

Capítulo introductorio

Sebastián Montoya Hernández

September 30, 2024

Desde tiempos inmemoriales, los seres humanos han utilizado sus sentidos para interpretar y comprender el entorno. La visión, uno de los sentidos más fundamentales, permite la interacción con el mundo a través de la captación de la luz, o más ampliamente, de la radiación electromagnética. Esta luz interactúa con la materia, se dispersa o es absorbida, y es procesada por nuestros ojos para generar señales neuronales que el cerebro traduce en imágenes. Sin embargo, la detección no se limita solo a los sentidos humanos. A lo largo de la historia, el desarrollo de dispositivos y tecnologías ha expandido nuestra capacidad para percibir fenómenos imperceptibles para nuestros sentidos, como las partículas subatómicas y la radiación electromagnética de alta energía [1]. De manera análoga a nuestros ojos, estos dispositivos, los detectores, permiten la interacción controlada entre las partículas y la materia, proporcionando información valiosa para entender los secretos del universo.

El estudio de partículas subatómicas cobró relevancia a inicios del siglo XX, con experimentos pioneros realizados por científicos como J.J. Thomson [2] y Ernest Rutherford [3]. Thomson descubrió el electrón mediante el uso de rayos catódicos, y Rutherford desentrañó la estructura del núcleo atómico al estudiar la dispersión de partículas alfa. Estos experimentos, que marcaron el nacimiento de la física atómica moderna, fueron posibles gracias al uso de detectores rudimentarios pero innovadores, que permitieron observar los efectos de partículas invisibles sobre la materia. Estos avances científicos evidenciaron la necesidad de desarrollar tecnologías más sofisticadas para detectar partículas en entornos cada vez más complejos.

A medida que la física de partículas avanzaba, la detección de partículas subatómicas requirió el desarrollo de dispositivos cada vez más especializados, capaces de explotar diversos fenómenos físicos como la ionización de gases, la emisión de luz en cristales (centelleo) o la generación de cascadas electromagnéticas [4]. Uno de los primeros avances clave en esta área fue la creación de la cámara de ionización, que permitía detectar partículas midiendo la ionización producida en un gas. Este diseño evolucionó hacia el contador proporcional, fruto del trabajo pionero de Rutherford y su colaborador Hans Geiger [5]. Los contadores proporcionales no solo mejoraban la detección al amplificar las señales generadas por la ionización, sino que también sentaron las bases para dispositivos icónicos

como el contador Geiger-Müller, utilizado durante décadas para la detección de radiación ionizante. No obstante, con el aumento de los requerimientos experimentales, surgieron nuevas tecnologías como las cámaras de ionización de múltiples hilos (Multi-Wire Proportional Chambers, MWPC), que ofrecieron una mayor resolución espacial y capacidad de registro en experimentos de mayor escala y complejidad [6].

Una de las evoluciones más recientes y sofisticadas en esta línea de detectores gaseosos es la tecnología de los detectores de micropatronos, entre los cuales destaca el Gas Electron Multiplier (GEM) [7]. Los GEMs, basados en láminas perforadas que amplifican las señales de ionización, permiten una mayor sensibilidad y una excelente capacidad para manejar altas tasas de conteo. Además, son especialmente útiles en entornos con campos magnéticos intensos, ya que pueden rastrear con gran precisión las trayectorias de partículas cargadas. Los GEMs presentan ventajas significativas frente a los detectores de semiconductores: son más ligeros, económicos y pueden cubrir grandes áreas, lo que los convierte en la tecnología ideal tanto para experimentos como aplicaciones de gran envergadura y alto rendimiento [8].

La utilización de detectores GEM requiere sistemas de adquisición de datos robustos y eficientes, ya que no solo deben manejar grandes volúmenes de datos, sino también hacerlo con alta precisión y en tiempo real, garantizando que se preserven las características espaciales y temporales de las señales emitidas por los detectores [9]. La estructura típica de un sistema de adquisición de datos se basa en una serie de etapas electrónicas de acondicionamiento de la señal y plataformas de procesamiento digital, las cuales son esenciales para extraer información útil de las señales eléctricas generadas en los detectores y transferirlas al usuario para su análisis [10].

Debido a que las señales producidas por los GEMs son de baja amplitud respecto a los parámetros de funcionamiento de la electrónica convencional, es necesario el uso de preamplificadores de carga, dispositivos encargados de amplificar estas pequeñas señales sin introducir ruido adicional, conservando la integridad de la señal y permitiendo su posterior procesamiento [11]. Una vez amplificadas, las señales deben ser optimizadas a través de shapers, cuya función es mejorar la relación señal-ruido y adecuar la forma de la señal para su correcta digitalización. Estos procesos, que pueden realizarse por medio de circuitos discretos o en ASICs especializados [12], permiten destacar características clave de las señales como el tiempo de llegada y la amplitud, asegurando que la información física de interés se conserve para su análisis posterior.

El desafío de procesar grandes volúmenes de datos en paralelo y a alta velocidad recae en las plataformas de procesamiento digital, como las FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) [13]. Las FPGAs permiten la implementación de algoritmos complejos de procesamiento de señales en tiempo real, lo que resulta esencial para los sistemas de adquisición de datos de detectores GEM [14].

Además, gracias a su capacidad de ser reconfiguradas dinámicamente, las FPGAs pueden adaptarse a diferentes experimentos o condiciones, optimizando el rendimiento del sistema sin necesidad de hardware adicional.

En este trabajo se realiza una revisión general desde la instrumentación científica sobre las características, estructura y ejemplos de un sistema de adquisición de datos, fundamental para la medición de magnitudes físicas. Se pone especial énfasis en los sistemas de detección de radiación y partículas, describiendo algunas particularidades de las señales que producen y la tecnología necesaria para procesarlas. Además, se expone la implementación de un sistema de adquisición de datos monocanal de alta velocidad basado en FPGA SoC, abarcando las etapas de hardware, firmware y software, que incluyen subsistemas de digitalización, procesamiento de señales, interfaces de comunicación de alta velocidad e interfaz de usuario. Se valida el sistema utilizando señales sintéticas que simulan las generadas por un detector de partículas, analizando el comportamiento de cada etapa según los estímulos ingresados. El objetivo es emplear esta plataforma para la lectura de señales de detectores GEM, destacando la flexibilidad y capacidad de reconfiguración que ofrece el desarrollo basado en FPGA, lo cual abre nuevas posibilidades tanto para la investigación básica en física de partículas como para aplicaciones en instrumentación científica.

References

- [1] J. A. Swets, “Signal detection by human observers,” tech. rep., Research Laboratory of Electronics (RLE) at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1960. pp. 127–128.
- [2] G. E. Smith, “Jj thomson and the electron, 1897–1899,” *Histories of the electron. The birth of microphysics*, pp. 21–76, 2001.
- [3] E. Rutherford, “Bakerian lecture: nuclear constitution of atoms,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 97, no. 686, pp. 374–400, 1920.
- [4] H. Kolanoski and N. Wermes, *Particle Detectors: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, USA, 2020. p. 4.
- [5] H. Friedman, “Geiger counter tubes,” *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 7, pp. 791–808, 1949.
- [6] G. Charpak and F. Sauli, “Multiwire proportional chambers and drift chambers,” *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 162, no. 1-3, pp. 405–428, 1979.
- [7] F. Sauli, “Gem: A new concept for electron amplification in gas detectors,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 386, no. 2-3, pp. 531–534, 1997.
- [8] F. Sauli and A. Sharma, “Micropattern gaseous detectors,” *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 49, no. 1, pp. 341–388, 1999.
- [9] X. Cheng, X. Ouyang, and F. Liu, “A multi channel high accuracy real time daq system for fast neutron spectrometer based on gem-tpc,” in *2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC)*, pp. 1028–1030, IEEE, 2012.
- [10] H. Kolanoski and N. Wermes, *Particle Detectors: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, USA, 2020. p. 714.
- [11] A. Pezzotta *et al.*, “Design and development of an integrated readout system for the triple-gem detector,” 2015. p. 14.
- [12] P. Aspell, “Vfat2-digital specification (version5),” *ReH*, vol. 101, no. 2, p. 2, 2005.
- [13] A. K. Choubey, R. Raushan, *et al.*, “High-speed data acquisition system design,” in *2006 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pp. 6–pp, IEEE, 2006.

- [14] B. Yu, G. De Geronimo, J. Fried, A. Kandasamy, D. Makowiecki, G. Smith, V. Radeka, S. Hoblit, A. Sandorfi, C. Thorn, *et al.*, “A gem based tpc for the legs experiment,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005*, vol. 2, pp. 924–928, IEEE, 2005.