]. Las características del computador en el cual se realizaron las pruebas son las siguientes:

- **Modelo:** *Asus X450C*.
- **Ram:** *8 GB*.
- **Procesador:** *Intel(R) Core(TM) i5, 1.8 GHz*.
- **Versión Matlab:** *2015a*.

Recordando lo explicado en el capítulo 2, en la sección de indicadores de desempeño, el error absoluto y relativo muestran variaciones de voltaje entre la solución de cada uno de los modelos, ya sea entre la malla homogénea y heterogénea con igual algoritmo de solución, o entre mallas heterogéneas con diferentes algoritmos para la obtención del mejor solucionador. Sin embargo, al realizar la comparación con datos reales, los errores comparan los potenciales estimados y los medidos.

4.1. Comparación entre algoritmos

Primero se hará una comparación entre algoritmos mediante el error absoluto, error relativo y tiempo de procesamiento, comparando cada uno (primer orden, alto orden, aparente resistividad, *halfspace*) con el algoritmo base (*default*). En la figura 4.1 se muestran los modelos FEM 2D empleados para el análisis de los algoritmos de solución del problema directo, como se puede observar los modelos presentan objetos circulares conductores y no conductores que permitirán evaluar la variación de los potenciales sobre los electrodos y seleccionar el algoritmo con mejor desempeño.

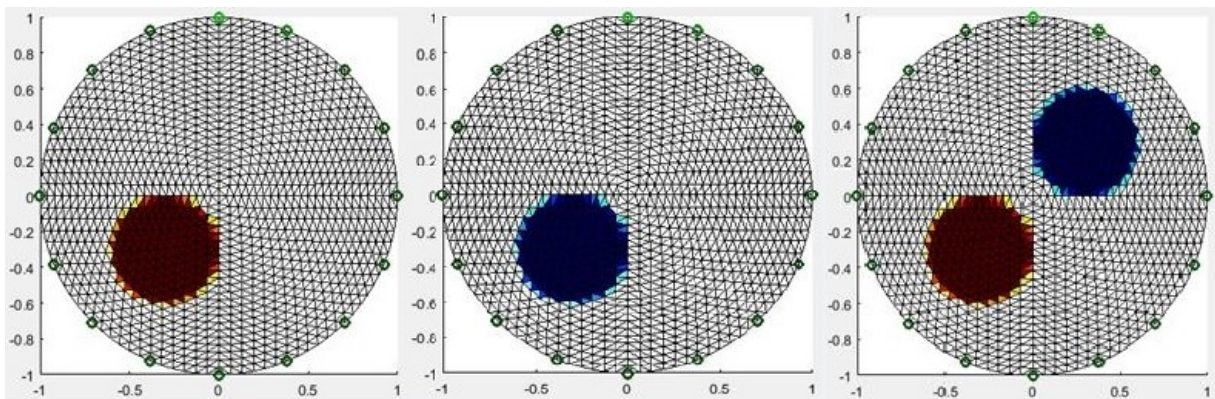


Figura 4.1: Modelos FEM, Modelo A con objeto conductor (izquierda), Modelo B con objeto no conductor (centro) y Modelo C con objetos conductor y no conductor (derecha).

Algoritmo	Modelo A			Modelo B			Modelo C		
	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Tiempo (seg)	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Tiempo (seg)	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Tiempo (seg)
Alto orden	$1,9305 \times 10^{-15}$	$3,8095 \times 10^{-17}$	0,1359	$1,9115 \times 10^{-15}$	$4,413 \times 10^{-17}$	0,1392	$2,1289 \times 10^{-15}$	$4,9647 \times 10^{-17}$	0,1339
Resistividad aparente	22,9435	0,4356	0,3326	22,9435	0,54	0,3753	22,9435	0,5077	0,335
<i>Halfspace</i>	$7,6201 \times 10^{15}$	$1,3865 \times 10^{14}$	0,0642	$7,2103 \times 10^{15}$	$1,6013 \times 10^{14}$	0,0998	$6,7824 \times 10^{15}$	$1,4862 \times 10^{14}$	0,0675
Primer orden	0	0	0,1519	0	0	0,1564	0	0	0,1557

Tabla 4.1: Resultados de algoritmos de solución del problema directo.

Como se puede observar en la tabla 4.1, el algoritmo que presenta un menor error relativo y absoluto, comparado con el solucionador por defecto que emplea EIDORS para la solución

del problema directo, es el de alto orden, para los tres modelos de prueba. En cuanto al tiempo que tardan los algoritmos para encontrar los potenciales sobre los electrodos, el algoritmo *Halfspace* es el más rápido pero con unos errores extremadamente altos.

Para continuar con el estudio de los algoritmos, se plantea una prueba para identificar cuál es el algoritmo que permite detectar de mejor manera los cambios de potenciales sobre los electrodos cuando el modelo FEM homogéneo es modificado mediante la adición de objetos (modelo heterogéneo).

4.2. Caso 1: Con objeto no conductor

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema con un objeto no conductor fue la siguiente: malla circular, densidad f , y 16 electrodos, además, la perturbación no conductora es de forma circular con radio de 0.3 unidades y coordenadas en X y Y de -0.3 , así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de la corriente fue de $15\mu A$.

En la figura 4.2, se puede observar la distribución de corriente en cada uno de los electrodos, con un objeto no conductor. Se puede notar el cambio de corriente de la malla homogénea a la heterogénea en los electrodos 9, 10, 11, 13, 14 y 15, pues son más cercanos a la perturbación.

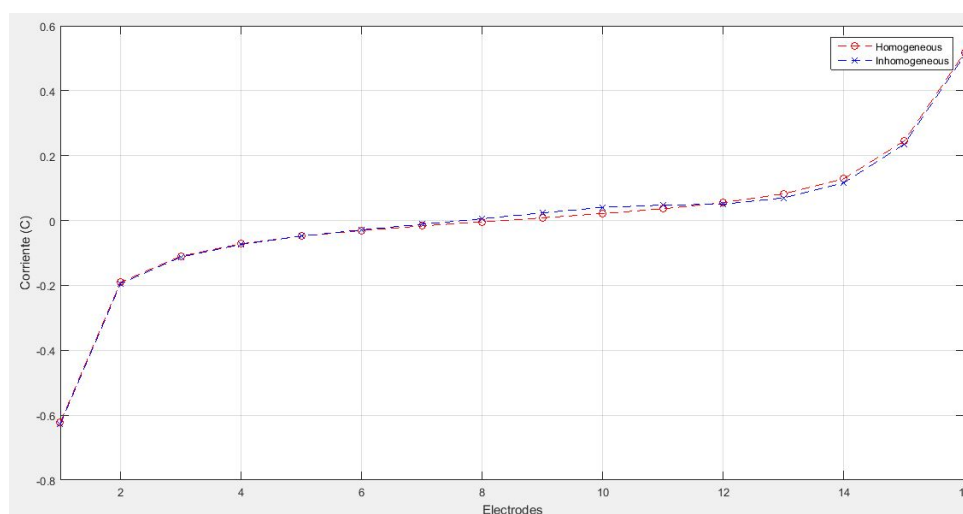


Figura 4.2: Corriente en cada electrodo objeto no conductor.

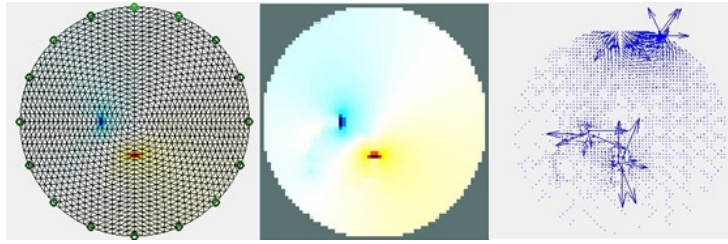


Figura 4.3: Solución *default*.

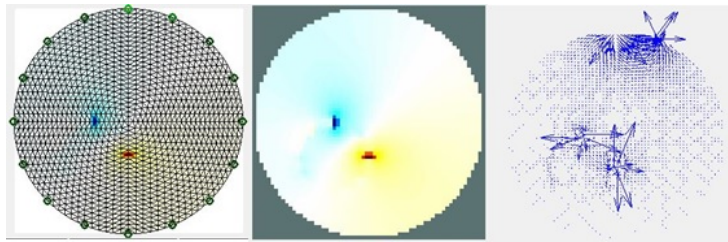


Figura 4.4: Solución primer orden.

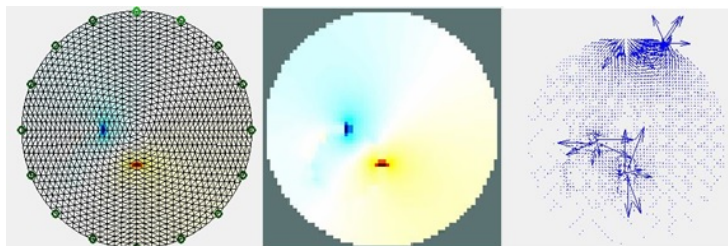


Figura 4.5: Solución alto orden.



Figura 4.6: Solución *halfspace*.

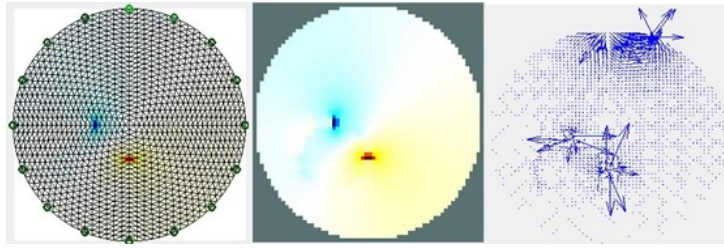


Figura 4.7: Solución aparente resistividad.

Teniendo en cuenta las imágenes 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, obtenidas con los diferentes solucionadores y vistas, se puede observar que el solucionador *halfspace*, figura 4.6, no indica la localización del disturbio, mientras que los demás presentan resultados gráficos bastante similares, por ello se procede a analizar las gráficas de error absoluto, error relativo y tiempos de solución.

En la figura 4.8, se muestran las gráficas de error absoluto por medida, separadas para cada solucionador, se puede observar que los solucionadores de primer orden, alto orden y por defecto presentan resultados similares, mientras que el *halfspace* presenta unos errores muy elevados, del orden de 10^{15} . Por otra parte el algoritmo de resistividad aparente presenta el mayor porcentaje de variación en este caso.

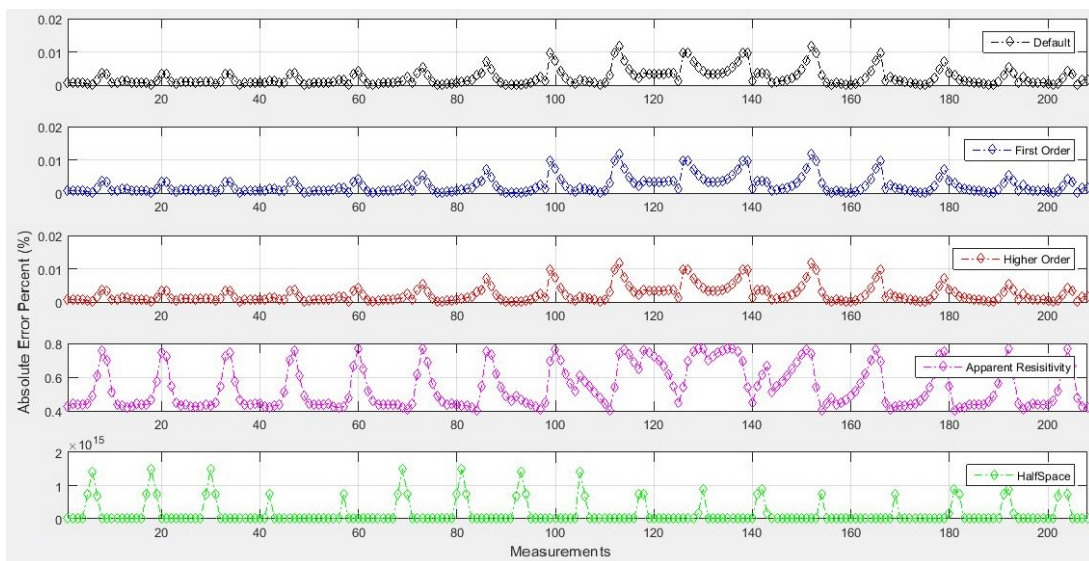


Figura 4.8: Error absoluto individual.

En la figura 4.9, se muestran las gráficas de error relativo individual por medida para cada

uno de los solucionadores, al igual que con las gráficas de error absoluto, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen resultados similares.

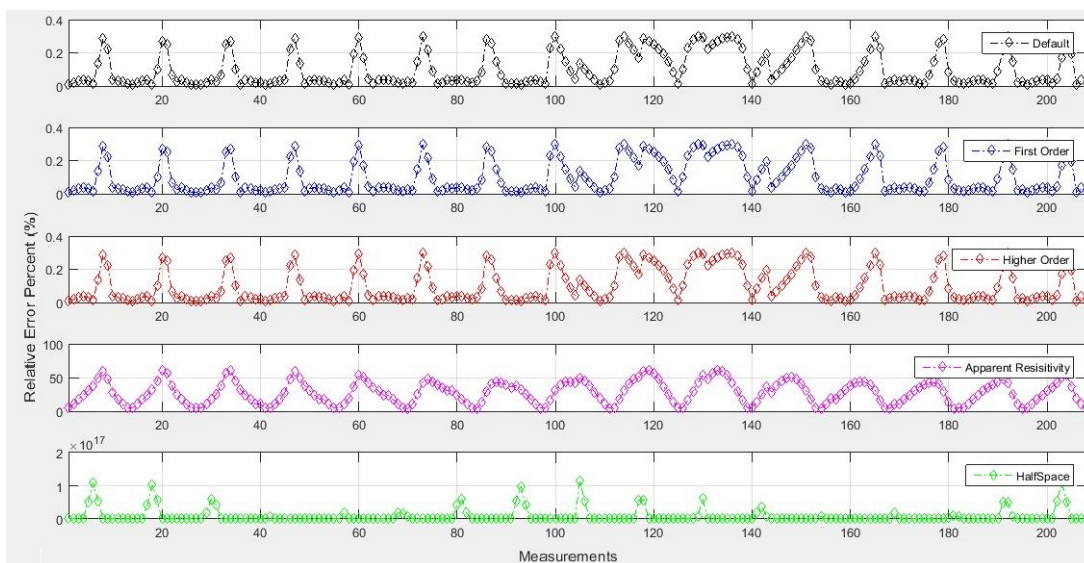


Figura 4.9: Error relativo individual.

Al igual que en el caso anterior el algoritmo *halfspace*, presenta un error relativo muy grande del orden $\times 10^{17}$. Además se puede ver que los solucionadores *default*, alto orden y primer orden presentan resultados similares. En contraste el solucionador de resistividad aparente tiene el mayor porcentaje de variación.

En la figura 4.10, se muestra que el solucionador *halfspace* es el que menor tiempo tarda, seguido del solucionador de alto orden, luego por el de primer orden, después por el *default* y finalmente se encuentra el solucionador de resistividad aparente, el cual tarda aproximadamente el doble que el de alto orden. Es importante resaltar que a medida que aumentan las interacciones el tiempo de solución para cada algoritmo se incrementa, esto se debe a que EIDORS almacena datos de los modelos empleados en la prueba, además de los resultados obtenidos en cada ejecución, lo cual carga el computador y lo hace más lento.

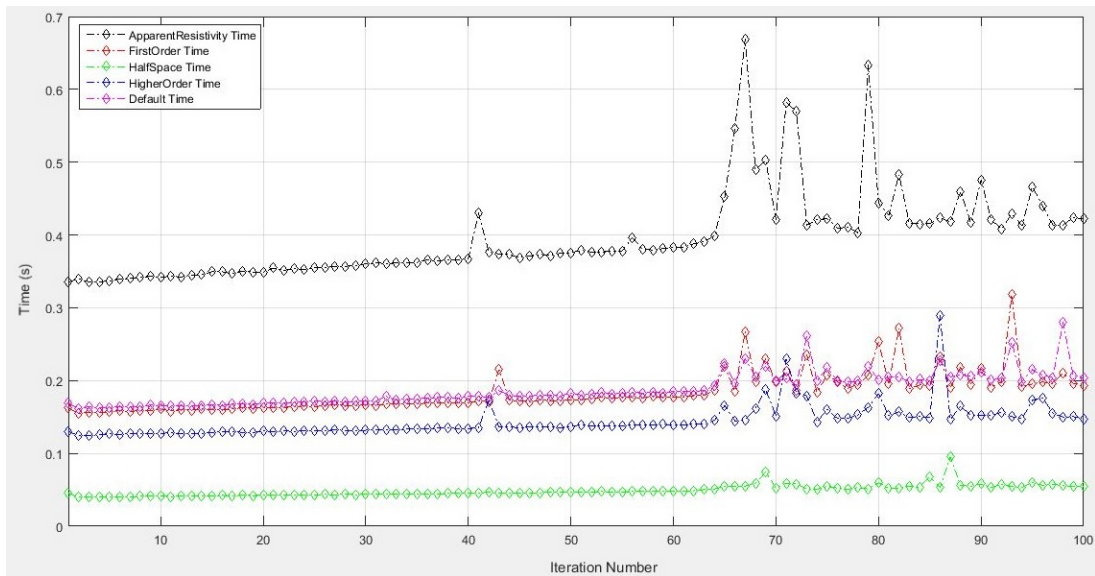


Figura 4.10: Tiempo solucionadores.

Con los datos obtenidos se observa que en cuanto a error absoluto y relativo, los solucionadores de alto orden, primer orden y por defecto presentan los mismos resultados; sin embargo, estos difieren en sus tiempos de solución, siendo el de alto orden el más rápido.

Por otro lado el solucionador de *halfspace* no permite identificar el comportamiento de los potenciales en los elementos del modelo FEM, lo que hace que los errores sean muy altos.

Finalmente el solucionador de resistividad aparente presenta buenos resultados en cuanto a distribución de potencial, error absoluto y relativo, pero este es el que más tarda, llegando incluso a duplicar el tiempo del solucionador de alto orden.

A continuación se presenta una tabla comparativa 4.2, la cual contiene los promedios de error relativo, error absoluto y tiempos, adicional a lo anterior se indica si cada solucionador reconstruye o no la distribución de potencial; lo anterior con el fin de seleccionar el mejor solucionador para el presente caso.

Solucionadores	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Distribución de potencial	Tiempos (seg)
Alto orden	0,11007	0,00254	Si	0,07005
Primer orden	0,11007	0,00254	Si	0,08866
Resistividad aparente	30,31552	0,59011	Si	0,190009

<i>Halfspace</i>	$8,29 \cdot 10^{15}$	$1,71 \cdot 10^{14}$	No	0,02347
<i>Default</i>	0,11007	0,00254	Si	0,09166

Tabla 4.2: Tabla comparativa solucionadores caso conductor.

4.3. Caso 2: Con objeto conductor

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema con un objeto no conductor fue la siguiente: malla circular, densidad f , y 16 electrodos, además, la perturbación conductora es de forma circular con radio 0.3 unidades y coordenadas en X y Y de -0.3 , así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de la corriente fue de $15\mu A$.

En la figura 4.11, se puede observar la distribución de corriente en cada uno de los electrodos, con un objeto conductor, se puede notar el cambio de corriente de la malla homogénea a la heterogénea en los electrodos 9, 10, 11, pues son más cercanos a la perturbación. A diferencia de la figura 4.2, esta presenta una menor variación debido a que el disturbio es conductor lo cual altera mínimamente el flujo de corriente.

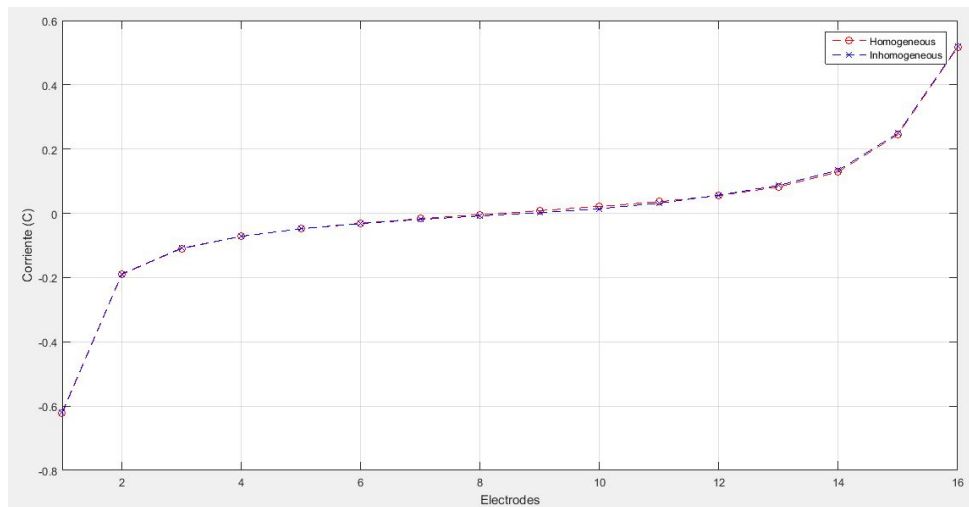


Figura 4.11: Corriente en cada electrodo objeto conductor.

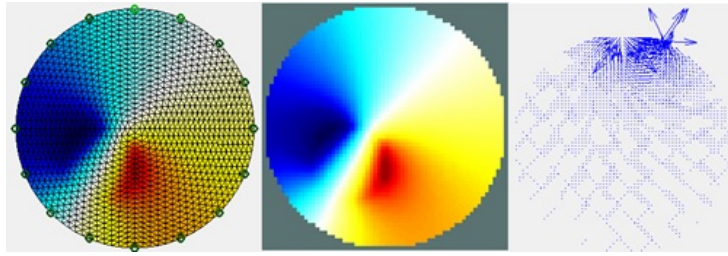


Figura 4.12: Solución *default* Conductor.

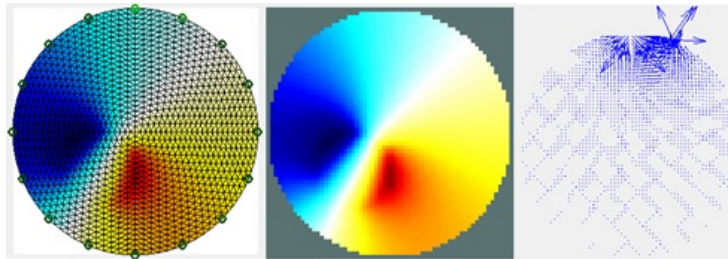


Figura 4.13: Solución primer orden conductor.

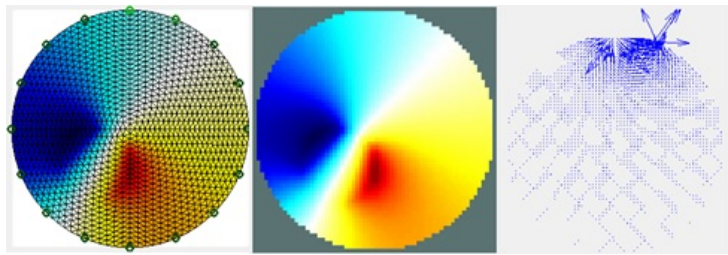


Figura 4.14: Solución alto orden conductor.

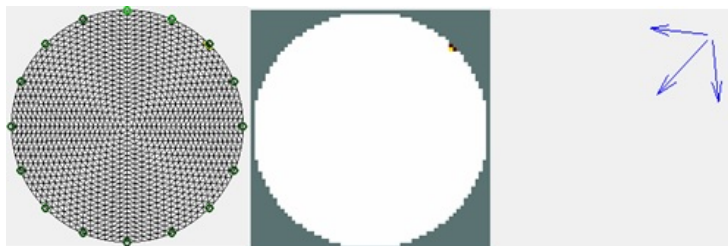


Figura 4.15: Solución *halfSpace* conductor.

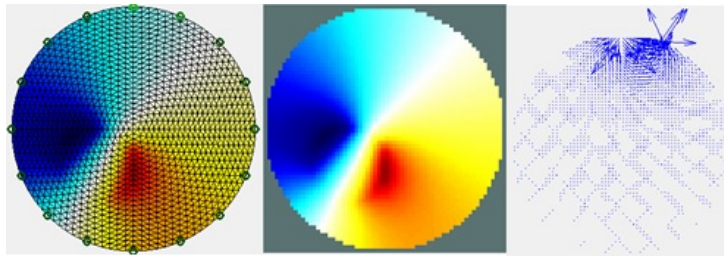


Figura 4.16: Solución aparente resistividad conductor.

Al igual que en el caso de un material no conductor, se puede observar que el solucionador *halfspace* (figura 4.15) presenta unos resultados deficientes en cuanto a determinar la distribución de potencial al interior del modelo. A continuación se procede a analizar las gráficas de error absoluto, error relativo y tiempos de solución para determinar el mejor solucionador.

En la figura 4.17, se muestran las gráficas de error absoluto por medida, para cada solucionador, al igual que en el caso del objeto no conductor, se puede ver que los solucionadores de primer orden, alto orden y por defecto presentan resultados similares, siendo las variaciones para estos del orden $\times 10^{-3}$. Por otra parte el solucionador de resistividad aparente presenta el mayor porcentaje de variación en este caso.

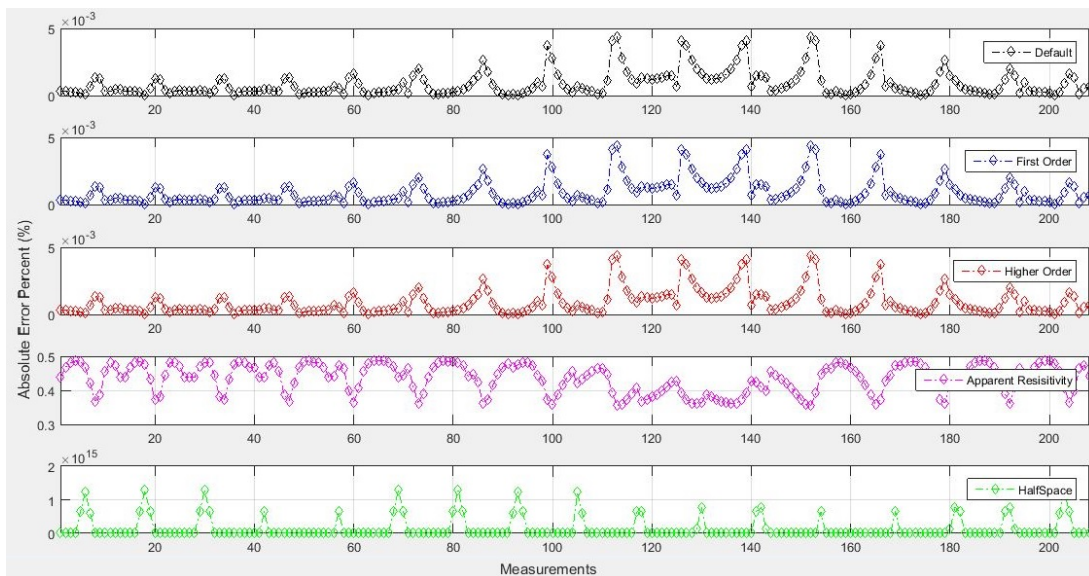


Figura 4.17: Error absoluto individual conductor.

En la figura 4.18, se muestran las gráficas de error relativo por medida para cada solucio-

nador, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen resultados similares.

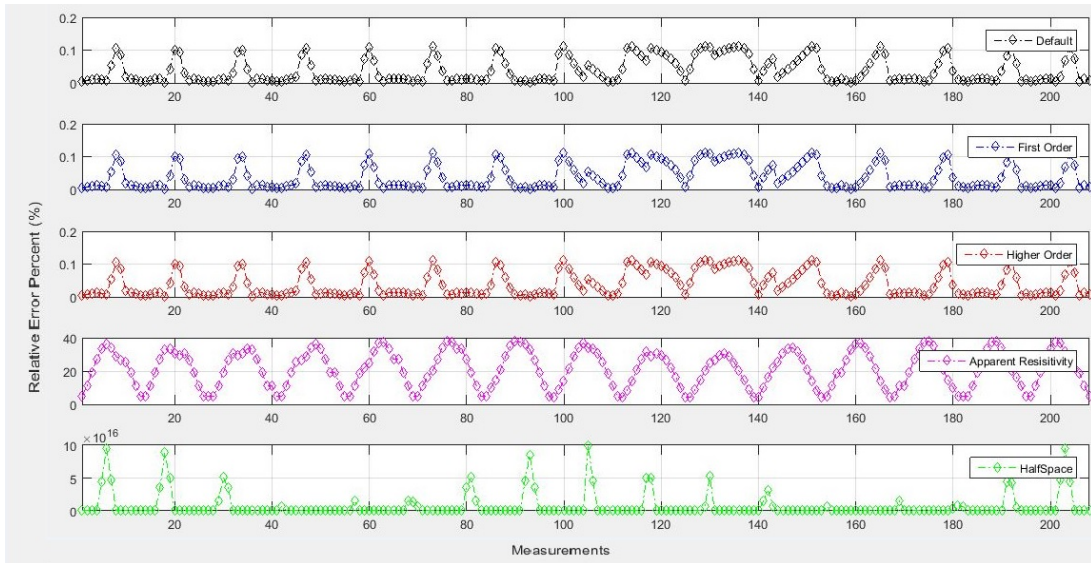


Figura 4.18: Error relativo individual conductor.

Al igual que los resultados obtenidos mediante el error absoluto, el error relativo muestra un comportamiento similar para cada uno de los algoritmos en comparación.

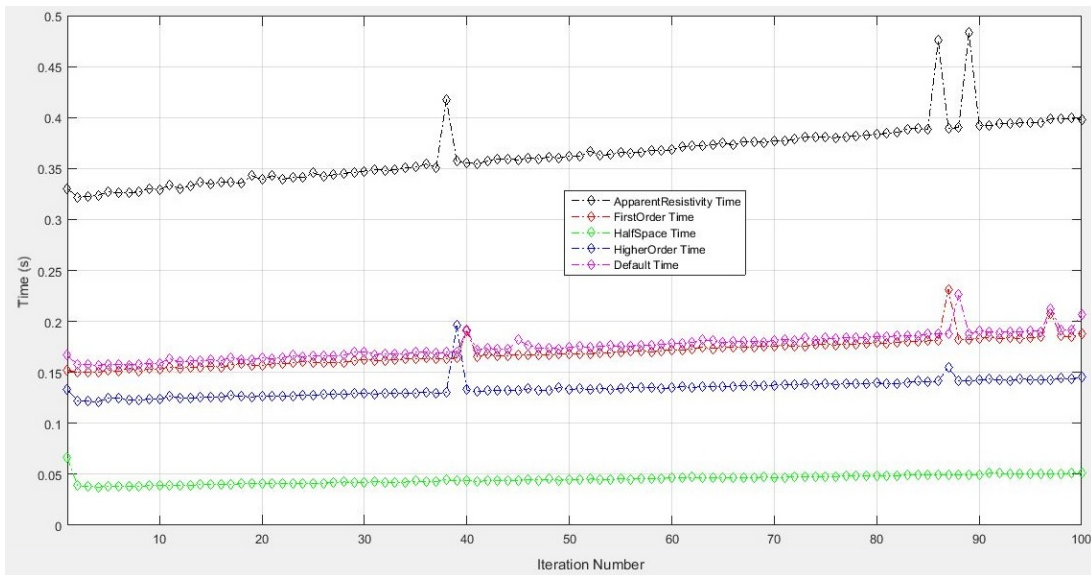


Figura 4.19: Tiempo solucionadores conductor.

El comportamiento en cuanto a tiempo de solución de los diferentes solucionadores es similar al del caso 1, donde el tiempo se incrementa a medida que aumentan las interacciones, además el solucionador de resistividad aparente presenta la mayor variación de potenciales entre el modelo homogéneo y heterogéneo, pero un tiempo mucho mayor comparado con los algoritmos de primer y alto orden.

Con los resultados obtenidos se observa que en cuanto a estimación de distribución de potencial, error absoluto y relativo, los solucionadores de alto orden, primer orden y por defecto presentan los resultados similares, pero menores respecto al caso de objeto no conductor; sin embargo, estos difieren en sus tiempos de solución, siendo el de alto orden el más rápido.

El algoritmo *halfspace* es la alternativa más deficiente, no permite determinar la distribución de potencial al interior del modelo FEM.

Finalmente el solucionador de resistividad aparente presenta buenos resultados en cuanto a distribución de potencial, error absoluto y relativo, pero este es el que más tarda, llegando incluso a duplicar el tiempo del solucionador de alto orden.

A continuación se presenta una tabla comparativa (4.3), la cual contiene los promedios de error relativo, error absoluto y tiempos, adicional a lo anterior se indica si cada solucionador estima o no la distribución de potencial; lo anterior con el fin de seleccionar el mejor solucionador para el presente caso.

Solucionadores	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Distribución de potencial	Tiempos (seg)
Alto orden	0,04244	0,00099	Si	0,07029
Primer orden	0,04244	0,00099	Si	0,08897
Resistividad aparente	22,99736	0,47014	Si	0,19077
<i>Halfspace</i>	$7,17*10^{15}$	$1,48*10^{14}$	No	0,02366
<i>Default</i>	0,04244	0,00099	Si	0,09179

Tabla 4.3: Tabla comparativa solucionadores caso no conductor.

4.4. Caso 3: Con objeto conductor y no conductor

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema con un objeto no conductor fue la siguiente: malla circular, densidad f , y 16 electrodos, además, la perturbación conductora fue circular, con radio 0.3 unidades y coordenadas en X y Y de -0.3 , mientras que la no conductora presenta la misma forma y radio; sin embargo, las coordenadas en X y Y son de 0.3, así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de la corriente fue de $15\mu A$. Para este caso se sigue la misma metodología que los anteriores teniendo como resultados los siguientes índices de desempeño.

Solucionadores	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Distribución de potencial	Tiempos (seg)
Alto orden	0,12054	0,00293	Si	0,07012
Primer orden	0,12054	0,00293	Si	0,08887
Resistividad aparente	27,9435	0,55156	Si	0,18993
<i>Halfspace</i>	$7,69*10^{15}$	$1,58*10^{14}$	No	0,02356
<i>Default</i>	0,12054	0,00293	Si	0,09180

Tabla 4.4: Tabla comparativa solucionadores caso conductor y no conductor.

Como se puede observar los resultados obtenidos son similares a los de los casos anteriores, haciendo del algoritmo de alto orden la mejor alternativa para la solución del problema directo cuando los artefactos incluidos en el modelo FEM tienen una forma geométrica regular.

4.5. Caso 4: Con objeto no conductor irregular e inyección opuesta 2D

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema con un objeto no conductor fue la siguiente: malla circular, densidad f , y 16 electrodos, además, la inyección fue opuesta, la medición adyacente y la amplitud de la corriente fue de $15\mu A$, la perturbación es no conductora, y se puede observar en la figura 4.20.

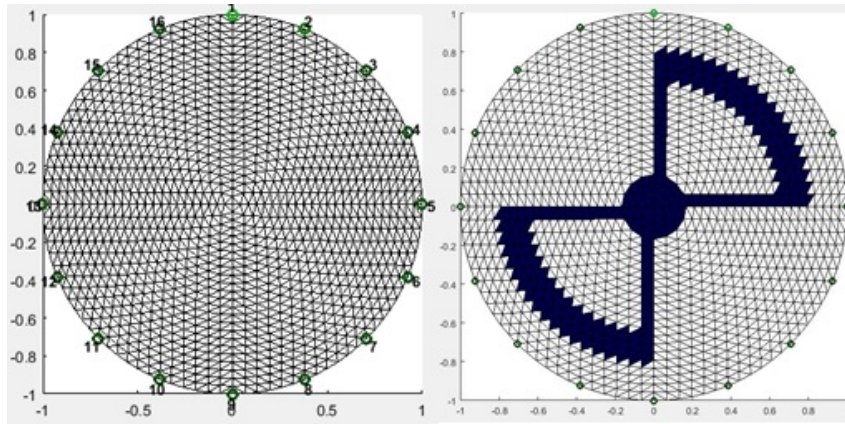


Figura 4.20: Malla diseñada con objeto irregular no conductor e inyección opuesta. [Elaboración Propia]

En la figura 4.21, se puede observar la distribución de corriente en cada uno de los electrodos, con un objeto irregular no conductor. Se puede notar el cambio de corriente de la malla homogénea a la heterogénea en la mayoría de los electrodos, porque el objeto es de gran tamaño.

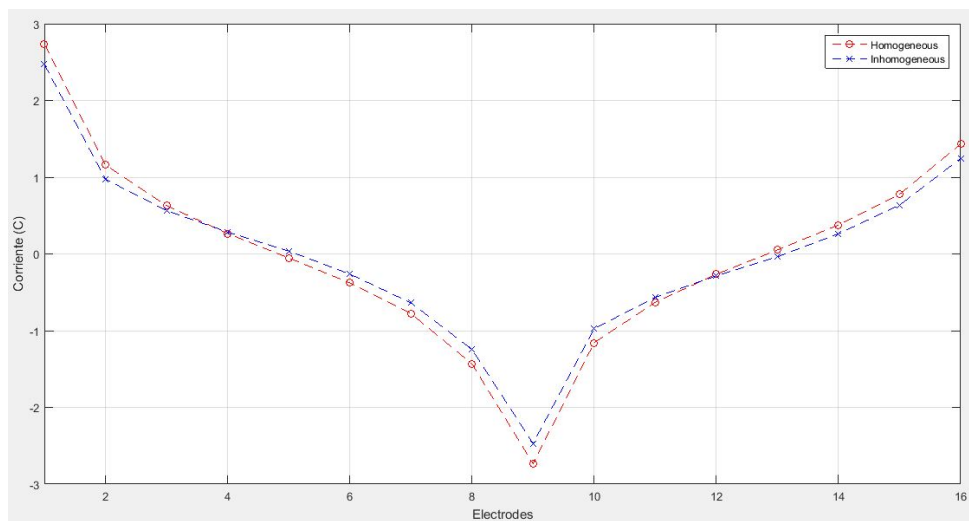


Figura 4.21: Corriente en cada electrodo objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

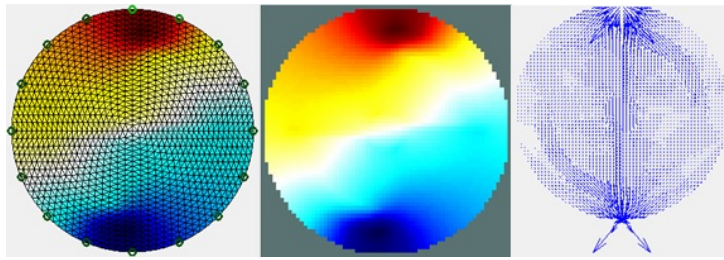


Figura 4.22: Solución *default* objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

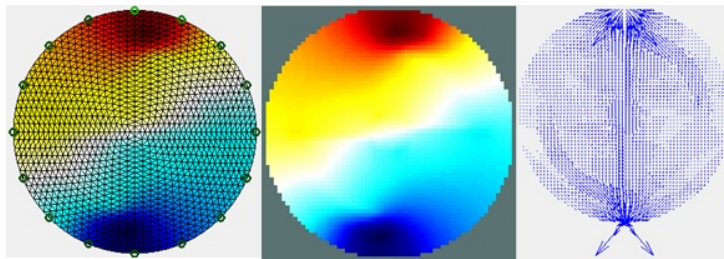


Figura 4.23: Solución primer orden objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

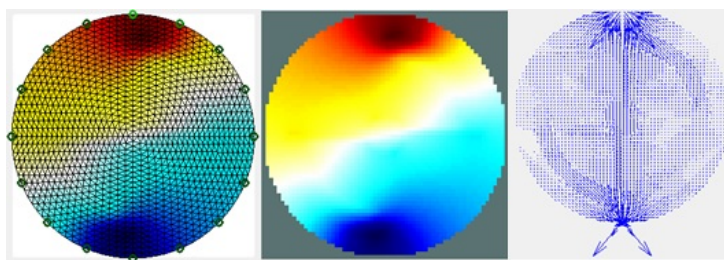


Figura 4.24: Solución alto orden objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

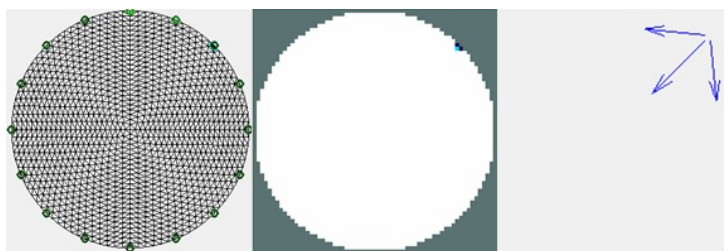


Figura 4.25: Solución *halfSpace* objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

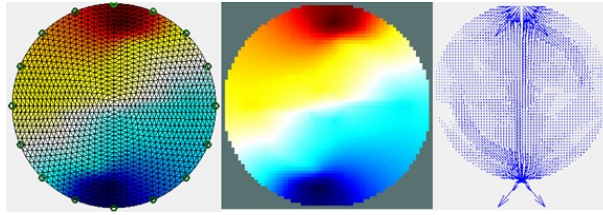


Figura 4.26: Solución aparente resistividad objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

Al igual que en los casos anteriores, se puede observar que el solucionador *halfspace* presenta unos resultados deficientes en cuanto a la determinación de la distribución de potencial. A continuación se procede a analizar las gráficas de error absoluto, error relativo y tiempos de solución para elegir el mejor solucionador.

En la figura 4.27, se muestran las gráficas de error absoluto por medida, donde se puede ver que los solucionadores de primer orden, alto orden y por defecto presentan resultados similares, como se ha venido presentando en los casos anteriormente estudiados.

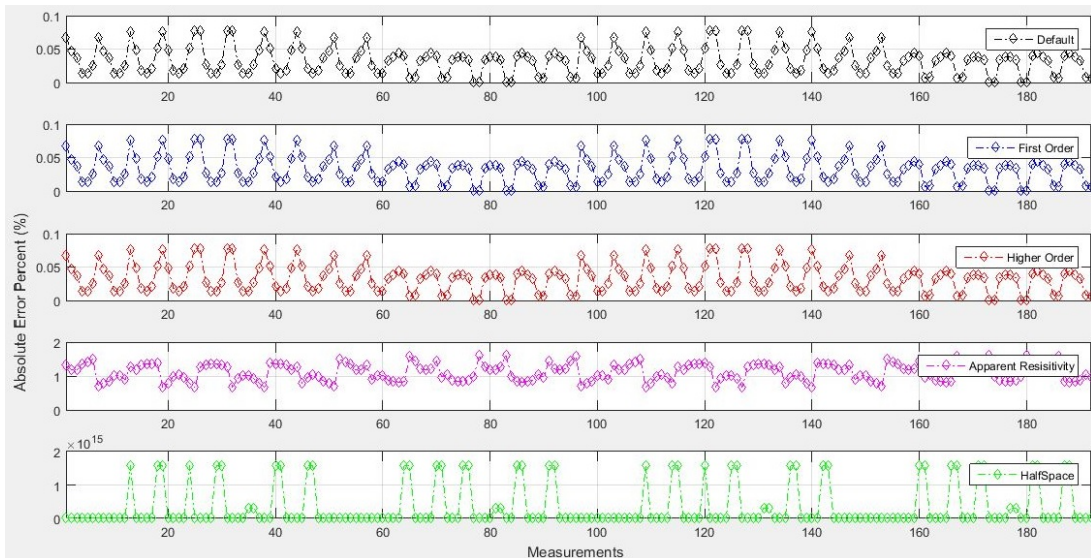


Figura 4.27: Error absoluto individual objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

En la figura 4.28, se muestran las gráficas error relativo por medida para cada solucionador, al igual que con las gráficas de error absoluto, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen resultados similares, así como se ha venido presentado en los casos anteriores.

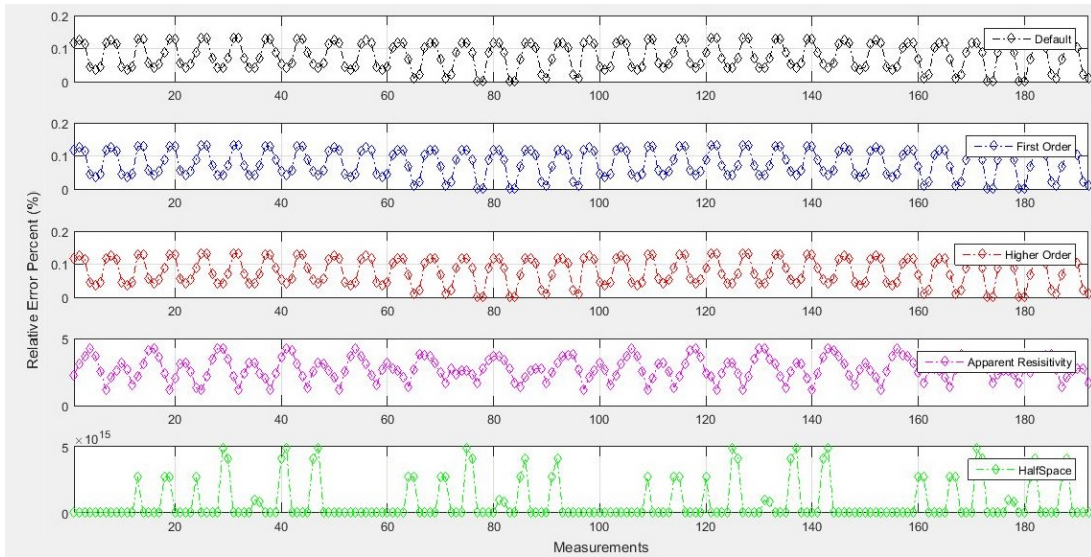


Figura 4.28: Error relativo individual objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

En la figura 4.29, se muestra que el solucionador *halspace* es el que menor tiempo empleó para solucionar el problema directo, seguido del solucionador de alto orden, luego el de primer orden, después el *default* y finalmente se encuentra el solucionador de resistividad aparente, el cual tarda aproximadamente el doble que el de alto orden. Estos resultados se han venido repitiendo en cada uno de los casos expuestos.

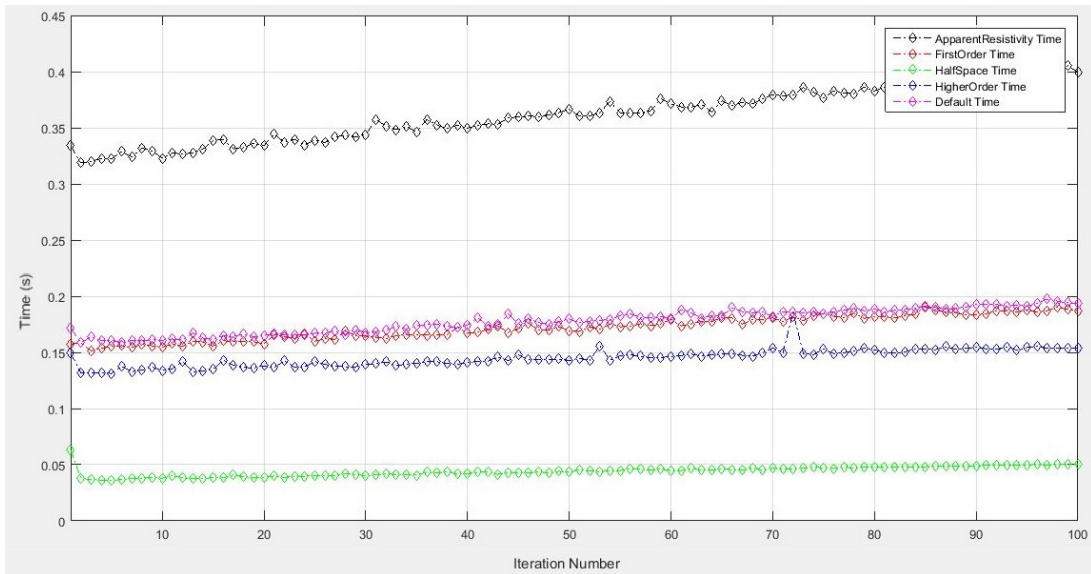


Figura 4.29: Tiempo solucionadores objeto irregular no conductor e inyección opuesta.

A continuación se presenta una tabla comparativa 4.5, la cual contiene los promedios de error relativo, error absoluto y tiempos, adicional a lo anterior se indica si cada solucionador logra estimar la distribución de potencial; lo anterior con el fin de seleccionar el mejor algoritmo para el presente caso.

Solucionadores	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Distribución de potencial	Tiempos (seg)
Alto orden	0,07810	0,03310	Si	0,07726
Primer orden	0,07810	0,03310	Si	0,09197
Resistividad aparente	2,74800	1,10680	Si	0,19186
<i>Halfspace</i>	$7,79*10^{14}$	$3,40*10^{14}$	No	0,02364
<i>Default</i>	0,07810	0,03310	Si	0,09484

Tabla 4.5: Tabla comparativa solucionadores caso irregular.

Se puede observar que en los modelos FEM 2D que contienen objetos regulares e irregulares, el algoritmo de alto orden presenta mejores índices de desempeño, tanto para patrones de inyección y medición adyacente y opuesto.

4.6. Caso 5: Con modelo 3D inyección adyacente

El modelo seleccionado para este caso fue el de hombre adulto con pulmones y 16 electrodos, así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de $15\mu A$ (Figura 4.30).

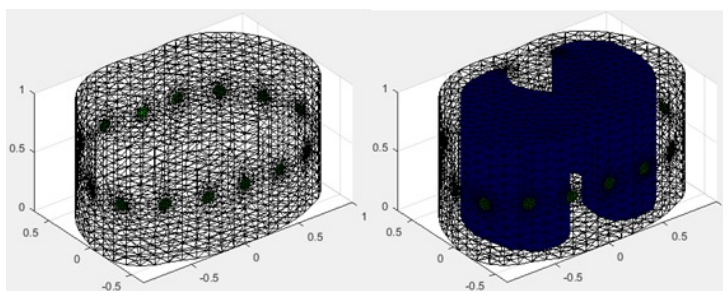


Figura 4.30: Malla precargada.

En la figura 4.31, se puede observar la distribución de corriente de los electrodos en un modelo precargado. Como se puede observar, las mayores variaciones de corriente se presentan en los electrodos 10, 15 y 16.

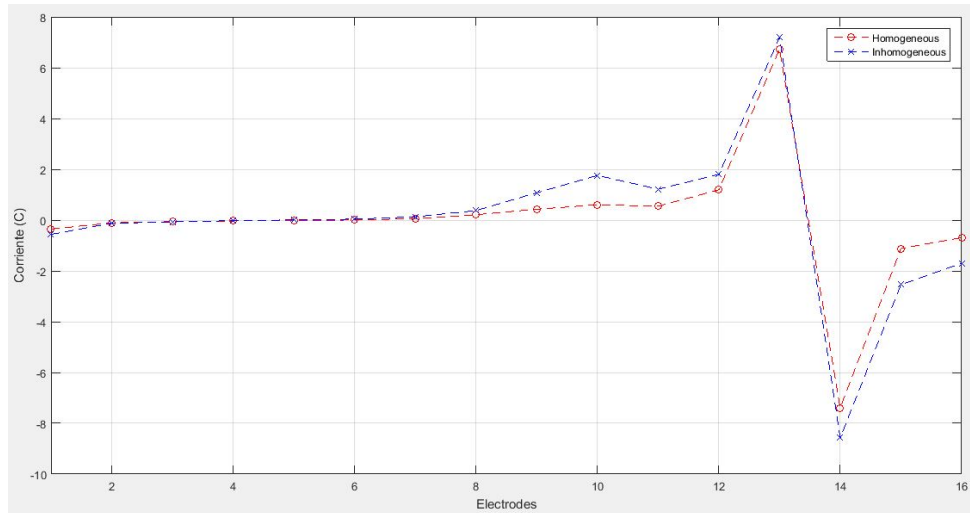


Figura 4.31: Corriente en cada electrodo con modelo precargado 3D.

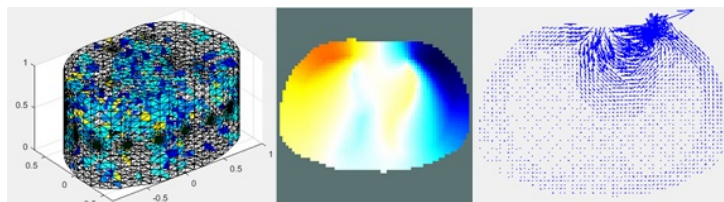


Figura 4.32: Solución *default* 3D.

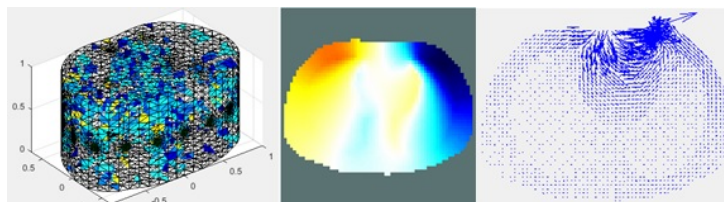


Figura 4.33: Solución primer orden 3D.

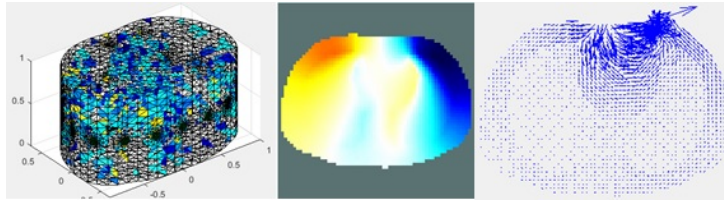


Figura 4.34: Solución alto orden 3D.

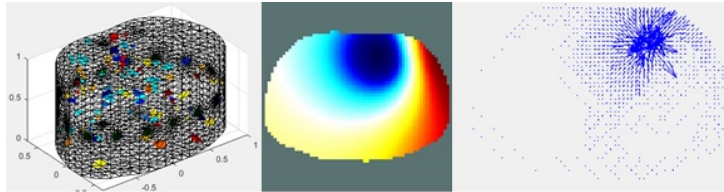


Figura 4.35: Solución *halfspace* 3D.

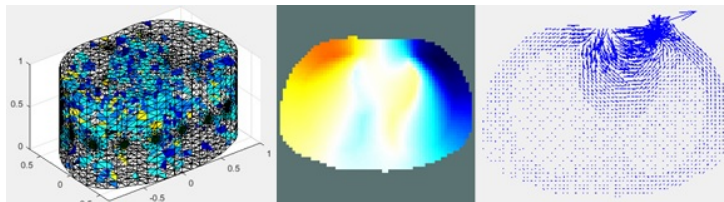


Figura 4.36: Solución aparente resistividad 3D.

En este caso, se puede observar que el solucionador *halfspace* presenta resultados gráficos aceptables, ver figura 4.35, aunque sigue estando por debajo de los otros solucionadores. A continuación se procede a analizar las gráficas de error absoluto, error relativo y tiempos de solución.

En la figura 4.37, se muestran las gráficas de error absoluto por medida para cada solucionador, donde se puede observar que los resultados presentan la misma tendencia que los obtenidos con los modelos 2D. Como se puede notar que el algoritmo *halfspace* presenta una mejor respuesta en 3D que en 2D, permitiendo estimar la distribución de potencial al interior del modelo.

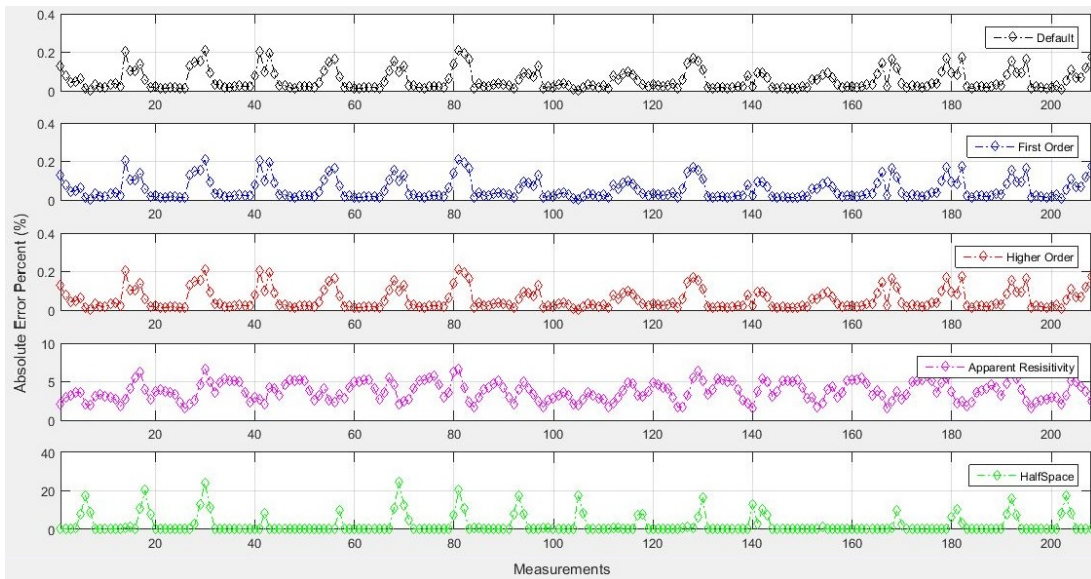


Figura 4.37: Error absoluto individual precargado.

En la figura 4.38, se muestra el error relativo por medida para cada solucionador, mostrando la misma tendencia que se ha venido presentando en los casos anteriores.

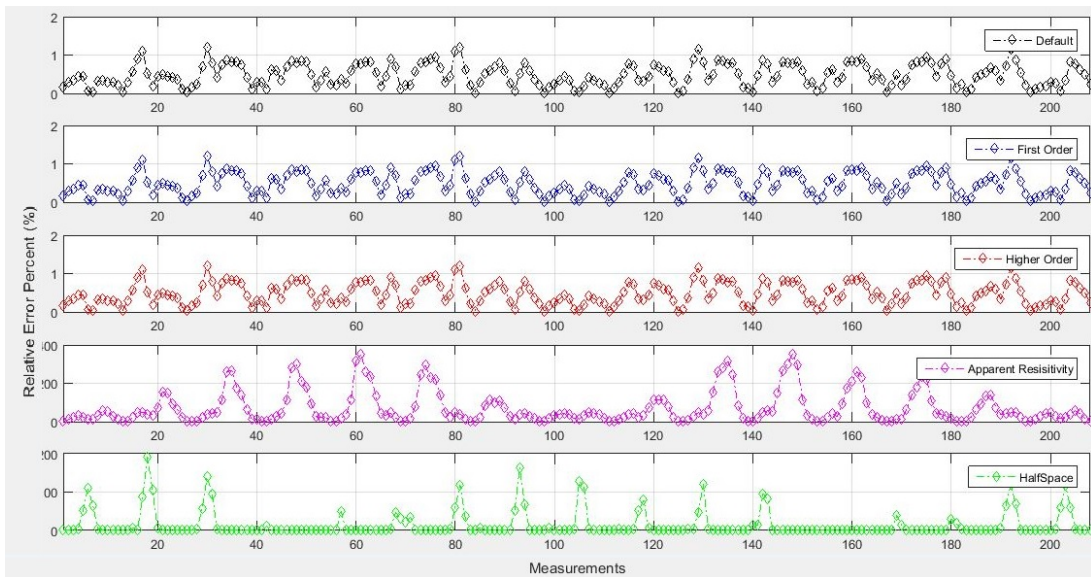


Figura 4.38: Error relativo individual precargado.

En la figura 4.39, se muestran las gráficas de los tiempos para cada solucionador, donde se puede observar que cuando se emplean modelos 3D, los tiempos de ejecución son muy

similares sin importar las interacciones, contrario a lo encontrado en los modelos 2D, donde el tiempo de solución del problema directo aumenta al incrementar la interacciones.

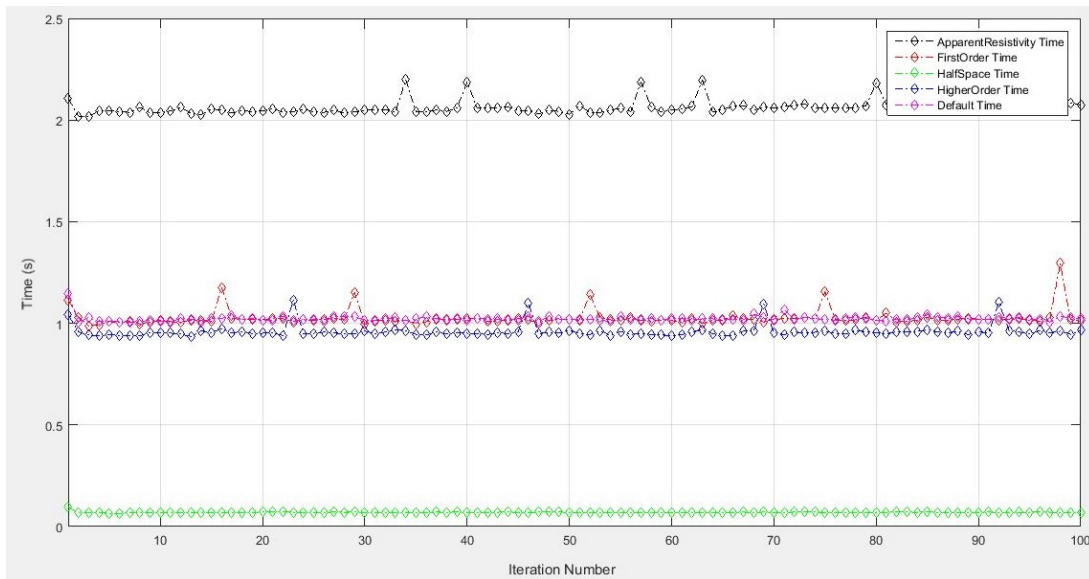


Figura 4.39: Tiempo solucionadores precargado.

A continuación se presenta una tabla comparativa 4.6, en la cual se puede observar que el algoritmo *halfspace* presenta unos índices de error aceptables y el mejor tiempo de solución del problema directo, convirtiéndose en una buena alternativa para el caso 3D.

Solucionadores	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Distribución de potencial	Tiempos (seg)
Alto orden	0,53034	0,05893	Si	0,49966
Primer orden	0,53034	0,05893	Si	0,53177
Resistividad aparente	82,88742	4,11326	Si	1,08138
<i>Halfspace</i>	15,77749	2,50531	Si	0,03553
<i>Default</i>	0,53034	0,05893	Si	0,53326

Tabla 4.6: Tabla comparativa solucionadores caso irregular 1.

4.7. Caso 6: Con modelo 3D inyección opuesta

Para este caso se emplea el mismo modelo del caso anterior, hombre adulto con pulmones y 16 electrodos, así mismo, la inyección y medición opuesta y la amplitud de $15\mu A$.

En la figura 4.40, se puede observar la distribución de corriente de los electrodos en un modelo precargado con inyección opuesta. Como se puede observar en la gráfica, las variaciones de corriente se presentan en todos electrodos (excepto en el electrodo 9), notándose así la diferencia con respecto a la gráfica de inyección adyacente en la figura 4.31.

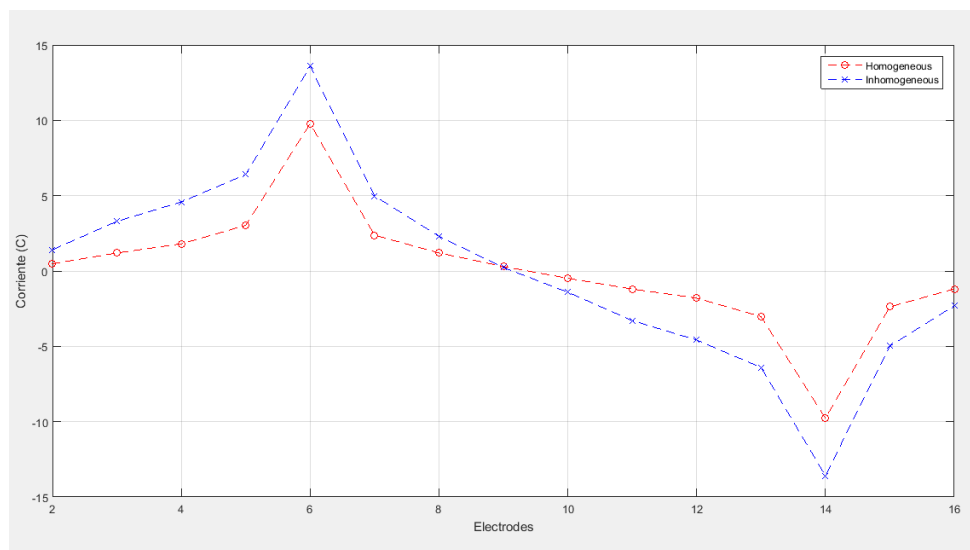


Figura 4.40: Corriente en cada electrodo con modelo precargado 3D inyección opuesta.

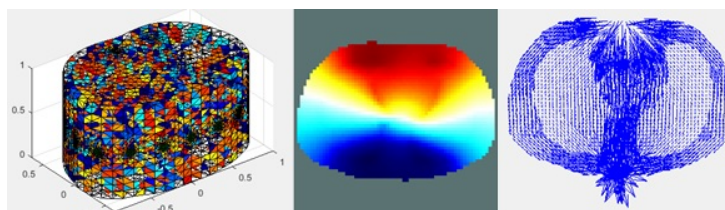


Figura 4.41: Solución *default* 3D inyección opuesta.

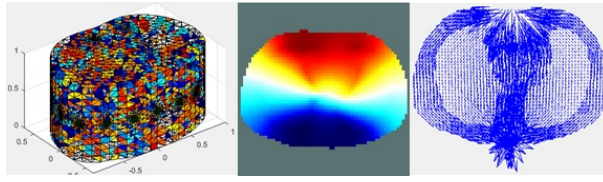


Figura 4.42: Solución primer orden 3D inyección opuesta.

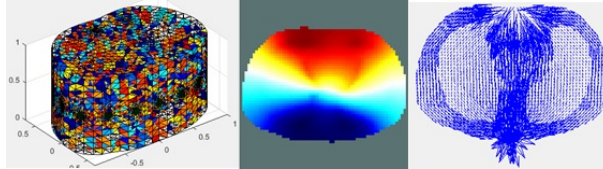


Figura 4.43: Solución alto orden 3D inyección opuesta.

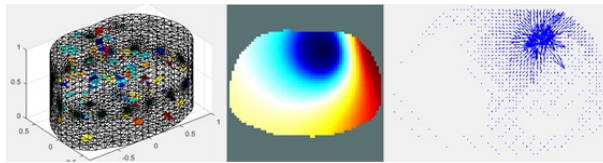


Figura 4.44: Solución *halfspace* 3D inyección opuesta.

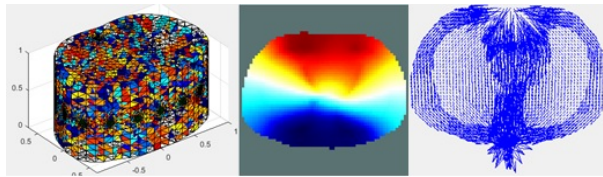


Figura 4.45: Solución aparente resistividad 3D inyección opuesta.

En este caso, se puede observar que el solucionador *halfspace* presenta resultados gráficos aceptables (Figura 4.44), aunque el comportamiento de las corrientes al interior del modelo presenta menor afectación que las otras alternativas.

En la figura 4.46, se muestran las gráficas de error absoluto por medida para cada solucionador, en donde se puede ver que los solucionadores de primer orden, alto orden y por defecto presentan resultados similares.

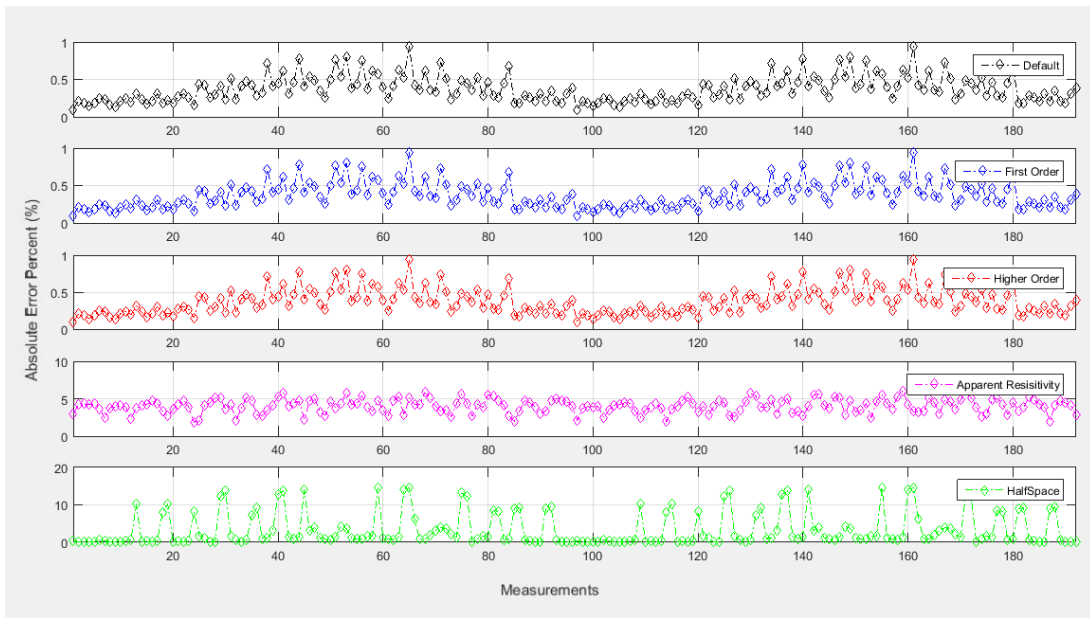


Figura 4.46: Error absoluto individual precargado inyección opuesta.

En la figura 4.47, se muestran las gráficas error relativo para cada solucionador, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen resultados similares como las gráficas de error absoluto. Por otra parte se observa que el solucionador de aparente resistividad y *halfspace* presentan mayor variación de potencial sobre los electrodos.

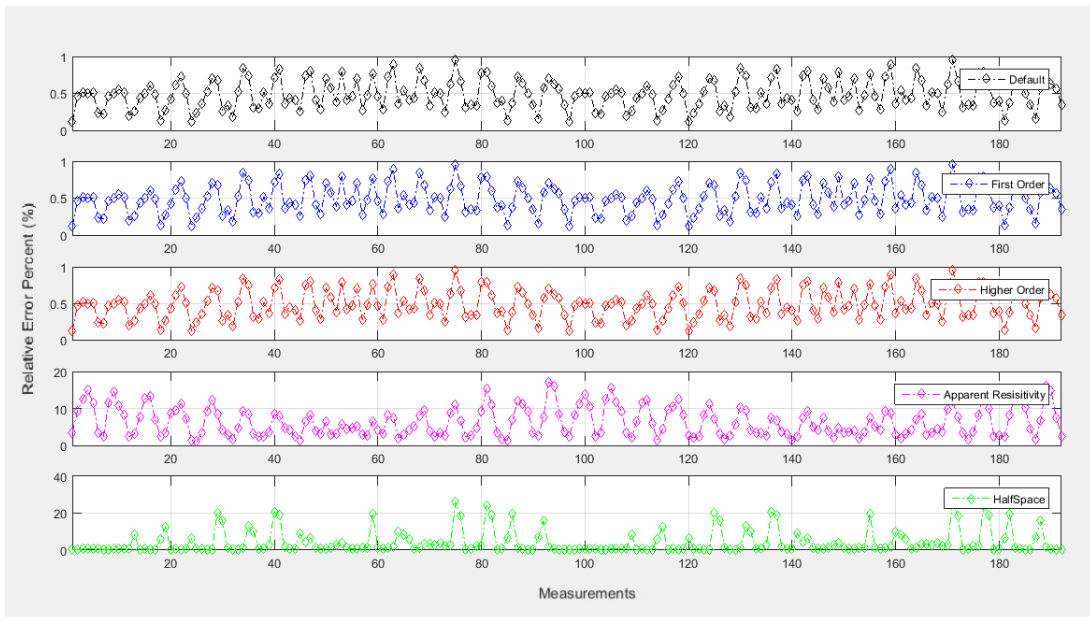


Figura 4.47: Error relativo 3D inyección opuesta.

En la figura 4.48, se muestran los tiempos para cada solucionador, donde se observa que el tiempo de procesamiento respecto a los resultados con inyección adyacente, son similares.

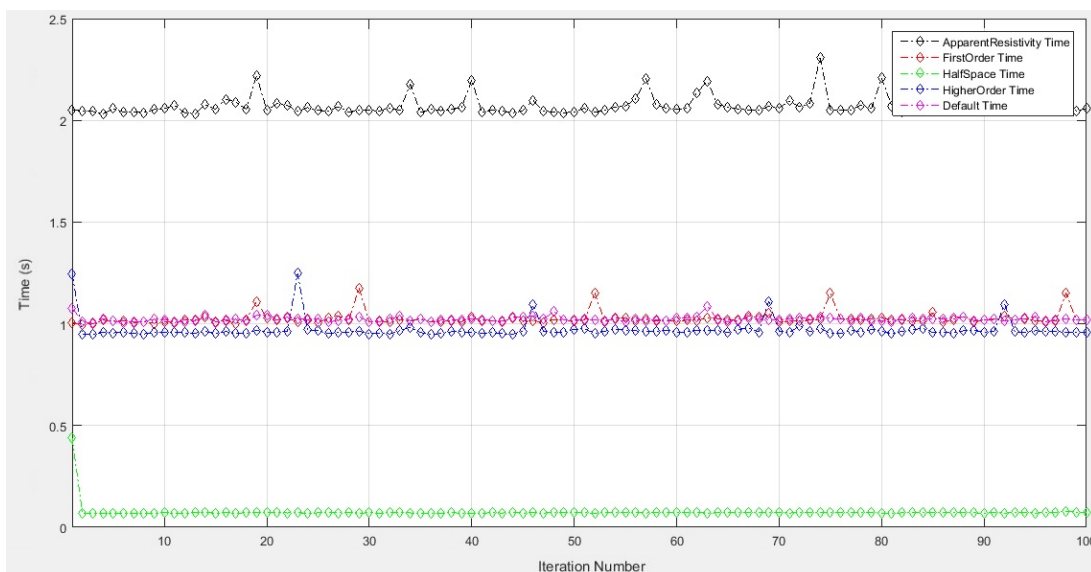


Figura 4.48: Tiempo solucionadores precargado inyección opuesta.

En la tabla 4.7 se presentan los índices de desempeño para este caso, mostrando un comportamiento similar al presentado en el caso 3D con patrones de inyección y medición adyacente.

Solucionadores	Error Relativo (%)	Error Absoluto (%)	Disribución de potencial	Tiempos (seg)
Alto orden	0,48627	0,37119	Si	0,50842
Primer orden	0,48627	0,37119	Si	0,53702
Resistividad aparente	6,34257	4,03032	Si	1,08495
<i>HalfSpace</i>	4,23177	3,36160	No	0,03673
<i>Default</i>	0,48627	0,37119	Si	0,53719

Tabla 4.7: Tabla comparativa solucionadores caso irregular 2.

4.8. Caso 7: Objeto no conductor en 3D, un anillo, dos anillos y zig-zag

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema en 3D con un objeto no conductor fue la siguiente: malla torácica, densidad c , sección transversal número 3 y 16 electrodos, además, la perturbación no conductora es de forma esférica con radio 20 unidades, coordenada en X de 50, en Y y Z de 30 unidades respectivamente. Así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de corriente fue de $15\mu A$. Adicional a esto, se hará una comparación entre el número de anillos, es decir se simuló el objeto mencionado con la malla en 3D, con un anillo, dos anillos y la distribución en zig-zag.

Corriente en cada electrodo

En las figuras 4.49, 4.50 y 4.51, se muestran las gráficas de corriente por cada electrodo, según sea el caso; con lo anterior se puede notar que el caso de 2 anillos es el que presenta mayor variación entre la malla homogénea y la heterogénea, indicando, que en este caso es en el que mejor se nota la perturbación. También se observa que en la distribución de zig-zag de los electrodos, la corriente presenta una distribución asociada a la forma en la que se encuentran ubicados los electrodos. Por otra parte en el caso de un anillo es más complejo detectar las variaciones de corriente, ya que el objeto se encuentra un poco más arriba que estos.

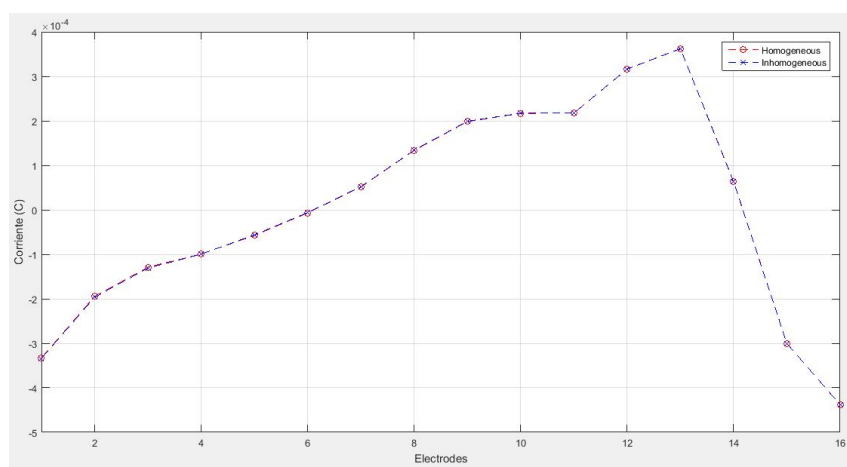


Figura 4.49: Corriente en cada electrodo, 1 anillo. [Elaboración Propia]

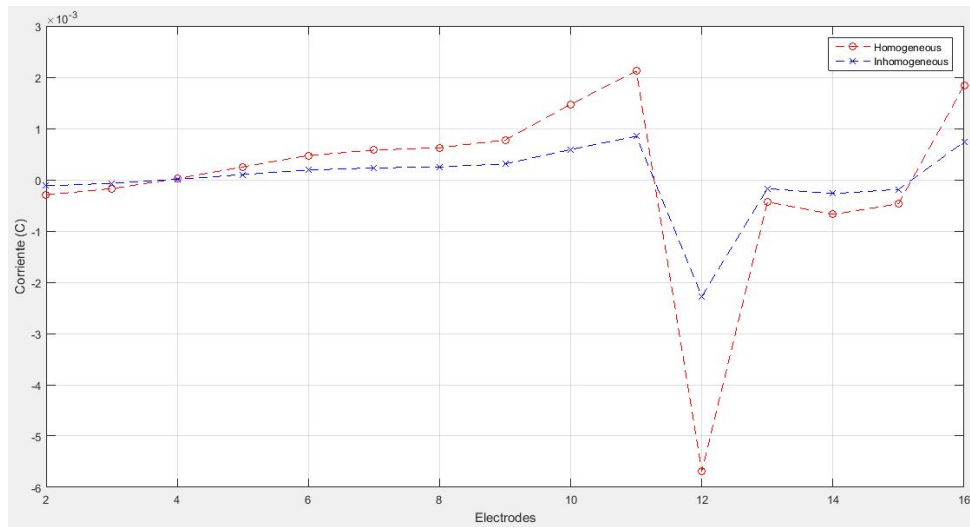


Figura 4.50: Corriente en cada electrodo, 2 anillos. [Elaboración Propia]

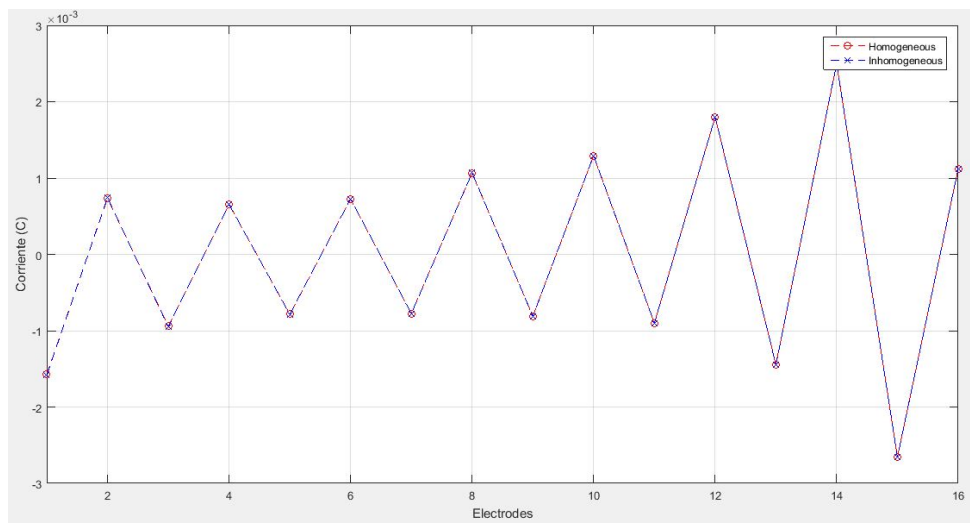


Figura 4.51: Corriente en cada electrodo, anillo zig-zag. [Elaboración Propia]

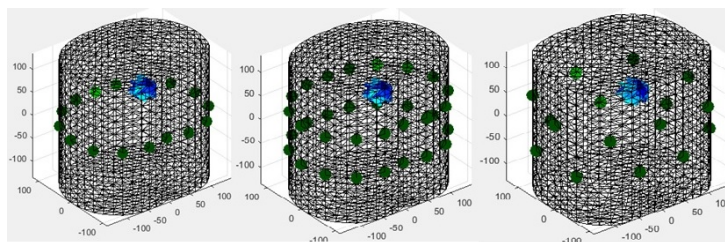


Figura 4.52: Malla diseñada con perturbación en 3D. [Elaboración Propia]

Analizando las siguientes imágenes de distribución de potencial para cada caso, se puede observar que con 2 anillos se presenta una mejor reconstrucción, pues se identifica de mejor manera la localización del disturbio. Adicional a lo anterior, se observa una mejor distribución de potencial con el solucionador *halfspace* y los electrodos en zig-zag, que con este mismo solucionador y uno o dos anillos de electrodos.

Distribución de potencial solucionador *default*

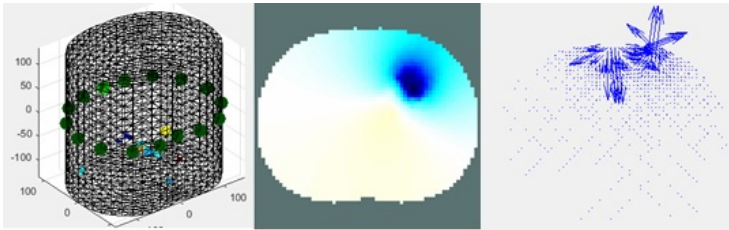


Figura 4.53: Solución con 1 anillo. [Elaboración Propia]

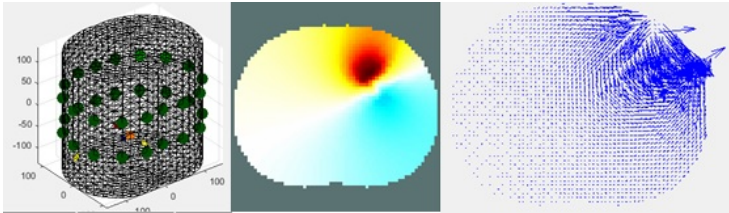


Figura 4.54: Solución con 2 anillos. [Elaboración Propia]

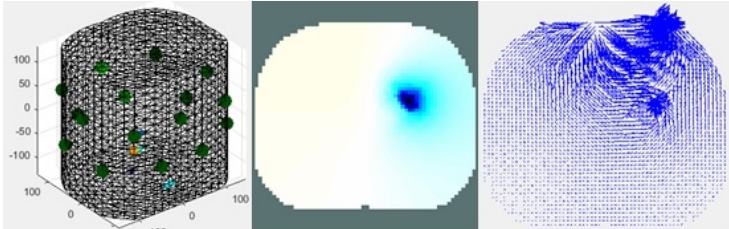


Figura 4.55: Solución con anillo en zig-zag. [Elaboración Propia]

Distribución de potencial solucionador primer orden

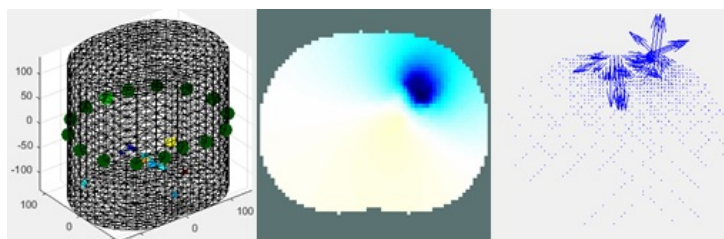


Figura 4.56: Solución con 1 anillo. [Elaboración Propia]

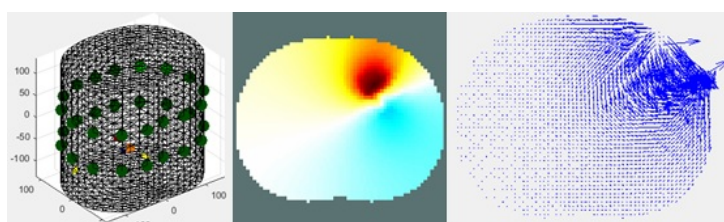


Figura 4.57: Solución con 2 anillos. [Elaboración Propia]

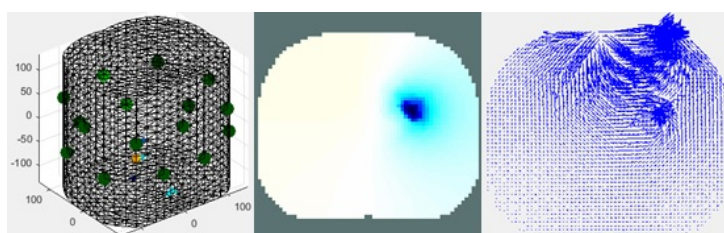


Figura 4.58: Solución con anillo en zig-zag. [Elaboración Propia]

Distribución de potencial solucionador alto orden

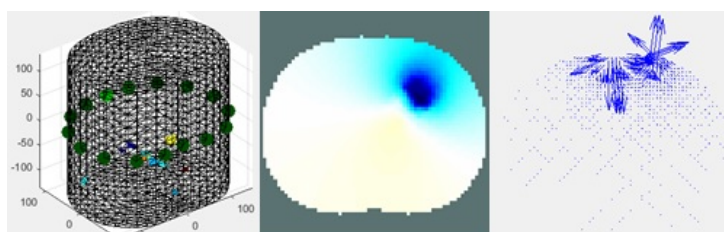


Figura 4.59: Solución con 1 anillo. [Elaboración Propia]

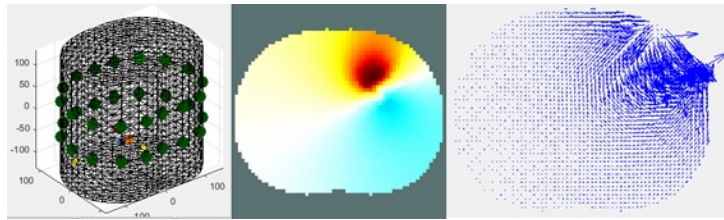


Figura 4.60: Solución con 2 anillos. [Elaboración Propia]

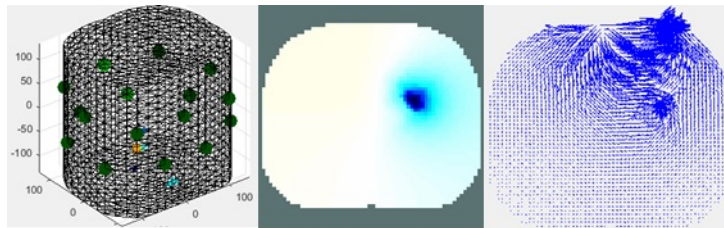


Figura 4.61: Solución con anillo en zig zag. [Elaboración Propia]

Distribución de potencial solucionador *halfspace*

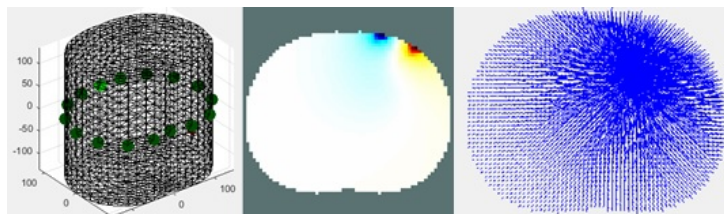


Figura 4.62: Solución con 1 anillo. [Elaboración Propia]

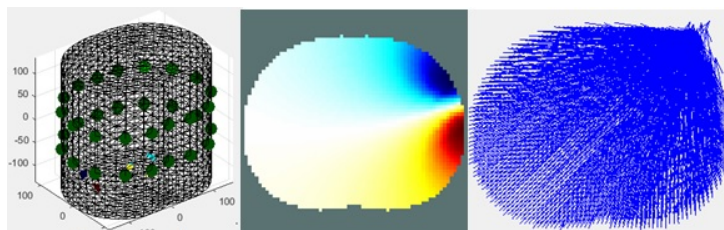


Figura 4.63: Solución con 2 anillos. [Elaboración Propia]

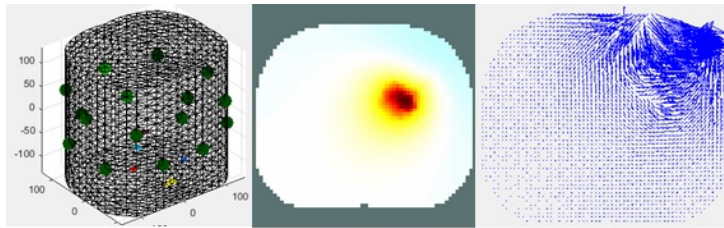


Figura 4.64: Solución con anillo en zig-zag. [Elaboración Propia]

Distribución de potencial solucionador aparente resistividad

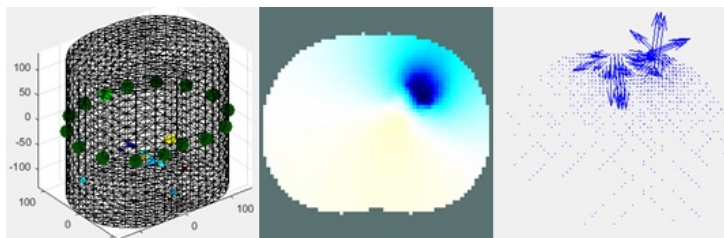


Figura 4.65: Solución con 1 anillo. [Elaboración Propia]

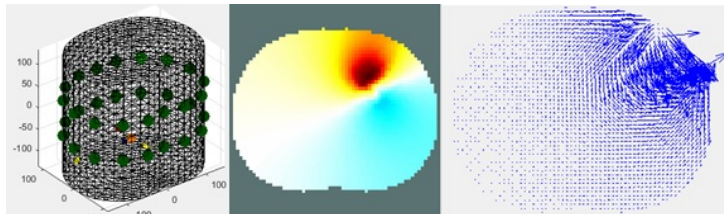


Figura 4.66: Solución con 2 anillos. [Elaboración Propia]

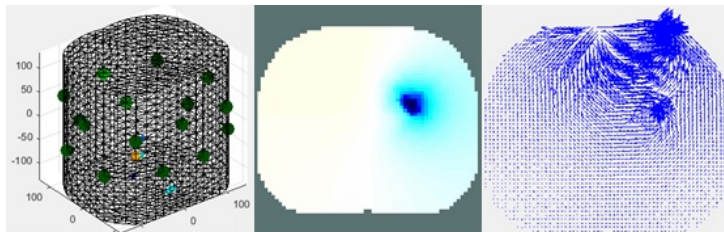


Figura 4.67: Solución con anillo en zig-zag. [Elaboración Propia]

Error absoluto individual

En las figuras 4.68, 4.69 y 4.70, se muestran las gráficas de error absoluto por medida (para un anillo, 2 anillos y zig-zag respectivamente), separadas para cada solucionador, como en los casos previos se puede observar que los solucionadores de primer orden, alto orden y por defecto presentan resultados similares. También se puede ver que el error absoluto varía muy poco comparando los 3 casos que se muestran; sin embargo, de mayor a menor variación de voltaje, está el caso de zig-zag, seguido por el de 2 anillos y finalmente el de 1 anillo.

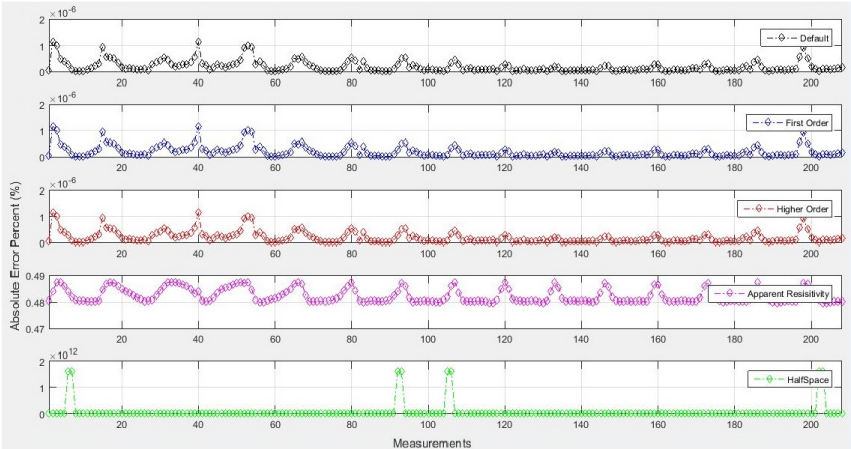


Figura 4.68: Error absoluto 1 anillo. [Elaboración Propia]

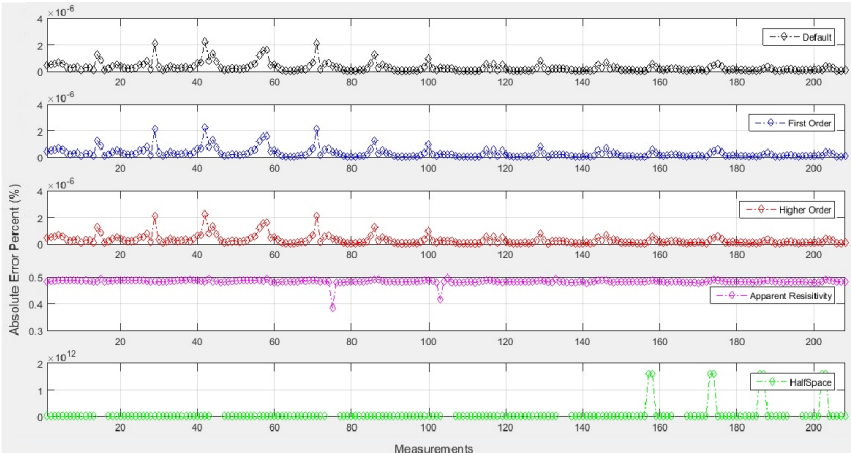


Figura 4.69: Error absoluto 2 anillos. [Elaboración Propia]

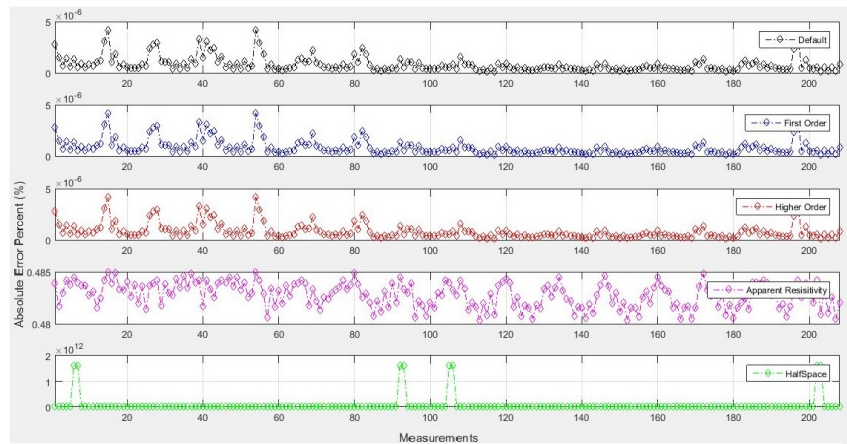


Figura 4.70: Error absoluto anillo zig-zag. [Elaboración Propia]

Error absoluto total

Como se puede notar en las gráficas 4.68, 4.69 y 4.70, la variación que presenta el solucionador *halfspace* es muy grande ($\times 10^{12}$), imposibilitando la lectura de las otras gráficas en las de error absoluto total, ver gráficas (4.71, 4.72 y 4.73), por tal motivo se eliminó, como en algunos casos previos. Adicional a esto se observa que, como se dijo anteriormente, los solucionadores *default*, primer orden y alto orden presentan los mismos resultados, aunque las variaciones para estos son pequeñas ($\times 10^{-6}$). Por lo anterior el solucionador de resistividad aparente presenta el mayor porcentaje de variación para este caso.

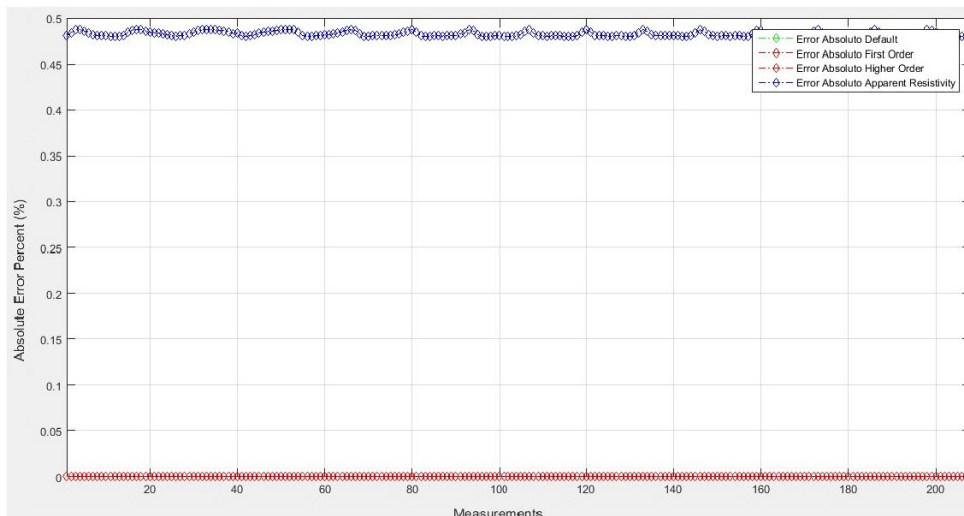


Figura 4.71: Con 1 anillo. [Elaboración Propia]

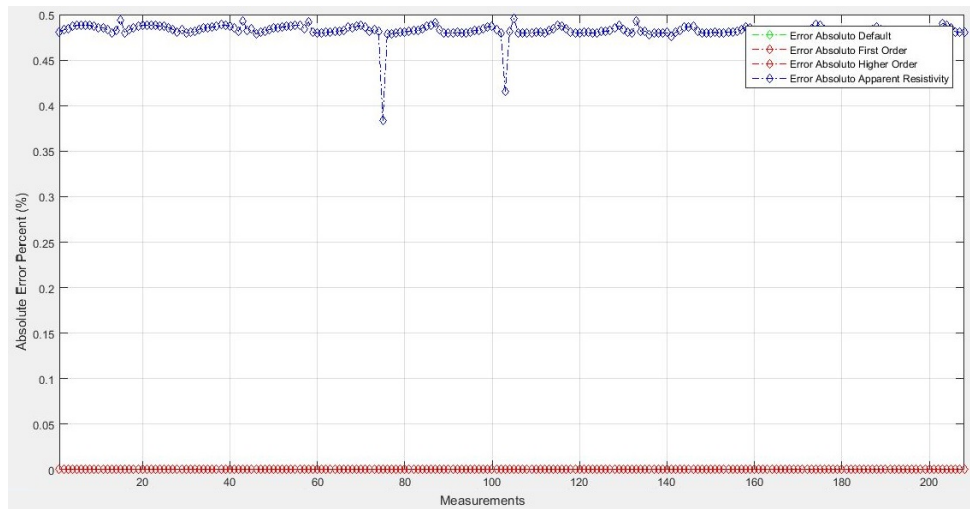


Figura 4.72: Con 2 anillos. [Elaboración Propia]

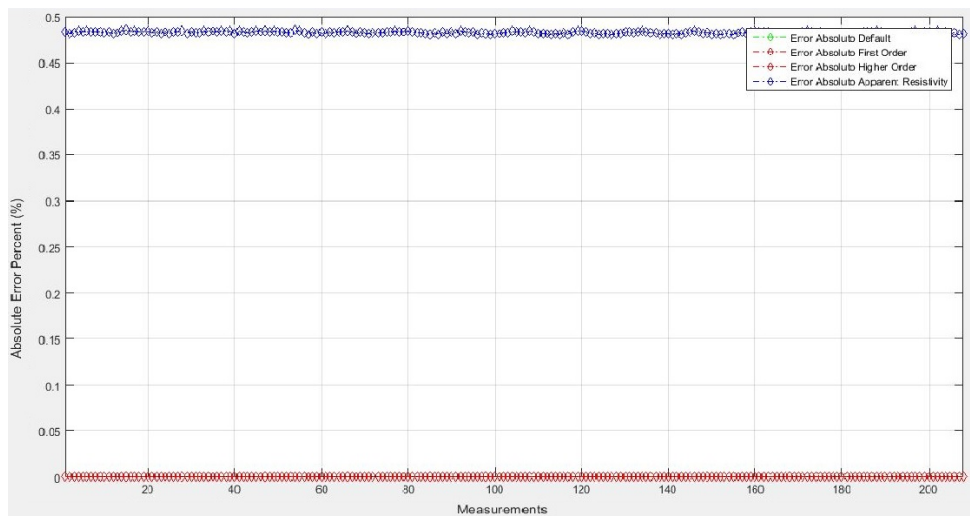


Figura 4.73: Con anillo zig-zag. [Elaboración Propia]

Solucionadores	1 anillo	2 anillos	Anillo en zig-zag
Alto orden	$1,9189 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$8,04 \cdot 10^{-7}$
Primer orden	$1,9189 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$8,04 \cdot 10^{-7}$
Resistividad aparente	0,4822	0,4822	0,4827
<i>HalfSpace</i>	$6,20 \cdot 10^{10}$	65535	$6,20 \cdot 10^{10}$
<i>Default</i>	$1,9189 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$8,04 \cdot 10^{-7}$

Tabla 4.8: Tabla comparativa solucionadores error absoluto (%).

Error relativo individual

En las figuras 4.74, 4.75 y 4.76, se muestran las gráficas de error relativo por medida, para cada solucionador, es posible notar que las de alto orden, primer orden y *default* tienen resultados similares. Cabe resaltar que en estos casos, la variación de voltaje, de mayor a menor es así: caso con 2 anillos, luego con distribución en zig-zag y finalmente con un anillo.

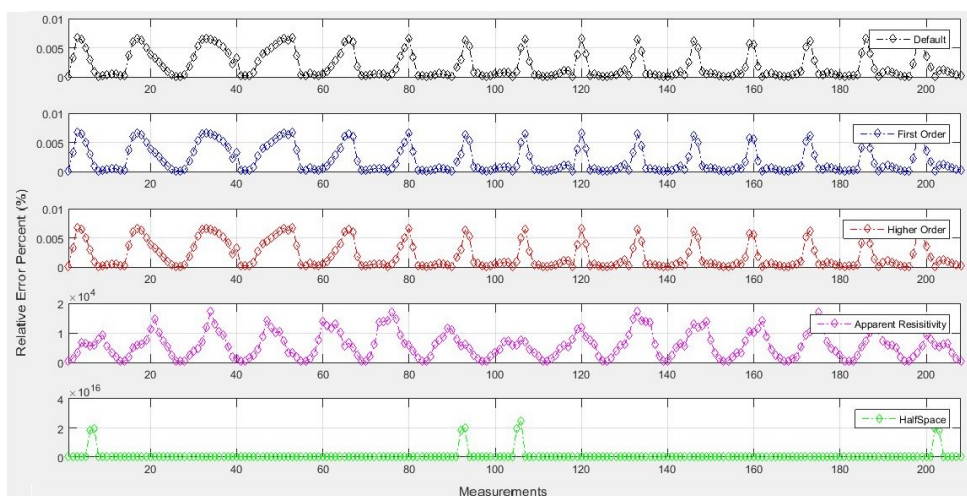


Figura 4.74: Con 1 anillo. [Elaboración Propia]

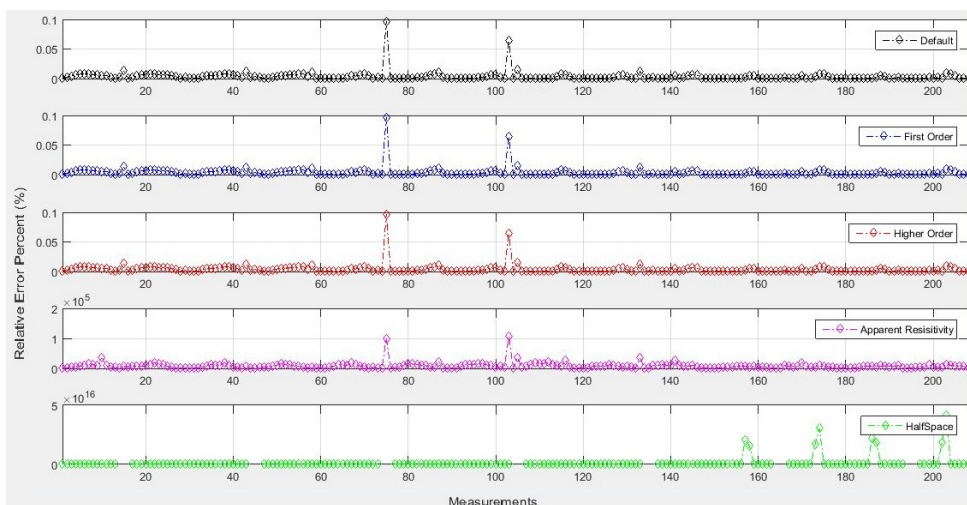


Figura 4.75: Con 2 anillos. [Elaboración Propia]

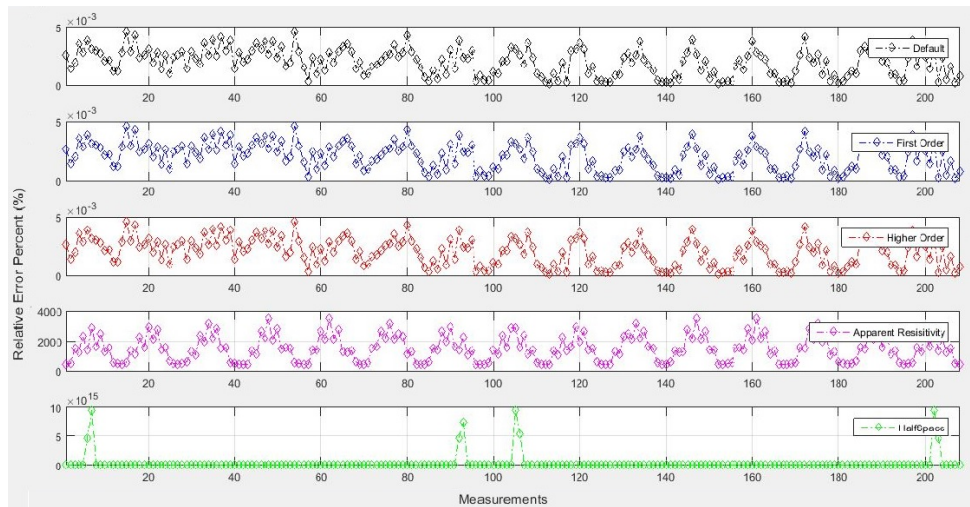


Figura 4.76: Con anillo zig-zag. [Elaboración Propia]

Error relativo total

Al igual que en los anteriores casos, se presenta la misma tendencia en los resultados, donde el error relativo del solucionador *halfspace* es muy grande (orden $\times 10^{15}$ o $\times 10^{16}$), imposibilitando visualizar las demás gráficas por este motivo se eliminó, los solucionadores *default*, alto orden y primer orden presentan los mismos resultados. Teniendo en cuenta lo anterior, el solucionador de resistividad aparente tiene el mayor porcentaje de variación, como se puede observar en las siguientes figuras.

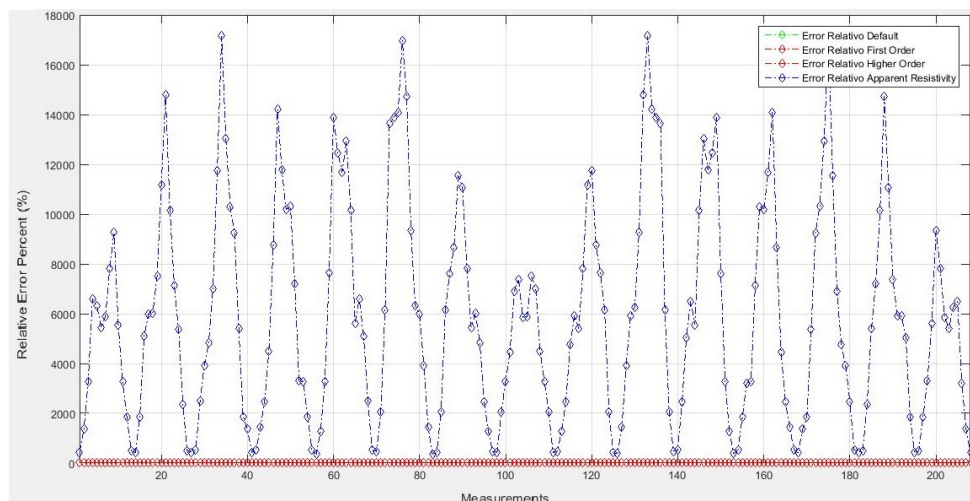


Figura 4.77: Con 1 anillo. [Elaboración Propia]

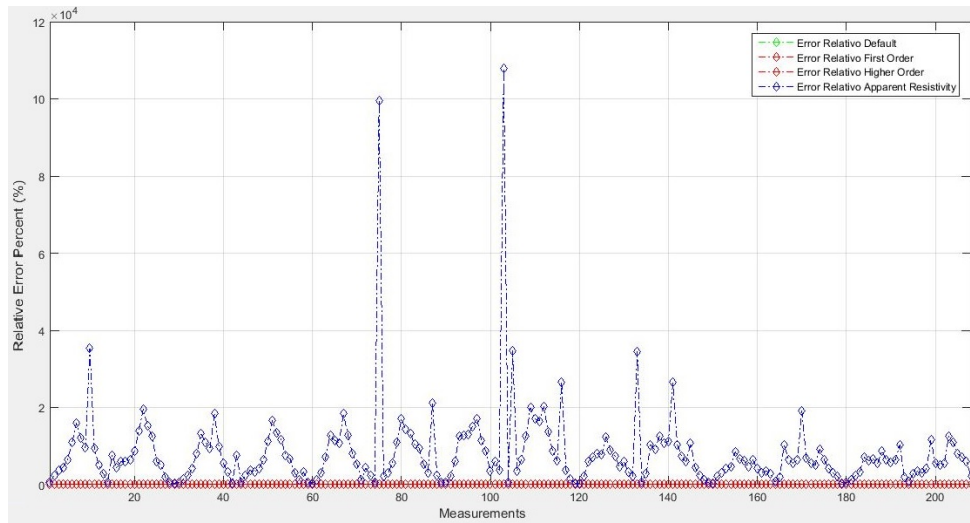


Figura 4.78: Con 2 anillos. [Elaboración Propia]

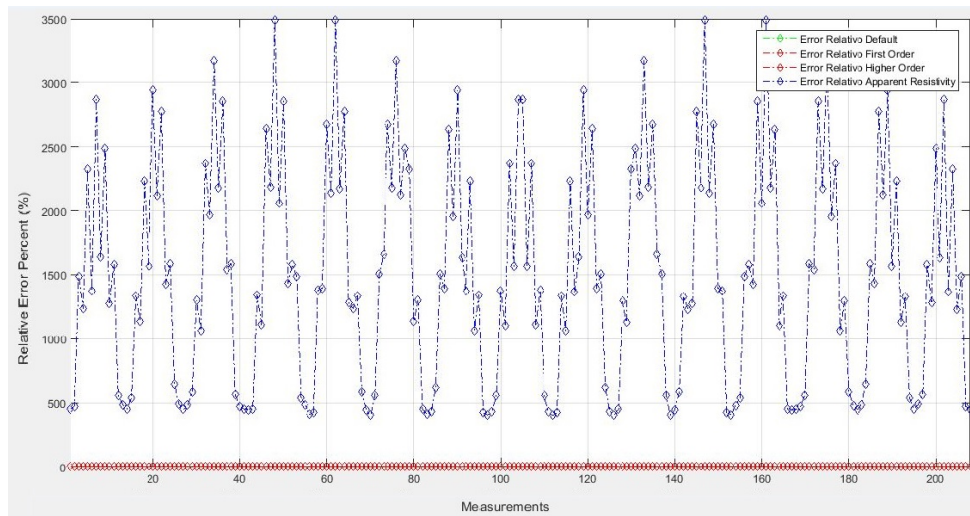


Figura 4.79: Con anillo zig-zag. [Elaboración Propia]

Solucionadores	1 anillo	2 anillos	Anillo zig-zag
Alto orden	0,0019	0,0036	0,0020
Primer orden	0,0019	0,0036	0,0020
Resistividad aparente	5912	8197	1489
<i>HalfSpace</i>	$7,61 \times 10^{14}$	65535	$2,64 \times 10^{14}$
<i>Default</i>	0,0019	0,0036	0,0020

Tabla 4.9: Tabla comparativa solucionadores error relativo (%).

Tiempos procesamiento total

En las figuras siguientes se muestran las gráficas de los tiempos, donde se puede observar que el solucionador que menos tarda es el *halfspace*, seguido del solucionador de alto orden, luego el de primer orden, después el *default* y finalmente el solucionador de aparente resistividad, este último tarda aproximadamente el doble del solucionador de alto orden. En cuanto a los casos más generales (con 1, 2 anillos o distribución en zig-zag), los tiempos más altos se encuentran en la distribución con 2 anillos, ello se puede deber a que al emplear más anillos se requiere mayor tiempo de procesamiento para incluirlos y solucionar las imágenes. Hay que destacar que en zig-zag solo se puede ubicar un anillo, pero por su distribución parece que constara de 2, por esto sus tiempos no llegan a ser tan bajos como el caso de 1 anillo, que es el que menos tarda ya que los electrodos se encuentran en un solo plano.

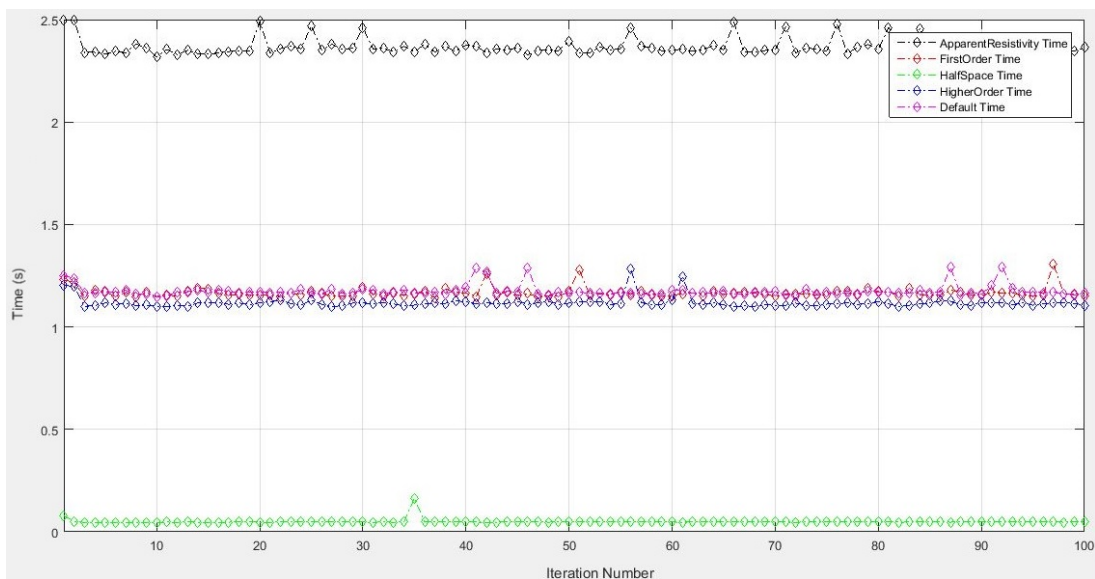


Figura 4.80: Con 1 anillo. [Elaboración Propia]

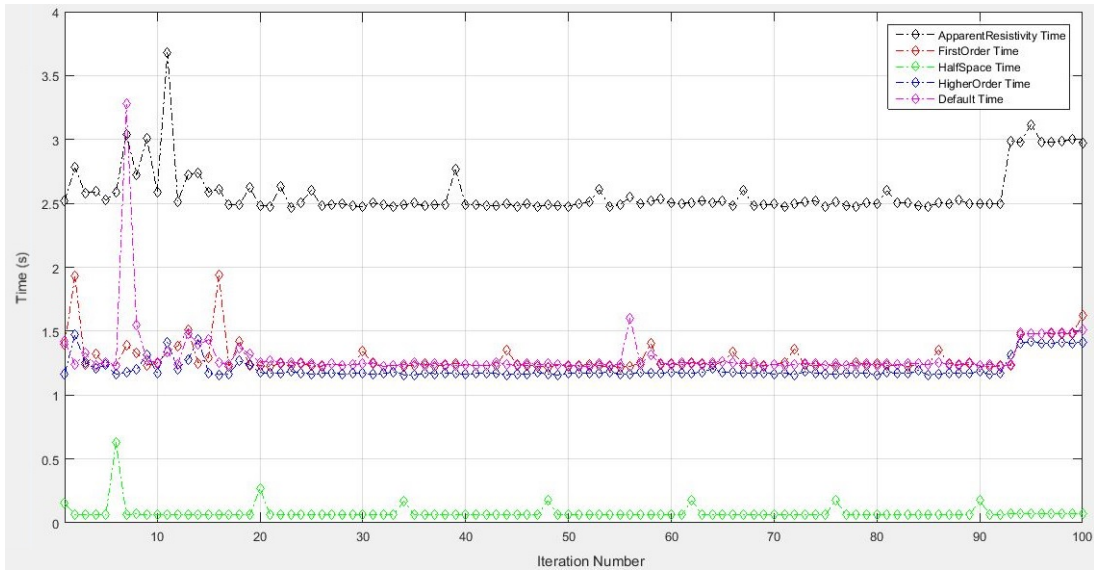


Figura 4.81: Con 2 anillos. [Elaboración Propia]

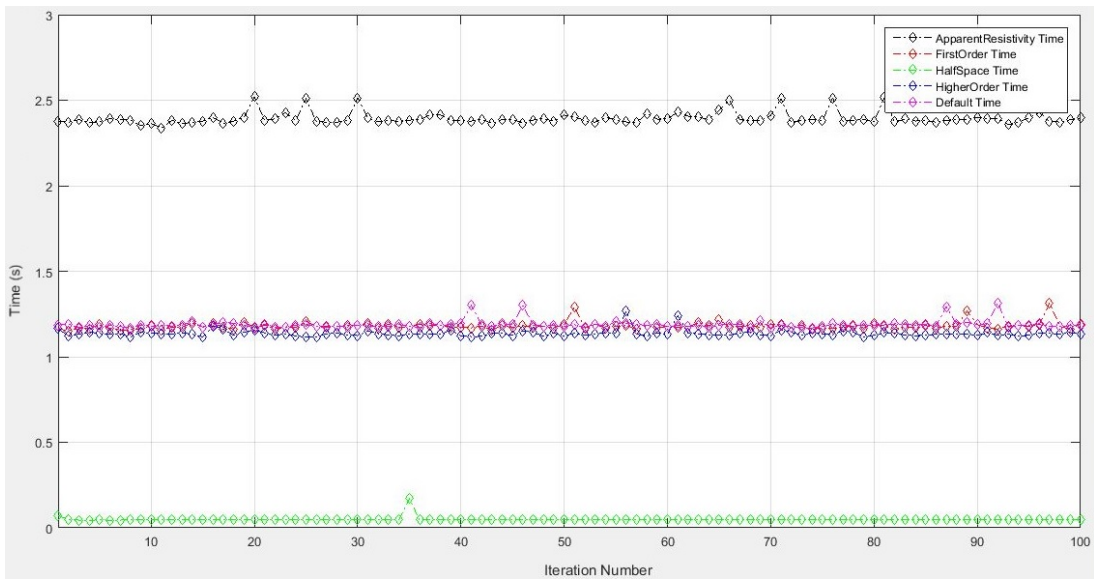


Figura 4.82: Con anillo zig-zag. [Elaboración Propia]

Solucionadores	1 anillo	2 anillos	Anillo zig-zag
Alto orden	0,5420	0,5559	0,5608
Primer orden	0,56517	0,5839	0,5809
Resistividad aparente	1,1456	1,1845	1,1410
<i>HalfSpace</i>	0,0233	0,0295	0,0232

<i>Default</i>	0,5713	0,5893	0,5678
----------------	--------	--------	--------

Tabla 4.10: Tabla comparativa solucionadores tiempo procesamiento en segundos.

Con el análisis previo realizado se observa que en cuanto a distribución de potencial, error absoluto y relativo, los solucionadores de alto orden, primer orden y por defecto presentan los mismos resultados; sin embargo, estos difieren en sus tiempos de solución, siendo el de alto orden el más rápido. Por otro lado el solucionador de *halfspace* tiene resultados óptimos en cuanto a error absoluto, relativo y tiempo de procesamiento, pero esto puede deberse a que su distribución de potencial es deficiente, por lo cual tarda menos tiempo y se nota una mayor diferencia de voltaje. Finalmente el solucionador de resistividad aparente presenta buenos resultados en cuanto a distribución de potencial, error absoluto y relativo, pero este es el que más tarda, llegando incluso a duplicar el tiempo del solucionador de alto orden.

4.9. Análisis de resultados de simulación

De acuerdo a los datos recolectados en simulación, se diseñaron las tablas comparativas en cada uno de los anteriores casos, teniendo en cuenta los resultados de cada solucionador respecto a los criterios de desempeño. En cada caso se eligió un solucionador con buenos resultados para todos los criterios, sabiendo que algunos solucionadores presentan resultados excelentes en algún criterio específico, pero deficientes en otros, por ello lo ideal es seleccionar el que presente en general buenos resultados.

Caso	Solucionador elegido
Caso 1:	Alto orden
Caso 2:	Alto orden
Caso 3:	Alto orden
Caso 4:	Alto orden
Caso 5:	Alto orden
Caso 6:	Alto orden

Tabla 4.11: Tabla elección solucionadores.

Teniendo en cuenta el análisis anterior de los casos en las tablas comparativas, se determinó que el mejor solucionador es el de alto orden (*higher order*), este se implementará para la comparación con datos reales, ello se puede ver en la interfaz diseñada con dicha finalidad. La interfaz brinda la posibilidad de elegir entre 3 casos (con objeto no conductor, conductor o con ambos), cada uno de estos consta de una carpeta que contiene diferentes *frames* (medidas de voltaje), de los cuales se debe seleccionar uno y con ello se procede a la comparación.

Comparación simulación datos reales

A continuación se presenta la comparación de datos reales vs simulación, donde el sistema simulado y el montaje posee solo 8 electrodos, con una densidad de malla F, radio del tanque 7.5 cm, altura 15 cm, inyección adyacente y corriente inyectada de $833\mu A$. Los *frames* (mediciones) de datos reales se almacenaron en un archivo.DAT, que es cargado y leído por la aplicación para su comparación. El experimento se dividió en 3 partes: conductor, no conductor y ambos, pues se poseen datos del experimento de estos 3 casos [1], que poseen diferentes resultados. Las especificaciones de cada objeto se encuentran explicadas en el capítulo 3, sección comparación con datos reales.

Objeto no conductor

Para el análisis con el artefacto no conductor se empleó una barra plástica como se muestra en la figura 4.83, para este caso se cuenta con 38 *frames* para el estudio, eligiendo aleatoriamente el número 11, presentando los siguientes resultados. Primero se procede a simular el *frame* 1 (homogeneo) en datos reales con el número 11, para presentar la diferencia entre estos.

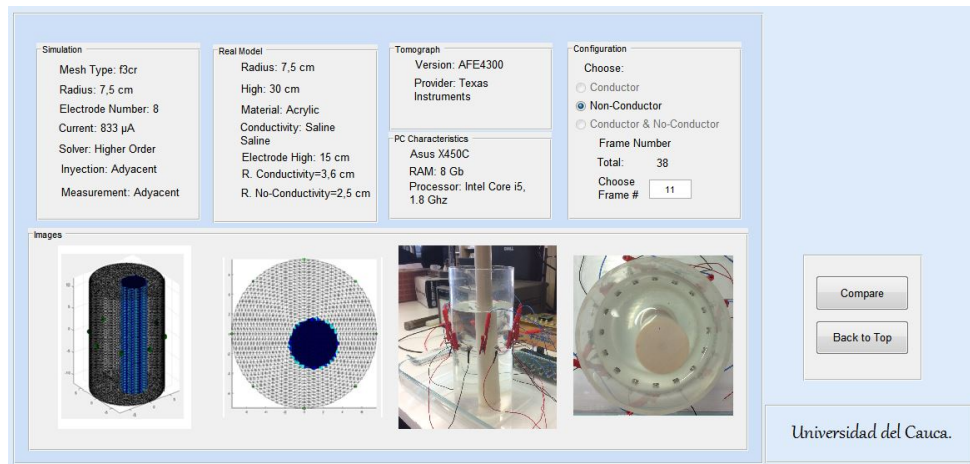


Figura 4.83: Interfaz comparación simulación con datos reales objeto no conductor. [Elaboración Propia]

De la figura 4.84, se observa el cambio en los niveles de voltaje entre un *frame* homogéneo (1) y un *frame* con un artefacto conductor (11), el cual será comparado con la simulación, donde los mayores cambios presentados se encuentran las medidas 9, 20, 30, 31, 33, 38.

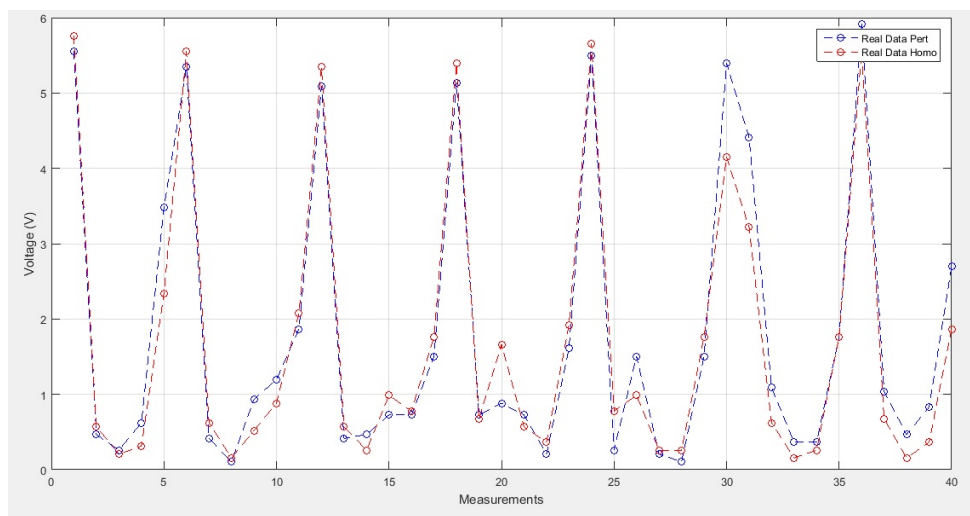


Figura 4.84: Comparación *frame* homogéneo (1) vs *frame* con artefacto (11). [Elaboración Propia]

De la figura 4.85, se puede observar una diferencia entre los valores simulados y medidos, ya que en el modelo FEM empleado no se consideran la capacitancias parásitas que existen en un experimento real, capacitancias debido al contacto entre los electrodos y la superficie del

tanque, la capacitancia debida a los cables de conexión entre los electrodos y el tomógrafo, datos que afectan las medidas. Sin embargo el error relativo entre los datos reales y simulados es un poco superior a 2(%), lo que indica que el emplear la aplicación para estimar los potenciales sobre los electrodos mediante modelos FEM simulados permite tener una buena aproximación del comportamiento de un medio bajo estudio. Además en esta figura se puede resaltar que entre las mediciones 14 – 26 se evidencia un cambio en los potenciales que son los que me permiten detectar el artefacto.

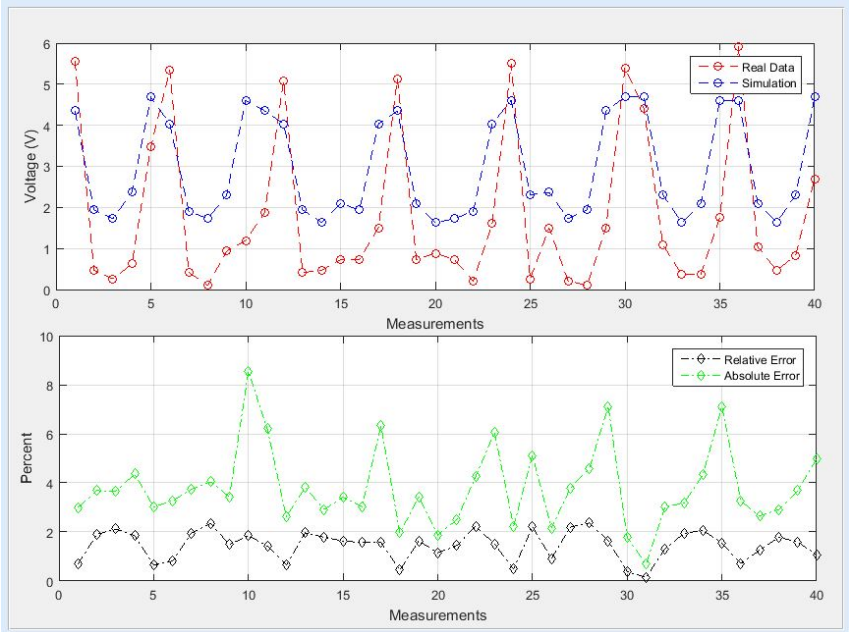


Figura 4.85: Gráficas de voltaje simulación vs datos reales objeto no conductor. [Elaboración Propia]

Objeto conductor

La figura 4.86, muestra que se seleccionó aleatoriamente el *frame* 15 para el análisis comparativo con un elemento conductor, y se obtienen los siguientes resultados.

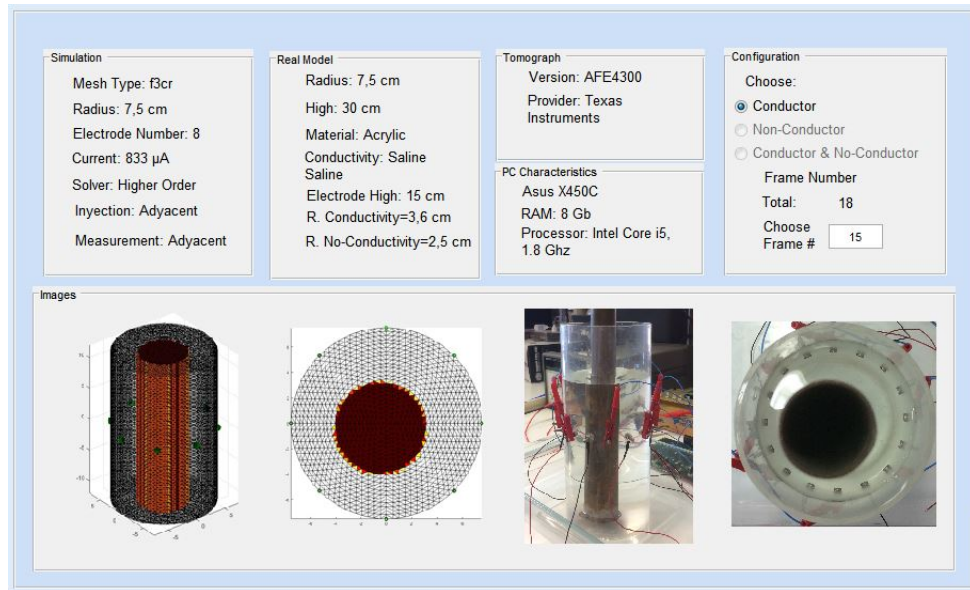


Figura 4.86: Interfaz comparación simulación con datos reales objeto conductor. [Elaboración Propia]

De la figura 4.87, se observa el cambio en los niveles de voltaje entre un *frame* homogéneo (1) y un *frame* con un artefacto conductor (15), el cual será comparado con la simulación, donde los mayores cambios presentados se encuentran las medidas 12, 18, 20, 29, 34.

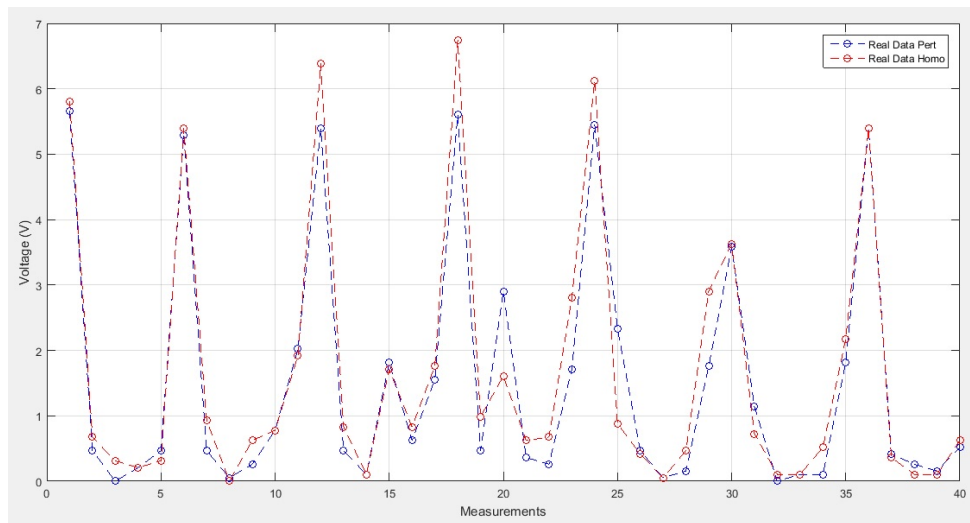


Figura 4.87: Comparación *frame* homogéneo (1) vs *frame* con artefacto (15). [Elaboración Propia]

Con el objeto conductor figura 4.88, se evidencia un error relativo superior que en el caso

anterior de un 3% y un error absoluto del 20% como máximo, lo cual indica que los campos eléctricos se ven más alterados con un objeto conductor. Además, al igual que en el experimento con el objeto no conductor, la variación de los potenciales se muestra entre los datos 14 – 22.

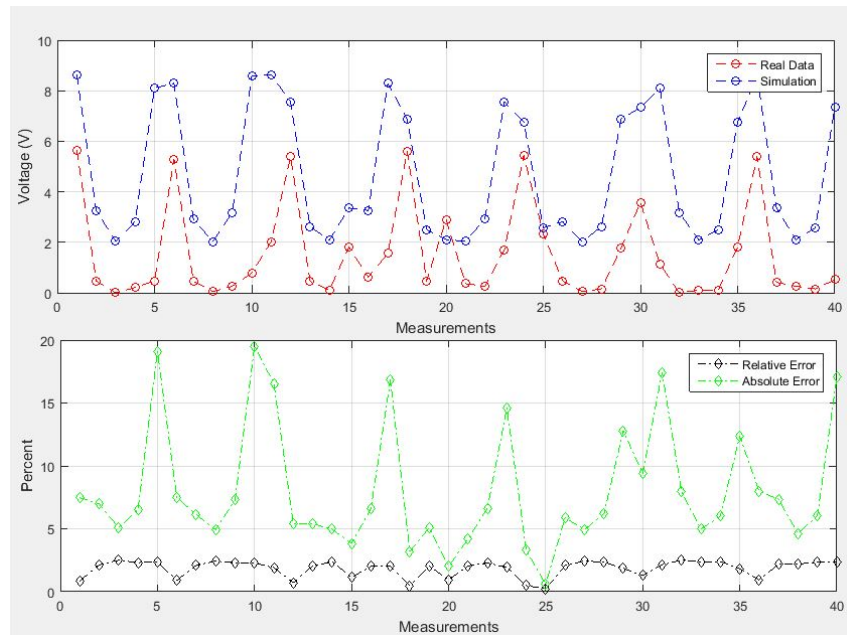


Figura 4.88: Gráficas de voltaje simulación vs datos reales objeto conductor. [Elaboración Propia]

Ambos objetos

La figura 4.89, muestra que se seleccionó el *frame 7* para el análisis comparativo con dos elementos, no conductor y conductor, y se obtienen los siguientes resultados.

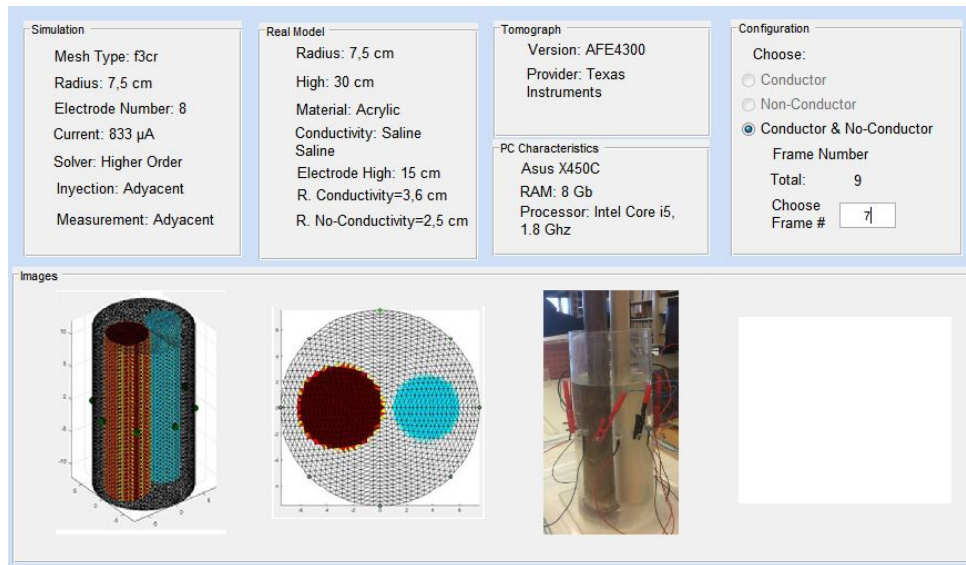


Figura 4.89: Interfaz comparación simulación con datos reales con dos objetos, conductor y no conductor. [Elaboración Propia]

De la figura 4.90, se observa el cambio en los niveles de voltaje entre un *frame* homogéneo (1) y un *frame* con un artefacto conductor (7), el cual será comparado con la simulación, donde los mayores cambios presentados se encuentran las medidas 13, 18, 20, 29.

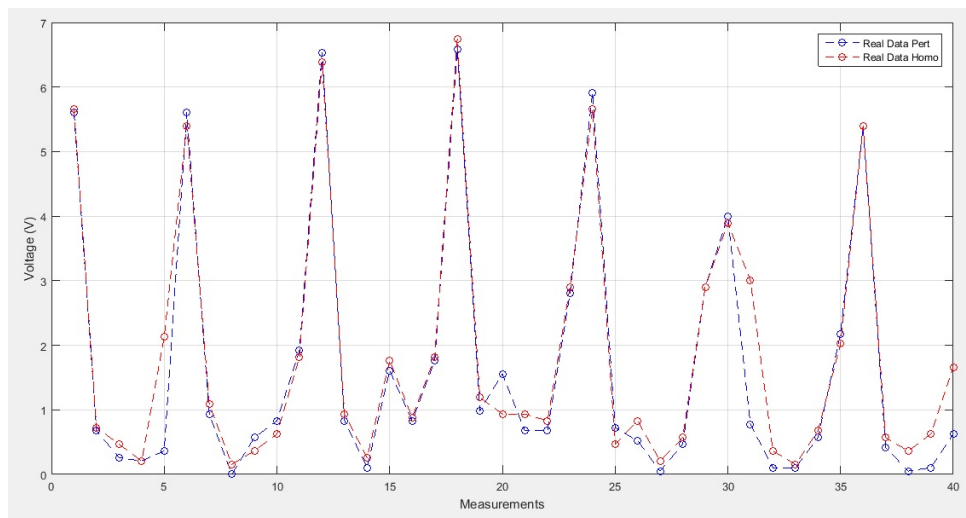


Figura 4.90: Comparación *frame* homogéneo (1) vs *frame* con artefacto (7). [Elaboración Propia]

Las gráficas de voltaje por medida, figura 4.91, muestran que, al igual que en el caso de

ambos elementos, la curva de voltajes simulados es mayor a la de los voltajes medidos. La gráfica de error absoluto indica que hay diferencias entre los voltajes simulados y medidos, pero el error relativo indica que es un porcentaje bajo, máximo del 2% para este caso.

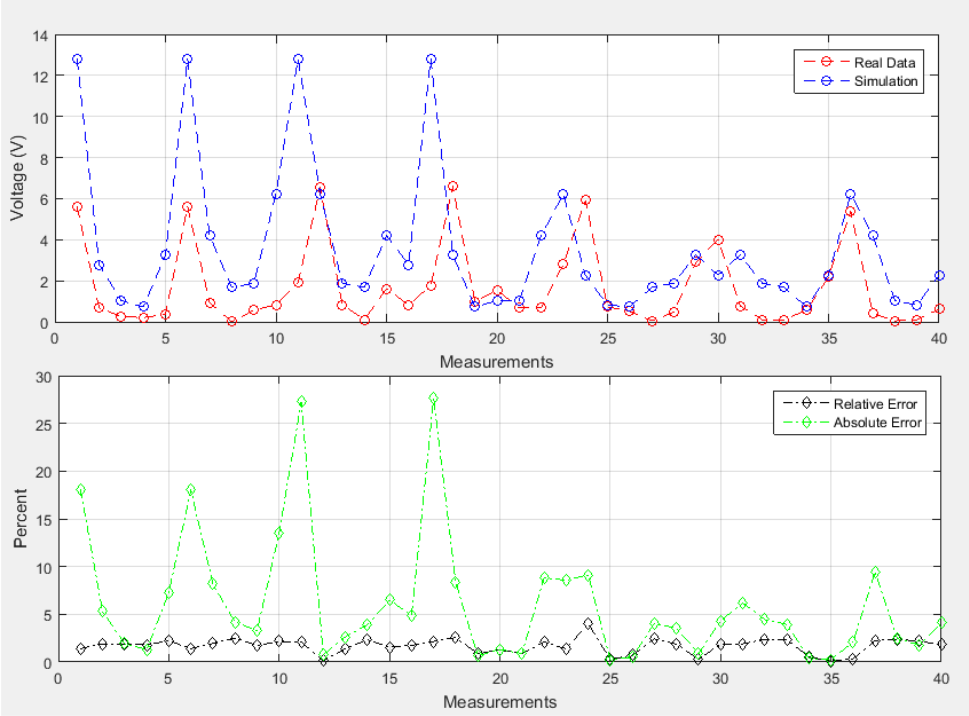


Figura 4.91: Gráficas de voltaje simulación vs datos reales con dos objetos, conductor y no conductor. [Elaboración Propia]

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1. Conclusiones

- Teniendo en cuenta los criterios que se plantearon inicialmente y los resultados obtenidos por medio de la aplicación, se concluye que el solucionador de alto orden es el que presenta un mejor desempeño.
- Enfocándose en la reconstrucción gráfica, la inyección opuesta muestra mejores resultados, pues al encontrarse el inyector y drenador en polos opuestos la corriente fluye a través de toda la malla.
- Con base en el software EIDORS, la aplicación cumple con el objetivo de simplificar el trabajo de creación de mallas, perturbaciones y la solución de estas, ya que el usuario no requiere buscar los códigos en la página para vincularlos y así obtener un resultado, debido a que la interfaz posee los códigos y los vincula según sea el caso.
- Cuando en Matlab o EIDORS se realiza una actualización, algunos códigos se pueden ver afectados, ya que algunos comandos cambian o los modelos se eliminan o modifican.
- Los resultados pueden variar de acuerdo a las especificaciones del computador (procesador, RAM, versión de Matlab) en el que se ejecute la aplicación, pues dichas especificaciones determinan el tiempo de solución.

5.2. Trabajos Futuros

A partir de este trabajo de grado es posible plantear nuevos trabajos de investigación.

- Integración de la aplicación desarrollada para la solución del problema directo, con una aplicación que solucione el problema inverso en tomografía por impedancia eléctrica con EIDORS.
- Comparación de datos reales vs simulación con otras configuraciones de los electrodos, con el fin de analizar la solución del problema directo.
- Integración de algoritmos propuestos pero no disponibles en la plataforma de EIDORS.

Bibliografía

- [1] V. H. Mosquera, C. F. Rengifo, A. Arregui, and R. Bragos, “Implementation of a low cost prototype for electrical impedance tomography based on the integrated circuit for body composition measurement afe4300,” in *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies - Volume 1*, 2018, pp. 121–127.
- [2] D. B. Ardrey, E. K. Murphy, D. Isaacson, G. J. Saulnier, and J. C. Newell, “Electrical impedance tomography using the finite element method in the mammography geometry,” in *2011 IEEE 37th Annual Northeast Bioengineering Conference (NEBEC)*, April 2011, pp. 1–2.
- [3] R. R. Ribeiro, A. R. S. Feitosa, R. E. de Souza, and W. P. dos Santos, “Reconstruction of electrical impedance tomography images using genetic algorithms and non-blind search,” in *2014 IEEE 11th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, April 2014, pp. 153–156.
- [4] T. K. Bera and J. Nagaraju, “A FEM-based forward solver for studying the forward problem of electrical impedance tomography (EIT) with a practical biological phantom,” in *Advance Computing IEEE, 2009. IACC 2009. International Conference*, March 2009, pp. 1375–1381.
- [5] B. S. Kim, A. K. Khambampati, Y. J. Jang, K. Y. Kim, and S. Kim, “Image reconstruction using voltage - current system in electrical impedance tomography,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 278, pp. 134 – 140, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549314004245>
- [6] R. S. Tavares, M. S. Tsuzuki, T. C. Martins, and R. G. Lima, “The EIT forward problem parallelized using a colored pjdS matrix format,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 20, pp. 42 – 47, 2015, 9th IFAC Symposium on Biological and

- Medical Systems BMS 2015 Berlin, Germany, 31 August-2 September 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315020030>
- [7] X. Zhang, G. Xu, S. Zhang, Y. Li, Y. Guo, Y. Li, Y. Wang, and W. Yan, "A numerical computation forward problem model of electrical impedance tomography based on generalized finite element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 1045–1048, Feb 2014.
- [8] M. Jehl, A. Dedner, T. Betcke, K. Aristovich, R. Klöfkorn, and D. Holder, "A fast parallel solver for the forward problem in electrical impedance tomography," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, no. 1, pp. 126–137, Jan 2015.
- [9] M. R. Yousefi, R. Jafari, and H. A. Moghaddam, "A combined wavelet - based mesh - free method for solving the forward problem in electrical impedance tomography," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 10, pp. 2629–2638, Oct 2013.
- [10] S. Zaravi, R. Amirfattahi, B. V. Vahdat, and A. Hassanipour, "Improving 2D block method in electrical impedance tomography," in *2015 22nd Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME)*, Nov 2015, pp. 245–250.
- [11] S. Zaravi, R. Amirfattahi, and B. V. Vahdat, "Expanding 2-D block method in two direction by a new formula in EIT." in *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, May 2015, pp. 131–135.
- [12] L. A. M. Mello, E. de Sturler, G. H. Paulino, and E. C. N. Silva, "Recycling krylov subspaces for efficient large - scale electrical impedance tomography," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 199, no. 49 - 52, pp. 3101 – 3110, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782510001684>
- [13] T. K. Bera and J. Nagaraju, "A study of practical biological phantoms with simple instrumentation for electrical impedance tomography (EIT)," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC '09. IEEE*, May 2009, pp. 511–516.
- [14] M. A. Heravi, L. Marin, and C. Sebu, "The method of fundamental solutions for complex electrical impedance tomography," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 46, pp. 126 – 139, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095579971400099X>

- [15] J. Riera, P. Riu, P. Casan, and J. Masclans, “Electrical impedance tomography in acute lung injury,” *Medicina Intensiva (English Edition)*, vol. 35, no. 8, pp. 509 – 517, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2173572711000506>
- [16] L. Lu, L. Liu, and C. Hu, “Analysis of the electrical impedance tomography algorithm based on finite element method and tikhonov regularization,” in *2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, July 2014, pp. 36–42.
- [17] P. G. Daneshmand and R. Jafari, “A 3D hybrid BE-FE solution to the forward problem of electrical impedance tomography,” *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 37, no. 4, pp. 757 – 764, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955799713000283>
- [18] P. Kantartzis and P. Liatsis, “On sparse forward solutions in non-stationary domains for the eit imaging problem,” in *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Aug 2011, pp. 3892–3896.
- [19] X. Zhang, G. Xu, S. Zhang, H. Wang, Y. Xu, Y. Li, and W. Yan, “Forward problem model of human thorax during breath in electrical impedance tomography,” in *Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 2012 Sixth International*, June 2012, pp. 1–4.
- [20] T. K. Bera and J. Nagaraju, “A simple instrumentation calibration technique for electrical impedance tomography (EIT) using a 16-electrode phantom,” in *2009 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Aug 2009, pp. 347–352.
- [21] D. Chakraborty, M. Chattopadhyay, and R. Bhar, “Resistivity imaging of a phantom with irregular inhomogeneities with 32 silver electrodes based sensory system in two dimensional electrical impedance tomography,” *Procedia Technology*, vol. 10, pp. 191 – 199, 2013, First International Conference on Computational Intelligence: Modeling Techniques and Applications (CIMTA) 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313005069>
- [22] A. Javaherian, A. Movafeghi, and R. Faghihi, “Reducing negative effects of quadratic norm regularization on image reconstruction in electrical impedance tomography,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 8, pp. 5637 – 5652, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X1200738X>

- [23] D. Chakraborty and M. Chattopadhyay, “Finite element method based modeling of a sensory system for detection of atherosclerosis in human using electrical impedance tomography,” *Procedia Technology*, vol. 10, pp. 262 – 270, 2013, First International Conference on Computational Intelligence: Modeling Techniques and Applications (CIMTA) 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313005148>
- [24] R. R. Ribeiro, A. R. S. Feitosa, R. E. de Souza, and W. P. dos Santos, “A modified differential evolution algorithm for the reconstruction of electrical impedance tomography images,” in *5th ISSNIP-IEEE Biosignals and Biorobotics Conference (2014): Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC)*, May 2014, pp. 1–6.
- [25] T. J. Noble, A. H. Morice, K. S. Channer, P. Milnes, N. D. Harris, and B. H. Brown, “Monitoring patients with left ventricular failure by electrical impedance tomography.” Wiley Online Library, 1999.
- [26] J. Zhang and R. P. Patterson, “Analysis on the influence of tissues/organs’ movements in eit images of lung ventilation using finite difference thorax models,” in *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 1, Sept 2004, pp. 1557–1560.
- [27] M. Arad and S. Abboud, “Electrical impedance tomography vs whole thoracic impedance for monitoring lung fluid content in congestive heart failure patients,” in *Computing in Cardiology 2013*, Sept 2013, pp. 465–466.
- [28] S. Goncalve, J. C. de Munck, J. P. A. Verbunt, R. M. Heethaar, and F. H. L. da Silva, “In vivo measurement of the brain and skull resistivities using an eit-based method and the combined analysis of sef/sep data,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, no. 9, pp. 1124–1127, Sept 2003.
- [29] M. Abdi and P. Liatsis, “Eit in breast cancer imaging: Application to patient-specific forward model,” in *2011 Developments in E-systems Engineering*, Dec 2011, pp. 56–61.
- [30] N. Polydorides and W. Lionheart, “A matlab-based toolkit for three-dimensional electrical impedance tomography: A contribution to the eidors project,” *Measurement Science and Technology*, vol. 13, no. 12, 2002.

- [31] R. Kusche, A. Malhotra, M. Ryschka, G. Ardelt, P. Klimach, and S. Kaufmann, “A fpga-based broadband eit system for complex bioimpedance measurements design and performance estimation,” *Electronics*, 2015.
- [32] M. Cheney, D. Isaacson, and J. Newell, “Electrical impedance tomography,” *SIAM*, vol. 41, pp. 85–101, 1999.
- [33] C.-N. Huang, F.-M. Yu, and H.-Y. Chung, “Rotational electrical impedance tomography,” *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 9, p. 2958, 2007. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0957-0233/18/i=9/a=028>
- [34] R. P. Patterson, “Electrical impedance tomography: Methods, history, and applications (institute of physics medical physics series),” *Physiological Measurement*, vol. 26, no. 4, p. 583, 2005. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0967-3334/26/i=4/a=B01>
- [35] Y. Ma, S. Miedema, V. Matousek, and W. Vlasblom, “Tomography as a measurement method for density and velocity distributions,” in *23rd WEDA Technical Conference & 35th TAMU Dredging Seminar, Chicago, USA*, 2003.
- [36] W. Lionheart, S. Arridge, M. Schweiger, M. Vauhkonen, and J. Kaipio, “Electrical impedance and diffuse optical tomography reconstruction software,” in *Proceedings of 1st World Congress on Industrial Process Tomography*, 1999, pp. 474–477.
- [37] N. Polydorides and W. Lionheart, “A Matlab toolkit for three-dimensional electrical impedance tomography: a contribution to the electrical impedance and diffuse optical reconstruction software project,” 2002.
- [38] A. Adler and W. R. Lionheart, “Uses and abuses of eiders: an extensible software base for eit,” *Physiological measurement*, 2006.
- [39] E. Frias Valero, “Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos,” 2018. [Online]. Available: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6294>
- [40] Fisicalab, “Errores absoluto y relativo,” 2018. [Online]. Available: <https://www.fisicalab.com/apartado/errores-absoluto-relativos#contenidos>
- [41] O. Casas Piedrafita, “Contribución a la obtención de imágenes paramétricas en tomografía de impedancia eléctrica para la caracterización de tejidos biológicos,” 2018. [Online]. Available: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6344>

- [42] A. Arregui Villaplana, “Disseny d’un sistema de tomografia d’impedància elèctrica basat en l’afe4300,” B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.

Anexo 1

El presente anexo contiene simulaciones extra que se realizaron de diversos casos posibles en la aplicación y así tener un análisis comparativo más completo:

Caso 1: Objeto no conductor en 3D

La configuración fue la siguiente: malla torácica, densidad c , sección transversal número 3 y 2 anillos cada uno de 16 electrodos, además, la perturbación no conductora es de forma esférica con radio 20 unidades, coordenada en X de 50, en Y y Z de 30 unidades respectivamente, así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de corriente fue de $15\mu A$.

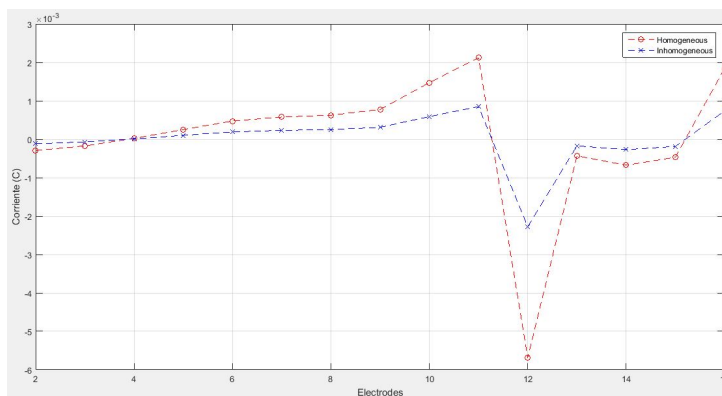


Figura 5.1: Corriente en cada electrodo objeto no conductor 3D. [Elaboración Propia]

En la figura 5.1, se puede observar la distribución de corriente de los electrodos, con un objeto no conductor, cabe resaltar que el código implementado solo permite el análisis de un anillo de electrodos, por lo anterior el eje X solo llega hasta 16; en la imagen se observa

que a lo largo de los 16 electrodos, la malla heterogénea presenta cambios respecto a la malla homogénea, exceptuando el electrodo 4, donde la magnitud es igual.

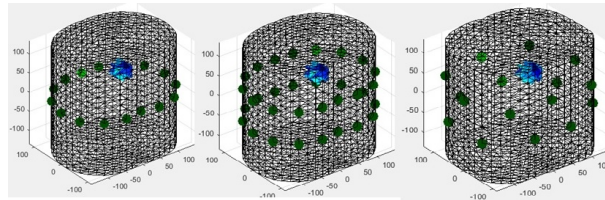


Figura 5.2: Malla diseñada con perturbación en 3D. [Elaboración Propia]

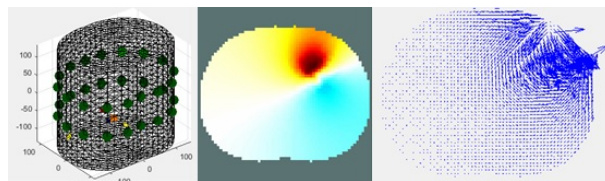


Figura 5.3: Solución *default* 3D. [Elaboración Propia]

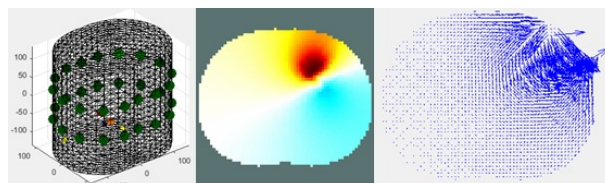


Figura 5.4: Solución primer orden 3D. [Elaboración Propia]

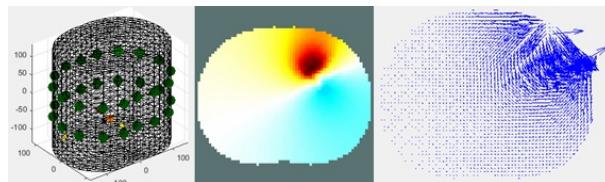


Figura 5.5: Solución alto orden 3D. [Elaboración Propia]

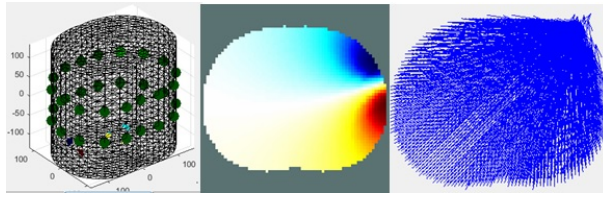


Figura 5.6: Solución *halfspace* 3D. [Elaboración Propia]

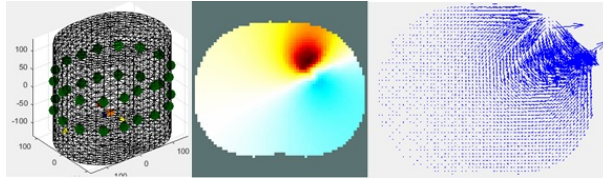


Figura 5.7: Solución aparente resistividad 3D. [Elaboración Propia]

Al igual que en los casos presentados en la monografía, se puede observar que el solucionador *halfspace* (figura 5.6) presenta unos resultados deficientes en cuanto a distribución de potencial. A continuación se procede a analizar las gráficas de error absoluto, error relativo y tiempos de solución para elegir el mejor solucionador.

En la figura 5.8, se muestran las gráficas de error absoluto, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen los mismos resultados, también el solucionador de resistividad aparente tiene el mayor porcentaje de variación.

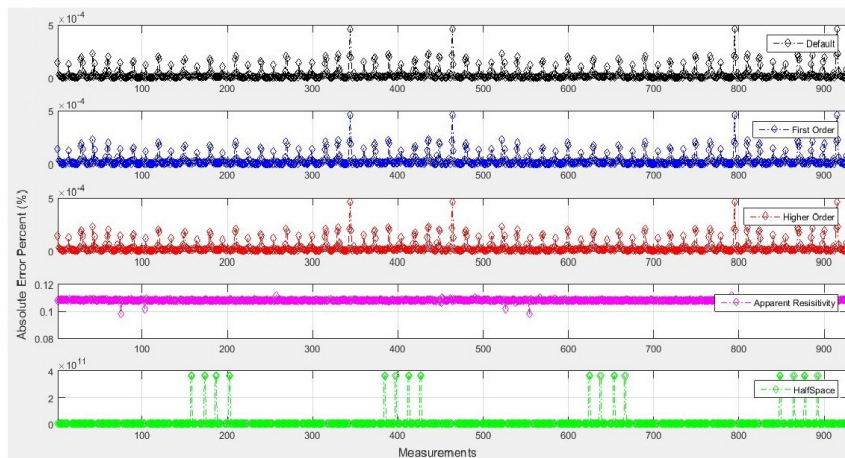


Figura 5.8: Error absoluto individual. [Elaboración Propia]

En la figura 5.9, se muestran las gráficas de error relativo, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen los mismos resultados y el solucionador de resistividad aparente tiene el mayor porcentaje de variación (orden $\times 10^4$).

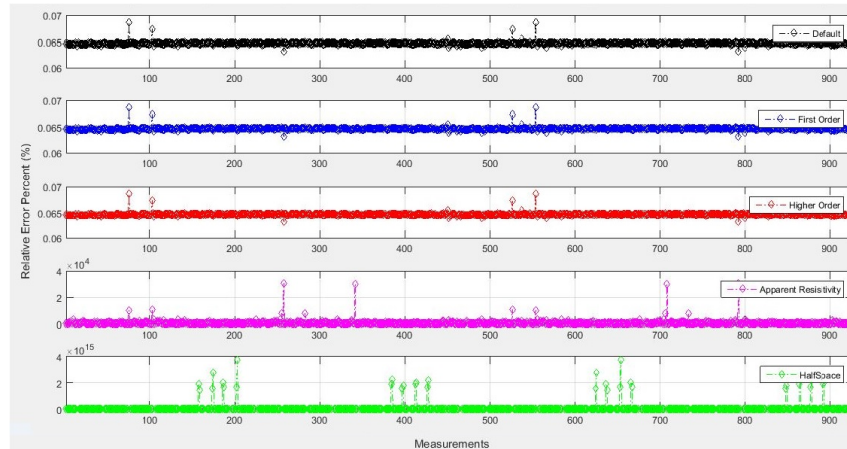


Figura 5.9: Error relativo individual. [Elaboración Propia]

En la figura 5.10, se muestra que el solucionador *halspace* es el que menor tiempo tarda, seguido del solucionador de alto orden, luego por el de primer orden, después por el *default* y finalmente se encuentra el solucionador de resistividad aparente, el cual tarda aproximadamente el doble que el de alto orden. También se puede observar que aproximadamente a partir de la iteración número 65, el sistema se desestabiliza.

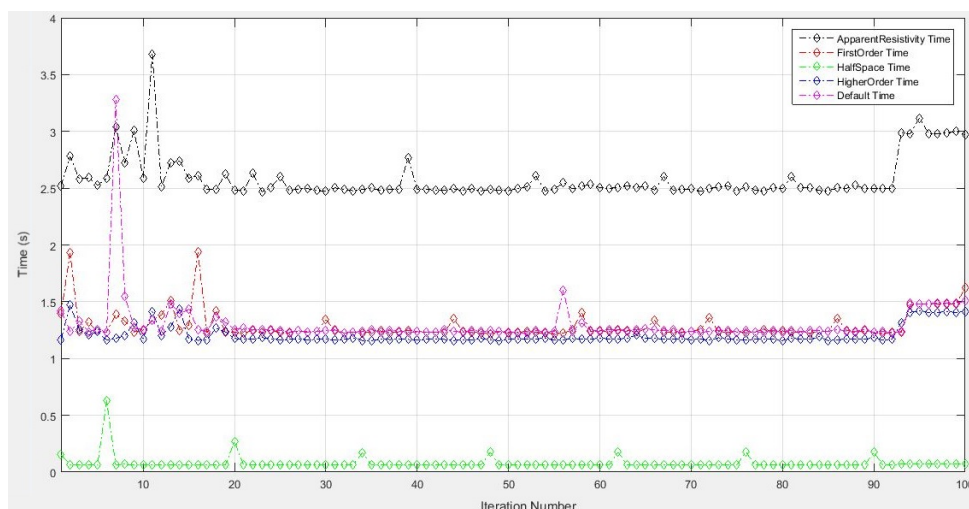


Figura 5.10: Gráfica de tiempos total. [Elaboración Propia]

Con el análisis previo realizado se observa que en cuanto a distribución de potencial, error absoluto y relativo, los solucionadores de alto orden, primer orden y por defecto presentan los mismos resultados; sin embargo, estos difieren en sus tiempos de solución, siendo el de alto orden el más rápido.

Caso 2: Objeto conductor en 3D

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema en 3D con un objeto conductor fue la siguiente: malla torácica, densidad c , sección transversal número 3 y 2 anillos cada uno de 16 electrodos, además, la perturbación no conductora es de forma esférica con radio 20 unidades, coordenada en X de 50, en Y y Z de 30 unidades respectivamente, así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de corriente fue de $15\mu A$.

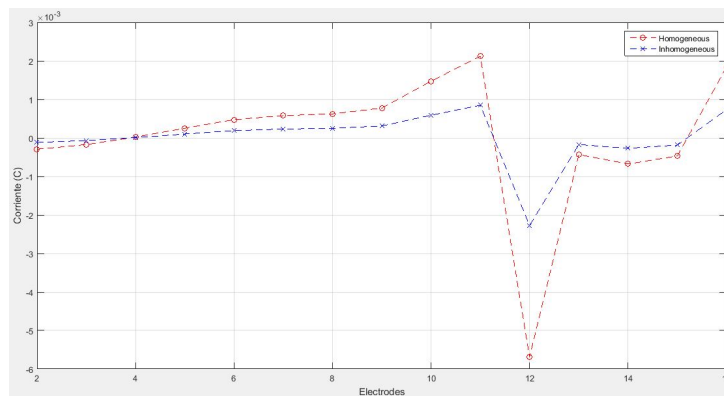


Figura 5.11: Corriente en cada electrodo objeto conductor 3D. [Elaboración Propia]

En la figura 5.11, se puede observar la distribución de corriente de los electrodos con un objeto conductor. La gráfica obtenida es muy similar a la del objeto no conductor, ello se puede deber a que el código solo permite graficar la corriente en un anillo de electrodos y los que indican un mayor cambio de corriente son: 10, 11 y 12.

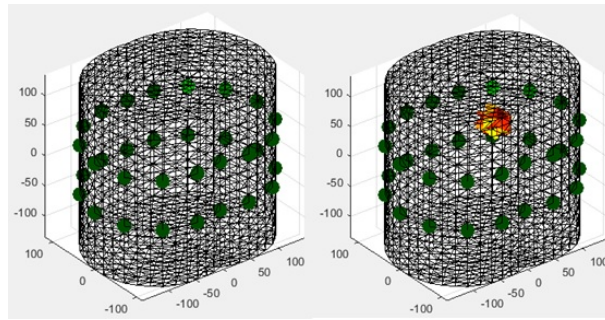


Figura 5.12: Malla diseñada con perturbación en 3D. [Elaboración Propia]

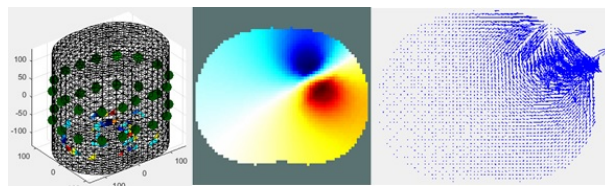


Figura 5.13: Solución *default* conductor 3D. [Elaboración Propia]

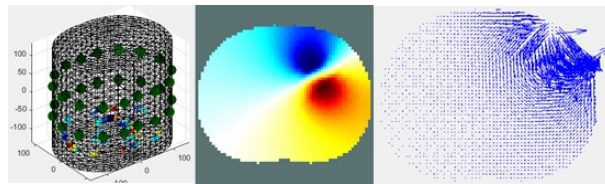


Figura 5.14: Solución primer orden conductor 3D. [Elaboración Propia]

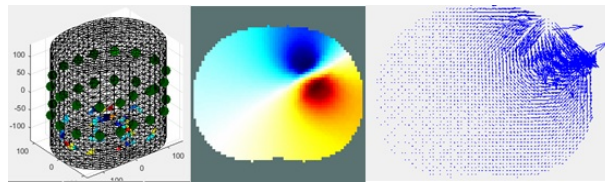


Figura 5.15: Solución alto orden conductor 3D. [Elaboración Propia]

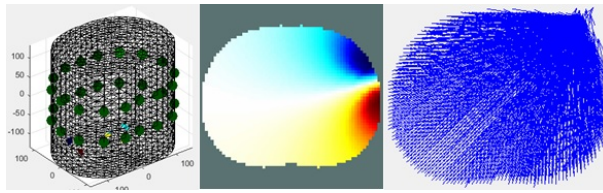


Figura 5.16: Solución *halfspace* conductor 3D. [Elaboración Propia]

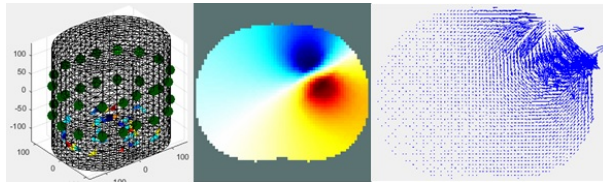


Figura 5.17: Solución aparente resistividad conductor 3D. [Elaboración Propia]

Al igual que en el caso de un material no conductor, se puede observar que el solucionador *halfspace* 5.16, presenta unos resultados deficientes en cuanto a distribución de potencial. A continuación se procede a analizar las gráficas de error absoluto, error relativo y tiempos de solución.

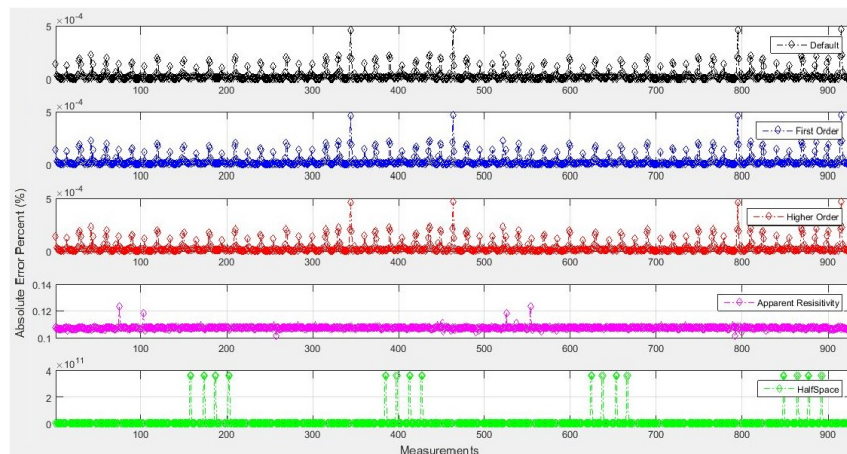


Figura 5.18: Error absoluto individual. [Elaboración Propia]

En la figura 5.18, se muestran las gráficas de error absoluto para cada uno de los solucionadores, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen los mismos resultados al igual que en todos los resultados.

En la figura 5.19, se muestran las gráficas de error relativo para cada uno de los solucionadores, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen los mismos resultados, como en la mayoría de los casos.

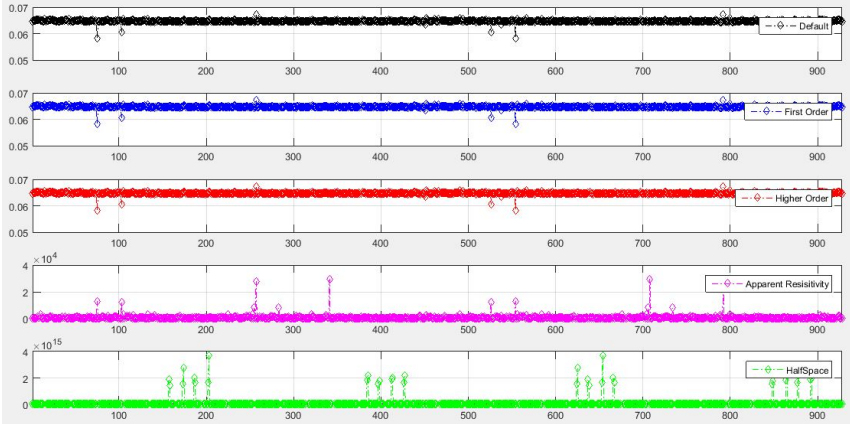


Figura 5.19: Error relativo individual conductor 3D. [Elaboración Propia]

En la figura 5.20, se muestran las gráficas integradas de los tiempos para cada solucionador, donde se puede observar que el solucionador *halfspace* es el de menor tiempo, pero teniendo en cuenta el análisis previo realizado de error absoluto, error relativo y distribución de potencial, este se ha descartado, dejando como primera opción al solucionador de alto orden.

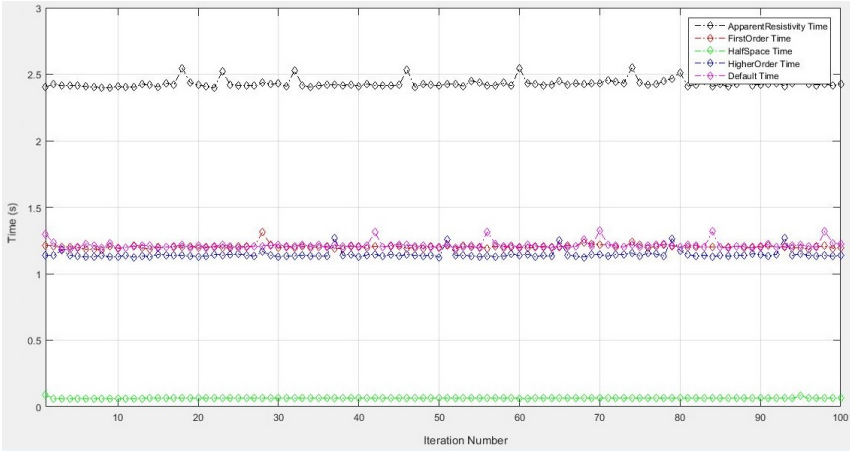


Figura 5.20: Gráfica de tiempos total conductor 3D. [Elaboración Propia]

Caso 3: Dos objetos en 3D

La configuración de la simulación para el análisis de un sistema con ambos objetos fue la siguiente: malla torácica, densidad c , sección transversal número 3 y 2 anillos cada uno de 16 electrodos, además, la perturbación conductora fue circular con radio 20 unidades y coordenadas en X de 50 , Y y Z de 30, mientras que la no conductora presenta la misma forma y radio; sin embargo, las coordenadas son en X de -50 , Y y Z de -30 , así mismo, la inyección y medición fue de forma adyacente y la amplitud de la corriente fue de $15\mu A$.

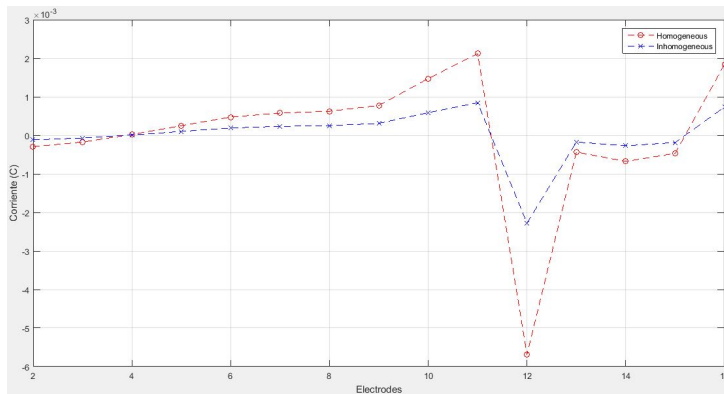


Figura 5.21: Corriente en cada electrodo con dos objetos 3D. [Elaboración Propia]

En la figura 5.21, se puede observar la distribución de corriente de los electrodos con ambos objetos. La gráfica es similar a la obtenida en los casos anteriores, esto puede deberse a que el código permite graficar la corriente solo en un anillo de electrodos, pero si se mira que hay diferencia entre las mallas heterogénea y homogénea a lo largo de todos los electrodos.

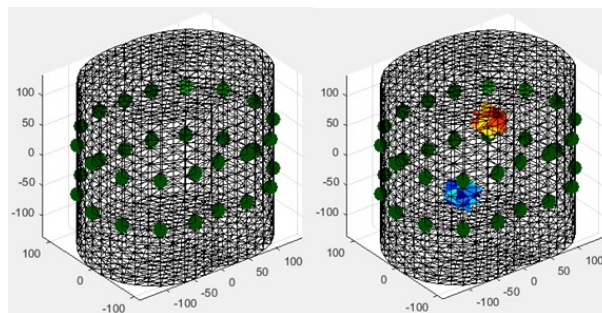


Figura 5.22: Malla diseñada con dos perturbaciones en 3D. [Elaboración Propia]

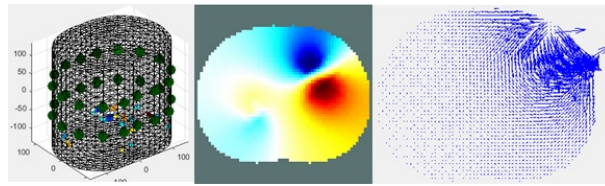


Figura 5.23: Solución default con dos objetos 3D. [Elaboración Propia]

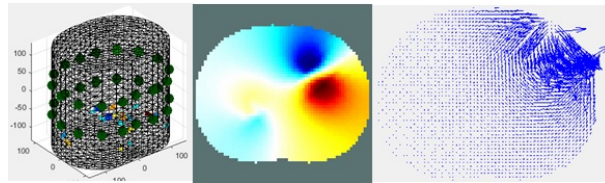


Figura 5.24: Solución primer orden con dos objetos 3D. [Elaboración Propia]

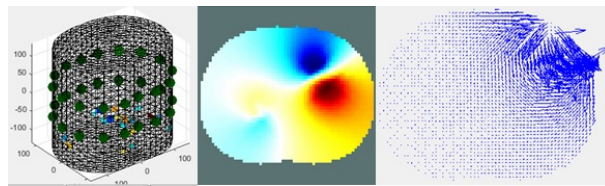


Figura 5.25: Solución alto orden con dos objetos 3D. [Elaboración Propia]

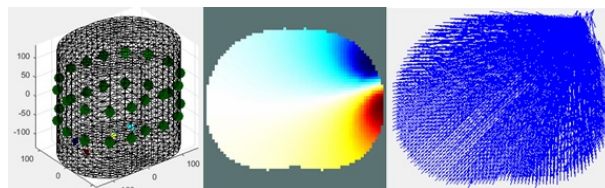


Figura 5.26: Solución halfSpace con dos objetos 3D. [Elaboración Propia]

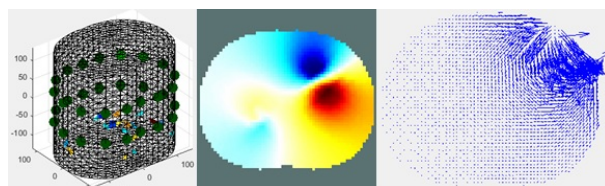


Figura 5.27: Solución aparente resistividad con dos objetos 3D. [Elaboración Propia]

Al igual que en los casos anteriores, se puede observar que el solucionador *halfspace* presenta unos resultados deficientes en cuanto a distribución de potencial.

En la figura 5.28, se muestran las gráficas de error absoluto para cada uno de los solucionadores, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen los mismos resultados.

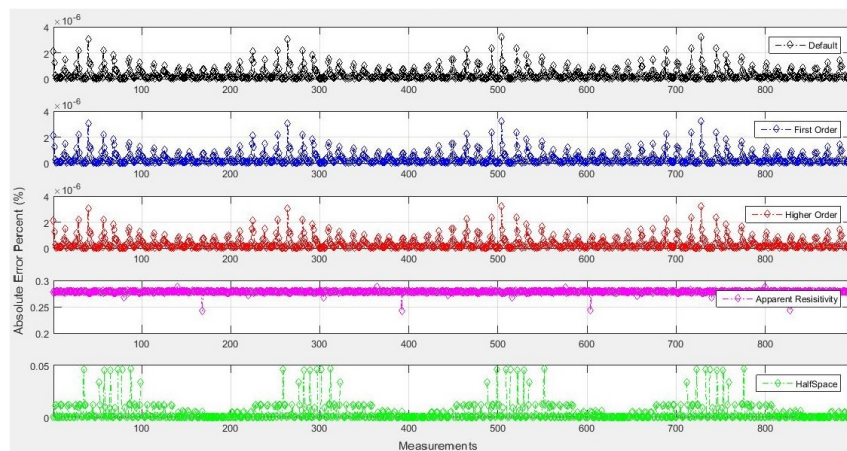


Figura 5.28: Error absoluto individual. [Elaboración Propia]

En la figura 5.29, se muestran las gráficas error relativo para cada solucionador, al igual que con las gráficas de error absoluto, es posible notar que las de alto orden, primer orden y por defecto tienen los mismos resultados.

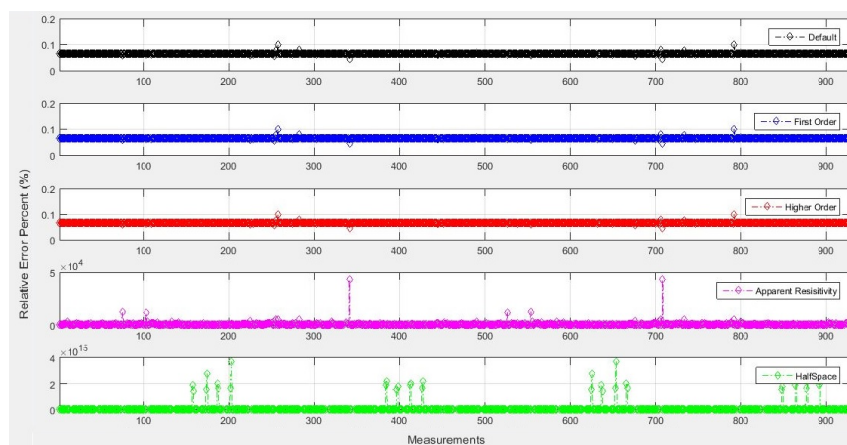


Figura 5.29: Error relativo individual con dos objetos. [Elaboración Propia]

En la figura 5.30, se muestran las gráficas integradas de los tiempos para cada solucionador,

donde se puede observar que el solucionador *halfspace* es el de menor tiempo, pero teniendo en cuenta el análisis previo realizado de error absoluto, relativo y distribución de potencial, este se ha descartado, dejando como primera opción al solucionador de alto orden, ya que presenta un menor tiempo, con resultados gráficos eficientes y variaciones de voltaje considerables, dando a entender que se identifica la perturbación.

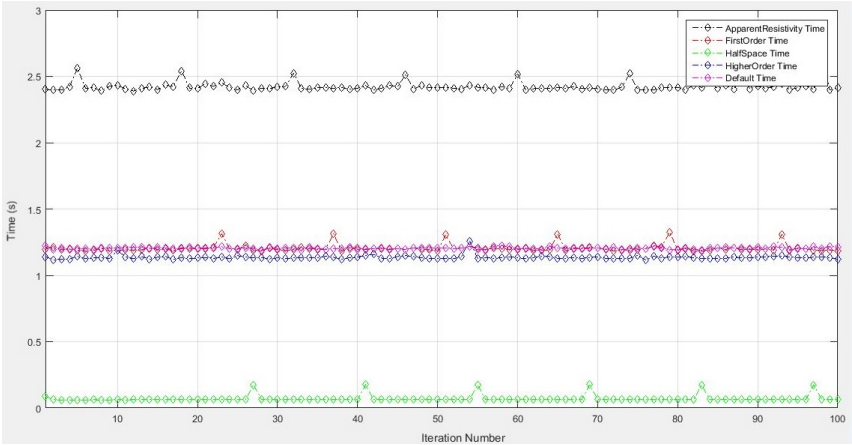


Figura 5.30: Gráfica de tiempos total con dos objetos. [Elaboración Propia]