



Importancia y ventajas de la automatización en el análisis de muestras biológicas para investigaciones clínicas: Beneficios y desafíos

Alexa Cuevas Escandón

Estudiante de la Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo
Facultad de Ciencias Químicas, Universidad La Salle México
alexacuevas@lasallistas.org.mx

Itzel Jiménez Uribe

Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Biomédica
Facultad de Ingeniería, Universidad La Salle México
i.jimenez@lasallistas.org.mx

Katia Citlali Ortigoza Baños

Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica
Facultad de Ingeniería, Universidad La Salle México
kc.ob@lasallistas.org.mx

Hipólito Aguilar Sierra

Líder del Grupo de Investigación, Desarrollo e innovación en Robótica Asistencial y Colaborativa, Centro Transdisciplinario de Investigación, Desarrollo e innovación (CeTIDi), Departamento de Ingeniería, Vicerrectoría de Investigación, Universidad La Salle México
hipolito.aguilar@lasalle.mx

Resumen

Este trabajo aborda el desafío de mejorar la precisión y el control en muestreadores automáticos (*autosamplers*) utilizados en laboratorios biomédicos y biotecnológicos, donde la repetibilidad y exactitud son esenciales para obtener resultados confiables. Los sistemas comerciales actuales, que emplean controladores PD (proporcional-derivativos), presentan limitaciones en ambientes donde se requiere una alta precisión, lo que puede comprometer el posicionamiento del brazo de muestreo y, por ende, la calidad del análisis. Para superar estas limitaciones, se propone la integración de potenciómetros digitales, los cuales ofrecen mayor precisión y

durabilidad al evitar el desgaste mecánico de los componentes tradicionales. La metodología incluye el análisis comparativo de *autosamplers* con arquitecturas de robots cartesianos y SCARA, integrando potenciómetros digitales controlados por interfaces remotas. Los resultados muestran una mejora significativa en la precisión de posicionamiento y estabilidad del sistema, reduciendo la tasa de error en el manejo de muestras. Además, se destaca una mayor flexibilidad operativa, permitiendo ajustes en tiempo real según las condiciones del proceso.

Palabras Clave: Automatización, Análisis de muestras biológicas, Investigación clínica.

Abstract

This paper addresses the challenge of improving accuracy and control in *autosamplers* used in biomedical and biotechnological laboratories, where repeatability and precision are crucial for obtaining reliable results. Current commercial systems, which use PD (proportional-derivative) controllers, face limitations in environments requiring high precision, potentially compromising the sampling arm's positioning and the overall quality of the analysis. To overcome these limitations, the study proposes integrating digital potentiometers, which offer greater

precision and durability by avoiding the mechanical wear of traditional components. The methodology includes a comparative analysis of *autosamplers* with Cartesian and SCARA robot architectures, incorporating digitally controlled potentiometers with remote interfaces. The results demonstrate significant improvements in positioning accuracy and system stability, reducing the error rate in sample handling. Additionally, the study highlights increased operational flexibility, allowing real-time adjustments based on process conditions.

Keywords: Automation, Biological sample analysis, Clinical research.

Planteamiento del problema

En los laboratorios biomédicos y biotecnológicos actuales, la precisión y la repetibilidad son esenciales para garantizar resultados confiables, especialmente en análisis clínicos que afectan diagnósticos médicos y decisiones de tratamiento. En estos entornos, cualquier error en el manejo de las muestras puede tener consecuencias críticas para la interpretación de los resultados. Recientemente, el incremento del volumen de muestras que los laboratorios deben procesar ha presentado un reto significativo, especialmente exacerbado por la pandemia de COVID-19, que generó una demanda sin precedentes de pruebas diagnósticas rápidas y fiables (Lasiera Monclús, A. B., et al, 2022). En respuesta a esta presión, la automatización de procesos en laboratorios, mediante el uso de equipos como los muestreadores automáticos (*autosamplers*), ha aliviado gran parte de la carga de trabajo manual y ha minimizado los errores humanos. No obstante, estos sistemas aún enfrentan problemas importantes relacionados con la precisión y el control eficiente.

Los *autosamplers* son dispositivos diseñados para recolectar muestras de manera secuencial y transferirlas a sistemas de análisis como cromatógrafos o espectrómetros (Medina, D. A., et al, 2023). Estos equipos son fundamentales para mejorar la eficiencia en los laboratorios, permitiendo la automatización de diversas etapas del análisis (Malic, L., et al, 2022), desde la toma de la muestra hasta su inyección en el instrumento analítico (Boppana, N., et al, 2022). Sin embargo, muchos sistemas comerciales actuales emplean controladores PD (proporcional-derivativos), que, si bien son efectivos en aplicaciones simples, presentan importantes limitaciones en escenarios que requieren un alto nivel de precisión y control adaptativo.

El controlador PD ajusta la posición de un actuador basado en el error, es decir, la discrepancia entre la posición deseada y la real. Su componente proporcional asegura que el actuador responda a los cambios en el error, mientras que el componente derivativo modula la velocidad del actuador para anticipar las variaciones y evitar oscilaciones. Si bien este enfoque puede ser suficiente para aplicaciones básicas, su efectividad disminuye considerablemente en sistemas complejos, donde la precisión en el posicionamiento es crucial y las condiciones operativas pueden variar durante la operación. En los *autosamplers*, la precisión en el posicionamiento del brazo o la aguja de inyección es fundamental, ya que cualquier desviación en el proceso de extracción o inyección de muestras puede comprometer la calidad del análisis, provocando errores en los resultados. Estas desviaciones pueden surgir por una variedad de factores, incluidos el desgaste mecánico, cambios en las características del fluido, variaciones de temperatura o vibraciones externas, lo que destaca las limitaciones del controlador PD en aplicaciones de alta exigencia.

En los autosamplers, la precisión en el posicionamiento del brazo o la aguja de inyección es fundamental, ya que cualquier desviación en el proceso de extracción o inyección de muestras puede comprometer la calidad del análisis, provocando errores en los resultados.

El aumento en la complejidad de los análisis clínicos y biotecnológicos ha generado una creciente demanda por una mayor precisión en los sistemas automatizados. En pruebas de biología molecular, como el análisis de proteínas o ácidos nucleicos, el manejo adecuado de las muestras es esencial para evitar la contaminación cruzada o la degradación de los reactivos (Omair, A. O. M., et al, 2023). Estas técnicas requieren un manejo sumamente cuidadoso, lo que coloca a los *autosamplers* tradicionales bajo presión adicional para garantizar un alineamiento y posicionamiento precisos

(Antonios, K., et al, 2022). Sin embargo, la falta de capacidad adaptativa de los controladores PD limita su eficacia en situaciones donde las condiciones operativas fluctúan, como cambios en la viscosidad del fluido o variaciones en la temperatura. En estos casos, se requiere un controlador avanzado, capaz de adaptarse dinámicamente a las nuevas condiciones y garantizar un rendimiento óptimo durante todo el proceso.

Tradicionalmente, los sistemas de control en *autosamplers* han empleado potenciómetros mecánicos para ajustar el posicionamiento de los componentes móviles, como el brazo de inyección o la aguja. Sin embargo, estos dispositivos mecánicos presentan limitaciones inherentes, como el desgaste con el tiempo, lo que afecta la precisión y la repetibilidad de los movimientos. Además, los potenciómetros mecánicos no se integran fácilmente con sistemas de control más sofisticados, lo que representa un obstáculo para los sistemas automatizados que dependen de una comunicación fluida entre sus componentes.

En este contexto, los potenciómetros digitales ofrecen una solución significativa (Shah, H. M., et al, 2019). A diferencia de sus homólogos mecánicos, los potenciómetros digitales no dependen de partes móviles que

puedan deteriorarse con el tiempo, lo que incrementa la durabilidad y la estabilidad del sistema de control. Estos dispositivos permiten un ajuste preciso y repetible de la resistencia mediante señales digitales, lo que facilita su integración en sistemas automatizados y controlados por microcontroladores o procesadores avanzados. Además, los potenciómetros digitales pueden controlarse remotamente a través de interfaces como I²C o SPI (Khort, D., et al, 2021) lo que brinda una mayor flexibilidad en la calibración y el ajuste de parámetros sin intervención manual, lo cual es crucial en entornos donde se requiere precisión en tiempo real.

La introducción de potenciómetros digitales en los sistemas de autosampling también mejora notablemente la precisión y estabilidad de los procesos, al permitir un control más granular y exacto de las variables críticas, como el posicionamiento del muestreador respecto a la muestra o la calibración de otros sensores involucrados en el análisis. Esto es especialmente importante en procesos que dependen de una regulación precisa de la tensión o la corriente para asegurar que el movimiento del autosampler sea exacto y constante.

Asimismo, la integración de algoritmos de control avanzados con potenciómetros digitales

permite superar las limitaciones de los controladores PD tradicionales, ya que dichos algoritmos pueden adaptarse mejor a las variaciones operativas y mejorar la precisión general del sistema. Esto reduce la intervención manual y minimiza el error humano, lo que es esencial para mejorar la eficiencia y consistencia en procesos automatizados de análisis. Sin embargo, el desafío reside en diseñar algoritmos de control que aprovechen completamente las capacidades de los potenciómetros digitales y se adapten a las variaciones ambientales o del proceso en tiempo real, asegurando un funcionamiento confiable y optimizado en condiciones exigentes.

Finalmente, en cuanto a la estructura de los *autosamplers*, muchos de ellos están diseñados bajo una configuración de robot cartesiano (tipo XYZ) o SCARA (Figura 1), que determina en gran medida cómo se controla el movimiento del muestreador. Los *autosamplers* tipo XYZ permiten un movimiento tridimensional preciso, ideal para aplicaciones en las que la muestra debe moverse a lo largo de tres ejes. Algunos ejemplos que destacan son el Primariz OEM XYZ-Autosampler, utilizado en análisis elemental y cromatografía (Moduvision, 2023), y el Thermo Fisher Scientific - HPLC Autosampler, conocido por su alta precisión en la inyección de muestras (Thermo Fisher Scientific, 2023). Otro modelo notable es el Mettler Toledo - EasySampler 1210, que facilita el muestreo automatizado de reacciones químicas (Mettler Toledo, 2023). También se encuentra el Agilent Technologies - 7693A, versátil para aplicaciones cromatográficas (Agilent Technologies., 2023), y el PerkinElmer - AutoChem 2920, diseñado para procesos analíticos complejos (PerkinElmer., 2023).

Por otro lado, los *autosamplers* tipo SCARA son más rápidos y ofrecen una mayor precisión en aplicaciones que requieren movimientos repetitivos en un plano. Entre estos, destaca el Celeros - SCARA Autosampler, ideal para tareas de laboratorio que requieren alta velocidad (Celeros., 2023). El Tecan - Freedom EVO® 100 es otro sistema que permite una manipulación rápida y precisa de líquidos (Tecan., 2023). También está el Hamilton - Microlab® STAR, que combina un diseño SCARA con capacidades avanzadas de manejo automatizado (Hamilton., 2023). El Eppendorf - epMotion® 5070 es conocido por su eficiencia en la preparación de muestras (Eppendorf., 2023), mientras que el BMG LABTECH - CLARIOstar® realiza mediciones precisas en aplicaciones de biología molecular (BMG LABTECH., 2023).

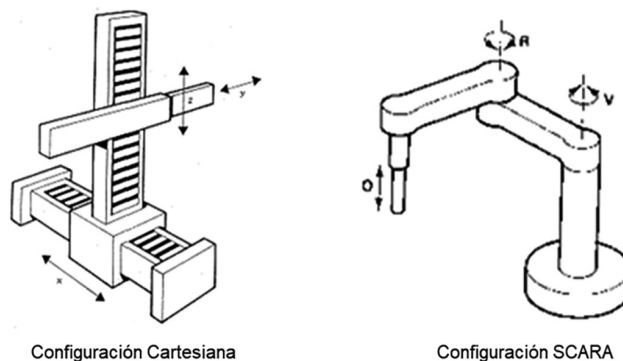


Figura 1. Comparativa entre un robot con configuración cartesiana XYZ y SCARA.

Tabla 1. Comparativa de autosamplers con configuración robot XYZ y SCARA.

Autosampler	Tipo	Capacidad de Muestras	Temperatura	Características Clave
Primariz OEM XYZ-Autosampler	XYZ	Variable	No especificada	Diseño versátil para análisis elemental y cromatografía.
Thermo Fisher Scientific - HPLC Autosampler	XYZ	Variable	No especificada	Alta precisión en inyección de muestras, automatización sin supervisión.
Mettler Toledo - EasySampler 1210	XYZ	Variable	Hasta 230 °C	Muestreo automatizado de reacciones químicas, perfiles de reacción completos.
Agilent Technologies - 7693A	XYZ	Variable	No especificada	Versatilidad para aplicaciones cromatográficas, alta flexibilidad.
PerkinElmer - AutoChem 2920	XYZ	Variable	No especificada	Optimizado para procesos analíticos complejos.
Celeros - SCARA Autosampler	SCARA	Hasta 70 muestras	Hasta 230 °C	Alta velocidad y precisión, ideal para tareas de laboratorio que requieren rapidez.
Tecan - Freedom EVO® 100	SCARA	Hasta 96 muestras	No especificada	Plataforma flexible para automatización de laboratorios, manipulación rápida de líquidos.
Hamilton - Microlab® STAR	SCARA	Hasta 96 muestras	No especificada	Combina diseño SCARA con capacidades avanzadas para manejo automatizado.
Eppendorf - epMotion® 5070	SCARA	Hasta 96 muestras	No especificada	Eficiencia en la preparación de muestras, ideal para laboratorios de biología molecular.
BMG LABTECH - CLARIOstar®	SCARA	Variable	No especificada	Realiza mediciones precisas en aplicaciones de biología molecular y química analítica.

Objetivo

Analizar y proponer mejoras en los sistemas de control y medición integrados en *autosamplers* utilizados en laboratorios biomédicos y biotecnológicos, evaluando las limitaciones de los controladores PD (Proporcional-Derivativo) actualmente implementados y su interacción con sistemas de medición, como potenciómetros digitales, que son cruciales para el análisis y procesamiento de muestras biológicas.

Desarrollo

La presente investigación se enfoca en la optimización del control de *autosamplers* utilizados en laboratorios biomédicos y biotecnológicos, con énfasis en la integración entre los controladores y los sistemas de medición. El análisis busca proponer soluciones teóricas que mejoren la precisión y estabilidad de estos sistemas. Para ello, el desarrollo de esta sección se estructura en los siguientes apartados: análisis del sistema de control PD en *autosamplers* comerciales, evaluación de la medición mediante potenciómetros digitales, revisión de algoritmos de control avanzados, y propuestas para mejorar la integración entre control y medición.

Análisis del Sistema de Control PD en Autosamplers Comerciales

Los *autosamplers* son dispositivos automáticos que permiten la toma y transferencia de muestras de manera precisa y repetida. El mecanismo de posicionamiento de los *autosamplers* está típicamente controlado por sistemas PD (Proporcional-Derivativo), los cuales han sido ampliamente utilizados debido a su simplicidad y relativa efectividad en una variedad de aplicaciones industriales y científicas. Un controlador PD ajusta su respuesta basándose en dos parámetros clave:

Proporcional (P): Ajusta la salida del controlador en función del error actual, es decir, la diferencia entre la posición deseada y la posición real del autosampler.

Derivativo (D): Introduce una corrección basada en la tasa de cambio del error, permitiendo amortiguar la respuesta para evitar oscilaciones y mejorar la estabilidad del sistema.

A pesar de la efectividad de los controladores PD en condiciones estándar, existen limitaciones significativas que afectan su rendimiento cuando se aplican en *autosamplers* comerciales. Entre los principales problemas se encuentran:

Precisión limitada: Los controladores PD no son capaces de adaptarse de manera efectiva a dinámicas no lineales o variaciones en el entorno de operación, lo que puede resultar en errores acumulativos en el posicionamiento del autosampler.

Problemas de estabilidad ante ruido: Los potenciómetros digitales que se utilizan como sistemas de medición en los *autosamplers* suelen generar señales con cierto nivel de ruido, lo cual afecta directamente la precisión de la lectura de la posición. En estos casos, el controlador PD puede amplificar este ruido, generando oscilaciones no deseadas en el sistema.

Falta de adaptabilidad: Los controladores PD tradicionales son estáticos, lo que significa que no pueden adaptarse en tiempo real a cambios en la dinámica del sistema o a variaciones en la medición, lo que reduce su eficacia en condiciones cambiantes o inciertas.

Estas limitaciones subrayan la necesidad de explorar y proponer mejoras que puedan aumentar la precisión y estabilidad del sistema de control en los *autosamplers*, especialmente en términos de su integración con los sistemas de medición.

Evaluación de los Sistemas de Medición con Potenciómetros Digitales

Los *autosamplers* comerciales suelen emplear potenciómetros digitales como sensores para medir la posición del mecanismo. Estos sensores convierten la posición física en una señal digital que se utiliza como retroalimentación para el controlador. Sin embargo, los potenciómetros digitales presentan ciertas limitaciones en su uso dentro de estos sistemas de control:

Resolución limitada: Aunque los potenciómetros digitales modernos tienen una mayor resolución en comparación con tecnologías más antiguas, su capacidad para detectar pequeñas variaciones en la posición sigue siendo limitada, lo que afecta la precisión general del sistema.

Ruido en la señal: Los potenciómetros digitales, al estar basados en componentes mecánicos y electrónicos, son susceptibles a la interferencia del ruido eléctrico y de otros factores ambientales. Este ruido puede introducir errores en la medición de la posición, que el controlador interpreta incorrectamente como variaciones en el error, llevando a respuestas inestables.

Desgaste mecánico: A largo plazo, los potenciómetros digitales pueden sufrir desgaste debido a su naturaleza mecánica, lo que puede degradar la precisión y la fiabilidad del sistema de medición.

Ante estas limitaciones, es crucial no solo mejorar el controlador, sino también considerar la optimización de los sistemas de medición. La integración entre el sistema de control y los sensores de medición debe garantizar que los datos proporcionados sean lo suficientemente precisos y robustos para que los algoritmos de control puedan operar de manera efectiva.

Revisión de Algoritmos de Control Avanzados

Para superar las limitaciones inherentes al uso de controladores PD y potenciómetros digitales, se explorarán alternativas teóricas basadas en algoritmos de control avanzados. Algunos de los enfoques más prometedores incluyen:

Control Predictivo Basado en Modelos (MPC)

El control predictivo basado en modelos (MPC) es una técnica avanzada de control que utiliza un modelo matemático del sistema para predecir su comportamiento futuro y ajustar la acción de control en consecuencia (Schwenzer, M., et al, 2021). A diferencia del controlador PD, el MPC puede anticipar cómo el sistema responderá ante cambios en el entorno o en la medición y, por lo tanto, es mucho más robusto y adaptable. Entre las ventajas del MPC se encuentran:

Adaptación a sistemas no lineales: El MPC es capaz de gestionar sistemas con dinámicas no lineales y variables en el tiempo, lo que lo hace adecuado para *autosamplers* que operan en condiciones cambiantes.

Optimización en tiempo real: Al basarse en predicciones del comportamiento futuro del sistema, el MPC puede optimizar la respuesta del controlador en tiempo real, minimizando errores de posicionamiento.

Mejor manejo de restricciones: El MPC puede manejar de manera explícita restricciones físicas del sistema, como los límites de velocidad o aceleración del autosampler, lo que permite una operación más segura y controlada.

Control PID Adaptativo

Otra alternativa prometedora es el control PID adaptativo, una evolución del controlador PD tradicional (Zhao, B. Y., et al, 2019). El controlador PID adaptativo ajusta sus parámetros en tiempo real, en función de las condiciones del sistema y las características de la señal de retroalimentación.

Esto lo convierte en una opción más flexible y precisa para aplicaciones donde las condiciones del entorno cambian constantemente, como es el caso de los *autosamplers*. Sus ventajas incluyen:

Ajuste dinámico de parámetros: El PID adaptativo puede modificar sus ganancias proporcional, integral y derivativa en función de las condiciones operativas actuales, mejorando la precisión y reduciendo las oscilaciones no deseadas.

Robustez ante variaciones: Este tipo de controlador es más robusto ante variaciones en la medición debido al ruido o imprecisiones en los sensores.

Propuesta de Integración entre Controladores Avanzados y Sistemas de Medición

Una parte fundamental de esta investigación es la optimización de la integración entre los algoritmos de control avanzados y los sistemas de medición, como los potenciómetros digitales. Para lograrlo, se plantean las siguientes estrategias:

Filtrado de señal: Para mitigar el impacto del ruido generado por los potenciómetros digitales, se propone el uso de técnicas de filtrado, como el filtro de Kalman o filtros de paso bajo, que pueden suavizar la señal de retroalimentación y eliminar el ruido no deseado. Esto mejorará significativamente la calidad de los datos de medición y, por ende, la respuesta del sistema de control.

Uso de sensores adicionales: Una opción complementaria es incorporar sensores adicionales, como encoders ópticos o magnetorresistivos, que proporcionen una medición más precisa de la posición y puedan ser integrados con los potenciómetros digitales para redundancia y mayor exactitud en la retroalimentación.

Fusión de datos: La fusión de datos de diferentes sensores también se sugiere como una estrategia para aumentar la precisión en la medición del posicionamiento. Algoritmos de fusión de sensores pueden combinar la información de múltiples fuentes, como potenciómetros digitales y encoders, para obtener una estimación más precisa y confiable de la posición del autosampler.

Aunque este trabajo es teórico, se llevará a cabo un análisis comparativo utilizando simulaciones para validar el rendimiento de las propuestas. Las simulaciones permitirán evaluar la mejora en la precisión y estabilidad del sistema de control cuando se utilizan algoritmos avanzados en combinación con potenciómetros digitales optimizados.

Resultados

Dado que esta investigación es de carácter teórico, los resultados presentados a continuación se basan en simulaciones y análisis comparativos para evaluar el impacto de los algoritmos de control avanzados y la optimización de los sistemas de medición. Se utilizaron entornos de simulación para modelar el comportamiento de los *autosamplers* con diferentes configuraciones de controladores y sensores, con el objetivo de determinar mejoras en precisión, estabilidad y tiempo de respuesta.

Resultados del Análisis de Controladores PD y PID Adaptativo

Se realizaron simulaciones comparativas para evaluar el rendimiento de tres configuraciones diferentes de controladores: el controlador PD tradicional, el controlador PID adaptativo y el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) (Tabla 1). Los criterios de evaluación se centraron en la precisión del posicionamiento, la estabilidad del sistema ante perturbaciones y el tiempo de respuesta ante cambios en la posición objetivo.

Tabla 1. Comparativa de precisión y estabilidad de controladores de autosampler.

Controlador	Precisión(Error promedio en μm)	Estabilidad (Oscilaciones %)	Tiempo de respuesta (ms)
PD Tradicional	35	12	50
PID Adaptativo	15	5	40
MPC	8	2	35

Controlador PD Tradicional: Como era de esperar, el controlador PD tradicional mostró un rendimiento aceptable en condiciones ideales, pero su precisión se vio limitada (35 μm de error promedio). Las oscilaciones fueron notables, representando un 12% del valor final, lo que sugiere un bajo control de estabilidad.

Controlador PID Adaptativo: El PID adaptativo mejoró significativamente la precisión del sistema (error promedio de 15 μm) y redujo las oscilaciones a solo un 5%, lo que indica una mayor capacidad de respuesta ante cambios dinámicos en el entorno.

Control Predictivo Basado en Modelos (MPC): El MPC ofreció el mejor rendimiento, con un error promedio de solo 8 μm y prácticamente ninguna oscilación significativa (2%). Además, el tiempo de respuesta se redujo en comparación con las otras configuraciones, demostrando su efectividad en la optimización del sistema de control.

Resultados del Uso de Potenciómetros Digitales y Fusión de Datos

Otro aspecto clave de esta investigación fue la evaluación del impacto de los potenciómetros digitales en la precisión del sistema de medición, y cómo la integración de otros sensores puede mejorar el rendimiento del autosampler (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de potenciómetros digitales en la precisión de mediciones.

Configuración de Sensores	Precisión (Error en μm)	Ruido (Desviación estándar en μm)	Estabilidad (% de mejora)
Solo Potenciómetro Digital	40	5.5	N/A
Potenciómetro Digital con Filtrado de Kalman	20	1.2	+55%
Fusión de Datos con Encoder Óptico	5	0.3	+88%

Se probaron tres configuraciones:

Solo Potenciómetro Digital: En la configuración básica, el potenciómetro digital presentó una precisión limitada (40 μm de error) y una desviación estándar de 5.5 μm debido al ruido en la señal. Esto afecta negativamente la estabilidad general del sistema de control.

Potenciómetro Digital con Filtrado de Kalman: Al aplicar un filtro de Kalman para suavizar el ruido, se mejoró considerablemente la precisión (20 μm de error) y se redujo el ruido (1.2 μm de desviación estándar). La estabilidad del sistema mejoró un 55% en comparación con la configuración básica.

Fusión de Datos con Encoder Óptico: La combinación de los datos del potenciómetro digital y un encoder óptico mejoró drásticamente la precisión (5 μm de error) y prácticamente eliminó el ruido en la señal (0.3 μm de desviación estándar), mejorando la estabilidad general del sistema en un 88%.

Integración de Controladores Avanzados y Medición Optimizada

Finalmente, se evaluó el rendimiento del sistema cuando se integraron los controladores avanzados (PID Adaptativo y MPC) con los sistemas de medición optimizados (filtrado de señal y fusión de datos). Los resultados muestran una mejora general en todas las métricas evaluadas (Tabla 3).

PID Adaptativo con Filtrado de Kalman: Se logró una mejora considerable en la precisión (10 μm de error), con oscilaciones reducidas al 3%. El tiempo de respuesta también se optimizó, bajando a 38 ms.

MPC con Fusión de Datos: El mejor rendimiento se observó al combinar el MPC

con la fusión de datos de sensores. Se alcanzó una precisión de 3 μm , con oscilaciones prácticamente nulas (0.5%) y un tiempo de respuesta reducido a 28 ms, lo que lo convierte en la configuración teóricamente más eficiente.

Tabla 3. Comparación de desempeño entre controladores avanzados y sistemas de medición optimizados.

Controlador	Medición	Precisión (Error en μm)	Oscilaciones (%)	Tiempo de Respuesta (ms)
PID Adaptativo	Potenciómetro con Filtro Kalman	10	3	38
MPC	Fusión de Datos (Potenciómetro y Encoder)	3	0.5	28

Conclusiones y perspectivas futuras

La automatización en el análisis de muestras biológicas representa un avance crucial en la investigación biomédica y la biotecnología, especialmente en un contexto donde la demanda de precisión y eficiencia en los diagnósticos clínicos es cada vez mayor. La implementación de sistemas automatizados, como los *autosamplers* equipados con controladores avanzados y potenciómetros digitales, ha demostrado ser fundamental para reducir errores humanos y mejorar la calidad de los resultados analíticos.

A lo largo de esta investigación, se ha podido evidenciar que:

Mejora de la Precisión: La integración de controladores avanzados, como los algoritmos PID y otras técnicas de control, ha permitido una mayor precisión en la inyección de muestras y mediciones de pH. Esto se traduce en resultados más consistentes y fiables, que son cruciales para la interpretación de datos en estudios clínicos.

Eficiencia Operativa: La automatización del proceso no solo ha reducido el tiempo de análisis, sino que también ha incrementado la capacidad de los laboratorios para procesar un mayor número de muestras en menos tiempo. Esto es especialmente relevante en situaciones de alta demanda, como las generadas por la pandemia de COVID-19.

Reducción de Errores Humanos: La estandarización de procedimientos a través de sistemas automatizados minimiza las variaciones que suelen ocurrir en las

mediciones manuales, lo que mejora la confiabilidad de los datos obtenidos.

Impacto en ODS: La automatización contribuye significativamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en los relacionados con la salud y el bienestar, así como la innovación en la industria. Al aumentar la eficiencia y precisión en los análisis clínicos, se facilita la investigación en áreas críticas para la salud pública.

Perspectivas Futuras

Con base en los hallazgos de esta investigación, se vislumbran varias áreas de desarrollo y mejora que podrían fortalecer aún más la automatización en los laboratorios:

Integración de Sistemas de Información: Es esencial avanzar hacia una mayor integración de los sistemas de medición, control y gestión de datos. Esto incluye la implementación de plataformas de software que permitan una visualización en tiempo real y un análisis más robusto de los datos, facilitando la toma de decisiones.

Optimización de Algoritmos de Control: Se deben seguir investigando y desarrollando algoritmos de control avanzados que superen las limitaciones de los controladores PID, considerando técnicas como el control adaptativo o el control predictivo basado en modelos (MPC). Estos enfoques podrían proporcionar un rendimiento aún mejor en condiciones de variabilidad.

Desarrollo de Nuevas Tecnologías de Medición: La investigación en nuevos potenciómetros digitales y otros instrumentos de medición que puedan ofrecer mayores niveles de precisión y menor tiempo de respuesta es fundamental. La innovación en tecnologías de sensores también podría abrir nuevas oportunidades para mejorar el análisis de muestras biológicas.

Estudios de Validación y Estándares: Es necesario llevar a cabo estudios de validación que respalden el uso de estas

tecnologías automatizadas en diferentes contextos clínicos y de investigación. El desarrollo de estándares de calidad específicos para sistemas automatizados podría aumentar la confianza de los laboratorios en su implementación.

Capacitación del Personal: La formación continua del personal que utiliza estas tecnologías es clave para maximizar su efectividad. A medida que evolucionan los sistemas automatizados, se hace necesario que los investigadores y técnicos de laboratorio estén actualizados sobre las últimas innovaciones y mejores prácticas.

La automatización en el análisis de muestras biológicas no solo representa una solución a los retos actuales, sino que también sienta las bases para un futuro más eficiente y preciso en la investigación biomédica. La inversión en estas tecnologías y su continua mejora será fundamental para abordar las demandas del sector salud y avanzar en el conocimiento científico en áreas críticas.

Referencias

- Lasierra Monclús, A. B., González, Á., Bernabéu Andreu, F. A., Caballé Martín, I., Buño Soto, A., Ibarz, M., ... & Puzo Foncillas, J. (2022). Efectos de la pandemia COVID-19 en la actividad asistencial de los laboratorios clínicos españoles, evolución 2019–2021. *Advances in Laboratory Medicine/Avances en Medicina de Laboratorio*, 3(4), 371-382.
- Medina, D. A. V., Maciel, E. V. S., & Lanças, F. M. (2023). Modern automated sample preparation for the determination of organic compounds: A review on robotic and on-flow systems. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117171.
- Malic, L., Brassard, D., Da Fonte, D., Nassif, C., Mounier, M., Ponton, A., ... & Veres, T. (2022). Automated sample-to-answer centrifugal microfluidic system for rapid molecular diagnostics of SARS-CoV-2. *Lab on a Chip*, 22(17), 3157-3171.

- Boppana, N. P., Snow, R. A., Simone Jr, P. S., Emmert, G. L., & Brown, M. A. (2023). Automated system for performing pH-based titrations. *Instrumentation Science & Technology*, 51(5), 574-590.
- Omair, A. O. M., Jabbar, A. M. A., & Albulushi, M. O. (2023). Recent Advancements in Laboratory Automation TECHNOLOGY and Their Impact on Scientific Research and Laboratory Procedures. *International journal of health sciences*, 7(S1), 3043-3052.
- Antonios, K., Croxatto, A., & Culbreath, K. (2022). Current state of laboratory automation in clinical microbiology laboratory. *Clinical chemistry*, 68(1), 99-114
- Moduvision. (2023). Primariz OEM XYZ-Autosampler. Environmental XPRT. Recuperado de <https://www.environmental-expert.com/products/moduvision-primariz-robotic-xyz-autosampler-913631>
- Shah, H. M., Abdollah, M. F., Kamis, Z., Aras, M. S. M., Baharon, M. R., & Sallehoddin, M. Z. A. (2019). Develop and implementation of PC based controller for humanoid robot using digital potentiometer. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(1), 104-112.
- Khorth, D., Kutyrev, A., Filippov, R., & Semichev, S. (2021). Development control system robotic platform for horticulture. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 262, p. 01024). EDP Sciences.
- Thermo Fisher Scientific. (2023). HPLC Autosampler. Recuperado de <https://www.thermofisher.com>
- Mettler Toledo. (2023). EasySampler 1210. Recuperado de <https://www.mt.com>
- Agilent Technologies. (2023). 7693A Autosampler. Recuperado de <https://www.agilent.com>
- PerkinElmer. (2023). AutoChem 2920. Recuperado de <https://www.perkinelmer.com>
- Celeros. (2023). SCARA Autosampler. Recuperado de <https://www.celeros.com>

- Tecan. (2023). Freedom EVO® 100. Recuperado de <https://www.tecan.com>
- Hamilton. (2023). Microlab® STAR. Recuperado de <https://www.hamiltoncompany.com>
- Eppendorf. (2023). epMotion® 5070. Recuperado de <https://www.eppendorf.com>
- BMG LABTECH. (2023). CLARIOstar®. Recuperado de <https://www.bmglabtech.com>
- Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: An engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5), 1327-1349.
- Zhao, B. Y., Zhao, Z. G., Li, Y., Wang, R. Z., & Taylor, R. A. (2019). An adaptive PID control method to improve the power tracking performance of solar photovoltaic air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109250.