

SISTEMA EMPOTRADO DE ADQUISICIÓN DE DATOS SENSORIALES EN TIEMPO REAL BASADO EN FPGA

Federico Fernández y Diego Pinto
*Facultad Politécnica – Universidad Nacional de Asunción
Campus Universitario San Lorenzo, Paraguay*

RESUMEN

Hoy en día, en cualquier área en donde se utilice un sistema de monitorización de señales sensoriales, es importante contar con un dispositivo que permita monitorizar cualquier tipo de señal ya sea analógica o digital, utilizar un sistema de tratamiento y acondicionamiento de las señales como filtrado, digitalización, etc. Un factor importante a tener en cuenta en el caso de los procesos industriales, es que el sistema de monitorización sensorial pueda adaptarse a los cambios que puedan experimentar los procesos como el número de entradas y salidas, por ejemplo, sin tener que realizar una modificación significativa de la configuración del hardware. Esta ventaja se evidencia claramente con respecto a otras tecnologías tradicionalmente utilizadas para realizar esta tarea como los microprocesadores y microcontroladores, mediante la utilización de sistemas basadas en FPGAs, ya que cualquier modificación en el hardware en operación solo requiere una modificación en el entorno que programe la interconexión entre los diferentes elementos del mismo, compuertas lógicas, temporizadores, contadores, registros, etc. No solo eso, el uso de microprocesadores empotrados como MicroBlaze reduce el tiempo de diseño de los proyectos complejos permitiendo una rápida implementación gracias a las herramientas de diseño y simulación que suministran los fabricantes con el entorno de desarrollo. En este trabajo presentamos una breve revisión bibliográfica acerca de los sistemas de adquisición de datos basados en FPGAs, y un sistema de adquisición de datos sensoriales en tiempo real de propósito general basado en el microprocesador empotrado MicroBlaze.

PALABRAS CLAVE

Sistemas Empotrados, FPGA, Microblaze, Tiempo Real

1. INTRODUCCIÓN

La adquisición y procesamiento de señales procedentes de sensores ya sean analógicos o digitales utilizando sistemas de adquisición de datos en tiempo real abarcan en la actualidad todas las áreas que impliquen el control de procesos industriales. Su utilización está presente en todos los ámbitos debido a los numerosos fabricantes, la necesidad de contar con sistemas de adquisición de datos con elevadas capacidades de adquisición, acondicionamiento y procesamiento de señales en tiempo real, mayor frecuencia de funcionamiento, capacidad de almacenamiento de las señales, visualización gráfica en tiempo real de las señales, transmisión on line, etc., por lo que se necesitan mejores componentes tanto en hardware como en software que permita un funcionamiento robusto y fiable a la hora de supervisar el funcionamiento de un proceso, siendo los pilares los microcontroladores y microprocesadores de propósito general. Sin embargo, cuando un proceso necesita una modificación ya sea por el aumento del número de sensores y/o de los actuadores, eso implica modificar el diseño y si está basado en microcontroladores y/o microprocesadores de propósito general realizar modificaciones es un problema, ya que solo funciona para el diseño para la cual ha sido proyectado. Pero sí se puede contar con la utilización de dispositivos que se pueden configurar a medida de las necesidades de una aplicación específica sin tener que rediseñar físicamente todo el hardware necesario, sino solamente modificando una parte que alberga el diseño original, si tiene bajos precios, bajo consumo de potencia, diseño modular, menores tiempos de desarrollo y puesta a punto de los proyectos gracias a las herramientas suministradas por los propios fabricantes con el consiguiente ahorro en el costo final entonces vemos que las tecnologías basadas en las FPGAs se ajustan a estas características. Aún más, si además posee la capacidad de configurarse para obtener microprocesadores empotrados por medio del llamando de una librería IP como MicroBlaze entonces se dispone de una herramienta muy versátil para el diseño hardware.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En la sección II se describen los trabajos previos realizados. En la sección III se describe la arquitectura del sistema. En la sección IV se describen los resultados obtenidos para finalmente cerrar al trabajo en la sección V con las conclusiones.

2. ANTECEDENTES

En (DAS, 2020) se define un Sistema de Adquisición de Datos (DAQ por sus siglas en inglés), como un conjunto de herramientas y dispositivos utilizados para medir y recopilar información sobre fenómenos eléctricos o físicos, como voltaje, corriente, temperatura, presión, vibración o sonido. Un sistema DAQ generalmente consta de los siguientes componentes: Sensores, Hardware de acondicionamiento, Computadora, Software de aplicación, etc. Los sistemas DAQ son esenciales en diversas aplicaciones incluyendo monitoreo de condiciones, pruebas y verificación de diferentes procesos industriales y en la investigación científica, ya que permiten obtener información valiosa sobre el comportamiento de sistemas y procesos. En (Bassous, G. F. et al., 2021) se describe el desarrollo y validación de un sistema de adquisición de datos de bajo costo para monitorizar y modelar la variabilidad a corto plazo en la generación de energía fotovoltaica (PV). Al utilizar un enfoque adaptado para la adquisición de datos y modelos de previsión, el trabajo aborda los desafíos que plantea la alta variabilidad de la irradiación solar, contribuyendo en última instancia a una mayor penetración de la energía solar en la red y apoyando los objetivos de energía sostenible. En (Saiz-Rubio, V., 2020) los sistemas avanzados de gestión agrícola implican el uso de sistemas de adquisición de datos para la recolección de mediciones de los cultivos utilizando varios sensores y tecnologías de procesamiento de datos, que deben ser utilizados de manera eficiente para transformar números o imágenes en bruto en información valiosa a fin de tomar decisiones estratégicas, con el fin de ayudar a los agricultores a tomar decisiones correctas para una mejora continua en las prácticas agrícolas que conduzcan a una mayor productividad y sostenibilidad.

En (Advanced Workshop on FPGA, 2018) se presenta un sistema de adquisición de datos basado en FPGA que funciona a través de varios componentes y procesos interrelacionados que permiten que un sistema de adquisición de datos basado en FPGA funcione de manera eficiente, proporcionando una solución confiable y de alto rendimiento para la instrumentación científica. En (Baste, V. et al., 2016) se presentan las aplicaciones potenciales de un sistema de adquisición de datos en el campo de la medicina que incluyen monitoreo de pacientes, monitoreo de electrocardiogramas (ECG), monitoreo remoto de pacientes, servicios médicos de emergencia. Más allá de estos usos el sistema también puede aplicarse en pequeñas industrias, plantas de energía de vapor y en la industria química para monitorear diversos parámetros. Estas aplicaciones destacan la versatilidad y la importancia del sistema de adquisición de datos en la mejora de la atención al paciente y la eficiencia operativa en entornos médicos. En (Zemmouri, A. et al., 2023) se presentan varias metodologías para diseñar un microsistema que controle un motor de corriente continua (DC) utilizando modulación por ancho de pulso (PWM) con el microprocesador empotrado MicroBlaze. Los autores proponen un microsistema que integra una matriz de puertas programables en campo (FPGA) con un procesador MicroBlaze para facilitar el control de un motor DC. Este diseño permite flexibilidad y adaptabilidad en el control de diversos dispositivos y máquinas, contribuyendo al desarrollo de un microsistema robusto y eficiente para el control de motores DC, mostrando la integración de hardware y software en aplicaciones utilizando sistemas empotrados. En (Juárez Palacios, A., 2021) se implementa un sistema empotrado que integra procesadores MicroBlaze y ARM Cortex-A9 para aplicaciones industriales, que consiste en un sistema de multiprocesamiento asimétrico sobre arquitectura del SoC Zynq-7000, que combina procesadores ARM Cortex-A9 y la lógica programable (PL) donde se implementa MicroBlaze. Se analizan las características de ambos procesadores, destacando su rendimiento y flexibilidad utilizándose el lenguaje C para la programación, concluyendo que la combinación de los dos tipos de microprocesadores permite aprovechar sus características únicas enfatizándose la importancia del concepto de multiprocesamiento asimétrico y la flexibilidad del sistema FPGA para adaptarse a diferentes aplicaciones industriales.

En (Choudhury, A. et al., 2023) MicroBlaze se utiliza como microprocesador para implementar un sistema de posicionamiento global (GPS) que se encarga de recibir y procesar los datos de los sensores GPS analizando y decodificando los datos recibidos, permitiendo calcular la distancia recorrida y determinar la ubicación del usuario en tiempo real, utilizando la interfaz AXI (Advanced eXtensible Interface) para comunicarse con otros bloques IP y periféricos dentro del diseño de la FPGA, facilitando la transmisión y recepción de datos. En (Beeram, R. R., 2013) se describe un sistema de adquisición de datos en aplicaciones de defensa, en donde

MicroBlaze funciona como el procesador central que gestiona y controla todas las operaciones del sistema procesando los datos adquiridos de los sensores a través del ADC0809. Esto incluye la conversión de las señales analógicas en valores digitales que pueden ser almacenados y analizados, utilizando un controlador de interrupciones para gestionar múltiples fuentes de interrupción, como temporizadores. Esto permite que el procesador responda a eventos en tiempo real, lo cual es crucial para aplicaciones de defensa donde la rapidez de respuesta es esencial. En resumen, el microprocesador empotrado MicroBlaze actúa como el núcleo del sistema DAQ, coordinando la adquisición de datos, el procesamiento, la gestión de interrupciones y la interacción con el usuario, que lo convierte en un componente esencial para el funcionamiento eficiente del sistema en aplicaciones críticas. En (Costa, A. et al., 2023) MicroBlaze actúa como un sistema de procesamiento dentro del firmware del Patch Panel Transceiver (PPT). Su función principal es manejar diversas tareas relacionadas con el control y la gestión de datos en el sistema de adquisición de datos (DAQ) del detector DSSC. El MicroBlaze se ejecuta en un sistema operativo Linux, permitiendo una mayor flexibilidad y facilidad de uso en la gestión de recursos y control de hardware. Su papel es fundamental para la operación eficiente del sistema DAQ, permitiendo la integración de diversas funciones de control y comunicación que son esenciales para el rendimiento del detector DSSC en el entorno del European XFEL.

En (Pei, X. et al., 2021) MicroBlaze se utiliza como un controlador para gestionar y monitorear la plataforma SNAP2, que es un convertidor de datos de banda base digital, operando como el núcleo de control que gestiona las operaciones del sistema SNAP2. Esto incluye la configuración y el control del hardware, así como la supervisión del estado del sistema, comunicándose con un servidor host permitiendo que MicroBlaze reciba comandos y envíe datos, facilitando la interacción entre el hardware y el software a fin de realizar un procesamiento eficiente de las señales en aplicaciones de radioastronomía. En (Ponsard, R., 2020) MicroBlaze se utiliza como un soft-processor que permite la configuración dinámica en tiempo real del controlador DMA (Direct Memory Access). Esto es vital para manejar la transferencia de grandes volúmenes de datos desde los dispositivos de detección hasta la memoria del sistema o la memoria de la GPU, preparando los descriptores de memoria durante las transferencias en tiempo real, siendo esto muy importante porque se están manejando conjuntos de datos muy grandes, y almacenar todos los descriptores por adelantado requeriría una cantidad enorme de memoria. En (Iroanusi, K. A., 2021) MicroBlaze se desempeña como gestor de tareas de procesamiento y control dentro del sistema de adquisición de datos permitiendo que el sistema ejecute tareas de procesamiento de datos y control de manera eficiente, haciendo del mismo un sistema puede ser escalable y flexible, permitiendo la adición de nuevas funcionalidades o la modificación de las existentes sin necesidad de rediseñar el hardware. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde los requisitos pueden cambiar con el tiempo. El MicroBlaze puede facilitar la interacción entre el hardware y la GUI desarrollada en LabVIEW, asegurando que los datos se presenten de manera comprensible y en tiempo real para el usuario.

3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Nuestro sistema se implementó utilizando una placa Nexys 4 (Nexys 4, 2015), que contiene una FPGA Artix 7, mediante el IDE Vivado 2019.1 y la funcionalidad del microcontrolador MicroBlaze fue realizada en lenguaje C mediante el entorno de desarrollo Software Development Kit (SDK) 2019.1. La programación Hardware se realizó utilizando herramientas IP (intellectual property) para el diseño y configuración del microcontrolador MicroBlaze. La configuración de MicroBlaze fue de 32 Kb de memoria local, 100 MHz de frecuencia y comunicándose con el host pareando el terminal de comunicación usb_uart de la placa Artix 7 y el puerto USB del host. Para la gestión de la comunicación entre la Nexys 4 y el PC se utilizó TeraTerm a una velocidad de 9600 baudios, Figura 1. Para el monitoreo de las señales sensoriales se utilizaron cuatro sensores, un sensor de temperatura termopar, un detector de luminosidad, un sensor de movimiento y un encoder cuyas señales son procesadas por el Artix 7 y enviadas a la PC para su visualización mediante Tera Term, Figura 2.

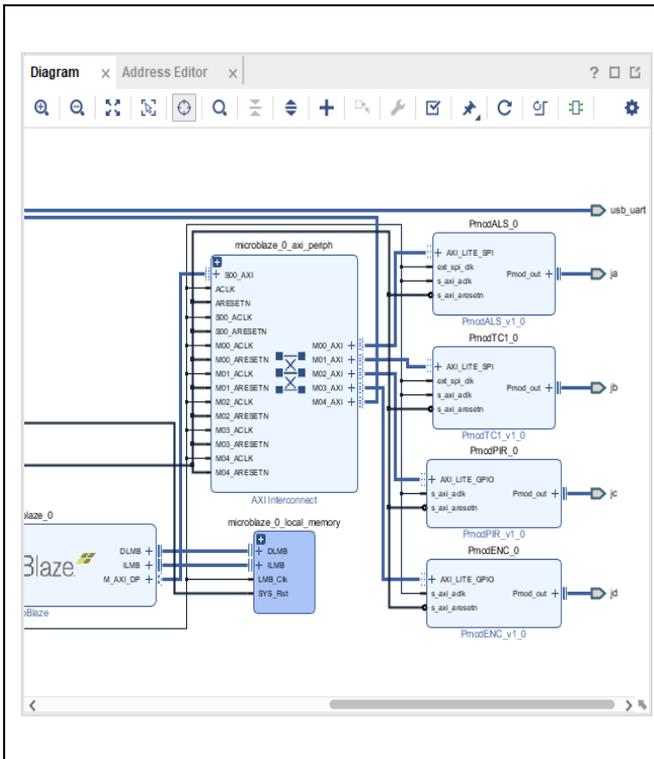


Figura 1. Arquitectura del sistema.

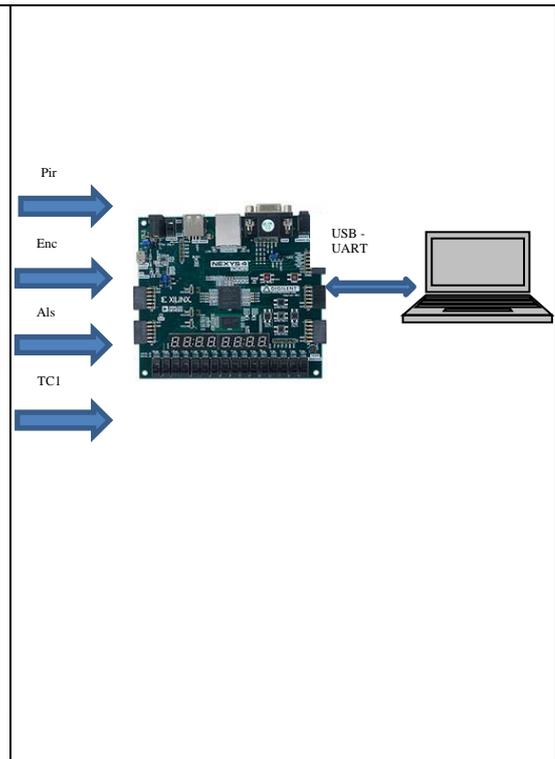


Figura 2. Sistema de adquisición de datos

El termopar utilizado es un PmodTC1 (Pmod TC1. 2016), cuyo diseño modular consta de un termopar tipo K y un sistema de conversión analógico/digital de 14 bits y 0,25 grados centígrados de resolución, +/- 2 grados centígrados de precisión, un rango entre -200 grados centígrados a + 700 grados centígrados e interface de comunicación SPI. El encoder utilizado es un PmodENC (Pmod ENC. 2016), que cuenta con un codificador de eje giratorio con un botón pulsador integral para proporcionar múltiples tipos de salidas. El detector de luminosidad es un PmodALS (Pmod ALS. 2016), cuyo diseño modular es un detector de luz integrado a un conversor analógico digital que utiliza protocolo SPI para la comunicación. El detector de movimiento Pmod PIR (Pmod PIR. 2017), cuya arquitectura es un sensor infrarrojo pasivo para monitorear el movimiento hasta 5 metros de distancia, comunicándose a través de protocolo GPIO.

Todos los módulos sensores están conectados al sistema de adquisición de datos Nexys 4 a través de los terminales Pmod que son pequeños módulos de interfaz de E/S que permiten ampliar las capacidades de las placas de lógica programable, teniendo además de las terminales, sus fuentes de alimentación para alimentar eléctricamente a los módulos conectados Figura 2. Una vez que las señales sensoriales son enviadas al MicroBlaze mediante los buses internos, las mismas son procesadas y enviadas a la PC vía puerto USB para su visualización en la pantalla mediante Tera Term.



```
COM18 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
Iluminacion = 4
Temperatura = 24 oC
Iluminacion = 4
Temperatura = 23 oC
Iluminacion = 4
Temperatura = 23 oC
Iluminacion = 4
Desplazamiento = 2
Temperatura = 21 oC
Iluminacion = 4
Temperatura = 21 oC
Iluminacion = 4
Desplazamiento = 2
Temperatura = 21 oC
Iluminacion = 4
Temperatura = 21 oC
Iluminacion = 4
Desplazamiento = 2
Temperatura = 21 oC
Iluminacion = 4
Movimiento Detectado!!!!
Temperatura = 22 oC
Iluminacion = 4
Temperatura = 22 oC
Iluminacion = 4
Temperatura = 21 oC
Iluminacion = 4
```

Figura 3. Datos de salida

4. RESULTADOS

Se puede observar en la Figura 3, los valores que va enviando el microprocesador empotrado MicroBlaze que provienen de los cuatro sensores que componen el sistema empotrado de adquisición de datos sensoriales, siendo la temperatura medida en grados centígrados, el valor de la luminosidad, el desplazamiento del encoder y una advertencia de detección de movimientos. Cada sensor ya realiza el proceso de acondicionamiento de señal antes de ser enviados al sistema de adquisición de datos Nexys 4 en donde son procesados por el microprocesador MicroBlaze el cual multiplexa las diferentes señales para enviarlos de manera serial a la terminal USB para ser presentadas en la pantalla de la PC mediante Tera Term. El sistema responde en tiempo real a las variaciones detectadas por los sensores, siendo su funcionamiento estable lo que nos permite plantearnos el diseño de sistemas de adquisición de datos de aplicaciones mas específicas acorde al tipo de proceso a ser monitorizado.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del sistema empotrado de adquisición de datos sensoriales basado en FPGA son satisfactorios, aunque nuestro sistema es de aplicación general puede ser adaptado a aplicaciones específicas solo cambiando los sensores correspondientes como medioambiente, sistemas industriales, sistemas médicos etc. Las pruebas de funcionamiento han demostrado que el sistema posee estabilidad, precisión y adquisición de datos en tiempo real y fundamentalmente de aplicación práctica. Es lo suficientemente flexible para agregarle un dispositivo de almacenamiento de estado sólido a fin de que los datos no se pierdan y se pueda realizar análisis off line de los mismos ya sea para mantenimiento preventivo o análisis de datos. Un factor importante a tener en cuenta es, considerando la complejidad del diseño, que el tiempo que ha llevado el desarrollo, depuración y prueba de funcionamiento del proyecto ha sido muy reducido, frente a un diseño de similares características utilizando dispositivos ASICs, que los hace ideales para utilizarlos en proyectos particulares o como un prototipo a ser fabricado masivamente introduciendo un factor muy importante en los emprendimientos tecnológicos, que es el ahorro de costos que debe primar en el desarrollo de este tipo de proyectos. Como microprocesador empotrado se ha utilizado el microprocesador MicroBlaze, aunque en un futuro podemos ver la funcionalidad con el microcontrolador MicroBlaze MCS, que utiliza menos recursos y por tanto, consume menos energía en su funcionamiento. Se le puede agregar capacidad de transmisión inalámbrica ya sea utilizando protocolo ZigBee, BlueTooth, o wifi, ampliar su funcionalidad para controlar procesos en tiempo real mejorando el algoritmo de adquisición de datos para realizar un sistema de supervisión y control de lazo cerrado en tiempo real.

REFERENCIAS

- Bassous, G. F., Calili, R. F., & Barbosa, C. H. (2021). Development of a low-cost data acquisition system for very short-term photovoltaic power forecasting. *Energies*, 14(19), 6075. <https://doi.org/10.3390/en14196075>
- Baste, V., Shende, D. K., More, S. K., & More, A. (2016). FPGA based data acquisition system. **International Journal of Engineering Science Invention Research & Development*, 3(4), 262–268.
- Beeram, R. R., & Reddy, G. R. (2013). FPGA Implementation of Data Acquisition System using XMK for Defense Applications. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, 2(9), 2069–2072.
- Choudhury, A., Srinivasan, A., Kattimani, A. R., Siddamal, S. V., & Hiremath, S. B. (2021). Microblaze Implementation of GPS. *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Intelligent Computing Communication & Security (ICIIC 2021)*.
- Costa, A., & Geraci, A. (2023). **A study of the latest updates of the DAQ firmware for the DSSC camera at the European XFEL. European XFEL*.
- Data Acquisition Systems. (2020). *Data Acquisition Systems*. (2020). In DAQ eBook. <https://electronicsforu.com/wp-content/uploads/2020/07/daq-ebook.pdf>. <https://electronicsforu.com/wp-content/uploads/2020/07/DAQ-eBook.pdf>
- Iroanusi, K. A. (2021). FPGA data acquisition of electrical parameter. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 6(4), 105–123. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2021.6.4.1538>
- Jeremiahakim, H. J., & Berchsmann, G. (n.d.). Design and Development of Low-Cost Data Acquisition System for Solar PV PowerPlantMonitoring. Vol 3 No 5 (2021): *Mechatronics and Engineering Management*.
- Konorov, I. (2018). Intelligent FPGA-based Data Acquisition System. <https://Indico.Ictp.It/Event/8342/Session/12/Contribution/75/Material/Slides/0.Pdf>.
- Nexys 4. (2015). *Digilentinc.com*. <https://reference.digilentinc.com/nexys4>
- Palacios, J. (2021). Sistema embebido para interconexión de dispositivos industriales de entrada/salida reconfigurables (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Pei, X., Li, J., Wang, N., Ergesh, T., Duan, X.-F., Ma, J., & Chen, M.-Z. (2021). Design of a multi-function high-speed digital baseband data acquisition system. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(10), 248. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/10/248>
- Pmod ALS. (2016). *Digilent.com*. <https://digilent.com/reference/pmod/pmodals/>
- Pmod ENC. (2016). *Digilent.com*. <https://digilent.com/reference/pmod/pmodenc/>
- Pmod PIR. (2017). *Digilent.com*. <https://digilent.com/reference/pmod/pmodpir/start>
- Pmod TC1. (2016). *Digilent.com*. <https://digilent.com/reference/pmod/pmodtc1/>
- Ponsard, R. (2020). **Online GPU analysis using adaptive DMA controlled by software for 2D detectors. In En 2020 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD) (pp. 436–439). IEEE*.
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 10(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Zemmouri, A., Barodi, A., Dahou, H., Alareqi, M., Elgouri, R., Hlou, L., & Benbrahim, M. (2023). A microsystem design for controlling a DC motor by pulse width modulation using MicroBlaze soft-core. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(2), 1437. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1437-1448>