

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2025,
Volumen 9, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5

CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DETECTORES DE PARTÍCULAS

**CONSTRUCTION OF AN INSTRUMENT FOR THE
CHARACTERIZATION OF PARTICLE DETECTORS**

Gustavo Mendoza Leal

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas- México

Alfredo Valentin Reyes Acosta

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas- México

Ernesto Rios Willars

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas- México

José Humberto Carrillo Ramos

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas- México

Jessica Esperanza Mora del Bosque

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas - México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20297

Construcción de Instrumento para la Caracterización Detectores de Partículas

Gustavo Mendoza Leal¹

gustavomendozaleal@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0006-5238-0297>

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de
Sistemas
México

Alfredo Valentin Reyes Acosta

alfredoreyes@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2022-8048>

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de
Sistemas
México

Ernesto Rios Willars

riose@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7157-8884>

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de
Sistemas
México

José Humberto Carrillo Ramos

Jose.carrillo@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de
Sistemas
México

Jessica Esperanza Mora del Bosque

jemorad@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de
Sistemas
México

RESUMEN

La automatización es parte fundamental para las empresas a nivel mundial, ya que se automatizan las actividades y procesos, lo que nos permite trabajar de manera continua, con diferentes procesos y en ambientes de alto riesgo para aquellos que operan ciertos sistemas, además nos facilitan la obtención de datos de forma continua, permitiéndonos el análisis, optimización y diagnóstico; por lo tanto, en esta investigación se diseñó y construyó un prototipo automatizado caracterizador de detectores de partículas, que nos permitan conocer el grado de “aceptancia” de dichos detectores. En dicho proceso se realizaron tres pruebas con las cuales se extrajeron datos para conocer si estos son los que representan al sistema. Dicho sistema permite tener una gráfica de aceptación, a pesar del error por las diferentes variables del instrumento, los resultados nos permiten el análisis del instrumento y saber si la incidencia fue correcta.

Palabras clave: detectores, partículas, incidencia, caracterizador

¹ Autor principal

Correspondencia: gustavomendozaleal@uadec.edu.mx

Construction of an Instrument for the Characterization of Particle Detectors

ABSTRACT

Automation is a fundamental component for companies worldwide, as it enables the automation of activities and processes, allowing continuous operation in various environments, including high-risk settings for operators. Furthermore, it facilitates the rapid and continuous acquisition of data, which in turn supports analysis, optimization, and diagnostics. In this work, an automated instrument was designed and constructed for the characterization of particle detectors, with the purpose of determining their acceptance degree and obtaining precise technical datasheets. During the development, three experimental tests were carried out, from which data were extracted to verify whether the results accurately represented the behavior of the system. The implemented system enables the generation of an acceptance curve that, despite possible errors caused by different variables involved in the operation of the instrument, allows a reliable analysis of the detector's performance and validates the accuracy of the incidence.

Keywords: detectors, particles, incidence, characterization

Artículo recibido 15 septiembre 2025

Aceptado para publicación: 15 octubre 2025



INTRODUCCIÓN

Los detectores de partículas son dispositivos empleados para observar, registrar, analizar y/o identificar el paso de partículas subatómicas (Gruppen & Shwartz, 2023). Actualmente los detectores para los aceleradores son grandes y de precios elevados. Algunos detectores pueden contar el número de partículas, sin embargo, no determinan su energía o ionización.

Esta investigación apunta al diseño y construcción de un prototipo para la caracterización de detectores de partículas de alta energía basados en silicón. La relevancia de esta investigación es la de obtener un instrumento de tamaño reducido y de un costo accesible referente a los convencionales. El prototipo propuesto efectúa un movimiento controlado desde la fuente de energía y un sistema de detección electrónico, de tal manera que podamos producir una gráfica de aceptación que muestre dicha relación. Esta investigación tiene repercusiones en varios ámbitos, entre ellos la industria médica, automotriz, física de partículas entre otros, ya que permite convertir interacciones invisibles de partículas subatómicas en señales medibles de manera más eficiente y a un menor costo.

De tal manera, que este proyecto adquiere relevancia al poder evaluar algunos materiales bajo ciertas condiciones, contribuyendo al avance tecnológico, la generación de conocimiento e investigación. Este sistema crea innovación al ser un sistema más compacto, accesible y con la transversatividad de ser utilizado en varias ciencias e ingenierías.

Estado Del Arte

Los detectores de partículas representan una herramienta fundamental en la física experimental y en diversas ramas de la ingeniería, dado que permiten la identificación de radiaciones como resultado de interacciones electromagnéticas con materiales detectores (Gruppen & Shwartz, 2023). Actualmente, existen múltiples tipos de detectores, entre los que destacan los de vacío, los fotodetectores basados en gas y con ventajas significativas, los detectores de estado sólido. Estos últimos se caracterizan por ser más compactos, ligeros, resistentes y tolerantes a campos electromagnéticos, además de presentar un menor costo. Su diseño permite una pixelación más fina, la integración sencilla en sistemas más grandes y la operación a bajo potencial eléctrico, cumpliendo o incluso superando los criterios de desempeño de otras tecnologías (Beringer et al., 2012).

La detección de partículas y radiaciones solo es posible a través de sus interacciones con la materia,

siendo diferentes los procesos de interacción para partículas cargadas y neutras, como los fotones. Dichos fenómenos están gobernados por las interacciones fundamentales de la naturaleza: gravitacional, nuclear débil, electromagnética y nuclear fuerte, que explican los procesos físicos del universo (Navas et al., 2024; Wermes, 2009). En este sentido, la mecánica describe las interacciones como una energía potencial dependiente de las coordenadas de las partículas que interactúan, lo que supone una propagación instantánea de las fuerzas involucradas (Benacquista & Romano, 2018). Esta diversidad de interacciones obliga a que los procesos de detección varíen según la naturaleza de la partícula y la energía en juego, lo que ha derivado en una gran variedad de detectores (Gruppen & Schwartz, 2023).

Entre los principales tipos de detectores se encuentran los centelladores, los cuales emiten luz visible al retornar un electrón excitado a su estado fundamental. Estos dispositivos actúan con cristales que transforman las radiaciones gamma en longitudes de ondas visibles, los cuales inciden en el fotomultiplicador para ser convertidos en electrones y de este modo ser detectados por dispositivos electrónicos (Martin & Morales, 2015). Por otra parte, los detectores de gases su base es por medio de la ionización que se produce cuando las partículas lo atraviesan y los electrones que están libres generan iones por la trayectoria. Este tipo de detectores ha sido utilizado en la detección de muones, partículas elementales pertenecientes a la segunda generación de leptones (Assran & Sharma, 2011). Finalmente, los detectores de estado sólido, basados en materiales semiconductores, producen ionización en forma de señal y ofrecen configuraciones avanzadas como los detectores de silicio de doble cara, diseñados para estudios de radioactividad nuclear (McGregor & Shultis, 2020).

Una característica clave de los detectores modernos es que todos incorporan sistemas eléctricos de transducción, lo que permite transformar la información en impulsos eléctricos procesables mediante circuitos electrónicos. Este avance representa una ventaja significativa, ya que permite el análisis de los datos de manera rápida y precisa, convirtiendo a los detectores en un sistema inseparable de los componentes electrónicos.

En el camino histórico de estos dispositivos, cabe destacar la radioactividad descubierta por Henri Becquerel en el año de 1896, lo que permitió comprender que las sales de uranio emitían radiaciones capaces de atravesar materiales opacos. Dicho fenómeno condujo al desarrollo de los primeros modelos

atómicos y, posteriormente, cuando los rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Conrad Roentgen. Más adelante, Sir William Crookes introdujo el espintariscopio, un detector basado en la emisión de destellos de luz provocados por partículas alfa en pantallas de sulfuro de zinc, dispositivo que aún se emplea en experimentos de demostración (Gruppen & Shwartz, 2023).

Los detectores de estado sólido, en particular, han jugado un papel central en la física moderna. Basados en materiales como el silicio o el germanio, estos dispositivos alcanzan alta resolución en la medición de energía y se adaptaron rápidamente en espectroscopía y en la detección de trayectorias en física de altas energías. Su operación básica se basa en la generación de pares electrón-hueco al paso de la radiación ionizante, los cuales se recolectan mediante campos eléctricos (Leo, 1994; Wermes, 2009).

Investigaciones recientes también ha incorporado innovaciones, como lo son las pinzas ópticas, capaces de capturar y manipular partículas micrométricas y nanométricas mediante haces láser focalizados, con aplicaciones en biología celular (Wang et al., 2021). Así mismo, se han desarrollado métodos de caracterización en fotometría y reflectancia, como los estudios de flujo luminoso en lámparas, la determinación de la expansividad espectral de fotodiodos InGaAs/InP, cuyo comportamiento depende de la reflectancia y eficiencia cuántica. Estos estudios han demostrado que ciertos dispositivos incluyen estructuras antirreflejantes que estabilizan la respuesta ante variaciones en el estado de polarización de la radiación (Rogalski, 2019).

Otros detectores de partículas de altas energías son las que se encargan de detectar el espectro de energía y el flujo de protones en tres direcciones ortogonales X, Y, y Z, al obtener estas partículas cargas se puede obtener su distribución espacial variable en el tiempo lo que proporciona información del movimiento de partículas (Shen et al., 2023).

En los casos más extensos la detección de lluvias de partículas y la reconstrucción de rayos cósmicos se han realizado con diferentes técnicas, en las cuales diferentes conjuntos de detectores convencionales como los centelladores, las estaciones Cherenkov de agua o detectores de muones subterráneos miden la distribución lateral de la lluvia en los suelos (Navas et al., 2024).

En general, la evolución de los detectores de partículas refleja un progreso constante desde los primeros experimentos a finales del siglo XIX hasta los sofisticados sistemas de estado sólido y ópticos actuales. Estos avances han permitido mejorar la precisión, eficiencia y seguridad en la detección de radiaciones,

consolidando su importancia en áreas como la física de partículas, la medicina y la ingeniería.

METODOLOGÍA

Este trabajo se fundamentó en un proceso iterativo, orientado a la creación y análisis de un mecanismo con aplicación a un detector de partículas. Se aplicaron algunas fases propuestas en cuanto a procesos iterativos (Shigley et al., 2021), comenzando con el reconocimiento de la necesidad y teniendo un sistema previo y la posibilidad de introducir mejoras. Posteriormente, se realizó la definición del problema, que incluyó las cantidades de entradas y de salidas, las dimensiones, restricciones de operación como costo, vida útil, intervalos de mantenimiento y confiabilidad.

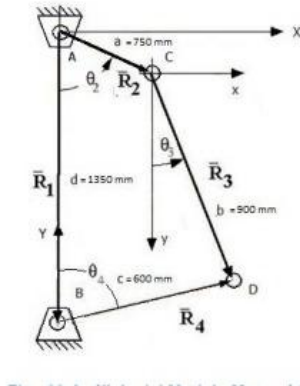
Una vez planteado el problema, en el cual se formularon y evaluaron alternativas de diseño conceptual. Dichas alternativas fueron sometidas a análisis y optimización mediante retroalimentación, descartando aquellas que no satisfacían las condiciones iniciales. El proceso se completó con la evaluación del prototipo, verificando el cumplimiento de las especificaciones, y con la presentación de los resultados obtenidos. Todo el proceso se desarrolló de forma iterativa en cada paso del proyecto, lo que permitió ajustar y optimizar el diseño en función de los resultados parciales obtenidos.

La caracterización del mecanismo se determinó cuantos deberían de ser los grados de libertad, definidos por los parámetros de entrada independiente requeridos para llevar el sistema a una posición particular (Norton, 2009). Por lo cual, se empleó una expresión general que relaciona eslabones, juntas y grados de libertad. Se consideraron juntas rotacionales, prismáticas y cilíndricas, además de la clasificación de cadenas cinemáticas abiertas y cerradas. Para el caso específico del mecanismo de cuatro barras, se aplicó el criterio de Grashof para conocer si al menos un eslabón podría realizar una rotación completa, identificando también las inversiones posibles.

El mecanismo de cuatro barras fue elegido base para el diseño por su simplicidad (Figura 1) y capacidad de realizar varias funciones como la coordinación de movimientos angulares, la generación de trayectorias y la translación. Los cálculos incluyeron el estudio algebraico vectorial factorial. En el análisis algebraico se formularon expresiones que describieron las posiciones de los puntos característicos en función de los parámetros geométricos y el ángulo de entrada, utilizando funciones trigonométricas y relaciones del teorema de Pitágoras. Se considero además las dificultades asociadas a

las funciones trigonométricas inversas y los problemas de cuadrantes al implementar los cálculos en el software computacional.

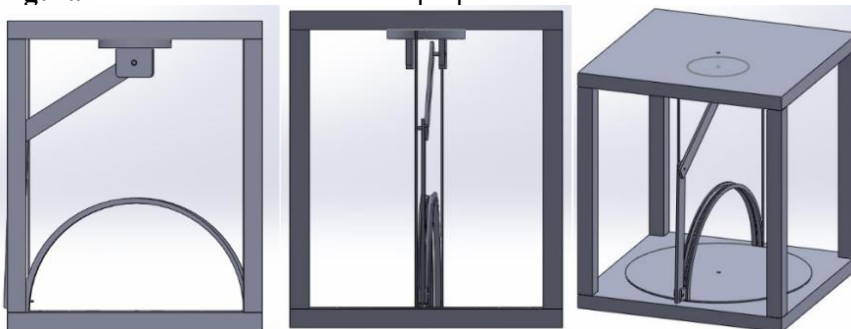
Figura 1. Mecanismo de 4 barras empleado



Complementariamente, y conociendo que el punto D del sistema será el que portará con la fuente de energía y el punto B será la que tendrá la parte de adquisición de datos, se procedió al análisis vectorial el cual se desarrolló mediante representaciones en los eslabones y la descomposición de ecuaciones vectoriales. A través de este método se obtuvieron relaciones cerradas para los ángulos de salida y para las configuraciones abiertas y cruzadas del mecanismo, Dichos resultados facilitaron posteriormente la determinación de posiciones, velocidades y aceleraciones de espacios de interés.

La verificación del diseño se apoyó en simulaciones dinámicas y modelos computacionales. Se utilizó un software de movimiento dinámico como SolidWorks para reproducir el comportamiento cinemático y validar los resultados. Lo que permitió representar geoméricamente el mecanismo, generar planos, realizar análisis, producir prototipos y documentar el diseño. El uso de CAD también incluyó la visualización interactiva del modelo y la simulación del comportamiento mecánico (Figura 2).

Figura 2. Diseño CAD del sistema propuesto



Para la etapa experimental, se integraron sistemas de adquisición de datos (DAQ), definidos como la captura, digitalización y análisis de señales físicas. El sistema contempla sensores y transductores,

acondicionamiento de señal, hardware de adquisición, software y aplicaciones de procesamiento y visualización. Se emplearon dispositivos tales como diodo IR, potenciómetros y fotodiodos, en función de los parámetros a medir. Se prestó especial atención a la frecuencia de muestreo con el fin de garantizar la fidelidad de la señal adquirida.

En el sistema electrónico se consideraron los transistores bipolares de unión (BJT), empleados en configuración de conmutación. Además, para simular el espectro de energía se utilizó un Diodo IR y para la detección del haz se seleccionaron fotodiodos debido a su rapidez de respuesta frente a variaciones luminosas.

Finalmente, los resultados obtenidos a través de la simulación dinámica, el análisis en el software CAD y la implementación experimental con el DAQ. Dicho procedimiento permitió validar el diseño propuesto y garantizar su adecuación para la aplicación en el detector de partículas.

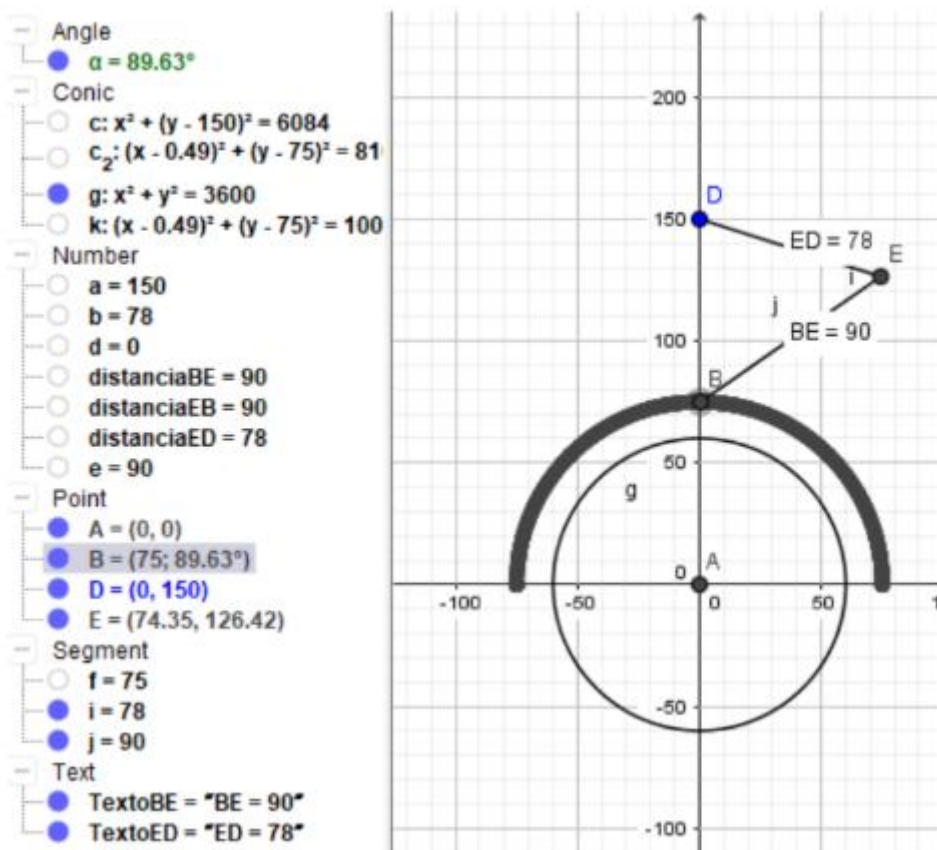
El diseño del sistema para la caracterización de detectores de partículas se estructuró en diferentes fases las cuales se fueron validando con diferentes metodologías validando cada una de las dichas fases hasta llegar al desarrollo de un prototipo real, el control electrónico y la integración de dispositivos emisores y receptores de señal.

El número de eventos registrados en el detector se ve limitado por la aceptación y su eficiencia (Dhaliwal, 2006). Este mecanismo, el cual proporciona tres grados de libertad y permite cubrir un área semiesférica de 600mm, que corresponde a la superficie de trabajo requerida. Con el software GeoGebra se realizó un análisis geométrico para determinar las dimensiones precisas (ver Figura 3).

Una vez definido el diseño inicial, se inició con el análisis matemático mediante un estudio vectorial mecánico de cuatro barras. La validación numérica de los parámetros, junto con las gráficas obtenidas, confirmó que el mecanismo cumple con los requerimientos de cobertura del área de trabajo necesaria, presentando solamente una ligera cobertura en el área de trabajo que se considera despreciable. Posteriormente se realizó una simulación computacional en el software SolidWorks, la construcción del modelo a escala 1:4 y, finalmente el prototipo de dimensiones (1.70 × 1.70 × 1.80 m). El control se desarrolló mediante un dispositivo NI USB-600, cuyas especificaciones de 14 bits y 20kS/s de adquisición de datos permitieron sincronizar el sistema mecánico con el procesamiento de señal, donde el primero generó un haz simulando la radiación y el segundo permitió cuantificar la “aceptancia.”

Las pruebas experimentales se realizaron en Saltillo Coahuila, demostraron que el sistema logra transmitir y recibir datos de una manera confiable hasta en 800mm de distancia, confirmando la funcionabilidad del diseño y validando el prototipo como herramienta de caracterización de detectores de partículas.

Figura 3. Análisis geométrico de los ejes en GeoGebra. Punto marcado como B es el lugar de la fuente y punto A marcado como el dato a adquirir



La secuencia de los motores a pasos constituye el primer aspecto a implementar, en el cual se utilizara un NEMA 17 para mover la base del sistema de manera circular facilitándonos así el área semiesférica que como se presentó en el análisis (Figura 3); de igual manera un servomotor ayudara a la movilidad de eslabonamiento en el ángulo E que se puede apreciar en el sistema simulado por GeoGebra y de esta manera permitir los grados de libertad necesarios y cubrir el área deseada, en el caso del sistema de adquisición de datos empleado cuenta con salidas de fuente limitada a 150 mA con una protección de sobre corriente de 200 mA, por lo que la conexión directa no es posible. Por lo cual se integró el controlador para motores L298N, capaz de proporcionar un incremento de voltaje de 4.5 hasta 40 V y una corriente de hasta 2 A por canal. Se empleó fuentes externas de alimentación en conjunto con la PC

de adquisición. La validación de la secuencia de los motores se realizó mediante observación para asegurar la correcta programación y conexión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez integrado el programa y el sistema mecánico, se procedió a las conexiones necesarias para la automatización. Las salidas digitales generadas se enlazaron al controlador del motor que actuó como interfaz de potencia para los motores, mientras que la fuente se conectó a la salida preestablecida del pulso y el detector a la entrada definida del sistema de adquisición de datos para iniciar el sensado. Con el sistema ensamblado, se realizaron pruebas iniciales en los ejes y en la adquisición de datos. La fuente de voltaje garantiza la estabilidad del sistema y el arranque se efectuó desde una PC, mediante comunicación alámbrica. El recorrido completo del instrumento tardó aproximadamente 20 minutos, tiempo en el cual también se generaron los resultados, que muestra los valores de adquisición de incidencia.

Las muestras fueron tomadas cada 10 grados, lo que facilitó identificar la zona de mayor concentración de incidencia. Los resultados confirmaron área de interés, aunque algunos valores atípicos se atribuyeron a haces luminosos en el entorno de las pruebas.

Posteriormente, los datos relevantes se agruparon para tener una visión general y poder realizar un análisis más estructurado. A partir de esa información, se generó la gráfica de incidencia fuente receptor representada por un gráfico circular (Figura 4), donde se identificaron puntos muertos ocasionados por la rotación de los motores y por la precisión del sistema. Para mitigar estas limitaciones, se aplicó un análisis de regresión lineal, con el fin de interpolar los puntos intermedios del escaneo y predecir la aceptación completa del detector (Figura 5). Los valores derivados de la regresión permiten obtener una representación más completa de la gráfica evidenciando que el sistema proporciona una caracterización estable y consistente, aunque con márgenes de error vinculados a la mecánica de los motores.

En conjunto, los hallazgos muestran que el sistema automatizado cumple con el objetivo de detectar en el área de trabajo deseada mediante un método mecánico de cuatro barras asistido por control digital. La validación práctica demostró la pertinencia del diseño y la efectividad de la automatización, resaltando tanto la viabilidad del sistema como la necesidad de futuras mejoras en la precisión de los actuadores. Los resultados obtenidos concuerdan con los principios teóricos de la metodología aplicada

y aportan un precedente experimental para el desarrollo de caracterizaciones similares en detectores de estado sólido.

Figura 4. Grafica de caracterización. Vista superior de la maquina



Figura 5. Análisis de regresión lineal



CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema automatizado para la caracterización de detectores de partículas de estado sólido demostró que es posible implementar un mecanismo de cuatro barras asistido por control digital para obtener gráficas de aceptación confiables. La integración de dispositivos para la adquisición de los datos y del control de motores permitió reducir la intervención humana en el proceso, asegurando mayor precisión y seguridad durante la operación.

Los resultados obtenidos evidencian que la caracterización del detector es factible mediante un diseño mecánico adaptable a la semiesfera de 600 mm establecida como área de trabajo. En el análisis estadístico y de regresión lineal confirmaron la validez de los resultados al proporcionar una información

más precisa a pesar de las limitaciones del sistema mecánico por causa de la precisión de los motores. Esto da como resultado una base sólida para la caracterización de detectores en condiciones controladas, contribuyendo a la optimización de su uso en aplicaciones como ingeniería y física de partículas.

Esta investigación aporta una manera metodológica replicable que se puede extender a otros detectores, afirmando su uso dentro de líneas de investigación de instrumentación científica y automatización. A pesar de esto se detectaron limitaciones relacionadas a los actuadores y la incidencia de otros factores, lo que abre la necesidad de analizar sistemas más precisos en términos de control y entornos más aislados.

Finalmente, se plantea como trabajo futuro la mejora del sistema en cuanto la exactitud mecánica y la expansión de su aplicación a diferentes tipos de detectores. Esto permitirá no solo incrementará la pertinencia de los resultados, sino también extender las posibilidades de caracterización hacia escenarios experimentales más complejos, en los que la validación de los detectores sea primordiales para el avance científico y tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assran, Y., & Sharma, A. (2011). *Transport Properties of operational gas mixtures used at LHC*.

<https://arxiv.org/abs/1110.6761>

Benacquista, M. J., & Romano, J. D. (2018). *Classical mechanics*. Springer.

Beringer, J., Arguin, J.-F., Barnett, R. M., Copic, K., Dahl, O., Groom, D. E., Lin, C.-J., Lys, J.,

Murayama, H., Wohl, C. G., Yao, W.-M., Zyla, P. A., Amsler, C., Antonelli, M., Asner, D. M., Baer,

H., Band, H. R., Basaglia, T., Bauer, C. W., ... Schaffner, P. (2012). Review of Particle Physics.

Physical Review D, 86(1), 010001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>

Dhaliwal, D. K. (2006). *Calculation of acceptance and efficiency for $D^0 \rightarrow e^+e^-$ and rates of pions and kaons faking electrons signals at CDF*. Wayne State University, Detroit.

Gruppen, C., & Schwartz, B. (2023). *Particle Detectors*. Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/9781009401531>

Leo, W. R. (1994). Ionization Detectors. In *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*

(pp. 127–156). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2_6



- Martin, I. S., & Morales, J. M. P. (2015). *Detectores monolíticos y sensores compatibles con altos campos magnéticos para tomografía por emisión de positrones*. Universidad Politécnica de Madrid.
- McGregor, D. S., & Shultis, J. K. (2020). *Radiation Detection*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781439819401>
- Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., Masoni, A., Mikhasenko, M., Mitchell, R. E., Patrignani, C., Schwanda, C., Spanier, S., Venanzoni, G., Yuan, C. Z., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., Alvarez-Muñiz, J., Antonelli, M., ... Zheng, W. (2024). Review of Particle Physics. *Physical Review D*, 110(3), 030001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001>
- Norton, R. L. (2009). *Kinematics and dynamics of machinery*. McGraw-Hill New York.
- Rogalski, A. (2019). *Infrared and terahertz detectors*. CRC press.
- Shen, G., Zhang, X., Wang, J., Huang, C., Li, J., Zhang, S., Zhang, X., Yang, Y., Zhang, P., & Sun, Y. (2023). Development and Calibration of a Three-Directional High-Energy Particle Detector for FY-3E Satellite. *Aerospace*, 10(2), 173. <https://doi.org/10.3390/aerospace10020173>
- Shigley, J. E., Nisbett, J. K., & Budynas, R. G. (2021). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Hill Interamericana.
- Wang, C., Pan, Y.-L., & Videen, G. (2021). Optical trapping and laser-spectroscopy measurements of single particles in air: a review. *Measurement Science and Technology*, 32(10), 102005.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac0acf>
- Wermes, N. (2009). Pixel detectors for charged particles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 604(1–2), 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.098>