



Instrumentación empotrada basada en hardware reconfigurable

Embedded instrumentation based on reconfigurable hardware

Federico Fernández Gómez

<https://orcid.org/0009-0008-9545-625X>

fefernandez@pol.una.py

*Facultad Politécnica Universidad Nacional de Asunción,
Paraguay*

Resumen

En todos los sistemas modernos de control en la que se tenga que monitorizar las señales procedentes de sensores o las generadas por el controlador para comandar los actuadores es necesario un instrumento que pueda ir describiendo gráficamente las señales recibidas o enviadas por el/los controladores. Tradicionalmente los instrumentos de medida como osciloscopios, multímetros, analizadores lógicos, etc. han sido instrumentos que operaban de manera paralela a los sistemas de control, aumentando la complejidad en el diseño del sistema controlador y el consumo de energía, sin embargo gracias a la posibilidad que brindan los sistemas de control de procesos industriales basados en FPGA que es la de, no solo realizar las funciones propias de control automático se presenta la posibilidad de diseñar estos instrumentos dentro de los propios sistemas de control como un módulo integrado de los mismos por lo que se pueden obtener un sistema de control basado en FPGA que tiene integrado los propios instrumentos para visualizar las señales generadas o recibidas por el mismo. Presentamos un sistema de monitoreo empotrado reconfigurable que permite visualizar las señales generadas internamente por un controlador.

Palabras clave: FPGA; Instrumentación; Tiempo real

Abstract

In all modern control systems in which signals from sensors or those generated by the controller have to be monitored to command the actuators, an instrument is necessary that can graphically describe the signals received or sent by the controller(s). Traditionally, measuring instruments such as oscilloscopes, multimeters, logic analyzers, etc. have been instruments that operated in parallel to the control systems, increasing the complexity in the design of the controller system and energy consumption, however thanks to the possibility offered by industrial process control systems based on FPGA, which is the of, not only performing the automatic control functions, the possibility of designing these instruments within the control systems themselves as an integrated module is presented, so a control system based on FPGA can be obtained that has integrated the own instruments to visualize the signals generated or received by it. We present a reconfigurable embedded monitoring system that allows the visualization of signals generated internally by a controller.

Keywords: FPGA; Instrumentation; Real time.

INTRODUCCIÓN

Todos los procesos de control industrial necesitan contar con diferentes puntos de medida y visualización de las variables ya sea de entrada o salida con el fin de facilitar una inspección visual de las condiciones de funcionamiento interno de las señales que se van generando. Esto se ha realizado con el uso de instrumentos especializados de monitoreo como visores, interfaces hombre maquina HMI, osciloscopios, sistemas multicanales, etc. ya que muchas veces la información visual que se obtiene de estas observaciones puede indicar la ocurrencia de una falla o malfuncionamiento de las señales generadas internamente en su fase inicial [1] [2]. Por ello la monitorización en tiempo real de señales sensoriales es clave para obtener las características del comportamiento de un proceso interno dentro del circuito en funcionamiento y por tanto en el desarrollo y



evolución en los diferentes sistemas en las áreas del control industrial, aeronáuticos, navales, biomédicos, automovilísticos etc. [3][4][5][6][7]. Ahora bien, el conectar instrumentos de medida dentro del sistema de control conlleva numerosos factores a tener en cuenta como el cableado adicional que se debe incorporar dentro del sistema. La imposibilidad de efectuar lecturas dentro del hardware del sistema supervisor, como ser señales que entran o salen del microcontrolador internamente es una de las dificultades. El costo de cada instrumento es algo adicional que se debe de introducir dentro del presupuesto proyectado [8] [9].

Según [10] se deben tener en cuenta los siguientes factores a la hora de considerar el comportamiento de un instrumento de medida: ruido, tiempo de respuesta, limitaciones de diseño, transmisión, deterioro del sistema de medida, influencia del ambiente en el sistema de medida, errores de observación e interpretación, etc. Como se ve, el uso de instrumentos añade complejidad y puede ser origen de errores en su funcionamiento. En [11] se considera que la instrumentación virtual puedes ser reconfigurado sobre diferentes instrumentos electrónicos utilizando herramientas de software, siendo esta combinación de hardware y software lo que permite emular el funcionamiento de un instrumento real siendo flexible y adaptable a una amplia variedad de requerimientos, además de ser capaz de mitigar la obsolescencia del hardware gracias a la migración a nuevas versiones de software.

La aparición de las FPGAs ayuda a realizar módulos de control y supervisión de procesos debido a sus características de robustez, paralelismo, rapidez y versatilidad. Gracias a las ventajas no solo de diseño convencional sino a la posibilidad de usar herramientas IP permite a una placa basada en FPGA funcionar no solo como un sistema de control sino también como un instrumento de medida de las variables que se generan internamente como así también de las señales que llegan al núcleo del controlador [12].

Son numerosos los trabajos realizados aprovechando la capacidad que tienen las FPGAs de funcionar como un instrumento de medida empotrado dentro de un sistema de control de procesos. La utilización del Analizador Lógico Integrado (ILA) es una alternativa para realizar esta función, es de fácil implementación, rápido, flexible y tiene muchas funciones avanzadas que ayudan a los diseñadores a ver y comprobar rápidamente el comportamiento de las señales de interés por lo que su uso en sistemas de control basados en FPGAs es cada vez más creciente. [13].

Algunos ejemplos de la utilización del módulo ILA se describen en [14] en donde se observa el funcionamiento de un sistema de adquisición de datos basada en FPGA cuya aplicación es su utilización como instrumento de medida en un entorno criogénico en la cual fueron evaluados algunos parámetros como la velocidad del reloj, las tasas de error y el consumo de energía. La evaluación del rendimiento del instrumento ha demostrado ser apta en un entorno criogénico y dada las condiciones extremas de funcionamiento en este tipo de entornos, su utilización se puede extender a una amplia gama de aplicaciones con el mismo grado de exigencia de funcionamiento.

En [15] se implementa un sistema de adquisición de datos basado en FPGA utilizando la configuración System-on-chip, (SoC) a fin de adquirir digitalizar y analizar las señales sensoriales provenientes de numerosas fuentes.

La principal dificultad en estos casos es el almacenamiento de los datos, el tamaño del hardware y el monitoreo remoto. El SoC demuestra ser una solución a estos problemas ya que permite reducción de tamaño del hardware y la memoria utilizada, así como se logra un eficiente monitoreo y control remoto mediante procesamiento de señales en tiempo real. El manejo y visualización de las señales sensoriales se realiza mediante un módulo de monitoreo en tiempo real que se encuentra dentro del sistema.



En [16] se describe la necesidad de las aplicaciones actuales de emplear un número creciente de señales con mayor rapidez y complejidad. Estas necesidades se cubren mediante equipos de prueba más inteligentes para detectar ciertas condiciones de señal sin o con un mínimo de tiempo muerto, para procesar datos durante la adquisición a fin de reducir los tiempos de prueba, o para generar rápidamente señales de retroalimentación para controlar el dispositivo bajo control. La solución utilizada en el pasado consistía en de un PC de gran potencia tanto en hardware como en software unido a una configuración de E/S modular. Sin embargo, con la posibilidad que brindan las FPGAs permite el diseño de sistemas de medida optimizados, que pueden analizar las señales en tiempo real dando como resultado tiempos de prueba más cortos y descripción de resultados más veloces en aplicaciones científicas y de investigación.

En [17] se describe que los sistemas modernos han experimentado un profundo cambio en cuanto al aumento de la complejidad e integración de las soluciones *on – chips* presentes en el mercado lo que presenta nuevos desafíos en el acceso a la lectura de datos dentro de esos dispositivos. En respuesta a este desafío se han creado módulos de prueba y depuración para el acceso al interior de los dispositivos *on chip* a fin de realizar el monitoreo de señales de interés ya sea sensoriales como las señales de control del mismo. En [18] se verifica que los avances tecnológicos han permitido que los instrumentos virtuales convencionales son basados en un sistema de adquisición de datos son implementados por software en computadoras personales, sin embargo, presentan inconvenientes a la hora de manipular señales en donde se utilizan instrumentos que deben medir eventos de tiempo crítico.

El hecho de ser implementado por software, depende de la tasa de transferencia de datos entre el hardware de adquisición y la computadora y también en la capacidad en tiempo real del sistema operativo de la PC. Por lo tanto, los instrumentos virtuales no pueden operar a la misma frecuencia que lo requieren las variables a ser medidas. Por tanto, se debe encontrar un mecanismo para que no se presente este inconveniente. Usando FPGA como un procesador empotrado se puede utilizar como núcleo de un instrumento de medición. Este instrumento de medida es un instrumento virtual reconfigurable en función a las necesidades de medida y da capacidad de procesamiento en tiempo real para tareas que tengan necesidad de tiempo críticas. En [19] se presenta el desarrollo de bibliotecas de código abierto, herramientas de software y firmware que pueden emular el comportamiento de diferentes instrumentos de laboratorio convencionales utilizando placas FPGA y una computadora personal (PC), creando así un instrumento virtual múltiple.

El sistema desarrollado permite la elección del instrumento a utilizar sin hacer un cambio sustancial en el hardware principal, el sistema se ha diseñado de forma modular para que sea fácilmente adaptable y personalizable, el software de PC y el lenguaje de descripción de hardware utilizado para codificar el FPGA son fácilmente extensibles para añadir funcionalidades o aplicaciones. Llegados a este punto debemos describir que mecanismos utilizan los sistemas de adquisición de datos basados en FPGA para generar instrumentos virtuales. Para empezar, se debe definir lo que es un IP core. Una forma de expresar la reusabilidad de los códigos en VHDL es a través de lo que se conoce como componentes e IP Cores. Los núcleos IP (Intellectual Property) son bloques de lógica o dato diseñados por terceros que pueden incorporarse como componentes en diseños más complejos con FPGAs. En nuestro caso nos interesa su utilización como dispositivos de medida con posibilidad de ser empotrados dentro de un sistema de adquisición de datos, para lo cual están los ILA.

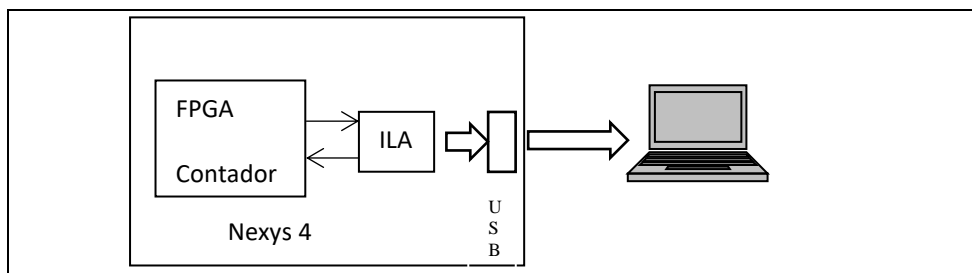
El Analizador Lógico Integrado (*Integrated Logic Analyzer (ILA)*) *IP core* es un analizador lógico que se puede utilizar para monitorear las señales internas de un diseño, más específicamente señales que se generan dentro de la FPGA, que de otra manera es imposible de ser accedido por otro instrumento de medida externo. El núcleo de ILA incluye muchas características avanzadas de los analizadores lógicos modernos, incluidos operaciones booleanas, manejar activadores de transición de borde etc. Debido a que el núcleo de ILA es sincrónico con el diseño que está siendo monitoreado, las restricciones que se aplican a su diseño también se aplican a los componentes del núcleo ILA. [20]. Sus características incluyen la posibilidad de definir por el usuario el número de sondas a utilizar y el ancho de banda de los mismos para las mediciones, la posibilidad de combinar múltiples sondas a fin de crear condiciones específicas de disparo entre otras.

Arquitectura del sistema

Se han implementado dos casos de estudio, en la que los elementos del proyecto diseñado constan de una placa *Nexys 4* de *Digilent* que utiliza una FPGA *Artix 7* de AMD. El entorno de desarrollo utilizado fue el Vivado 2019.1. En el primer caso se ha utilizado el lenguaje *Verilog* para el diseño del contador de 8 bits que se genera internamente dentro de la FPGA *Artix 7* juntamente con el núcleo IP del analizador lógico integrado (ILA) para la visualización de las señales internas, Figura 1.

Figura 1

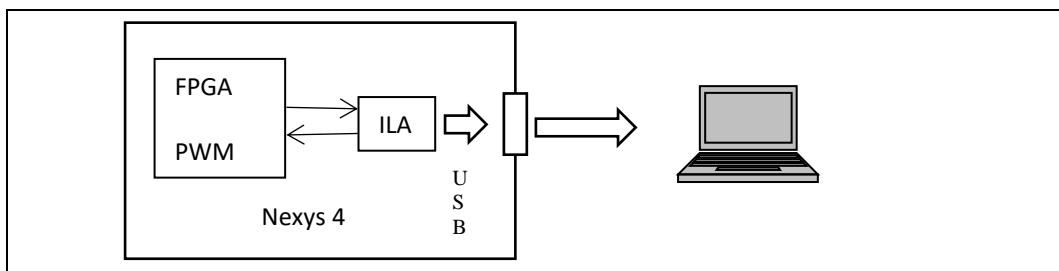
Contador de 8 bits conectado al ILA.



En el segundo caso se ha utilizado el lenguaje *vhdl*, el microcontrolador y empotrado *MicroBlaze MCS* para generar una señal PWM de un canal, la funcionalidad del mismo fue realizada en lenguaje C mediante el entorno de desarrollo *Software Development Kit SDK 2019.1* juntamente al núcleo IP del analizador lógico integrado (ILA) Figura 2. Las señales generadas y visualizadas son internas de la FPGA *Artix 7* y son visualizadas en el monitor de un PC a través del puerto USB que conecta la PC con la placa *Nexys 4*.

Figura 2

Generador de PWM conectado al ILA.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ambos casos se presentan las capturas de pantalla gracias a la funcionalidad del Vivado 2019.1. En la Figura 3 se observa la salida del contador de 8 bits generadas internamente por el *Artix 7* y capturadas con la librería ILA. Esta captura es el formato más elemental del funcionamiento del analizador lógico integrado ya que se pueden programar condiciones de disparo en función a las condiciones de entrada del analizador. También es posible guardar las señales que se van generando para su posterior análisis.

Figura 3

Visualización con el analizador ILA del contador

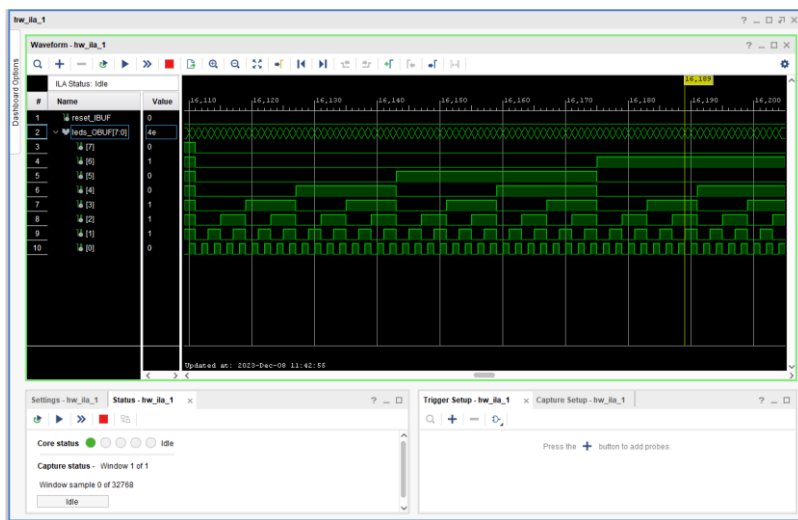
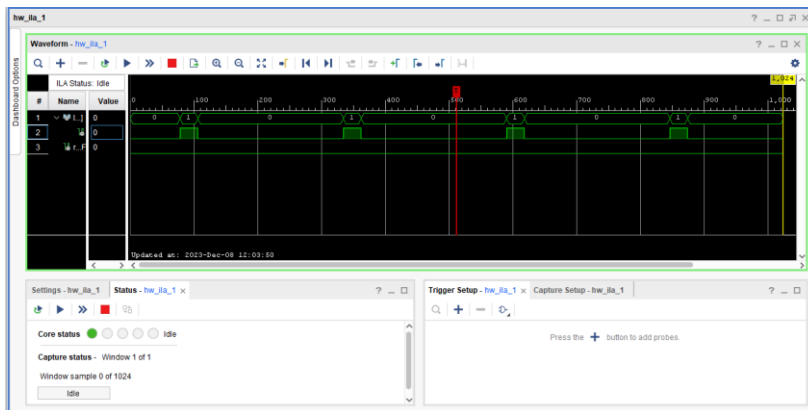


Figura 4

Salida PWM desde el Artix 7.



Se observa un pulso PWM generado de manera continua, con un Duty Cycle determinado siendo la señal generada y monitorizada en tiempo real por la propia FPGA.

En ambos casos el monitoreo se realiza sin necesidad de una medición invasiva y sin la necesidad de cables adicionales ni fuentes de alimentación externas. El circuito utiliza su propia fuente interna de 3,3 Volts por lo que el consumo de energía es mínimo comparado con la utilización de fuentes de medida externas además de que no ocupa espacios físicos adicionales entre los instrumentos de medida y control.



CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos son satisfactorios. Se ha demostrado mediante la presentación de dos casos de estudio la posibilidad que brinda el entorno de desarrollo Vivado de presentar en tiempo real la visualización de las señales internas generadas dentro de la FPGA gracias a analizador lógico integrado (ILA) ante la imposibilidad de acceder mediante instrumentos externos para su visualización.

Se tiene así un sistema integrado de monitorización de señales internas dentro de la FPGA que incluye la reducción de la complejidad del diseño y con la disminución del consumo de energía del sistema y por tanto una reducción de los costos operativos. Hay que mencionar que su aplicación se puede extender a todas las áreas tecnológicas, industrial, naval, automóviles, aeroespacial, etc. porque en todas ellas es preciso realizar el monitoreo de las señales internas que se han generado a medida que transcurre el tiempo.

REFERENCIAS

- [1] CHENG, c. y. C.Y.; Pourhejazy, P.; Hung, C.-Y.; Yuangyai, C. Smart Monitoring of Manufacturing Systems for Automated Decision Making: A Multi-Method Framework. *Sensors* 2021, 21, 6860. <https://doi.org/10.3390/s21206860>
- [2] Ji, C.; Sun, W. A Review on Data-Driven Process Monitoring Methods: Characterization and Mining of Industrial Data. *Processes* 2022, 10, 335. <https://doi.org/10.3390/pr10020335>
- [3] Feilong Wang. Research and design of industrial information monitoring system based on B/S structure. *Advances in Engineering Research, volume 150*. 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer (MACMC 2017). DOI <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.46>
- [4] Nur Athilah Abdul Rahman, Asral Bahari Jambek. Biomedical Health Monitoring System Design and Analysis. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. Vol. 13, No. 1, January 2019, pp. 1056~1064 ISSN: 2502-4752, <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i3.pp1056-1064>
- [5] Sabatini, R., Roy, A., Blasch, E., Kramer, K. A., Fasano, G., Majid, I., ... & Major, R. O. (2020). Avionics systems panel research and innovation perspectives. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 35(12), 58-72. <https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3033475>
- [6] Chi, H., Du, Y., & Brett, P. M. (2020). Design of a marine environment monitoring system based on the Internet of Things. *Journal of Coastal Research*, 110(SI), 256-260. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI110-061.1>
- [7] Zhang, Y., & Xu, Y. (2016, January). Design of Commercial Vehicle Information Collection and Remote Monitoring System. In *2016 International Forum on Management, Education and Information Technology Application* (pp. 673-677). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/ifmeita-16.2016.123>
- [8] Alessandra Caggiano, Roberto Teti, Roberto Perez, Paul Xirouchakis. Wire EDM Monitoring for Zero-Defect Manufacturing based on Advanced Sensor Signal Processing. 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14. www.sciencedirect.com
- [9] How to check whether your installed instrumentation is in need of a health: check on line: https://library.e.abb.com/public/93ac88ecf20146b9be6f2e64f6417b89/gd_anaint_001-en.pdf
- [10] Dr. P Raghavulu M V Aditya Nag Instrumentation and control systems https://www.iare.ac.in/sites/default/files/IARE_ICS_PPT_0.pdf



- [11] Crespo M. Reconfigurable Virtual Instrumentation based on FPGA and open-source intellectual property. ICTP Latin-American Advanced Course on FPGA Design for Scientific Instrumentation. 19 November - 7 December, 2012.
<https://indico.ictp.it/event/a11204/session/105/contribution/63/material/0/0.pdf>
- [12] Virtual Instrumentation for Test, Control and Design - LabVIEW
<https://mindmajix.com/labview/virtual-instrumentation-for-test-control-and-design>
- [13] Cicuttin, A. Garcia L, Crspo M.L. Sameera K. Melo. R, Valinotti B. Levorato S. Design for Portability of Reconfigurable Instrumentation Based on Programmable Systems-on-Chip. SPL2019. <http://www.splconf.org/spl19/pdf/Papers/20/presentation.pdf>
- [14] I. D. Conway Lamb;J. I. Colless;J. M. Hornibrook;S. J. Pauka;S. J. Waddy;M. K. Frechtling;D. J. Reilly. An FPGA- based instrumentation platform for use at deep cryogenic temperaturas. *Review of Scientific Instruments*. Volume 87, Issue 1January 2016. <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article/87/1/014701/367382/An-FPGA-based-instrumentation-platform-for-use-at>
- [15] Rajasekaran, C., Jeyabharath, R. and Veena, P. (2017) FPGA SoC Based Multichannel Data Acquisition System with Network Control Module. *Circuits and Systems*, 8, 53-75. <https://doi.org/10.4236/cs.2017.82004>
- [16] National instruments. Get Better Measurements Faster Using Oscilloscopes with User-Programmable FPGAs Sep 28, 2022. <https://www.ni.com/es-cr/shop/electronic-test-instrumentation/oscilloscopes/what-are-oscilloscopes/get-better-measurements-faster-using-oscilloscopes-with-user-pro.html>
- [17] MacNamee and D. Heffernan, "On-Chip Instrumentation for Runtime Verification in Deeply Embedded Processors," 2015 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, Montpellier, France, 2015, pp. 374-379, <https://doi.org/10.1109/ISVLSI.2015.38>
- [18] Sundaramurthy, R. Perumal, Dananjayan. Hard real time implementation of reconfigurable virtual instruments using FPGA. 2013, PP 878 - 882. SN - 978-1-4673-4865-2
<https://doi.org/10.1109/iccsp.2013.6577182>
- [19] Miguel Risco-Castillo Reconfigurable virtual instrumentation with FPGA. InnovateFPGA | Americas | AS033
<http://www.innovatefpga.com/cgi-bin/innovate/teams2018.pl?Id=AS033>
- [20] Integrated Logic Analyzer v6.2 LogiCORE IP Product Guide Vivado Design Suite. G172