

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



Ingeniería Industrial

Proyecto Fin de Carrera

Localización de descargas parciales mediante
el estudio radiométrico de señales captadas
con antenas UHF.

Autor:

José Manuel Fresno de Marcos

Director:

Dr. D. Guillermo Robles Muñoz

Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Leganés, 2012

1 Índice.

1.1 Índice Títulos.

Índice

1	Índice.....	2
1.1	Índice Títulos.	2
1.2	Índice de figuras.	4
1.3	Índice de tablas.	6
2	Objetivos y resumen.	7
2.1	Objetivos.	7
2.2	Resumen.	7
3	Introducción.	8
3.1	Las descargas parciales.	8
3.2	Inconvenientes de las descargas parciales.....	9
4	Localización de la fuente de descargas parciales.	11
4.1	Geometría de la localización de la fuente de descargas parciales.	11
4.2	Método Newton-Raphson en la localización de la fuente de DP's.....	14
5	Evolución del programa.	17
5.1	Matlab, entorno digital.	17
5.2	Creación de las señales de las antenas.....	18
5.3	Cálculo del tiempo de desfase entre dos señales tipo impulso.	21
5.4	Algoritmo para la localización de la fuente de descargas parciales.....	34
5.5	Localización de una fuente de DP's que emite señales con tres puntos.	36
5.6	Estudio con DP reales (Archivos de Matlab).	39
5.6.1	Desfase con señales reales.....	39
5.6.2	Localización con señales reales.	42
6	Error en la localización.....	47
6.1	Error teórico.....	47
6.1.1	Error en los datos de entrada.	47
6.1.2	Error de redondeo de los datos y el cálculo.	48
6.1.3	Error de truncamiento del método.....	56
6.1.4	Errores de inestabilidad y control.....	57
6.2	Propagación de errores.	59
6.3	Exactitud en la localización.....	61

7	Resultados experimentales.....	64
7.1	Código final.....	64
7.1.1	Definición datos entrada.....	64
7.1.2	Cargar las señales.....	64
7.1.3	Interpolar las señales para conseguir resolución.....	64
7.1.4	Localización del inicio de la DP.....	65
7.1.5	Selección del primer frente de onda.....	65
7.1.6	Cálculo del desfase entre señales.....	65
7.1.7	Definición del punto de partida del algoritmo.....	65
7.1.8	Bucle del algoritmo Newton-Raphson.....	65
7.1.9	Mostrar en pantalla el resultado final.....	65
7.2	Equipo de medida.....	69
7.3	Medidas finales, configuración 1.....	72
7.4	Medidas finales, configuración 2.....	75
8	Conclusiones y trabajos futuros.....	79
8.1	Conclusiones.....	79
8.2	Trabajos futuros.....	79
9	Bibliografía.....	81

1.2 Índice de figuras.

Figura 1. Evolución de la tensión e intensidad en la vacuola.	9
Figura 2. Disposición de las antenas y la fuente de DP, en la localización de la fuente DP.	12
Figura 3. Propagación esférica de las DP's	12
Figura 4. Tiempo de propagación de las DP's.....	13
Figura 5. Señales impulsionales con desfases sencillos	18
Figura 6. Ilustración de cuatro señales impulsionales.	21
Figura 7. Descarga parcial real (Izquierda). Pulso (Derecha).....	21
Figura 8. Vectores para calcular la correlación $a = -4990$. El resultado es $output1(10) = R_{xy}(-4990) = 0$	24
Figura 9. Vectores para calcular la correlación $a = -2000$. El resultado es $output1(3000) = R_{xy}(-2000) = 0,0127$	24
Figura 10. Vectores para calcular la correlación $a = -1000$. El resultado es $output1(4000) = R_{xy}(-1000) = 0,0271$	25
Figura 11. Vectores para calcular la correlación $a = -500$. El resultado es $output1(4500) = R_{xy}(-500) = 0,0037$	26
Figura 12. Vectores para calcular la correlación $a = 0$. El resultado es $output1(5000) = R_{xy}(0) = 1,794$	26
Figura 13. Vectores para calcular la correlación $a = 500$. El resultado es $output1(5500) = R_{xy}(500) = 0,0037$	27
Figura 14. Vectores para calcular la correlación $a = 1000$. El resultado es $output1(6000) = R_{xy}(1000) = 0,0271$	27
Figura 15. Vectores para calcular la correlación $a = 2000$. El resultado es $output1(7000) = R_{xy}(2000) = 0,0127$	28
Figura 16. Vectores para calcular la correlación $a = 4990$. El resultado es $output1(9990) = R_{xy}(4990) = 0$	28
Figura 17. Resultado final de la correlación R_{xy}	29
Figura 18. $Output_1$ de la función Xcorr (Derecha). $Output_2$ de la función Xcorr (Izquierda).	30
Figura 19. Distribución de las antenas para ejemplo de cálculo de desfase.....	31
Figura 20. Señales tipo impulso ejemplo cálculo de desfase.	32
Figura 21. Correlación para señales tipo impulso. Vector $output1$ de la función Xcorr.....	33
Figura 22. Desfase para señales tipo impulso. Vector $output2$ de la función Xcorr.	33
Figura 23. Ilustración de la posición de las antenas y fuente DP en la ejecución del algoritmo en la primera versión.....	36
Figura 24. S1 formada por tres puntos $S1(258)=-0.4$, $S1(261)=1$, $S1(263)=0.9$	37
Figura 25. DP con posiciones y magnitudes distintas.	39
Figura 26. Distribución de las antenas para cálculo de correlación con señales reales	40
Figura 27. Señales reales en ejemplo cálculo correlación.....	41
Figura 28. Resultado correlación para señales reales.....	41
Figura 29. DP reales sin desfasar no tienen distinta forma	42
Figura 30. DP reales desfasadas un valor concreto.	43
Figura 31. Posición de las antenas, posición de la fuente de DP'teórica y calculada.....	46
Figura 32. Efectos de la multipropagación.	48
Figura 33. Corrección de la posición de la fuente de DP por discretización.	49

Figura 34. Señales de las cuatro antenas con las que se obtuvo mala correlación.....	50
Figura 35. Correlación cruzada para las señales de la Figura 34.....	51
Figura 36. Ubicación del disparo en las 4 señales de las distintas antenas	52
Figura 37. Primer frente de onda de las DP's (Rojo). DP completa (Azul).....	52
Figura 38. Correlación cruzada sobremuestreada.	54
Figura 39. Señal de la antena 1 interpolada con $int = 5$	54
Figura 40. Correlación cruzada bien muestreada.....	55
Figura 41. Solución cuando el método converge.	57
Figura 42. Solución cuando el método converge a una solución y oscila en torno a ésta.....	58
Figura 43. Solución cuando el método no converge	58
Figura 44. Método de Newton Raphson no convergencia a la solución deseada.....	60
Figura 45. Método Newton Raphson divergente.	60
Figura 46. Método Newton Raphson con término corrector minorado.....	61
Figura 47. Localización de DP's para distribución cúbica [8].....	62
Figura 48. Localización de DP's para distribución tetraédrica [8].	63
Figura 49. Fuente de DP's.	70
Figura 50. Antena receptora de emisiones de DP's (Izquierda). Antena en disposición de adquirir DP's (Derecha).....	71
Figura 51. Osciloscopio Tektronix DPO 7254.....	71
Figura 52. Antenas y fuente de DP's durante las mediciones en el laboratorio.	72
Figura 53. Imagen distribución antenas y fuente de DP's para configuración 1.....	73
Figura 54. Señales recibidas por el osciloscopio para la configuración 1.	73
Figura 55. Señales cargadas en Matlab para la configuración 1.	74
Figura 56. Señales recortadas y localización del disparo para la configuración 1.	74
Figura 57. Correlación cruzada para la configuración 1.	75
Figura 58. Imagen distribución antenas y fuente de DP's para configuración 2.....	76
Figura 59. Señales recibidas por el osciloscopio para la configuración 2.	76
Figura 60. Señales cargadas en Matlab para la configuración 2.	77
Figura 61. Señales recortadas y localización del disparo para la configuración 2.	77
Figura 62. Correlación cruzada para la configuración 2.	78
Figura 63. Conjunto de 5 antenas.	80

1.3 Índice de tablas.

Tabla 1. Relación de desfases calculados manualmente.....	32
Tabla 2. Comparativa desfase entre señales calculado manualmente y con el algoritmo.....	33
Tabla 3.Resultado ejecución algoritmo primera versión.....	36
Tabla 4. Tabla comparativa de resultados del algoritmo en la primera versión en función de t_s	36
Tabla 5. Comparativa desfase entre señales reales calculado manualmente y con el algoritmo.....	41
Tabla 6. Comparativa tiempo real Vs teórico para DP reales.....	43
Tabla 7. Comparativa desfases real y calculado para señales de baja calidad.....	51
Tabla 8. Comparativa desfases real y calculado para señales de baja calidad recortadas.....	51
Tabla 9. Errores asociados a operaciones básicas.....	59
Tabla 10. Error en los datos de entrada antes de operar.....	61

2 Objetivos y resumen.

2.1 Objetivos.

- Calcular la correlación entre dos señales tipo impulso y calcular la separación temporal entre ellas.
- Probar algoritmos de fuentes de descargas parciales y en su caso, modificarlos y adaptarlos a nuestras necesidades.
- Hacer medidas reales en laboratorios para localizar fuentes de descargas parciales y probar el algoritmo escogido.

2.2 Resumen.

Este proyecto fin de carrera tiene por objeto localizar fuentes de descargas parciales mediante las emisiones electromagnéticas que producen en la banda de ultra alta frecuencia (UHF). Se utilizan cuatro antenas que captan las emisiones en distintos instantes de tiempo y las señales se adquieren y se analizan con Matlab mediante un algoritmo iterativo se puede resolver la posición del emisor.

3 Introducción.

3.1 Las descargas parciales.

Los aislantes de los componentes eléctricos no son perfectos, en su fabricación quedan huecos de aire o impurezas que impiden mantener el mismo nivel de aislamiento a lo largo del material.

Las descargas parciales son un fenómeno eléctrico que se produce en estas oquedades. Consisten en rupturas locales que generan pulsos rápidos de corriente que propician un deterioro progresivo del aislante y la perforación del dieléctrico con el tiempo. Cuando el componente trabaja en condiciones nominales, el campo eléctrico dentro de las oquedades es mucho mayor que en el aislante debido a que la constante dieléctrica del aire o de los gases que puede haber dentro de los huecos es mucho menor que la del material aislante [1] [2] [3].

Este campo eléctrico dentro de las vacuolas varía en función de la tensión V aplicada al aislante eléctrico. Si la tensión de la vacuola V_c supera la tensión de ruptura del dieléctrico V_{rd} se produce una avalancha de electrones y por tanto una descarga parcial que reduce la tensión en la vacuola hasta alcanzar la tensión de extinción V_e [4] [5]. Cuando se extingue la descarga parcial vuelve a variar la tensión en la vacuola hasta alcanzar V_{rd} o $-V_{rd}$ porque este fenómeno también se produce en el semiciclo negativo. El fenómeno descrito en este párrafo se muestra en la Figura 1. La actividad las descargas parciales se reduce en la cresta de la tensión aplicada al aislante eléctrico debido a que los incrementos de tensión son menores y por tanto se tarda más tiempo en alcanzar los valores V_{rd} o $-V_{rd}$. Finalmente, conforme se van produciendo descargas, la intensidad de las mismas disminuye, siendo un claro indicador del estado del aislante [6].

La magnitud de las descargas parciales depende de las dimensiones de la vacuola, del material que la integra, del tipo de impureza, de la temperatura y de la presión de la cavidad así como de las condiciones y características del aislante. Estas variables hacen que el fenómeno de las descargas parciales sea de carácter estocástico [7].

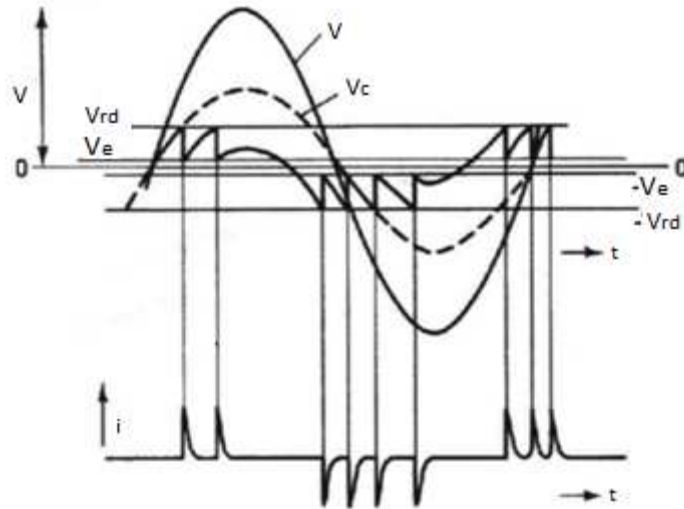


Figura 1. Evolución de la tensión e intensidad en la vacuola.

La duración de las descargas parciales está comprendida entre unos pocos nanosegundos y decimas de microsegundo. Por ello, los dispositivos utilizados para detectar y procesar las descargas parciales deben tener un ancho de banda comprendido entre 1-1000MHz. Este ancho de banda pertenece al espectro de alta frecuencia. Estos rangos se denominan de muy alta frecuencia VHF (30–300 MHz) y ultra alta frecuencia UHF (300–3000 MHz).

3.2 Inconvenientes de las descargas parciales.

Los principales inconvenientes que generan las descargas parciales son, en primer lugar, el deterioro de la capacidad de aislamiento del material donde se producen. En segundo, lugar las radiaciones que generan las descargas parciales, contaminan el ambiente electromagnético produciendo interferencias en las señales de radio y televisión entre otras.

Cuando se produce un aumento progresivo de la actividad de descargas parciales (DP) se tiene una advertencia de un fallo inminente en el aislante del sistema eléctrico donde se producen o es un síntoma de que ya existe una avería. La DP provoca el deterioro del aislante donde se produce, debido a su calentamiento por la energía que liberan las DP's y a los ataques físicos y químicos que sufre por parte de las DP's. Además, el impacto directo de avalanchas de electrones provoca la erosión del material aislante.

Si finalmente se produce el fallo del aislador, la empresa encargada de gestionar el sistema eléctrico donde se ha producido el fallo, deberá hacer frente a las consecuencias. Tendrá que reponer el servicio eléctrico cuanto antes. En todo caso será un tiempo mucho mayor que si se realizaran maniobras preventivas de mantenimiento. También tendrá que indemnizar a sus clientes en mayor medida que si cortara el suministro de manera programada.

El segundo inconveniente de las descargas parciales es que cuando éstas se producen, se emiten ondas electromagnéticas que pueden interferir en los sistemas de comunicación. Las DP's se pueden poner de manifiesto en forma de ruidos en la televisión, radio y otras comunicaciones inalámbricas que operen en un rango de frecuencias de 1-2000 MHz.

Por ello, es necesario conocer si se producen DP's. Si hay pruebas de que éstas tienen lugar, se debe localizar la fuente para poder repararla o sustituirla. La eliminación de la fuente de DP's sustituyendo el componente dañado, implica la eliminación de sus inconvenientes. Al eliminar la fuente de DP's se consigue el objetivo de las compañías eléctricas que es ofrecer un buen servicio eléctrico, sin huecos de tensión debidos a cortocircuitos provocados por fallos de los aisladores. También los ciudadanos se benefician de la eliminación de las fuentes de DP's porque se consigue tener un buen ambiente electromagnético sin interferencias.

4 Localización de la fuente de descargas parciales.

En este apartado se desarrolla teóricamente el método elegido para localizar la posición de la fuente de DP's. Los datos de entrada del método son las señales que capta cada antena y las tres incógnitas por resolver son las tres coordenadas de la posición de la fuente de DP's.

Como se ha comentado anteriormente, la naturaleza de la DP es estocástica, no se puede conocer el instante en que se produce puesto que no es predecible. Además, tampoco se sabe el tiempo que transcurre desde que se produce la DP hasta que se recibe en las antenas. Por esto es muy difícil calcular la ubicación de las fuentes de DP's.

Para calcular la posición de la fuente de DP's en tres dimensiones, necesitamos cuatro antenas como mínimo, en la Figura 2 se muestra el concepto. Teniendo cuatro antenas obtendremos tres ecuaciones con tres incógnitas, las coordenadas de la posición de la fuente de DP's.

4.1 Geometría de la localización de la fuente de descargas parciales.

Supondremos que las emisiones que producen las DP's se propagan esféricamente. En la Figura 3 se muestra un ejemplo en dos dimensiones para visualizar cómo es la propagación. Las emisiones de las DP's se recibirán desfasadas entre sí debido a que cada antena se encuentra a una distancia distinta respecto de la fuente de DP's. En el ejemplo de la Figura 3, la emisión de la DP alcanzará primero la antena 1, después la antena 3, después la antena 2 y por último la antena 4. En la Figura 4 se pueden observar unas flechas que unen la posición de la fuente de DP's con las distintas antenas. Estas flechas simbolizan el tiempo que tarda en llegar la DP a cada antena, representan los tiempos absolutos (t_1, t_2, t_3 y t_4). Estos parámetros no tienen valor si se utilizan de manera independiente porque se desconoce el punto de origen de las DP's. Pero son muy útiles si se utilizan en conjunto de manera que se calculen las diferencias de tiempo de llegada de las DP's entre antenas. La diferencia de tiempo entre antenas se calcula según $t_{ij} = t_i - t_j$. Se puede hacer una idea de qué significan estos parámetros observando la Figura 4 las flechas t_{12}, t_{13} y t_{14} . Tomando la antena 1 como referencia, el desfase que hay entre la antena 1 y las demás representa el retardo o adelanto con el que el resto de antenas capta la emisión de la DP. La flecha t_{12} representa el tiempo de retardo con el que la antena 2 recibe la misma señal que ha recibido la antena 1, las flechas t_{13} y t_{14} representan lo mismo para sus antenas correspondientes.

Calculando la diferencia de tiempos de llegada de la emisión de DP entre antenas t_{ij} (desfase entre antenas), se puede calcular la distancia que existe entre ellas. La diferencia de tiempo de llegada de las DP's entre antenas, es el tiempo que emplea en recorrer la emisión de la DP el espacio que hay entre las antenas. Si se multiplica la diferencia de tiempo entre antenas t_{ij} por la velocidad de propagación del medio, se obtiene la distancia en metros que hay entre antenas. En este estudio el medio de propagación es el aire.

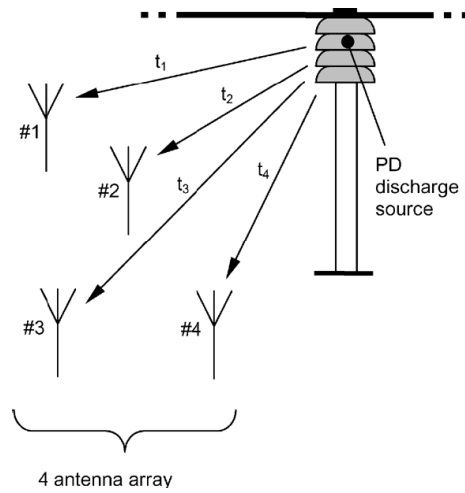


Figura 2. Disposición de las antenas y la fuente de DP, en la localización de la fuente DP.

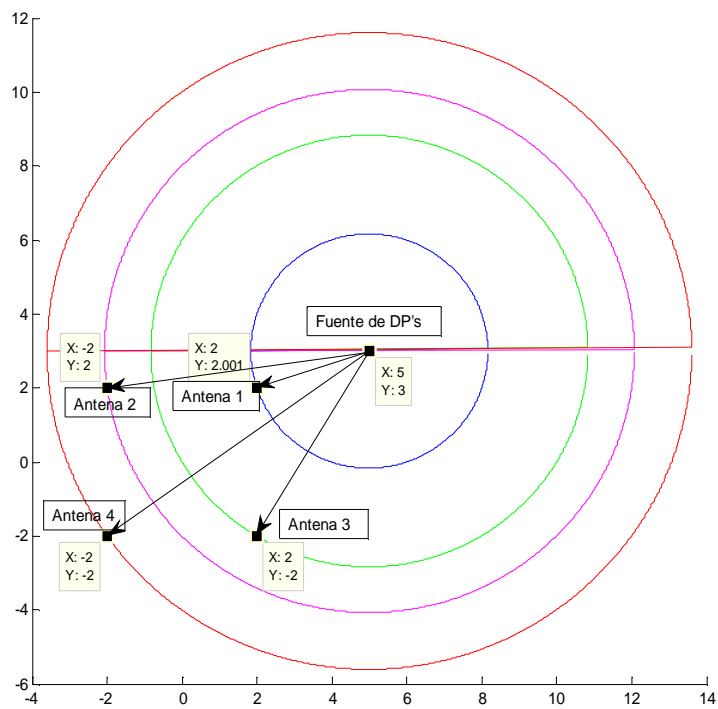


Figura 3. Propagación esférica de las DP's

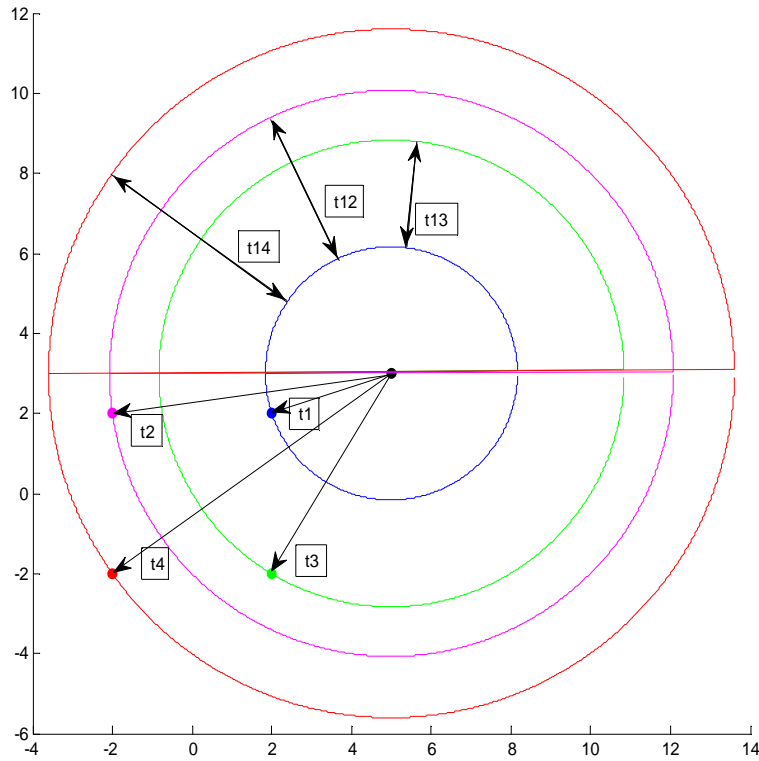


Figura 4. Tiempo de propagación de las DP's.

La localización de la fuente de DP implica obtener la solución de un sistema de tres ecuaciones no lineales con tres incógnitas. Los datos conocidos de este sistema son la posición de las antenas x_q , y_q y z_q donde el subíndice q representa cualquiera de las cuatro antenas. Otro dato son los tiempos de desfase con el que llega la emisión de la DP, t_{ij} donde i representa la antena que se toma de referencia y j representa una de las tres antenas que no se toman como referencia. El último dato conocido utilizado en el sistema de ecuaciones es la velocidad de propagación del aire, $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.

La principal ecuación del sistema es (1), de ésta ecuación se derivan todas las demás. Ésta ecuación representa que la distancia entre dos puntos calculada geométricamente es igual a la distancia obtenida del producto de la velocidad de propagación del medio por el tiempo que se está propagando.

En las ecuaciones utilizadas en éste documento se utilizará el subíndice q para referirse a las antenas y puede adoptar cualquiera de estos valores: 1, 2, 3 y 4, para referirse a la fuente se utiliza el subíndice s . Se supone que las emisiones de DP se propagan esféricamente desde la posición de la fuente como se ha explicado anteriormente. El inicio de la propagación se produce en un instante τ desconocido y llega a las antenas en los tiempos $(t_1, t_2, t_3$ y $t_4)$. La propagación puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$c \cdot (t_q - \tau) = \sqrt{(x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2} \quad (1)$$

Al observar la ecuación (1) se puede comprobar que hay dos incógnitas más de las que se han mencionado anteriormente. Estas son el instante τ , en el que se produce el comienzo de la emisión de la DP. La otra incógnita es t_q que representa los tiempos de llegada (t_1, t_2, t_3 y t_4). Operando con éstas ecuaciones, se obtiene una ecuación más práctica en la que el principal objetivo es eliminar el instante τ , en el que se produce el comienzo de la emisión de la DP. Para ello se tiene que trabajar con tiempos relativos que no hagan referencia a ningún punto de origen, simplemente referenciados a dos puntos con coordenadas conocidas. Restando los tiempos referenciados al origen de dos antenas, se obtiene el tiempo relativo que tarda en propagarse la emisión de la DP desde una de las antenas i a la otra j .

$$t_{ij} = (t_j - \tau) - (t_i - \tau) \quad (2)$$

La representación gráfica de la ecuación (2) se puede apreciar en la Figura 4. La resta del vector t_2 menos el t_1 da como resultado el vector $t_{12} = (t_2 - \tau) - (t_1 - \tau)$.

Los tiempos de retardo entre antenas se pueden conocer realizando el producto entre el desfase calculado mediante la correlación r_{ij} , y el tiempo por muestra t_s véase la ecuación (3). Este producto se desarrolla con más detenimiento en el apartado 5.3 Cálculo del tiempo de desfase entre dos señales tipo impulso.

$$t_{ij} = t_i - t_j = r_{ij} \cdot t_s \quad (3)$$

Si se opera con la diferencia de la ecuación (2) en la ecuación (1) y se aplica la simplificación que se indica en la ecuación (4) para las tres combinaciones posibles, se obtienen las ecuaciones (5), (6) y (7).

$$g_q = \sqrt{(x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2} \quad (4)$$

$$c \cdot t_{12} = g_1 - g_2 \quad (5)$$

$$c \cdot t_{13} = g_1 - g_3 \quad (6)$$

$$c \cdot t_{14} = g_1 - g_4 \quad (7)$$

Las ecuaciones (5), (6) y (7), son las tres ecuaciones con tres incógnitas que se utilizarán para calcular la posición de la fuente de DP's. En estas ecuaciones todos los datos son conocidos excepto las coordenadas de la posición de la fuente de DP's.

4.2 Método Newton-Raphson en la localización de la fuente de DP's.

Debido a que el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas planteado en el apartado anterior es un sistema no lineal, se recurre al método de Newton-Raphson para resolverlo mediante iteraciones.

Inicialmente se introduce en el algoritmo una estimación de la posición de la fuente de DP (x'_s, y'_s, z'_s). En cada iteración se realiza el cálculo de un incremento correctivo que se suma a la posición de la fuente de DP, con el objeto de alcanzar la posición real de la fuente de DP. En la primera iteración, el término corrector se suma a la estimación inicial de la posición de la fuente de DP. En las iteraciones posteriores el incremento correctivo se suma al valor estimado de la posición de la fuente de DP en la iteración

anterior. Este método iterativo hace que se obtenga la solución correcta acercándose a la misma progresivamente.

$$x_s = x'_s + \Delta x'_s; \quad y_s = y'_s + \Delta y'_s; \quad z_s = z'_s + \Delta z'_s \quad (8)$$

Donde $\Delta' = [\Delta x'_s \quad \Delta y'_s \quad \Delta z'_s]^T$ es la matriz de términos correctivos

Este algoritmo es altamente eficiente para encontrar los ceros de una función dada. Reescribiendo las ecuaciones (5), (6) y (7) utilizadas anteriormente, agrupándolas en un vector, obtenemos la ecuación (9).

$$F_{(x_s, y_s, z_s)} = \begin{pmatrix} f_{12} \\ f_{13} \\ f_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 - g_2 - (c \cdot t_{12}) \\ g_1 - g_3 - (c \cdot t_{13}) \\ g_1 - g_4 - (c \cdot t_{14}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

El objetivo es conseguir que $F_{(x_s, y_s, z_s)} = 0$, es decir, que las funciones f_{12}, f_{13}, f_{14} que son las funciones de error sean igual a cero. Éstas se deben minimizar para reducir el error en la localización de la posición de la fuente de descargas parciales. El valor de estas funciones de error tenderá a cero en cada iteración hasta alcanzar la solución final.

El método de Newton-Raphson evalúa en cada iteración la función (9). Como la ecuación (9) no es lineal, encontrar la solución resulta complejo mediante métodos sencillos. Desarrollando la función $F_{(x_s, y_s, z_s)}$ con los dos primeros términos de la serie de Taylor, para un entorno del punto (x_s, y_s, z_s) . Se obtiene:

$$F_{(x_s, y_s, z_s)} = F_{(x'_s, y'_s, z'_s)} + \Delta' \frac{dF_{(x'_s, y'_s, z'_s)}}{d(x_s, y_s, z_s)} \quad (10)$$

La matriz jacobiana de derivadas parciales $J = \frac{dF_{(x'_s, y'_s, z'_s)}}{d(x_s, y_s, z_s)}$ queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{12}}{\partial x_s} & \frac{\partial f_{12}}{\partial y_s} & \frac{\partial f_{12}}{\partial z_s} \\ \frac{\partial f_{13}}{\partial x_s} & \frac{\partial f_{13}}{\partial y_s} & \frac{\partial f_{13}}{\partial z_s} \\ \frac{\partial f_{14}}{\partial x_s} & \frac{\partial f_{14}}{\partial y_s} & \frac{\partial f_{14}}{\partial z_s} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Operando:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial(g_1 - g_2 - (c \cdot t_{12}))}{\partial x_s} & \frac{\partial(g_1 - g_2 - (c \cdot t_{12}))}{\partial y_s} & \frac{\partial(g_1 - g_2 - (c \cdot t_{12}))}{\partial z_s} \\ \frac{\partial(g_1 - g_3 - (c \cdot t_{13}))}{\partial x_s} & \frac{\partial(g_1 - g_3 - (c \cdot t_{13}))}{\partial y_s} & \frac{\partial(g_1 - g_3 - (c \cdot t_{13}))}{\partial z_s} \\ \frac{\partial(g_1 - g_4 - (c \cdot t_{14}))}{\partial x_s} & \frac{\partial(g_1 - g_4 - (c \cdot t_{14}))}{\partial y_s} & \frac{\partial(g_1 - g_4 - (c \cdot t_{14}))}{\partial z_s} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Donde la distancia absoluta entre las antenas y la fuente de descargas parciales es:

$$g_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} \quad (13)$$

$$g_2 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2} \quad (14)$$

$$g_3 = \sqrt{(x_s - x_3)^2 + (y_s - y_3)^2 + (z_s - z_3)^2} \quad (15)$$

$$g_4 = \sqrt{(x_s - x_4)^2 + (y_s - y_4)^2 + (z_s - z_4)^2} \quad (16)$$

Operando:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{x'_s - x_1}{g_1} & \frac{x'_s - x_2}{g_2} & \frac{y'_s - y_1}{g_1} & \frac{y'_s - y_2}{g_2} & \frac{z'_s - z_1}{g_1} & \frac{z'_s - z_2}{g_2} \\ \frac{x'_s - x_1}{g_1} & \frac{x'_s - x_3}{g_3} & \frac{y'_s - y_1}{g_1} & \frac{y'_s - y_3}{g_3} & \frac{z'_s - z_1}{g_1} & \frac{z'_s - z_3}{g_3} \\ \frac{x'_s - x_1}{g_1} & \frac{x'_s - x_4}{g_4} & \frac{y'_s - y_1}{g_1} & \frac{y'_s - y_4}{g_4} & \frac{z'_s - z_1}{g_1} & \frac{z'_s - z_4}{g_4} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Finalmente del producto entre la inversa de jacobiana y la función de error, se obtiene el vector de términos correctivos.

$$\Delta' = J^{-1} \cdot F(x'_s, y'_s, z'_s) \quad (18)$$

Para cada iteración que realiza la aplicación, se resta éste término correctivo al valor de la posición de la fuente de DP provisional calculado en la iteración anterior hasta que el algoritmo converge. Las coordenadas de la fuente de DP recibe el mismo nombre en cada iteración porque se sobrescribe en cada iteración.

$$x_s = x_s - \Delta x'_s \quad (19)$$

$$y_s = y_s - \Delta y'_s \quad (20)$$

$$z_s = z_s - \Delta z'_s \quad (21)$$

5 Evolución del programa.

Para poder probar el algoritmo es necesario tener las señales que recibirían cuatro antenas con la fuente situada en un punto conocido y comprobar que la solución del algoritmo es igual a ese punto conocido. En este apartado se explica cómo generar las cuatro señales en las antenas y qué desfase deben tener en función de su posición y de la posición del punto de emisión.

Como las emisiones que generan las descargas parciales, son señales impulsionales, el primer paso desarrollado en Matlab fue crear señales tipo impulso sencillas. Estas señales son un vector con todos sus valores igual a cero exceptuando una posición cuyo valor es 1. La ubicación de la posición distinta de cero varía en función del tiempo transcurrido desde que se produce la emisión del impulso hasta que éste es recibido en la antena. Esto se repite para cada una de las antenas obteniéndose cuatro señales tipo impulso desfasadas entre sí.

El siguiente paso es crear un código que sea capaz de calcular los desfases con que se reciben los pulsos. Para poder dar este paso, hay que plantear el problema desde otro punto de vista. Partiendo de las ecuaciones (4), (5), (6) y (7), se cambian las incógnitas y se obtienen las ecuaciones (22), (23) y (24). Las incógnitas pasarán a ser los desfases entre señales y la posición de las coordenadas de la fuente de DP's serán datos conocidos.

$$t_{12} = \frac{g_1 - g_2}{c} \quad (22)$$

$$t_{13} = \frac{g_1 - g_3}{c} \quad (23)$$

$$t_{14} = \frac{g_1 - g_4}{c} \quad (24)$$

Una vez que se tienen las señales generadas, se puede comprobar si el algoritmo funciona correctamente. Se parte de la situación original en la que las incógnitas son las coordenadas de la fuente de DP's y se calculará mediante el algoritmo la posición de la fuente de DP's.

Los siguientes pasos van en la misma línea y consisten en complicar las señales hasta que éstas sean señales reales.

5.1 Matlab, entorno digital.

Las señales de origen natural, son analógicas. Para poder trabajar con una señal analógica en cualquier dispositivo electrónico, es necesario discretizarla para convertirla en digital. Cuando trabajamos en Matlab, utilizamos señales que proporciona el osciloscopio, como este dispositivo es digital las señales que capta son señales digitales.

Cuando se calcula el desfase entre dos señales, Matlab devuelve un número entero. Este número son las muestras que hay de desfase entre las dos señales estudiadas. Es muy difícil que coincida el desfase real con el desfase que calcula Matlab porque

este último es número entero de muestras. Al discretizar la señal y al calcular el desfase en número de muestras se comete un error que se estudia en el apartado 6.

Debido a la necesidad de discretizar se estableció un parámetro t_s que representa el tiempo por muestra. Este parámetro es variable en función de la frecuencia de muestreo, de él depende la exactitud de la localización. La inversa de este parámetro, es la frecuencia de muestreo que viene fijada en el dispositivo de adquisición. Estos parámetros son fundamentales en la adquisición de datos. Existen cuatro parámetros interrelacionados que permiten establecer la configuración de la adquisición cuando esta se transforma de analógica en digital. La relación que existe entre estos parámetros, se muestra en las ecuaciones (25) y (26).

- Periodo de muestreo (T) Es el intervalo de tiempo durante el cual se recogen descargas parciales.
- Numero de muestras(n). Indica la cantidad de puntos en que se divide la señal de entrada.
- Frecuencia de muestreo(F). Es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal analógica para producir una señal discreta. Se expresa en hercios (Hz, ciclos por segundo).
- Tiempo por muestra (t_s). Es la inversa del tiempo que equivale cada muestra, es decir, cada parte en que se ha dividido la señal.

$$T = \frac{n}{F} = t_s \cdot n \quad (25)$$

$$t_s = \frac{1}{F} \quad (26)$$

5.2 Creación de las señales de las antenas.

En este apartado se generarán cuatro vectores como se ha indicado anteriormente. Inicialmente se crearán señales impulsionales con desfases aleatorios, el pulso será colocado sin criterio definido. Para conseguir estas señales, se generan cuatro vectores de tamaño n llenos de ceros. Para generar los vectores de ceros, se utiliza la función `zeros`. Esta función permite generar matrices de $n \times m$ dimensiones, en este caso de 1×100 . Posteriormente se asigna una posición aleatoria al pulso. El resultado se muestra en la Figura 5.

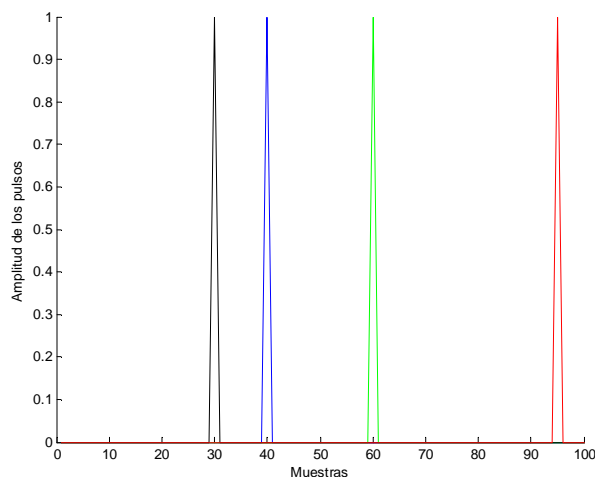


Figura 5. Señales impulsionales con desfases sencillos

El código en Matlab es:

```
n=100;
%%Señal 1
S1=zeros(1,n);
S1(40)=1;
%%Señal 2
S2=zeros(1,n);
S2(60)=1;
%%Señal 3
S3=zeros(1,n);
S3(30)=1;
%%Señal 4
S4=zeros(1,n);
S4(95)=1;

holdon

plot(S1,'b')
plot(S2,'g')
plot(S3,'k')
plot(S4,'r')
```

El siguiente paso es desfasar las señales en función de la distancia entre las antenas y la posición de la fuente de DP's. Para implementar en Matlab esta idea, se predeterminó la posición de las cuatro antenas receptoras y la posición de la fuente de descargas parciales. La predeterminación de la posición de la fuente de descargas parciales se debe a la necesidad de establecer el tiempo que tardara en llegar la señal de la descarga parcial a cada antena.

Para obtener el desfase con el que se recibe la señal en las distintas antenas, se calcula la distancia existente entre cada antena y la fuente de descargas parciales. Una vez obtenida esta distancia, se divide entre la velocidad de la luz para obtener el tiempo con el que llega la descarga parcial a cada antena.

El subíndice i permite identificar la antena a la que pertenece 1, 2, 3 ó 4. La muestra n_i nunca puede ser un número entero por tanto se redondea siempre hacia el número entero más cercano utilizando la función `round` de Matlab. Aquí se comete un error que será objeto de estudio más adelante en el apartado 6.

Llegado a este punto se crea un vector S_i lleno de ceros de tamaño n . El subíndice i permite identificar la antena a la que pertenece 1, 2, 3 ó 4. En el vector de cada antena se coloca un 1 en la posición n_i calculada anteriormente.

La señal que genera la fuente de descargas parciales es un vector en Matlab. Como se ha explicado anteriormente este vector está lleno de ceros exceptuando un pulso. Se debe calcular la posición que ocupa el pulso dentro del vector para que simule la distancia a la que se ha situado esa antena respecto del emisor. A partir de la distancia existente entre la posición de la fuente de descargas parciales y las distintas antenas, dividiendo entre el producto velocidad de propagación por tiempo por muestra t_s se obtiene la muestra n_i donde se produce el pulso, ver ecuación (27).

$$n_i = \frac{\sqrt{(x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2}}{c \cdot t_s} \quad (27)$$

El código en Matlab para conseguir estas acciones es:

```
n=200;%numero de muestras
Ts=10^-9;%Tiempo por muestra
c=3*10^8;%velocidad de la luz
% Posición real de la antena, para poder saber dónde está el pulso
%-----
Xso=20; Yso=20; Zso=20; % Valores aleatorios
%-----
%%Definimos la posición de las antenas
%%Antena 1
X1=2;Y1=0;Z1=0; % Valores aleatorios
%%Antena 2
X2=0;Y2=4;Z2=0; % Valores aleatorios
%%Antena 3
X3=0;Y3=0;Z3=6; % Valores aleatorios
%%Antena 4
X4=8;Y4=0;Z4=0; % Valores aleatorios
%%Antena 1
S1=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n1=round(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
S1(n1)=1;
%%Antena 2
S2=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n2=round(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
S2(n2)=1;
%%Antena 3
S3=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n3=round(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
S3(n3)=1;
%%Antena 4
S4=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n4=round(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
S4(n4)=1;
```

La fuente se sitúa en $Fuente_{s_0} = (20,20,20)$ m y las antenas se sitúan en $Antena_1 = (2,0,0)$ $Antena_2 = (0,4,0)$ m, $Antena_3 = (0,0,6)$ m y $Antena_4 = (8,0,0)$ m por lo que las distancias entre las antenas y la fuente son $Distancia_{1-s_0} = 33,5$ m, $Distancia_{2-s_0} = 32,5$ m, $Distancia_{3-s_0} = 31,6$ m y $Distancia_{4-s_0} = 30,7$ m. Si dividimos estas distancias entre $t_s \cdot c$, se obtienen las muestras que hay de distancia entre las antenas y la fuente, su valor es $Muestras_{1-s_0} = 111,8$, $Muestras_{2-s_0} = 108,3$, $Muestras_{3-s_0} = 105,2$ y $Muestras_{4-s_0} = 102,4$ m. Ejecutando este fragmento de código, se obtienen cuatro vectores tipo impulso como se muestra en la Figura 6. Al redondear los valores obtenidos anteriormente al entero más cercano se obtiene la muestra donde se ubica el pulso $n_1 = 112$ en color azul, $n_2 = 108$ en color verde, $n_3 = 105$ en color amarillo y $n_4 = 102$ en color rojo. El tamaño de los vectores S_i es de 200 muestras, que viene fijado por el parámetro n . La diferencia entre el número entero de muestras y el número decimal introduce un pequeño error que será comentado más adelante.

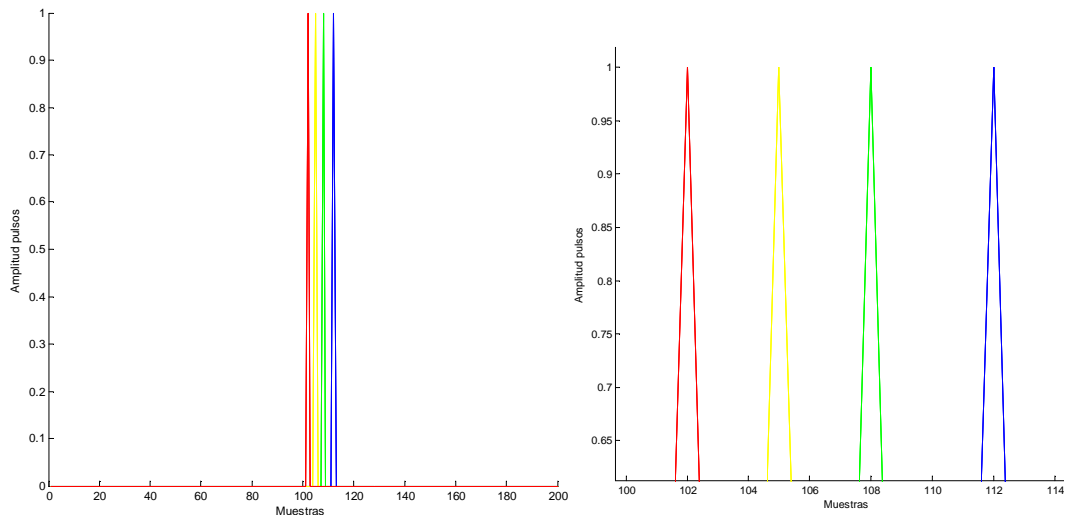


Figura 6. Ilustración de cuatro señales impulsionales.

5.3 Cálculo del tiempo de desfase entre dos señales tipo impulso.

La señal de una emisión de descarga parcial medida con una antena es un impulso con un periodo de atenuación como el mostrado en la Figura 7 Izquierda. El primer objetivo propuesto, consistía en calcular el desfase existente entre dos pulsos. Para simplificar los cálculos se generaban pulsos que simulaban descargas parciales muy simplificadas. Estas señales estaban formadas por un vector de ceros exceptuando un valor que se le asignaba la unidad, como se muestra en la Figura 7 derecha.

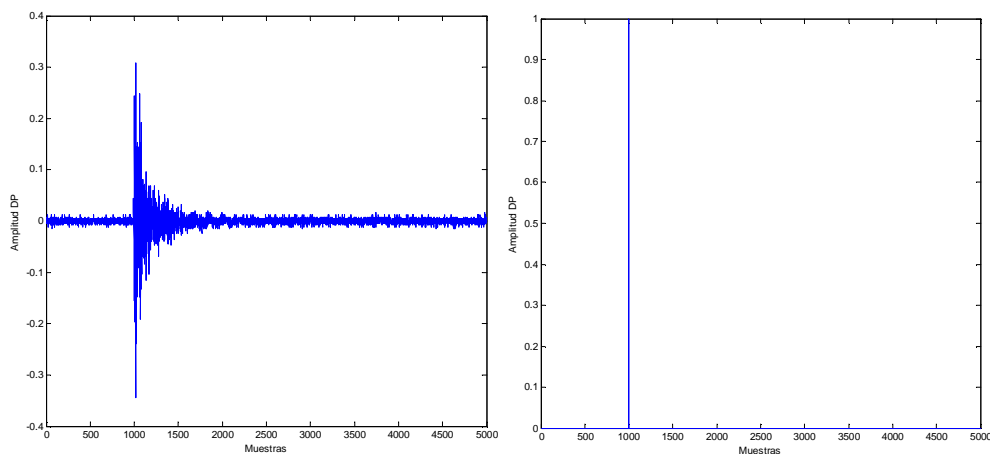


Figura 7. Descarga parcial real (Izquierda). Pulso (Derecha)

Matlab ofrece varias opciones para calcular el desfase entre dos señales. Para el estudio realizado en este documento se optó por calcular la correlación cruzada con *xcorr*.

Xcorr es una función que trabaja con dos argumentos de entrada y dos de salida. Los argumentos de entrada, son las dos señales (de tamaño m) de las que se pretende conocer el desfase que existe entre ellas. Los argumentos de salida son dos vectores (de tamaño $2m - 1$).

$$[Output1, Output2] = \mathbf{xcorr}(Input1, Input2) \quad (28)$$

En la documentación que ofrece Matlab sobre esta función se puede ver como se ejecuta la función. La correlación para cada desfase la calculada atendiendo la siguiente ecuación.

$$R_{xy}(a) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{m-a-1} Input_1(a+n) \cdot Conj(Input_2(n)) & a \geq 0 \\ R_{yx}(-a) & a < 0 \end{cases} \quad (29)$$

En las condiciones de la derecha que se especifican en la ecuación (29) el valor positivo de a toma valores desde 0 hasta $m - 1$. Contando el cero esta progresión tiene m pasos. En las condiciones para los valores de a menores de cero, la progresión de valores de a va desde $-(m - 1)$ hasta -1 esta progresión tiene $m - 1$ pasos. Al juntar la serie positiva y la negativa se obtiene que la correlación se evalúa en $2m - 1$ posiciones, como anteriormente se había dicho.

El desarrollo de la ecuación (29), permite ver más intuitivamente como se realiza el cálculo de $output1$ correlación cruzada. Este desarrollo se muestra en las ecuaciones siguientes (30)-(38). Cabe destacar que cuando se hace la llamada al elemento de un vector, el subíndice es un entero menor de la posición que ocupa dicho elemento. Por ejemplo X_0 hace alusión al primer elemento del vector X , X_1 hace alusión al segundo elemento del vector X ... X_{m-1} hace alusión al elemento m del vector X .

$$Output1(1) = R_{yx}(-(m - 1)) = \sum_{n=0}^{m-(m-1)-1} Y_{m-1+n} \cdot X_n = Y_{m-1} \cdot X_0 \quad (30)$$

$$Output1(2) = R_{yx}(-(m - 2)) = \sum_{n=0}^{m-(m-2)-1} Y_{m-2+n} \cdot X_n = (Y_{m-2} \cdot X_0 + Y_{m-1} \cdot X_1) \quad (31)$$

(...)

$$\begin{aligned} Output1(2m - 2) &= R_{yx}(-2) = \sum_{n=0}^{m-2-1} Y_{2+n} \cdot X_n \\ &= (Y_2 \cdot X_0 + Y_3 \cdot X_1 + \dots + Y_{m-2} \cdot X_{m-3}) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} Output1(m - 1) &= R_{yx}(-1) = \sum_{n=0}^{m-1-1} Y_{1+n} \cdot X_n \\ &= (Y_1 \cdot X_0 + Y_2 \cdot X_1 + \dots + Y_{m-1} \cdot X_{m-2}) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
Output1(m) = R_{xy}(0) &= \sum_{n=0}^{m-0-1} X_{0+n} \cdot Y_n \\
&= (X_0 \cdot Y_0 + X_1 \cdot Y_1 + X_2 \cdot Y_2 + \dots + X_{m-1} \cdot Y_{m-1})
\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
Output1(m+1) = R_{xy}(1) &= \sum_{n=0}^{m-1-1} X_{1+n} \cdot Y_n \\
&= (X_1 \cdot Y_0 + X_2 \cdot Y_1 + \dots + X_{m-1} \cdot Y_{m-2})
\end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
Output1(m+2) = R_{xy}(2) &= \sum_{n=0}^{m-2-1} X_{2+n} \cdot Y_n \\
&= (X_2 \cdot Y_0 + X_3 \cdot Y_1 + \dots + X_{m-2} \cdot Y_{m-3})
\end{aligned} \tag{36}$$

(...)

$$\begin{aligned}
Output1(2m-2) = R_{xy}(m-2) &= \sum_{n=0}^{m-(m-2)-1} X_{m-2+n} \cdot Y_n \\
&= (X_{m-2} \cdot Y_0 + X_{m-1} \cdot Y_1)
\end{aligned} \tag{37}$$

$$Output1(2m-1) = R_{xy}(m-1) = \sum_{n=0}^{m-(m-1)-1} X_{m-1+n} \cdot Y_n = X_{m-1} \cdot Y_0 \tag{38}$$

Estos sumatorios van reduciendo progresivamente el número de sumandos conforme la posición del elemento que se está calculando aumenta desde 0 hacia $m-1$ o disminuye desde 0 hacia $-(m-1)$. Cuando se calcula $R_{xy}(0)$ se suman m elementos y cuando se calcula $R_{xy}(m-1)$ ó $R_{xy}(-m+1)$ se calcula un único producto. Para comprender mejor esta afirmación, se muestra las siguientes gráficas desde la Figura 12 hasta la Figura 16. En estas figuras se muestran las señales S1 y S2 sin ningún tipo de desfase entre sí para distintos valores de correlación. En estas figuras se puede apreciar que para distintos valores R_{xy} los vectores tienen distinto tamaño. Cada figura muestra los vectores que serán multiplicados término a término. Para calcular la correlación en un desfase $R_{xy}(i)$, se suman todos los productos realizados $\sum_{n=0}^{m-i-1} X_{i+n} \cdot Y_n$.

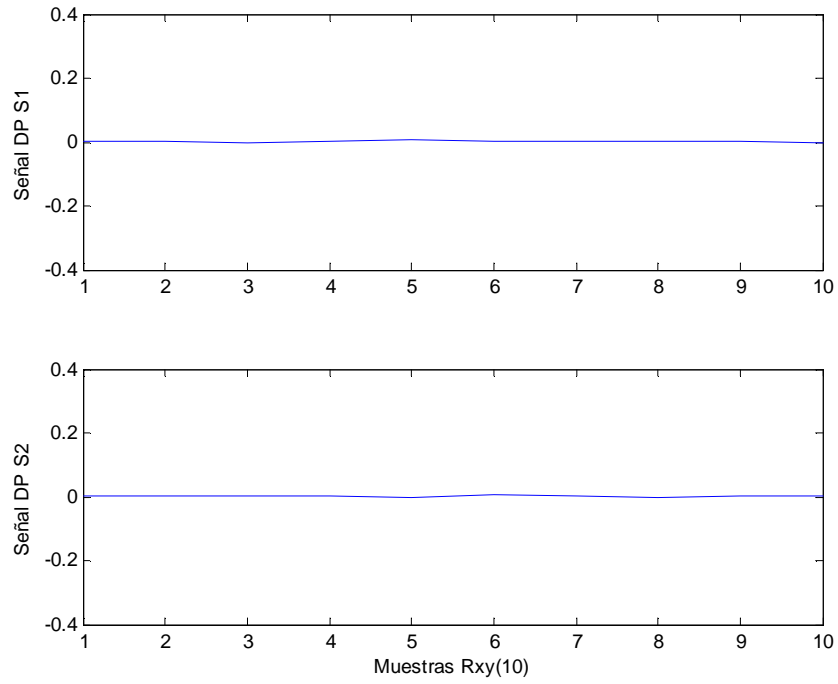


Figura 8. Vectores para calcular la correlación $a = -4990$. El resultado es $output1(10) = R_{xy}(-4990) = 0$.

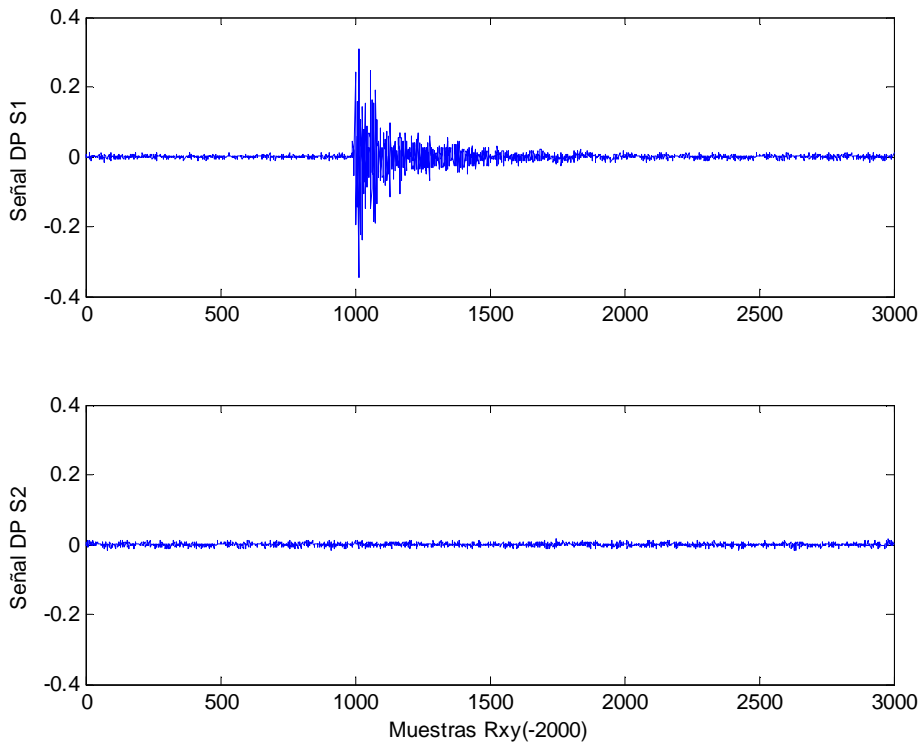


Figura 9. Vectores para calcular la correlación $a = -2000$. El resultado es $output1(3000) = R_{xy}(-2000) = 0,0127$.

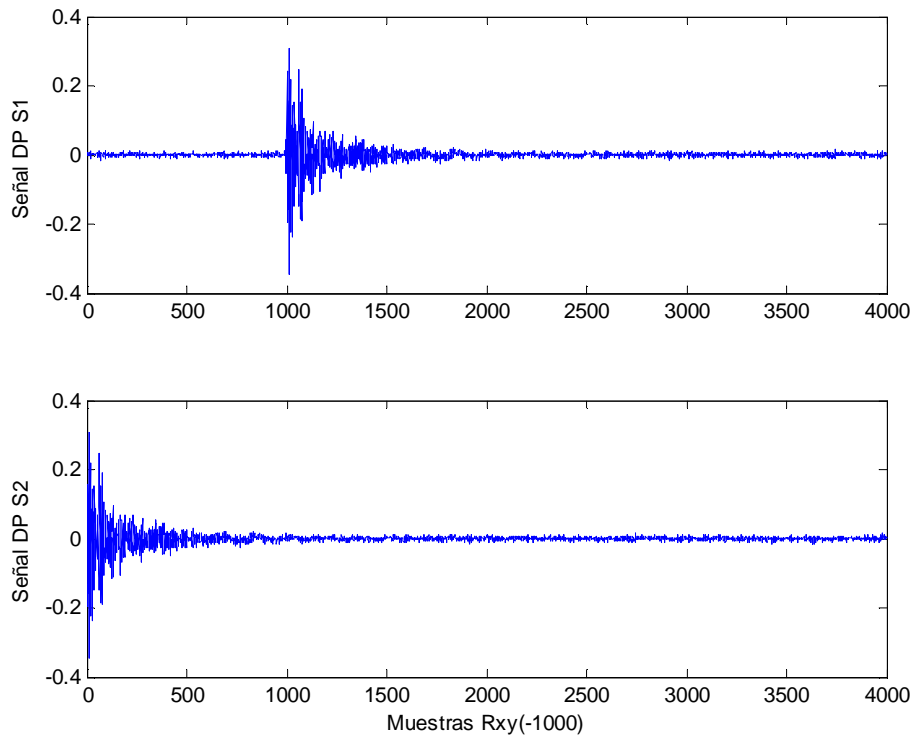


Figura 10. Vectores para calcular la correlación $a = -1000$. El resultado es $output1(4000) = R_{xy}(-1000) = 0,0271$.

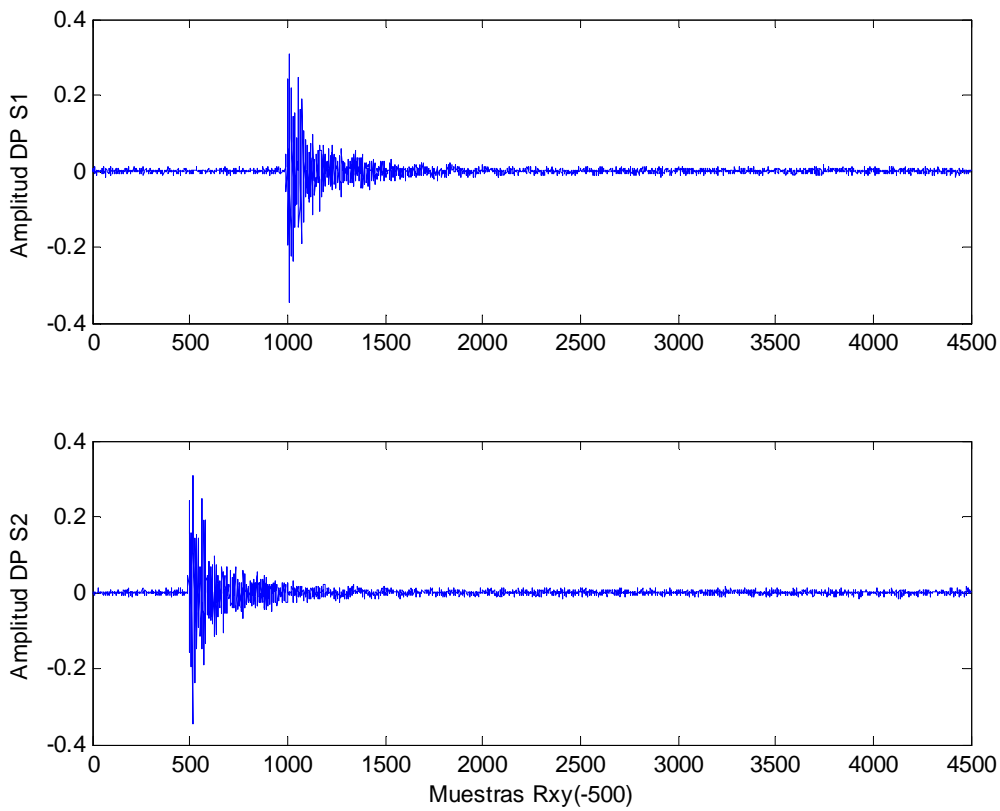


Figura 11. Vectores para calcular la correlación $a = -500$. El resultado es $output1(4500) = R_{xy}(-500) = 0,0037$.

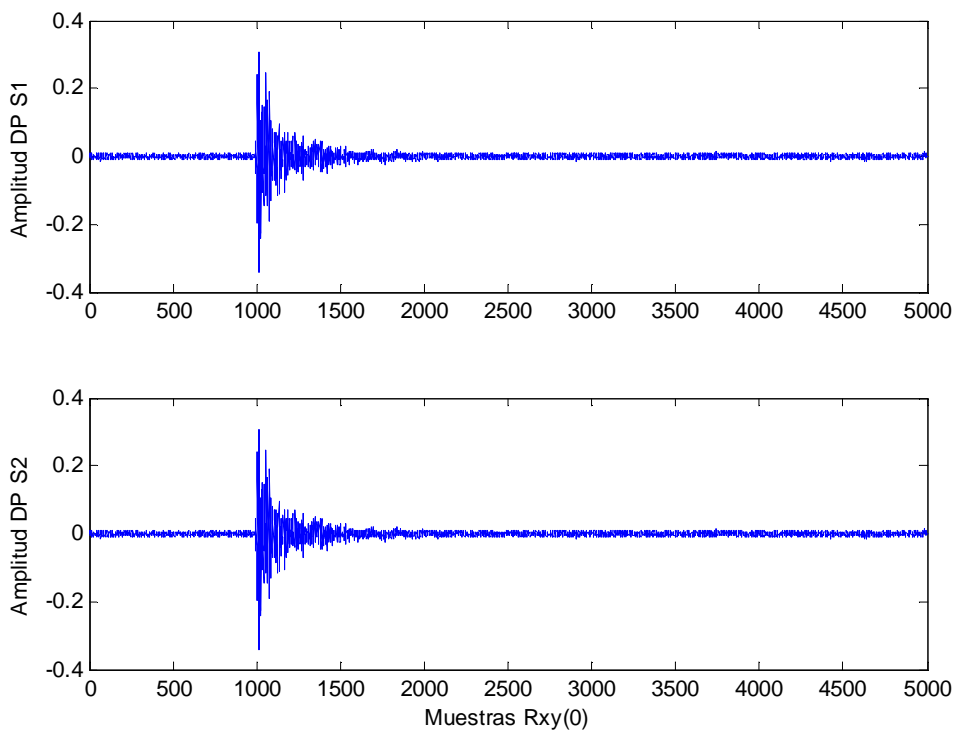


Figura 12. Vectores para calcular la correlación $a = 0$. El resultado es $output1(5000) = R_{xy}(0) = 1.794$.

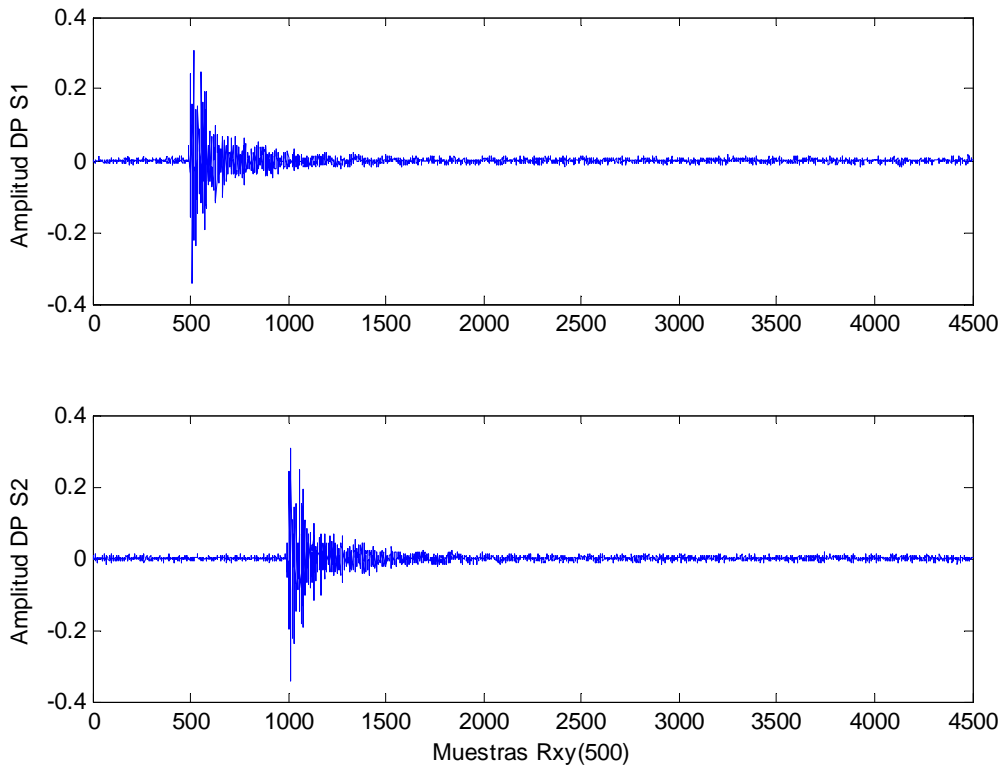


Figura 13. Vectores para calcular la correlación $a = 500$. El resultado es $output1(5500) = R_{xy}(500) = 0,0037$.

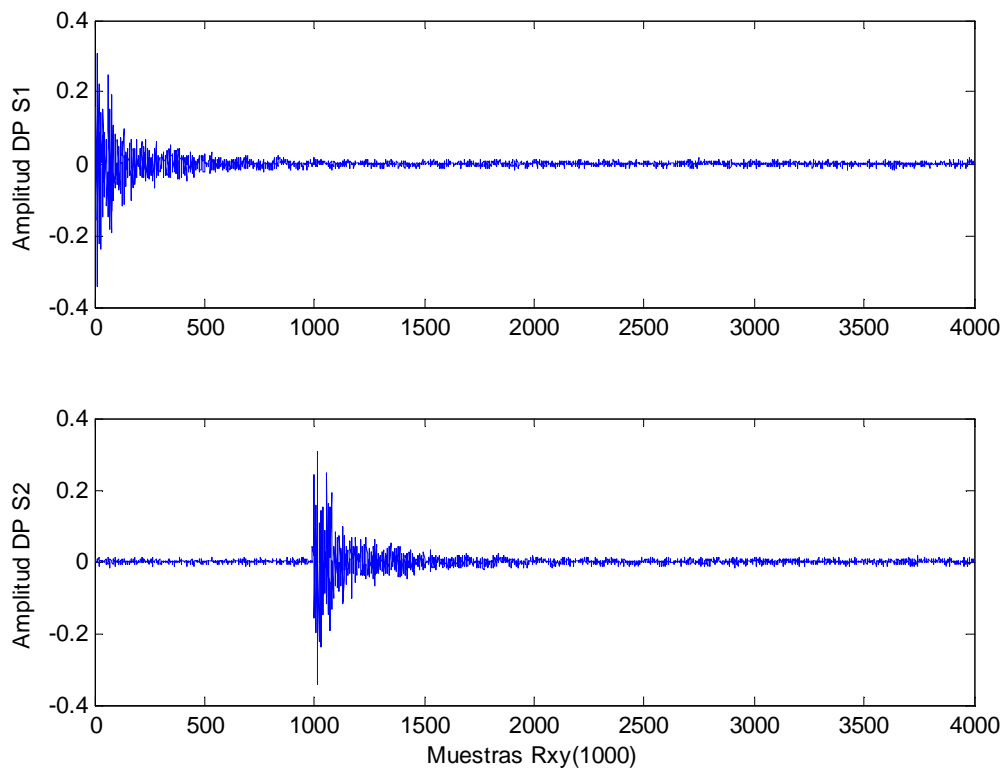


Figura 14. Vectores para calcular la correlación $a = 1000$. El resultado es $output1(6000) = R_{xy}(1000) = 0,0271$.

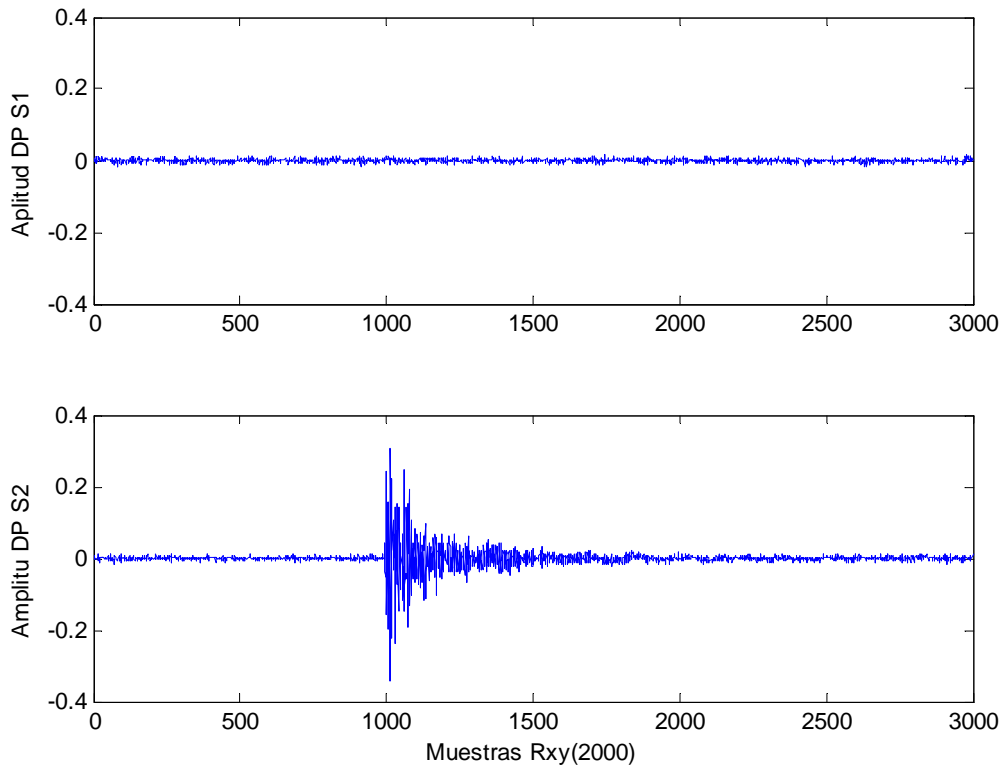


Figura 15. Vectores para calcular la correlación $a = 2000$. El resultado es $output1(7000) = R_{xy}(2000) = 0,0127$.

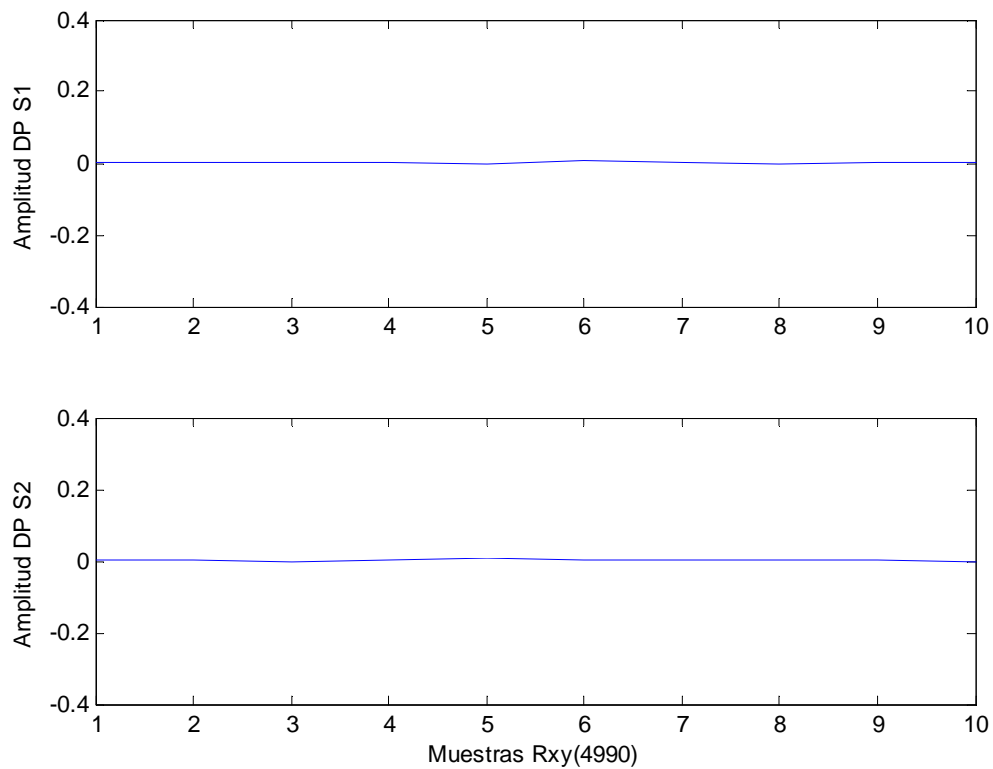


Figura 16. Vectores para calcular la correlación $a = 4990$. El resultado es $output1(9990) = R_{xy}(4990) = 0$.

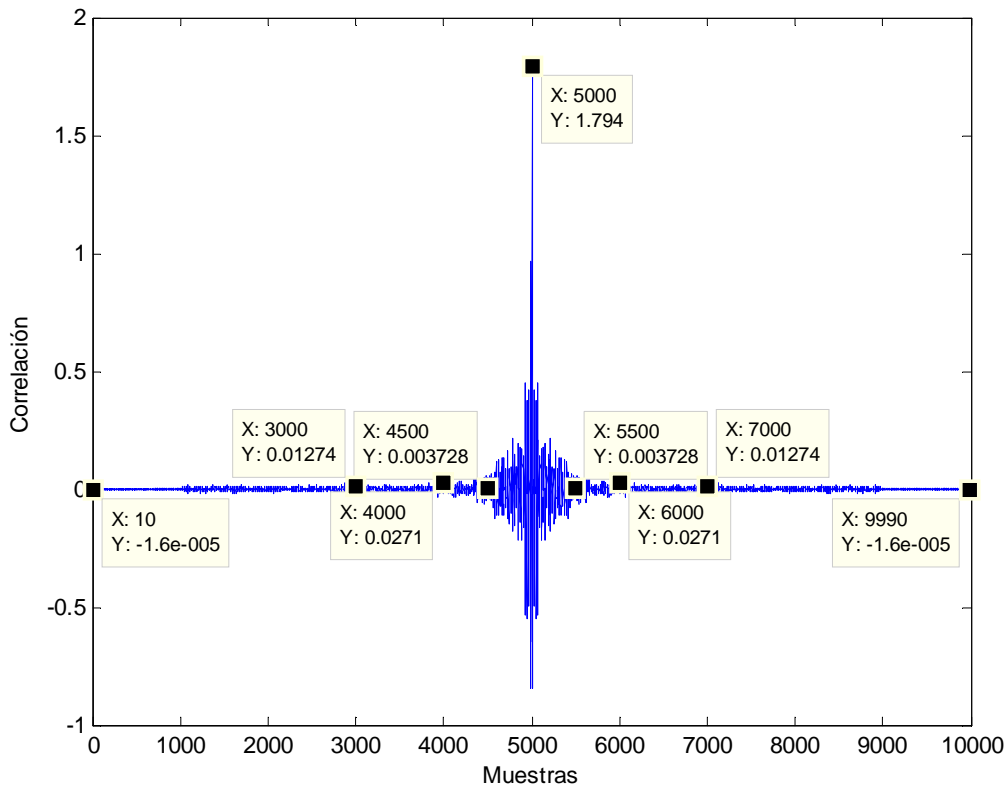


Figura 17. Resultado final de la correlación R_{xy} .

En la función `xcorr` el primer vector devuelve la secuencia de valores de correlación cruzada entre las dos señales para cada desfase. Los elementos del vector $Output_1$ son asignados de la siguiente manera:

$$Output_1(a) = R_{xy}(a - m) \quad (39)$$

Donde $a \in [0, 2m - 1]$

El motivo de que se devuelva unos vectores de este tamaño ($2m - 1$) es debido a que esta función, calcula la correlación existente entre las dos señales punto por punto. Se calcula la correlación desfasando las señales progresivamente desde $-m$ hasta $+m$. Como el desfase 0 no es necesario volver a calcularlo en el subconjunto de los valores negativos, se obtiene un vector de tamaño ($2m - 1$). Esta progresión se muestra desde la Figura 12 hasta la Figura 16. Los elementos del vector $Output_1$ avanzan desde el índice con valor 1 hasta $2m - 1$. Sería más intuitivo poder almacenar estos valores de correlación en un vector que fuese desde $-m$ hasta m pero Matlab no permite generar vectores con índice negativo o de índice 0. De esta manera todos los valores de correlación quedan desfasados m posiciones a la derecha.

En la Figura 17 se puede ver los valores de correlación obtenidos para las señales S1 y S2 que no estaban desfasadas. En ésta figura se pueden ver los puntos calculados a partir de las señales mostradas desde la Figura 12 hasta la Figura 13. Como se ha dicho anteriormente los valores de correlación se calculan multiplicando término a término los vectores mostrados en las Figura 12 - Figura 13 y sumando todos éstos productos.

En la función `xcorr` el vector $Output_2$ indica el desfase en número de muestras con el que se han producido los valores de correlación calculados en el primer vector $Output_1$.

Se muestra un ejemplo de la función `xcorr` en la Figura 18. En la Figura 18 izquierda se muestra el vector $Output_1$ y en la Figura 18 derecha se muestra el vector $Output_2$ del mismo ejemplo. Estas salidas fueron obtenidas para dos señales de DP's reales, como las mostradas en la Figura 7 izquierda.

Para calcular el desfase entre señales, se debe conocer el número de muestras de retardo entre las señales cuando se produce la mayor correlación entre ellas. Este desfase será el retardo existente entre los dos inputs, es decir, las dos señales de entrada. Para obtener el valor que refleje la mayor correlación cruzada entre los dos inputs, se analiza el vector $Output_1$. Se calcula el valor máximo que tiene éste vector, es decir, se obtiene el valor de máxima correlación.

Para calcular el valor máximo del vector $Output_1$ utilizamos la función `max` de Matlab. Esta función nos devuelve dos valores, el máximo valor que tiene el vector que analizamos (Mv) y la posición donde está éste máximo (Mp).

$$[Mv, Mp] = \mathbf{max}(Output_1) \quad (40)$$

De esta manera, para extraer la correlación cruzada entre señales, tenemos que llamar al vector $output_1$ en la posición Mp .

$$Output_1(Mp) \quad (41)$$

Este valor es el número de muestras que hay de desfase entre las dos señales. Si queremos conocer el tiempo que hay de desfase entre las señales, tenemos que multiplicar el número de muestras por el tiempo por muestra.

$$T_{(Input_1, input_2)} = Output_1(Mp) \cdot ts \quad (42)$$

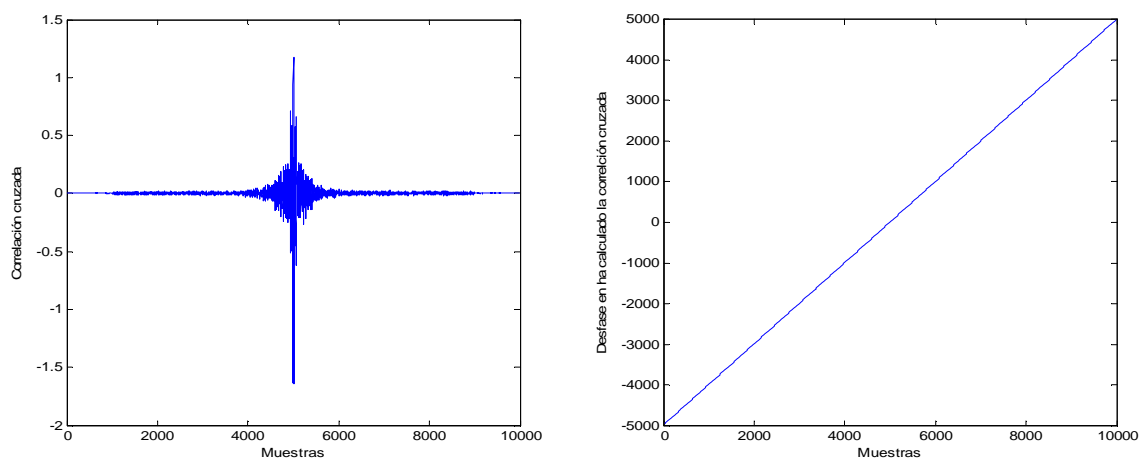


Figura 18. $Output_1$ de la función `Xcorr` (Derecha). $Output_2$ de la función `Xcorr` (Izquierda).

El código en Matlab para conseguir estas acciones es:

```
[a12,b12]=xcorr(S1,S2);  
[mv12,mp12]=max(a12);  
T12=(b12(mp12))*Ts;  
  
[a13,b13]=xcorr(S1,S3);  
[mv13,mp13]=max(a13);  
T13=(b13(mp13))*Ts;  
  
[a14,b14]=xcorr(S1,S4);  
[mv14,mp14]=max(a14);  
T14=(b14(mp14))*Ts;
```

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo del desfase entre antenas. En la Figura 19 se muestran la distribución de las antenas (círculos) y de la fuente de DP's (cuadrado negro).

Según lo descrito en el apartado 5.2, se generan cuatro pulsos a partir de la posición de la fuente de DP's y la colocación de las distintas antenas. El resultado obtenido se muestra en la Figura 20 donde se ven las cuatro señales S1, S2, S3 y S4. En los recuadros se indica la posición x donde se asigna el pulso de magnitud 1 para cada señal.

En estas señales sencillas se puede calcular fácilmente el desfase entre señales. Para obtener el desfase se realiza la diferencia entre las posiciones donde se producen los pulsos. La Tabla 1 muestra los desfases calculados manualmente.

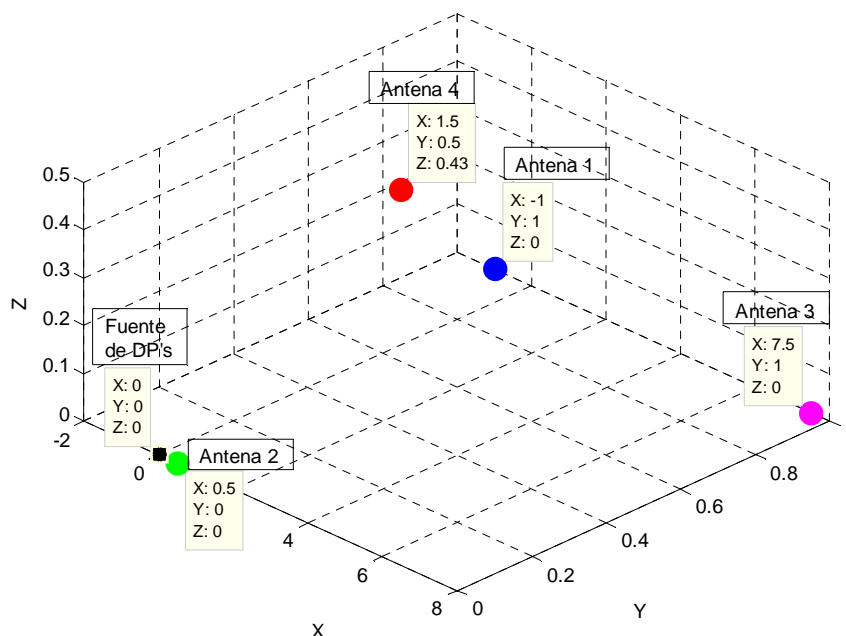


Figura 19. Distribución de las antenas para ejemplo de cálculo de desfase.

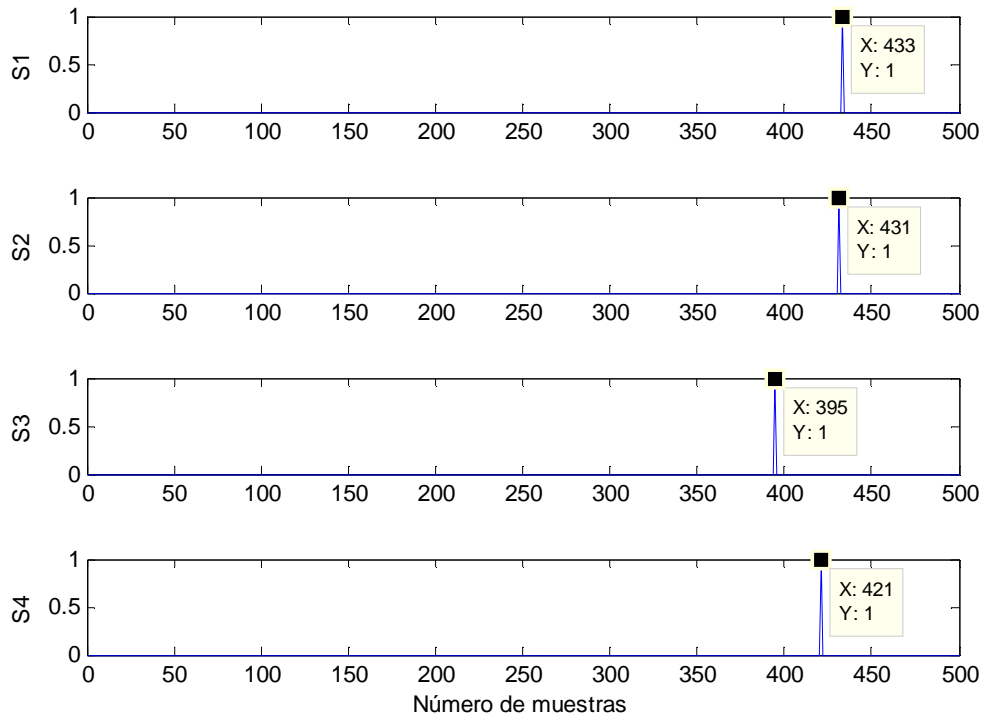


Figura 20. Señales tipo impulso ejemplo cálculo de desfase.

	Desfase S1-S2	Desfase S1-S3	Desfase S1-S4
Desfase en muestras	$R_{12} = 433 - 431 = 2$	$R_{13} = 433 - 395 = 38$	$R_{14} = 433 - 421 = 12$

Tabla 1. Relación de desfases calculados manualmente.

En la Figura 21 se muestra la correlación obtenida para las señales de la Figura 20. La Figura 21 muestra los vectores *Output1* para la correlación entre $S_1 - S_2$, $S_1 - S_3$ y $S_1 - S_4$, respectivamente. Como se ha explicado anteriormente el vector *Output1* es un vector de tamaño $2m - 1$, en este caso 999 muestras.

Tras ejecutar la función `xcorr` para las distintas señales, se busca el máximo en los vectores *Output1* y seguidamente se busca donde se produce este máximo para cada correlación R_{12} , R_{13} y R_{14} . Después de conocer dónde se producen los máximos, se evalúa el vector *Output2* en las posiciones donde se han localizado los máximos. En la Figura 22 se muestra los vectores *Output2* obtenidos en el ejemplo tratado. En ésta figura se puede observar que posicionándose en el vector *Output2* en el valor x donde se produce el máximo, se obtiene el desfase entre las señales estudiadas. En la Tabla 2 se muestran la comparativa de los resultados obtenidos manualmente y a través del algoritmo.

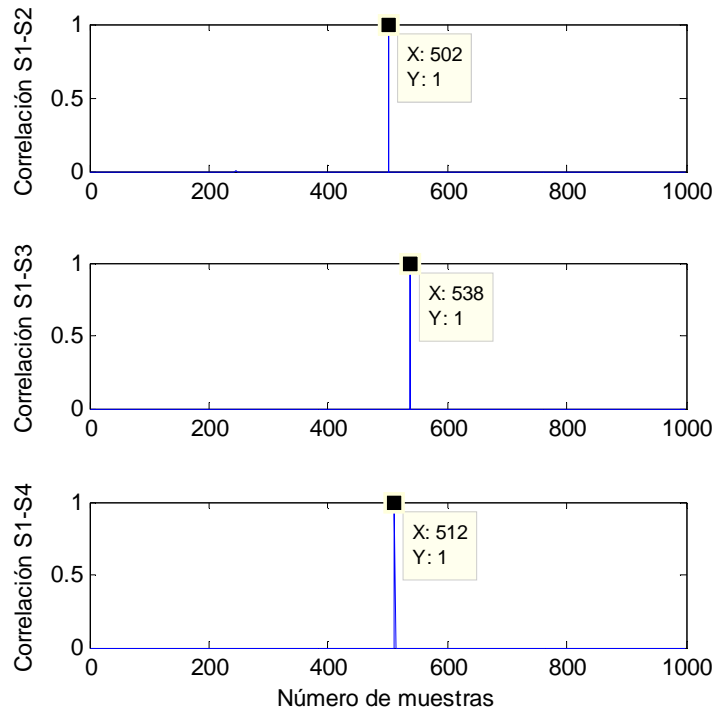


Figura 21. Correlación para señales tipo impulso. Vector output1 de la función Xcorr.

	Desfase S1-S2	Desfase S1-S3	Desfase S1-S4
Desfase Manual	$R12 = 433 - 431 = 2$	$R13 = 433 - 395 = 38$	$R14 = 433 - 421 = 12$
Desfase Algoritmo	$R12 = b12(mp12) = 2$	$R13 = b13(mp13) = 38$	$R14 = (mp14) = 12$

Tabla 2. Comparativa desfase entre señales calculado manualmente y con el algoritmo.

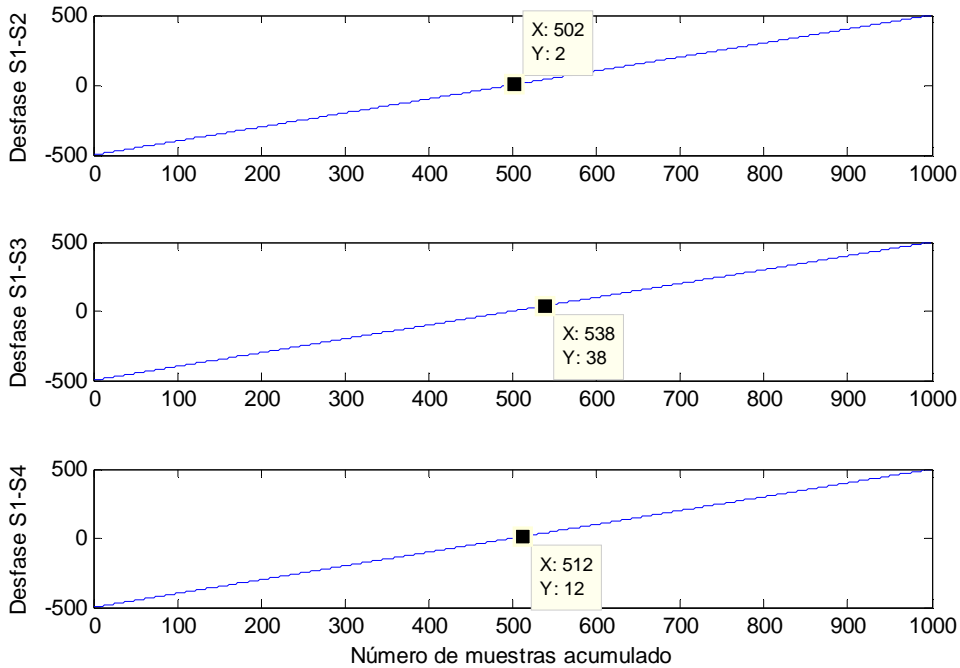


Figura 22. Desfase para señales tipo impulso. Vector output2 de la función Xcorr.

5.4 Algoritmo para la localización de la fuente de descargas parciales.

Mediante el método de Newton-Raphson, se trata de localizar la fuente de descargas parciales. En este apartado se implementa, lo explicado en el apartado 4 Localización de la fuente de descargas parciales, con el fin último de conocer la posición de la fuente DP's.

Este método requiere un punto de partida, una estimación de la posición de la fuente de DP's. El punto de partida ideal es el origen de coordenadas (0,0,0). Experimentalmente se comprobó que en múltiples ocasiones esta estimación conducía a soluciones que divergían. Por ejemplo, cuando dos antenas están a la misma distancia del punto de partida, ésta estimación conduce a soluciones que no convergen porque a la hora de calcular la jacobiana se produce una división entre cero debido a que la resta de dos parámetros $g_i - g_j$ daban cero. Debido a esto se pasó a generar un punto de partida muy cercano al origen pero basado en la posición de la antena utilizada como referencia para los cálculos de desfase. Al seleccionar un punto de partida referenciado a una antena, es muy poco probable que otras dos antenas estén a la misma distancia del punto estimado. Para generar el punto de partida se utilizan las coordenadas x , y y z de la antena seleccionada aleatoriamente y se minoran mil veces sus coordenadas. Posteriormente, por si éstas coordenadas tienen valor igual a cero se le suma un milímetro para que el valor de la estimación de la fuente de DP's sea distinta al punto (0,0,0). El objetivo final es conseguir partir cerca del origen pero evitando el mismo que se ha mencionado anteriormente.

El bucle que controle la ejecución del algoritmo será tipo `while`, este tipo de bucle se ejecuta mientras se cumple una condición. La condición de parada se da cuando el módulo del vector de la función de error para una iteración es mayor que en la anterior, véase la ecuación Figura 42.

$$\begin{aligned} d(i) &= \sqrt{F(1,1)_i^2 + F(1,2)_i^2 + F(1,3)_i^2} \geq \\ d(i-1) &= \sqrt{F(1,1)_{i-1}^2 + F(1,2)_{i-1}^2 + F(1,3)_{i-1}^2} \end{aligned} \quad (43)$$

Como en la primera iteración no se puede comparar con la iteración anterior hay que comenzar el bucle en la segunda iteración. En esta primera iteración, se estima que el módulo del vector función de error en la iteración anterior es dos veces del módulo en la iteración actual $d(1) = d(2) \cdot 2$.

El código en Matlab correspondiente a este apartado es:

```
Xs=X1*0.001+0.001;  
Ys=Y1*0.001+0.001;  
Zs=Z1*0.001+0.001;  
  
dd=1;  
i=2;  
  
while dd==1  
G1=sqrt((Xs-X1)^2+(Ys-Y1)^2+(Zs-Z1)^2);  
G2=sqrt((Xs-X2)^2+(Ys-Y2)^2+(Zs-Z2)^2);  
G3=sqrt((Xs-X3)^2+(Ys-Y3)^2+(Zs-Z3)^2);
```

```

G4=sqrt((Xs-X4)^2+(Ys-Y4)^2+(Zs-Z4)^2);

F=[(G1-G2-(c*T12)),(G1-G3-(c*T13)),(G1-G4-(c*T14))]' ;

%Se calcula la matriz jacobiana
J(1,1)=(Xs-X1)/G1-(Xs-X2)/G2;
J(1,2)=(Ys-Y1)/G1-(Ys-Y2)/G2;
J(1,3)=(Zs-Z1)/G1-(Zs-Z2)/G2;
J(2,1)=(Xs-X1)/G1-(Xs-X3)/G3;
J(2,2)=(Ys-Y1)/G1-(Ys-Y3)/G3;
J(2,3)=(Zs-Z1)/G1-(Zs-Z3)/G3;
J(3,1)=(Xs-X1)/G1-(Xs-X4)/G4;
J(3,2)=(Ys-Y1)/G1-(Ys-Y4)/G4;
J(3,3)=(Zs-Z1)/G1-(Zs-Z4)/G4;
%%Calculamos los incrementos de variación de la posición de la
fuente
A=(J\F)/1000;

Xs=Xs-A(1,1);
Ys=Ys-A(2,1);
Zs=Zs-A(3,1);

er=sqrt((F(1,1))^2+(F(2,1))^2+(F(3,1))^2);
d(i)=er;

%%Se evalua la condición de parada
d(1)=d(2)*2;
if d(i)<d(i-1)
    dd=1;
else
    dd=0;
end
i=i+1;
end

disp('Posición de la fuente de descargas parciales Xs,Ys,Zs')
[Xs,Ys,Zs]'

```

La distribución de las antenas y fuente de DP's se reflejan en la Figura 23. La posición de la primera antena viene representada por un círculo azul, la segunda por un círculo verde, la tercera por un círculo de color magenta y la cuarta por un círculo rojo. La fuente se representa como un círculo negro.

Ejecutando en Matlab, todos los fragmentos de código mostrados en los apartados anteriores, se obtiene el resultado mostrado en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para distintos valores de t_s . Estos resultados varían mucho en función del parámetro t_s , tiempo por muestra. Se puede observar que el resultado obtenido para $t_s = 10^{-9}$ es un resultado regular, existe una desviación de 0,92 m respecto de la posición real lo que equivale a un 12% de error. Para $t_s = 5 \cdot 10^{-11}$ se obtiene un buen resultado, existe una desviación respecto de la posición real de 2 cm. El inconveniente de este resultado es que esta solución es una simulación. Para conseguir un tiempo por muestra $t_s = 5 \cdot 10^{-11}$ necesitaría una tarjeta de adquisición de datos o un osciloscopio que muestrease con una frecuencia de muestreo de 20GHz, estos dispositivos tienen un coste elevadísimo. Por ello se tendrán que buscar soluciones que mejoren el algoritmo y en consecuencia reduzcan el error.

	Posición
Xs	8,23
Ys	8,60
Zs	8,65

Tabla 3. Resultado ejecución algoritmo primera versión.

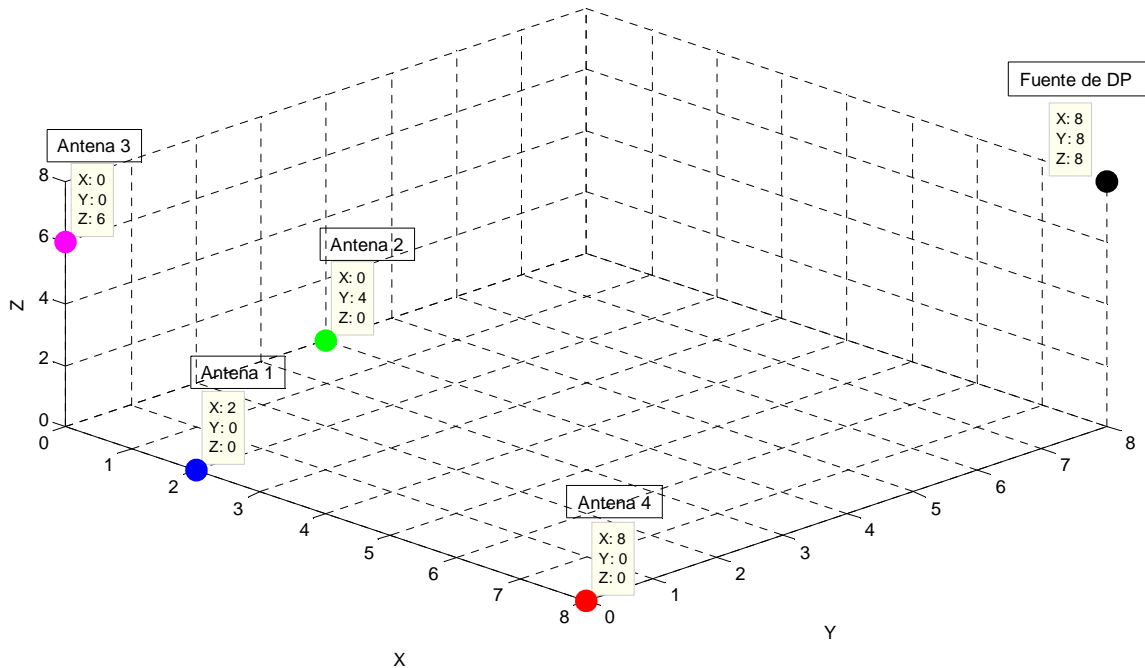


Figura 23. Ilustración de la posición de las antenas y fuente DP en la ejecución del algoritmo en la primera versión.

$T_s(s)$	$X_s(m)$	$Y_s(m)$	$Z_s(m)$	Desviación(m)
Posición teórica de la fuente de DP	8	8	8	-
10^{-9}	8,23	8,60	8,65	0,92
$5 \cdot 10^{-10}$	7,90	7,69	7,65	0,47
10^{-10}	8,02	8,03	8,02	0,05
$5 \cdot 10^{-11}$	7,98	7,98	7,99	0,02

Tabla 4. Tabla comparativa de resultados del algoritmo en la primera versión en función de t_s .

5.5 Localización de una fuente de DP's que emite señales con tres puntos.

Después de trabajar con la señal impulsional simple, se da otro paso hacia la realidad. Este paso consiste en formar una señal impulso formada por tres puntos Figura 24. En la primera prueba, se colocan los tres puntos con la misma magnitud y mismo desfase en las cuatro antenas. Se calculan las posiciones n_i igual que en el apartado 5.2 y se coloca un pulso de valor 1. En esta evolución se colocan dos pulsos más en cada señal, en $n_i - 3$ se coloca un pulso de valor $-0,4$ y en $n_i + 2$ se coloca un pulso de valor $0,9$.

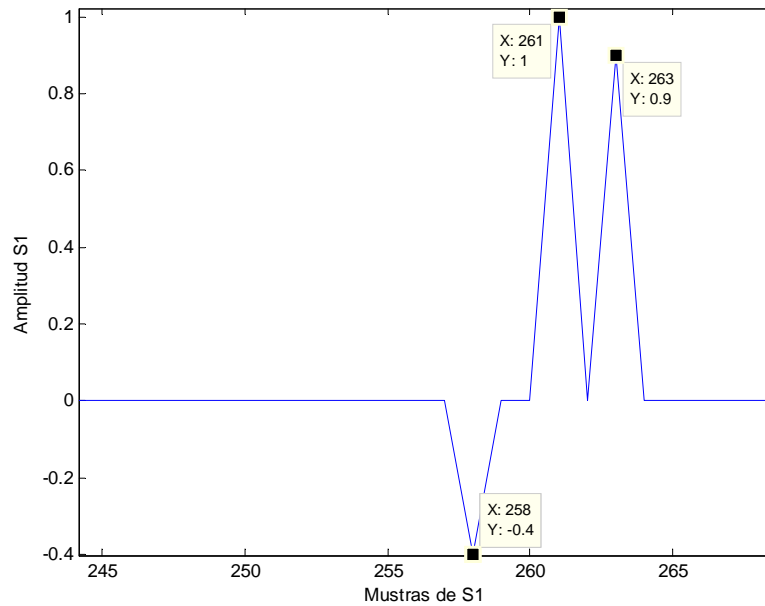


Figura 24. S1 formada por tres puntos $S1(258)=-0.4$, $S1(261)=1$, $S1(263)=0.9$.

El código en Matlab correspondiente a este apartado es:

```

%%Las señales que recibimos en cada antena
%%Antena 1
S1=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n1=round(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
S1(n1-3)=-0.4;
S1(n1)=1;
S1(n1+2)=0.9;
%%Antena 2
S2=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n2=round(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
S2(n2-3)=-0.4;
S2(n2)=1;
S2(n2+2)=0.9;
%%Antena 3
S3=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n3=round(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
S3(n3-3)=-0.4;
S3(n3)=1;
S3(n3+2)=0.9;
%%Antena 4
S4=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n4=round(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
S4(n4-3)=-0.4;
S4(n4)=1;
S4(n4+2)=0.9;

```

Los resultados son exactamente iguales a los que se obtenían cuando la señal solo tenía un punto. Para acercarse a la realidad y simular la aleatoriedad de las DP reales se decide establecer desfases y magnitudes distintas para cada antena Figura 25.

```

%%Las señales que recibimos en cada antena
%%Antena 1
S1=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n1=round(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
nn1=(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
S1(n1-4)=-0.5;
S1(n1)=1;
S1(n1+7)=0.8;
%%Antena 2
S2=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n2=round(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
nn2=(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
S2(n2-8)=-0.2;
S2(n2)=1;
S2(n2+9)=0.5;
%%Antena 3
S3=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n3=round(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
nn3=(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
S3(n3-3)=-0.1;
S3(n3)=1;
S3(n3+2)=0.7;
%%Antena 4
S4=zeros(1,n);
%%Ubicamos el pulso
n4=round(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
nn4=(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
S4(n4-9)=-0.8;
S4(n4)=1;
S4(n4+5)=0.1;

```

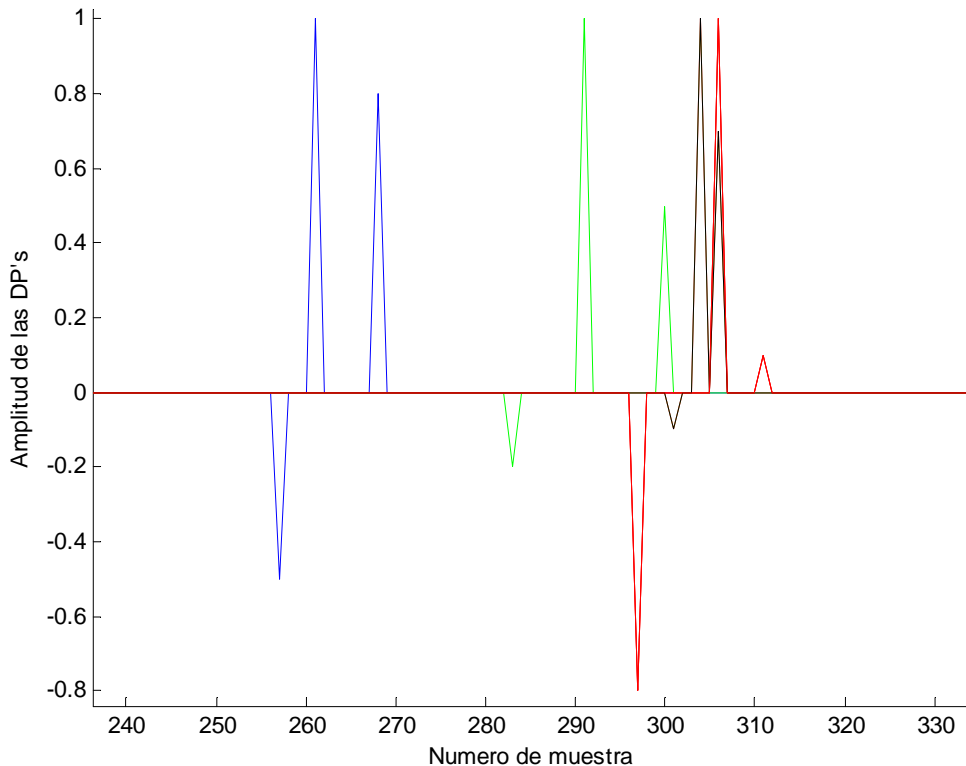


Figura 25. DP con posiciones y magnitudes distintas.

La función `xcorr` permite obtener resultados iguales en los dos casos anteriores, mismas magnitudes y desfases Vs magnitudes y desfases distintos. Matlab devuelve la posición de la fuente de DP con cuatro decimales y en los dos casos para las tres coordenadas de la posición de la fuente de DP's se obtiene el mismo resultado hasta el cuarto decimal.

5.6 Estudio con DP reales (Archivos de Matlab).

El siguiente paso para acercarnos a las descargas parciales reales, es trabajar con un fichero que almacena 4 señales de descargas parciales. Este fichero, `señales.mat`, almacena 5 variables. 4 son las descargas parciales $a1, a2, a3, a4$, formadas por 5000 muestras cada una. La quinta variable es el tiempo, que refleja que cada muestra representa un tiempo de $2 \cdot 10^{-10}$ s. Para poder cargar estas variables al fichero se utiliza la función `load`:

```
Loadseñales.
```

5.6.1 Desfase con señales reales.

El primer estudio que se va a realizar con señales reales es calcular el desfase existente entre una misma señal de DP que se desfazará en función de la posición de las antenas. En la Figura 26 se muestra la distribución de las antenas para el cálculo de la correlación con las señales reales.

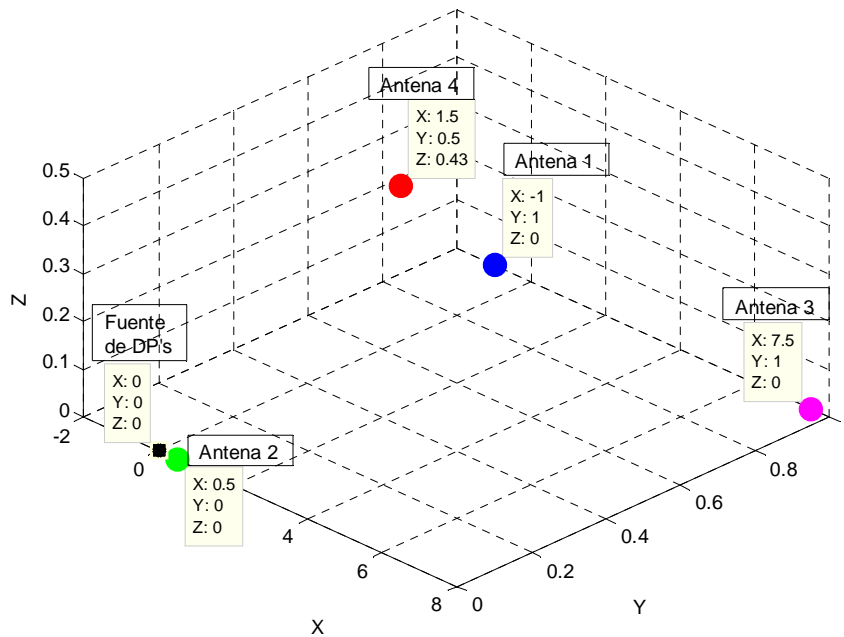


Figura 26. Distribución de las antenas para cálculo de correlación con señales reales

El código introducido en Matlab para poder desfasar las señales es el siguiente:

```

%%Las señales que recibimos en cada antena
%%Antena 1 Ubicamos la DP
n1=round(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
aa1=zeros(1,(n1));
aaa1=zeros(1,(n-n1-length(a1)));
S1=[aa1,a1',aaa1];
%%Antena 2 Ubicamos la DP
n2=round(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
aa2=zeros(1,n2);
aaa2=zeros(1,(n-n2-length(a1)));
S2=[aa2,a1',aaa2];
%%Antena 3 Ubicamos la DP
n3=round(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
aa3=zeros(1,n3);
aaa3=zeros(1,(n-n3-length(a1)));
S3=[aa3,a1',aaa3];
%%Antena 4 Ubicamos la DP
n4=round(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
aa4=zeros(1,n4);
aaa4=zeros(1,(n-n4-length(a1)));
S4=[aa4,a1',aaa4];

```

Cuando cargamos las descargas parciales del fichero señales, se obtiene cuatro señales a_1 , a_2 , a_3 y a_4 . Estas señales están formadas por vectores de 5000 muestras. Solo utilizaremos la descarga parcial a_1 . Lo que se hace con esta señal es colocar ceros delante (vector aa_i) y detrás (vector aaa_i) de ella hasta alcanzar un tamaño de 6000 muestras. Los vectores aa_i y aaa_i tendrán un tamaño diferente para cada señal S_1 , S_2 , S_3 y S_4 para generar las señales que captarían las antenas. El resultado de esta operación se muestra en la Figura 27.

En la Figura 28 se muestra la correlación cruzada obtenida para las señales de la Figura 27. La Figura 28 muestra los vectores *Output1* para la correlación entre S1-S2, S1-S3 y S1-S4 respectivamente. En la Tabla 5 se muestra la comparativa de los desfases calculados manualmente en la Figura 27 y los desfases calculados por el algoritmo Figura 28. Los resultados son excelentes puesto que se obtienen los mismos valores en los dos casos, teóricamente y mediante el algoritmo.

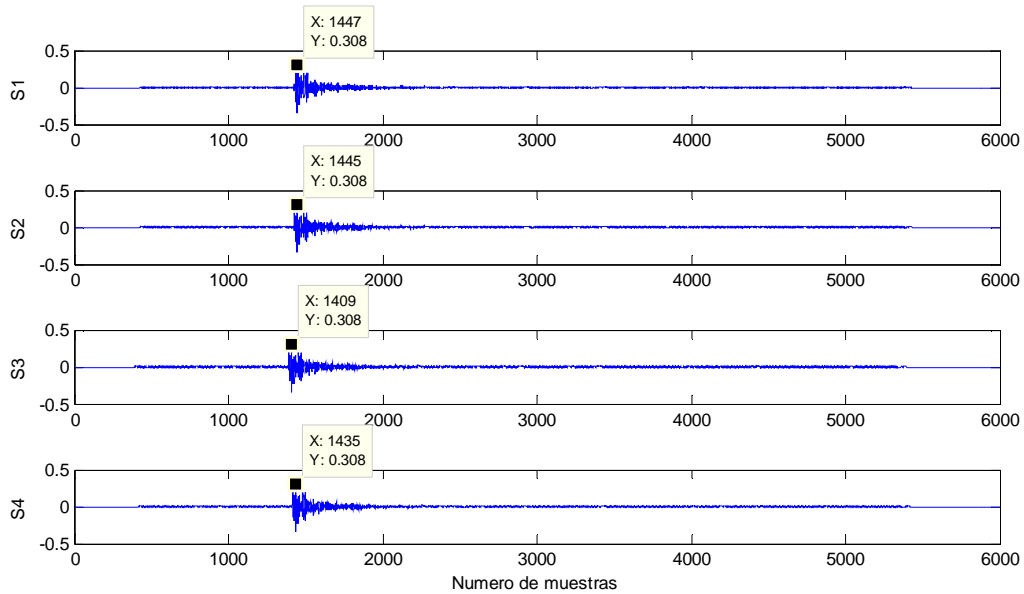


Figura 27. Señales reales en ejemplo cálculo correlación

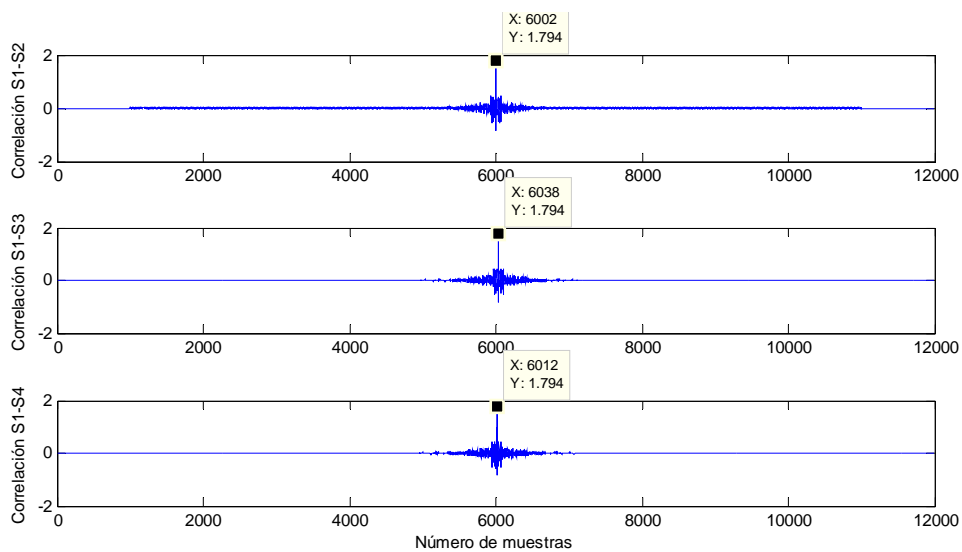


Figura 28. Resultado correlación para señales reales

	Desfase S1-S2	Desfase S1-S3	Desfase S1-S4
Desfase Manual	$R_{12} = 1447 - 1445 = 2$	$R_{13} = 1447 - 1409 = 38$	$R_{14} = 1447 - 1435 = 12$
Desfase Algoritmo	$R_{12} = b_{12}(mp_{12}) = 2$	$R_{13} = b_{13}(mp_{13}) = 38$	$R_{14} = (mp_{14}) = 12$

Tabla 5. Comparativa desfase entre señales reales calculado manualmente y con el algoritmo.

5.6.2 Localización con señales reales.

Las cuatro descargas parciales que hay almacenadas en el fichero señales son distintas, como se muestra en la Figura 29. Se puede comprobar que la traza de las DP's no se solapa, esto es un signo de que no se utiliza la misma señal para las cuatro antenas, se utiliza señales distintas de la misma DP.

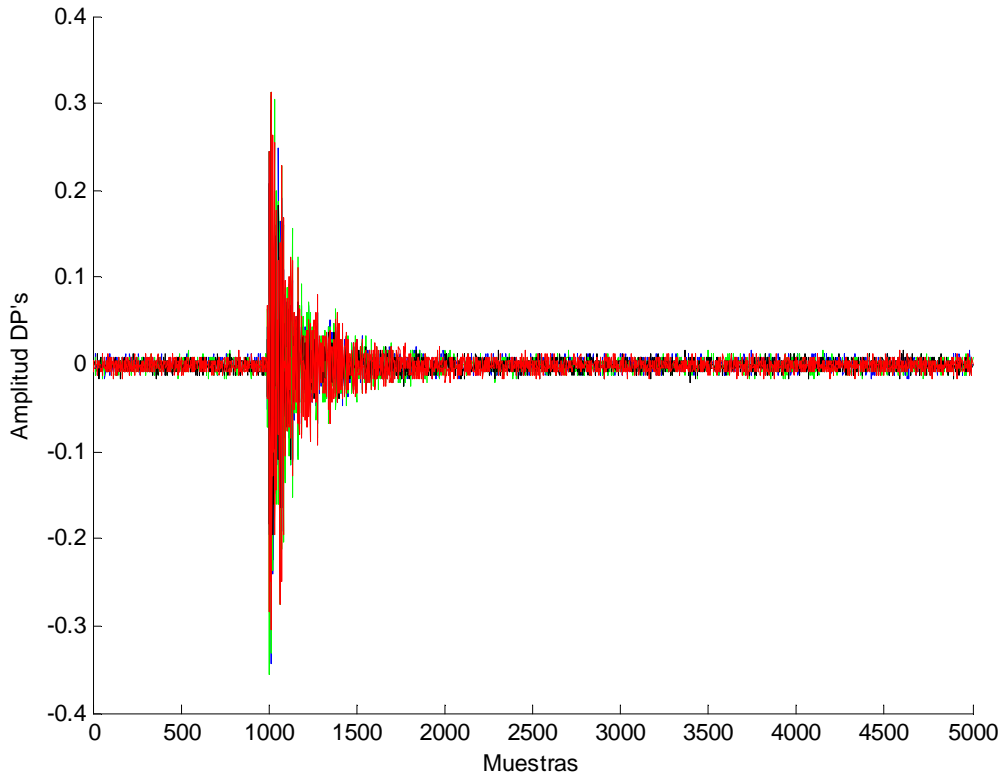


Figura 29. DP reales sin desfazar no tienen distinta forma

A continuación se desfazan las señales un valor conocido Figura 30. Después se calculará el tiempo de desfase que existe entre ellas, en función de la correlación de las señales. Para desfazar las señales se crea un vector lleno de ceros de un tamaño determinado y se une al vector a_i cargado del fichero señales. Código en Matlab:

```
clc
n=10000;%numero de muestras
Ts=10^-9;%Tiempo por muestra segundos
c=3*10^8;%velocidad de la luz m/s
loadseñales
%-----
aa1=zeros(1,200);
a1;
S1=[aa1,a1'];
%-----
aa2=zeros(1,300);
a2;
S2=[aa2,a2'];
%-----
aa3=zeros(1,400);
a3;
S3=[aa3,a3'];
```

```

%-----
aa4=zeros(1,500);
a4;
S4=[aa4,a4'];
%-----Correlación cruzada-----
[a12,b12]=xcorr(S1,S2);
[mv12,mp12]=max(a12);
T12=(b12(mp12))*Ts

[a13,b13]=xcorr(S1,S3);
[mv13,mp13]=max(a13);
T13=(b13(mp13))*Ts

[a14,b14]=xcorr(S1,S4);
[mv14,mp14]=max(a14);
T14=(b14(mp14))*Ts
%-----Dibujarlas-----
holdon
plot(S1,'b')
plot(S2,'r')
plot(S3,'y')
plot(S4,'g')

```

Los resultados obtenidos se muestran en Tabla 6, estos resultados son buenos. Al calcular el desfase entre las señales de las antenas 1 y 4 se detecta un pequeño error del 1% error, es un error asumible.

	T_{12}	T_{13}	T_{14}
Valor teórico	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$-3 \cdot 10^{-7}$
Valor real	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$-3.03 \cdot 10^{-7}$

Tabla 6. Comparativa tiempo real Vs teórico para DP reales.

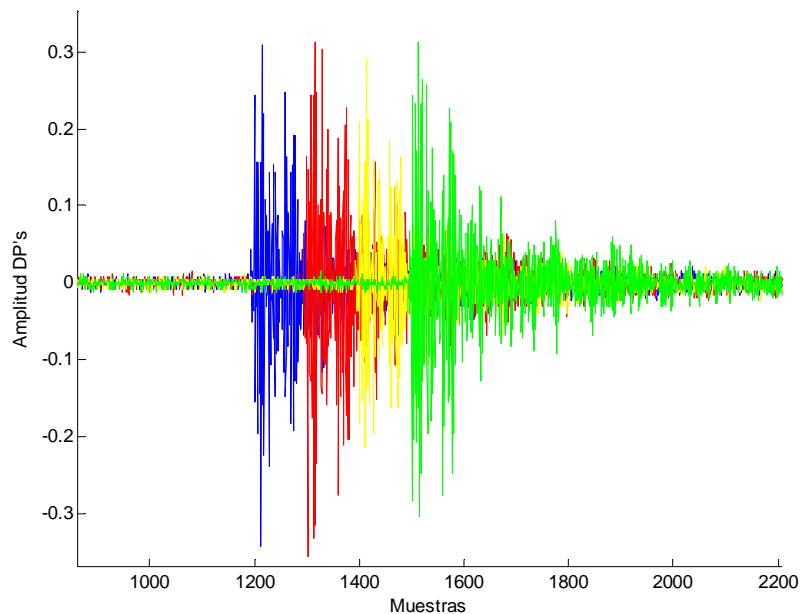


Figura 30. DP reales desfasadas un valor concreto.

Tras comprobar que se puede calcular el desfase entre las DP's reales obteniendo buenos resultados. Se da otro paso que consiste en colocar estas señales de DP en una configuración de antenas real. Se desfazará las DP's una magnitud real calculada a partir de la posición de las antenas y la posición teórica de la fuente de DP. Para realizar este apartado se ejecuta el siguiente código en Matlab:

```

clc
clearall
closeall
n=10000;%numero de muestras
Ts=4*10^-11;%Tiempo por muestra segundos
c=3*10^8;%velocidad de la luz m/s
loadsenales

%%Posicion real de la antena, la pongo para poder saber
dondeesta el pulso
%-----
Xso=10; Yso=7; Zso=8;
%-----
%%Definimos la posición de las antenas
d=3;
%Antena 1
X1=d;Y1=d;Z1=0; % Valores aleatorios
%%Antena 2
X2=d;Y2=-d;Z2=0; % Valores aleatorios
%%Antena 3
X3=-d;Y3=0;Z3=0; % Valores aleatorios
%%Antena 4
X4=-d;Y4=-d;Z4=d; % Valores aleatorios
%%-----Localización de las antenas-----
%%Las señales que recibimos en cada antena
%%Antena 1 Ubicamos la DP
n1=round(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
nn1=(sqrt((Xso-X1)^2+(Yso-Y1)^2+(Zso-Z1)^2)/(c*Ts));
aa1=zeros(1,n1);
S1=[aa1,a1'];
%%Antena 2 Ubicamos la DP
n2=round(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
nn2=(sqrt((Xso-X2)^2+(Yso-Y2)^2+(Zso-Z2)^2)/(c*Ts));
aa2=zeros(1,n2);
S2=[aa2,a2'];
%%Antena 3 Ubicamos la DP
n3=round(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
nn3=(sqrt((Xso-X3)^2+(Yso-Y3)^2+(Zso-Z3)^2)/(c*Ts));
aa3=zeros(1,n3);
S3=[aa3,a3'];
%%Antena 4 Ubicamos la DP
n4=round(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
nn4=(sqrt((Xso-X4)^2+(Yso-Y4)^2+(Zso-Z4)^2)/(c*Ts));
aa4=zeros(1,n4);
S4=[aa4,a4'];
%%-----Correlación cruzada-----
[a12,b12]=xcorr(S1,S2);
[mv12,mp12]=max(a12);
T12=(b12(mp12))*Ts;
N12=b12(mp12);

[a13,b13]=xcorr(S1,S3);
[mv13,mp13]=max(a13);
T13=(b13(mp13))*Ts;

```

```

N13=b13(mp13);

[a14,b14]=xcorr(S1,S4);
[mv14,mp14]=max(a14);
T14=(b14(mp14))*Ts;
N14=b14(mp14);
%-----Punto inicio algoritmo
Xs=X1*0.001+0.001;
Ys=Y1*0.001+0.001;
Zs=Z1*0.001+0.001;

dd=1;
i=2;
while dd==1
G1=sqrt((Xs-X1)^2+(Ys-Y1)^2+(Zs-Z1)^2);
G2=sqrt((Xs-X2)^2+(Ys-Y2)^2+(Zs-Z2)^2);
G3=sqrt((Xs-X3)^2+(Ys-Y3)^2+(Zs-Z3)^2);
G4=sqrt((Xs-X4)^2+(Ys-Y4)^2+(Zs-Z4)^2);

F=[(G1-G2-(c*T12)),(G1-G3-(c*T13)),(G1-G4-(c*T14))]' ;
%Se calcula la matriz jacobiana
J(1,1)=(Xs-X1)/G1-((Xs-X2)/G2);
J(1,2)=(Ys-Y1)/G1-((Ys-Y2)/G2);
J(1,3)=(Zs-Z1)/G1-((Zs-Z2)/G2);
J(2,1)=(Xs-X1)/G1-((Xs-X3)/G3);
J(2,2)=(Ys-Y1)/G1-((Ys-Y3)/G3);
J(2,3)=(Zs-Z1)/G1-((Zs-Z3)/G3);
J(3,1)=(Xs-X1)/G1-((Xs-X4)/G4);
J(3,2)=(Ys-Y1)/G1-((Ys-Y4)/G4);
J(3,3)=(Zs-Z1)/G1-((Zs-Z4)/G4);

%Calculamos los incrementos de variación de la posición de la
fuente

A=(J\F);

Xs=Xs-A(1,1);
Ys=Ys-A(2,1);
Zs=Zs-A(3,1);

er=sqrt((F(1,1))^2+(F(2,1))^2+(F(3,1))^2);
d(i)=er;
d(1)=d(2)*2;
if d(i)<d(i-1)
dd=1;
else
dd=0;
end
%Para dibujar la progresión de las coordenadas de la fuente de
DP's
Xs1(i)=Xs;
Ys1(i)=Ys;
Zs1(i)=Zs;

er=sqrt((F(1,1))^2+(F(2,1))^2+(F(3,1))^2);
d(i)=er;
i=i+1;
end

disp('Posicion de la fuente de descargas parciales Xs,Ys,Zs')

```

```

[Xs,Ys,Zs]'
%-----
holdon
view(45,45)
plot3(X1,Y1,Z1,'bo','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(X2,Y2,Z2,'go','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(X3,Y3,Z3,'mo','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(X4,Y4,Z4,'ro','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(Xso,Yso,Zso,'ko','MarkerSize',6,'LineWidth',2)
plot3(Xs,Ys,Zs,'k*','MarkerSize',5,'LineWidth',5)
gridon

```

La posición teórica de la fuente de DP es $x_{so} = 10$; $y_{so} = 7$; $z_{so} = 8$ el resultado obtenido es $x_{so} = 9,903$; $y_{so} = 6,927$; $z_{so} = 7,908$ Figura 31. El error es del 1% luego la exactitud es excelente. En una distancia entre las antenas y la fuente de DP entorno a los 14.59 m se comete un error de 15cm.

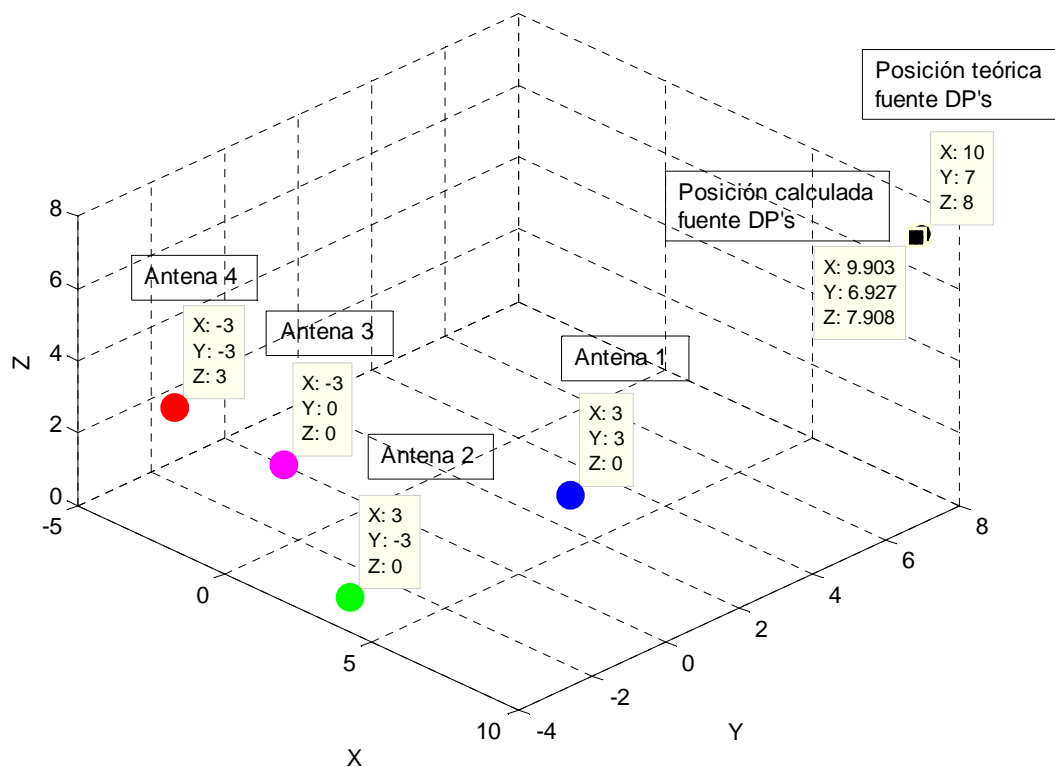


Figura 31. Posición de las antenas, posición de la fuente de DP'teórica y calculada.

6 Error en la localización.

6.1 Error teórico.

Existen varios tipos de errores que se pueden cometer en el proceso de cálculo de la posición de la fuente de DP's [10].

6.1.1 Error en los datos de entrada.

En el caso de la simulación, los datos de entrada se introducen directamente en el algoritmo por tanto no se producen errores en los datos de entrada. Cuando se realizan medidas reales en el laboratorio si se cometen errores en los datos de entrada.

- Cuando se realizan medidas reales en el laboratorio, se introducen errores sistemáticos y aleatorios. Estos errores se producen en cada una de las coordenadas de cada antena utilizadas para la localización de la fuente de DP's. Este error vendrá determinado por la precisión de la cinta métrica (sistemático) utilizada para ubicar las antenas y la precisión de la persona que coloque la antena (aleatorio).
- Para el caso de la simulación en Matlab, el error cometido al discretizar la señal, no se considera como error en los datos de entrada. Se considerará un error de redondeo de los datos porque este dato se genera dentro del algoritmo como se explica en el apartado Creación de las señales de las antenas.

Cuando se tomen medidas reales y los tiempos de llegada se obtengan del osciloscopio, se considerará que el error por discretizar es un error de los datos de entrada.

- Las DP's recibidas en las distintas antenas, tienen distinta forma de onda. Esta diferencia no es muy grande pero sí lo suficiente para introducir un nuevo error al método. Este error se debe a las diferentes distancias entre las antenas y la fuente de DP's. Las DP's se propagan omnidireccionalmente, esto implica que hay reflexión y por tanto existe multipropagación de la emisión. Las trayectorias de DP's captadas que no son la señal directa, deforman la señal recibida en la antena. El artículo [8] sostiene que el frente de subida de las DP's no se ve afectado por la multipropagación, el resto de la onda sí. En la Figura 32 se muestran los efectos de la multipropagación como oscilaciones y cómo en el primer frente de onda no hay multipropagación. Para evitar este error, a la hora de calcular la correlación entre antenas, se debe coger única y exclusivamente el primer frente de la descarga parcial.

El ruido de fondo es un error en los datos de entrada. Si la DP es lo suficiente potente no será un problema. Cuando la descarga parcial es muy débil puede enmascarar las DP's impidiendo su correcta detección

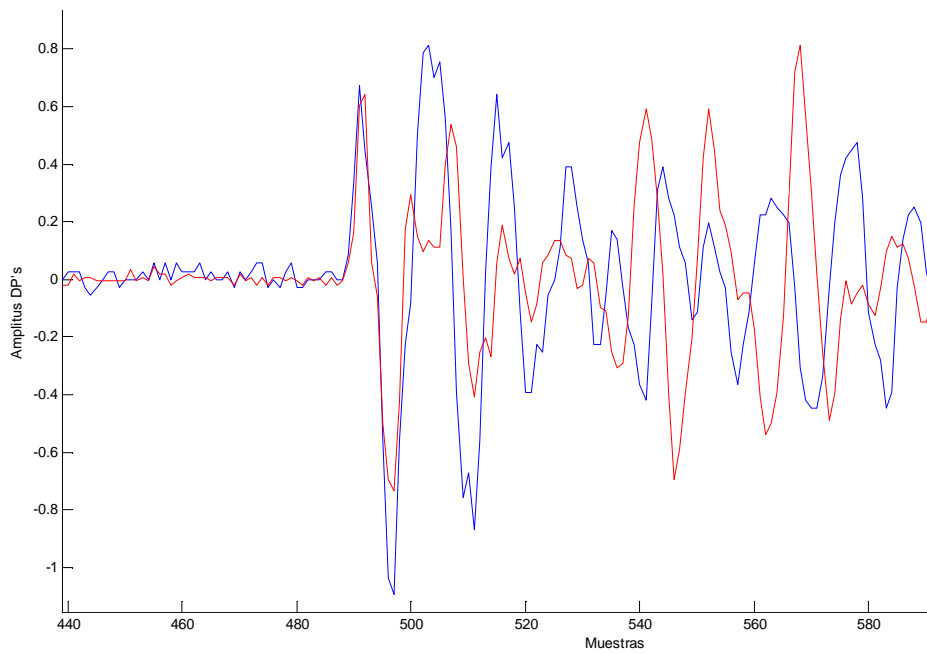


Figura 32. Efectos de la multipropagación.

6.1.2 Error de redondeo de los datos y el cálculo.

En este apartado se tratan los errores producidos al redondear los datos en Matlab y al operar con ellos.

- Al discretizar la señal que captan las antenas, se generan errores de este tipo.

Para la simulación en Matlab el algoritmo necesita establecer la posición de las antenas. También requiere la posición de la fuente de DP's. A partir de estos puntos se calcula el tiempo que tarda en llegar el pulso de la DP desde la fuente hasta las antenas. El pulso que reciben las antenas, cuando se trabaja en Matlab, es un vector. Este vector se compone de n muestras y el pulso se ubicará en una de ellas. Cada muestra equivale al producto entre la velocidad de la luz y el tiempo por muestra t_s .

$$\text{distancia por muestra} = c \cdot t_s [m] \quad (44)$$

Por ejemplo, para una frecuencia de muestreo $f = 2,5\text{GHz}$, el tiempo por muestra $t_s = \frac{1}{f} = 4 \cdot 10^{-9} s$

Por tanto la distancia de cada muestra queda $\text{distancia por muestra} = 3 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^{-9} = 0,12 m$

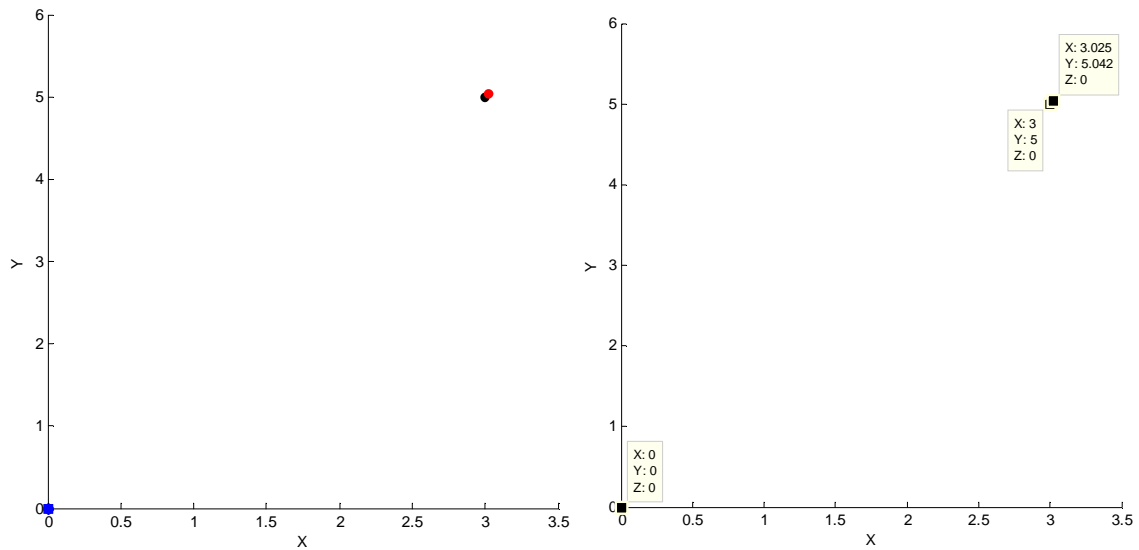


Figura 33. Corrección de la posición de la fuente de DP por discretización.

Si tenemos una antena en la posición $(0, 0, 0)$ representada en azul en la Figura 33 y la fuente de descargas parciales está en la posición $(3, 5, 0)$ representada en negro en la Figura 33. La distancia entre estos dos puntos es 5,831 m pero el algoritmo al discretizar redondeará al múltiplo de 0,12 más cercano. El algoritmo determinará que la distancia entre la fuente y la antena es de 5,880 metros, 49 muestras. La nueva posición que establecería el algoritmo para fijar una distancia de 5,880 m entre la fuente y la antena es $(3,025, 5,042, 0)$ representada en rojo en la Figura 33.

La distancia se establece en un número entero de muestras, en este caso 49. La distancia por muestra se puede controlar en función del tiempo por muestra. Este parámetro viene determinado por las características de los dispositivos de adquisición, se puede regular en función de las necesidades, dentro de los límites de los dispositivos. En la simulación se han utilizado valores fieles a la realidad. Bajar los tiempos por muestra por debajo de los nanosegundos permite encontrar la solución con mayor exactitud. Esto se debe a que el error por redondeo de los datos y de cálculo se puede reducir en varias unidades de magnitud.

- Al calcular la correlación entre las antenas, se pueden cometer dos tipos de error de cálculo.
 - 1º- Al calcular el desfase entre dos señales de las antenas, se puede dar el caso que exista más correlación en la cola del pulso que en el frente de onda. Esto se debe al acople de ruido de fondo y de la multipropagación a la señal principal. En la Figura 34 se muestran las señales de las cuatro antenas con las que se obtuvo mala correlación. En la señal de la antena cuatro, prácticamente no se aprecia la descarga parcial, siendo prácticamente toda la señal ruido. La correlación cruzada obtenida para estas señales es la que se muestra en la Figura 35. En esta figura se puede apreciar que no se obtienen buenos resultados en los desfases. La correlación cruzada es muy difuminada, no se identifica claramente un valor máximo de correlación para establecer el

desfase entre señales. En la Tabla 7 se indica el desfase real y el calculado (la unidad de magnitud son muestras).

Para evitar este error, se utiliza la misma herramienta que la que se utiliza para eliminar la multipropagación. Se establece un disparo que permite determinar el comienzo de la DP y a partir de este valor se extrae el primer frente de onda (esta operación se muestra en la Figura 36 y Figura 37). Calcular el desfase entre dos señales, a partir de las señales recortadas permite obtener mejores resultados.

Esta operación aplicada a las señales mencionadas permite calcular desfases entre señales mucho más cercanos a la realidad. En la Tabla 8 se indica el desfase real y el calculado (la unidad de magnitud son muestras) para señales recortadas dejando únicamente el frente de onda.

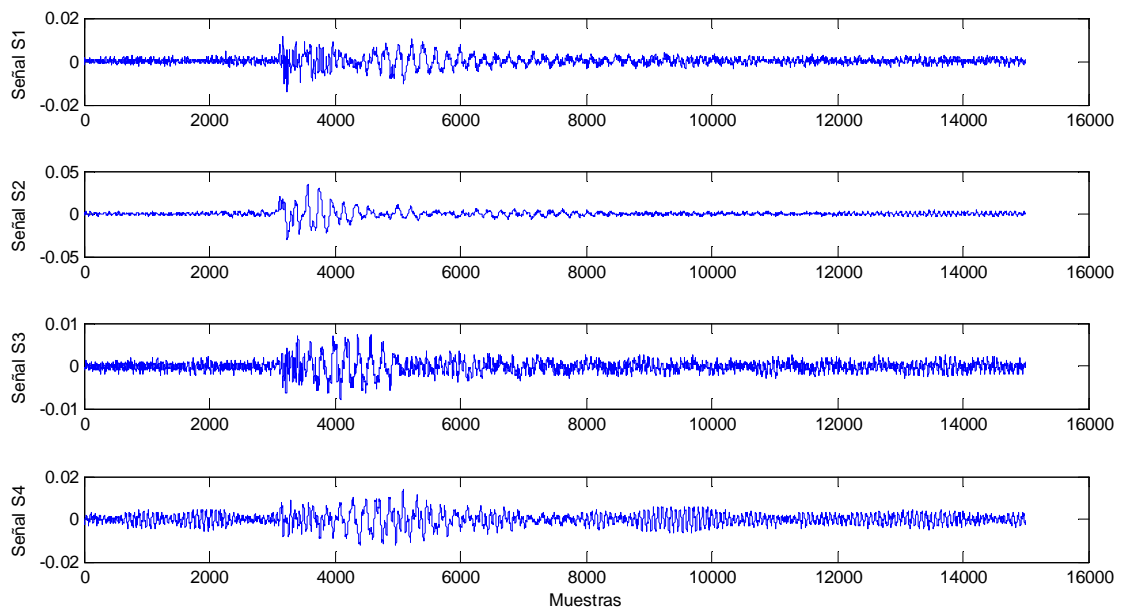


Figura 34. Señales de las cuatro antenas con las que se obtuvo mala correlación.

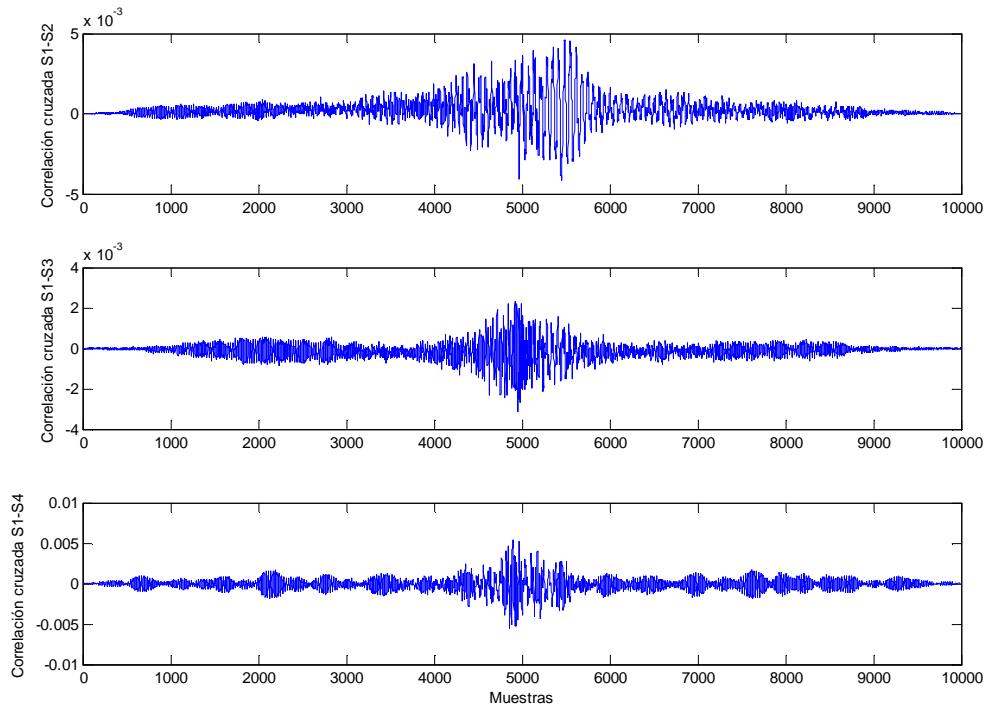


Figura 35. Correlación cruzada para las señales de la Figura 34.

	Xs	Ys	Zs
Desfase Calculado	484.00	-81.000	-106.00
Desfase Real	2.8296	-9.4006	-5.1045

Tabla 7. Comparativa desfases real y calculado para señales de baja calidad.

	Xs	Ys	Zs
Desfase Calculado	1.0000	-11.000	-8.0000
Desfase Real	2.8296	-9.4006	-5.1045

Tabla 8. Comparativa desfases real y calculado para señales de baja calidad recortadas.

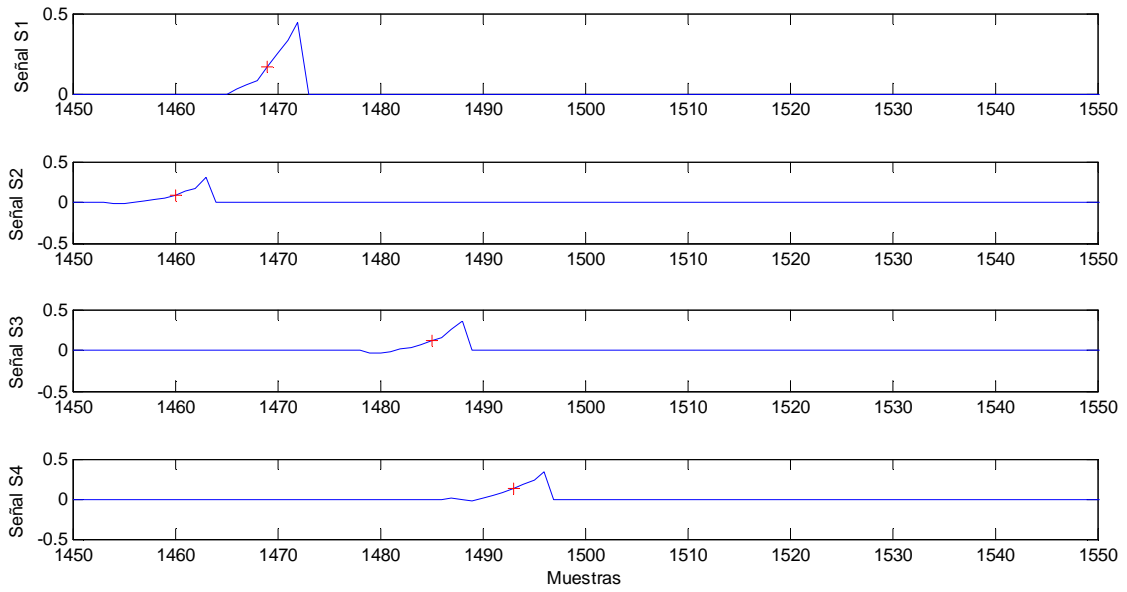


Figura 36. Ubicación del disparo en las 4 señales de las distintas antenas

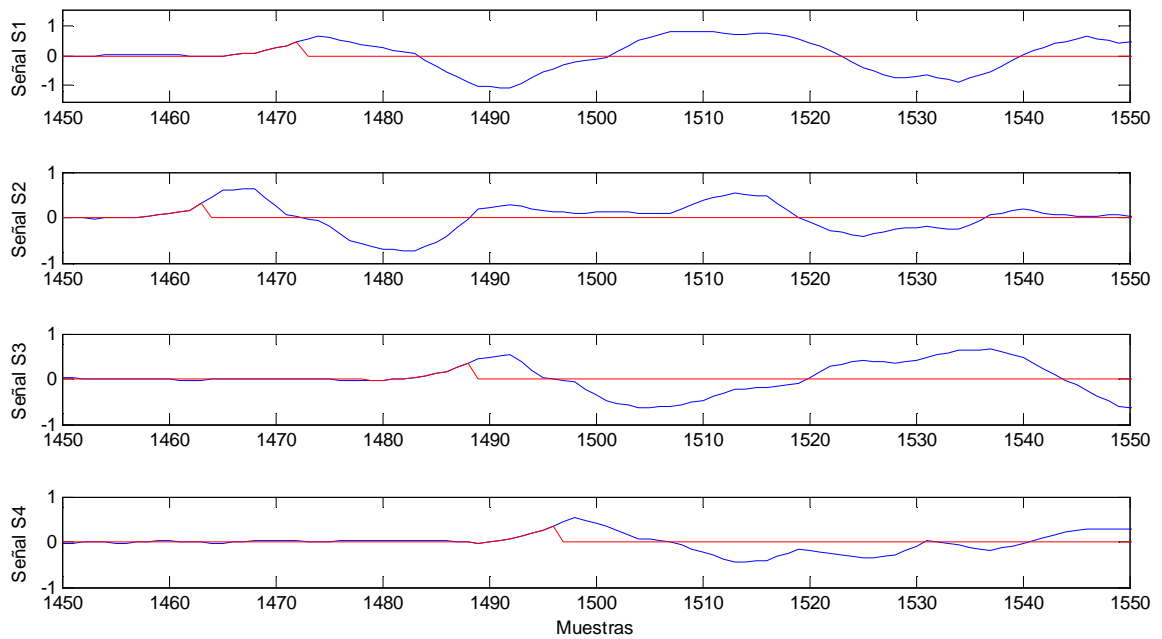


Figura 37. Primer frente de onda de las DP's (Rojo). DP completa (Azul)

2º- La correlación cruzada no es una línea continua con infinitos puntos de correlación, es una línea discreta que adopta valores en ciertas posiciones omitiendo valores intermedios. El valor de desfase calculado puede estar muy cerca del deseado pero puede no ser exactamente el deseado. En la Figura 38 se muestra la correlación cruzada (líneas azules) y las áreas donde se pueden encontrar puntos no calculados de máxima correlación (elipses negras).

Para mitigar este error se utilizará la función *interp1*. Esta función permite calcular los puntos desconocidos que se pierden cuando se discretiza la señal. No estima el valor que podrían tener los puntos siguiendo la forma original de la onda, simplemente traza una línea recta entre dos puntos consecutivos conocidos y evalúa la recta que los une en los puntos definidos en la función.

El código en Matlab para interpolar la señal de la antena 1 es el siguiente:

```
l=length(S1);  
x = 1:l;  
y = S1;  
xi1 = 0:(1/int):l;  
yi1 = interp1(x,y,xi1);  
S1=yi1;
```

Lo primero es averiguar el tamaño (l) del vector que almacena los valores de la señal que queremos interpolar (En este caso S1). Después se genera un vector (x) que de tamaño (l) que avance progresivamente de uno en uno empezando en uno y acabando en l. Este vector servirá para referenciar la posición donde se producen los valores del vector S1. A continuación se renombra el vector S1, llamándole y. Posteriormente se genera un vector x_{i1} de tamaño (l · int) este vector servirá para referenciar la posición donde se producen los valores calculados del nuevo vector. Int es la constante que define el número de puntos que se quieren estimar dentro de los puntos consecutivos calculados, esta constante es común a las cuatro señales interpoladas S1, S2, S3, S4.

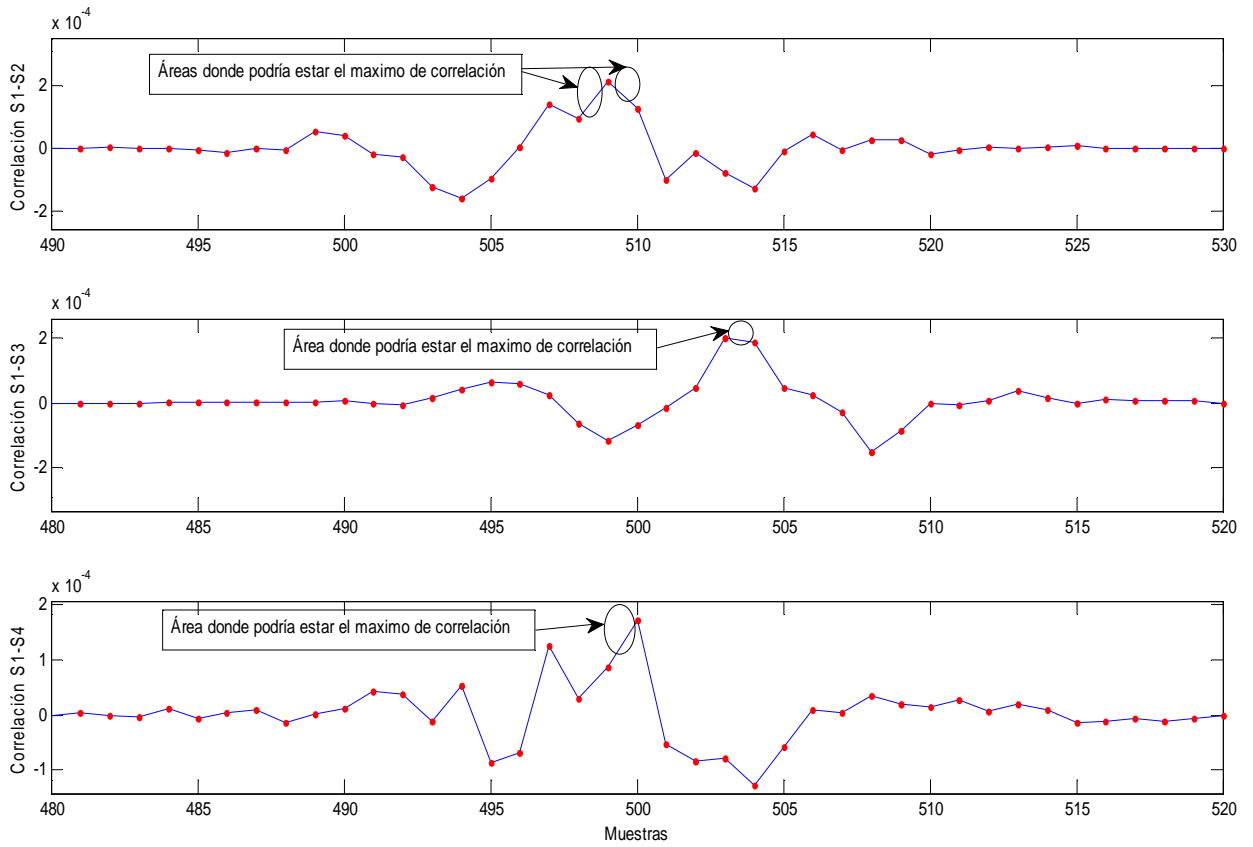


Figura 38. Correlación cruzada sobremuestreada.

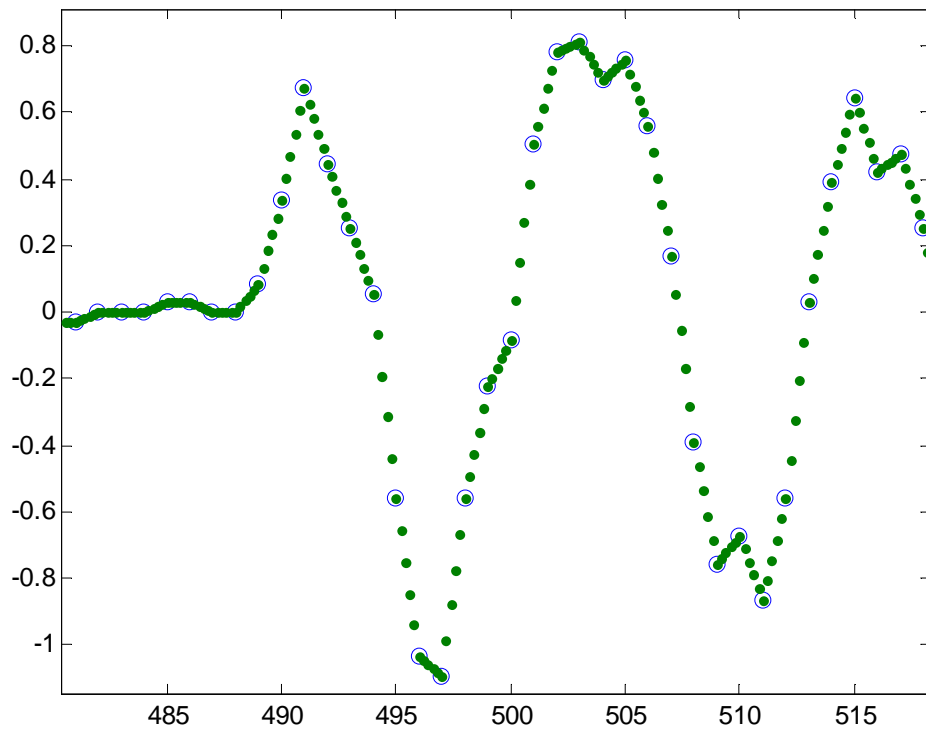


Figura 39. Señal de la antena 1 interpolada con $int = 5$.

En el siguiente paso se genera el vector interpolado $y_{i1} = \text{interp1}(x, y, x_{i1})$ de tamaño $(l \cdot \text{int})$. La Figura 39 muestra el resultado y_{i1} de interpolar la señal S1 de la antena 1 mediante la función *interp1*, con un valor de *int* = 5.

Realizar esta interpolación nos permite mejorar dos aspectos del cálculo. En primer lugar se mejora la detección del inicio de la descarga parcial. Se obtendrá una precisión tantas veces mayor como se especifique mediante la variable *int*. Cabe destacar que se obtiene mayor precisión si el valor de disparo es un valor aceptable. Si el valor de disparo está en la zona de ruido la detección del inicio de la DP será erróneo y no tendrá sentido hablar de precisión (la mejora de la detección del disparo se estudia en el apartado siguiente). En segundo lugar, la interpolación nos permite calcular de manera más continua la correlación entre dos señales. De esta manera, se puede obtener el valor de máxima correlación de manera más certera porque la función de correlación cruzada es más continua, se evitan las áreas sin datos que se muestran en la Figura 38 en forma de elipses negras. Ejecutando el algoritmo en las mismas condiciones que para la Figura 38 pero con un valor de interpolación *int* = 10 se obtiene el resultado de la Figura 40.

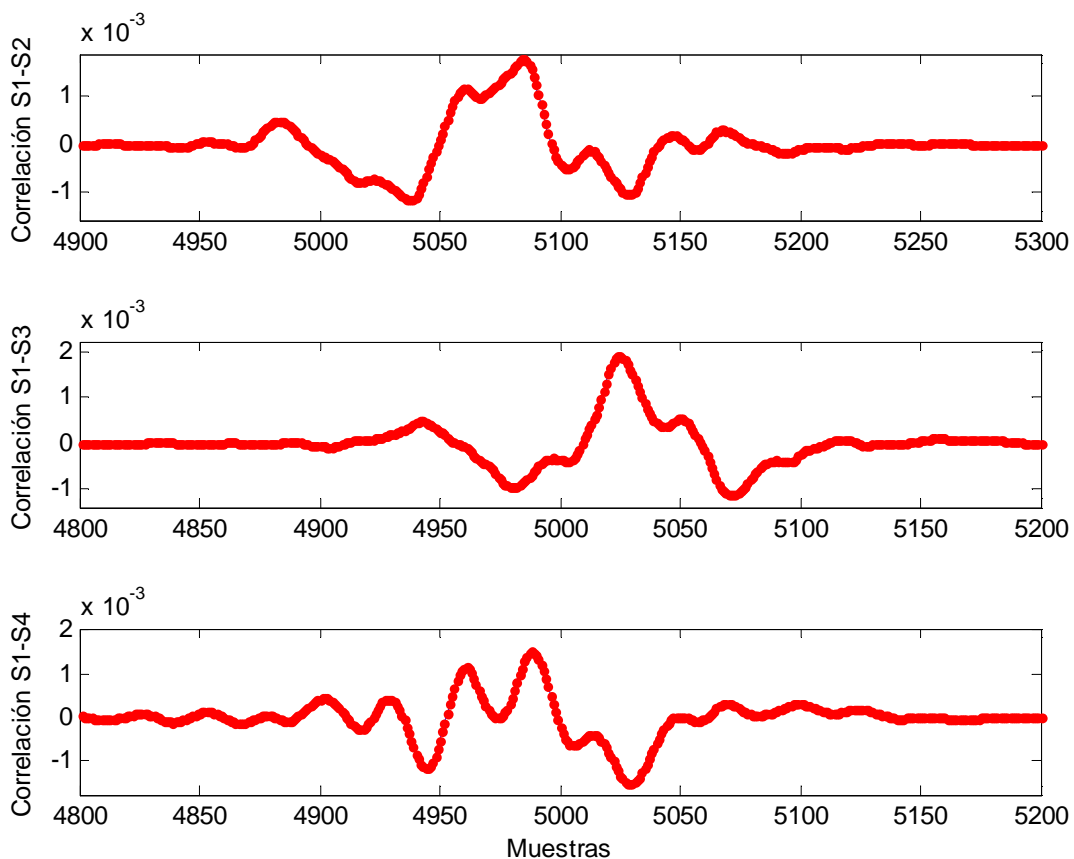


Figura 40. Correlación cruzada bien muestreada.

- El disparo es otro parámetro que puede introducir un error de cálculo en el algoritmo. Este parámetro determina el valor por encima del cual el algoritmo considera que ha producido la DP. Si este parámetro es muy pequeño, puede identificar ruido de fondo como si fuera una DP. Si este valor es muy elevado puede que nunca detecte descargas parciales o que detecte un frente de onda distinto al primero, incurriendo en un error debido a la multipropagación.

El disparo debe adoptar un valor aceptable que permita adquirir DP's de manera correcta como se muestra en la Figura 36. Mediante un bucle `while` a partir del disparo (Cruz roja en la Figura 36) se consigue extraer de la señal original el primer frente de onda (Señal azul en la Figura 36). La Figura 37 muestra el primer frente de onda de las DP's (En rojo) utilizado para realizar los cálculos de correlación entre señales.

- Otro error se produce al coger únicamente los dos primeros términos del polinomio Taylor.

$$f(x) = f(x_n) + \frac{f'(x_n)}{1!} \cdot (x - x_n) \quad (45)$$

El polinomio de Taylor que sirve para evaluar una función derivable entorno a un punto conocido a partir de sus derivadas.

$$f(x) = f(x_n) + \frac{f'(x_n)}{1!} \cdot (x - x_n) + \frac{f^{(2)}(x_n)}{2!} \cdot (x - x_n)^2 + \dots \quad (46)$$

Para simplificar los cálculos y reducir los tiempos de ejecución, se optó por coger únicamente los dos primeros términos de la serie de Taylor. Se genera un error por truncamiento asociado a los términos generados a partir de la derivada segunda.

$$error_{Taylor} = \frac{f^{(2)}(x_n)}{2!} \cdot (x - x_n)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_n)}{n!} \cdot (x - x_n)^n \quad (47)$$

6.1.3 Error de truncamiento del método.

El bucle que ejecuta el programa para calcular la posición de la fuente de DP's, permite acercarse a la solución exacta en cada iteración. Este bucle se podría ejecutar indefinidamente, obteniendo nuevos decimales de la solución. Por motivos de tiempo, se establece que el bucle deje de ejecutarse cuando la suma cuadrática de los elementos del vector F , alcanza un valor igual o mayor que en la iteración anterior.

Cuando el bucle finaliza su ejecución porque cumple la condición de parada, se comete un error en el método por truncamiento. Este error según lo establecido en el algoritmo será de 0,05mm.

Éste error no tiene tanta importancia como los anteriores. Los anteriores pueden hacer que el método no converja a la solución correcta. El error por truncamiento es un error que afecta al quinto decimal de la solución, es decir, 0,05mm.

6.1.4 Errores de inestabilidad y control.

Los errores de inestabilidad y control se refieren a cómo afecta a la solución final, los errores en los datos de entrada o los errores inducidos en los cálculos.

En relación a la estabilidad del algoritmo se pueden dar tres tipos de soluciones:

- El método converge a la solución correcta. Figura 41
- El método converge a una solución y oscila en torno a ésta. Figura 42.
- El método no converge. Figura 43.

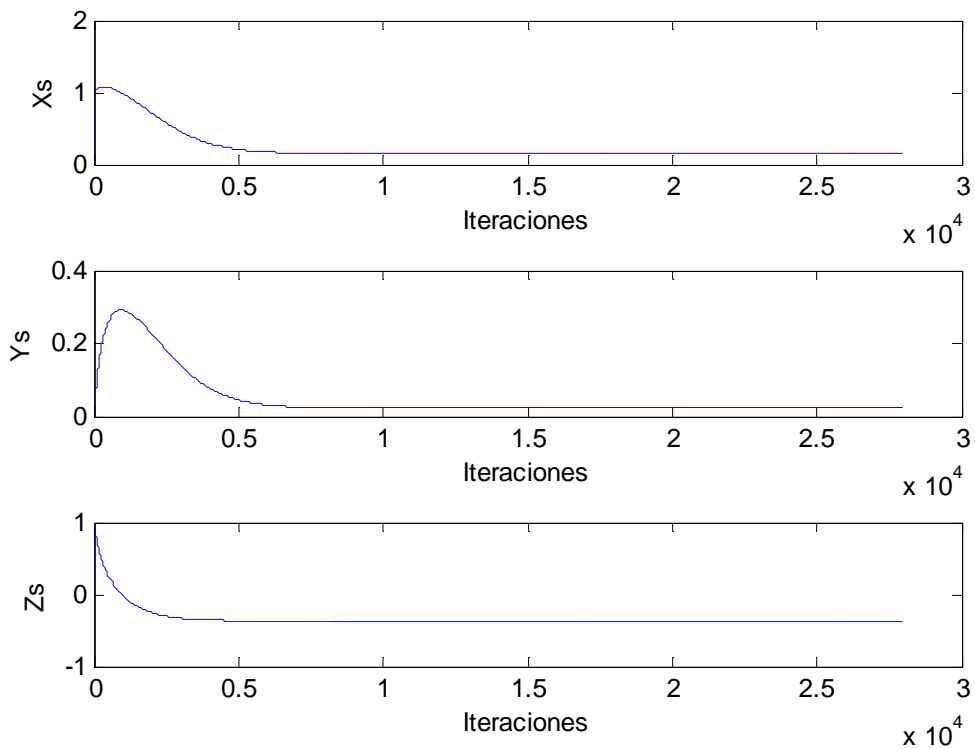


Figura 41. Solución cuando el método converge.

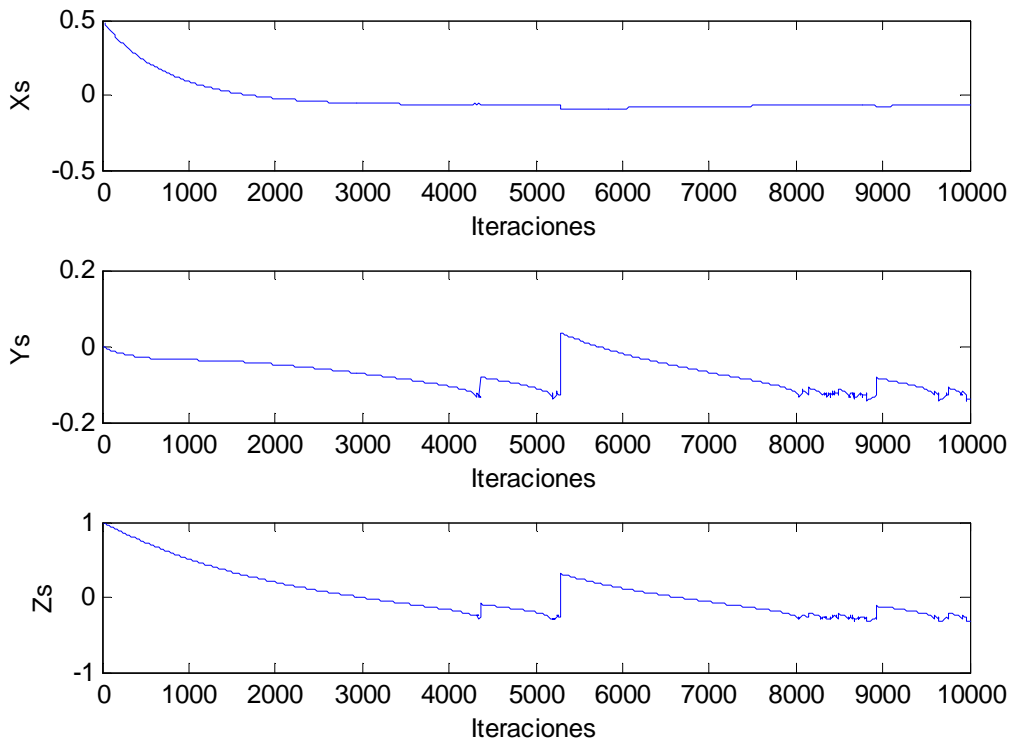


Figura 42. Solución cuando el método converge a una solución y oscila en torno a ésta.

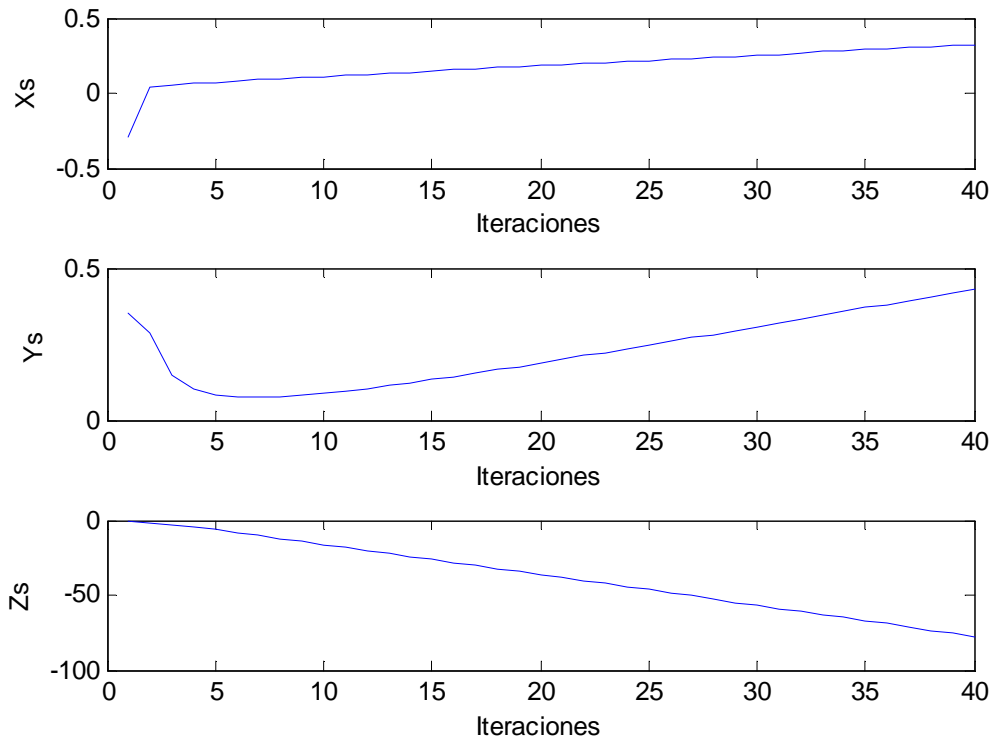


Figura 43. Solución cuando el método no converge

	Función	Error
Suma y diferencia	$q = x \pm y$	$\delta q \approx \delta x + \delta y$
Producto	$q = x \cdot y$	$\frac{\delta q}{ q } \approx \frac{\delta x}{ x } + \frac{\delta y}{y}$
Cociente	$q = \frac{x}{y}$	$\frac{\delta q}{ q } \approx \frac{\delta x}{ x } + \frac{\delta y}{y}$
Producto por una constante	$q = A \cdot x$	$\delta q \approx A \cdot \delta x$
Potencia	$q = x^n$	$\frac{\delta q}{ q } \approx n \cdot \frac{\delta x}{ x }$

Tabla 9. Errores asociados a operaciones básicas

6.2 Propagación de errores.

La propagación de errores estudia la incertidumbre de la solución del algoritmo. Al realizar operaciones con datos que tienen un error asociado, se obtienen resultados con error derivado de los datos anteriores. Para establecer el error de la solución se deben analizar todas las operaciones realizadas en el algoritmo. En cada operación con varias variables el error va incrementado de magnitud. La propagación de errores asociados a las operaciones básicas se muestra en la Tabla 9.

El algoritmo se ejecuta un número j de iteraciones. El éxito del método depende de los datos iniciales. Si los errores son demasiado grandes el método no convergerá y se alejará de la solución deseada en cada iteración. Debido a la propagación de errores, si el método tiene considerables errores de partida al finalizar la iteración el error será mucho mayor. Éste motivo hará que en la siguiente iteración el error sea mucho mayor así hasta que se detenga la ejecución del algoritmo.

Un inconveniente del algoritmo es la evaluación de la derivada de la función. Si la derivada es muy pequeña, el incremento será muy grande y el algoritmo conducirá a una solución no deseada. Un ejemplo del problema descrito se muestra en dos dimensiones en la Figura 44. Podría darse el caso que la derivada calculada fuese más plana, en ese caso, nos alejaríamos más aún de la solución deseada. Por otro lado como se muestra en la Figura 45, puede darse el caso que el algoritmo diverja. Si las pendientes de dos soluciones consecutivas tienen el mismo signo y entre estas dos soluciones se encuentra la solución deseada, el método no convergerá y por tanto no se encontrará la solución deseada.

Para conseguir una convergencia más lenta, se reduce el término corrector que se suma en cada iteración. No se modifica la derivada, simplemente el término corrector se divide entre un factor corrector $\Delta' = \frac{J^{-1} \cdot F(x'_s, y'_s, z'_s)}{\text{factor reductor}}$. De este modo la convergencia es más lenta pero más eficaz Figura 46. Tras reducir el término corrector, se consigue que el ejemplo de la Figura 44 que no convergía a la solución deseada ahora si lo haga Figura 46.

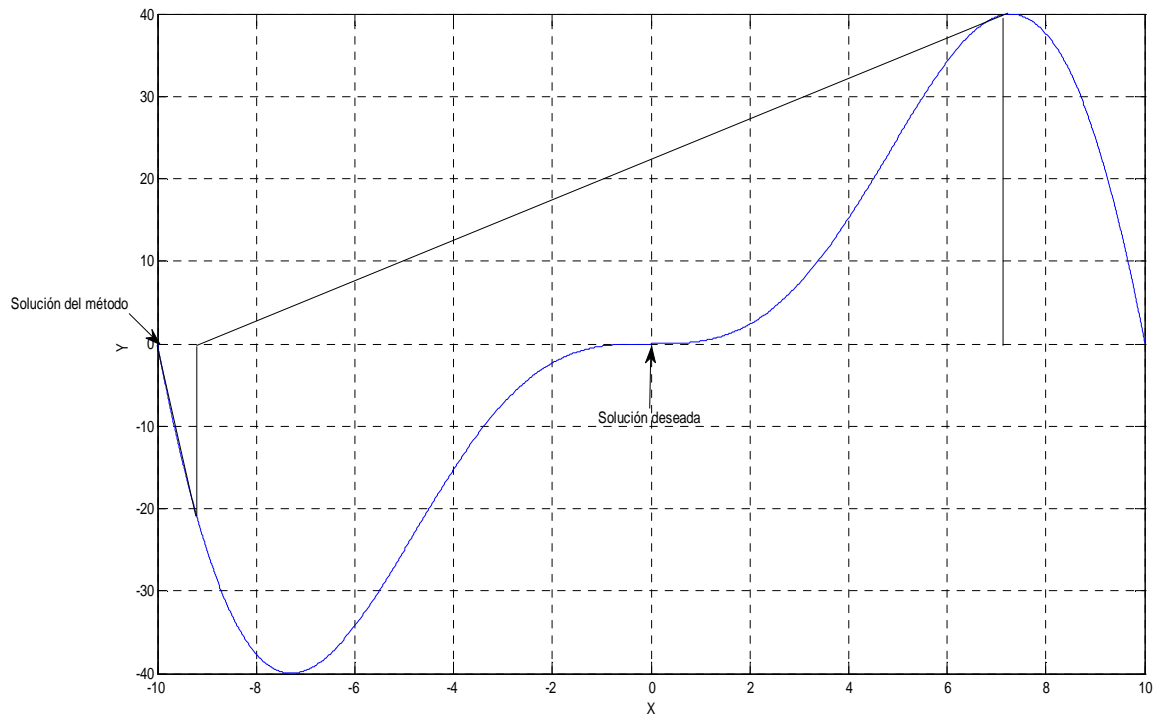


Figura 44. Método de Newton Raphson no convergencia a la solución deseada.

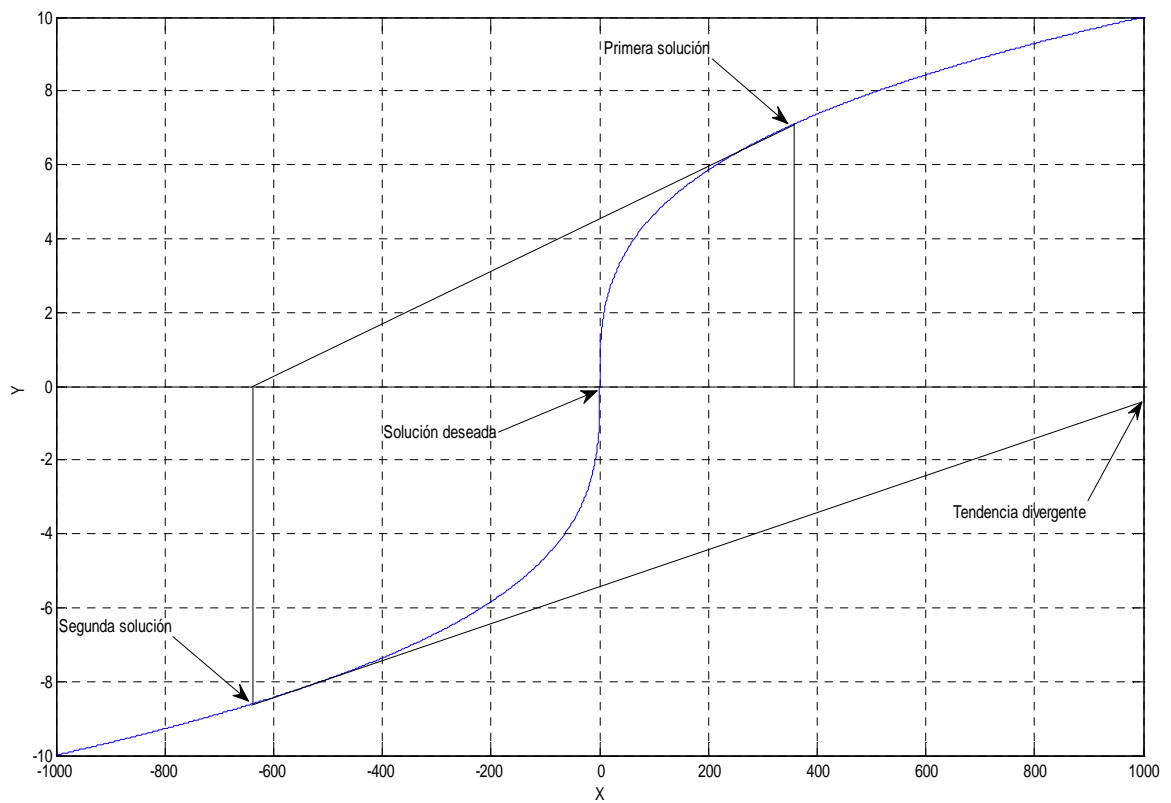


Figura 45. Método Newton Raphson divergente.

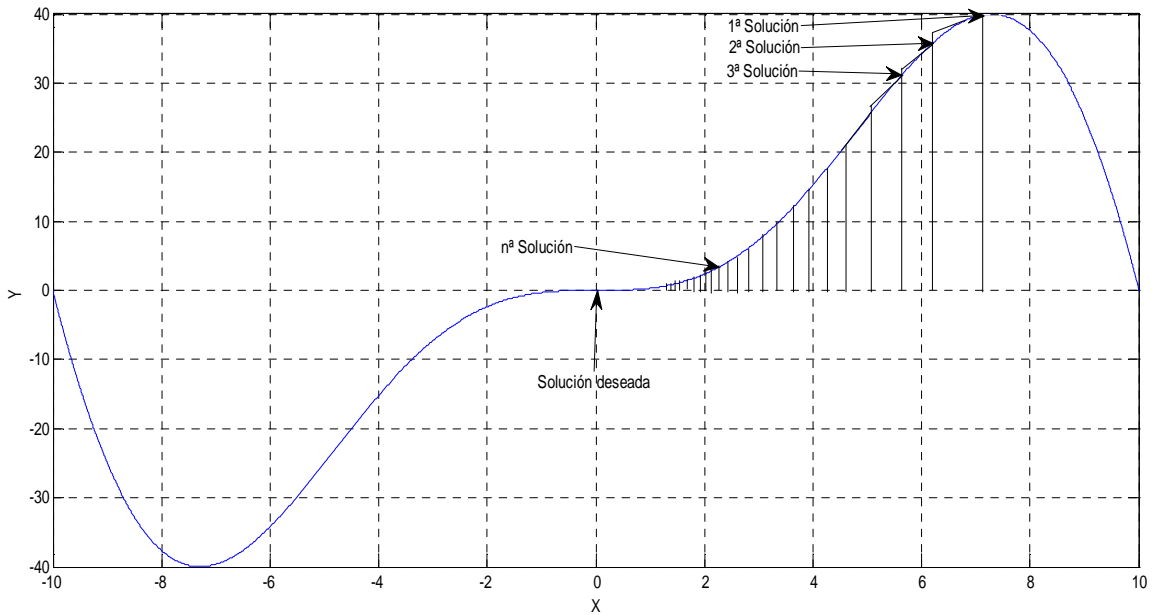


Figura 46. Método Newton Raphson con término corrector minorado.

6.3 Exactitud en la localización.

La exactitud en la localización de la fuente de descargas parciales, depende de la configuración de las 4 antenas y de la distancia entre ellas y la fuente de descargas parciales [8] [9], es muy difícil de estimar. La no linealidad de las ecuaciones, hace muy complicado poder calcular el error cometido mediante propagación de errores.

Durante la realización de este documento, el error principal es el debido a la discretización de la señal analógica como se ha explicado en el apartado 6.1. El redondeo que se hace en el caso más desfavorable la mitad del tiempo por muestra multiplicado por la velocidad de la luz.

$$Error = \frac{t_s \cdot c}{2} \quad (48)$$

En función de la frecuencia de muestreo elegida, se trabajaría con un tiempo por muestra determinado. En la Tabla 10 se muestran los valores que alcanzaría el error en función de t_s .

F	1MHz	10MHz	100MHz	1GHz	2,5GHz	10GHz	100GHz
t_s (s)	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	$4 \cdot 10^{-10}$	10^{-10}	10^{-11}
Error (m)	150	15	1.5	0.15	0.12	0.015	0.0015

Tabla 10. Error en los datos de entrada antes de operar.

En las primeras fases de estudio no se analizó la influencia de la distribución de las antenas. Pronto se observó que la colocación de las antenas tenía influencia sobre el resultado final.

Buscando nuevas líneas de estudio, en los artículos [8] [9], se concluye que la colocación óptima de las antenas es distribuyéndolas de forma tetraédrica. Con esta

distribución el conjunto de antenas se comporta de forma simétrica en todas direcciones. Esta homogeneidad en la localización de las fuentes de DP's se debe a que la distancia entre cualquier antena es equidistante, se crea un conjunto de antenas omnidireccional.

La localización de fuentes de DP's para una distribución cúbica de antenas, se muestra en la Figura 47. En esta figura se puede observar que el error en la localización varía mucho en función de la posición de las antenas. En el caso de que la fuente de DP's estuviera en las líneas de los ejes coordenados, la localización sería excelente. Por el contrario si la posición de la fuente de DP's estuviera en la línea de la diagonal que forman las antenas, el error sería considerable, asumible en el entorno cercano a las antenas pero muy grande a distancias relativamente cortas.

La localización de fuentes de DP's para una distribución tetraédrica de antenas, se muestra en la Figura 48. En este grafico se puede observar que el error es proporcional a la distancia de la fuente de DP's con las antenas e independiente de la orientación del conjunto de antenas.

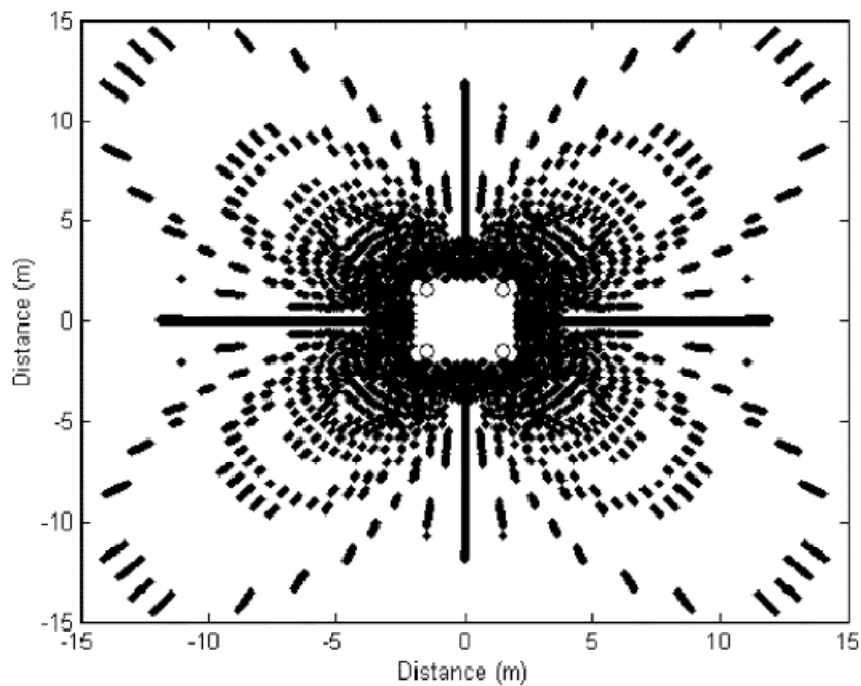


Figura 47. Localización de DP's para distribución cúbica [8].

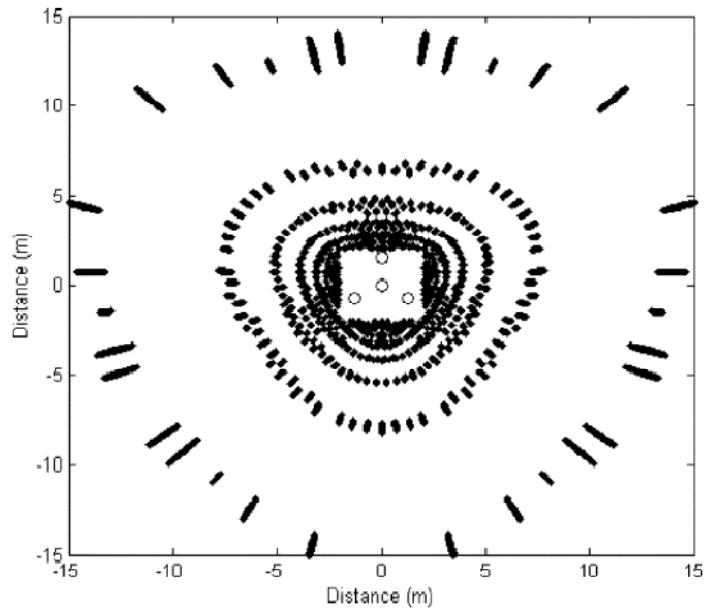


Figura 48. Localización de DP's para distribución tetraédrica [8].

La exactitud en la localización de la fuente de descargas parciales, depende de la configuración de las antenas, la distancia entre ellas y la distancia a la fuente de descargas parciales.

Para realizar la localización de fuentes de DP's se debería situar el conjunto de antenas lo más cercano posible a la fuente, o realizar medidas recolocando las antenas de manera que se vaya acercando progresivamente a la solución final y reduciendo la incertidumbre de la misma en función de la localización de la distribución anterior.

7 Resultados experimentales.

En este apartado se muestra el programa final después de todas las evoluciones realizadas para minimizar el error. También se describe e ilustra la configuración del equipo de medida detallando los dispositivos utilizados para realizar la localización de la fuente de descargas parciales. Por último se mostrarán dos de las medidas realizadas en el laboratorio.

7.1 Código final

En este punto se muestra y desgrana el código completo escrito en Matlab para conseguir la localización de la fuente de DP's. El código se puede subdividir en nueve bloques:

7.1.1 Definición datos entrada.

En este bloque se define la constante de adquisición, frecuencia de muestreo. Realmente éste parámetro se ajusta cuando se realizan las medidas en el osciloscopio pero es necesario indicar este valor en Matlab para poder hacer la conversión del desfase de muestras a segundos. También hay que definir la constante de la velocidad de la luz para convertir los tiempos en distancias. Otras variables que se definen son: $AX = 0$, $AY = 0$ y $AZ = 0$ que sirven para desplazar el conjunto de antenas. Las medidas de laboratorio se realizan con una configuración que no se puede modificar una vez se han realizado las medidas. Normalmente, se situaba la fuente de DP's como referencia en el origen de coordenadas para realizar los cálculos. Debido a la peculiaridad de esta posición se decidió desplazar todo el conjunto de antenas y fuente de DP para comprobar la eficacia del método y se comprobó que localizaba correctamente. Otros dos parámetros determinantes para realizar la localización son el disparo (`trigger`) y el coeficiente de interpolación (`int`). A continuación se introduce la posición de las antenas y de la fuente de DP's, esta última no se utiliza en el algoritmo de localización pero es útil para comprobar parámetros intermedios durante la ejecución del algoritmo. Por último se genera un gráfico que permite visualizar la posición de las antenas y de la fuente de DP's.

7.1.2 Cargar las señales.

En este bloque se cargan las señales que se han guardado en un fichero tras haber sido adquiridas en el osciloscopio mediante la función `load` de Matlab. Posteriormente se modifica el nombre de las señales para poder operar con ellas de manera más cómoda. A continuación se homogenizan los valores máximos de las señales para conseguir que el disparo se detecte en la misma proporción en todas las señales.

7.1.3 Interpolación de las señales para conseguir resolución.

En este bloque se generan más puntos a las señales que captura el osciloscopio para poder realizar cálculos más continuos. Mediante la función `interp1` que se ha descrito anteriormente, se crea una señal con un número de muestras `int` veces más. `int` es la variable que determina el número de muestras que se quieren generar entre dos muestras originales.

7.1.4 Localización del inicio de la DP.

En este bloque mediante un bucle `for` se localiza la primera muestra que cumple las condiciones de disparo y por tanto donde empieza la descarga parcial. El bucle `for` recorre todos los elementos del vector que representa la DP y los va comparando con el valor de disparo (`trigger`) que se ha definido anteriormente. Cuando encuentra un elemento del vector que cumple la condición de disparo, se deja de ejecutar el bucle con un `break`. El valor de la muestra donde se produce el comienzo de la DP se almacena en la variable md_i donde $i \in (1, 2, 3 \text{ ó } 4)$

7.1.5 Selección del primer frente de onda.

Como se ha explicado anteriormente para evitar la multipropagación, se debe coger el primer frente de onda de la DP. Para conseguir este objetivo se utiliza un bucle `for` que modifica un vector lleno de ceros generado anteriormente del mismo tamaño que las señales que se reciben del osciloscopio. El bucle `for` asigna a las posiciones del nuevo vector que van desde $md_i - 2 \cdot int$ hasta $md_i + int$, los valores del vector de la señal original de la antena i que van desde $md_i - 2 \cdot int$ hasta $md_i + int$. Por ejemplo si la señal de la antena 1 tiene el disparo en $md_1 = 234$ y el paso de interpolación es $int = 3$, el nuevo vector será todo ceros menos las muestras que van desde 228 hasta la 237 que tendrán el mismo valor que la señal original de la antena 1. El resultado de este bloque se puede observar en la Figura 37 donde se ve en azul la señal original y en rojo la nueva señal.

7.1.6 Cálculo del desfase entre señales.

En este bloque de acuerdo con el apartado 5.3 se calculan los tiempos de desfase con que llegan de retraso o adelanto las señales a las diferentes antenas, utilizando a la antena 1 como referencia.

7.1.7 Definición del punto de partida del algoritmo.

En este bloque simplemente se asigna como estimación de punto de partida de la posición de la fuente de DP's, la posición de la antena de referencia minorada 1000 veces para tener como punto de partida un punto cercano al origen. Este punto es imprescindible para poder ejecutar el algoritmo, sin él no se puede comenzar a ejecutar.

7.1.8 Bucle del algoritmo Newton-Raphson.

En este bloque, se ejecuta el método de Newton-Raphson como se describió anteriormente en el apartado 5.4 Algoritmo para la localización de la fuente de descargas parciales.

7.1.9 Mostrar en pantalla el resultado final.

En este último bloque, se devuelve por pantalla el valor calculado de la posición de la fuente de DP's.

El código completo desarrollado en Matab se muestra a continuación:

```
%_1_Definición_datos_entrada.-----
clearall
closeall
clc
f=2500000000;
Ts=1/f;
c=300000000;
dm=Ts*c;
%Incremento de la posición de las antenas y la fuente
AX=0;
AY=0;
AZ=0;
trigger=0.09;
int=3;
%Posición de las fuentes de DP's
Xs=0+AX;Ys=0+AY;Zs=0+AZ;
%%Antena 1
X1=1+AX;Y1=1+AY;Z1=0+AZ;
%Antena 2
X2=1+AX;Y2=0+AY;Z2=0+AZ;
%Antena 3
X3=2+AX;Y3=0+AY;Z3=0+AZ;
%Antena 4
X4=2+AX;Y4=1+AY;Z4=0.45+AZ;
%Dibujo de la distribución de las antenas
holdon
view(45,45)
plot3(X1,Y1,Z1,'bo','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(X2,Y2,Z2,'go','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(X3,Y3,Z3,'mo','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(X4,Y4,Z4,'ro','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
plot3(Xs,Ys,Zs,'k*','MarkerSize',6,'LineWidth',6)
gridon
%_2_Cargar_las_ñales-----
load'Triagulación\Dia2.2.5Gss.Pos1.2._Ch1.dat'
load'Triagulación\Dia2.2.5Gss.Pos1.2._Ch2.dat'
load'Triagulación\Dia2.2.5Gss.Pos1.2._Ch3.dat'
load'Triagulación\Dia2.2.5Gss.Pos1.2._Ch4.dat'
S1=Dia2_2_5Gss_Pos1_2__Ch1;
S2=Dia2_2_5Gss_Pos1_2__Ch2;
S3=Dia2_2_5Gss_Pos1_2__Ch3;
S4=Dia2_2_5Gss_Pos1_2__Ch4;
S2=(max(S1)/max(S2))*S2;
S3=(max(S1)/max(S3))*S3;
S4=(max(S1)/max(S4))*S4;
%_3_Interpoliar_las_ñales_para_conseguir_resolución.-----
l=length(S1);
x = 1:l;
y = S1;
xi1 = 0:(1/int):l;
yi1 = interp1(x,y,xi1);
S1=yi1;
%---
l=length(S2);
x = 1:l;
y = S2;
xi2 = 0:(1/int):l;
yi2 = interp1(x,y,xi2);
S2=yi2;
```

```

%---
l=length(S3);
x = 1:l;
y = S3;
xi3 = 0:(1/int):l;
yi3 = interp1(x,y,xi3);
S3=yi3;
%---
l=length(S4);
x = 1:l;
y = S4;
xi4 = 0:(1/int):l;
yi4 = interp1(x,y,xi4);
S4=yi4;
%_4_Localización_del_inicio_de_la_DP.-----
l=0;
ll=0;
l=length(S1);
for ll=1:1:(l-1)
if abs(S1(ll))>abs(trigger)
md1=ll;%Muestra Disparo antena 1
break
end
end
%---
l=0;
ll=0;
l=length(S2);
for ll=1:1:(l-1)
if abs(S2(ll))>abs(trigger)
md2=ll;%Muestra Disparo antena 2
break
end
end
%---
l=0;
ll=0;
l=length(S3);
for ll=1:1:(l-1)
if abs(S3(ll))>abs(trigger)
md3=ll;%Muestra Disparo antena 3
break
end
end
%---
l=0;
ll=0;
l=length(S4);
for ll=1:1:(l-1)
if abs(S4(ll))>abs(trigger)
md4=ll;%Muestra Disparo antena 4
break
end
end
%_5_Selección_del_primer_frente_de_onda.-----
l1=length(S1);
l2=length(S2);
l3=length(S3);
l4=length(S4);
s1=zeros(l1,1);
s2=zeros(l2,1);

```

```

s3=zeros(13,1);
s4=zeros(14,1);
%---
j=md1;
for j= md1-2*int:1:md1+int
s1(j)=S1(j);
j=j+1;
disparo1=j;
end
%---
j=md2;
for j= md2-2*int:1:md2+int
s2(j)=S2(j);
j=j+1;
disparo2=j;
end
%---
j=md3;
for j= md3-2*int:1:md3+int
s3(j)=S3(j);
j=j+1;
disparo3=j;
end
%---
j=md4;
for j= md4-2*int:1:md4+int
s4(j)=S4(j);
j=j+1;
disparo4=j;
end
%_6_Cálculo_de_la_correlación_entre_señales-----
%Utilizamos de referencia la primera antena
[a12,b12]=xcorr(s1,s2);
[mv12,mp12]=max(a12);
T12=(b12(mp12))*Ts/int;

[a13,b13]=xcorr(s1,s3);
[mv13,mp13]=max(a13);
T13=(b13(mp13))*Ts/int;

[a14,b14]=xcorr(s1,s4);
[mv14,mp14]=max(a14);
T14=(b14(mp14))*Ts/int;
%_7_Definición_del_punto_de_partida_del_algoritmo-----
Xs=X1*0.001+0.001;
Ys=Y1*0.001+0.001;
Zs=Z1*0.001+0.001;
%_8_Bucle_del_algoritmo_Newton-Raphson-----
dd=1;
i=2;
while dd==1
G1=sqrt((Xs-X1)^2+(Ys-Y1)^2+(Zs-Z1)^2);
G2=sqrt((Xs-X2)^2+(Ys-Y2)^2+(Zs-Z2)^2);
G3=sqrt((Xs-X3)^2+(Ys-Y3)^2+(Zs-Z3)^2);
G4=sqrt((Xs-X4)^2+(Ys-Y4)^2+(Zs-Z4)^2);

F=[(G1-G2-(c*T12)),(G1-G3-(c*T13)),(G1-G4-(c*T14))];
%Se calcula la matriz jacobiana
J(1,1)=((Xs-X1)/G1)-((Xs-X2)/G2);
J(1,2)=((Ys-Y1)/G1)-((Ys-Y2)/G2);
J(1,3)=((Zs-Z1)/G1)-((Zs-Z2)/G2);

```

```

J(2,1)=((Xs-X1)/G1)-((Xs-X3)/G3);
J(2,2)=((Ys-Y1)/G1)-((Ys-Y3)/G3);
J(2,3)=((Zs-Z1)/G1)-((Zs-Z3)/G3);
J(3,1)=((Xs-X1)/G1)-((Xs-X4)/G4);
J(3,2)=((Ys-Y1)/G1)-((Ys-Y4)/G4);
J(3,3)=((Zs-Z1)/G1)-((Zs-Z4)/G4);

%%Calculamos los incrementos de variación de la posición de la
fuente

A=(J\F)/1000;

Xs=Xs-A(1,1);
Ys=Ys-A(2,1);
Zs=Zs-A(3,1);

er=sqrt((F(1,1))^2+(F(2,1))^2+(F(3,1))^2);
d(i)=er;
d(1)=d(2)*2;
    if d(i)<d(i-1)
        dd=1;
    else
        dd=0;
    end
    i=i+1;
end
%_9_Mostrar_en_pantalla_el_resultado_final.-----
disp('Posicion de la fuente de descargas parciales Xs,Ys,Zs')
[Xs,Ys,Zs]'

```

7.2 Equipo de medida

En este apartado se describe el equipo utilizado para realizar la localización de la fuente de descargas parciales.

En primer lugar se muestra la fuente de descargas parciales Figura 49. Ésta fuente consiste en un recipiente lleno de aceite sintético, con un objeto de ensayo formado por papeles utilizados en el aislamiento de transformadores. Estos papeles se superponen unos con otros y en capas intermedias, se realizan pequeños agujeros simulando las vacuolas mencionadas en el apartado 3.1 Las descargas parciales. Finalmente cuando todos los papeles están colocados se envasan al vacío y se sumergen en el aceite sintético. Dentro del aceite se somete al objeto de ensayo a alta tensión, en torno a 10kV. Cuando se alcanzan éstas tensiones se producen descargas parciales y por tanto la fuente comienza a emitir.

El siguiente elemento se muestra en la Figura 50 (izquierda), que son las antenas utilizadas para la recepción de DP's. Esta antena es un hilo de cobre soldado a un conector de cable coaxial apantallado. En la atmosfera del laboratorio hay mucho ruido de fondo, por eso el apantallamiento es necesario para evitar introducir demasiado ruido de fondo en las señales adquiridas. En la Figura 50 (derecha) se muestra la ubicación definitiva de las antenas. Tres antenas se colocaron en tres bobinas de nailon como la que se muestra en la Figura 50. Otra se colocó más elevada para poder conseguir tres ecuaciones independientes puesto que si todas las antenas están en el

mismo plano, el algoritmo en 3 dimensiones no converge y habría que aplicar uno en dos dimensiones.

El elemento utilizado para la realización de la adquisición de medidas de DP's se muestra en la Figura 51 es el osciloscopio Tektronix DPO 7254

La unión de todos estos componentes, permite poner en práctica todo el estudio descrito en este documento. Estos elementos, adquieren señales que tras ser analizadas permiten la localización de la fuente de DP's.

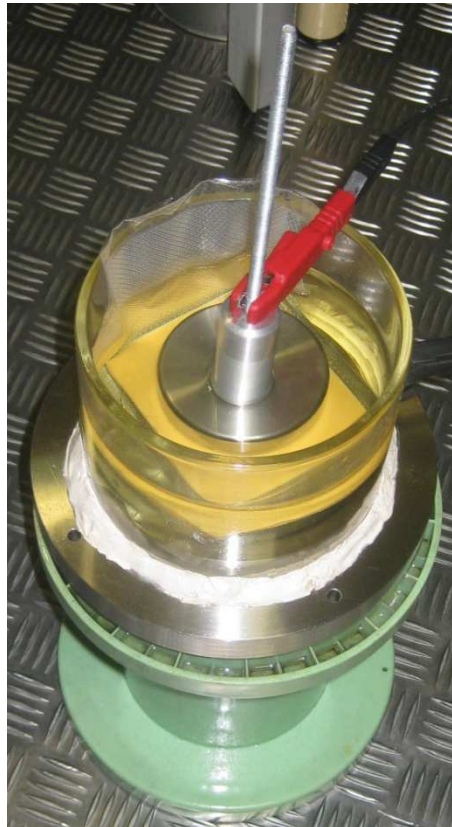


Figura 49. Fuente de DP's.

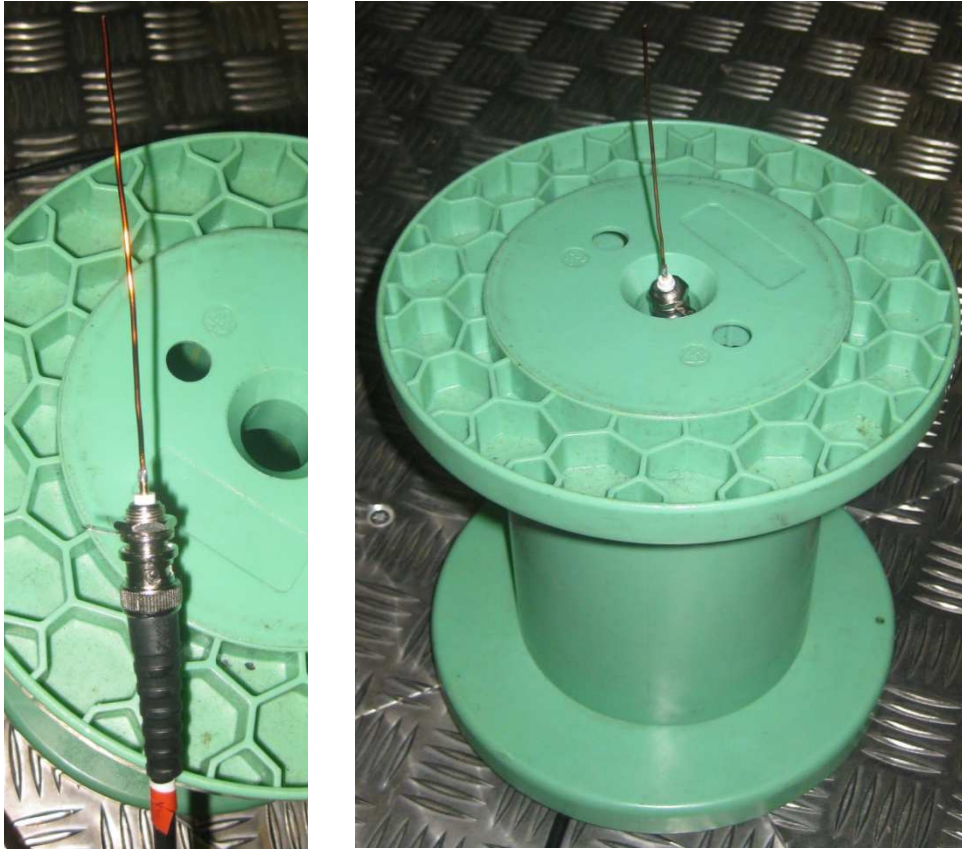


Figura 50. Antena receptora de emisiones de DP's (Izquierda). Antena en disposición de adquirir DP's (Derecha).

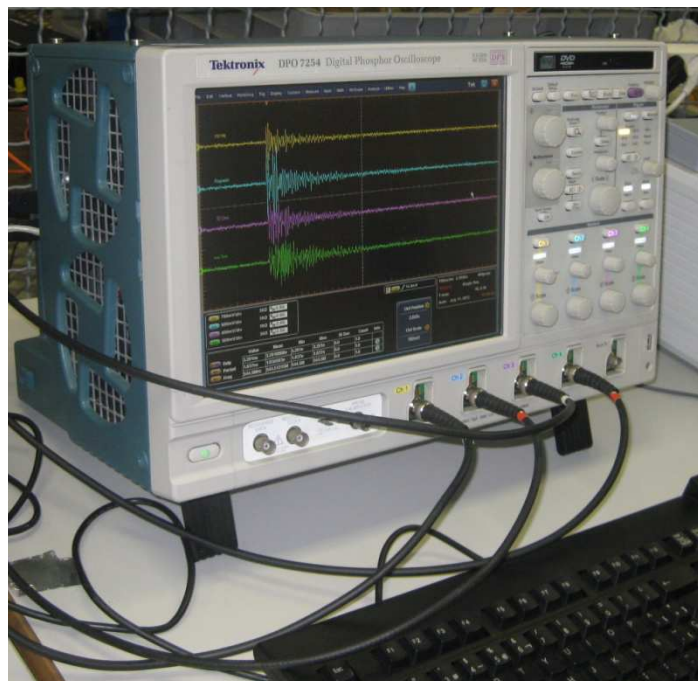


Figura 51. Osciloscopio Tektronix DPO 7254.

En la Figura 52 se muestra la distribución de las antenas y fuente de DP's utilizadas para realizar la localización de la fuente de DP's.



Figura 52. Antenas y fuente de DP's durante las mediciones en el laboratorio.

7.3 Medidas finales, configuración 1.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la configuración de antenas mostrada en la Figura 52 (Foto) y Figura 53 (Dibujo). Las señales captadas por el osciloscopio con esta configuración de antenas y fuente de DP's se muestran en la Figura 54. Tras haber sido cargadas por el algoritmo a Matlab, se visualizan en la Figura 55.

Los parámetros elegidos para localizar la fuente de DP's para este caso ha sido:

- Frecuencia de muestreo, $f = 2,5 \text{ GHz}$
- Umbral de disparo, $trigger = 0.09 \text{ V}$
- Coeficiente de interpolación, $int = 3$
- La posición de las antenas se muestra en la Figura 53.

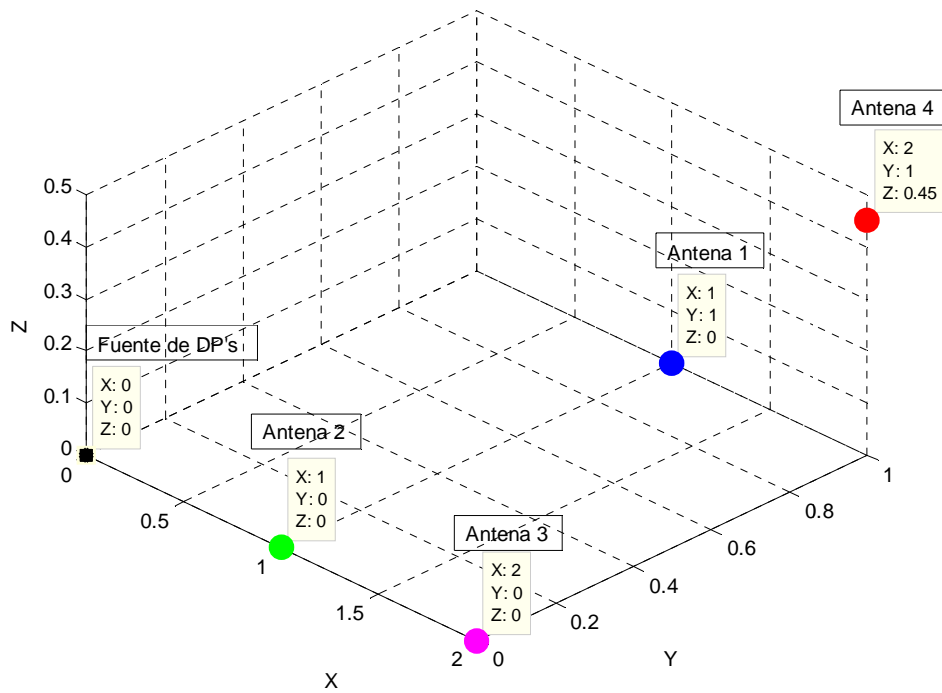


Figura 53. Imagen distribución antenas y fuente de DP's para configuración 1.

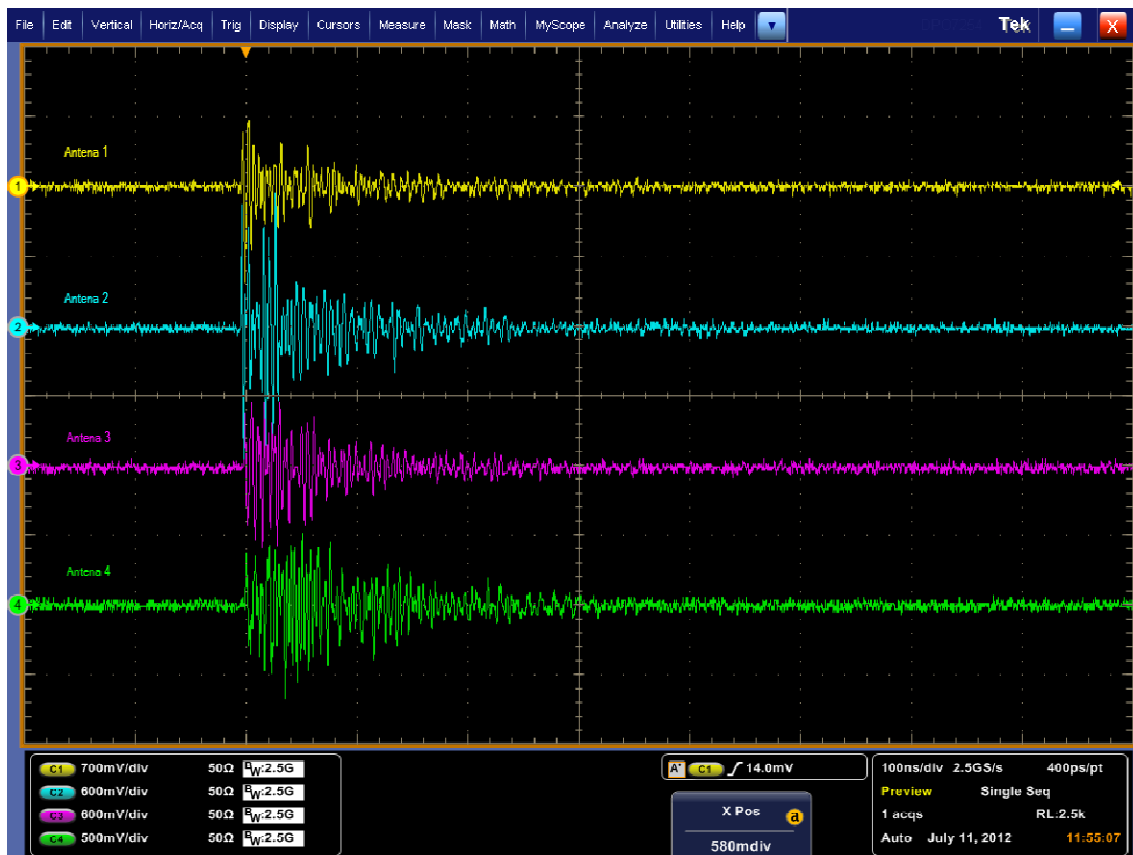


Figura 54. Señales recibidas por el osciloscopio para la configuración 1.

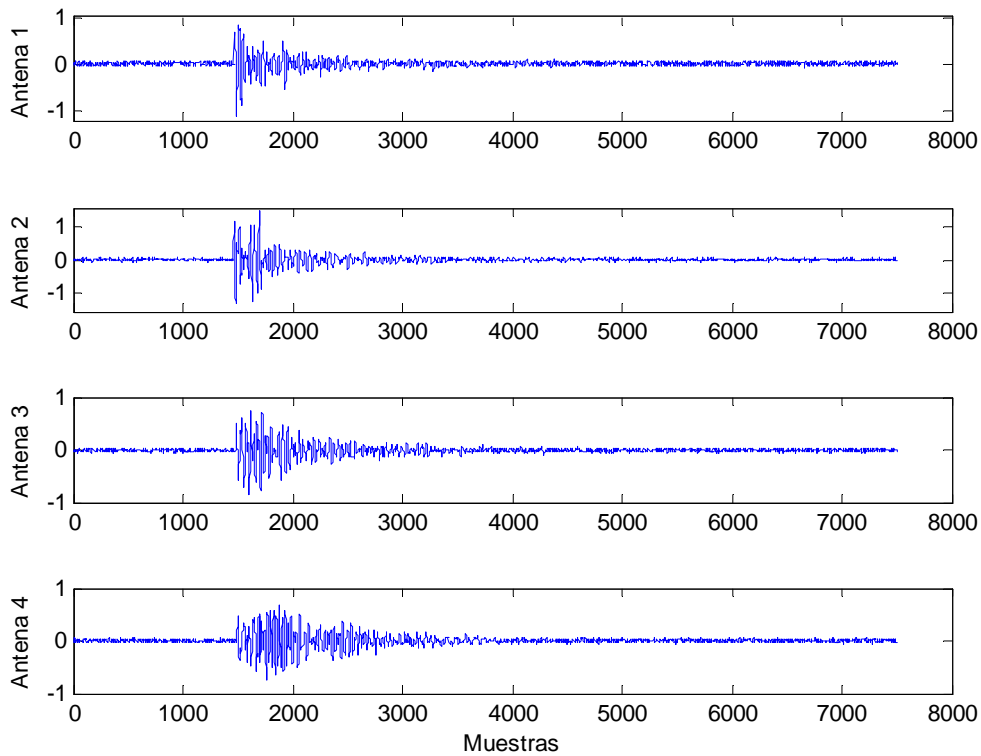


Figura 55. Señales cargadas en Matlab para la configuración 1.

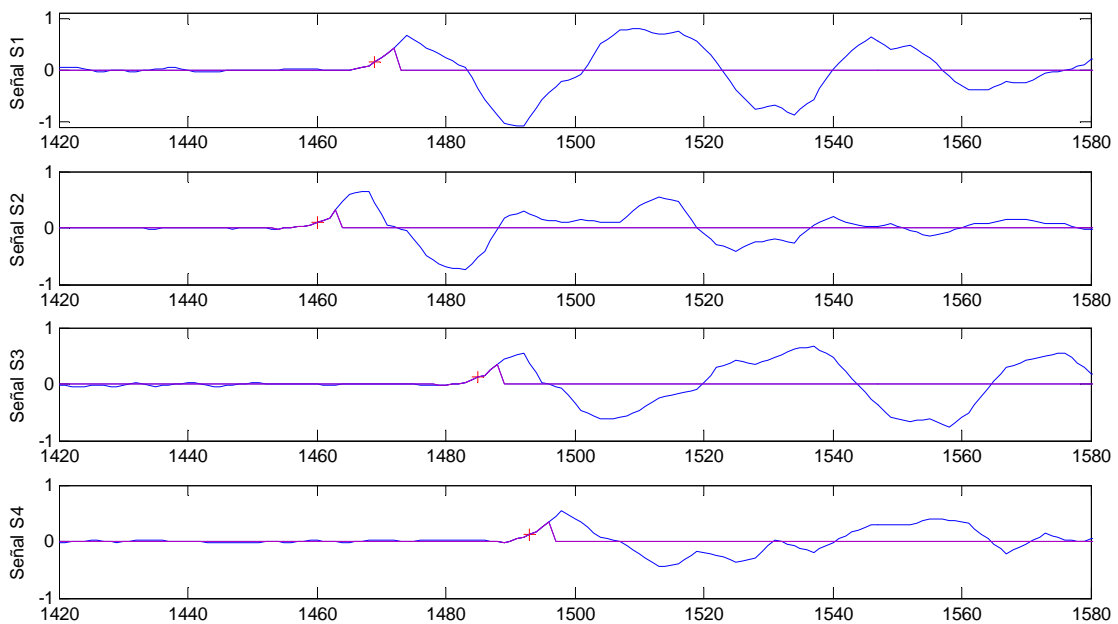


Figura 56. Señales recortadas y localización del disparo para la configuración 1.

En la Figura 56, se puede apreciar los disparos utilizados en forma cruz roja. Las señales moradas son las señales utilizadas para realizar la localización. Como se puede observar en la Figura 56, las señales moradas solo representan el inicio de DP, donde no están distorsionadas por el efecto de la multipropagación. Las señales azules son las DP's completas.

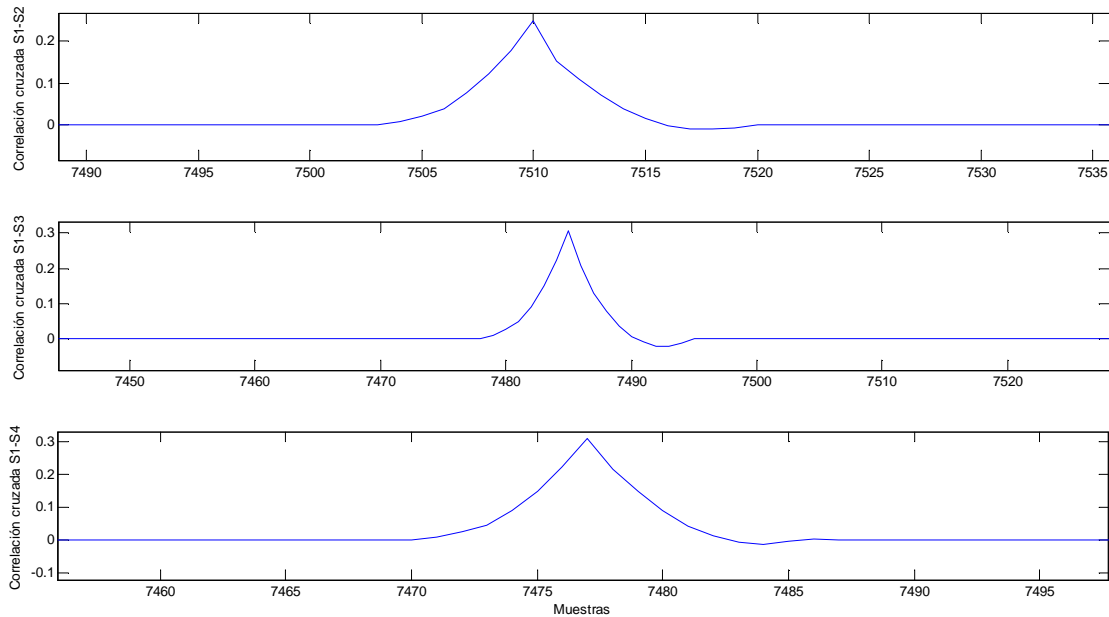


Figura 57. Correlación cruzada para la configuración 1.

Aunque la aproximación al máximo de la correlación cruzada sea demasiado abrupta, se sabe con certeza que el desfase escogido a partir del máximo de la correlación cruzada es el correcto. La señal de correlación cruzada posee muchos puntos dejando poco espacio entre uno y otro, descartando la posibilidad de omitir puntos relevantes. El motivo por el que las señales de la Figura 57 tengan cambios bruscos de pendiente al pasar por el máximo, se debe a que estas correlaciones están calculadas a partir de señales recortadas con forma triangular.

El resultado obtenido es:

$$x_s = 0.0514 \text{ m}$$

$$y_s = 0.0289 \text{ m}$$

$$z_s = -0.0456 \text{ m}$$

Este resultado es una estupenda localización porque se cometen errores entorno a los 5cm, error plenamente asumible puesto que para ésta adquisición se ha trabajado al discretizar con muestras de 0.12 m. El éxito de la localización depende de seleccionar el inicio de la señal donde no existe multipropagación. El umbral de disparo se debe fijar en función del ruido precedente a la DP y de esta manera poder coger el inicio de la misma.

7.4 Medidas finales, configuración 2.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la configuración de antenas mostrada en la Figura 58. Las señales captadas por el osciloscopio con esta configuración de antenas y fuente de DP's se muestran en la Figura 59. Tras haber sido cargadas por el algoritmo a Matlab, se visualizan en la Figura 60.

Los parámetros elegidos para localizar la fuente de DP's para este caso ha sido:

- Frecuencia de muestreo, $f = 5\text{GHz}$
- Umbral de disparo, $trigger = -0.005\text{ V}$
- Coeficiente de interpolación, $int = 3$
- La posición de las antenas se muestra en la Figura 58.

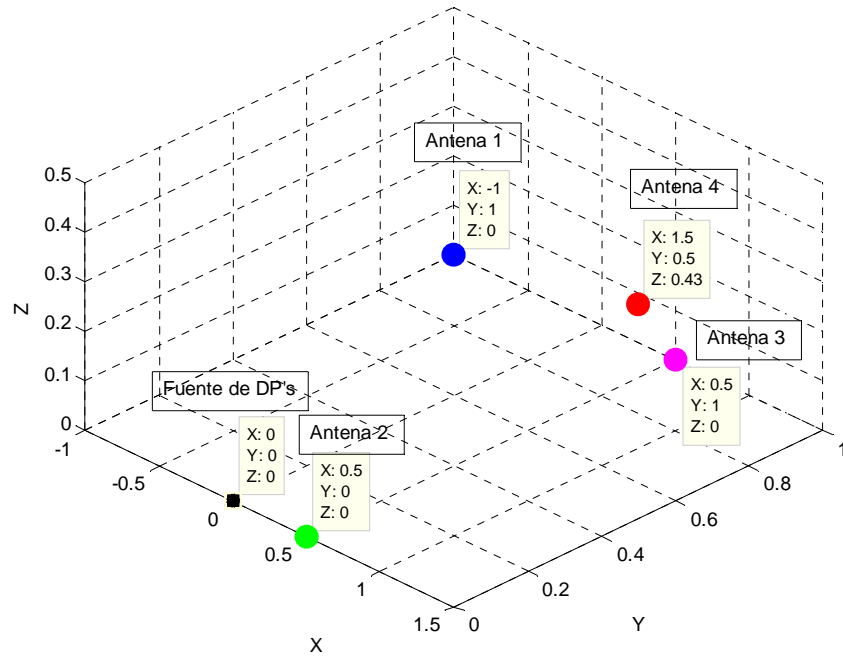


Figura 58. Imagen distribución antenas y fuente de DP's para configuración 2.

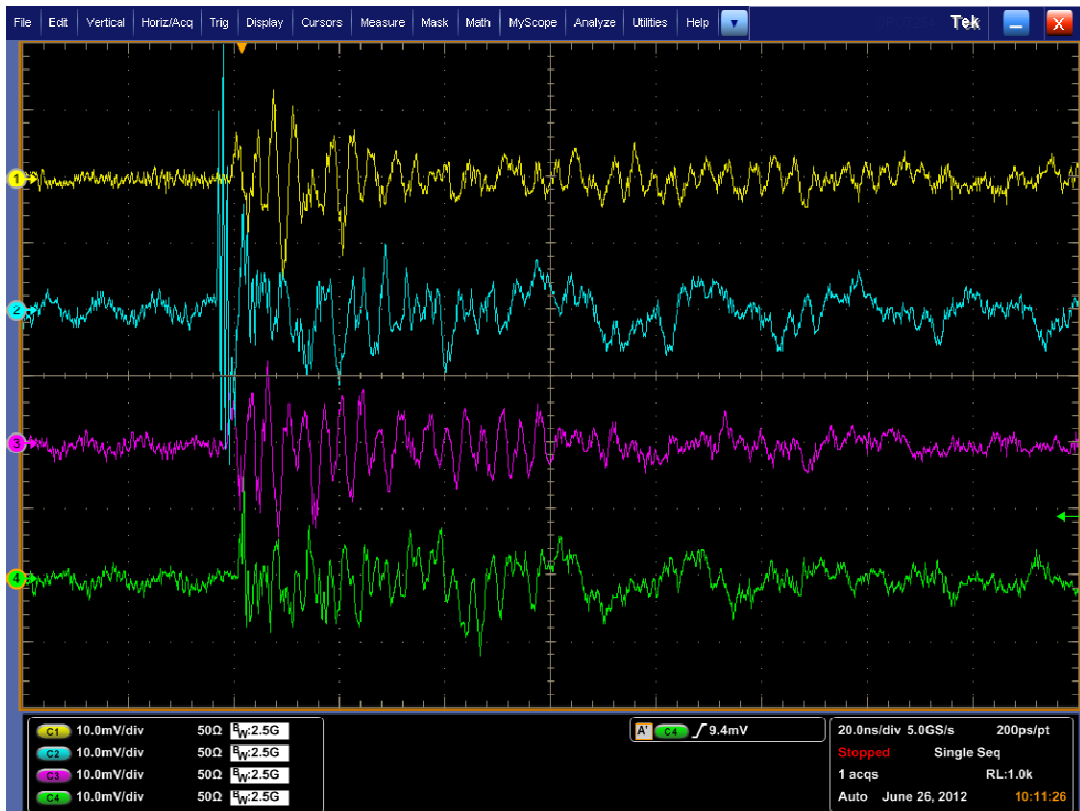


Figura 59. Señales recibidas por el osciloscopio para la configuración 2.

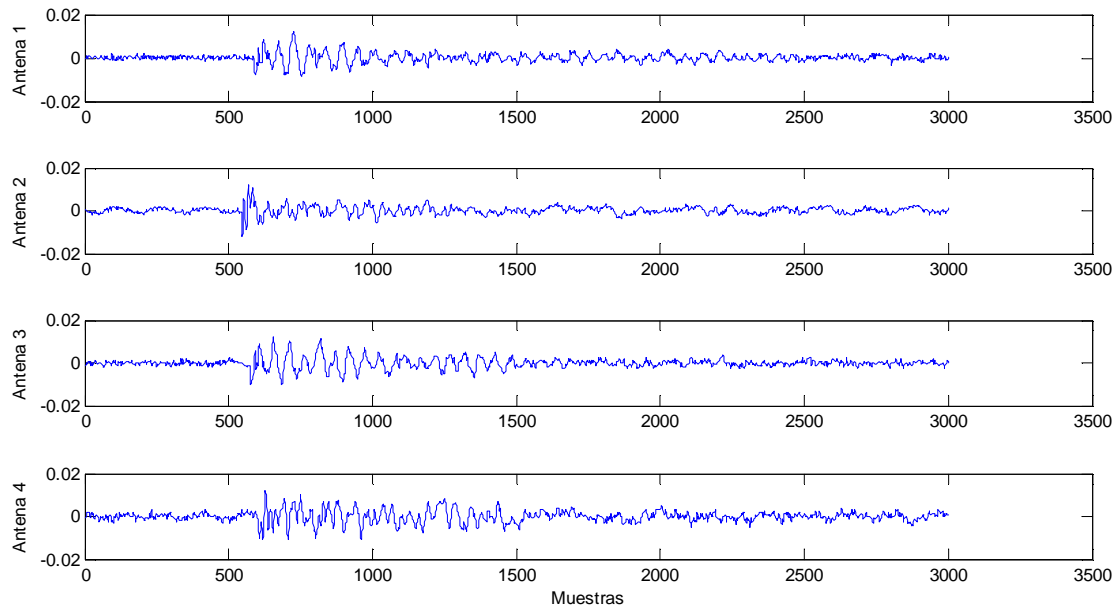


Figura 60. Señales cargadas en Matlab para la configuración 2.

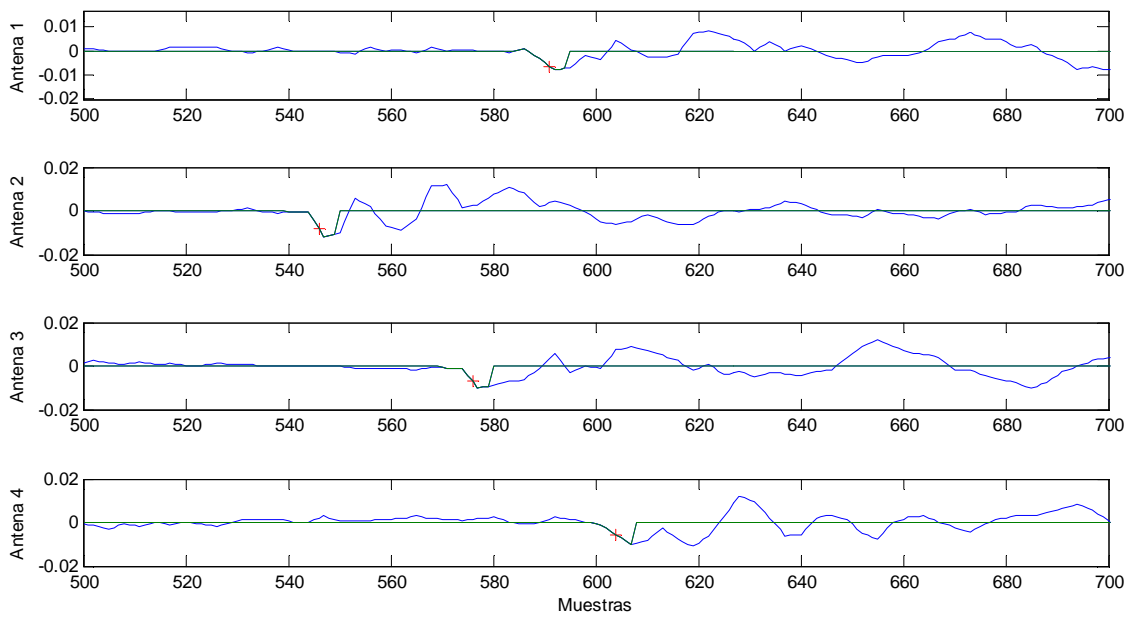


Figura 61. Señales recortadas y localización del disparo para la configuración 2.

Al igual que se ha explicado para la configuración 1, en la Figura 61, se puede apreciar los disparos utilizados en forma cruz roja. Las señales verdes son las señales utilizadas para realizar la localización. Como se puede observar en la Figura 61, las señales verdes solo representan el inicio de DP, donde no están distorsionadas por el efecto de la multipropagación. Las señales azules son las DP's completas.

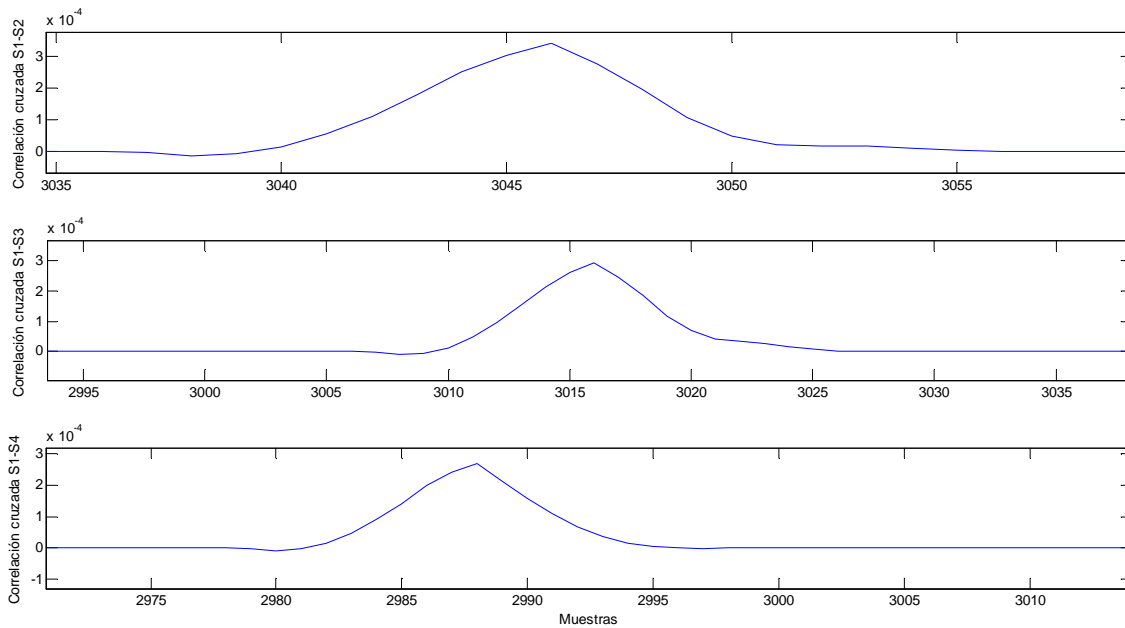


Figura 62. Correlación cruzada para la configuración 2.

En la Figura 62 se puede observar las señales de correlación cruzada obtenidas para las señales recortadas de la configuración 2. Como estas señales tienen la pendiente menos pronunciada que en la configuración 1, el resultado de correlación cruzada también es más suave.

El resultado obtenido es:

$$x_s = 0.0038 \text{ m}$$

$$y_s = 0.0085 \text{ m}$$

$$z_s = -0.1529 \text{ m}$$

Este resultado es una buena localización porque se cometen errores entorno a los 15 cm, error aceptable puesto que para ésta adquisición se ha trabajado al discretizar con muestras de 0.06 m.

8 Conclusiones y trabajos futuros

8.1 Conclusiones

El algoritmo desarrollado en Matlab que se presenta en este documento, permite localizar eficazmente fuentes de DP's. Cuando se realizan simulaciones con el algoritmo, se obtienen excelentes resultados, el sistema converge bien. Cuando se trabaja con medias reales, el resultado está condicionado a la sensibilidad mostrada a la multipropagación, sería conveniente realizar varias medidas para contrastar la solución final y garantizar la eficacia de la localización. Inicialmente se trató de calcular la correlación ente dos señales reales utilizando las señales enteras. Este supuesto conducía a error porque no necesariamente la zona del inicio de las DP's es la zona que más se tienen que parecer entre dos DP's, puede que la zona intermedia de una se parezca mucho a la zona final de la otra. Hay que seleccionar bien el inicio de las DP's para evitar errores de este tipo.

Debido a la multipropagación, es muy importante utilizar el inicio de la DP para realizar los cálculos de la localización. Cuando se configura el umbral de disparo (*trigger*), éste debe ser ligeramente superior al ruido de fondo que acompaña la señal. De esta manera se podrá utilizar el principio de la DP y por tanto se conseguirá mayor exactitud en la localización. Para poder afinar más aún el cálculo de la correlación, se interpolaron las señales de manera que las señales de correlación cruzada estaban formadas por muchos más puntos por tanto eran mucho más continuas y la probabilidad de omitir un dato deseado se reduce en gran medida. La interpolación, solo reporta beneficios si la detección del inicio de la DP ha sido buena, la interpolación permite afinar la solución de correlación y por tanto afinar en el desfase.

Cuando se adquieran señales se tratará de adquirir con la mayor frecuencia de muestreo posible. Cuanto mayor es la resolución de las señales adquiridas, mayor es la exactitud de la localización.

8.2 Trabajos futuros

- Desarrollar antenas que permitan adquirir señales de mayor calidad y con mayor precisión.
- Desarrollar un dispositivo que permita adquirir emisiones de DP's que se producen a larga distancia. Con los dispositivos actuales no se puede porque la señal llega muy atenuada y deformada por el ruido de fondo y la multipropagación. Se podría utilizar un amplificador, pero la cuestión principal sería mejorar la relación señal-ruido.
- Desarrollar un algoritmo con 5 antenas para generar tres sistemas de tres ecuaciones con tres incógnitas. Las incógnitas serían comunes a los tres sistemas. De esta manera se podría hacer una ponderación con las tres soluciones y así poder ofrecer un resultado más contrastado.

Teniendo 5 antenas, se tendrían tres conjuntos de tres desfases, en la Figura 63 serían líneas negras, líneas azules y líneas rojas. Con estos tres grupos de tres desfases se podría resolver los tres sistemas de tres ecuaciones con tres incógnitas.

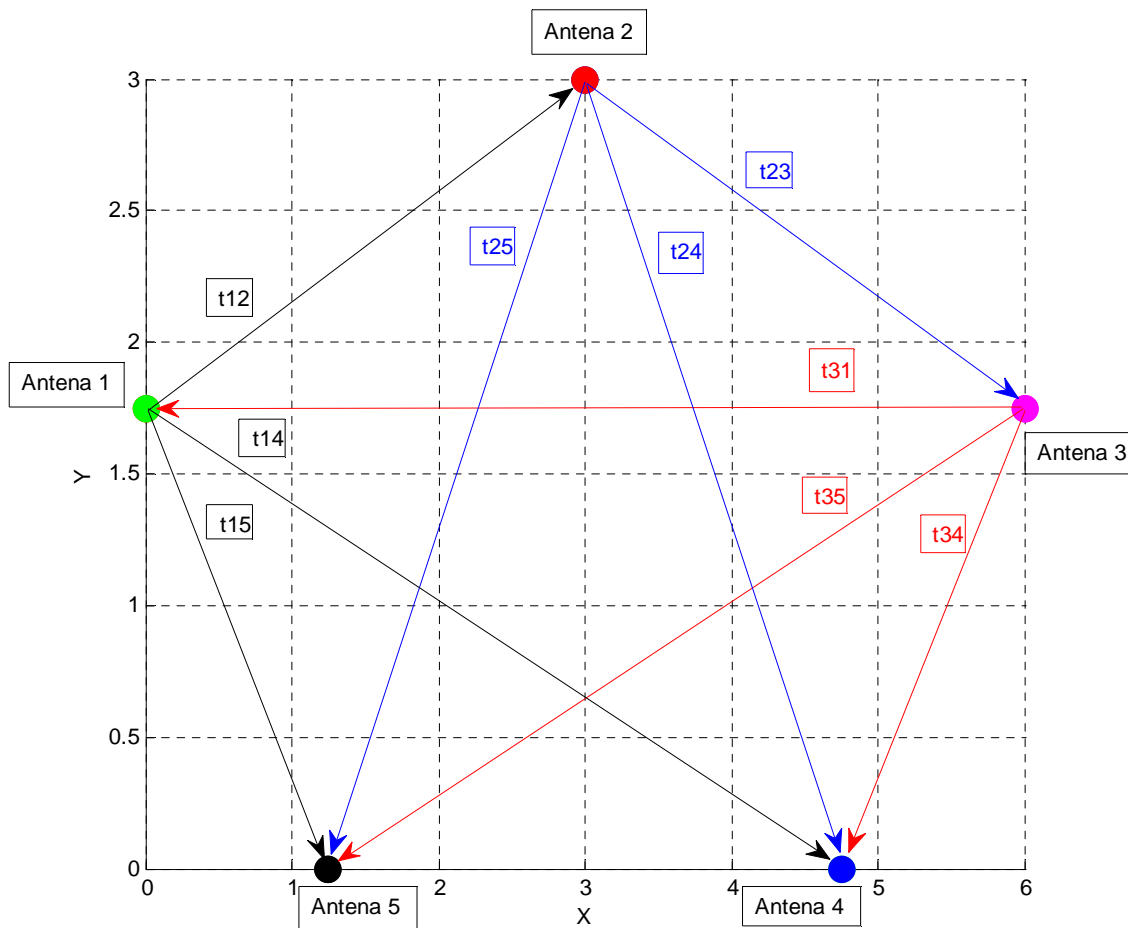


Figura 63. Conjunto de 5 antenas.

9 Bibliografía.

- 1- F.H. Kreuger. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment. Butterworth, Londres, 1989.
- 2- Bartnikas y McMahon. Engineering Dielectrics, Volume I. Corona Measurements and Interpretation. ASTM, Philadelphia, 1979.
- 3- R. Tallam, S. B. Lee, G. Stone, G. Kliman, J. Yoo, T. Habetler y R. Harley. A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines. Industry Applications, IEEE Transactions on, tomo 43(4): 920_ 933, 2007.
- 4- P. Morshuis. Partial Discharge Mechanisms. Delft University Press, Netherlands, 1993.
- 5- J. Lopez-Roldan, T. Tang y M. Gaskin. Optimization of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, tomo 15(6): 1634 1639, 2008.
- 6- G. Paoletti y A. Golubev. Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment. Industry Applications, IEEE Transactions on, tomo 37(1): 90 103, 2001.
- 7- H. Okubo, N. Hayakawa y G. Montanari. Technical Development on Partial Discharge Measurement and Electrical Insulation Techniques for Low Voltage Motors Driven by Voltage Inverters. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, tomo 14(6): 1516 1530, 2007.
- 8- Philip J. Moore, Senior Member, IEEE, Iliana E. Portugues, Member, IEEE, and Ian A. Glover Radiometric Location of Partial Discharge Source on Energized High-Voltage Plant
- 9- A. Tungkmawanich, Student member Z.I. Kawasaki, Member J. Abe, Nonmember K. Matsuura, Non member Location of Partial Discharge Source on Distribution Line by measuring emitted Pulse-Train Electromagnetic Waves
- 10- Métodos numéricos, Víctor Jiménez López y Antonio Pallarés Ruiz