

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA DETECCIÓN DE POSICIÓN EN 2D DE UN PUNTERO EMISOR DE ULTRASONIDO USANDO FPGA

Marlon Alejandro Cárdenas<sup>\*</sup>; Jorge Armando Delgado<sup>\*\*</sup>; John Michael Espinoza<sup>\*\*\*</sup>; Andrés David Restrepo<sup>\*\*\*\*</sup>

Evaluadores:

John Jiménez Gómez<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Diego Fernando Duque Betancourt<sup>\*\*\*\*\*</sup>

**Tipo de Artículo: Investigación Científica y Tecnológica**

## RESUMEN

Este artículo presenta la implementación de un algoritmo aritmético a nivel de hardware que permite determinar la posición de un puntero en un sistema de coordenadas cartesianas mediante la emisión y recepción de señales ultrasónicas. Se seleccionó un algoritmo de posicionamiento basado en un sistema de ecuaciones lineales determinado a partir de las diferencias de *Tiempo de Vuelo* (TOF) desde un puntero emisor hacia cuatro receptores fijos con coordenadas conocidas. El sistema implementado en el dispositivo FPGA EP2C20484C7 de la familia *Cyclone II*® de Altera incluido en la tarjeta de desarrollo DE1, consiste principalmente de un módulo para la medición de las diferencias de TOF, una unidad aritmética de punto flotante encargado del cálculo de las coordenadas y una unidad para despliegue gráfico de la posición del puntero en un monitor convencional por medio del puerto VGA de la tarjeta DE1.

---

\* Ingeniero Electrónico, Universidad Santiago de Cali (2008).

\*\* Ingeniero Electrónico, Universidad Santiago de Cali (2008).

\*\*\* Ingeniero Electrónico (2007), estudiante de Maestría en Ingeniería (énfasis en Electrónica) de la Universidad del Valle. Asistente de Docencia de la Universidad del Valle.

\*\*\*\* Ingeniero Electrónico (1999), Magíster en Automática (2005), estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad del Valle. Profesor Tiempo Completo de la Universidad Santiago de Cali. Vinculado al grupo de investigación en Instrumentación Electrónica (GIE). [adareg378@yahoo.com](mailto:adareg378@yahoo.com)

\*\*\*\*\* Ingeniero Electricista Universidad del Valle (1997), Especialista en Docencia para la Educación Superior Universidad Santiago de Cali (1999), Especialista en Electromedicina y Gestión Tecnológica Hospitalaria Universidad Autónoma de Occidente (2003), Maestría en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Electrónica Universidad del Valle, Profesor de Dedicación Exclusiva Universidad Santiago de Cali. Coordinador del grupo de investigación en Instrumentación Electrónica (GIE). [jjimenez@usc.edu.co](mailto:jjimenez@usc.edu.co)

\*\*\*\*\* Ingeniero Electricista (1996), Tecnólogo en Sistemas de Información (1998), Tecnólogo en Electrónica (1999), Magíster en Automática (2001), Universidad del Valle. Profesor Dedicación Exclusiva de la Universidad Santiago de Cali, Coordinador Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali, vinculado al Grupo de investigación en Instrumentación Electrónica (GIE). [diego.duque01@usc.edu.co](mailto:diego.duque01@usc.edu.co)

## PALABRAS CLAVE

FPGA, Ultrasonido, Posicionamiento, Punto flotante, 2D

## ABSTRACT

This article presents the implementation on hardware of an arithmetic algorithm that allows establishing a pointer position on a Cartesian coordinate system using emission and reception of ultrasonic waves. The algorithm selected is a linear equation system based calculated from the *Time of Flight* differences from the emitter pointer to four fixed receivers with known coordinates. The system was synthesised on the EP2C20484C7 FPGA device of *Cyclone II*® by Altera included in the DE1 development board. That system mainly consists in a module for TOF differences, a Floating Point arithmetic unit ordered to calculate the coordinates, and an unit for graphical display of pointer position on a conventional monitor via VGA port of DE1 board.

## KEYWORDS

FPGA, Ultrasound, Positioning, Floating point, 2D

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la instrumentación electrónica, y extendiéndose hacia otras ramas como la automatización y la robótica, el diseño de sistemas de medición y percepción se ha convertido en un pilar fundamental para el aprovechamiento y la óptima selección del tipo de señales que permiten la implementación de los sistemas mencionados. Dentro de las señales de uso más extendido se destaca el ultrasonido que presenta buenas prestaciones debido a su reducido ángulo de dispersión (que redundo en menores pérdidas de intensidad) y a su reducida longitud de onda (que hace posible obtener mejores resoluciones de medida). En adición a esto, es posible realizar la construcción de sistemas completamente en hardware a muy bajo costo gracias al avance que representan los dispositivos programables como los *Complex Programmable Logic*

*Device* (CPLD) y los *Field Programmable Gate Array* (FPGA) permitiendo la implementación de algoritmos matemáticos y de procesamiento de señales en un solo chip, lo cual presenta ventajas sobre el procesamiento en software.

En este contexto, el presente trabajo presenta el desarrollo de un prototipo que permite, a nivel de hardware, la determinación de la posición de un puntero de forma gráfica mediante la implementación de un algoritmo basado en las diferencias de tiempo de vuelo desde una señal ultrasónica proveniente del puntero hacia cuatro receptores ubicados en posiciones conocidas, y que se expresa como la solución de un sistema de ecuaciones lineales. Por consiguiente, se identifican dos etapas generales en el sistema propuesto: una etapa conformada por los circuitos de emisión y recepción ultrasónica, y otra consistente en el sistema digital que lleva a cabo la solución del sistema de ecuaciones que permite determinar las coordenadas del puntero en cuestión.

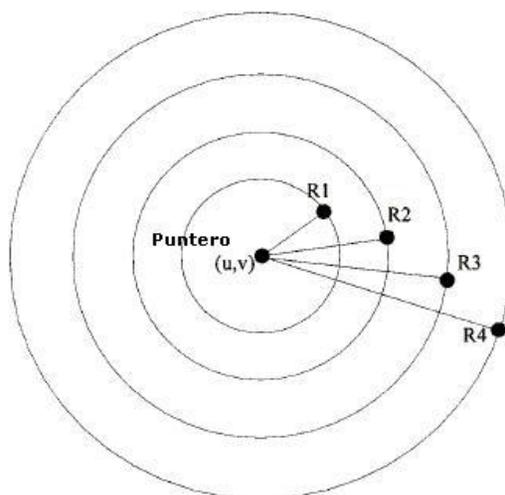
El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se explica de forma breve la descripción del algoritmo de posicionamiento utilizado en el proyecto, al igual que el diseño de los circuitos encargados de la emisión y la recepción ultrasónica. En la sección 3 se explica la adecuación del algoritmo de posicionamiento para su implementación a nivel de hardware, las etapas de sistema como tal y su descripción. En la sección 4 se presentan los resultados tanto simulados como experimentales, y finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

## **2. ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO Y CIRCUITOS DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN ULTRASÓNICA**

En esta sección se describe el algoritmo de posicionamiento utilizado, al igual que los circuitos de emisión y recepción ultrasónica.

## 2.1 POSICIONAMIENTO POR DIFERENCIA DE TIEMPOS DE VUELO

El algoritmo de posicionamiento seleccionado se basa en la determinación cartesiana de la ubicación de un transductor ultrasónico que actúa como puntero, conectado a un circuito emisor, y cuatro receptores estáticos sobre el mismo plano horizontal [7] como lo muestra la figura 1.



**Figura 1. Ubicación del puntero emisor respecto a los receptores**

Para el caso de posicionamiento en 2-D se requieren cuatro receptores en diferentes secciones del plano horizontal, tomando como referencia al primero o R1, respecto al cual se calculan las diferencias de tiempo de llegada con los receptores restantes. La ubicación de los receptores debe permitir que exista una relación entre los tiempos de llegada de tal forma que R1 sea el primero en recibir la señal y a partir de este punto, se puedan calcular las diferencias de tiempos de vuelo con respecto a los receptores restantes. De lo anterior, y tomando en cuenta la propiedad de las ondas sónicas de desplazarse radialmente, se determinan las ecuaciones que describen las circunferencias cuyo centro corresponde a la ubicación  $(u,v)$  del puntero.

$$\begin{aligned}
(x_1 - u)^2 + (y_1 - v)^2 &= d^2 \\
(x_2 - u)^2 + (y_2 - v)^2 &= (d + c\Delta T_{12})^2 \\
(x_3 - u)^2 + (y_3 - v)^2 &= (d + c\Delta T_{13})^2 \quad (1) \\
(x_4 - u)^2 + (y_4 - v)^2 &= (d + c\Delta T_{14})^2
\end{aligned}$$

Donde la variable  $d$  corresponde a la distancia radial entre el receptor R1 y el puntero. Nótese que para las ecuaciones que describen las tres circunferencias exteriores, el radio está dado por el término  $d+c\Delta t_{1x}$  donde  $c$  es la velocidad del sonido en el aire y  $\Delta t_{1x}$  es la diferencia del tiempo de llegada entre el receptor en cuestión y el primer receptor. Despejando la variable  $d$  en la primera ecuación y reemplazando en las tres siguientes, se obtiene finalmente el sistema de ecuaciones de 3x3.

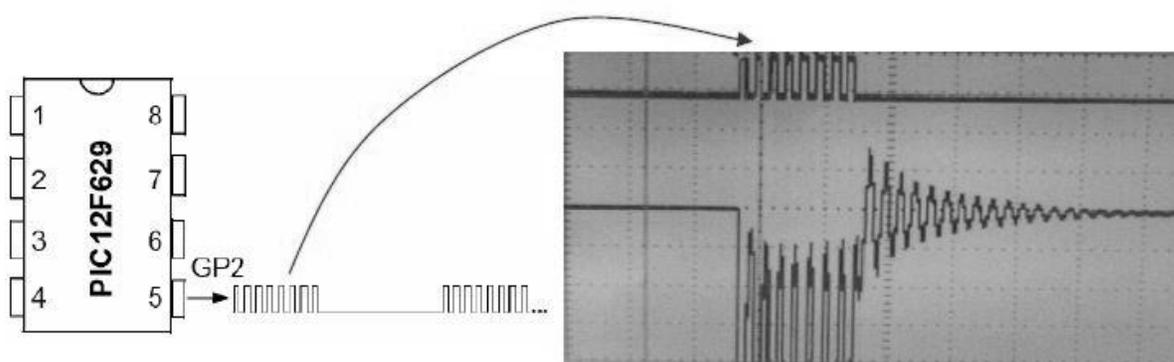
$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) & -2c\Delta T_{12} \\ 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) & -2c\Delta T_{13} \\ 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) & -2c\Delta T_{14} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2\Delta T_{12}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ c^2\Delta T_{13}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 \\ c^2\Delta T_{14}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_4^2 - y_4^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Se puede observar en (2) que las variables del sistema son las coordenadas del puntero  $(u,v)$  y la distancia  $d$  desde el puntero hasta el primer receptor. Los términos  $x$  e  $y$  son valores constantes que corresponden a las coordenadas de los receptores, y  $c$  se asume también como un valor constante.

## 2.2 CIRCUITOS DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN ULTRASÓNICA

Los circuitos para la emisión y la recepción de la señal ultrasónica son circuitos que funcionan de forma independiente debido a que el algoritmo seleccionado opera con diferencias de TOF y no con TOFs absolutos, razón por la cual los circuitos no requieren ningún tipo de sincronización y pueden operar con fuentes de poder independientes, evitando así problemas de acoplamiento eléctrico que producen detecciones erróneas de la señal ultrasónica en la etapa de recepción.

Para la emisión y recepción de la señal ultrasónica se utilizan transductores piezoeléctricos a 40kHz con un diámetro de 12mm. La frecuencia de resonancia de los transductores permite establecer un patrón de radiación determinado por un alcance aproximado de 2m y un ángulo de dispersión (determinado experimentalmente) de casi 30°. El circuito de emisión ultrasónica que actúa como puntero se construye con un esquema de emisión pulsada a partir del microcontrolador PIC12F629, el cual se encarga de excitar el transductor por medio de ocho pulsos cuadrados [2] de aproximadamente 12,5µs de ancho, emitidos cada 200ms (figura 2). La utilización del microcontrolador permite la generación de una señal limpia, estable en frecuencia además de una reducción considerable en el tamaño físico del circuito y su consumo de energía.



**Figura 2. Señal de excitación vista en el µC (arriba) y en el transductor emisor**

El circuito receptor es un circuito de instrumentación encargado de adecuar la señal proveniente del medio captada por el transductor de recepción, agregando ganancia y filtrado para obtener una señal de mayor nivel de voltaje. Debido a los objetivos y el alcance del proyecto, se adoptó el método más básico de detección de ondas ultrasónicas: detección por nivel o método de umbral. El circuito cuenta entonces con una etapa de rectificación de media onda y un filtro pasa bajas para la obtención de la envolvente de la señal ultrasónica y una etapa comparadora para la generación del pulso de detección de la señal [3]. Cabe destacar que tanto la etapa de rectificación como la de comparación requieren ser adecuadas, de tal forma que se garantice una buena calidad de la señal envolvente en términos de potencia y una estabilidad y

limpieza del pulso de recepción. Los circuitos de recepción se diseñaron teniendo en cuenta el diagrama de bloques de la figura 3.



**Figura 3. Diagrama de bloques del circuito de recepción ultrasónica**

### **3. DISEÑO DEL SISTEMA DIGITAL PARA POSICIONAMIENTO EN 2D**

En esta sección se explicará por etapas el diseño del sistema digital para la solución del sistema de ecuaciones que permite determinar las coordenadas del puntero dentro del plano.

#### **3.1 MÉTODO PARA LA SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES**

Para facilitar la implementación del algoritmo de posicionamiento a nivel de hardware, fue posible reducir la solución del sistema de 3x3 mencionado en la sección 2 a dos ecuaciones algebraicas cuyos componentes son las diferencias de tiempos de vuelo como términos variables (parámetros) y términos constantes resultantes del valor de la velocidad del sonido y las coordenadas de los cuatro receptores.

Se decidió utilizar el método de Regla de Cramer [4] [10], el cual consiste en hallar el determinante de la matriz asociada al sistema y los determinantes de las matrices asociadas a cada variable (tres en total). Solamente se requiere calcular el determinante general y los determinantes asociados a las variables  $u$  y  $v$  del sistema, lo que reduce la cantidad de elementos lógicos a utilizar en el diseño final.

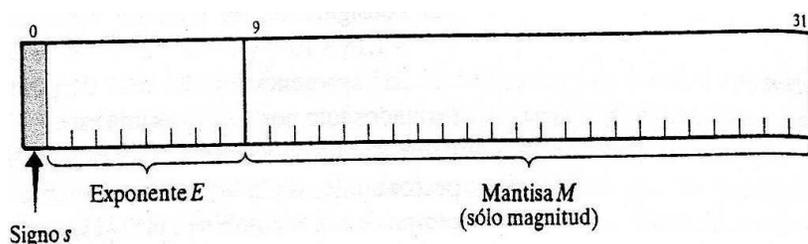
Realizando el análisis algebraico correspondiente para hallar los determinantes, las coordenadas del puntero pueden encontrarse mediante las ecuaciones de los determinantes parametrizadas las cuales son

$$|A| = Cte1[Cte2(\Delta T_{12} - \Delta T_{13}) + \Delta T_{14}] \quad (3)$$

$$a = Cte5.\Delta T_{1x} \cdot [Cte4.(Cte1.\Delta T_{1x} - Cte2.\Delta T_{1x}) \pm Cte3] \quad (4)$$

Donde (3) es la forma general de la ecuación para el cálculo del determinante general de la matriz asociada y (4) la forma general para el cálculo de los términos de las ecuaciones de los determinantes de las matrices asociadas a las variables  $u$  y  $v$ . Los valores constantes o Cte son valores resultantes de productos y sumas entre los valores correspondientes a las coordenadas de los receptores y  $c$ .

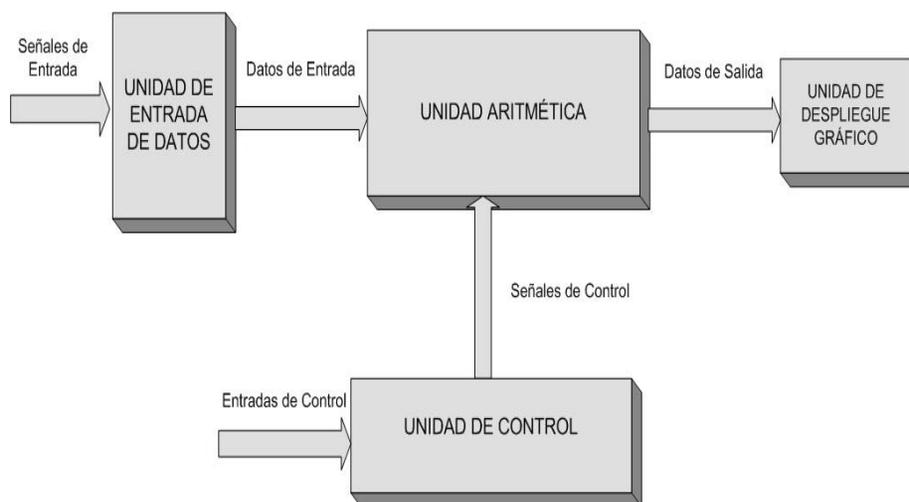
Una consideración importante dentro del desarrollo del proyecto es que las operaciones aritméticas deben realizarse de tal manera que el resultado final de las mismas posea la mayor precisión posible. Para este fin se determinó que la unidad mínima de tiempo a utilizar sea el microsegundo ( $\mu s$ ). De esta manera,  $c$  asume el valor constante de  $0.0344 \text{ cm}/\mu s$ . Al tratarse de un valor tan pequeño, es necesario adoptar un formato de datos adecuado para evitar errores de aproximaciones que se propagan a lo largo de los cálculos produciendo resultados erróneos. Para este fin, se adoptó el formato de datos en punto flotante de precisión simple definido por la norma IEEE 754 [6] como se muestra en la figura 4.



**Figura 4. Formato IEEE 754 para números en punto flotante de precisión simple**

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

El sistema de posicionamiento se desarrolla completamente en lenguaje VHDL para su posterior síntesis en el dispositivo FPGA EP2C20484C7 de la familia *Cyclone II*® de Altera, y se describe mediante la arquitectura observada en el diagrama de bloques de la figura 5.



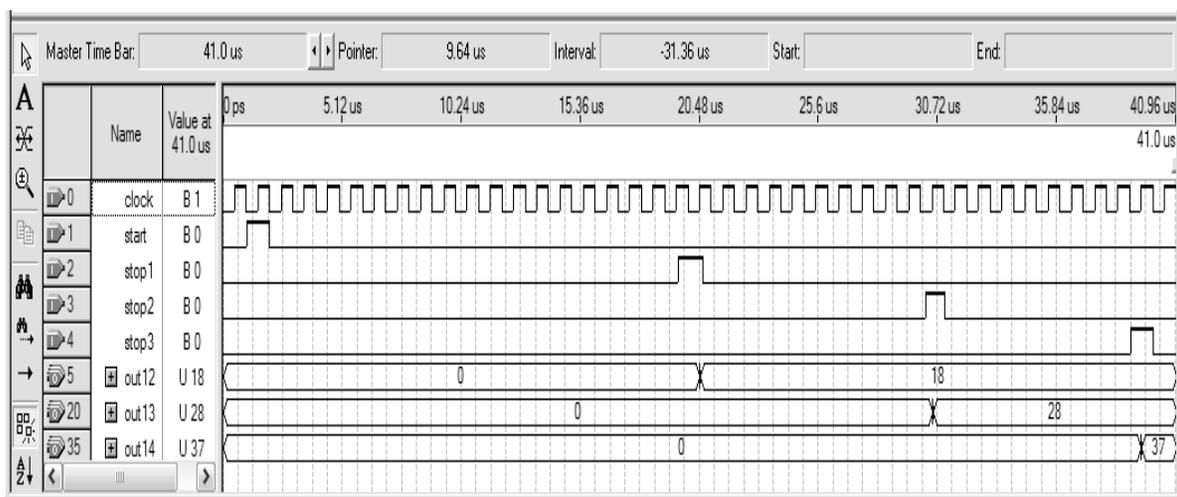
**Figura 5. Arquitectura Básica del Sistema Digital de Posicionamiento**

### 3.3 UNIDAD DE ENTRADA DE DATOS

Esta unidad es la encargada de determinar las diferencias de tiempos de vuelo que servirán como argumentos para la solución del sistema de ecuaciones y el cálculo de las coordenadas del puntero. Al haber seleccionado el método de umbral o detección por nivel como método para la detección de señal ultrasónica y cálculo de tiempo de vuelo, es necesario describir el hardware encargado de determinar el intervalo tiempo existente entre la llegada de una señal ultrasónica y otra.

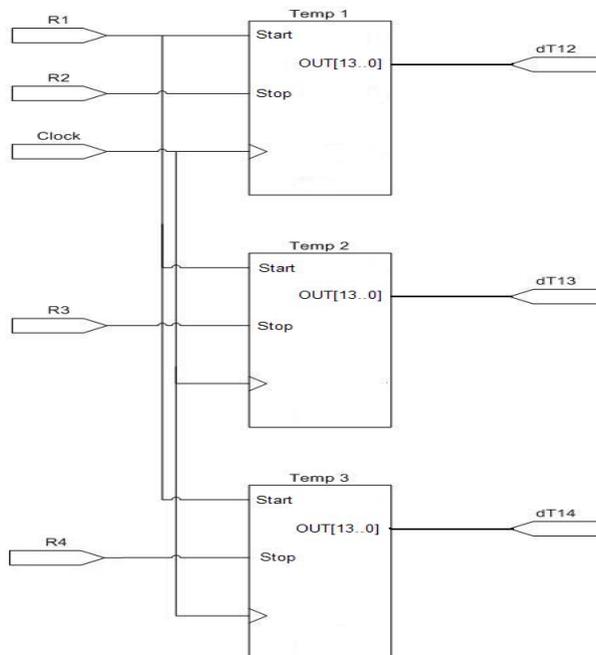
Esta unidad consta básicamente de unos temporizadores encargados de determinar el tiempo transcurrido entre la llegada de un pulso de recepción y otro. El temporizador consiste en un contador de ciclos de reloj a 1MHz que determina el intervalo entre la llegada de una señal de START proveniente del primer receptor ultrasónico y una señal de STOP proveniente de cualquiera de los demás receptores. El temporizador está

diseñado de tal forma que pueda registrar la última cuenta realizada tras la llegada de la señal de STOP y mostrar por la salida únicamente este valor, además de actualizarlo tras la llegada de una nueva señal de START (figura 6).



**Figura 6. Diagrama de tiempos de los tres temporizadores en paralelo**

Para obtener las diferencias de tiempos de vuelo, es necesario crear tres entidades de manera estructural para obtener los diferentes valores de forma simultánea, además de un hardware que se encargue de realizar la conversión del dato obtenido al formato de punto flotante y un registro activado por la última señal de recepción a las salidas de cada temporizador para que los datos sean dirigidos de forma paralela al siguiente bloque del diseño. La implementación estructural de los tres temporizadores se observa en la figura 7.

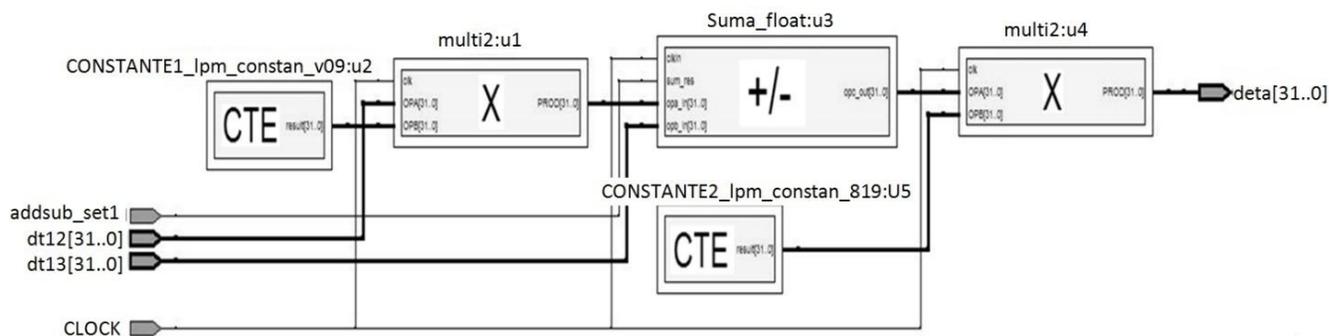


**Figura 7. Implementación estructural de los tres temporizadores en paralelo**

### 3.4 UNIDAD ARITMÉTICA

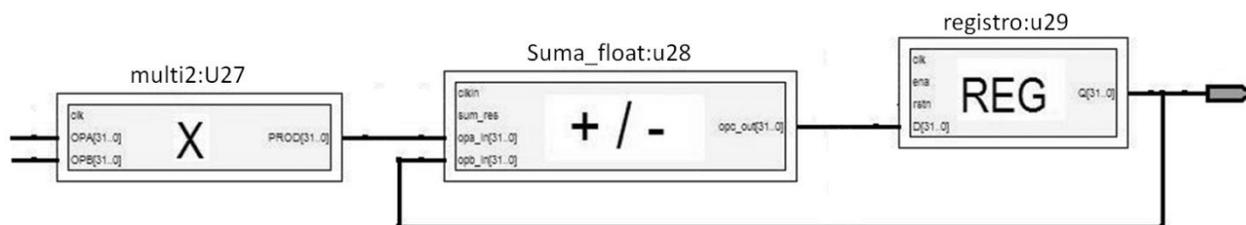
La unidad aritmética consiste en la implementación a nivel de hardware de las ecuaciones descritas en la sección 3.1. Hay que considerar que al trabajar en formato de punto flotante [9] y al ser las ecuaciones asociadas a las variables del sistema tan grandes, se precisa trabajar de forma secuencial con el hardware encargado de estas operaciones, lo cual es posible por medio de la implementación de una Unidad de Control o *Controlpath* la cual se explicará en lo sucesivo.

La implementación de la unidad aritmética se realiza desarrollando entidades independientes para las operaciones de suma/resta y multiplicación, y declarándolas como componentes de una entidad de mayor jerarquía. Es posible crear entidades independientes para las dos unidades encargadas del cálculo de los diferentes valores, de tal manera que la unidad encargada del cálculo del determinante general expresado por (3) posee la arquitectura observada en la figura 8.



**Figura 8. Diseño de hardware aritmético para el cálculo del determinante general**

Para el cálculo de los determinantes asociados a las variables del sistema, se adopta la topología de la ecuación (4). En realidad esta ecuación corresponde al cálculo de uno de los términos de la ecuación completa, lo que permite realizar una simplificación del diseño debido a que son dos ecuaciones de tres términos que se suman en cada una, los cuales poseen el mismo patrón diferenciándose únicamente en los argumentos que los conforman. Para realizar el cálculo del determinante realizando la ecuación completa, se implementa en el diseño un bloque Multiplicador- Acumulador (MAC) (figura 9), el cual consiste en un sumador con una unidad de almacenamiento temporal o registro en la parte final donde la salida de este último se realimenta a una de las entradas del sumador y donde la entrada restante del sumador se conecta a la salida de un multiplicador.



**Figura 9. Arquitectura de un bloque MAC**

Los argumentos correspondientes a las diferentes ecuaciones se conectan a multiplexores, cuyas salidas van conectadas a las entradas de la unidad aritmética y en los que un valor de entrada es seleccionado por la unidad de control para el cálculo de cada uno de los términos. A la salida de las unidades aritméticas se encuentran tres registros, uno para el determinante general y dos para los determinantes asociados, que permiten la posterior división de los términos.

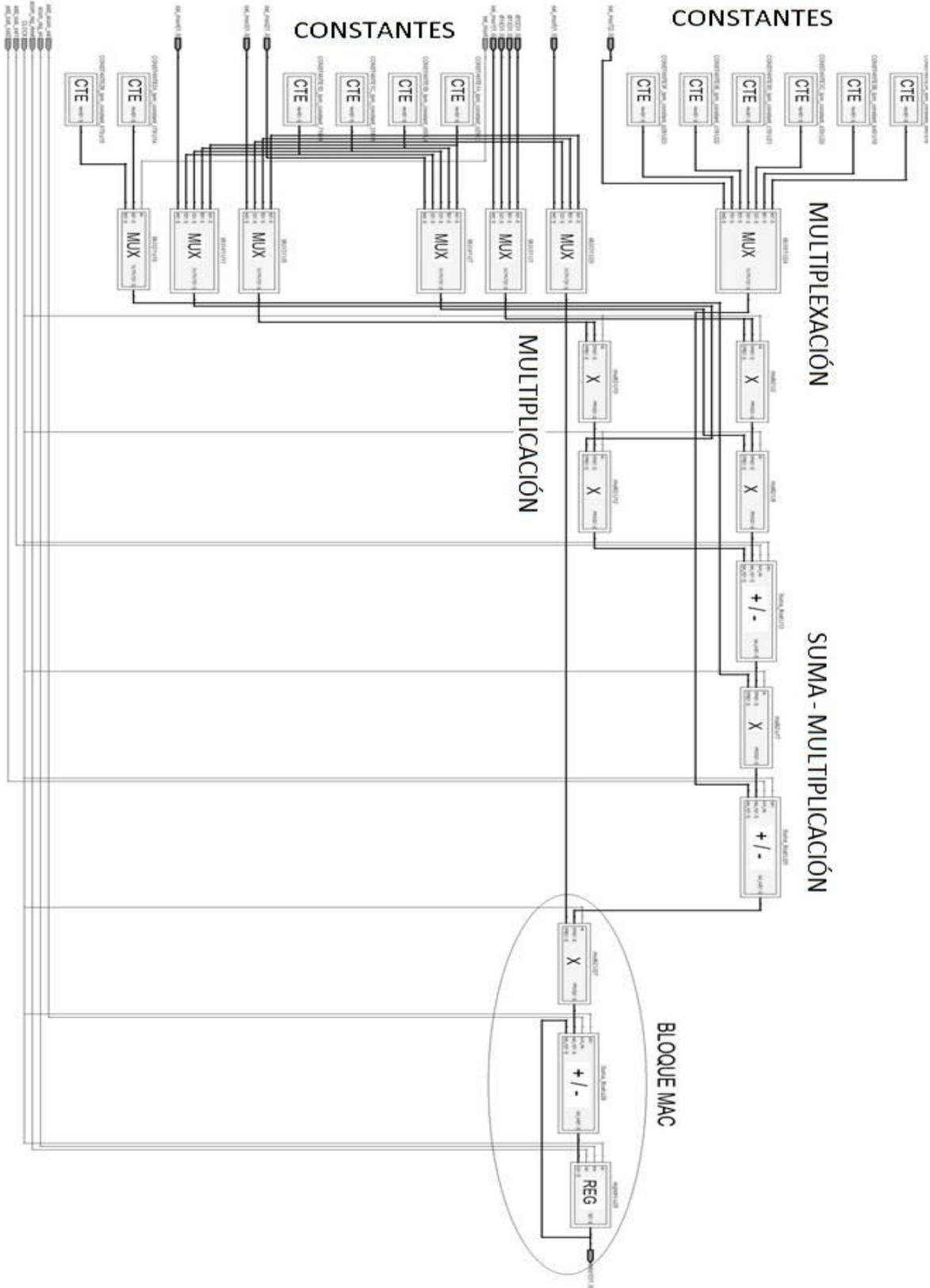
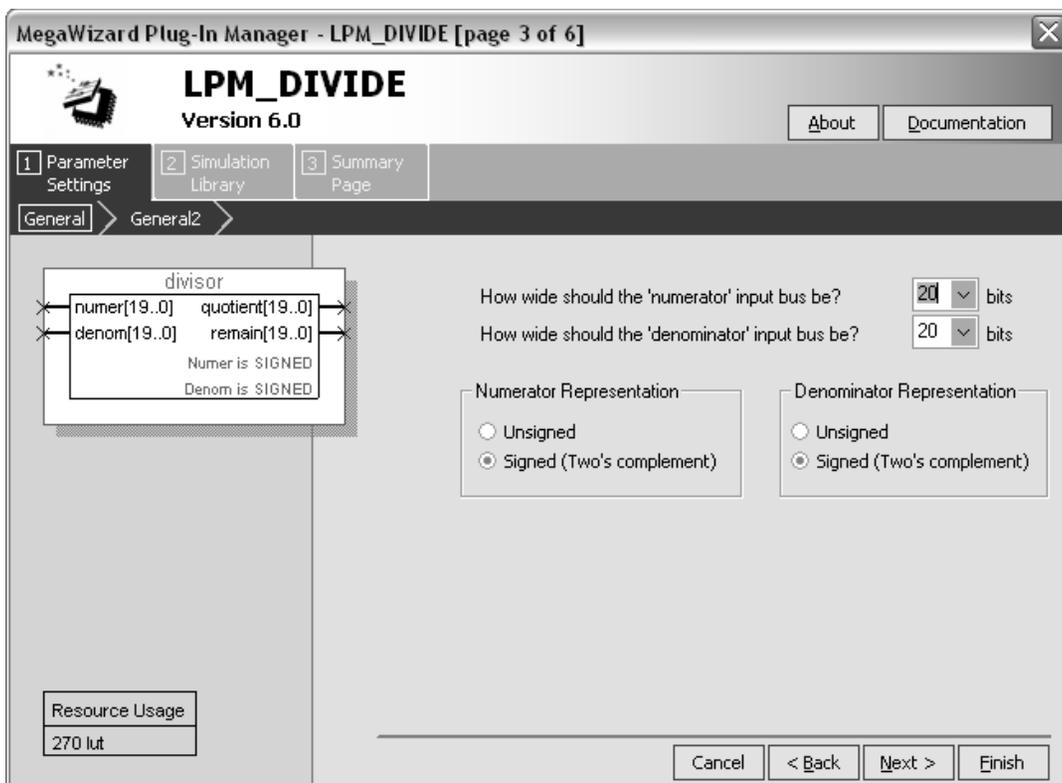


Figura 10. Diseño de hardware aritmético para el cálculo de los determinantes

Para el cálculo de los valores de las coordenadas es necesario efectuar la división entre los determinantes asociados a las variables y el determinante de la matriz. Para facilitar esto, se realiza la conversión de los valores resultantes del procesamiento en las unidades aritméticas en punto flotante nuevamente al formato entero con signo con una resolución de 22 bits para evitar errores de signo o magnitud. En realidad se trata de realizar una aproximación a un valor binario entero, lo cual resulta adecuado ya que no es necesario tener en cuenta los valores decimales presentes en el resultado debido al tamaño numérico de los mismos. La operación de división entera se realiza por medio de la declaración de la mega función *lpm\_divide* de Altera como bloque parametrizable. Cabe destacar que los valores constantes utilizados en las unidades aritméticas se declaran de la misma forma utilizando la mega función *lpm\_constant*.

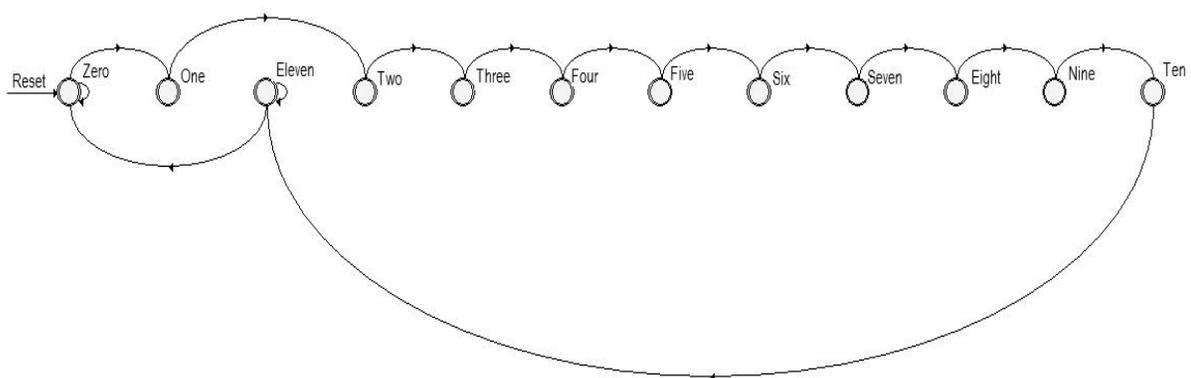


**Figura 11. Uso de la mega función *lpm\_divide* para división entera**

### 3.5 UNIDAD DE CONTROL

La Unidad de control consiste en un circuito secuencial síncrono encargado de manipular las señales lógicas que controlan las operaciones de la unidad aritmética [8] a saber, las señales de selección de los multiplexores, las señales de habilitación de los registros y la selección de suma y resta.

La unidad de control consiste en una máquina de estados en la cual cada estado se encarga de seleccionar las señales correspondientes al cálculo de cada término de las diferentes ecuaciones. Adicionalmente, existen estados presentes de forma anterior o intermedia a los estados ya mencionados que se encargan de habilitar o limpiar los registros correspondientes a los datos de entrada y salida de la unidad aritmética. Se propuso el diseño de una máquina de 12 estados con un reloj a 2MHz como se observa en el diagrama de estados de la figura 12.



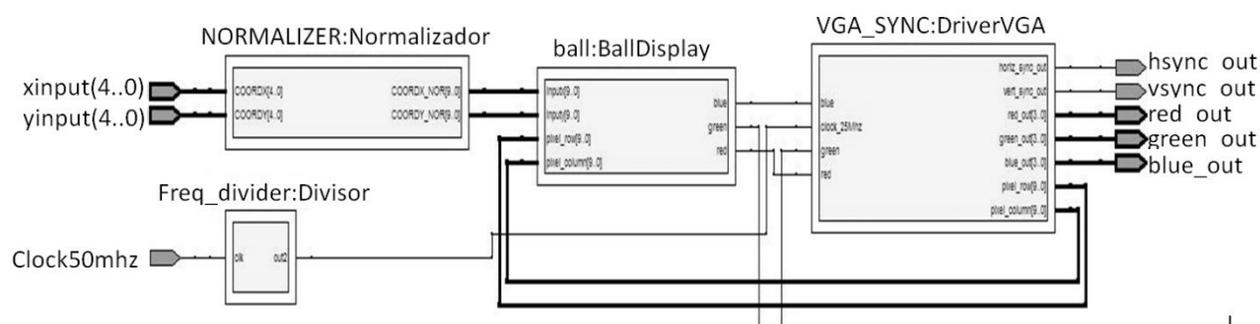
**Figura 12. Diagrama de estados de la unidad de control**

### 3.6 UNIDAD DE DESPLIEGUE GRÁFICO

Por ultimo, se realiza el despliegue de la posición de las coordenadas en el plano mediante la visualización en un monitor VGA gracias a la generación del hardware encargado de producir las señales de sincronización. Para esto se aprovechó el puerto

VGA incorporado en la tarjeta DE1 [5] que permitió hacer el despliegue sin necesidad de realizar interfaces con un PC ni desarrollo de aplicaciones en software.

La unidad consta de tres bloques, un bloque principal encargado de generar las señales de barrido de la pantalla, un bloque encargado de la normalización de los datos provenientes de la unidad aritmética para establecer la posición adecuada sobre la pantalla y la escala correspondiente, y por último un bloque de generación de gráficos en donde, por medio de una función de resolución [1] se despliegan dos líneas correspondientes al plano y un punto representando el puntero sobre el fondo negro. La arquitectura de este bloque puede observarse en la figura 13.



**Figura 13. Arquitectura de la unidad de despliegue gráfico**

## 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se presenta un grupo de pruebas tanto teóricas como prácticas realizadas para determinar si el algoritmo de posicionamiento adoptado para el desarrollo del proyecto era el adecuado y el cálculo del margen de error y la precisión del sistema a la hora de su implementación.

### 4.1 PRUEBA DE ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO CON MATLAB

Se realizó una prueba netamente teórica mediante la cual se tomaron arbitrariamente 11 coordenadas distintas en diversos cuadrantes del plano, y se procedió a calcular las

diferencias de tiempo de vuelo con lápiz y papel. Estos resultados se ingresaron por teclado a la ventana de comandos de MATLAB en donde previamente se hacía el llamado a un programa que implementaba el algoritmo de posicionamiento resolviendo el sistema de ecuaciones para calcular las coordenadas. Para esta prueba, cada valor de  $\Delta T_{ix}$  se ingresa con dos cifras decimales como se observa en la Tabla 1. Los errores porcentuales se obtuvieron con las diferencias entre las coordenadas nominales y obtenidas, divididas entre los valores de las coordenadas nominales.

Coordenadas nominales (cm)		Diferencias de tiempo calculadas (uS)			Coordenadas obtenidas (cm)		Error Porcentual %	
X	Y	$\Delta T_{12}$	$\Delta T_{13}$	$\Delta T_{14}$	X	Y	X	Y
10	30	251.91	720.12	1007.42	10.00	30.00	0	0
15	5	367.24	851.88	1108.22	15.00	5.00	0	0
12	14	348.84	836.49	1110.61	12.00	14.00	0	0
8	35	220.72	692.27	998.07	8.00	34.99	0	0.028
-25	25	637.76	1283.33	1801.43	-25.02	24.97	0.08	0.120
-5	18	491.24	1070.70	1464.88	-5.00	17.99	0	0.050
-4	40	340.88	909.65	1330.06	-3.99	39.99	0.250	0.025
-10	-8	556.52	1152.71	1547.48	-9.99	-7.99	0.100	0.125
-20	-12	599.06	1219.25	1654.90	-17.56	-13.2	12.20	9.200
-2	-9	515.10	1085.33	1439.94	-2.00	-9.01	0	0.111
0	0	490.09	1050.83	1399.09	0	-1	0	-

**Tabla 1. Resultados teóricos del algoritmo de posicionamiento con MATLAB**

#### **4.2 PRUEBA TEÓRICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD ARITMÉTICA MEDIANTE SIMULACIÓN EN QUARTUS II**

Para verificar que el diseño de la unidad aritmética del sistema de posicionamiento, en conjunto con la unidad de control se diseñó correctamente, se realizó la simulación de las mismas por medio de los datos de entrada utilizados en la prueba anterior. Se decidió utilizar los datos redondeados debido a que de antemano se asumió que los

temporizadores solamente pueden entregar valores enteros de  $\Delta T_{1x}$ . Para la simulación en Quartus II se utilizó una entrada de reloj a 2Mhz, la cual es la frecuencia mínima a la que el sistema funciona adecuadamente y los datos de entrada utilizados en la prueba anterior. Los resultados se pueden observar en la Tabla 2.

Coordenadas nominales (cm)		Diferencias de tiempo redondeadas (uS)			Coordenadas obtenidas (cm)		Error Porcentual %	
X	Y	$\Delta T_{12}$	$\Delta T_{13}$	$\Delta T_{14}$	X	Y	X	Y
10	30	252	721	1008	11	31	10	3.3
15	5	268	852	1109	15	5	0	0
12	14	349	837	1111	13	15	8.3	7.14
8	35	221	693	999	8	36	0	2.85
-25	25	638	1284	1802	-23	28	8	12
-5	18	492	1071	1465	-5	18	0	0
-4	40	341	910	1331	-4	41	0	2.5
-10	-8	557	1153	1548	-10	-9	0	12.5
-20	-12	600	1220	1655	-20	-15	0	25
-2	-9	516	1086	1440	-2	-10	0	11.11
0	0	491	1051	1399	-1	-1	-	-

**Tabla 2. Resultados teóricos del algoritmo de posicionamiento con QUARTUS II**

#### 4.3 PRUEBA EXPERIMENTAL DE POSICIONAMIENTO CON QUARTUS II

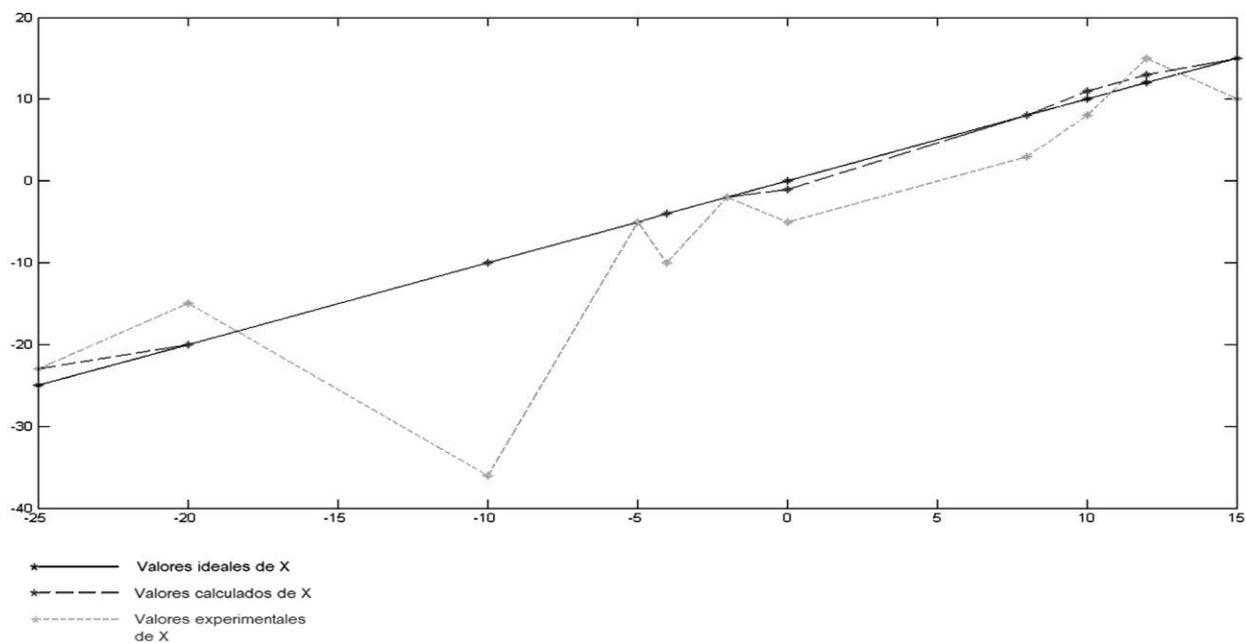
Adicional a las pruebas anteriormente mencionadas, se realizó una prueba experimental para determinar si las coordenadas del puntero reales coinciden con las calculadas mediante el algoritmo por medio de la simulación en Quartus II. Para este caso, se ubicó el puntero en las coordenadas seleccionadas y se calcularon las diferencias de tiempo de vuelo por medio de la observación en el osciloscopio comparando el momento en el que se genera la señal PRF del circuito emisor con el tiempo de llegada de los pulsos de recepción en los circuitos receptores para determinar los valores de  $\Delta T_{1x}$

correspondientes a cada coordenada. Los resultados de simulación en Quartus II se pueden observar en la Tabla 3

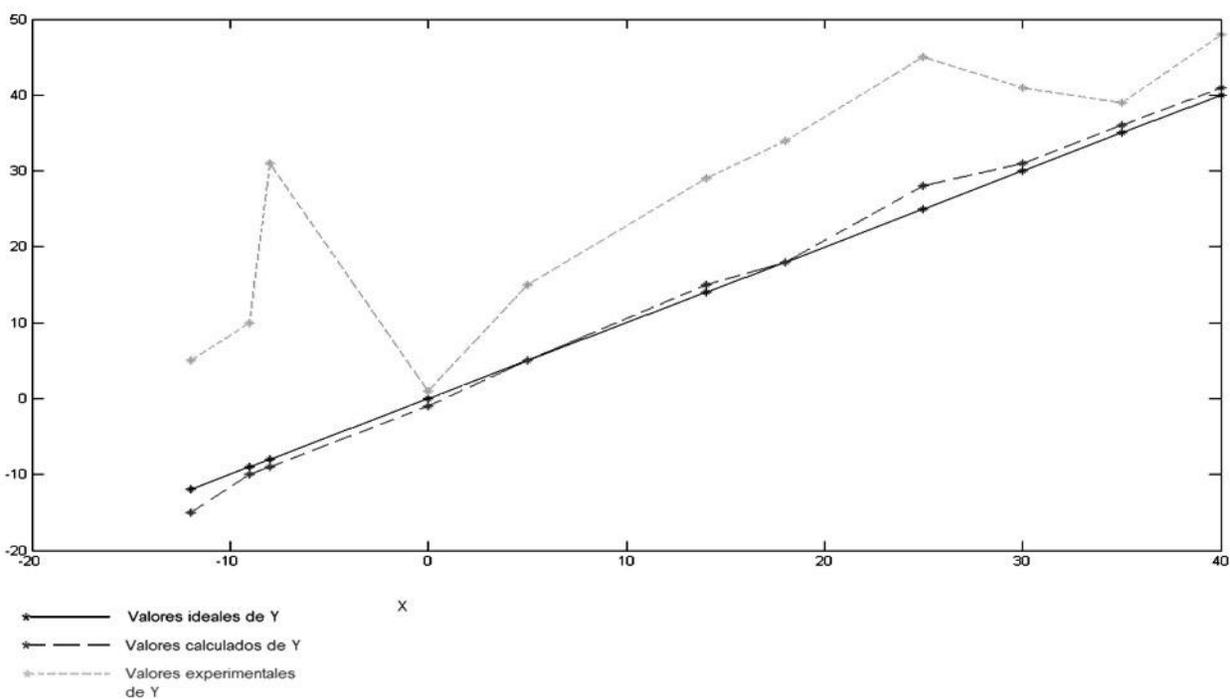
Coordenadas nominales (cm)		Diferencias de tiempo redondeadas (uS)			Coordenadas obtenidas (cm)		Error Porcentual %	
X	Y	$\Delta T_{12}$	$\Delta T_{13}$	$\Delta T_{14}$	X	Y	X	Y
10	30	252	721	1008	8	41	20	36.6
15	5	268	852	1109	10	15	33.3	200
12	14	349	837	1111	15	29	25	107.14
8	35	221	693	999	3	39	62.5	11.42
-25	25	638	1284	1802	-23	45	8	80
-5	18	492	1071	1465	-5	34	0	88.88
-4	40	341	910	1331	-10	48	150	20
-10	-8	557	1153	1548	-36	-31	260	287.5
-20	-12	600	1220	1655	-15	5	25	83.3
-2	-9	516	1086	1440	-2	10	0	10
0	0	491	1051	1399	-5	1	-	.

**Tabla 3. Resultados de prueba experimental del algoritmo de posicionamiento con QUARTUS II**

Para comparar los resultados de las pruebas tanto en  $x$  como en  $y$ , se realizaron las curvas de correlación de las figuras 14 y 15 respectivamente.



**Figura 14. Curva de correlación para valores teóricos y experimentales de X**



**Figura 15. Curva de correlación para los valores teóricos y experimentales de Y**

Como se puede observar en las figuras anteriores, se realizó una comparación entre los resultados esperados y los resultados obtenidos mediante el análisis experimental, y se manifiesta una diferencia casi uniforme entre los datos ideales y los datos experimentales que representa un error en la medición de las diferencias de tiempos de

vuelo. Este error se debe a múltiples causas entre las cuales se pueden identificar problemas con la recepción de la señal ultrasónica, básicamente en cuanto a la variabilidad en el tiempo de detección: se encontró que esta variabilidad usualmente era igual a un período de la señal ultrasónica ( $12.5\mu\text{s}$ ), aceptable para una buena precisión axial, pero suficiente para generar discrepancias considerables a la hora de introducirse como error en la medición de tiempo de vuelo durante el cálculo de la posición del puntero. Además, en los receptores se debe ajustar un valor de umbral lo suficientemente bajo para que el comparador genere el pulso de detección; en lugares en donde el pulso de detección se genera mediante la recepción debida a uno de los lóbulos laterales, se presenta un error de medición del tiempo de vuelo ya que el nivel de umbral no puede ser lo suficientemente bajo para que la generación del pulso de detección coincida con la llegada del impulso ultrasónico. Para calcular este error, se realiza una diferencia entre los datos experimentales y los datos reales. Se calcula la mediana de cada uno de los vectores resultantes de esta diferencia por medio de MATLAB para establecer un valor de compensación promedio del error en la medición. Una vez hecho esto se obtuvo los siguientes resultados.

Mediana X= -2

Mediana Y= 15

Como se puede observar, para compensar en algún grado el error en X, se puede sumar dos centímetros a los cálculos obtenidos en la coordenada X y restar 15 a los cálculos obtenidos en la coordenada Y. De esta manera, pueden ajustarse los valores experimentales para que se aproximen a la curva de correlación ideal. Esto se puede realizar agregando sumadores enteros a la salida de la unidad aritmética del sistema digital que operen con estas constantes.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El desarrollo y las pruebas anteriormente explicadas concluyeron en la construcción de un sistema cuyo rango de acción se da en un área aproximada de  $0.4\text{mts}^2$  donde se puede observar la posición del puntero a través de un monitor VGA. Cada receptor se encuentra ubicado en las coordenadas ya mencionadas a 10cms de la superficie, al igual que el puntero emisor.

No fue posible aprovechar toda el área destinada para el posicionamiento del puntero en su totalidad debido a la atenuación de la señal ultrasónica que ocasionaba una caída en la potencia de la misma. De la misma forma, estos fenómenos ocasionan error en la medición de las diferencias de tiempo de vuelo debidas a la diferencia entre la llegada del impulso ultrasónico y la generación del pulso de detección, lo que a nivel aritmético ocasiona errores en los resultados finales estableciendo así zonas en donde la posición del puntero es errónea o nula. Se pudo observar teóricamente que para un error de un periodo de la señal ultrasónica ( $25\ \mu\text{s}$ ), existe un desfase de aproximadamente 5 cm en el eje  $X$  y de 10 cms en el eje  $Y$ .

De las pruebas y simulaciones realizadas, se puede concluir lo siguiente.

- Se logró crear un sistema completamente en hardware capaz de permitir la visualización de la posición de un puntero en un plano bidimensional con un área limitada en un monitor por medio de ondas ultrasónicas sin la necesidad de realizar ninguna clase de procesamiento por software. Se pudo justificar la utilización del dispositivo FPGA debido a las facilidades que este prestó para la implementación de la parte lógica aritmética en punto flotante, su alta densidad lógica, su velocidad y su flexibilidad para el diseño de sistemas digitales a nivel de componentes que permitieron el diseño de un sistema que probablemente resultaría menos eficiente siendo implementado de la misma forma en dispositivos programables como microcontroladores o DSP

- Se puede apreciar además que en la parte de generación y tratamiento de las señales ultrasónicas existen técnicas que permiten mejorar la precisión y el desempeño del proyecto que no pudieron implementarse en él, debido a que la mayor parte de los esfuerzos se concentraron en realizar la implementación del algoritmo de posicionamiento en hardware y a optimizar de la mejor manera el desempeño del sistema digital adoptando métodos sencillos y convencionales a la hora de realizar la parte de emisión y recepción, que permitieron establecer unos parámetros claves para el desarrollo práctico del algoritmo teórico seleccionado.
- Se presentaron ciertos limitantes a la hora de utilizar señales ultrasónicas para aplicaciones similares que pueden compensarse de alguna forma para mejorar su funcionamiento. Se puede destacar que el algoritmo de posicionamiento seleccionado, a pesar de ser eficiente, permitió concluir que la detección de la señal de ultrasonido y la medición de su tiempo de vuelo por detección de nivel no es un método óptimo para esta aplicación debido al error ocasionado por la diferencia entre la llegada de la señal ultrasónica y la generación del pulso de detección. Se detectó que el error mínimo presentado es de alrededor de  $25\mu\text{s}$  o un periodo de la señal ultrasónica, esto debido a problemas de absorción y dispersión de la señal ultrasónica en el medio, por lo que se debe recurrir a un método de detección digital para proporcionar mayor exactitud al sistema.

A partir de este proyecto puede realizarse trabajo futuro, que involucra expandir las posibilidades del sistema a realizar posicionamiento en 3D, además de mejorar la parte de emisión y recepción ultrasónica mediante la implementación de métodos de detección digital basados en correlación cruzada. Es posible también mejorar el desempeño del sistema encargado de la implementación del algoritmo en FPGA implementando algoritmos que permitan el diseño de un sistema completamente concurrente o bien un algoritmo matemático de mayor complejidad. Es posible también visualizar la posición de dos o más objetos a posicionar tanto en el caso de 2D como de 3D.

El proyecto puede servir también como ayuda en la parte de instrumentación a la hora de implementar un sistema de control digital de posición de forma remota, además de que los bloques utilizados en el desarrollo de la parte aritmética son de gran utilidad para el desarrollo de aplicaciones DSP a nivel de hardware.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]**ESPINOZA**, M.; **MONTAÑO**, A.; **VERA**, M.(--). METODOLOGIA PARA LA APLICACIÓN DEL VHDL EN EL DISEÑO DE VIDEOJUEGOS 2D E IMPLEMENTACION SOIC Grupo de Bioelectrónica y Nanoelectrónica, EIEE, Universidad del Valle Santiago de Cali, Colombia.

[2]**FERDEGHINI**, F. (--). SENSORES ULTRASÓNICOS: RESPUESTA A DISTINTAS FORMAS DE ONDA. CITEI, INTI. Buenos Aires, Argentina

[3]**FERDEGHINI** F. (--). SISTEMA DE DETECCIÓN COMBINADO PARA SENSORES ULTRASÓNICOS. CITEI, INTI. Buenos Aires, Argentina

[4]**GROSSMAN**, S.(1996). ALGEBRA LINEAL Quinta Edición Mc. Graw Hill México.

[5]**HAMBLEN** J.; **FURMAN**, M. (2002). RAPID PROTOTYPING OF DIGITAL SYSTEMS Second Edition. Kluwer Academic Publishers Boston, USA

[6]**HAYES**, J. (1996). INTRODUCCIÓN AL DISEÑO LÓGICO DIGITAL. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington Delaware EUA

[7]**MAHAJAN**, A; **WALWORTH** M. (2001). 3 –D POSITION SENSING USING THE DIFFERENCES IN THE TIME OF FLIGHTS FROM A WAVE SOURCE TO VARIOUS RECEIVERS. IEEE Transactions on Robotics Automation Vol. 17. No 1.

[8]**PEDRONI**, V.(2004). CIRCUIT DESIGN WITH VHDL. MIT Press London, England

[9]**VELASCO**, J.; VERA M. (--).DISEÑO DE OPERADORES ARITMÉTICOS EN PUNTO FLOTANTE USANDO FPGAS. Grupo de Bio-Nanoelectrónica, Escuela EIEE Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia

[10]**WILLIAMS**, G. (2002). ALGEBRA LINEAL CON APLICACIONES Cuarta Edición Mc Graw Hill, México.