

CODISEÑO HARDWARE/SOFTWARE DE UN SENSOR INTELIGENTE PARA MEDIDAS DE ACELERACIONES SOBRE 3 EJES BASADO EN PICOBLAZE

E. Magdaleno, M. Rodríguez, A. Ayala, I. Díaz
Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas
Universidad de La Laguna. España
emagcas@ull.es, mrvalido@ull.es

El presente trabajo muestra la aplicación de las nuevas metodologías de diseño basadas en lógica programable y FPGAs para realizar un prototipo de un sensor que obtenga aceleraciones en los 3 ejes, así como medidas de inclinaciones, velocidades y posiciones mediante un procesado de señal interno. Todas estas medidas, junto con la incorporación de prestaciones como calibración de offset y sensibilidad y una interfaz de comunicación con un PC hacen del prototipo un sensor inteligente. Toda la parte concerniente a las comunicaciones con el PC se han realizando con un microcontrolador embebido en la propia FPGA denominado PicoBlaze.

1. Introducción

A lo largo de los últimos años han cobrado especial interés las técnicas basadas en codiseño en el entorno de los sistemas empotrados. Mediante estas técnicas es posible dividir las tareas a realizar (particionado software/hardware) de manera que parte de ellas son implementadas mediante un hardware de propósito específico y otras mediante la programación de un microprocesador de propósito general [1]. De esta manera, las tareas más complejas y críticas se implementan en hardware mientras que aquellas que se adaptan mejor a la ejecución de un microprocesador y en las que se requiere mayor flexibilidad se programan.

Actualmente, la tecnología microelectrónica permite incluir sistemas completos dentro de una única pastilla de silicio. Son los llamados SoC (System on Chip), dentro de los cuales son de especial interés aquellos que se denominan SoPC (System on Programmable Chip). En éstos, en un mismo chip incluimos microprocesador, memoria, lógica programable para diseño a medida, y otro tipo de componentes que realizan funciones de procesado específicas a las necesidades del sistema.

Este tipo de sistemas supone un reto para los desarrolladores de sistemas por las innumerables ventajas que supone la implementación de SoPC. El diseño e implementación de un SoPC implica que hay que conocer el diseño de sistemas digitales basados en microprocesador junto con el diseño e implementación microelectrónica de sistemas digitales. Es decir, el diseñador de SoPC tiene que unir las capacidades del ingeniero de sistemas con las del ingeniero de diseño microelectrónico.

La estructura mínima de un SoPC basado en el microcontrolador de 8 bits embebido PicoBlaze se compone del módulo de PicoBlaze [2] y la memoria que almacena el programa. A estos componentes se les tiene que unir la interfaz de conexión con las señales de entrada y de salida, así como el resto de componentes de procesado que se necesitan en el sistema específico que se implementa en este proyecto.

La metodología de diseño de este tipo de sistemas está basada en lenguajes de descripción de hardware, en nuestro caso en VHDL (VHSIC (*Very High Speed Integrated Circuit*) *Description Language*). La estructura del código VHDL [3] que describe un sistema es una descripción que bien es completamente estructural, es decir, todos los componentes están descritos en módulos individuales y en la descripción del sistema solamente se establece el interconexión, o bien puede ser una descripción mixta estructural-comportamiento. En cualquier caso, el microprocesador PicoBlaze y la memoria de

programa se incluyen en el código VHDL del sistema como componentes. Para el resto de elementos bien se emplea una descripción estructural o de comportamiento.

Tomando por un lado las ventajas del diseño usando FPGA y la metodología de diseño basada en microcontroladores embebidos en estos dispositivos, se propuso a un alumno, en el marco de un Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Electrónica Industrial la implementación de un sistema que mida aceleraciones, velocidades y desplazamientos en los tres ejes y que pueda empotrarse, por ejemplo, en un vehículo autónomo.

2. Descripción del sistema

Como se ilustró en la introducción, el sistema implementado se trata de un instrumento de medida que consta de dos acelerómetros montados perpendicularmente y una FPGA Spartan 3 de Xilinx incluida en una placa S-3 Starter de Digilent [4]. A continuación se muestra un esquema general del sistema:

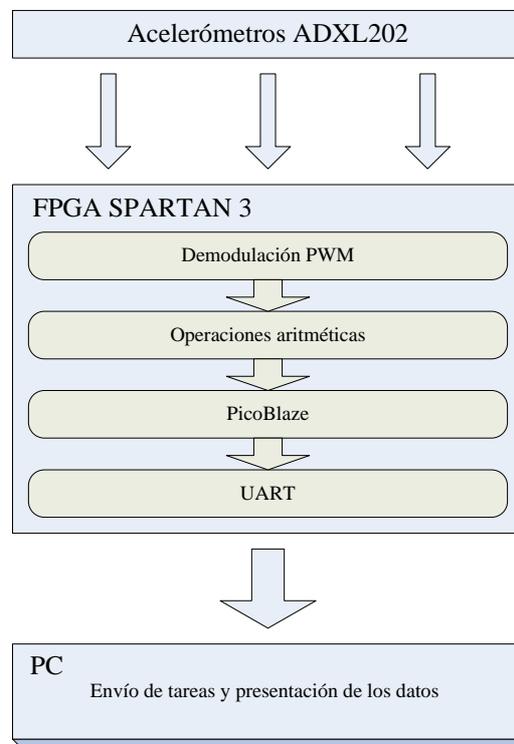


Figura 1. Diagrama funcional del sistema

Cada acelerómetro ADXL202 [5] incluye dos ejes con salidas digitales en forma de pulsos cuadrados con modulación de anchura de pulso (PWM), donde el ciclo de trabajo es proporcional a la aceleración detectada por el dispositivo. Dentro de la FPGA, cada uno de los canales de entrada desde los acelerómetros (PWMs de los ejes 'x', 'y' y 'z') cuenta con un demodulador independiente que ingresa los datos al sistema de procesamiento, que se encarga de hacer los cálculos matemáticos necesarios para obtener los valores de las aceleraciones en bytes representados en complemento a dos.

Una vez procesadas las señales, dentro de la FPGA, éstas son transmitidas al microcontrolador embebido PicoBlaze, el cuál se encarga de recibir e interpretar las consignas de configuración y de exportación de datos remitidas por una aplicación software desde PC a través del puerto serie RS-232, mediante un módulo UART de recepción y transmisión de datos. En la figura 2 se muestra el aspecto de

los dos acelerómetros montados perpendicularmente para obtener medidas en el espacio, y su conexión con la FPGA a través de uno de los buses de expansión de los que cuenta la placa de desarrollo. También puede apreciarse el puerto con que se ha realizado la comunicación con el ordenador.

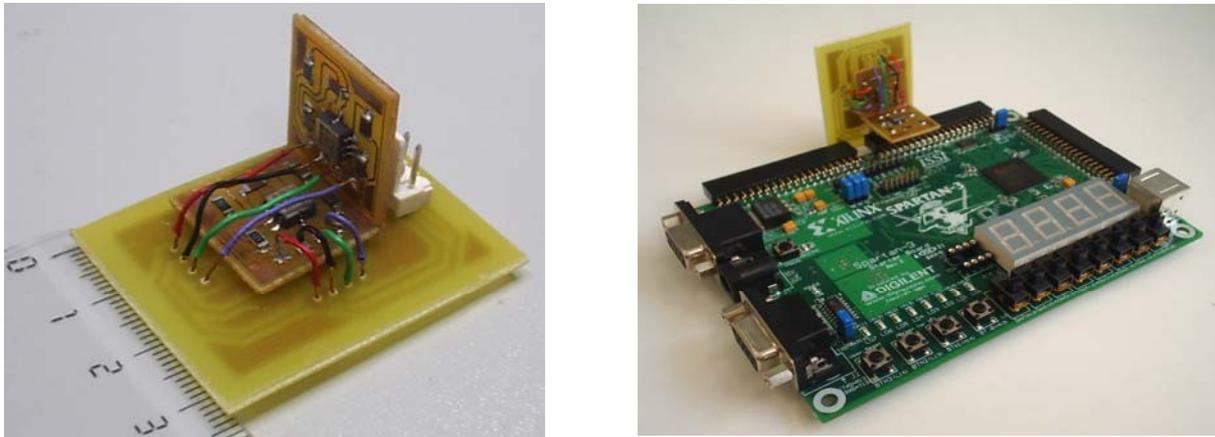


Figura 2. Aspecto de los acelerómetros y su conexión a la placa de desarrollo

3. Metodología de diseño

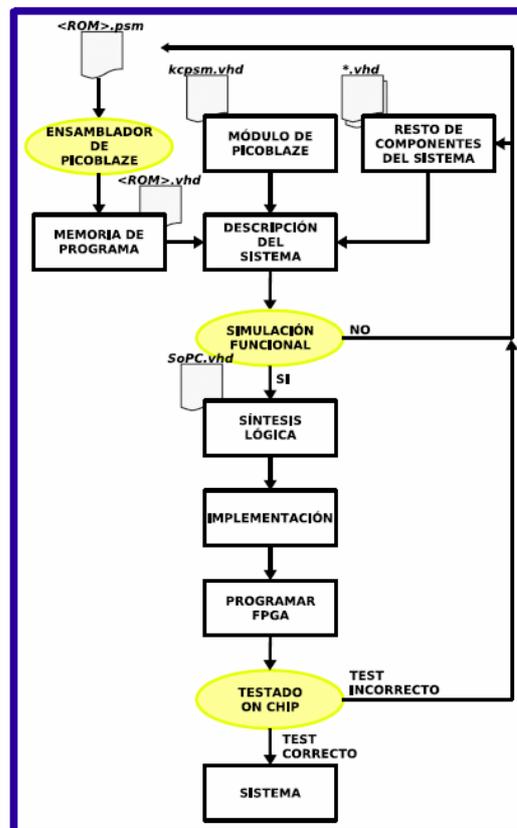


Figura 3. Metodología de diseño e implementación seguida

En la figura 3 se muestra la metodología seguida para el diseño e implementación del sistema. En dicha figura, observamos cómo el primer paso de la metodología propuesta es describir el sistema. En esta descripción, hay que emplear el módulo de PicoBlaze y además, generar el código de la memoria de programa y del resto de componentes de interconexión y procesado usando códigos VHDL para la descripción de los mismos.

PicoBlaze es un Soft Core de 8 bits, es decir, un microprocesador diseñado para ser 100% empotrable en FPGAs de Xilinx. PicoBlaze para Spartan-3 tiene las siguientes características:

- 30 instrucciones (en función de todas las condiciones posibles llegamos a un total de 57).
- Cada instrucción tiene un tamaño de 18 bits.
- 16 registros de propósito general de 8 bits.
- 256 puertos direccionables tanto directa como indirectamente, que nos permiten conectar PicoBlaze con otros dispositivos.
- Señal de reset, de interrupción y de reconocimiento de interrupción (nueva en esta versión).
- Permite direccionar una memoria de programa de 1024 palabras de 18 bits cada una.

La arquitectura que implementa el *core* de PicoBlaze puede apreciarse en la siguiente figura:

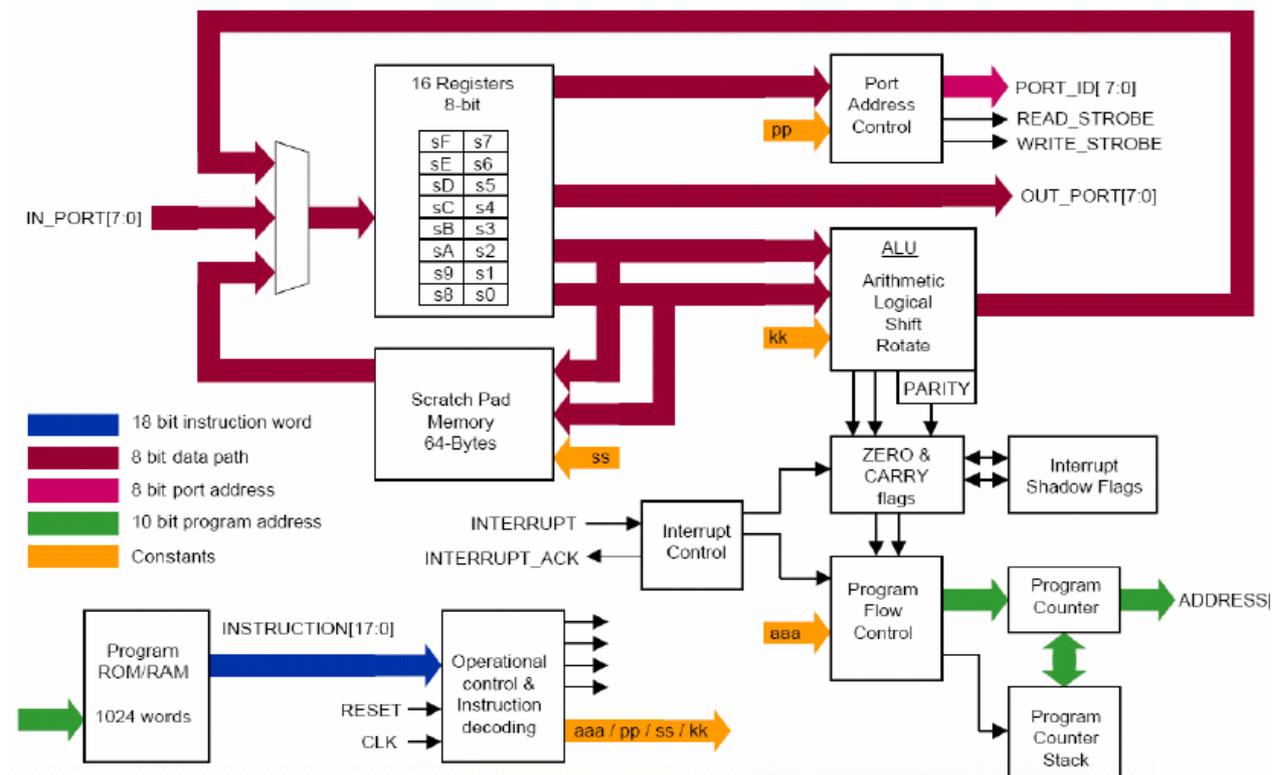


Figura 4. Arquitectura de PicoBlaze

A continuación, se sintetiza y se implementa el diseño empleando las herramientas del entorno de Xilinx ISE. Finalmente, se configura la placa descargando el sistema implementado en la FPGA a través de la herramienta iMPACT, comprobando sobre la propia placa si el resultado obtenido se ajusta al deseado, volviendo nuevamente a un paso anterior en caso contrario.

4. Descripción de la interfaz de usuario

El programa implementado en C# [6] básicamente envía instrucciones de adquisición de datos o de calibración del sensor a la FPGA y gestiona la recepción de datos adquiridos por el sensor y procesados por la FPGA.

Al inicio de la aplicación se ofrece la posibilidad al usuario de configurar las propiedades de la comunicación serial o bien comenzar directamente la conexión con la configuración predeterminada.



Figura 5. Ventana de inicio de la aplicación

Cuando se establece una nueva conexión se ofrece la posibilidad al usuario de conocer la aceleración instantánea a la que está sometida el dispositivo o bien su inclinación, suponiendo que éste se encuentra en estado de reposo. Además también se puede calibrar el dispositivo desde esta aplicación, siempre que el mismo se encuentre en la posición adecuada, horizontal si se quiere compensar el *offset* y vertical para calibrar la sensibilidad para cada uno de los ejes (figura 6).

El programa también permite observar gráficamente la evolución de los datos adquiridos por el sensor inteligente en tiempo real. Además de la aceleración, que es propiamente el parámetro que se recibe desde la FPGA, también permite observar la evolución de la velocidad y la posición del dispositivo sobre el plano horizontal. El cálculo de la velocidad se consigue aproximando la integral de la aceleración por el diferencial de tiempo por la suma finita de productos de la aceleración por el incremento de tiempo. La posición a su vez se aproxima por la suma finita de productos de la velocidad por el incremento de tiempo. Debido a que cada muestra se recoge a intervalos de tiempo de 20 ms, relativamente cortos, estas aproximaciones resultan bastante precisas.

El programa ofrece la posibilidad de guardar la serie de valores representados gráficamente en un archivo binario con formato .data, de modo que pueden ser visualizados en cualquier otro momento o exportados. Además, la aplicación también ofrece la posibilidad de imprimir las gráficas que se deseen por parte del usuario.

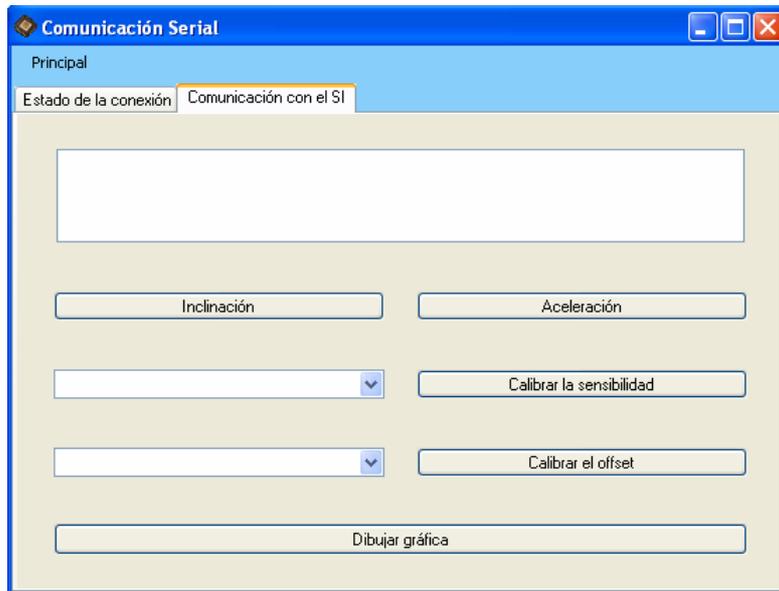


Figura 6. Vista de la ventana principal del programa

5. Ensayos experimentales

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado en el proyecto se realizaron diversas pruebas al mismo. Todos los ensayos realizados tenían por objeto estudiar y mejorar las diferentes tareas realizadas por el sistema, sobre todo centrándose en las relativas a la calibración del sensor y la transmisión e interpretación de los datos. Los resultados obtenidos muestran una gran coherencia con lo esperado en la información sobre las aceleraciones medidas, siendo satisfactorios en cuanto a los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

Durante los ensayos, la placa de los acelerómetros se sometió a movimientos controlados con el fin de apreciar las aceleraciones experimentadas por el mismo en los resultados. Debido a la construcción de los acelerómetros, éstos son sensibles a la inclinación. Si se inclina un acelerómetro, el sensor interno, debido a la fuerza de la gravedad, sufre una deflexión. La deflexión que sufre el sensor cuando se inclina perpendicularmente al suelo es igual a la que soportaría si se acelerase con una aceleración igual a g .

En las figuras 7 y 8 puede apreciarse los resultados al girar 90° la placa de los acelerómetros partiendo de una posición horizontal. Comprobamos que los valores de las aceleraciones para los ejes que quedaban en posición vertical son próximos al valor de la aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 , y para los que quedaban en posición horizontal próximos a 0.

También se realizaron otras pruebas para comprobar la bondad de las medidas de velocidades, desplazamientos y trayectorias. Algunas visualizaciones se muestran en las figuras 9 y 10.

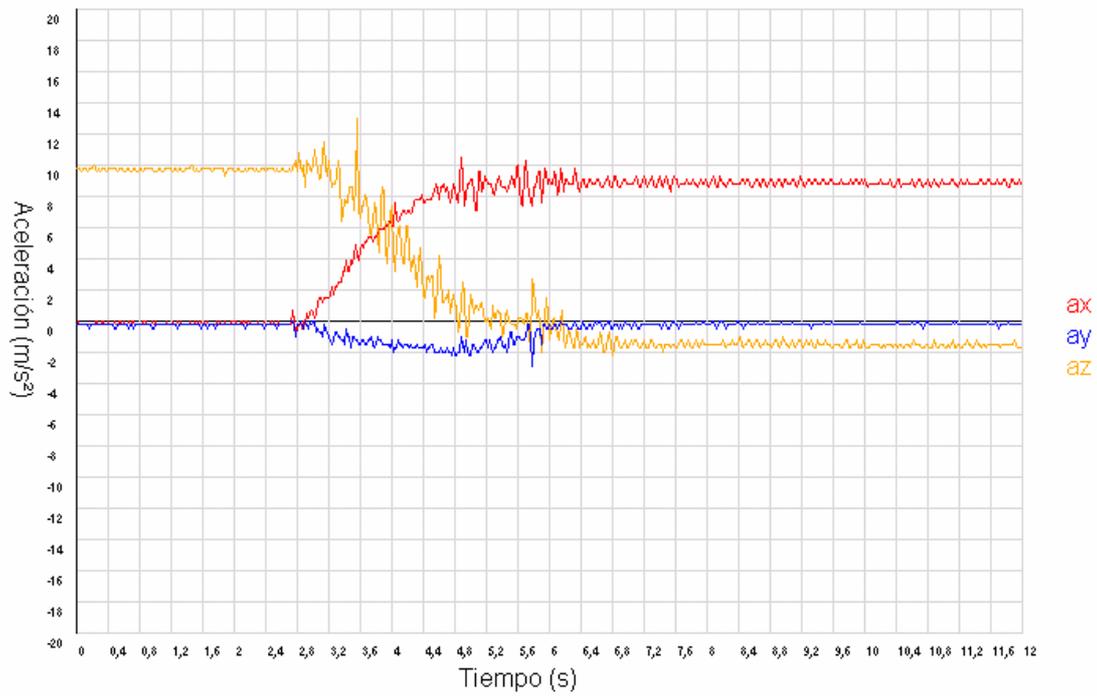


Figura 7. Muestras de aceleraciones correspondientes a un giro de 90° sobre los ejes z y x

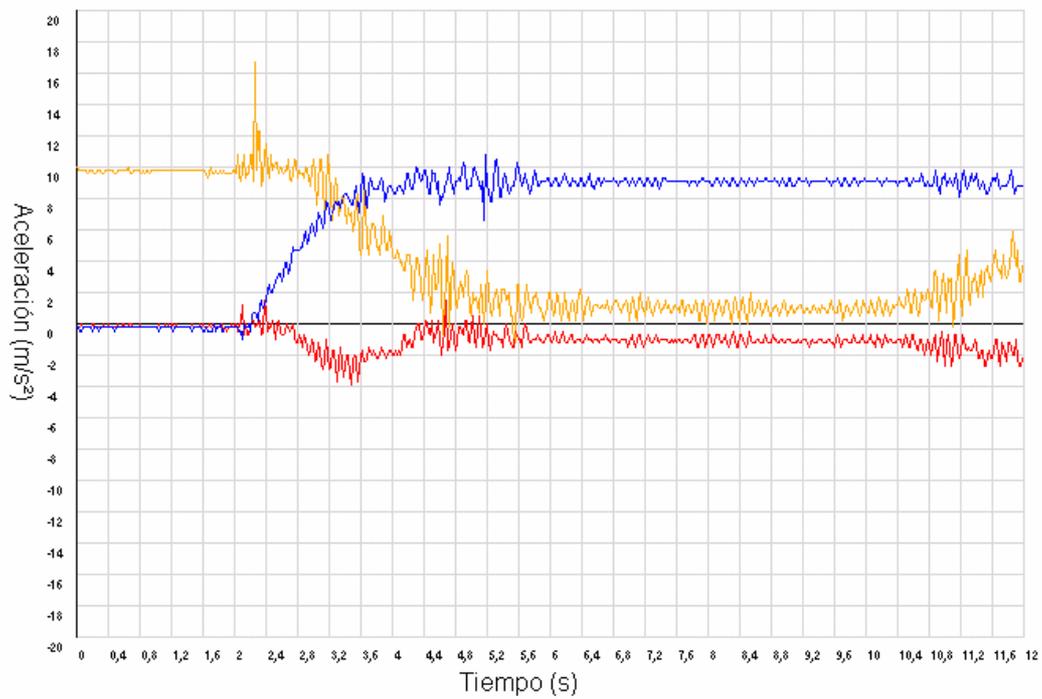


Figura 8. Muestras de aceleraciones correspondientes a un giro de 90° sobre los ejes z e y

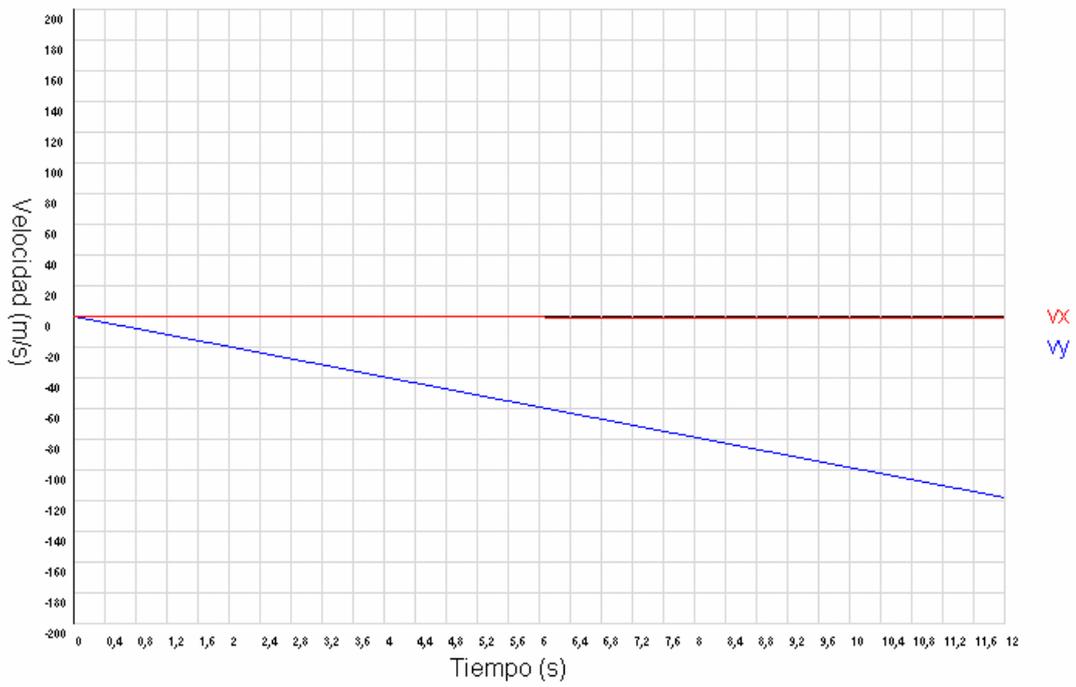


Figura 9. Muestras de velocidades correspondientes a una aceleración constante de $-g$ en el eje y

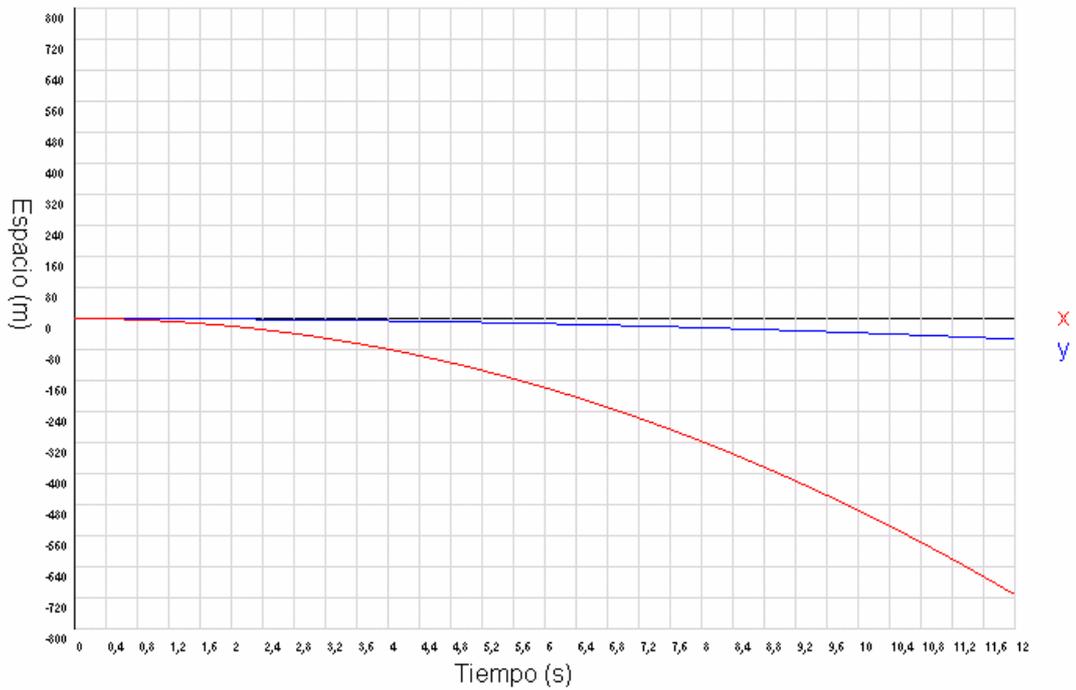


Figura 10. Muestras de espacio recorrido en función del tiempo correspondientes a una aceleración constante de $-g$ en el eje x

4. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permite al alumno conocer el uso y aplicaciones de los dispositivos FPGA así como del lenguaje de programación VHDL dentro del marco de una metodología de diseño orientada a sistemas embebidos.

El alumno ha comprobado con la realización de este proyecto todas las ventajas que se han expuesto en clase sobre el uso de dispositivos programables en el diseño de sistemas electrónicos digitales, sobre todo en cuanto al desarrollo de prototipos se refiere. Este trabajo constituye el proyecto fin de carrera del alumno para obtener el título de Ingeniero Técnico Industrial, especialidad en Electrónica Industrial y los conocimientos necesarios para la ejecución del mismo abarcan varias asignaturas de la titulación, debido al carácter multidisciplinar del proyecto (fundamentos físicos, programación, electrónica digital, instrumentación, comunicaciones, sistemas electrónicos digitales).

En lo referente al prototipo implementado, se ha dotado a los sensores de prestaciones tales como calibración de *offset* y sensibilidad, además de incorporar, a través de lógica programable, de módulos demoduladores para cada eje, lo que dota de cierto paralelismo a la tarea de decodificar las aceleraciones; y también una interfaz de comunicación gestionada por un microcontrolador embebido. Todo ello hace que el sensor sea inteligente.

También se desarrolló una interfaz de usuario con el que configurar el sensor y la conexión y que permite la presentación y almacenamiento de las aceleraciones medidas. Además, el software implementado es capaz de calcular velocidades y desplazamientos en base a las aceleraciones que se van recibiendo.

El sistema implementado puede fácilmente incorporarse en un cuerpo móvil y formar parte de un sistema de control empotrado en el mismo.

Agradecimientos

El resultado presentado en este trabajo ha sido realizado en el marco del Programa Nacional de Diseño y Producción Industrial (Proyecto DPI 2006-07906) del Ministerio de Educación y Ciencia y por la “European Regional Development Fund” (ERDF).

Referencias

- [1] E. Magdaleno, M. Rodríguez, A. Ayala, B. Mendoza, S. Rodríguez, “Metodología para el Aprendizaje de Sistemas Electrónicos Digitales y su Diseño”, TAEE, 2004.
- [2] Xilinx, PicoBlaze 8-bit Embedded Microcontroller User Guide, 2005.
- [3] Ll. Teres, Y. Torroja, S. Locos y E. Villar, “VHDL, Lenguaje Estándar de Diseño Electrónico”, McGraw-Hill, 1997.
- [4] Xilinx, Spartan3 Xilinx Development Board User Guide, Reference manual, 2005.
- [5] Analog Devices, “Low Cost 2g dual axis iMEMS Accelerometers with Digital Output ADXL202 Datasheet”, 1999.
- [6] F. J. Ceballos, “El lenguaje de programación C#”, Ed. Ra-ma, 2001.