

**Implementación en sistema reconfigurable FPGA de un sistema  
para reconocimiento de imágenes provenientes de un radar  
RASCAN.**

**JUAN PABLO OSORIO OSPINA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
MEDELLÍN**

**2013**

**Implementación en sistema reconfigurable FPGA de un sistema  
para reconocimiento de imágenes provenientes de un radar  
RASCAN.**

**JUAN PABLO OSORIO OSPINA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

**MARISOL OSORIO CÁRDENAS**

**Ingeniera Electrónica, Doctora en ingeniería eléctrica, área Control**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**MEDELLÍN**

**2013**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Medellín, 6 de Agosto de 2013.**

A Dios.

A mi Familia.

A mis Amigos.

A mis Maestros.

## **Agradecimientos.**

Marisol Osorio Cárdenas, Ingeniera Electrónica y Doctora en ingeniería eléctrica, área Control. Por su apoyo, acompañamiento y orientación en este trabajo.

José Valentín Restrepo Laverde, Ingeniero Electrónico y Magister en Finanzas. Por haberme incluido dentro de sus investigaciones y permitirme aprender de ellas.

Juan Camilo Vanegas Serna, Ingeniero Electrónico. Por su apoyo, amistad y cooperación durante los años de estudio.

Gloria C. Ospina A, Ramón E. Osorio B y Felipe Osorio O. Familia gracias por su apoyo incondicional, los Amo.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>1 RADAR RASCAN</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 FÍSICA DEL RADAR RASCAN</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 FUNCIONAMIENTO DEL RADAR RASCAN</b> .....	<b>14</b>
<b>2 PRUEBAS DE CAMPO</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 PRUEBAS EN CAMPO ABIERTO</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 PRUEBAS EN AMBIENTE CONTROLADO</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3 PRUEBAS DE REFERENCIA</b> .....	<b>24</b>
2.3.1 <i>Botellas</i> .....	25
2.3.2 <i>Tubo PVC</i> .....	27
2.3.3 <i>Cajas Plásticas</i> .....	28
2.3.4 <i>Metales</i> .....	30
2.3.5 <i>Hueco</i> .....	34
<b>2.4 PRUEBAS DE COMPARACIÓN</b> .....	<b>36</b>
2.4.1 <i>Variación de parámetros en la botella</i> .....	36
2.4.2 <i>Variación de parámetros en las barras de hierro.</i> .....	42
<b>2.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
<b>3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1 ALGORITMO DE INTERPRETACIÓN</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2 MÉTODO IMPLEMENTADO CON BASE EN CORRELACIONES LINEALES</b> . 47	
3.2.1 <i>Correlación Lineal</i> .....	47
<b>3.3 ALGORITMOS DE OBTENCIÓN DE BORDES</b> .....	<b>53</b>
3.3.1 <i>Algoritmo de Canny</i> .....	53
<b>4 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN EN FPGA</b> .....	<b>54</b>
<b>4.1 SISTEMA XILINX CORE GENERATOR™</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN</b> .....	<b>56</b>
4.2.1 <i>Transmisión de datos</i> .....	56
4.2.2 <i>Recepción de datos</i> .....	58
<b>4.3 DIGITAL CLOCK MANAGER ( DCM )</b> .....	<b>59</b>
<b>4.4 BUFFER</b> .....	<b>62</b>
<b>4.5 CONTROLADOR DEL DISPLAY</b> .....	<b>64</b>
4.5.1 <i>Módulo Terasic LCD</i> .....	64
4.5.2 <i>Diagramas de tiempo para el display LCD</i> .....	65
4.5.3 <i>Controlador del display.</i> .....	67
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Conexión radar RASCAN, unidad de control y PC.....	14
Figura 2. Entorno de trabajo del software MultiScan.....	15
Figura 3. Ventana de test, prueba de funcionamiento.....	16
Figura 4. Ventana de opciones.....	17
Figura 5. Ventana para seguir el barrido, Scan. ....	18
Figura 6. Guardar las imágenes como tabla de datos .....	18
Figura 7. Terreno en campo abierto y muestras enterradas para pruebas.....	20
Figura 8. Prueba en campo abierto, 30 cm de profundidad. ....	21
Figura 9. Imágenes en campo abierto 1 cm profundidad.....	22
Figura 10. Cajón para pruebas controladas.....	23
Figura 11. Botella plástica.....	25
Figura 12. Resultados botella plástica.....	25
Figura 13. Botella de vidrio. ....	26
Figura 14. Resultados botella de vidrio. ....	26
Figura 15. Tubo de PVC. ....	27
Figura 16. Resultados tubo de PVC. ....	28
Figura 17. Caja plástica cuadrada. ....	29
Figura 18. Caja plástica circular.....	29
Figura 19. Resultado caja plástica cuadrada. ....	30
Figura 20. Resultado caja plástica circular.....	30
Figura 21. Lámina de aluminio.....	31
Figura 22. Resultados para láminas de aluminio. ....	32
Figura 23. Barra de Hierro.....	32
Figura 24. Resultados para las barras de hierro. ....	33
Figura 25. Hueco en la arena. ....	34
Figura 26. Resultados en la prueba con el hueco. ....	35
Figura 27. Imagen de referencia para una botella plástica.....	36
Figura 28. Diagrama de referencia para los barridos con el radar. ....	38
Figura 29. Imagen de referencia para las barras metálicas.....	42
Figura 30. Imágenes del mismo barrido, intensidades opuestas.....	47
Figura 31. Modelo de la matriz de correlaciones.....	49
Figura 32. Imágenes de prueba, botella enterrada diagonalmente. ....	50
Figura 33. Matriz de correlación y conjunto seleccionado.....	51
Figura 34. Imagen Final. ....	51
Figura 35. Diagrama de flujo del algoritmo para conformar imagen. ....	52
Figura 36. Diagrama de bloques sistema de en la FPGA.....	55
Figura 37. Sistema de transmisión serial.....	57
Figura 38. Configuración bloque de transmisión serial. ....	58
Figura 39. Puerto serial del Kit Spartan-3E 1600E.....	58
Figura 40. Señales IN/OUT del DCM.....	59
Figura 41. Configuración inicial del DCM.....	60
Figura 42. Configuración de las señales del DCM.....	61
Figura 43. Configuración del reloj a 33MHz.....	62

<i>Figura 44. Asistente de configuración para la Block RAM.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 45. Conexiones de la Block RAM. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 46. LCD y conector de Terasic. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 47. Secuencias de señales y tiempos horizontales. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 48. Secuencias de señales y tiempos verticales. ....</i>	<i>67</i>



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Resultados variando la posición de la botella, respecto a la dirección del barrido. ....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2. Resultados obtenidos variando la profundidad de la botella. ....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3. Resultados cambiando el contenido de la botella. ....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4. Resultados variando la profundidad de las barras de hierro. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5. Rangos de calificación para las imágenes. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6. Promedios de desempeño del radar RASCAN. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7. Recursos en la FPGA. ....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Tiempos de las señales horizontales. ....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 9. Tiempos de las señales verticales. ....</i>	<i>67</i>

## GLOSARIO

ARTEFACTOS EXPLOSIVOS IMPROVISADOS (AIE): Este tipo de artefactos son fabricados generalmente de manera artesanal usando elementos de poca elaboración y de muy bajo costo. Son activados ante el contacto de una persona.

BLOCK RAM: Es un tipo de memoria configurable, incluida dentro de las FPGA de Xilinx. Permite realizar operaciones de lectura y escritura, en diferentes espacios de tiempo sobre la misma memoria.

DCM: Siglas en inglés para gestor de reloj digital (*Digital Clock Manager*).

FPGA: Siglas correspondientes a *Field-Programmable Gate Array*, son dispositivos PLD que son configurados usando lenguajes HDL y permiten implementar circuitos digitales.

LCD: Siglas en inglés para identificar una pantalla de cristal líquido (*Liquid Crystal Display*).

MINAS ANTIPERSONA (MAP): Artefacto explosivo de fabricación industrial, el cual regularmente es de tamaño pequeño y está diseñado para herir, mutilar o matar personas [1]. Son ubicadas bajo la tierra y activadas por las víctimas ante un contacto con estas o una manipulación errónea.

RADAR HOLOGRÁFICO: Es un tipo de radar que está monitoreando de manera continua todo el volumen de su espacio de detección, por esto permite adquirir información de amplitud, fase de todos los objetos que se encuentren en dicho volumen. Debido a toda esta información es posible reconstruir de manera gráfica la representación del volumen analizado.

## RESUMEN

Un radar es un sistema que utiliza ondas electromagnéticas para detectar la presencia de un objeto en un radio determinado. Esta tecnología es ampliamente conocida y utilizada en diferentes campos de la ciencia, como: la aviación, la meteorología y la navegación, entre otros. En la actualidad, existen diversas tecnologías aplicadas a los radares, cada una con una finalidad específica y dependientes de la aplicación; en este proyecto se caracterizó un radar holográfico fabricado por RASCAN y se determinó la viabilidad de usarlo en la detección de minas antipersona.

Las minas antipersona son una problemática que sufre Colombia, como consecuencia del conflicto existente entre guerrillas y el gobierno nacional. Actualmente, las minas antipersona son fabricadas en su mayoría de manera artesanal y se encuentran enterradas a lo largo y ancho del país, causando daños día tras día a la población civil. El ejército Colombiano, trabaja arduamente en la tarea del desminado humanitario, detectando y desactivando minas antipersona, pero con tecnologías que descargan la mayor responsabilidad sobre el detectorista; esta investigación busca aportar conocimiento, que facilite la labor de los soldados en la realización del desminado.

El proyecto se centra en procesar las imágenes generadas por el radar RASCAN y mostrar los resultados del procesamiento en un *display* LCD. El sistema para realizar este proceso, está compuesto por tres etapas: inicialmente, las imágenes son adquiridas desde el radar utilizando el software Multiscan, luego en Matlab, se realiza el procesamiento y para finalizar, los resultados son enviados a la FPGA, dispositivo desde el cual se controla el *display* y se muestra la imagen obtenida.

## INTRODUCCIÓN

Aunque en nuestro país exista la prohibición en cuanto a la fabricación e instalación de las minas antipersona, desde que se aceptó el tratado de Ottawa, este ideal no se ve reflejado en el devenir del conflicto. De hecho, la problemática de minas en Colombia se encuentra en una evolución permanente [2], los grupos armados al margen de la ley se han preocupado por crear artefactos explosivos capaces de evadir las técnicas de detección militares, aunque estas se modifiquen y tecnifiquen constantemente. Ese proceso evolutivo, dio origen a artefactos explosivos improvisados (AIE) ó minas antipersona (MAP) no convencionales, es decir, minas de fabricación artesanal que utilizan botellas de gaseosa, tubos de PVC o jeringas como contenedores para los explosivos. Este tipo de minas de elaboración sencilla y rápida, ha ocasionado que el número de AEI enterrados aumente considerablemente año tras año en el suelo Colombiano.

Partiendo de esta problemática y continuando en la línea de investigación dentro del grupo de investigación A+D, que busca mejorar las técnicas de detección de MAP se desarrolló este proyecto, en el cual se caracterizó y se puso a prueba el radar RASCAN. El objetivo es identificar la viabilidad de usar la tecnología del radar mencionado, como una opción de apoyo para mejorar los métodos con los que cuenta actualmente el Ejército Colombiano en la detección de MAP no convencionales y además aportar conocimiento en el campo investigativo relacionado.

Con el fin de alcanzar el objetivo planteado, se realizaron pruebas de campo con el radar RASCAN y partiendo de los resultados de las mismas se conformaron los protocolos más óptimos para adquirir imágenes relevantes, es decir, imágenes que realmente dieran cuenta de los objetos enterrados. Además se implementaron diferentes algoritmos de pre-procesamiento, los cuales posibilitaron la interpretación y mejora de las imágenes adquiridas, para que en un procesamiento posterior fuera posible identificar la forma del objeto enterrado. Con el fin de facilitar el proceso de identificación, se usó una pantalla LCD de 480x800px en la cual se presenta de forma visual y clara el contorno del objeto detectado, entregándole así a la persona que opere el radar RASCAN un señal visual que es de interpretación fácil y rápida.

# 1 RADAR RASCAN

## 1.1 FÍSICA DEL RADAR RASCAN

Es importante conocer cómo se conforman las imágenes de acuerdo al funcionamiento del radar, para lo cual es de utilidad comprender el comportamiento físico del mismo. La intensidad de cada uno de los pixeles de la imagen es un múltiplo entero de 360, calculado en la ecuación (3), este coeficiente es basado en la interferencia generada por la onda emitida y la onda reflejada, ambas se encuentran en función de la distancia a la que se encuentre enterrado el objeto y a la frecuencia de radiación del radar. Además cada una de las imágenes es entregada en una polarización específica ya sea paralela o cruzada, la cual es aplicada respecto a la línea en la cual se realiza el barrido durante la adquisición. No es de interés de este trabajo, realizar todo el desarrollo matemático para demostrar el comportamiento ondulatorio del radar, sin embargo a continuación se muestran de manera sencilla las ecuaciones que describen este proceso [3]:

La onda emitida desde el radar se puede aproximar a una señal continua oscilante que se puede expresar como

$$O_i(t) \approx \cos(2\pi ft + \theta_0) \quad (1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia,  $t$  el tiempo y  $\theta_0$  la fase de la onda que incide en el suelo. Si en el suelo que está siendo analizado hay presencia de algún objeto enterrado la onda es reflejada y viajará en dirección opuesta a la incidente, una vez en el punto donde se genera la señal emitida es posible expresar la onda reflejada como

$$O_r(t) = \cos\left(2\pi ft + \frac{4\pi fd}{v} + \theta_0\right) \quad (2)$$

Esta ecuación es dependiente de  $d$  que representa la distancia desde la fuente hasta el objeto enterrado y  $v$  es la velocidad de propagación de las ondas en el medio.

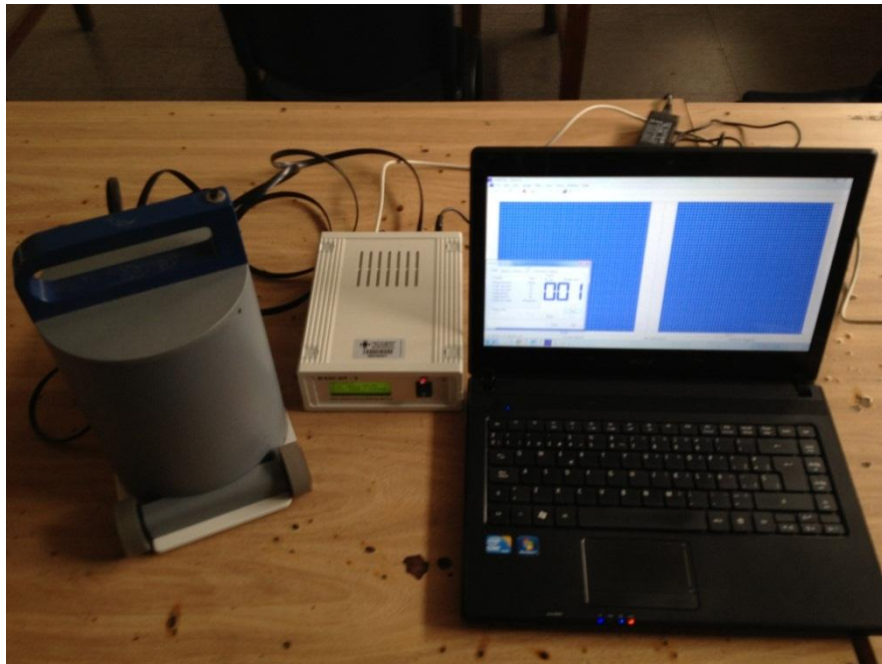
Finalmente, la amplitud de la señal de interferencia, a partir de la cual se conforman las imágenes, queda dependiente de la distancia  $d$ , la frecuencia  $f$  y la velocidad de propagación  $v$ , mas no del tiempo ni de la fase de las señales

$$A_{in}(d) = \frac{4\pi f d}{v} \quad (3)$$

## 1.2 FUNCIONAMIENTO DEL RADAR RASCAN

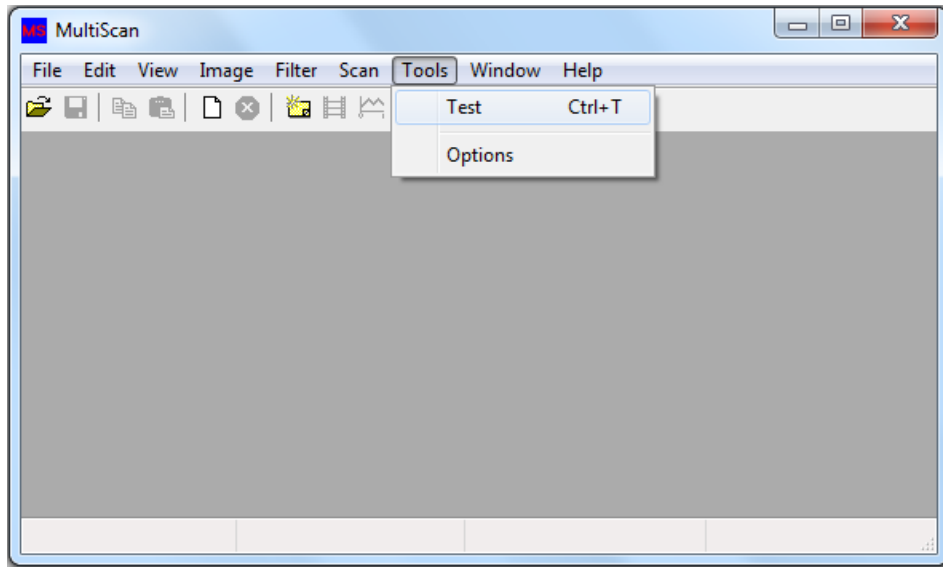
A continuación se describen los pasos a seguir para adquirir un conjunto de imágenes con el radar RASCAN, con el fin de plantear un protocolo de uso a partir del cual se garantice el buen uso del radar, la prevención de accidentes y la extracción de imágenes que aporten información relevante.

1. Realizar el ensamble de todas las partes del sistema como se muestra en la Figura 1, La conexión del sistema es a 110 VAC. Igualmente se recomienda tener el computador conectado a su cargador respectivo.





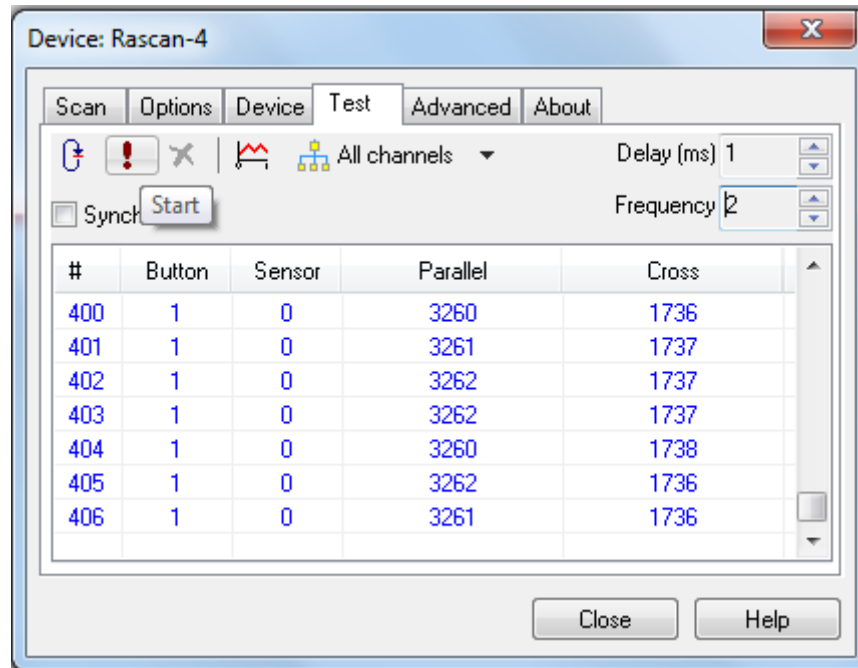
**Figura 1. Conexión radar RASCAN, unidad de control y PC.**

2. Probar el funcionamiento correcto del sistema ensamblado. Para hacerlo se utiliza el *software* MultiScan [4] proporcionado por el fabricante, Figura 2, una vez en este se selecciona la opción *Tools > Test*.



**Figura 2. Entorno de trabajo del software *MultiScan*.**

3. Un cuadro de diálogo como el mostrado en la Figura 3 se despliega. Se da inicio dando clic en . Una vez inicia la prueba el software arroja unos valores, que representan la intensidad de la señal en el punto escaneado. Para detener la prueba se debe hacer clic en ; si el funcionamiento es incorrecto, es decir, no aparece ningún valor en la tabla, es necesario revisar las conexiones del sistema y que el controlador sí este encendido.



**Figura 3. Ventana de test, prueba de funcionamiento.**

4. Para adquirir un conjunto nuevo de imágenes, se selecciona la opción *Scan* > *StartScan*, se despliega un cuadro de diálogo en el cual las dos primeras opciones son las más relevantes

4.1. En la Figura 4 se muestra el menú generado al seleccionar la pestaña *Options*, a través de la cual es posible configurar múltiples parámetros: las dimensiones el área a recorrer, el tamaño de cada desplazamiento tanto en el eje X como en el eje Y, seleccionar el orden del barrido, las direcciones de los desplazamientos ó seleccionar una frecuencia específica aunque se usan normalmente las 5 para obtener una mejor respuesta.



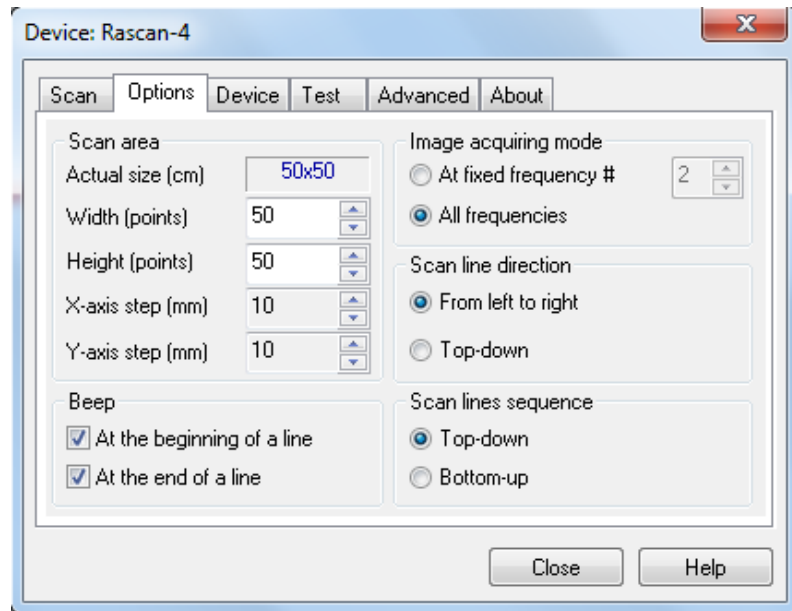
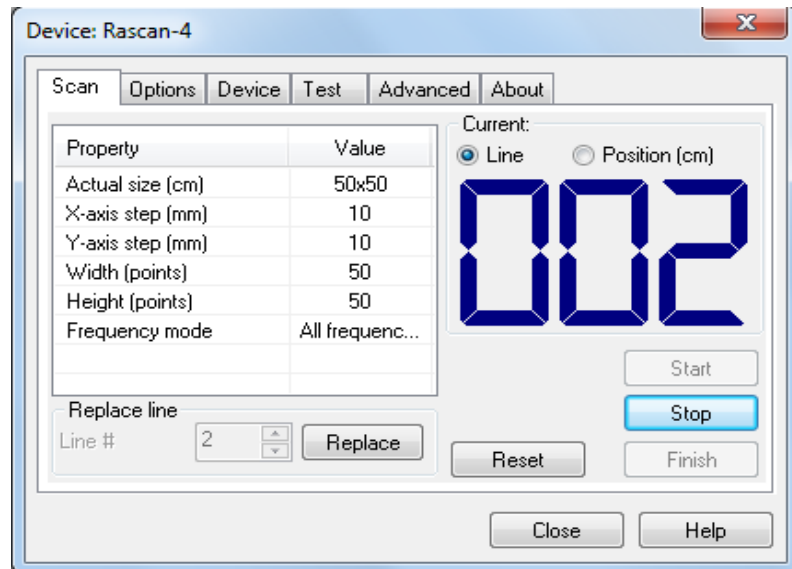


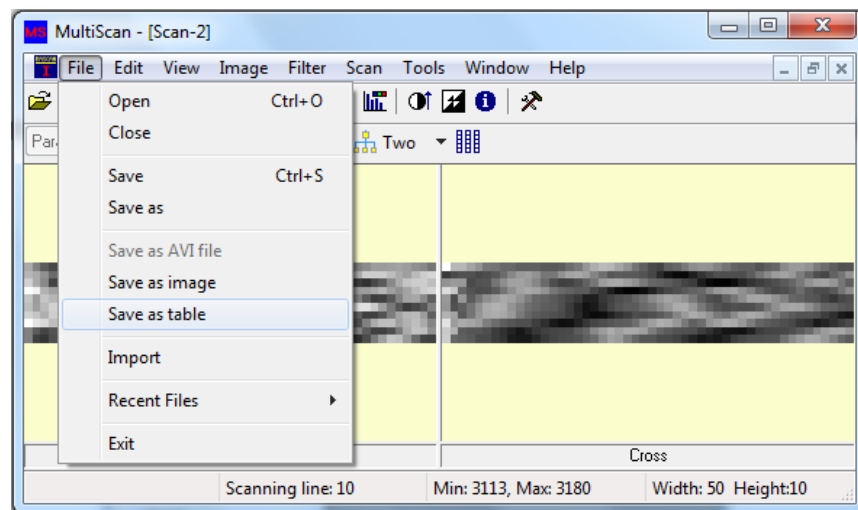
Figura 4. Ventana de opciones.

- 4.2. En la Figura 5 se muestran las opciones que brinda la pestaña *Scan*, en la que es posible iniciar y detener el proceso de adquisición de las imágenes. Además, es posible reemplazar una línea específica que se observe incoherente con el resultado parcial o reiniciar todo el proceso de ser necesario.
5. Una vez realizado todo el barrido del área propuesta se finaliza el proceso y las imágenes generadas por el radar pueden ser guardadas en diversos formatos. Para el procesamiento posterior se recomienda almacenarlas en forma de tabla, así como se muestra en la Figura 6.



**Figura 5. Ventana para seguir el barrido, Scan.**

De ser necesario profundizar en el manejo del *software* se puede acceder al manual [4] que proporciona la compañía y en el cual detallan de una manera más profunda el funcionamiento de todas las herramientas, lo cual no es necesario en esta aplicación.



**Figura 6. Guardar las imágenes como tabla de datos**

## **2 PRUEBAS DE CAMPO**

La calidad de las imágenes adquiridas desde el radar es dependiente de muchos factores, como lo son el tipo de material y la profundidad del objeto enterrado, la velocidad del barrido o la humedad del suelo. Con el fin de realizar una correcta caracterización del radar RASCAN y siguiendo el protocolo descrito en el capítulo anterior se realizaron múltiples pruebas, con las cuales fue posible identificar cómo se modificaba la calidad de las imágenes ante variaciones en algunos de los factores mencionados.

Inicialmente se desarrollaron procedimientos en campo abierto con el fin de simular el escenario donde son enterradas las minas antipersona y posteriormente se realizaron pruebas en un ambiente de laboratorio donde se pudieran controlar algunas de las variables modificadoras de la calidad en la imagen.

### **2.1 PRUEBAS EN CAMPO ABIERTO**

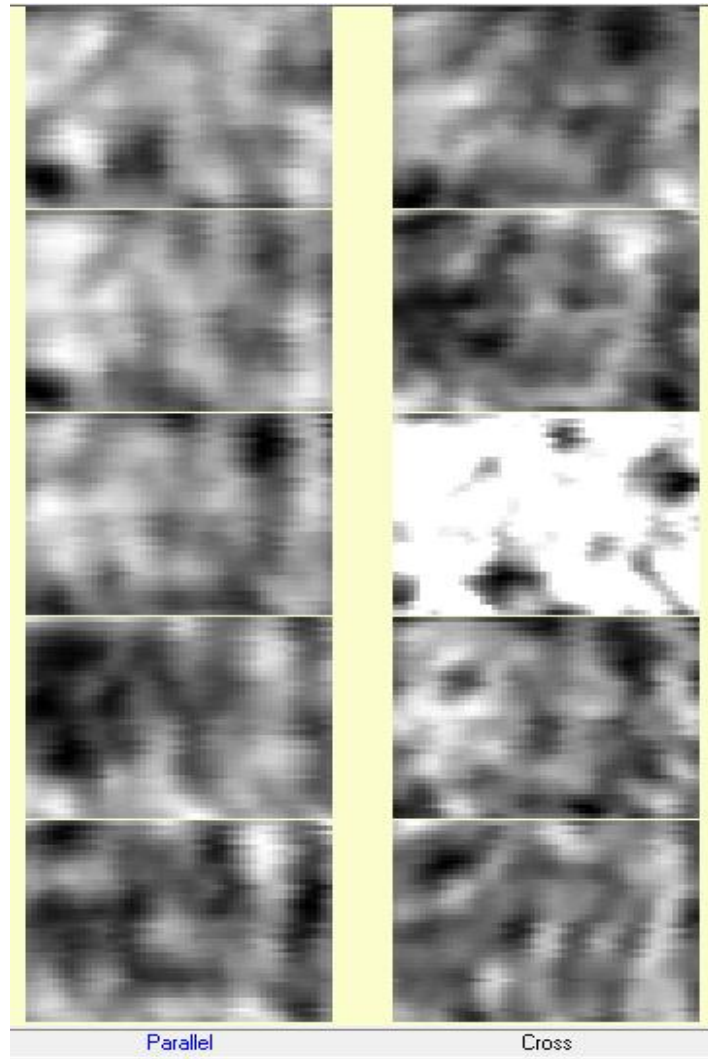
Estas pruebas fueron realizadas en un terreno muy húmedo y denso. Como se muestra en la Figura 7, se enterraron tubos de PVC y cajas plásticas los cuales son materiales comunes en MAP no convencionales. Sobre este terreno, se realizaron dos pruebas que dieran cuenta del funcionamiento del radar en esta aplicación; una con los objetos enterrados a 30 cm de profundidad y otra variando la profundidad de los objetos a 1 cm.



**Figura 7. Terreno en campo abierto y muestras enterradas para pruebas.**

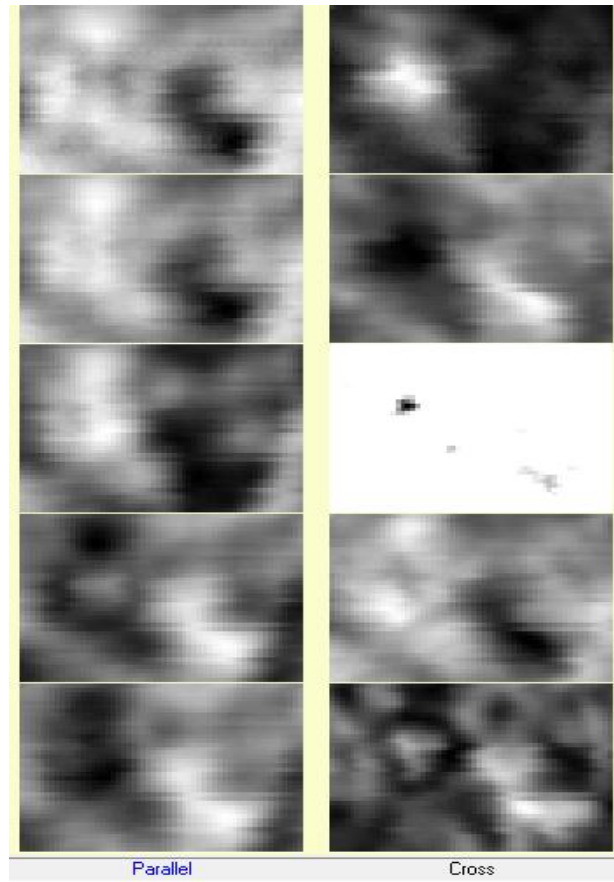
Para la prueba de 30 cm las imágenes resultantes se presentan en la Figura 8, a partir de las cuales no es posible detectar ninguno de los objetos que fueron enterrados. Sobre la misma muestra se realizaron varios barridos para detectar variaciones, pero no se obtuvo ningún resultado relevante, todas las imágenes fueron muy similares e incomprensibles, alejadas de la referencia que se poseía. Debido a que todas las pruebas realizadas a esta profundidad arrojaron resultados muy pobres, se optó por realizar las pruebas con los objetos enterrados a 1 cm y descartar así los errores generados en el proceso de adquisición debido a la distancia entre los objetos y el radar.

Como se describe a continuación, los resultados obtenidos en la prueba a 1 cm de profundidad tampoco fueron sobresalientes; por ende no se realizaron mas pruebas en este terreno y se optó por desarrollarlas en un ambiente controlado.



**Figura 8. Prueba en campo abierto, 30 cm de profundidad.**

Para la prueba a 1 cm, en la cual los objetos quedaban al ras del suelo estudiado, se encontró una pequeña mejoría en comparación con la prueba anterior. Aunque las imágenes tampoco aportaban información suficiente como para realizar un procesamiento digital y detectar algún objeto. En la Figura 9 se aprecia una mayor claridad de los componentes y aunque no se identifican bien las formas, si se perciben cambios más notorios de intensidad.



**Figura 9. Imágenes en campo abierto 1 cm profundidad.**

Debido a que las imágenes resultantes en este tipo de terrenos son demasiado borrosas y la cantidad de ruido que contienen no permite identificar la forma de los objetos, las imágenes de estas pruebas no fueron utilizadas durante el desarrollo del trabajo.

Con el fin de mejorar este tipo de resultados tan deficientes, se generó un nuevo foco de investigación en busca de técnicas que permitan obtener imágenes que transmitan información relevante. Específicamente en [5], se desarrolló una investigación con el objetivo de aumentar y mejorar la resolución de las imágenes capturadas con el radar RASCAN, facilitando la detección de los objetos en la imagen.

## 2.2 PRUEBAS EN AMBIENTE CONTROLADO

Partiendo de las dificultades que se presentaron en campo abierto y viendo que ninguna prueba arrojaba una imagen que diera cuenta de lo que se había enterrado, se diseñó un espacio para pruebas controladas en el cual fuera realizar pruebas fácilmente, variando la profundidad de los objetos, cambiando el material del suelo y sin tener la dependencia del clima. El espacio diseñado consiste en una caja de madera de 105cm × 80cm × 30cm, Figura 10, acompañado de una lámina plástica en la cual se encuentran las marcas métricas para realizar los desplazamientos de la manera correcta.

Con el fin de mejorar la dificultad que se presentó en las pruebas de campo con respecto a la densidad del terreno, la caja se llenó con arena de pega y se enterraron objetos de prueba. Los resultados iniciales fueron imágenes con alta concentración de ruido, debido a esto se consultó con el fabricante y se decidió dejar secar la arena. Para validar el secado se realizó una prueba de humedad en la cual se obtuvo un porcentaje del 0.6 % de este modo se mejoró la calidad de las imágenes sustancialmente.



**Figura 10. Cajón para pruebas controladas.**

A continuación, se describen algunas de las pruebas realizadas y cuáles fueron las imágenes obtenidas ante cambios en las variables del sistema. Para comenzar, se tomaron unas muestras de referencia, en las cuales los objetos fueron enterrados a no más de 5 cm. Posteriormente a algunas de las muestras se les modificó la profundidad, el material de relleno y la posición, entre otras características. A partir estos resultados, fue posible conocer la respuesta del radar RASCAN ante los cambios descritos anteriormente y generar unas pautas para mejorar el proceso de adquisición.

### **2.3 PRUEBAS DE REFERENCIA**

Las pruebas de referencia se realizaron usando elementos comunes en la fabricación de MAP no convencionales como lo son botellas, tubos de PVC o cajas plásticas. Además se realizaron pruebas con materiales metálicos y espacios vacíos, las cuales sirven como un punto de comparación para conocer las diferentes respuestas del radar y lograr una mejor caracterización del mismo.

El *software MultiScan* fue configurado para barrer un área de 50cm × 35cm, con pasos de 1 cm en ambos ejes, empezando desde la esquina inferior izquierda avanzando y siempre de abajo hacia arriba.

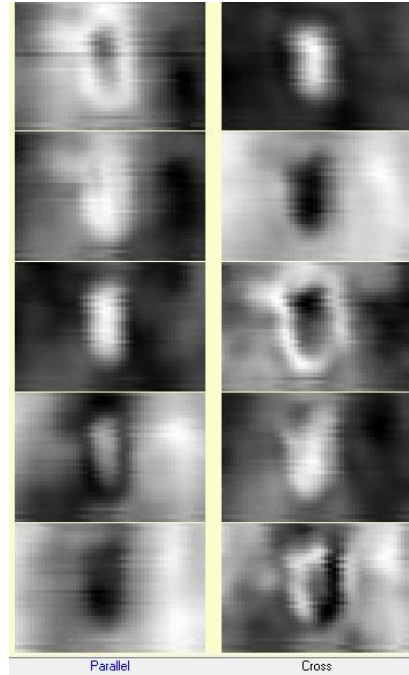


### 2.3.1 Botellas

#### Plástica



**Figura 11. Botella plástica.**



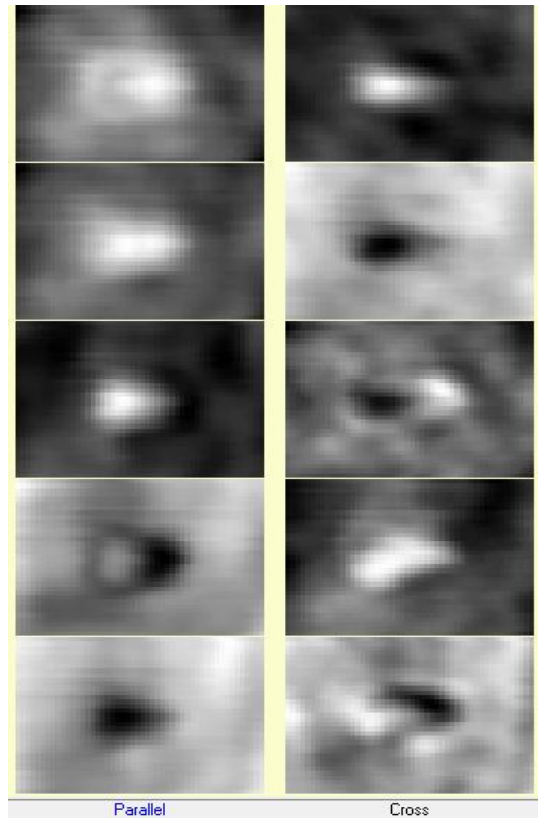
**Figura 12. Resultados botella plástica.**

Se utilizó una botella plástica de una bebida refrescante comercial de 500 ml como la mostrada en la Figura 11. Para la imagen de referencia se tomó una botella vacía, enterrada en posición perpendicular al sentido del barrido y cubierta por muy poca arena en la superficie, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 12.

## Vidrio



**Figura 13. Botella de vidrio.**



**Figura 14. Resultados botella de vidrio.**

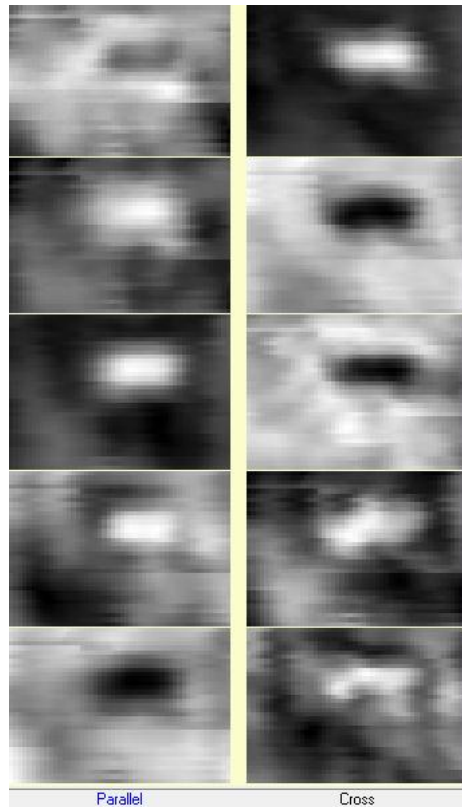
Para la prueba con vidrio se utilizó una botella de una bebida refrescante comercial de 300 ml, Figura 13, la cual no es muy común en las MAP no convencionales, pero sirve como punto de comparación ante cambios en los materiales enterrados. Para la imagen de referencia se tomó una botella vacía, enterrada de forma paralela a la dirección del barrido y el resultado se muestra en la Figura 14.

### 2.3.2 *Tubo PVC*



**Figura 15. Tubo de PVC.**

Debido a que este material es altamente utilizado para la fabricación de MAP no convencionales en nuestro país se utilizó una muestra como la mostrada en la Figura 15, para sacar la imagen de referencia el tubo fue enterrado vacío, en posición paralela al barrido y cubierto con una capa de arena no mayor a 2mm, las imágenes obtenidas se presentan en la Figura 16.



**Figura 16. Resultados tubo de PVC.**

### **2.3.3 Cajas Plásticas**

Usando cajas de derivación fabricadas en materiales plásticos, se realizaron pruebas para comprender la respuesta del radar ante este tipo de material. Se realizaron pruebas con dos cajas una de forma cuadrada, Figura 17, y otra de forma circular, Figura 18.

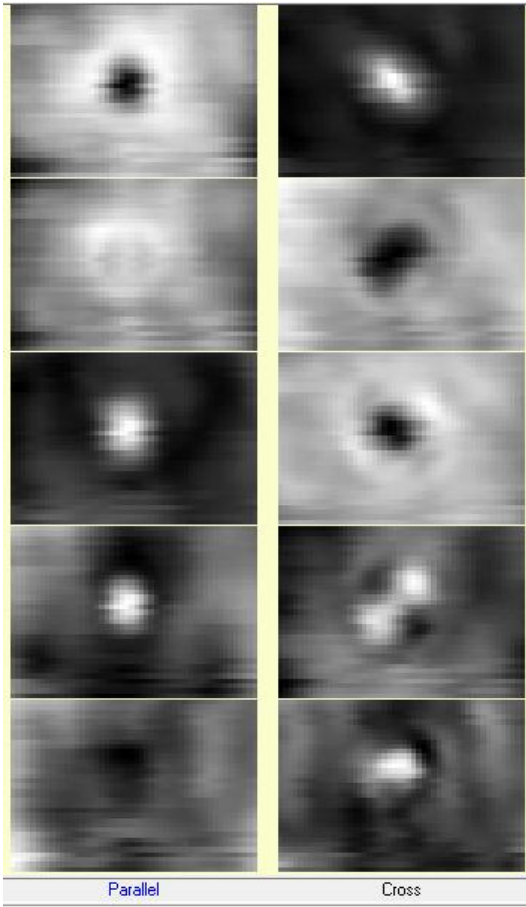


**Figura 17. Caja plástica cuadrada.**

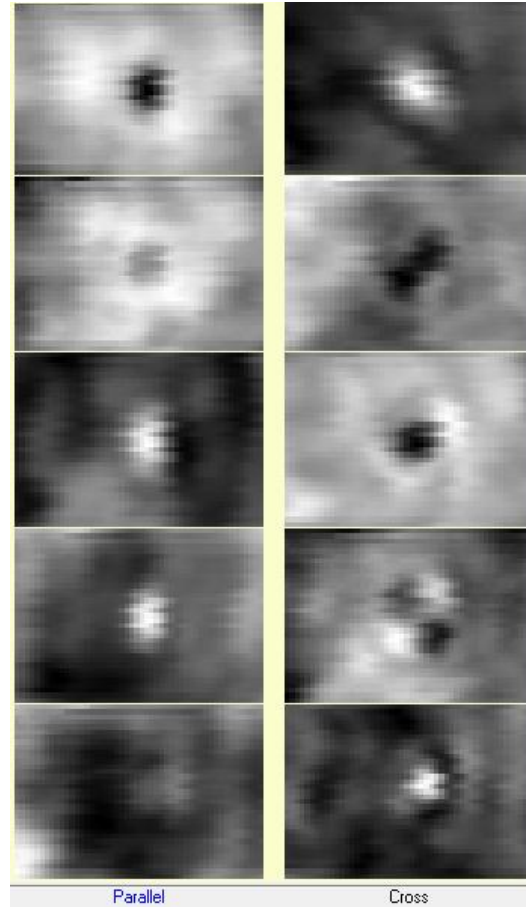


**Figura 18. Caja plástica circular.**

Para detectar si había cambios en la respuesta del radar ante la forma de cada elemento, ambas fueron enterradas en pruebas independientes y cubiertas con poca arena. Los resultados se muestran en la Figura 19 y la Figura 20 respectivamente.



**Figura 19. Resultado caja plástica cuadrada.**



**Figura 20. Resultado caja plástica circular**

#### **2.3.4 Metales**

Debido a la estabilidad y precisión que presentan los detectores de metales en la actualidad, las MAP no convencionales que se entierran en el país carecen de metales en su gran mayoría. Con fines prácticos y como complemento a la caracterización del radar RASCAN se realizaron pruebas con diferentes materiales metálicos, como se describe a continuación.

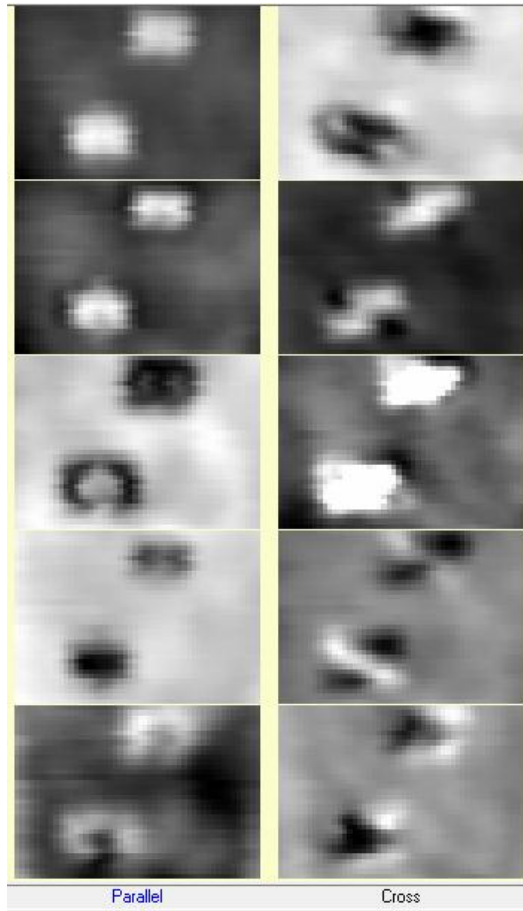
## Aluminio



**Figura 21. Lámina de aluminio.**

Esta prueba se realizó utilizando dos láminas de aluminio, similares a la mostrada en la Figura 21. Las láminas tienen un grosor de 0.15 cm cada una y fueron enterradas simultáneamente dejando un espacio considerable entre ambas. Al igual que en las pruebas anteriores, las láminas fueron cubiertas con poca arena, de manera que quedaran casi visibles desde la superficie. Luego de realizar el barrido las imágenes generadas se presentan en la Figura 22.





**Figura 22. Resultados para láminas de aluminio.**

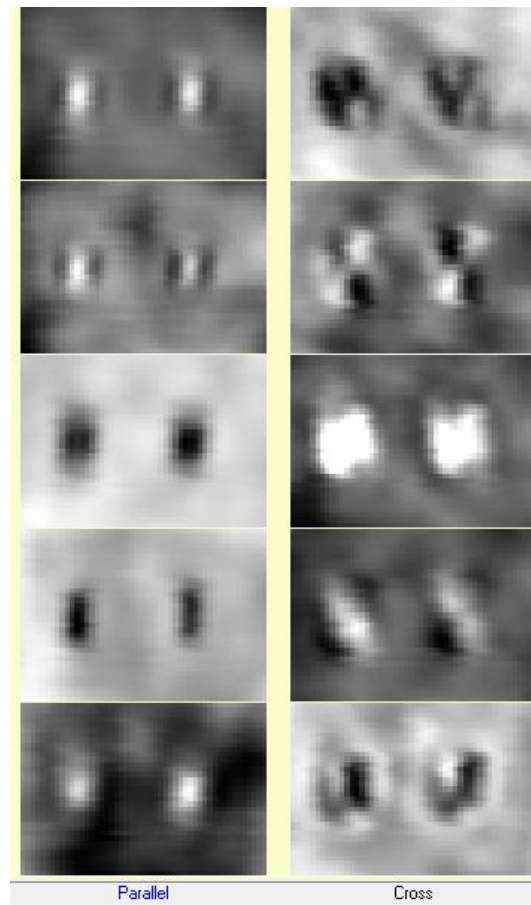
## Hierro



**Figura 23. Barra de Hierro.**



Siguiendo con las pruebas sobre metales se enterraron dos barras de hierro, las cuales tienen un grosor de 1.24 cm, Figura 23, estas se adentraron de forma que quedaran cerca a la superficie y lo suficientemente espaciadas para no confundirlas. Después de realizar el barrido las imágenes resultantes fueron las presentadas en la Figura 24.



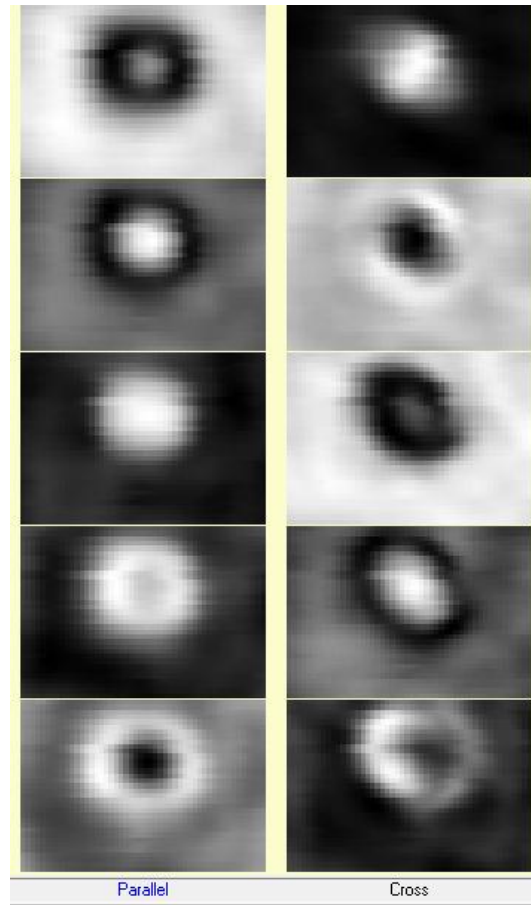
**Figura 24. Resultados para las barras de hierro.**

### 2.3.5 *Hueco*



**Figura 25. Hueco en la arena.**

Para tener otro punto de referencia, se realizó una prueba creando un vacío en la arena, es decir, no se entierra ningún objeto como se aprecia en la Figura 25 y se coloca la tabla de corte para realizar el barrido. Después de realizar esta prueba, el resultado obtenido fue muy bueno como se aprecia en la Figura 26, la forma de las imágenes generadas por el radar dan cuenta perfectamente de la forma que tomó la arena.



**Figura 26. Resultados en la prueba con el hueco.**

Todos los resultados mostrados anteriormente fueron extraídos de un banco de imágenes, el cual se ha elaborado a lo largo de pruebas realizadas en el ambiente controlado. Las imágenes presentadas para cada caso son consideradas como un conjunto de imágenes bien condicionadas, esto significa que dan cuenta de la información más apropiada, partiendo de una comparación en la cual se tiene como referencia el objeto enterrado. Luego, estas imágenes de referencia servirán como punto de partida para realizar las comparaciones pertinentes al aplicar modificaciones sobre las variables del sistema.

## 2.4 PRUEBAS DE COMPARACIÓN

Debido a que las botellas plásticas y los tubos de PVC son muy utilizados en la fabricación de MAP no convencionales y que la respuesta del radar en ambos casos es muy similar, las pruebas de comparación se realizaron utilizando solo la botella; con el fin de realizar una comparación entre respuestas del radar se también se compararon las barras de hierro. Para la botella plástica fueron modificadas de manera independiente la profundidad, el material de relleno y la posición respecto a la dirección del barrido, en el caso de las barras metálicas se modificó la profundidad y la posición. Finalmente, el aspecto del terreno fue alterado, ya que durante las pruebas de referencia el suelo tenía un acabado parejo y sin irregularidades notorias.

Para ilustrar los resultados obtenidos se conformaron algunas tablas, en las que se muestra la imagen capturada luego de realizar la modificación indicada. Por facilidad en la presentación y para hacer más claro el análisis, se optó por utilizar herramientas de procesamiento de imagen que utilizan la redundancia. Se tomaron las 10 imágenes obtenidas con el radar RASCAN y se llevó a cabo el procesamiento que se explica en el capítulo 3 para obtener una sola imagen que transmita la información necesaria.

### 2.4.1 Variación de parámetros en la botella

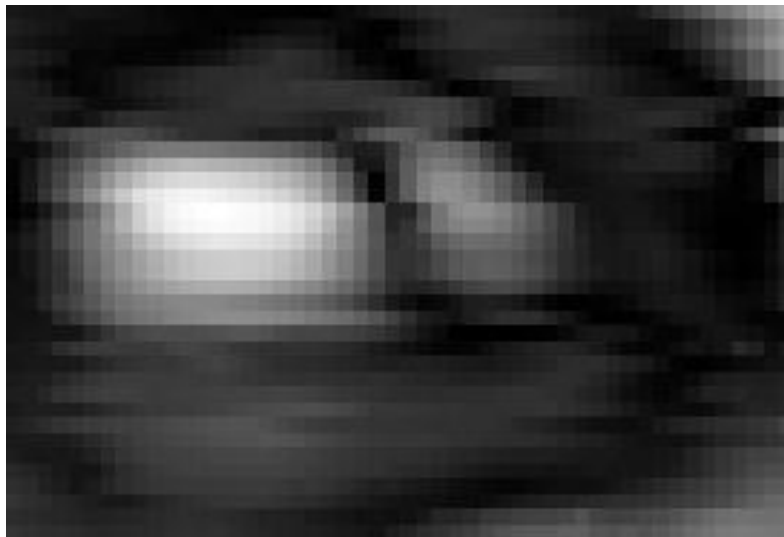

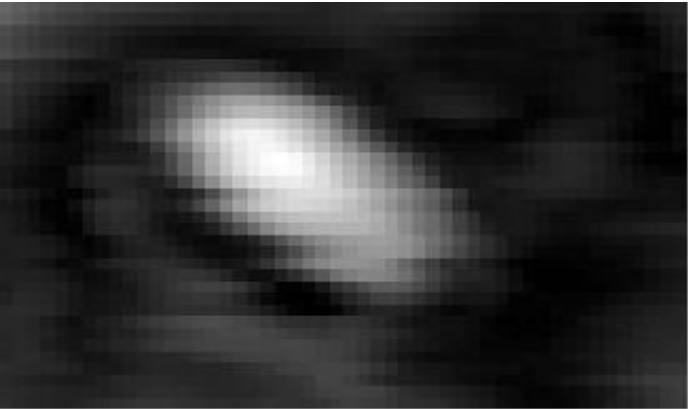


Figura 27. Imagen de referencia para una botella plástica.

En la Figura 27 se observa una mancha blanca sobresaliente, esta representa una botella plástica enterrada a no más de 2 cm de profundidad, sin ningún contenido en su interior y en posición paralela a la dirección del barrido. Esta figura será la referencia para comparar los resultados que se muestran a continuación.

POSICIÓN RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE BARRIDO	RESULTADO
<b>Vertical</b>	
<b>Diagonal</b>	

**Tabla 1. Resultados variando la posición de la botella, respecto a la dirección del barrido.**

En la Tabla 1 aparecen los resultados correspondientes a pruebas realizadas modificando la posición de la botella respecto a la dirección del barrido. Ambos resultados fueron buenos y muy similares al obtenido en la imagen de referencia, dejando claro que la posición del objeto no representa una variable relevante al momento de capturar una imagen nueva.

En el resultado con la botella en posición vertical, son notorias unas líneas desplazadas sobre la mancha blanca. Este corrimiento en los píxeles es un error en la adquisición que se puede evitar teniendo en cuenta las siguientes instrucciones:

- La velocidad en el barrido: se debe procurar que siempre sea lo más constante posible y que el recorrido de cada línea tarde el mismo tiempo durante toda la prueba. Cambios bruscos de velocidad generan píxeles desfasados o intensidades incoherentes con el resto de la imagen. Además es recomendable que cada línea sea recorrida en no menos de dos segundos.



**Figura 28. Diagrama de referencia para los barridos con el radar.**

- La posición de inicio: el barrido de cada línea dentro de la prueba debe iniciar siempre en el mismo punto, es decir, la cabeza sensora al iniciar el recorrido siempre debe hacerlo desde el mismo punto en el eje y.
- El desplazamiento horizontal: se debe garantizar que los pasos en el eje x sean de la magnitud que se programó desde el software, es decir, la magnitud de cada desplazamiento horizontal debe ser constante y corresponde al valor programado.

Las instrucciones anteriores, se deben tener en cuenta siempre que se desee realizar un procedimiento nuevo, del cumplimiento de estas depende la calidad de la imagen que se obtenga. Por estos motivos es recomendable que el radar sea situado sobre una plataforma automática, ya que los desplazamientos realizados de manera manual no siempre logran cumplir con los requisitos y generan errores notorios dentro de las imágenes.

Continuando con los resultados en la Tabla 2 se presentan las imágenes obtenidas variando la profundidad. Con el fin de no alterar de manera significativa los resultados, cada prueba fue realizada el mismo día de manera consecutiva, utilizando siempre la misma botella y manteniendo la superficie del terreno lo más pareja posible.

De las imágenes que aparecen en la Tabla 2, es evidente el deterioro que sufre la señal al aumentar la distancia entre el objeto y el radar.

Este resultado era predecible, pues entre más arena se encuentre en el recorrido, mayor será la absorción de señal, aunque se esperaba que, por las condiciones técnicas del radar, los resultados fueran mejores. En la imagen capturada a 15 cm, se observa en el centro una tonalidad blanca sobresaliente, que no es tan relevante como la observada en la imagen de referencia, pero da una idea acerca de la presencia de la botella. En las otras dos imágenes no es rescatable ningún elemento relevante, la tonalidad de gris se mantiene muy pareja dando cuenta del suelo y aunque aparecen manchas ninguna representa la botella, son cambios de intensidad generados por errores en la adquisición, los cuales se hacen más notorios al aumentar la profundidad.

En la Tabla 3, se muestran las imágenes obtenidas al enterrar la botella con algún contenido en su interior. La profundidad de las muestras siempre fue menor a 2 cm y fueron tomadas en un lapso de tiempo corto, para que la humedad de la arena no afectara las pruebas.

Los resultados obtenidos son claros, la botella llena de agua fue detectada de manera relevante, de hecho con respecto a la botella vacía se pudo apreciar mucho más claramente. Situación contraria sucedió con las otras dos muestras, en ambos casos las intensidades que se logran observar son todas muy similares, de modo que la botella se confunde con el suelo y no logra ser detectada.

Las pruebas modificando el contenido de la botella, permitieron determinar que la señal capturada en el radar, es dependiente tanto del material del objeto como de su contenido, agregando así una variable al proceso de adquisición. Además, se pudo concluir que si los materiales contenidos en el objeto enterrado, son de composición similar al suelo donde se conforman las imágenes, los objetos logran confundirse con el suelo evitando así su detección con el radar RASCAN.

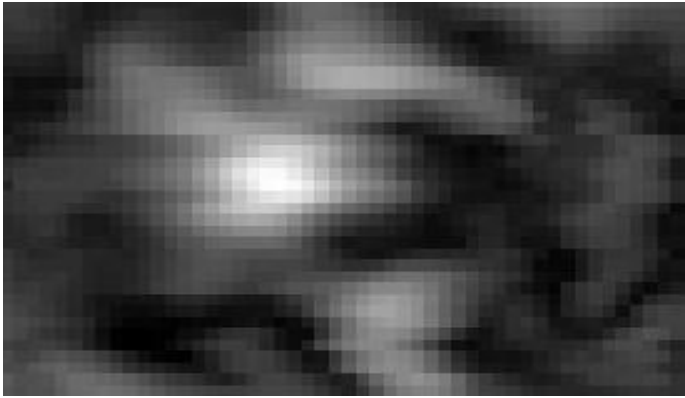
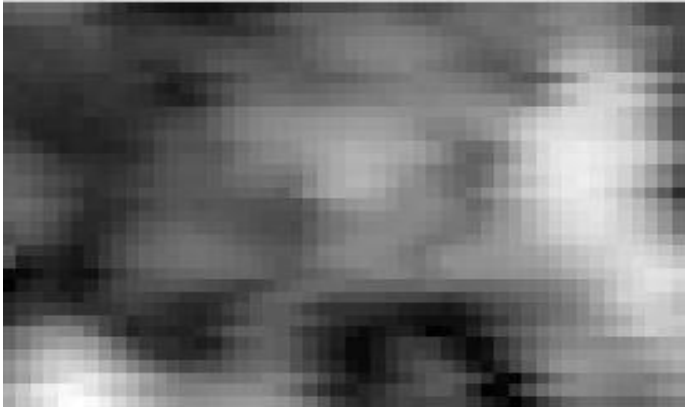
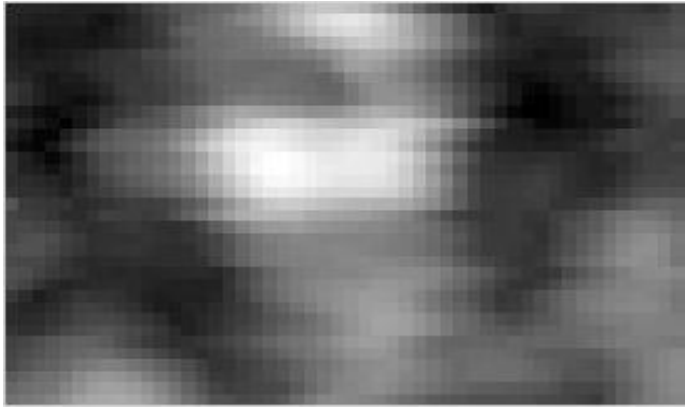
PROFUNDIDAD	RESULTADO
15 cm	
20cm	
25 cm	

Tabla 2. Resultados obtenidos variando la profundidad de la botella.






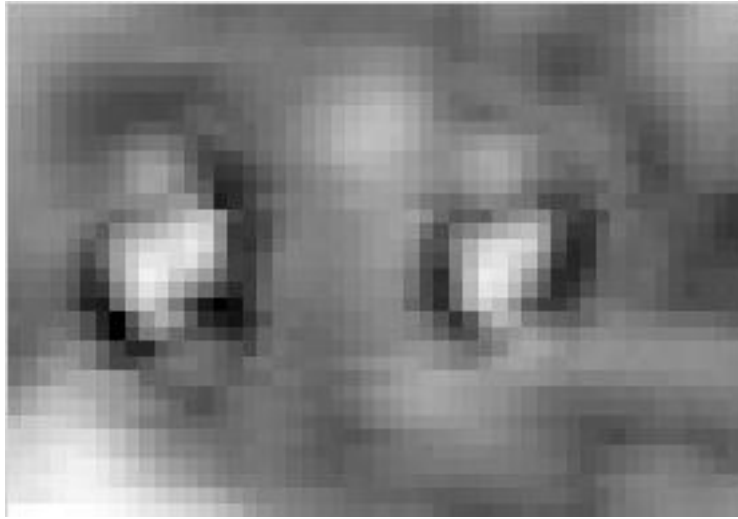
MATERIAL RELLENO	RESULTADO
<p data-bbox="402 489 505 531"><b>Agua</b></p>	
<p data-bbox="394 993 513 1035"><b>Arena</b></p>	
<p data-bbox="391 1497 516 1539"><b>Piedra</b></p>	

Tabla 3. Resultados cambiando el contenido de la botella.

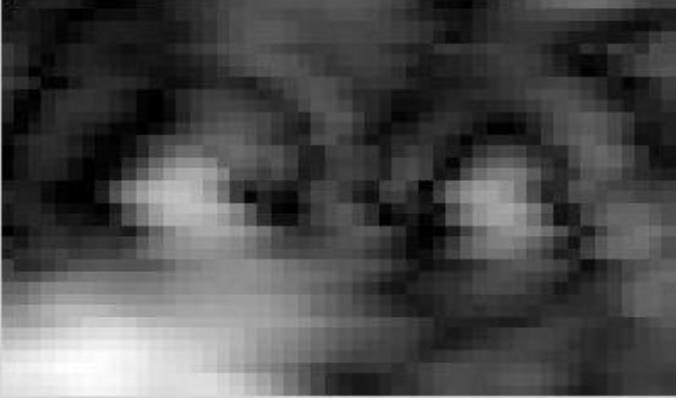
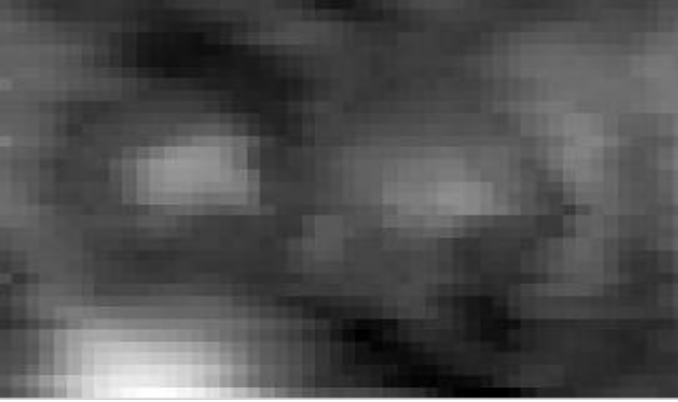

#### 2.4.2 Variación de parámetros en las barras de hierro.



**Figura 29. Imagen de referencia para las barras metálicas.**

En las pruebas realizadas usando las barras metálicas, siempre se presentó un patrón relevante dentro de las imágenes, alrededor de cada barra se formaron circunferencias que variaban la intensidad a medida que el radio de estas aumentaba. Además, la diferencia de intensidad entre el suelo y el objeto, es mucho más marcada que en las pruebas con la botella. Resultado esperable, dada la afinidad entre los metales y las señales electromagnéticas.

En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos, al modificar la profundidad de las barras metálicas. Al igual que en la prueba realizada con la botella, las imágenes pierden calidad y no transmiten la misma información a medida que aumenta la distancia de la cabeza sensora. Con esta prueba, se reafirma la incapacidad del radar RASCAN para detectar objetos a profundidades mayores a los 15 cm. Incluso en los materiales metálicos, en los cuales los resultados habían sido claros y contundentes, al ponerlo a prueba con la profundidad la claridad de los objetos desmejoró y nuevamente el suelo se volvió el común denominador dentro de la imagen final.

PROFUNDIDAD	RESULTADOS
15 cm	
20cm	
25 cm	

**Tabla 4. Resultados variando la profundidad de las barras de hierro.**

## 2.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Durante el desarrollo de la investigación, se realizaron pruebas con diferentes objetos, enterrados en diferentes posiciones, de materiales diversos, con el terreno irregular, entre otras variables que pueden modificar los resultados de las imágenes. Con el fin de resumir las pruebas realizadas, se seleccionaron algunas muestras de diferentes pruebas y a cada una se le aplicaron los algoritmos de procesamiento descritos en el capítulo 3.

A la salida de los algoritmos diseñados, se obtiene una imagen con el contorno del objeto que el radar RASCAN logró detectar. Partiendo de esta imagen, se evaluó cualitativamente el resultado. Este proceso consistió en observar el contorno arrojado por los algoritmos y compararlo con la forma del objeto que se había enterrado.

Calificación Cuantitativa	Calificación Cualitativa.
1	No se ve nada
2	Formas irregulares
3	La forma similar al objeto.
4	Forma clara + ruido.
5	Forma clara.

**Tabla 5. Rangos de calificación para las imágenes.**

Con base en la Tabla 5, a las calificaciones cualitativas se les asignó un valor numérico y con estos, se calcularon promedios de desempeño del radar ante ciertas situaciones. Los resultados de todas las pruebas se pueden resumir en la Tabla 6, en esta se muestran los promedios obtenidos por el radar, en ciertos casos de interés para la investigación y con los cuales es posible emitir un juicio de valor, acerca del funcionamiento del radar RASCAN, como detector de objetos enterrados.

Característica	Promedio [0,5]
Objetos vacíos	3,875
Objetos arena	1,71
Objetos agua	3,94
Huecos	4,87
Metales	4,29

**Tabla 6. Promedios de desempeño del radar RASCAN.**

Es importante aclarar cuáles fueron las condiciones en las pruebas, para obtener las imágenes que integraron los grupos para el cálculo de los promedios mostrados en Tabla 6. En las pruebas en las cuales se enterraron elementos (botellas, tubos, cajas, metales), el terreno se mantuvo parejo y sin irregularidades notorias, además la profundidad de los objetos nunca fue mayor a 5 cm.

También se realizaron pruebas, en las cuales la superficie era dispareja y con baches notorios. En estas el promedio de las imágenes siempre estuvo entre 0 y 1, sin importar qué objeto se hubiera enterrado, por este motivo no se presentan especificadas en una tabla aparte.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, de los promedios obtenidos es posible sacar algunas conclusiones:

- En las pruebas realizadas, las muestras de los objetos que simularon las minas (botellas, tubos y cajas plásticas), eran de diferentes tamaños y materiales. Pero la característica más relevante, a la hora de realizar la detección, fue el material que estuviera en el interior del objeto enterrado.
- Con el radar RASCAN, en la configuración de fábrica, la detección de objetos metálicos es más efectiva que la de objetos de otro tipo de material.
- Si el material depositado al interior de los objetos enterrados, es de una composición similar a la del suelo, la detección de los objetos pierde efectividad. En la respuesta del radar, la intensidad del objeto tiende a ser la misma que la del suelo.
- Todas las imágenes que se obtienen son de bordes redondeados. Esto ocasiona que la forma de los objetos en la imagen no sea muy precisa y discrepe de cierta manera con la forma del objeto real.
- Los huecos o variaciones de altura dentro de la superficie, son detectados de manera contundente por el radar RASCAN. Es en estos casos en los que el radar se desempeña de mejor manera, generando imágenes que dan cuenta de la forma del vacío de manera precisa.

### 3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

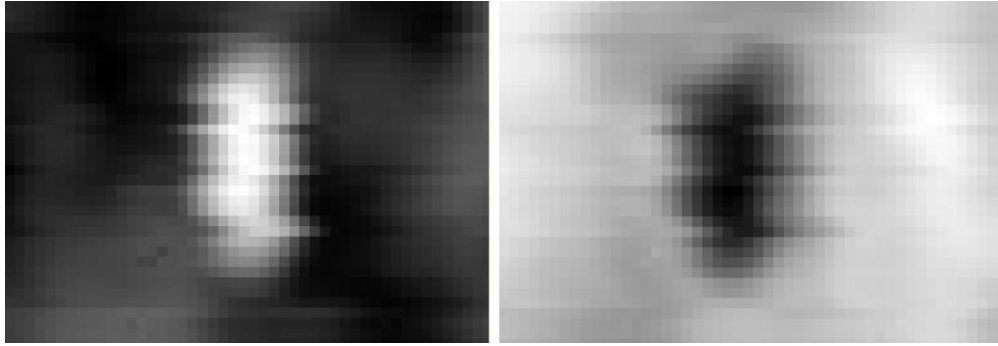
#### 3.1 ALGORITMO DE INTERPRETACIÓN

Inicialmente, se pensó en procesar cada una de las diez imágenes obtenidas por separado y a través de un análisis de resultados lograr concluir qué objeto se encontraba enterrado. El procedimiento descrito anteriormente no se implementó, debido a que desde el proceso de adquisición se detectó que no todas las imágenes contenían información importante y por ende procesarlas todas implicaría desperdiciar recursos y tiempo de cómputo.

Posteriormente, se investigó acerca de posibilidades para conformar una sola imagen a partir de las diez imágenes generadas por el radar RASCAN, de modo que se obtuviera una imagen que contuviera una información más relevante. Con base en [6] se implementó un algoritmo estadístico en el cual a cada imagen se le calculaba la moda, la cual representa el fondo de la imagen y luego este valor era restado pixel a pixel obteniendo una nueva imagen, en la cual el objeto enterrado era más sobresaliente, finalmente se sumaban pixel a pixel las diez imágenes modificadas obteniendo una sola imagen.

Este algoritmo fue descartado por varios motivos:

- Para un barrido pueden haber imágenes similares pero en colores opuestos, Figura 30, este par al ser sumado anula la mayoría de la información.
- En algunas pruebas aparecen imágenes con alta concentración de ruido, esto ocasiona que se distorsione la información real. Si estas imágenes son sumadas con otras se disminuye la efectividad del algoritmo.
- El valor de intensidad de cada pixel es diferente en todas las imágenes, la amplitud de este depende de la frecuencia de trabajo. Por esto, al sumarlas todas se le daría un mayor peso en el resultado final a ciertas imágenes y mientras que la información aportada por otras será insignificante.



**Figura 30. Imágenes del mismo barrido, intensidades opuestas.**

Aunque en algunas pruebas este algoritmo entregó resultados satisfactorios, no es de alta confiabilidad, ya que las dificultades que presenta afectan notoriamente datos relevantes dentro del proyecto.

## **3.2 MÉTODO IMPLEMENTADO CON BASE EN CORRELACIONES LINEALES**

### ***3.2.1 Correlación Lineal***

Realizar el cálculo de la correlación lineal entre dos variables, implica medir cuál es la intensidad de la relación existente entre las mismas [7]. Para comprender mejor el cálculo se suponen dos variables cualquiera, una independiente  $x$  y otra dependiente  $y$ . Posterior al cálculo se pueden sacar tres conclusiones: si a medida que  $x$  aumenta no hay un patrón de cambio en  $y$  se dice que no hay correlación. Por otro lado si  $x$  crece y  $y$  varía de manera paralela se dice que existe correlación, esta puede ser positiva si  $y$  crece o negativa si  $y$  decrece.

Con el fin de saber cuál es la fuerza de la relación que existe entre las dos variables, se calcula el coeficiente de correlación lineal,  $r$ , definido como

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (4)$$

El coeficiente de correlación lineal  $r$  siempre arroja un valor entre  $-1$  y  $+1$ , siendo  $-1$  una correlación negativa perfecta,  $0$  indica que no existe correlación y  $+1$  una correlación positiva perfecta.

### 3.2.2 Aplicación de la correlación a las imágenes

Con el fin de componer una sola imagen a partir de las diez entregadas por el radar RASCAN, se diseñó e implementó un algoritmo que permite calcular el coeficiente de correlación lineal entre las imágenes. El coeficiente  $r$  dará cuenta de la relación que existe entre las intensidades de dos muestras pixel a pixel.

El algoritmo de procesamiento inicia re-escalando todas las imágenes para que sus intensidades puedan ser expresadas en 8 bits, es decir el valor del pixel mínimo sea  $0$  y el máximo sea  $255$ , este proceso se hace basado en la ecuación (5)

$$P_n = \frac{P_0 - \min}{\max - \min} \quad (5)$$

Donde  $P_n$  es el valor del pixel nuevo,  $P_0$  es el valor original del pixel,  $\min$  representa el valor de amplitud mínima dentro de la imagen original mientras que  $\max$  representa el valor de amplitud máxima. Finalizado el proceso de escalar, en cada una de las imágenes el rango de amplitud es el mismo, pero en cada una de ellas la diferencia en intensidad de sus pixeles se mantiene constante.

Con las imágenes escaladas se realiza el cálculo de correlación entre todas, es decir, cada una de las diez va a tomar el papel de variable independiente con respecto a las otras nueve. De par en par se pasan por la ecuación (4) para calcular  $r$ , cada uno de estos resultados es organizado de modo que se conforma una matriz de  $10 \times 10$ , Figura 31, en la cual cada



componente  $C_{ij}$  es el coeficiente de correlación,  $r$ , de la imagen  $i$  con la imagen  $j$ , con  $i \wedge j \in [1,10]$ .

$$\text{MatrizCorrelaciones} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & \dots & C_{110} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & \dots & C_{210} \\ C_{31} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{101} & C_{102} & C_{103} & C_{104} & \dots & C_{1010} \end{bmatrix}$$

**Figura 31. Modelo de la matriz de correlaciones.**

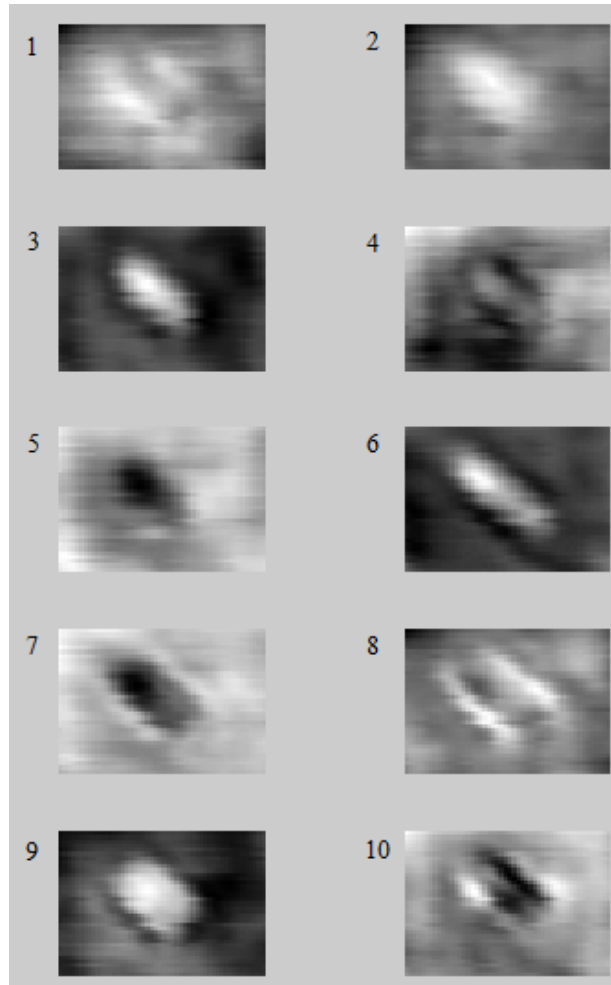
Sabiendo que las diez imágenes corresponden al mismo objeto y fueron capturadas bajo las mismas condiciones, es válido suponer que la forma del objeto que se conforma es muy similar en cada una de las imágenes.

Con el coeficiente de correlación, es posible crear un filtro para seleccionar las imágenes que cumplen con el supuesto anterior. Para este proyecto, se especificó que el  $r$  entre un par de imágenes para pasar el filtro debe ser mayor a 0.7 o menor a  $-0.7$ , pero este valor puede ser modificado por uno mayor con el fin de hacer más exigente el filtro de selección.

Continuando con el algoritmo, desde la matriz de correlaciones se selecciona la fila en la cual se presente la mayor cantidad de coeficientes mayores a 0.7 o menores a  $-0.7$ , es decir donde se encuentre la mayor cantidad de imágenes con una correlación alta ya sea directa o inversa. En caso que la correlación sea inversa se calcula el negativo de la imagen para obtener el mismo coeficiente pero positivo.

Posteriormente, con el fin de resaltar la forma del objeto enterrado, a cada imagen de las seleccionadas se le resta la moda, que representa el fondo o los pixeles producidos por la onda reflejada en el suelo. Además, cada imagen es multiplicada pixel a pixel por el  $r$  correspondiente, con el fin de ponderar la relevancia de cada una sobre el resultado final optimizando aún más al algoritmo de selección. Para finalizar, las imágenes clasificadas y ponderadas son sumadas pixel a pixel de modo que se conforma una sola imagen, la cual es escalada nuevamente para que los valores de sus componentes pertenezcan al rango entre 0 y 255.

Para comprender mejor al algoritmo descrito se presenta en la Figura 35 el diagrama de flujo del mismo y a continuación un ejemplo de la ejecución, aplicándolo sobre una botella plástica enterrada de manera diagonal respecto a la dirección del barrido.



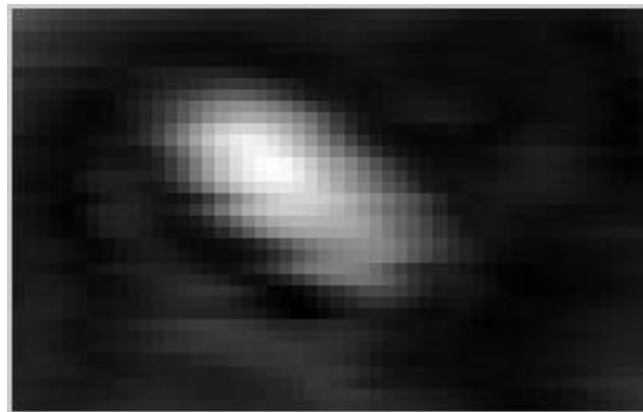
**Figura 32. Imágenes de prueba, botella enterrada diagonalmente.**

Para una prueba realizada se obtuvieron las diez imágenes que se muestra en la Figura 32 y con estas se calculó la matriz de correlación, la cual se presenta en la Figura 33. Posteriormente, se seleccionó la fila número 7 y de esta superaron el filtro las imágenes 2, 3, 5, 6, 7 y 9, en este caso a las imágenes 2, 3, 6 y 9 se les calculó el negativo antes de ser ponderadas.

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & 0.75 & 0.29 & -0.59 & -0.74 & 0.12 & -0.58 & 0.62 & 0.63 & -0.48 \\ 0.75 & 1 & 0.66 & -0.43 & -0.80 & 0.65 & -0.89 & 0.55 & 0.80 & 0.42 \\ 0.29 & 0.66 & 1 & -0.31 & -0.78 & 0.70 & -0.82 & -0.05 & 0.86 & -0.39 \\ -0.59 & -0.43 & -0.31 & 1 & 0.46 & 0.09 & 0.46 & -0.43 & -0.60 & 0.72 \\ -0.74 & -0.80 & -0.78 & 0.46 & 1 & -0.55 & 0.85 & -0.16 & -0.88 & 0.40 \\ 0.12 & 0.65 & 0.70 & 0.09 & -0.55 & 1 & -0.76 & -0.11 & 0.51 & 0.01 \\ -0.58 & -0.89 & -0.82 & 0.46 & 0.85 & -0.76 & 1 & -0.23 & -0.89 & 0.38 \\ 0.62 & 0.55 & -0.05 & -0.43 & -0.16 & -0.11 & -0.23 & 1 & 0.27 & -0.45 \\ 0.63 & 0.80 & 0.86 & -0.60 & -0.88 & 0.51 & -0.89 & 0.27 & 1 & -0.61 \\ -0.48 & -0.42 & -0.39 & 0.72 & 0.40 & 0.01 & 0.38 & -0.45 & -0.61 & 1 \end{bmatrix}$$

**Figura 33. Matriz de correlación y conjunto seleccionado.**

A cada una de las imágenes seleccionadas, se les restó la moda respectiva y finalmente fueron sumadas para obtener el resultado final, Figura 34. Esta imagen, visualmente logra transmitir más información que las diez anteriores, cumpliendo así con el objetivo propuesto con el algoritmo.



**Figura 34. Imagen Final.**

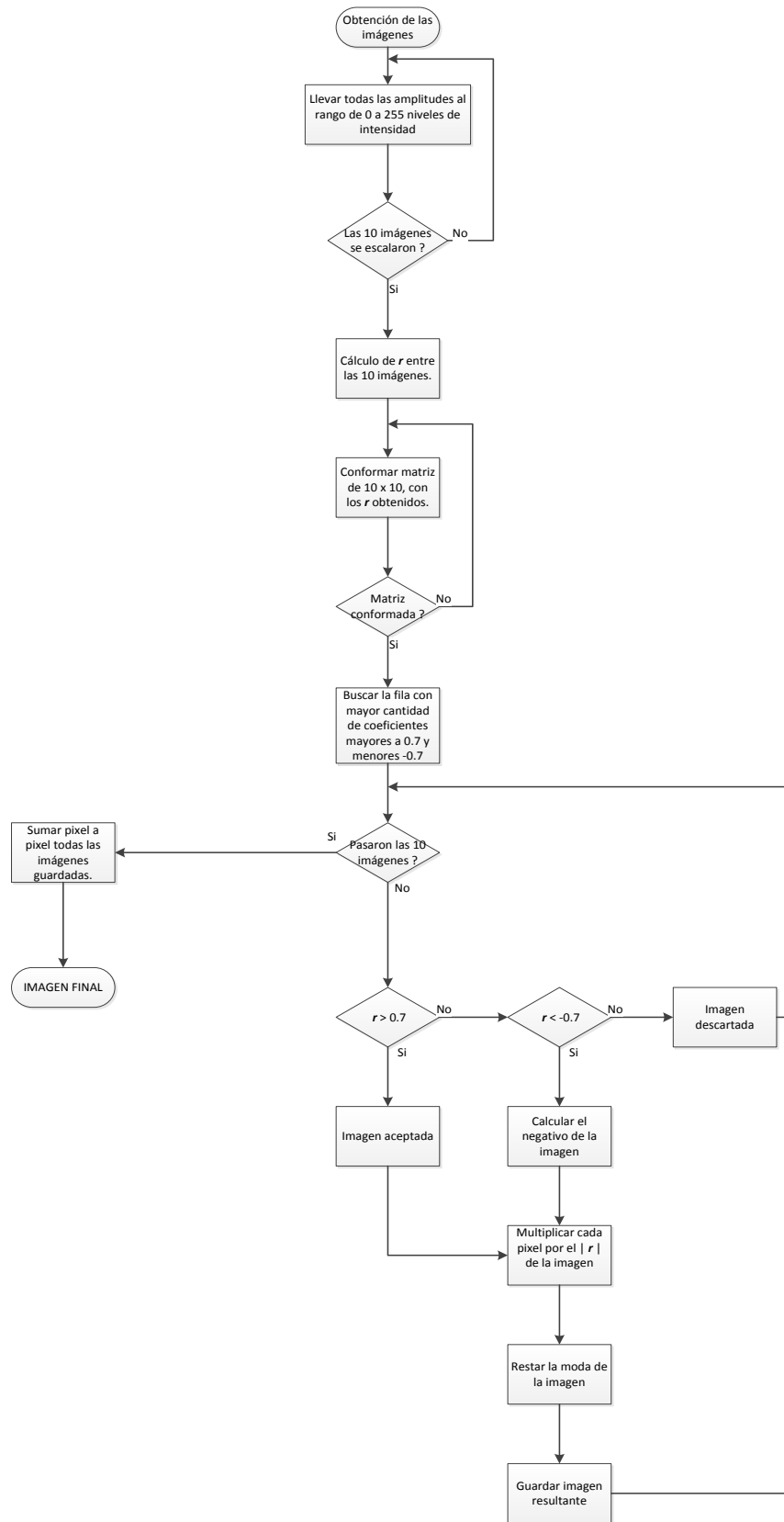


Figura 35. Diagrama de flujo del algoritmo para conformar imagen.

### 3.3 ALGORITMOS DE OBTENCIÓN DE BORDES

Buscando identificar los objetos que se encuentran enterrados, se implementaron varios algoritmos para la detección de bordes [8]. Entre ellos, los operadores de Sobel y de Prewitt, conocidos como operadores de ventana. Con ambos se alcanzaron buenos resultados, pero determinar de manera concluyente la forma del objeto que estuviera enterrado era difícil; también se usó el algoritmo de Canny y con este se obtuvieron resultados más positivos, lo que determinó su elección como algoritmo a usar.

#### 3.3.1 Algoritmo de Canny

La base de este algoritmo es el cálculo de variaciones en la intensidad dentro de una imagen. Aplicando este principio, John F. Canny logró detectar los bordes de manera satisfactoria [9].

La implementación de este algoritmo requiere unos mayores recursos de computación respecto a los operadores de ventana, pero sus ventajas son notorias. Su diseño está pensado para aumentar la relación señal a ruido de la imagen, evitar la ruptura de bordes y limitar la detección de los mismos a un conjunto de píxeles con conectividad [10]. Para implementar este algoritmo de manera computacional se realiza en 4 etapas:

1. Suavizado de la imagen base, a través de un filtro Gaussiano.
2. Cálculo del gradiente en ambas direcciones, es decir se calculan las derivadas parciales recorriendo la imagen en sentido horizontal, eje  $x$ , y en sentido vertical, eje  $y$ . Posteriormente se calcula la norma del gradiente, ecuación (6) y con esta se agrupan ambas derivadas, además, a partir de la norma se realizan las siguientes etapas. Con esto se logra detectar los cambios fuertes de intensidad y por ende los posibles bordes presentes dentro de la imagen.

$$|G_{f(x,y)}| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

3. Umbralización. Para eliminar información irrelevante se propone un umbral que permita conservar los bordes pero que desprecie los cambios leves de intensidad.

Esta etapa se usa como calibración, de forma que el umbral puede ser modificado hasta obtener los resultados deseados, los cuales serán dependientes de las imágenes utilizadas.

4. Finalmente, utilizando interpolación, se realiza un afinamiento sobre la imagen umbralizada. Para hacerlo se busca dentro de los pixeles que se han detectado como bordes, cuáles son verdaderamente máximos y por ende relevantes para afinar el resultado.

## 4 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN EN FPGA

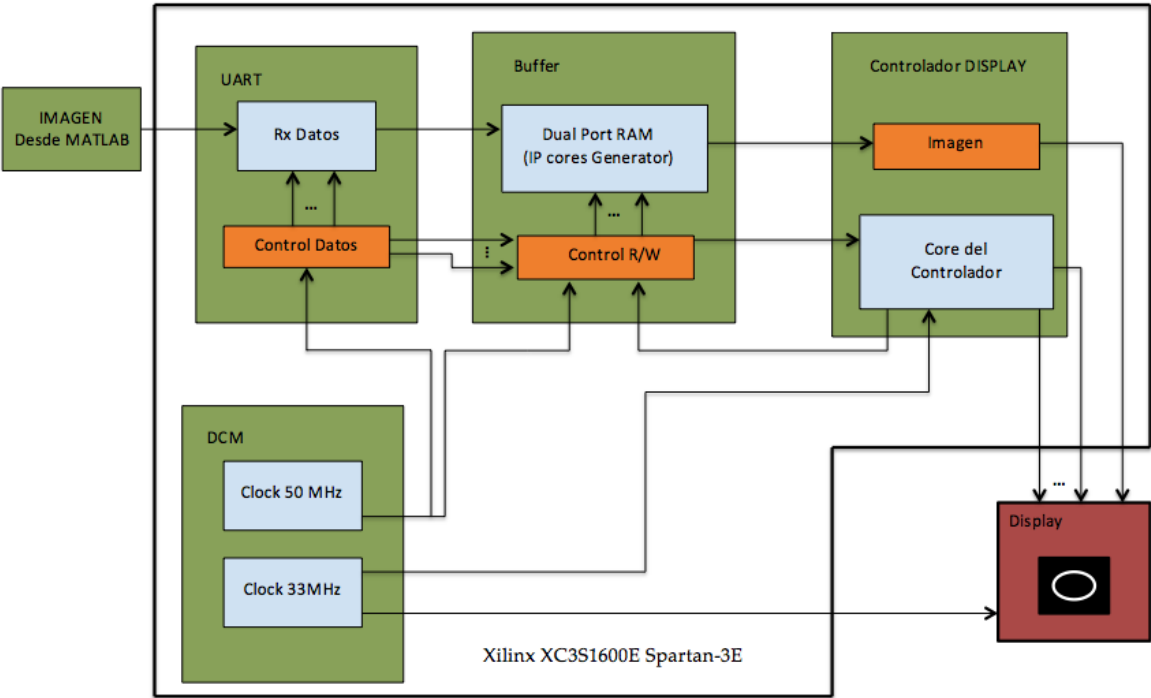
El sistema implementado consta de 3 etapas, primero la imagen procesada en MATLAB es recibida por el puerto serial en una UART, luego los datos recibidos son almacenados en un *buffer* para ser mostrados posteriormente en el *display* LCD. En la Figura 36, se muestra como se relacionan las etapas entre ellas y los bloques extras que se diseñaron para poner en funcionamiento el sistema completo.

Para realizar el prototipo, el sistema fue implementado sobre una FPGA fabricada por Xilinx, específicamente la Xilinx XC3S1600E Spartan-3E. Las especificaciones del chip utilizado se encuentran en la Tabla 7 y en esta también se resumen los componentes utilizados en la implementación final.

Componente	Cantidad	Usada	%Uso
Slice Flip Flops	29504	103	1
4 input LUTs	29504	149	1
DCM	1	8	12
Buf G MUX	24	3	12
RAM 16s	36	5	13
Bonded IOBs	250	33	13

**Tabla 7. Recursos en la FPGA.**

Aunque este dispositivo no es óptimo para aplicaciones portátiles, debido a su alto consumo de potencia, el objetivo de este trabajo se centra en la implementación y prueba de un sistema de visualización aprovechando los recursos con los cuales cuenta el laboratorio de Ingeniería de la UPB. Además en investigaciones futuras es posible adaptar el sistema generado a una familia diferente de dispositivos que sean diseñados para el bajo consumo.



**Figura 36. Diagrama de bloques sistema de en la FPGA.**

Para describir el hardware se utilizaron dos elementos, el código VHDL y el Xilinx CORE Generator™. Cada uno de estos fue utilizado de acuerdo a las necesidades de la aplicación y las ventajas que presentara en la programación; de este modo la UART y el controlador del *display* fueron descritos en VHDL mientras que la RAM y el DCM fueron configurados usando el sistema CORE Generator.

## 4.1 SISTEMA XILINX CORE GENERATOR™

Antes de definir el sistema, es necesario dejar claro qué es un *Intellectual Property Core* ( *IP Core* ) [11] y cuál es su función dentro de los sistemas reconfigurables. En busca de agilizar la producción de componentes electrónicos basados en FPGA, la industria ha creado los *IP Cores*; estos son códigos que cumplen la función de un circuito electrónico, es decir, son descritos por el usuario o adquiridos a través de un tercero, con el fin de incluir funcionalidades ágilmente dentro del proyecto que se esté desarrollando.

El sistema ISE CORE Generator [12] genera Cores optimizados para las FPGAs de Xilinx, basados en una librería de IP cores, totalmente diseñada, documentada y soportada por Xilinx. Este sistema permite la creación y configuración de componentes de manera rápida y con la garantía que fueron fabricados y verificados por diseñadores expertos.

En la librería LogiCORE IP de Xilinx, incluida con el *ISE Foundation™*, están disponibles cores para implementar DSP, memorias, funciones matemáticas y controles digitales de reloj, entre otros. Dado el caso que se llegara a necesitar un *core* que no está incluido en la librería, es posible obtenerlos desde internet, desde webs como IpCores o Opencores [13], [14] e integrarlos al proyecto para usarlos según las necesidades.

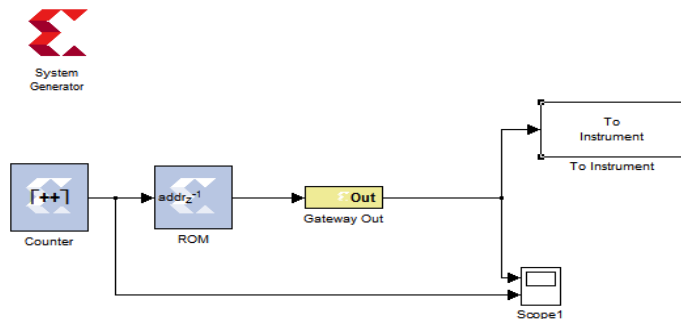
## 4.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para comunicar MATLAB® con el sistema implementado en la FPGA, se estableció una comunicación serial en la cual la transmisión es ejecutada a través del ambiente de Simulink® de MATLAB y la recepción se hace en una UART implementada en la FPGA.

### 4.2.1 Transmisión de datos

Para ejecutar la transmisión de la imagen se utilizó Simulink; en este entorno gráfico de programación, se implementó el sistema encargado de obtener la imagen procesada y transmitirla por el puerto serial virtual del computador (COM4), Figura 37.





**Figura 37. Sistema de transmisión serial.**

El bloque encargado de ejecutar la comunicación se aprecia como, *To Instrument* [15], este bloque se encuentra en el *Instrument Control Toolbox*<sup>TM</sup> de Matlab y se encarga de escribir datos en el puerto serial virtual (COM) del computador. Para ponerlo en funcionamiento es necesario especificar algunos parámetros según la aplicación, para este caso se usó la configuración mostrada en la Figura 38.

Los bloques que complementan el sistema de transmisión, fueron implementados utilizando System Generator<sup>TM</sup> (sysgen), esta es una herramienta de programación de alto nivel creada por Xilinx, que permite diseñar sistemas para el procesamiento digital de señales, con las especificaciones necesarias para implementarlos sobre una FPGA.

La ventaja de Sysgen, es que las tareas de modelamiento y generación de código para FPGA, son realizadas en el entorno gráfico de Simulink.

El flujo de datos es controlado por un sub-sistema compuesto por un contador y una memoria ROM. Sobre la memoria se escribe el vector *IMG\_Final*, que contiene la imagen a mostrar en el *display*; a medida que pasa el tiempo de cómputo, el contador cambia la dirección de lectura de la ROM y esta acción cambia el dato que es enviado por serial.

Para poder conectar los bloques propios de Xilinx con los de Simulink, es necesario utilizar bloques de acople similares al mostrado en la Figura 37, nombrado como *Gateway Out*. Este tipo de bloques se encuentran en la librería de Xilinx incluida en Simulink y pueden ser usados para acoplar tanto entradas (*Gateway In*) como salidas (*Gateway Out*) en los sistemas diseñados.

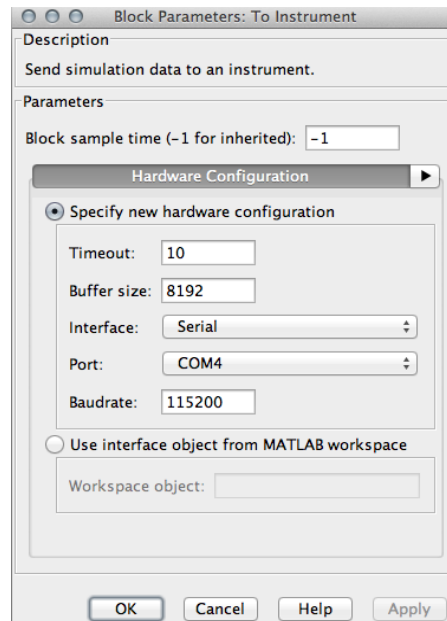


Figura 38. Configuración bloque de transmisión serial.

#### 4.2.2 Recepción de datos

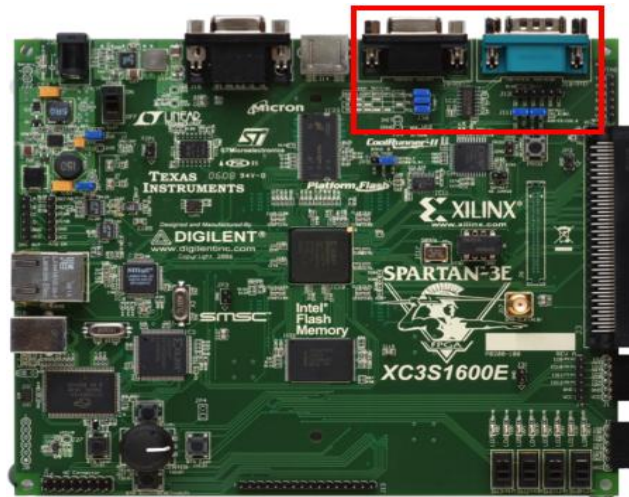


Figura 39. Puerto serial del Kit Spartan-3E 1600E.

Para recibir los datos por serial, se usó el conector DB9 hembra mostrado en la Figura 39, los pines de datos de este conector están comunicados dentro del kit de desarrollo, para cumplir con el protocolo RS-232 y facilitar la comunicación con otro dispositivo que funcione bajo el mismo protocolo.

Para controlar el flujo de datos desde el puerto serial, se diseñó un *core* en VHDL que cumple las funciones de una UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) [16]. Con este, es posible recibir y transmitir datos por el puerto serial y configurar la velocidad según la comunicación que se desee establecer. Dentro del proyecto, sólo se utilizó el componente encargado del proceso de recepción (UART Rx), ya que el sistema conformado no necesitaba transmitir datos.

En la UART Rx, se cuenta con dos componentes principales:

- Un contador, el cual habilita la recepción de los datos en el tiempo indicado, es decir sincroniza la FPGA, que trabaja a una frecuencia de 50 MHz, con la comunicación serial que se realiza a 115200 baudios.
- Registro SIPO (Serial Input Parallel Output), el cual se encarga de recibir y almacenar de manera ordenada los datos en un registro temporal.

Todo el proceso de recepción es realizado a la velocidad de la transmisión serial. Cada ocho datos recibidos, el registro SIPO escribe en la RAM el byte conformado; esta transferencia es realizada a la velocidad del reloj de la FPGA.

### 4.3 DIGITAL CLOCK MANAGER ( DCM )

Dentro del sistema mostrado en la Figura 36, hay elementos que tienen diferentes frecuencias de trabajo. La UART y el buffer funcionan a 50 MHz, pero el controlador del *display* debe trabajar a 33 MHz. Para cumplir con estos requerimientos, se integró al sistema un DCM [17], el cual se encarga de administrar los relojes dentro del sistema.

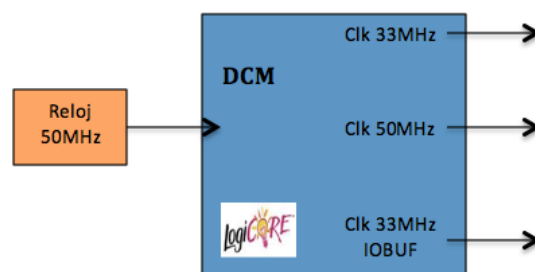
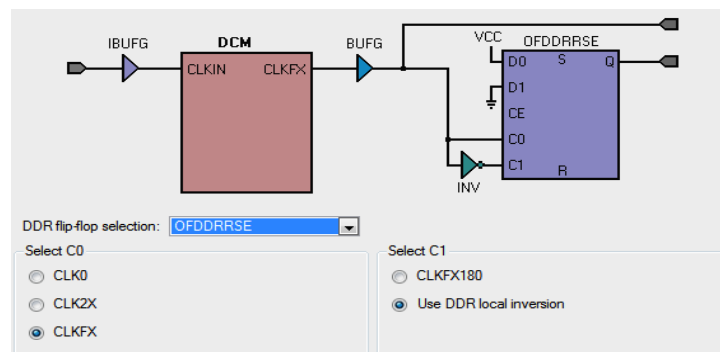


Figura 40. Señales IN/OUT del DCM.

En la Figura 40, se muestran de manera simplificada las señales que integran el *core* del DCM. En la entrada está la señal de reloj, proveniente del cristal que se encuentra en el kit empleado para el desarrollo. Las señales de salida son las encargadas de llevar la señal de reloj a todos los componentes del sistema.

Es importante resaltar que la señal de 50 MHz y la de 33 MHz, son internas en el sistema y por ende no se necesita ser exigente con el *hardware* a la hora de elegir su ruta de conexión. Caso contrario es el de la señal de 33 MHz IOBUF, Figura 40, esta señal de reloj es externa y va desde la FPGA hasta el *display* LCD, por esto, es necesario que la conexión cumpla con ciertos requisitos, que no cumplen los puertos de salida I/O genéricos de la FPGA. La conexión entonces, de una señal de reloj externa debe hacerse sobre a el puerto que posea un buffer antes de la salida, de lo contrario la señal será afectada por *skew*, fenómeno que ocasiona problemas de sincronismo.

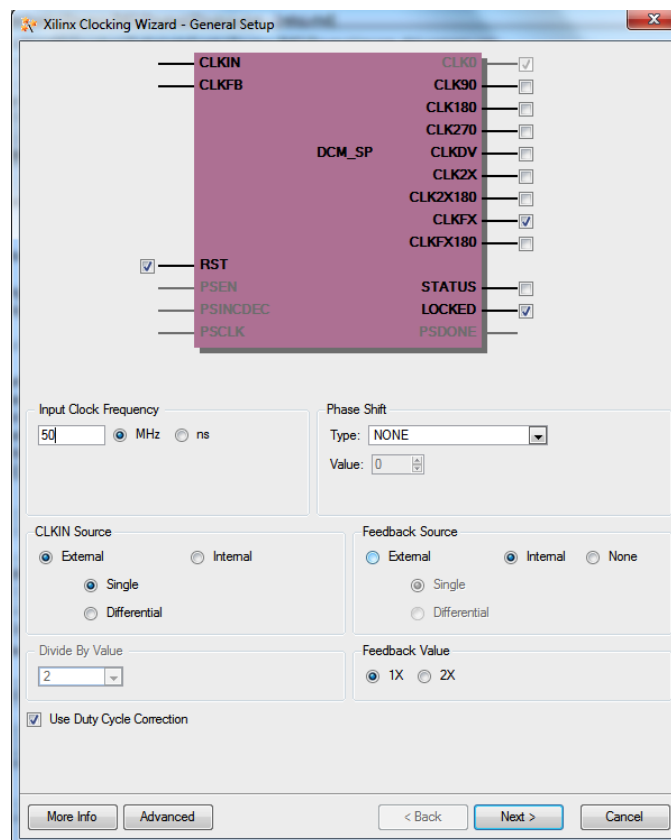


**Figura 41. Configuración inicial del DCM.**

Por agilidad en la programación y teniendo en cuenta que los cores presentes en la librería de Xilinx están optimizados para usar sobre la FPGA, se seleccionó el core que cumple la tarea del DCM y además posee un *flip flop* DDR sobre la salida. La configuración del core, es realizada usando del asistente incluido en el Xilinx Core Generator<sup>TM</sup> y contiene varias etapas.

Inicialmente la señal CLKFX (señal de reloj de 33MHz) mostrada en la Figura 41, es conectada a un *flip flop* DDR. La señal de salida del *flip flop*, es asignada a la señal 33MHz IOBUF y de este modo queda habilitada para conectarse en el *display* LCD sin el problema del *skew*.

Continuando con la configuración del *core*, se configura el reloj de entrada; si será interno o externo y cuál es su frecuencia, además se seleccionan cuáles serán las salidas del *core* como se muestra en la Figura 42.



**Figura 42. Configuración de las señales del DCM.**

Para finalizar se configuran las constantes que modificarán el reloj inicial, es decir, se establece la frecuencia deseada, que para la aplicación es de 33 MHz; esta etapa de la configuración se presenta en la Figura 43.

Valid Ranges for Speed Grade -4				
DFS Mode	Fin (MHz)		Fout (MHz)	
Low	0.200 - 333.000		5.000 - 311.000	
High	0.200 - 333.000		5.000 - 311.000	

Inputs for Jitter Calculations				
Input Clock Frequency: 50 MHz				
<input type="radio"/> Use output frequency <input checked="" type="radio"/> Use Multiply (M) and Divide (D) values				
33 <input type="text"/> MHz <input type="radio"/> ns				
M	2	D	3	
Calculate				

Generated Output				
M	D	Output Freq (MHz)	Period Jitter (unit interval)	Period Jitter (pk-to-pk ns)
2	3	33.3333	0.03	0.89

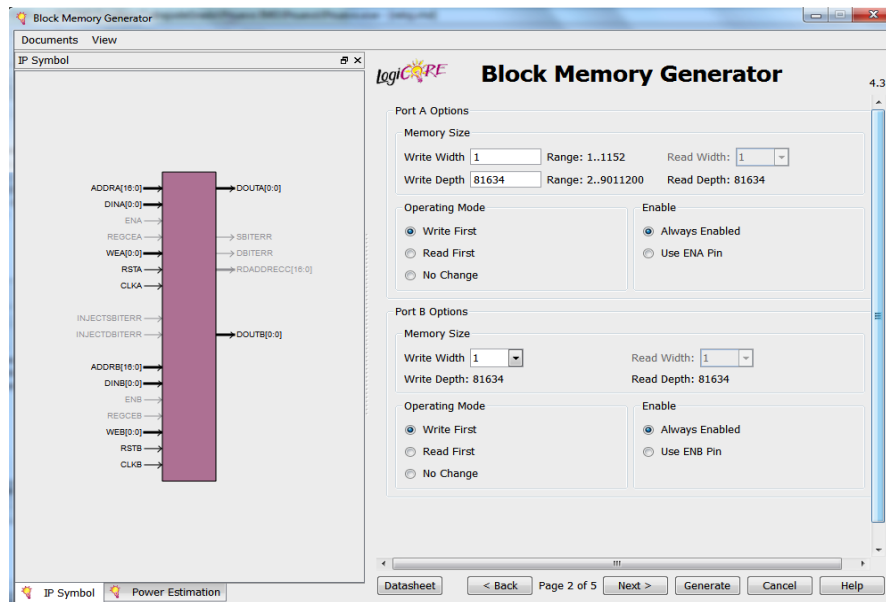
**Figura 43. Configuración del reloj a 33MHz.**

Con estos pasos queda configurado por completo el DCM. Posteriormente, se genera el código VHDL del componente, con la tranquilidad que es un *core* totalmente funcional, optimizado y que cumple con todas las condiciones necesarias para integrarse al sistema diseñado.

#### 4.4 BUFFER

Dentro del sistema se presenta una diferencia entre la frecuencia de trabajo del controlador del *display* y la velocidad a la reciben los datos, razón por la cual los datos no pueden ser mostrados de manera inmediata. Para solucionar este inconveniente se utilizó una Block RAM Dual-Port [18], en la cual se acumulan los datos recibidos por serial y posteriormente son leídos por el controlador del *display* para ser mostrados en la pantalla.

La Block RAM Dual-Port, se encuentra incluida dentro de la librería de IP Cores de Xilinx, por lo que su programación se realizó de manera similar al DCM.



**Figura 44. Asistente de configuración para la Block RAM.**

En el asistente, Figura 44, es claro que la Dual Port ofrece una memoria a la que se puede acceder desde dos puertos independientes entre si, pero incluidos en un solo *core*, además en cada uno es posible configurar el tamaño, el modo de operación y los pines que se utilizaran en el proceso.

Para el sistema propuesto, la Block RAM se conectó como se muestra en la Figura 45. Este tipo de conexión permite que la lectura y la escritura de la memoria sean ejecutadas en diferentes frecuencias, emulando los sistemas de reproducción de video, que cuentan con puertos dedicados para cada tarea. En el caso del sistema diseñado, los puertos dedicados fueron configurados de la siguiente manera:

- El puerto A se encarga de recibir los datos que llegan por serial y guardarlos en la dirección que indique un contador que se encuentra en la UART, además la escritura sobre la memoria solo se habilita cuando la UART lo indique, es decir cuando llegan datos por el puerto serial.

- Por el puerto B, se realiza la lectura de los datos almacenados en la RAM, el flujo de datos es manejado desde el controlador del *display*, el cual a medida que va graficando la imagen va avanzando en la lectura.

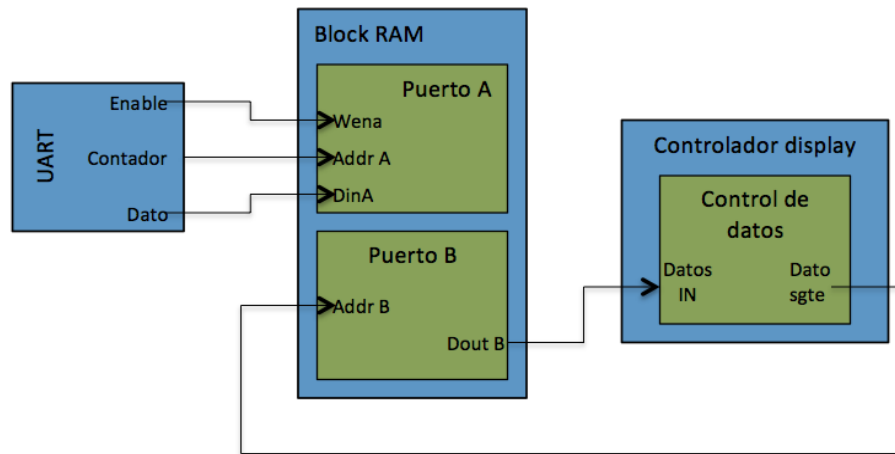


Figura 45. Conexiones de la Block RAM.

## 4.5 CONTROLADOR DEL *DISPLAY*

Para cumplir con el objetivo de integrar al sistema un dispositivo de visualización se adquirió un *display* LCD, fabricado por Terasic [19], el cual se conectó al sistema de solución propuesto, Figura 36, a través de la FPGA. Con esta integración se logró dar una opción de portabilidad como se planteó dentro de los objetivos.

### 4.5.1 Módulo Terasic LCD

La *display* es un LCD de 800 x 480 px, como el mostrado en la Figura 46. Este dispositivo, cuenta con un conector que da acceso a la señales de control y además a un bus paralelo de 24 bits, para el control de los colores usando el modelo RGB. Además, posee un módulo analógico digital, que convierte los toques sobre los puntos sensibles del *display* en señales



digitales; el módulo táctil del *display* no fue utilizado en el desarrollo del proyecto, pero puede ser habilitado para trabajos futuros con este equipo.



**Figura 46. LCD y conector de Terasic.**

Por la arquitectura del LCD, su control es realizado de manera similar al de una pantalla que trabaje en modo gráfico VGA, por esto dentro de sus señales de control cuenta con una para el sincronismo horizontal, otra para el sincronismo vertical, una señal de reloj y un *enable* para los datos.

#### **4.5.2 Diagramas de tiempo para el display LCD.**

Para lograr poner en funcionamiento el *display*, es primordial cumplir con los tiempos de las señales, que fueron establecidos por el fabricante. Dentro del *display* usado, es necesario seguir las secuencias mostradas en la Figura 47 y la Figura 48; estas secuencias son cíclicas, cada que se cumple la secuencia horizontal es graficada una línea y cuando se cumple una secuencia vertical se han graficado en todas las líneas la pantalla.

De acuerdo al tamaño del *display*, los tiempos de los pulsos en cada secuencia pueden variar; los tiempos programados para el segmento horizontal son los mostrados en la Tabla 8. Y en la Tabla 9 se muestran los tiempos correspondientes a las señales representadas en la Figura 48.

Parámetro	Símbolo	Tiempo	Unidad
Frecuencia de reloj	NCLK	33.2	MHz
Ancho pulso HSYNC	$t_{hpw}$	1	NCLK
Dato válido horizontal	$t_{hd}$	800	NCLK
Back porch horizontal	$t_{hbp}$	216	NCLK
Front porch horizontal	$t_{hfp}$	40	NCLK
Tiempo de <i>enable</i>	$t_{ep}$	800	NCLK

Tabla 8. Tiempos de las señales horizontales.

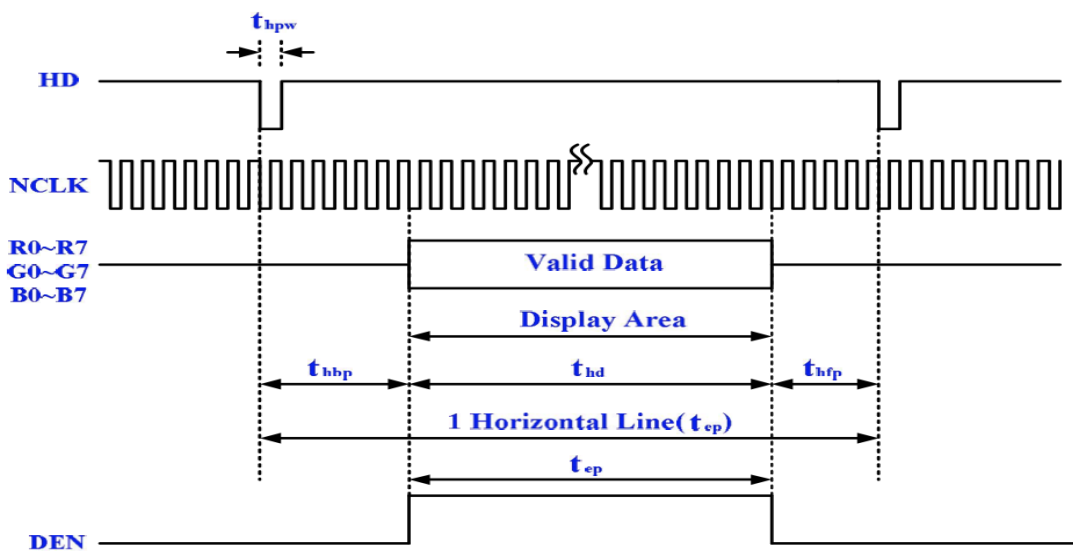


Figura 47. Secuencias de señales y tiempos horizontales.

Es importante resaltar que todas las señales para el control horizontal son sincrónicas respecto a la señal de reloj de la *display*, mientras que todas las señales verticales, son referenciadas al número de líneas horizontales que se han terminado de recorrer.

Parámetro	Símbolo	Tiempo	Unidad
Ancho pulso VSYNC	$t_{vpw}$	1	H
Dato valido vertical	$t_{vd}$	480	H
Back porch vertical	$t_{vbp}$	35	H
Front porch vertical	$t_{vfp}$	10	H
Tiempo de <i>enable</i> V.	$t_{DEN}$	480	H

Tabla 9. Tiempos de las señales verticales.

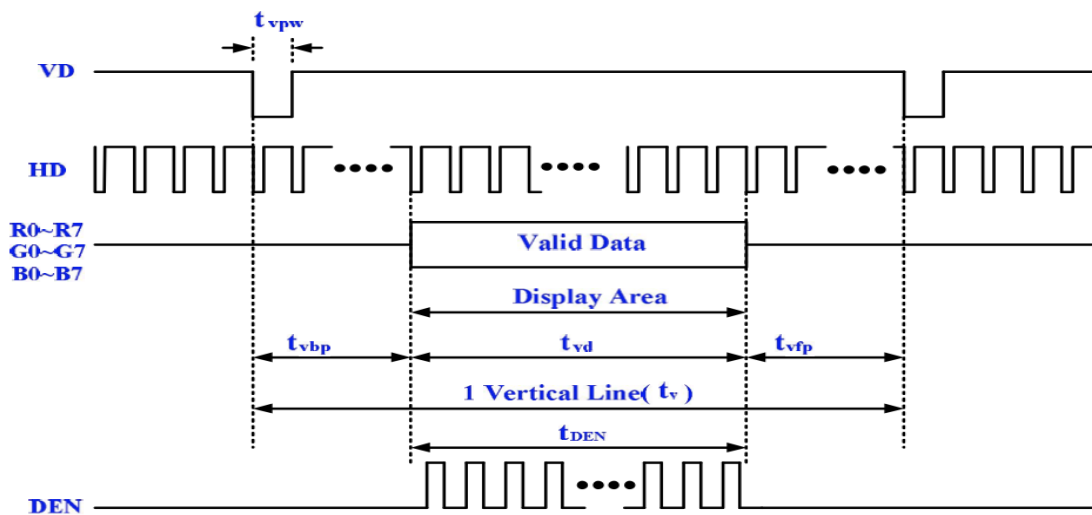


Figura 48. Secuencias de señales y tiempos verticales.

#### 4.5.3 Controlador del display.

Usando VHDL se diseñó un *core*, capaz de generar las señales propuestas en la sección anterior y que además se pudiera integrar con las partes del sistema, que se diseñaron en las etapas previas.

Aprovechando la posibilidad de trabajar en paralelo que brinda la FPGA, el *core* diseñado está constituido por dos máquinas de estados, las cuales están encargadas de generar las señales de control de acuerdo a las diagramas descritos en la sección anterior. Además, ambas máquinas en conjunto generan señales de control internas las cuales habilitan la lectura de datos desde la Block RAM y el envío hacia el *display* LCD.

Dentro del *core* hay varios aspectos destacables, estos detalles son necesarios para el funcionamiento y fueron obtenidos luego de múltiples pruebas que se desarrollaron durante la programación.

- Las señales que son sincrónicas, respecto al reloj de 33 MHz, deben hacer sus transiciones de estados, en los flancos de bajada de la señal del reloj. De lo contrario se generan problemas de sincronismo y por ende la no inicialización del *display*.
- Los límites que marcan el inicio y fin de los datos, dentro de la memoria, deben ser conocidos y deben ser bien especificados dentro del *core*, de no ser así, la imagen puede verse en movimiento o fragmentada.
- El *core* de la VGA, debe estar comunicado con el *core* de la Block RAM, esto para sincronizar la lectura y la escritura a través de las señales de *enable*, evitando que ambas tareas puedan ocurrir sobre una misma dirección ocasionando incongruencias.

El diseño y la programación del *core* fueron tareas realizadas con el apoyo de Juan Camilo Vanegas Serna, quien en su trabajo grado (Implementación de un tocardiógrafo digital en FPGA), también utiliza el *display* LCD. Este trabajo en equipo permitió la implementación de un *core* versátil, que se puede adaptar a diferentes sistemas y que funciona muy bien como medio de visualización de información. Además el *core* es fácil de modificar, para controlar pantallas de diferente resolución, mostrar información en diferentes colores o reposicionar la imagen dentro del área visible.

## CONCLUSIONES

A través de las pruebas realizadas, se detectaron las ventajas y desventajas de este tipo de radar para usarlo en la detección de minas antipersona, adquiriendo un conocimiento que es válido y escalable en futuras investigaciones, ya sea para mejorar el dispositivo o usarlo en otras aplicaciones. Además, a través de la caracterización realizada al radar RASCAN, se generó una guía de uso y una lista de recomendaciones, que permiten adquirir imágenes con mínimo ruido

Con los algoritmos implementados para el procesamiento de las imágenes, se consiguió generar una imagen rápida de procesar y que contiene las características más relevantes, de las diez imágenes adquiridas en un principio. Igualmente, los algoritmos mejoran lo reportado en el estado del arte, a la hora de generar una imagen única y además abren la posibilidad de realizar otros análisis ya sea en la frecuencia o en las fases intermedias del algoritmo de Canny para mejorar la detección de la forma.

De igual manera se diseñaron, programaron e implementaron *cores* para usar en la FPGA XC3S1600E Spartan-3E de Xilinx, los cuales son adaptables a diferentes sistemas de manera sencilla y además ofrecen la posibilidad de ser exportados a otras familias de dispositivos. En este proyecto, se utilizó la FPGA como medio de enlace entre el procesamiento y la visualización, pero se abre la posibilidad para futuras investigaciones de implementar un core para realizar el procesamiento en paralelo sobre la misma FPGA y tornar aún más portátil el sistema diseñado.

Se apoyó el trabajo investigativo, que se encuentran desarrollando las Fuerzas Militares de Colombia y el grupo de investigación de Automática y Diseño (A+D) en el campo de detección de minas antipersona. Se aportó conocimiento valioso y se fortaleció la línea de investigación en nuevas tecnologías, que sirvan para mejorar la calidad de las detecciones y en consecuencia proteger la vida de los detectoristas encargados de realizar el desminado humanitario.

## REFERENCIAS

- [1] Unicef, “MINAS ANTIPERSONA,” 2012. [Online]. Available: <http://www.unicef.org.co/Minas/encuenta.htm>. [Accessed: 25-Jun-2012].
- [2] F. M. de Colombia, “MOTAMP Colombia,” no. 57. 2012.
- [3] R. S. Rascan, “Funcionamiento Técnico del radar RASCAN.” [Online]. Available: <http://www.rascan.org/royalsociety/html/technical.html>. [Accessed: 15-Jan-2013].
- [4] RSLab, “Download MultiScan,” 2012. [Online]. Available: <http://www.rslab.ru/?lang=english&dir=downloads>. [Accessed: 15-Dec-2012].
- [5] A. Quintero and M. Osorio, “RASCAN type radar image resolution enhancement for non – metallic landmine detection,” 2013.
- [6] C. G. Windsor, A. Bulletti, L. Capineri, P. Falorni, S. Valentini, and G. Borgioli, “A Single Display for RASCAN 5-frequency 2-polarisation Holographic Radar Scans,” no. x, pp. 496–500, 2009.
- [7] R. Johnson and P. Kuby, “Correlación Lineal,” in *Estadística elemental*, 2<sup>a</sup> Ed., Thomson Editores, 1999, pp. 114–119.
- [8] R. Gonzalez and R. Woods, “Image segmentation,” in *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice Hall, 2002, pp. 567–630.
- [9] J. Canny, “A Computational Approach to Edge Detection,” *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, vol. PAMI-8, no. 6, 1986.
- [10] C. Platero, “Técnicas de preprocesado,” in *Apuntes de Visión Artificial*, 1<sup>a</sup> ed., Universidad Politécnica de Madrid, Ed. 2007, pp. 111–142.
- [11] M. Rouse, “What is IP core?,” 2011. [Online]. Available: <http://whatis.techtarget.com/definition/IP-core-intellectual-property-core>. [Accessed: 11-May-2013].
- [12] Xilinx, “Xilinx Core Generator Overview.” p. 1, 2005.
- [13] OpenCores team, “OpenCores,” 2013. [Online]. Available: <http://opencores.org/>. [Accessed: 04-May-2013].
- [14] I. IP Cores, “IP Cores, Inc,” 2012. [Online]. Available: <http://www.ipcores.com/index.htm>. [Accessed: 10-May-2013].

- [15] I. The MathWorks, “Models to send and receive data,” 2013. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/instrument/building-simulink-models-to-send-and-receive-data.html>. [Accessed: 12-May-2014].
- [16] K. Conway, M. DeHaan, and M. Rouse, “What is UART?,” 2011. [Online]. Available: <http://whatis.techtarget.com/definition/UART-Universal-Asynchronous-Receiver-Transmitter>. [Accessed: 11-May-2013].
- [17] Xilinx, “DCM Module.” pp. 1–6, 2009.
- [18] Xilinx, “Using Block RAM in Spartan-3 FPGAs,” vol. 463. pp. 1–40, 2003.
- [19] Terasic, “Terasic LTM User Manual.” .