

ISSN 1390-6712

MASKAY



Vol. 15, No. 2

Revista MASKAY

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

DIRECTOR DEL DEEL

Tern. Cristian Manrique Arias Espinosa, Mgtr.

EDITOR GENERAL

Diego Arcos Avilés (ESPE)

COEDITORES

Enrique V. Carrera (ESPE)

Vanessa Vargas (ESPE)

EQUIPO EDITORIAL

Enrique V. Carrera (ESPE, Ecuador)

Vanessa Vargas (ESPE, Ecuador)

Francesc Guijoan (UPC, España)

Juan Antonio Clemente (UCM, España)

Nelson Díaz (UD, Colombia)

Daniel Ochoa (ESPOL, Ecuador)

Carlos Julio Tierra (UFRJ, Brasil)

INFORMACIÓN DE CONTACTO

Revista MASKAY

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. Gral. Rumiñahui (S/N)

P. O. Box 17-15-243B

Sangolquí, Pichincha, Ecuador

e-mail: maskay@espe.edu.ec

Telf. +593 2 3989400 ext 1867

El contenido de los artículos aquí publicados es responsabilidad exclusiva de sus correspondientes autores. Mayor información en <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/maskay>.

Presentación

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, consciente de su gran responsabilidad ante la sociedad, busca proponer e impulsar iniciativas orientadas a fomentar el desarrollo integral de la ingeniería eléctrica y electrónica en el Ecuador. Como resultado de este compromiso, nace en 2011 la revista Maskay. Esta revista sintetiza de manera documentada los esfuerzos de investigación y desarrollo que realizan los docentes/investigadores y estudiantes de la región.

En la actualidad, la revista MASKAY se encuentra indexada en diversas bases de datos: **SciELO-Ecuador**, **Latindex catálogo v2.0**, **LatAm-Studies** Estudios Latinoamericanos, **RootIndexing**, **MIAR** (Matriz de Información para el análisis de Revistas), **DOAJ** (Directory of Open Access Journals), **DRJI** Directory of Research Journals Indexing), **Dialnet** y **REDIB** (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico), con el objetivo de difundir a nivel internacional las publicaciones realizadas en esta revista. Además, para que exista una mejor divulgación de sus contenidos, la revista MASKAY cuenta con número **DOI (Digital Object Identifier)** legítimamente registrado y validado por **Crossref**, lo que permite una fácil localización de sus contenidos en la web.

Diego Arcos Avilés
Editor General

Presentation

The Department of Electrical, Electronics, and Telecommunications Engineering of the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, aware of its great responsibility to society, seeks to propose and promote initiatives to foster the comprehensive development of electrical and electronic engineering in Ecuador. As a result of this commitment, the Maskay Journal was born in 2011. This journal presents the research and development efforts undertaken by the region's teachers/researchers, and students.

Currently, the MASKAY Journal is indexed in several databases: **SciELO-Ecuador**, **Latindex catalog v2.0**, **LatAm-Studies** Estudios Latinoamericanos, **RootIndexing**, **MIAR** (Information Matrix for the Analysis of Journals), **DOAJ** (Directory of Open Access Journals), **DRJI** (Directory of Research Journals Indexing), **Dialnet** and **REDIB** (Ibero-American Network of Innovation and Scientific Knowledge), to disseminate the publications in this journal internationally. In addition, to better disseminate its contents, the MASKAY Journal has a **DOI (Digital Object Identifier)** number legitimately registered and validated by **Crossref**, which allows easy location of its contents on the web.

Diego Arcos Avilés
Editor-in-Chief

Contenido / Table of Contents

Prototipo de estación meteorológica autosustentable para el monitoreo de variables climáticas en tiempo real en el cantón Salinas

Prototype of a self-sustainable weather station for real-time monitoring of climate variables in Salinas

DOI: 10.24133/maskay.v15i2.3833

Mario Alomoto, José Regatto, Geovanny Ortega, Jonathan Velásquez... 1

Diseño de un algoritmo de control predictivo ajustado por algoritmo evolutivo aplicado a un proceso de nivel de un tanque cónico no lineal

Design of a predictive control tuned by an evolutionary algorithm applied to a nonlinear conical tank level

DOI: 10.24133/maskay.v15i2.4156

Karina Montaluisa, Luis Tello 10

Prototipo de estación meteorológica autosustentable para el monitoreo de variables climáticas en tiempo real en el cantón Salinas

Prototype of a self-sustainable weather station for real- time monitoring of climate variables in Salinas

Mario Alomoto, Geovanny Ortega, José Regatto, Jonathan Velásquez

Abstract—This research proposes the development of a low-cost weather station prototype integrating microcontrollers, environmental sensors, and IoT technology, aiming to evaluate its measurement accuracy through comparison with official data from Ecuador's National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI). The study examines key meteorological variables, including temperature, humidity, UV-A radiation, air quality, atmospheric pressure, and wind speed/direction, employing an experimental quantitative methodology structured in sequential phases: technological architecture design, system implementation, and data validation. For data validation, rigorous statistical methods were applied, including: individual error determination, standard deviation analysis, margin of error calculation, and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Results demonstrate acceptable error margins across critical variables: temperature measurements showed a mean error of $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (MAPE: 1.15%), humidity displayed a -2.8% bias (MAPE: 6.7%), while atmospheric pressure achieved exceptional precision (MAPE: 0.034%). This work validates the prototype's technical feasibility. It establishes a methodological framework for optimizing meteorological sensors in coastal environments like Santa Elena, Ecuador, ultimately contributing to more accessible and reliable environmental monitoring systems.

Index Terms—Weather Station, IoT, LoRa.

Resumen—Esta investigación propone el desarrollo de un prototipo de estación meteorológica de bajo costo, que integra microcontroladores, sensores climáticos y tecnología IoT, con el objetivo de evaluar su precisión mediante la comparación con los datos oficiales del INAMHI. El estudio analiza variables clave como temperatura, humedad, radiación UV-A, calidad del aire, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, mediante el empleo de una metodología cuantitativa experimental estructurada en fases que incluyen el diseño de la arquitectura tecnológica, implementación del sistema y validación de datos. Para la validación los datos obtenidos, se aplicaron métodos estadísticos como es la determinación del error de cada dato, desviación estándar, margen de error y el MAPE. Los resultados

revelan márgenes de error aceptables en las variables más relevantes se obtuvo: la temperatura mostró un error medio de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (MAPE: 1.15 %), la humedad un sesgo de -2.8% (MAPE: 6.7 %), y la presión atmosférica una precisión destacable (MAPE: 0.034 %). Este trabajo no solo valida la viabilidad técnica del prototipo, sino que también proporciona un marco metodológico para optimizar sensores meteorológicos en entornos costeros como Santa Elena, Ecuador, lo que contribuye a sistemas de monitoreo accesibles y confiables.

Palabras Claves—Estación meteorológica, IoT, LoRa.

I. INTRODUCCIÓN

EN Ecuador existen 82 estaciones hidro-meteorológicas operativas, de las cuales: 44 son automáticas y 38 convencionales, los mismos que permiten monitorear datos de variables meteorológicas, de acuerdo a lo establecido en el informe de mes de marzo del 2024 realizado por el INAMHI [1].

Actualmente la provincia de Santa Elena cuenta con una estación meteorológica automática ubicada en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, donde los datos obtenidos por la misma son almacenadas y presentadas en la página web del INAMHI para el público general. Las variables que se presentan en la plataforma del INAMHI actualmente son: humedad relativa del aire, precipitación, presión atmosférica, radiación solar global, radiación solar reflejada, radiación UVA, radiación UV, recorrido del viento, temperatura del aire, temperatura del sensor UV, dirección y velocidad del viento [2].

Sin embargo, la información que se presentan en la plataforma del INAMHI tienden a ser de la siguiente manera: uno por día o en algunos casos no se presentan datos durante un periodo de tiempo y en otros casos no existen datos en algunas variables, lo que es una limitante para hacer un análisis profundo sobre los cambios significativos en el clima de la zona de estudio.

El propósito de esta investigación es diseñar e implementar un prototipo de estación meteorológica de bajo costo que integre sensores para medir variables climáticas, módulos de radiofrecuencia para transmisión de datos en zonas remotas, y un sistema de alimentación autosostenible con celdas solares y banco de baterías, que garantiza la operación continua. El

Alomoto M., docente investigador del Instituto Superior Tecnológico Centro Tecnológico Naval, Salinas, Ecuador (email: cetnav.marioalomoto@gmail.com).

Regatto J. y Ortega G. son docentes de la Carrera de Electrónica en el Instituto Superior Tecnológico Centro Tecnológico Naval, Salinas, Ecuador (email: {cetnav.joseregatto, cetnav.geovannyortega}@gmail.com).

Velásquez J. es docente de la Carrera de Mecánica en el Instituto Superior Tecnológico Centro Tecnológico Naval, Salinas, Ecuador (email: cetnav.jonathanvelasquezm@gmail.com).

impacto radica en demostrar que el uso de componentes económicos no compromete la confiabilidad de los datos, lo que ofrece una solución accesible y robusta para el monitoreo de las variables de estudio.

Para el análisis de datos, se recopilieron registros meteorológicos en el periodo comprendido entre el 17 de junio y el 17 de julio de 2024, obtenidos tanto del prototipo desarrollado como de los datos publicados en la página web del INAMHI. Posteriormente, se aplicaron métodos estadísticos para evaluar el margen de error de cada variable climática estudiada.

El presente documento está organizado de la siguiente manera: la sección dos revisa los trabajos relacionados con la investigación; la sección tres describe la metodología empleada; la sección cuatro presenta los resultados obtenidos; la sección cinco analiza dichos resultados mediante una discusión crítica; y finalmente, la sección seis expone las conclusiones derivadas del estudio.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Para los autores Monga et. al, la implementación de una estación meteorológica autosustentable en la ciudad de Quito, en la Escuela Politécnica Nacional permitió la recopilación de datos en tiempo real de variables como velocidades de viento, y radiación solar para determinar la capacidad de generación de energía eléctrica. La estación es capaz de transmitir datos en tiempo real, mismos que son procesados por un microcontrolador Arduino, y almacenados en una base de datos en MySQL. La validación de los datos se realizó mediante la comparación de medición de variables con una estación de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico del Distrito Metropolitano de Quito, con un periodo de recolección de datos de 30 días. La estación meteorológica para este estudio se implementó en el centro histórico, que obtiene como resultado un error de 65.66% en promedio de todas las variables medidas, de donde se concluye que los métodos para adquisición almacenamiento y procesamiento de datos funcionan de manera adecuada, y que, los márgenes porcentuales de errores se deben a que las condiciones climáticas de ambas estaciones son diferentes por sus ubicaciones [3].

En el contexto del IoT aplicado al monitoreo ambiental, desarrollaron una estación meteorológica inteligente basada en tecnología IoT, que integra sensores múltiples con unidades ESP32 para la adquisición de datos atmosféricos. Su implementación empleó la plataforma Blynk como interfaz remota, que logra un 95% de precisión en mediciones de precipitación y solo un 2% de desviación en humedad relativa diurna. El estudio demostró que este enfoque no solo optimiza la recolección eficiente de datos meteorológicos (temperatura, humedad y lluvia), sino que también aborda desafíos críticos de seguridad en la transmisión de información. Estos resultados resaltan el potencial del IoT para mejorar la toma de decisiones en agricultura, aviación y gestión ambiental, lo cual coincide con la propuesta en cuanto a arquitectura escalable y confiabilidad de los datos recolectados [4].

La cuenca del Río Paute cuenta con 130 estaciones

meteorológicas que no cuentan con una transmisión de datos automática, misma que se realiza manualmente, por ende, la investigación propone la implementación de un sistema de comunicaciones inalámbricas con arquitectura LoRa para la disminución de latencia en la recopilación de datos. Para cumplir con el objetivo de la propuesta se ha utilizado un microprocesador Raspberry Pie como Procesador principal y puerta de enlace para la intercomunicación de las estaciones meteorológicas. De igual manera se cumplió con la optimización del 20 % en temas de ahorros de energía al apagar los sensores que no necesitan estar encendidos permanentemente. La utilización de una topología estrella permite la interconexión entre todas las estaciones sin que exista pérdida de conectividad cuando una de ellas sale de operación por algún tipo de desperfecto. Las distancias entre cada estación son de aproximadamente 5.5 km, mismas que son cubiertas sin problemas por el protocolo LoRa [5].

El diseño e implementación de una estación meteorológica para las plantaciones de cacao, permite la toma de decisiones para el control fitosanitario del cultivo, esta infraestructura se construyó al seguir varios parámetros para la consecución del objetivo de la investigación, los protocolos usados para la comunicación de los sensores con el Datalogger y la base de datos son RS-32 y PHP encargados de transmitir los datos desde los sensores hacia el microprocesador Raspberry el cual mediante una programación en Python realiza la carga de información hacia la nube en una base de datos que finalmente será visualizada en una interfaz desarrollada en HTML de manera local y remota, los datos obtenidos por la estación meteorológica tienen un margen de error de 1.5 % comparados con las mediciones de la estación meteorológica INAMHI lo que demuestra que los datos obtenidos son confiables para el tema propuesto [6].

III. METODOLOGÍA

La presente investigación se realizó en las instalaciones del Instituto Superior Tecnológico “Centro Tecnológico Naval” ubicado en el Cantón Salinas, con un enfoque experimental cuantitativo. La Fig. 1 presenta el mapa geográfico de la ubicación con las coordenadas georreferenciales del lugar de implementación del prototipo, el cual consta de un módulo transmisor y otro receptor, mismos que se detallaran el modo de operación en el desarrollo del documento. Para llevar a cabo la presente propuesta se planteó un modelo basado en fases de acuerdo a la arquitectura propuesta.

La etapa inicial de la investigación se centró en el desarrollo de dos prototipos electrónicos distintos: un módulo transmisor de datos y un módulo receptor. En la Fig. 2, se presenta el diseño del módulo transmisor, el cual despliega un papel fundamental al capturar datos de diversas variables climáticas a través de sensores. Estas variables incluyen la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, calidad del aire y radiación UVA.

Una vez recopilados, estos datos son transmitidos mediante comunicación de radiofrecuencia a 433MHz, mediante el protocolo ofrece un alcance de transmisión de aproximadamente 1km.



Fig. 1. Ubicación del escenario de estudio.

Este diseño robusto del módulo transmisor establece una base sólida para la recopilación y transmisión eficiente de datos climáticos, lo que facilita el progreso hacia las fases posteriores del proyecto.

La Fig. 3 muestra el diagrama del módulo receptor el mismo que despliega el proceso de recepción de datos. Al recibir la información enviada por el módulo transmisor, este dispositivo se encarga de una serie de tareas esenciales. Primero, decodifica los datos entrantes para su comprensión. Luego, procede a procesarlos según los requerimientos del algoritmo. Una vez procesados, estos datos son presentados a través de una interfaz LCD, al facilitar su visualización para el usuario. Además, el módulo receptor actúa como un puente entre el entorno local y la base de datos central, ya que transfiere los datos procesados a una base de datos MySQL. Este proceso se realiza mediante el protocolo de comunicación HTTPS, el cual garantiza la integridad de la información transmitida.

La segunda fase correspondió a la selección de componentes electrónicos del módulo transmisor y receptor según sus características.

1) Unidad de control: La placa de desarrollo basado en el microcontrolador ESP32, es la unidad de control es el componente electrónico encargado de procesar los datos obtenidos de los sensores. Componente seleccionado por su buen procesamiento con una resolución de 10 bits, protocolos de comunicación, pines digitales y analógicos, además, por su bajo consumo de energía [7].

2) Sensor de dirección de viento: Para capturar el parámetro de dirección del viento, se optó por importar un sensor fabricado en policarbonato, el cual cuenta con excelentes propiedades anticorrosivas y de durabilidad. Estas características aseguran su fiabilidad y funcionamiento a largo plazo en diversas condiciones ambientales. Las características técnicas principales, es su voltaje de alimentación es de 10v a 30v, la señal de salida de 0v a 5v.

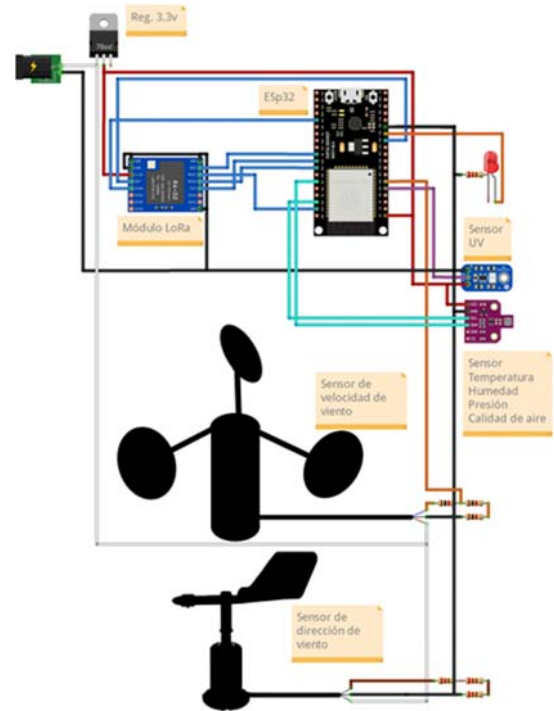


Fig. 2. Diagrama electrónico del módulo transmisor.

3) Sensor de velocidad de viento: Para la lectura de la velocidad de viento, se implementó un sensor fabricado de policarbonato con las mismas características del sensor de dirección de viento.

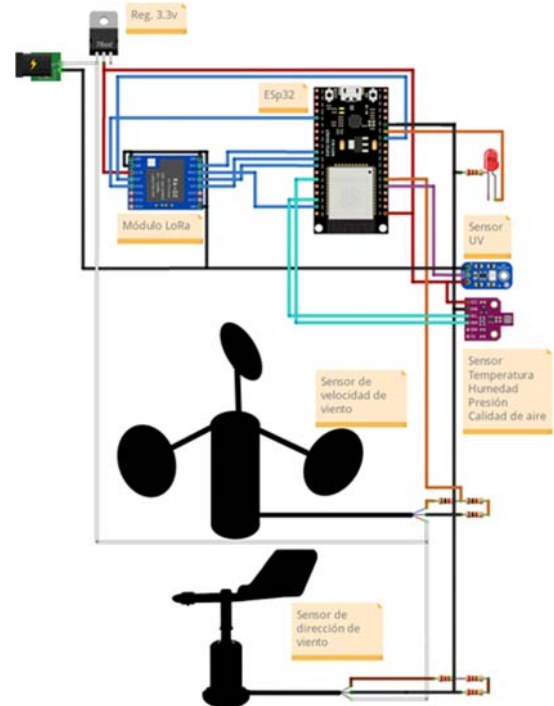


Fig. 3. Diagrama electrónico del módulo receptor.

4) Sensor climático: Se utilizó el sensor BME680 que a través del protocolo de comunicación I2C [8], permite obtener lecturas de Temperatura, humedad relativa, presión y calidad

del aire. El sensor es compatible para la placa de desarrollo ESP32, que mediante la librería Adafruit BME680 permite obtener los datos de manera efectiva [9].

5) Sensor UV: Se utilizó el sensor UV CJMCU-GUVA-S12SD, el cual permite obtener lectura de la intensidad de rayos ultravioleta [10] a través de voltajes, lo que permite realizar la lectura a través de un microcontrolador. Los valores que son recibidos por la placa de desarrollo ESP32 a través de un pin analógico.

6) Módulo de comunicación: Se implementó el módulo de comunicación por radio frecuencia LoRa SX1278-Ra02, por su largo alcance de transmisión de datos que para la presente propuesta abarca aproximadamente 1 km, su baja potencia de consumo y las dimensiones físicas de su hardware [11].

7) Display LCD: Se ha optado por la inclusión de un display LCD de 4 filas por 16 columnas para la visualización de los datos relacionados con las variables climáticas. Esta elección se fundamenta en varios aspectos. En primer lugar, las dimensiones del display proporcionan una cantidad adecuada de espacio para mostrar la información de manera clara y legible. La disposición de 4 filas permite presentar múltiples conjuntos de datos o información detallada sobre una sola variable, mientras que las 16 columnas permiten una distribución ordenada y eficiente de los datos [12].

La tercera fase del proyecto se enfocó en el diseño de un sistema de alimentación eficiente para los módulos transmisor y receptor. Este sistema fue concebido mediante la integración de tres paneles solares de 12V/200mAh, conectados en paralelo para aumentar la intensidad de corriente hasta alcanzar los 600mAh requeridos. Para mantener una alimentación estable, se incorporó un regulador de voltaje step down LM2596. Este componente suministra constantemente 12V para el módulo transmisor y 7.4V para el módulo receptor, lo que optimiza el rendimiento de ambos dispositivos. Además, se incluyó un controlador de carga diseñado específicamente para prevenir la sobrecarga y sobre descarga de las baterías 18650, de esta forma asegura su durabilidad de las baterías a lo largo del tiempo. Los esquemas detallados de este sistema de alimentación pueden ser apreciados en las Fig. 4 y Fig. 5, que ilustran su configuración electrónica tanto en el módulo transmisor como en el receptor, respectivamente.

En la cuarta fase del proyecto, se llevó a cabo la implementación de un servicio web mediante el uso de XAMPP, una solución integral que incluye Apache como servidor web, MySQL como sistema de gestión de bases de datos y PHP como lenguaje de programación del lado del servidor. Este servicio web se diseñó para establecer una conexión con la base de datos MySQL previamente configurada.

Una de las funcionalidades clave de este servicio web es su capacidad para recibir datos del módulo receptor a través de solicitudes HTTP mediante el método POST. Esta arquitectura permite una comunicación y segura entre el módulo receptor y la base de datos, que garantiza el almacenamiento de datos en la base de datos MySQL.

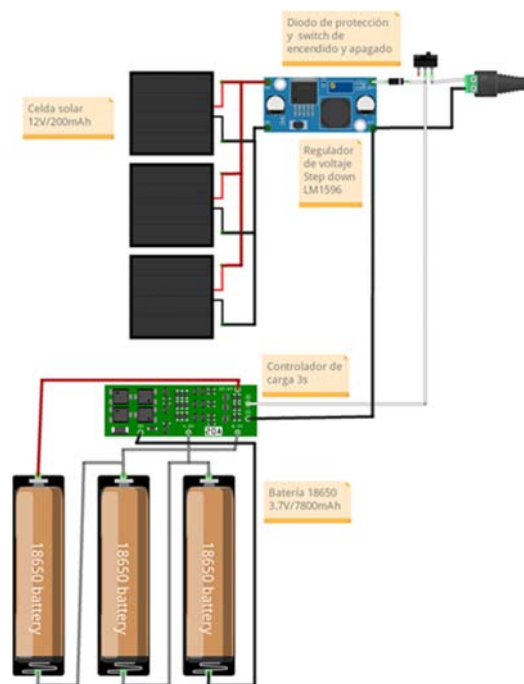


Fig. 4. Diseño de alimentación de voltaje del módulo TX.

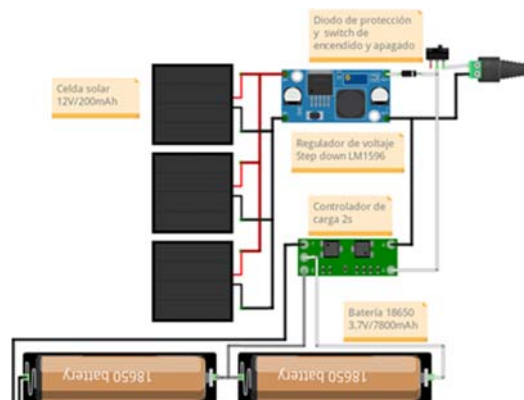


Fig. 5. Diseño de alimentación de voltaje del módulo RX.

En la quinta fase del proyecto, se centró en la configuración y optimización de la plataforma Power BI. Esta herramienta se seleccionó estratégicamente por su capacidad para extraer, procesar y visualizar de manera efectiva la información almacenada en la base de datos de variables climáticas.

La configuración de Power BI se realizó con el objetivo de ofrecer una interfaz intuitiva y amigable para los usuarios finales. Esto implica la creación de paneles personalizados que presentan los datos climáticos de manera detallada. Estos paneles se diseñaron al tener en cuenta las necesidades específicas del usuario, al brindar la flexibilidad para realizar análisis detallados por días, meses o años.

La fase final del proyecto consistió en validar la fiabilidad de los datos climáticos obtenidos por el prototipo (variable 2) mediante su comparación con los registros de la estación meteorológica oficial del INAMHI (variable 1) ubicada en UPSE. Para ello, se analizaron 865 muestras por cada variable climática durante el periodo de estudio. El análisis estadístico incluyó: cálculo del error de la mediana para cada dato (1), y

la determinación de la desviación estándar del error (2) mediante intervalos de confianza del 95% (3), y finalmente el MAPE (4) lo que permitió cuantificar la discrepancia entre ambas fuentes de medición [13].

$$Error_i = Variable2_i - Variable1_i \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Error_i - Error_{medio})^2} \quad (2)$$

$$Magendeerror = z * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{con } z = 1,96 \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Variable2_i - Variable1_i}{Variable1_i} \right| \quad (4)$$

A. Arquitectura propuesta

El avance de la tecnología IoT ha dado lugar a la creación de diversas arquitecturas diseñadas para conectar dispositivos de hardware, como microcontroladores, a internet, lo que permite el almacenamiento de variables en bases de datos en la nube. Aunque no existe un estándar específico para estas arquitecturas, si existe un punto de referencia que facilita alinear un proyecto con las características y funcionalidades del hardware en cuestión. Esta diversidad de enfoques subraya la versatilidad y la adaptabilidad de IoT en diferentes contextos, aunque también plantea desafíos en términos de interoperabilidad y compatibilidad entre sistemas [14].

En el ámbito de las arquitecturas informáticas, se encuentran diversas configuraciones que varían en la cantidad de capas que las componen, i.e., pueden constar de 3, 4, 5, 6 o incluso más niveles. Es importante destacar que, generalmente, se considera que a medida que se añaden capas a la arquitectura, el sistema resultante tiende a ser más robusto en términos de seguridad, soporte y gestión. Este aumento en la complejidad ofrece una mayor capacidad para abordar múltiples aspectos del sistema, como la seguridad de los datos, la redundancia de servicios y la escalabilidad. Esta tendencia hacia arquitecturas más profundas se vincula directamente con una mejora en la capacidad del sistema para enfrentar desafíos operativos y de mantenimiento, mismo que proporciona una base más sólida para el desarrollo y la expansión futura [15].

La Fig. 6 presenta la arquitectura de la estación meteorológica que se fundamenta en un enfoque de múltiples capas, las cuales se alinean con la tecnología del Internet de las Cosas. Este diseño se estructura en cuatro capas distintas: la capa de percepción, la capa de red, la capa de middleware y la capa de aplicación [16]. Es importante destacar que el enfoque adoptado incluye dos capas de percepción y dos capas de red. Esto implica que la arquitectura se basa en la utilización de dos métodos de comunicación diferentes: uno mediante radiofrecuencia y otro mediante una conexión inalámbrica a través de WiFi. Estas alternativas permiten el envío eficiente de datos a través de la red local, lo cual garantiza una transmisión confiable de la información meteorológica recopilada.

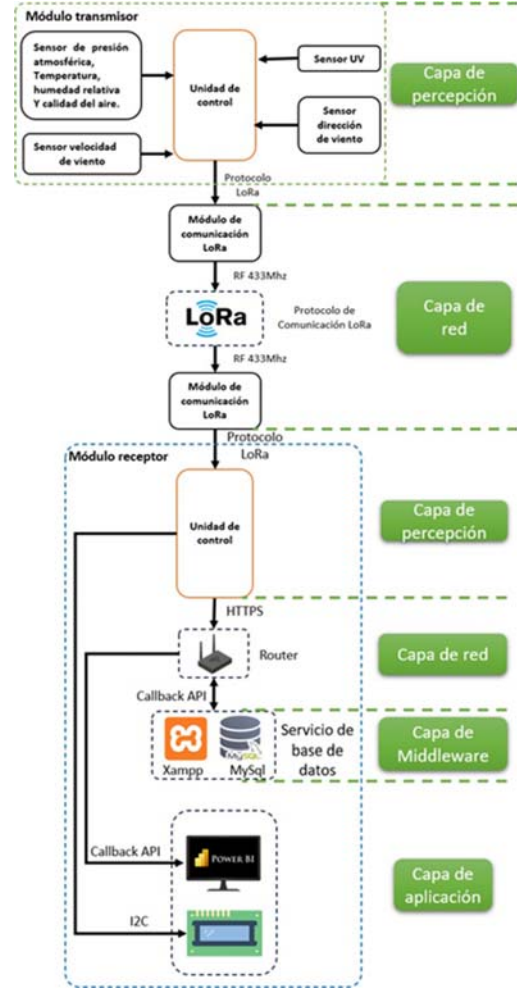


Fig. 6. Arquitectura propuesta.

La capa de percepción está compuesta por los sensores y la unidad de control del módulo de transmisión de las variables meteorológicas. Es importante destacar que esta capa se basa en la recolección y procesamiento de los datos para la siguiente capa.

La capa de red utiliza señales de radio moduladas en una frecuencia de 433 MHz para su funcionamiento. Los datos se transmiten mediante el uso del protocolo NMEA, diseñado originalmente para facilitar la transmisión de información de navegación y posicionamiento a través de redes tanto inalámbricas como cableadas. Este protocolo se caracteriza por la estructura de su trama de datos, que consiste en una serie de elementos separados por comas, que facilita la interpretación y el procesamiento de la información por parte de los dispositivos receptores [17].

Se considerará otra capa de percepción, pero esta vez desde la perspectiva del módulo receptor. Este componente tiene un proceso importante al recibir los datos que son transmitidos por el módulo transmisor mediante el enlace de radiofrecuencia, tal como se describe en la capa de red. Al hacerlo, el módulo receptor capta y decodifica las señales transmitidas, lo que permite que los datos sean procesados y llevados a la siguiente capa.

Finalmente, la capa de aplicación se encarga de consumir los datos almacenados en la base de datos MySQL y presentarlos en la interfaz desarrollada en la aplicación PowerBi. Además, se presentan los datos recolectados en la LCD que integra el módulo receptor.

B. Implementación del módulo transmisor y receptor

Para la implementación los módulos que integran el prototipo de estación meteorológica, se diseñaron soportes mediante software FreeCad. Los diseños que se muestran en las Fig. 7 y Fig. 8 con las dimensiones dada en milímetros y se adecuan principalmente para el soporte para el sistema de carga mediante paneles.

Por otro lado, el diseño de los soportes específicamente para el montaje de los módulos en los lugares establecidos para la presente propuesta. En la Fig. 9, se presentan los diseños con las características de acuerdo a sus medidas en unidades de milímetros.

A continuación, en las Fig. 10 y Fig. 11 se presenta la implementación del módulo transmisor y receptor de la estación meteorológica respectivamente.

C. Interfaz para el usuario

Para el análisis de los datos, se desarrollaron y configuraron interfaces en el software Power BI. Este programa permite visualizar los datos de las variables climáticas almacenadas en la base de datos de manera clara. Las variables monitoreadas incluyen Radiación UV, Calidad del aire, Velocidad del viento, Presión atmosférica, Dirección del viento, Temperatura del ambiente y Humedad en el ambiente.

En la Fig. 12 se presenta la primera interfaz desarrollada. Esta interfaz muestra el último dato climático adquirido, que especifica tanto la fecha actual como el valor de cada sensor. Esta interfaz es fundamental porque permite mostrar los datos en tiempo real, la interfaz permite a los usuarios comprobar de manera inmediata y continua el estado de cada variable climática monitoreada, lo que asegura una respuesta rápida ante cualquier cambio significativo en las condiciones ambientales. En la Fig. 13 se presenta una interfaz adicional desarrollada en Power BI, la cual permite visualizar los datos

históricos de cada sensor climático.

La visualización de los datos históricos es fundamental para identificar tendencias y patrones a lo largo del tiempo. La interfaz está diseñada para ser interactiva, al ofrecer diversas opciones de filtrado y segmentación de los datos.

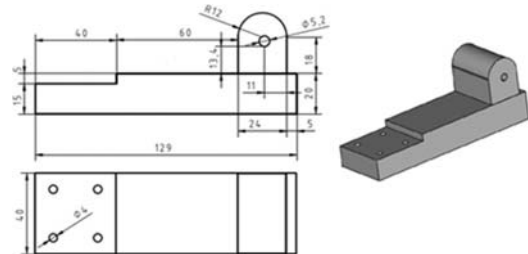


Fig. 7. Base para el soporte de celdas solares.

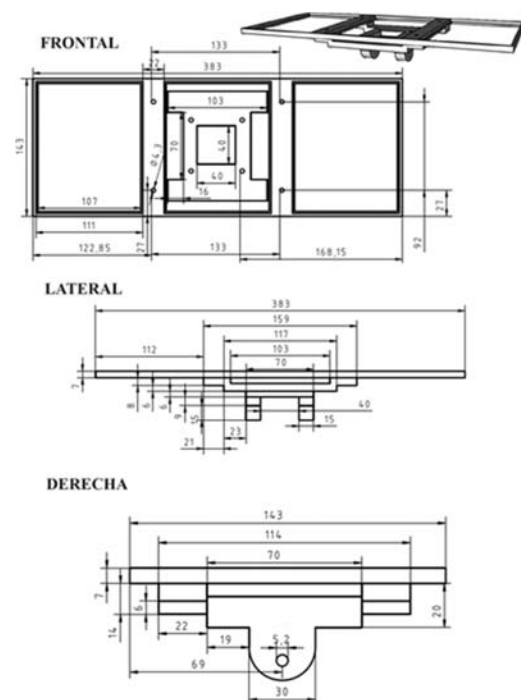


Fig. 8. Soporte de celdas solares.

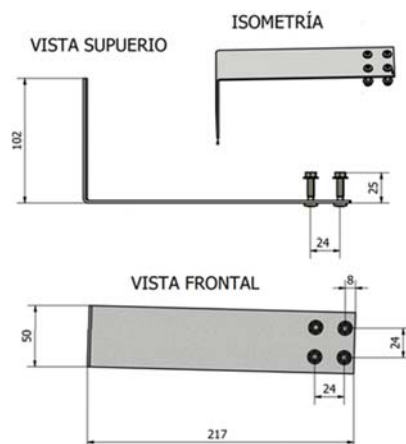


Fig. 9. Soportes la implementación.



Fig. 10. Prototipo del módulo Transmisor.



Fig. 11. Prototipo del módulo receptor.

Se pueden seleccionar rangos de fechas específicos, comparar diferentes periodos y observar la evolución de cada variable de manera individual.



Fig. 12. Monitoreo en tiempo real.

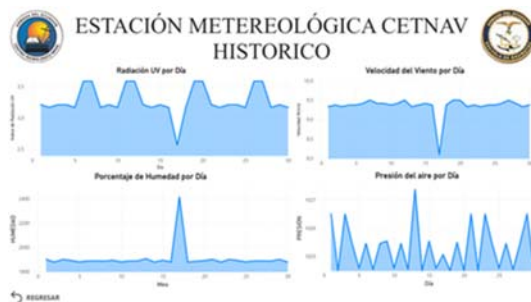


Fig. 13. Monitoreo histórico de variables.

IV. RESULTADOS

Los datos recolectados por el prototipo de estación meteorológica en comparación a los datos que se visualizan con respecto a la estación meteorológica del INAMHI, se detallan en la tabla I de acuerdo a cada variable de estudio.

TABLA I
ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE ESTUDIO: COMPARACIÓN ENTRE EL PROTOTIPO Y DATOS DE REFERENCIA

Variable	Error (1)	Desv. (2)	Margen (3)	MAPE (4)
Temperatura	+0.31°C	0.28°C	0.02°C	1.15%
Humedad	-2.8%	4.2%	±0.3 %.	6.7%
Presión A.	+0.35 hPa	0.42 hPa	±0.03 hPa	0.034%
Radiación	+2.8W/m ²	1.6W/m ²	±0.11W/m ²	7.9%
Velocidad	+0.45 m/s	0.89 m/s	±0.06 m/s	14.3%

Al comparar los datos recolectados por la presente propuesta en comparación a la información obtenida por la estación meteorológica del INAMHI. La temperatura presentó un error medio de +0.31°C, desviación estándar de 0.28°C y MAPE del 1.15 %, lo que indica alta precisión. La humedad mostró un sesgo de -2.8%, desviación estándar de 4.2% y MAPE del 6.7 %, con mayor error en valores bajos. La presión atmosférica tuvo un error medio de +0.35 hPa, desviación estándar de 0.42 hPa y MAPE del 0.034 %, lo que demuestra excelente exactitud. La radiación UV-A registró un sesgo de +2.8 W/m², desviación estándar de 1.6 W/m² y MAPE del 7.9 %, con mayor error en horas pico. La velocidad del viento presentó un error de +0.45 m/s, desviación estándar de 0.89 m/s y MAPE del 14.3 %, que es menos preciso en condiciones de calma. Los sensores mostraron mayor precisión en presión y temperatura, mientras que humedad y viento requieren ajustes, especialmente en rangos extremos. Los resultados validan su uso en aplicaciones ambientales.

Con relación a la dirección de viento, el sensor seleccionado para el desarrollo de la propuesta no cumple con los datos descritos por el fabricante, esto se debe a que su diseño y electrónica interna no genera valores en todas las direcciones. Sin embargo, el sensor a pesar de que permite obtener valores en los puntos cardinales más relevantes como el norte, sur, este, oeste, noreste, sureste, suroeste y noroeste; la estructura interna que permite obtener las posiciones de los puntos cardinales no se encuentra calibrados correctamente.

Por otro lado, el sensor que permite obtener los valores de la calidad del aire opera correctamente, sin embargo, dentro de la presente investigación los resultados obtenidos se

mantendrían como un antecedente por lo que la estación meteorológica del INAMHI como parte de este estudio no recolecta este tipo de datos.

V. DISCUSIÓN

En este apartado se discutirán los resultados obtenidos, al analizar cómo las variables climáticas medidas, como la radiación solar, temperatura y velocidad del viento.

Al igual que los autores Monga et al. La implementación de una estación meteorológica autosustentable es posible mediante el uso de microcontroladores y un sistema fotovoltaico para la energización de los instrumentos de medición. Ambas estaciones están en la capacidad de obtener datos de las variables: velocidad y dirección del viento, temperatura, y radiación solar, la estación meteorológica CETNAV a diferencia de la estación de Monga puede determinar la calidad del aire, humedad relativa del ambiente y presión atmosférica.

El sistema implementado en CETNAV utiliza como controlador principal la placa ESP32, seleccionada por su robustez y mayor resolución en la adquisición de datos. Comparativamente, el estudio Monga reportó un margen de error del 65.66% en sus validaciones, cifra significativamente superior a la obtenida en comparación a la presente propuesta. No obstante, se reconoce el valioso aporte de Monga su metodología para el almacenamiento y procesamiento de datos meteorológicos. Como factor contextual relevante, cabe destacar que las estaciones meteorológicas comparadas presentan ubicaciones geográficas distintas - una diferencia operacional que podría explicar parcialmente los sesgos observados en el estudio de Monga.

Así mismo, en comparación con el trabajo de Gallardo et al., Ambiente Weather 209, la estación meteorológica CETNAV permite caracterizar de los datos climáticos para la generación de energías limpias, sin embargo, tienen una gran diferencia en cuanto a la transmisión de datos, mientras que Ambiente Weather transmite los datos directamente a la nube, al contar de una conexión a internet lo que permite un acceso remoto, CETNAV utiliza una conexión PTP mediante un enlace LoRa de radiofrecuencia, lo que permite alcanzar distancias de hasta 5 km con LOS para un acceso local con mayor seguridad de los datos. Es importante mencionar que los resultados obtenidos por la estación Ambiente Weather pertenecen a un análisis de datos de 4 meses, mientras que la estación CETNAV ha recopilado datos por un periodo de 30 días.

Las estaciones meteorológicas de la Cuenca del río Paute no cuentan con un sistema automatizado para la toma de medidas de las variables ni con un sistema de transmisión de datos por lo que el trabajo realizado por Astudillo et al. Propone el uso de un sistema de transmisión bajo el protocolo LoRa, mismo que utiliza la estación CETNAV, para lograr alcances de hasta 5.5 km de distancia mediante la implementación de una red con topología estrella que permita la comunicación entre las diferentes estaciones que realizan el monitoreo en esta cuenca, los autores utilizan un Raspberry PI como procesador principal, y realizan la optimización energética mediante el

encendido de los sensores únicamente cuando van a realizar la toma de mediciones.

De igual manera el autor Medina propone la implementación de una estación meteorológica que transmita los datos a una estación local mediante comunicación RS232 mediante programación en Python y posteriormente subir los datos a la nube y poder visualizarlos en un HTML de manera local y remota, es importante señalar que la medición de esta estación al igual que CETNAV valida sus datos con una estación del INAMHI de la localidad, al presentar tasas de errores de 1.5 % y 3 %.

VI. CONCLUSIONES

La arquitectura propuesta demuestra capacidad efectiva para la transmisión de datos ambientales en un rango de 1 km, al optimizar las tecnologías implementadas. El sistema opera mediante: (1) una capa de percepción que adquiere y condiciona las señales de los sensores, (2) un módulo transmisor que gestiona la comunicación inalámbrica de largo alcance, y (3) una unidad receptora que procesa y estructura los datos para su visualización. Como interfaz final, se desarrolló un dashboard en Power BI que permite el monitoreo interactivo de las variables ambientales en tiempo real.

Los sensores implementados en el prototipo demostraron alta precisión en la medición de presión atmosférica y temperatura, con errores relativos menores. Sin embargo, se observó una disminución en la exactitud para las variables de humedad relativa y velocidad del viento, particularmente en rangos extremos de medición. A pesar de estas variaciones, el análisis estadístico aplicado confirma que los datos son consistentes y comparables con los registros de la estación meteorológica de referencia del INAMHI.

El uso del protocolo LoRa para la transmisión de los datos meteorológicos, ha demostrado ser efectivo para la distancia entre el módulo transmisor y receptor en el área de estudio elegido. Durante la recolección de información meteorológica, se evidenció el funcionamiento continuo de la presente investigación y esto se debió a la aplicación de la arquitectura propuesta, el cual lleva una secuencia de capas donde cada una debe realizar tareas específicas que van desde la recolección hasta la visualización de datos en la plataforma Power BI en tiempo real.

El sistema de alimentación autónomo del prototipo combina un arreglo de paneles solares con un banco de baterías de ciclo profundo, lo que garantiza operación continua las 24 horas. Durante las horas de luz solar, los módulos fotovoltaicos suministran energía tanto para el funcionamiento inmediato del sistema como para cargar las baterías. En periodos nocturnos o de baja irradiación, el banco de baterías mantiene la operación sin interrupciones, que elimina completamente la dependencia de la red eléctrica convencional.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Superior Tecnológico “Centro Tecnológico Naval”, por brindar el acceso de sus instalaciones durante el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS|

- [1] INAMHI, “Informe de gestión INAMHI,” Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Tech. Rep., 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/3M9j9gF>
- [2] INAMHI. (2024) Visor meteorológico. [Online]. Available: <https://inamhi.gob.ec/info/visor>
- [3] Granda, N., Monga, J., Barreno, C., & Quilumba, F., “Desarrollo de una estación meteorológica y una herramienta computacional para la evaluación de los recursos eólico y solar,” *Revista Técnica .Energía*, vol. 2, no. 18, pp. 113 – 123, 2022.
- [4] Qasim, H., Abbas, W., Tawfeeq, N., Jasim, E., Hamza, A., Hussein, W., “Mejora del monitoreo meteorológico: un estudio exhaustivo que utiliza iot, esp32, integración de sensores y la plataforma blynk,” Conferencia Internacional IEEE sobre Instrumentación, Medición y Aplicaciones Inteligentes (ICSIMA), pp. 156–161, 2024.
- [5] Vazquez-Rodas A., Astudillo-Salinas F., Minchala L., “Aplicación de tecnologías inalámbricas al monitoreo climatológico en la cuenca del Río Paute,” *RITI*, vol. 9, no. 17, pp. 89 – 96, 2021.
- [6] Cevallos-Medina A. et al., “Diagnóstico para el diseño de una estación meteorológica en monitoreo de plantaciones de cacao,” *Revista Arbitrada Interdisciplinaria KOINONIA*, vol. 7, no. 1, pp. 89 – 96, 2022.
- [7] E. Systems, “Esp32 wroom 32,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/3yoW99K>
- [8] Kumru, C., Vural, M., “Design and application of iot based weather station for high voltage laboratories,” *Muhendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, vol. 11, no. 3, pp. 1190 – 1201, 2023.
- [9] Boch, “Bme680,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QLW1r0>
- [10] Salum, G., Obando, W., “Sensing of psoriasis treatment with “sunmed”.” Master’s thesis, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay, 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.yachaytech.edu.ec/handle/123456789/198>
- [11] Semtech, “Lora 1276/77/78/79,” 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/4bAqJLC>
- [12] Vishay, “16 x 4 character LCD,” 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/4bkhEH9>
- [13] Quiñones, M., González, V., Torres, R., Jumbo, M., “Sistema de monitoreo de variables medioambientales usando una red de sensores inalámbricos y plataformas de internet de las cosas,” *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 1, pp. 329 – 343, 2017
- [14] C. Medina et al., “Propuesta de arquitectura IoT orientada a la creación de prototipos para su aplicación en plataformas educativas y de investigación,” *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, no. 39, pp. 118 – 125, 2022.
- [15] D. Buitrón, “Arquitecturas y modelos de referencia para sistemas iot: estado del arte de las arquitecturas para sistemas IoT” Master’s thesis, Escuela Politecnica Nacional, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22368>
- [16] Alomoto, M., “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo domiciliario para la gestión integral de la salud cardiovascular”, Master’s thesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12242>
- [17] A. Vázquez, “La radio definida por software de bajo coste, como herramienta para el desarrollo de prácticas y proyectos en el grado de ingeniería radioelectrónica,” Master’s thesis, Universidad de Cádiz, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10498/29187>
- [18] A. Forero and M. Ramírez, “Revisión sistemática del uso de los diferentes protocolos de interconexión para internet de las cosas (IoT),” Master’s thesis, Universidad Católica de Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10983/24588>

Diseño de un algoritmo de control predictivo ajustado por algoritmo evolutivo aplicado a un proceso de nivel de un tanque cónico no lineal *Design of a predictive control tuned by an evolutionary algorithm applied to a nonlinear conical tank level*

Karina Belén Montaluisa Herrera y Luis Tello-Oquendo

Abstract—The control of nonlinear dynamic systems, such as the liquid level in a conical tank, poses a critical challenge in various military applications, particularly for handling heavy liquids and slurries. This paper presents the design of a Model Predictive Control (MPC) algorithm that uses Particle Swarm Optimization (PSO) and Least Squares (LS) to control the liquid level in a conical tank. A prototype was built in a laboratory at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. The research highlights the limitations of traditional control methods, which fail to achieve a fast transient response and often cause overshoots. In the face of this problem, the incorporation of tuned evolutionary algorithms for MPC control is proposed to improve control performance for nonlinear systems.

Index Terms—modeling, least squares, particle swarm optimizer, modeling.

Resumen—El control de sistemas dinámicos no lineales, como el nivel de líquido en un tanque cónico, representa un desafío crítico en diversas aplicaciones militares, en particular para el manejo de líquidos y lodos pesados. Este artículo presenta el diseño de un algoritmo de Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) que utiliza Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) y Mínimos Cuadrados (LS) para controlar el nivel de un líquido en un tanque cónico. Se construyó un prototipo en un laboratorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). La investigación destaca las limitaciones de los métodos de control tradicionales, que no logran una respuesta transitoria rápida y a menudo causan sobre impulsos, ante a este problema se plantea la incorporación de algoritmos evolutivos ajustados para un control MPC con el objetivo de mejorar el desempeño del control para sistemas no lineales.

Palabras Claves—modelado, mínimos cuadrados, optimizador de enjambre de partículas.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria, un sistema de tanque cónico tiene alta aplicabilidad porque su forma permite la eliminación de impurezas [1]. Actualmente existen diseños avanzados de tanques de combustible blindados de forma cónica para optimizar el espacio interior y facilitar la distribución del

combustible, lo que permite mejorar la estabilidad del vehículo, al dar mejor equilibrio al centro de gravedad. Otra aplicación es en submarinos, que utilizan tanques de lastre para controlar la flotabilidad, su forma cónica permite facilitar la distribución del agua de lastre.

El tanque cónico tiene una dinámica no lineal debido a su forma cónica que origina variabilidad convirtiéndose en un sistema no lineal complejo en su modelado.

Los controladores tradicionales se utilizan comúnmente para resolver diversos sistemas lineales y no lineales. Sin embargo, al aplicarlos a un tanque cónico, su rendimiento es limitado, lo que resulta en un estado transitorio deficiente. La literatura especializada ha reportado el control de tanques cónicos mediante técnicas de control proporcional, integral y derivativo (PID) [2] en aplicaciones para plantas de tratamiento de aguas residuales y su uso es amplio en las industrias de procesos [3]. Aunque el PID convencional es efectivo para procesos lineales, no representa un control efectivo para sistemas no lineales. Por esta razón, se recomienda utilizar controles avanzados y la aplicación de algoritmos genéticos si se requiere mayor precisión, por ejemplo, el uso de optimización por enjambre de partículas (PSO) [4] para lograr un ajuste más preciso y eficiente de procesos no lineales [5]. Los algoritmos genéticos pueden ser usados para ajustar el control PID para obtener parámetros optimizados que mejoran el desempeño del controlador [6] y [7].

Los controladores PID ajustados mediante algoritmos de optimización como el algoritmo genético (GA) y PSO pueden garantizar un buen desempeño en sistemas no lineales [8]. Otra opción de ajuste para los controles tradicionales es el uso del algoritmo Nelder-Mead (NM), que mejora el seguimiento del punto de ajuste y proporciona una mejor respuesta del controlador [9]. El uso de algoritmos genéticos para controlar un tanque cónico mejora significativamente el tiempo de subida (t_r), el tiempo de estabilización (t_s), el sobre impulso (OS) y el error integral absoluto [10].

Otra técnica de control alternativa para sistemas no lineales, como el tanque cónico, es el uso de controles avanzados como los predictivos, basados en modelo MPC [11] y [12]. El controlador difuso (FLC) es otro tipo de control inteligente

Karina Belén Montaluisa Herrera. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba 060108, Ecuador, (e-mail: karina.montaluisa@unach.edu.ec).

Luis Tello-Oquendo. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba 060108, Ecuador, (e-mail: luis.tello@unach.edu.ec).

implementados en sistemas no lineales [13] y [14]. Otra forma de lograrlo es mediante el uso de lógica difusa de intervalo tipo 2 con autoajuste genético de sus funciones de pertenencia [15] o controladores de lógica difusa con algoritmo adaptativo de Kalman [16] para mejorar parámetros como el tiempo de respuesta y la precisión. Otra alternativa es el uso de controles PI difusos, que obtiene resultados eficientes en términos de rendimiento, tiempo de estabilización rápido y robustez [17].

Los controles avanzados en sistemas industriales ajustados con algoritmos de enjambre de partículas (MPC-PSO) o MPC ajustados con GA [18] se han aplicado en procesos con características no lineales. Por ejemplo, Sistemas Eléctricos de Potencia (EPS) para mejorar las oscilaciones en sistemas de potencia con PSO [19], el uso de controladores predictivos de modelos explícitos (EMPC) para suprimir las vibraciones y el torque del eje al optimizar los coeficientes de ponderación mediante un algoritmo de optimización basado PSO [20]. Sin embargo, la literatura especializada no ha reportado la aplicación de algoritmos PSO como optimizador de control basado en modelo no lineal MPC a un proceso de tanque cónico.

Los controles inteligentes, basado en redes neuronales optimizado por algoritmo PSO, son una alternativa común, por ejemplo, investigaciones que usan redes neuronales de retro-propagación y PSO para crear un modelo que permita determinar los riesgos de seguridad en las minas de carbón subterráneas [21], o en experimentos simulados para mejorar las redes neuronales mediante el uso de PSO para encontrar los mejores pesos y umbrales para la red [22].

Este estudio compara el rendimiento del desempeño de dos controladores avanzados MPC-PSO y MPC-LS con un controlador integral (PI) tradicional, y se analizan el tiempo de subida, el tiempo de estabilización, el sobre impulso y el error de estado estacionario al someterse a diferentes puntos de ajuste para garantizar un rendimiento razonable y una respuesta rápida en un proceso de nivel de tanque cónico a escala de laboratorio, lo que permite prolongar la vida útil de los componentes del proceso, especialmente la bomba periférica, en comparación con el uso de controles tradicionales como el control PI, que tiende a generar más oscilaciones lo que acorta su vida útil del equipo.

La investigación aporta: (i) desarrollar e implementar un modelo no lineal NARX aproximado del tanque cónico, (ii) diseñar y validar un controlador PI tradicional, y (iii) diseñar y validar dos propuestas de control basado en modelo MPC ajustado por optimizador PSO y MPC ajustado por optimizador LS.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2, se presentan las características técnicas de la planta a escala de laboratorio en estudio, junto con su modelo matemático. La Sección 3 introduce el diseño de algoritmos de control para el tanque cónico. La Sección 4 muestra los resultados de una prueba experimental que comparó tres métodos de control diferentes en un tanque cónico. Finalmente, la Sección 5 presenta la discusión de los hallazgos.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TANQUE CÓNICO

En esta sección se presentan las características técnicas de la planta a escala de laboratorio bajo estudio, junto con su modelo matemático.

El tanque cónico es una planta a escala de laboratorio de altura 80 cm que consta de una bomba trifásica, un sensor de radar SITRANS LR140 de Siemens salida 4-20 mA, cinco válvulas manuales de PVC, un tanque de almacenamiento con una altura: 34,5 cm y ancho de 61 cm, una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y un variador de frecuencia Siemens 220V/240V.

La planta a escala de laboratorio está ubicada en los laboratorios de Control Inteligente e Industria 4.0 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, las técnicas de control se experimentarán en la planta en la Fig. 1.

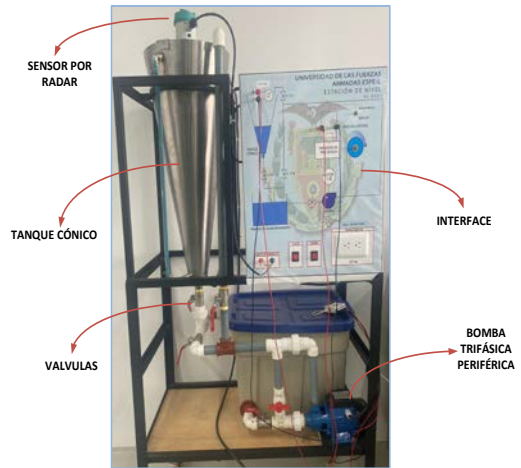


Fig. 1. Planta a escala de laboratorio del tanque cónico.

III. DISEÑO DE ALGORITMOS DE CONTROL PARA EL TANQUE CÓNICO

En el diseño de algoritmos de control se aplican tres técnicas: i) una técnica de control tradicional PI; ii) una técnica de control avanzada MPC optimizada por PSO con un modelo no lineal; y iii) una técnica de control avanzada MPC optimizada por LS con un modelo no lineal.

A. Diseño de un control PI para un tanque cónico

La Fig. 2 muestra la arquitectura en control de lazo cerrado del control PI, con acciones de control de 0 a 60 Hz que se envían del variador de frecuencia, el cual envía como acción de control al proceso una tensión de salida de 0 a 5 V.

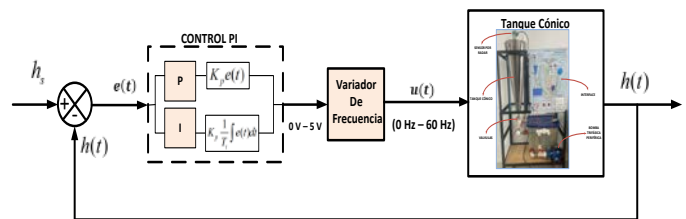


Fig. 2. Arquitectura del control PI.

El diseño matemático del control PI se describe en (1) a continuación:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (1)$$

donde $u(t)$ es la acción de control (0-60 Hz) transformada por el variador de frecuencia de 0-5V cuya señal que entra al tanque cónico, $e(t)$ es el error, K_p es la ganancia proporcional, T_i es la ganancia integral estas dos ganancias están representadas en segundos.

Para obtener el modelo de entrada y salida del tanque cónico, se deben considerar características físicas como el radio inferior y superior, la altura, y se recopilan datos sobre la variación de la salida en función del tiempo en presencia de varias entradas escalonadas. Los datos se evalúan y procesan mediante la aplicación *System Identification*, una herramienta de software MATLAB, para obtener el modelo de entrada y salida estimado, como se muestra en (2):

$$G(s) = \frac{\sigma e^{-\theta s}}{1 + \tau s} \quad (2)$$

La señal de salida (nivel 0-80 cm) de la planta se muestrea durante un periodo de 150 minutos y los datos se registran a intervalos de 300 segundos, como se ilustra en la Fig. 3.

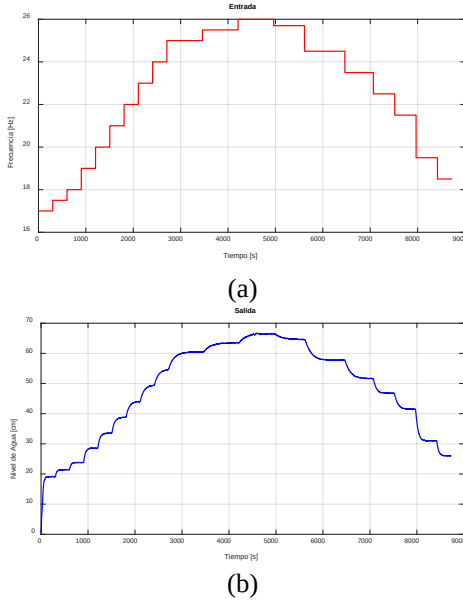


Fig. 3. (a) Adquisición de datos de la entrada del sistema con 20 entradas entre 17 Hz y 26 Hz, (b) Salida del sistema entre 0 cm a 80 cm.

A través la interfaz de *System Identification*, se realizó la estimación del modelo de entrada y salida, donde se obtienen los datos que se presentan en la Tabla I.

TABLA I PRECISIÓN DE LAS FUNCIONES GENERADAS		
Casos	Modelo	Exactitud
1	1 Polo	68.95%
2	2 Polos	67.37%

Al comparar los resultados de la Tabla I, y al optar por la

función con mayor porcentaje de precisión, se destaca que el modelo decrece al aumentar los polos, por lo que se concluye que el sistema no lineal del tanque cónico se estima eficientemente con la ecuación de primer orden con retardo en el tiempo, mismo que se representa por la siguiente función de transferencia $G(s) = (2.4782e^{-3s}) / (1 + 5.1651s)$.

A continuación, se utiliza la técnica de ajuste *Lambda agresivo* [23] para calcular los parámetros de la señal. Se aplican las fórmulas propuestas por este método de ajuste, y por medio del ajuste fino permite garantizar el mejor desempeño al obtener los mejores valores para las ganancias del controlador, como se muestra en la Tabla II.

TABLA II
GANANCIAS DEL CONTROLADOR PI CALCULADAS POR LAMBDA AGRESIVA

Parámetro	Ganancia
K_p	25.600
T_i	5.1651 s

B. Diseño de un control MPC con un modelo no lineal para un tanque cónico.

La Fig. 4, describe la arquitectura del control MPC. Inicializa con un nivel de referencia h_s , mientras que la entrada del controlador MPC es el error de seguimiento previsto $\hat{e}$. Además, el control utiliza un modelo de predicción que describa la dinámica del tanque cónico y permite evolucionar la variable del proceso h , mientras que el optimizador minimiza el error de estado estacionario. Esto permite introducir restricciones propias de la planta, lo que permite realizar un seguimiento constante del valor óptimo que toma las acciones de control en un rango de 0-5 V.

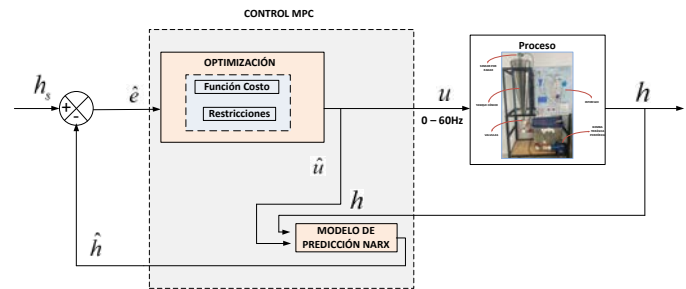


Fig. 4. Arquitectura del control MPC.

El control MPC se basa en la optimización de una función de costo, mostrada en (3), el objetivo principal es minimizar tanto el error de nivel estacionario como los cambios repentinos en las acciones de control. La función de costo tiene los siguientes componentes: h_r es el nivel deseado, H_p es el horizonte de predicción (tiempo total que predice), H_c es el horizonte de control (pasos que registra cuántas acciones de control se optimizan), $\hat{h}$ es el nivel medido por el modelo, Δu es la variación de las acciones de control, y λ_1 , λ_2 son los coeficientes denominados pesos que dictaminan que prioridad se dará al minimizar el error y la variación de las acciones de control respectivamente.

$$J(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \lambda_1 \left[h_r(k+i|k) - \hat{h}(k+i|k) \right]^2 \dots \quad (3)$$

$$\dots + \sum_{i=1}^{H_c} \lambda_2 [\Delta u(k+i-1)]^2$$

El problema de optimización está sujeto a restricciones mínimas y máximas que dependen de la planta física, como la altura del tanque cónico, mostrada en (4).

$$0 \text{ cm} \leq h(k) \leq 80 \text{ cm} \quad (4)$$

Otro rango para considerar como restricción son los valores de la acción de control, como en (5):

$$0 \text{ Hz} \leq u(k) \leq 60 \text{ Hz} \quad (5)$$

La Tabla III muestra los parámetros ajustados del control MPC con los cuales presentan mejor desempeño de control en la planta de tanque cónico.

Para el diseño del control MPC basado en modelos, se necesita un modelo predictivo del tanque cónico, representado en este estudio por un modelo Red neuronal Autoregresiva no lineal con entradas exógenas (NARX) no lineal, obtenido a través del proceso *System Identification* en donde se recolectan datos de entrada y salida del proceso en lazo abierto. Se aplica filtrado de datos y se ingresa al proceso de identificación con el modelo no lineal, al realizar una separación de datos con un 70% de entrenamiento y un 30% de validación como se muestra en la Fig. 5.

TABLA III
PARÁMETROS Y AJUSTES PARA EL CONTROL MPC

Parámetros	Variable	Ajustes
Horizonte de Predicción	H_p	10
Horizonte de Control	H_c	2
Peso para el objetivo de minimizar el error	λ_1	1
Peso para el objetivo de minimizar Δu	λ_2	1

El modelo NARX se basa en un modelo autorregresivo no lineal que utiliza datos históricos, como en (6).

$$\hat{y}(k) = f[y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)] \quad (6)$$

Donde $\hat{y}(k)$ corresponde la salida de nivel al resultado futuro del modelo que depende de una función con salidas pasadas y entradas futuras $y(k-n)$, $u(k-n)$, donde n describe los pasos pasados en cada instante de tiempo.

Los parámetros no lineales de la planta, como la altura anterior h_{ant} y acciones de control previas u_{ant} para obtener una altura prevista h_{pred} , están relacionados a través (7).

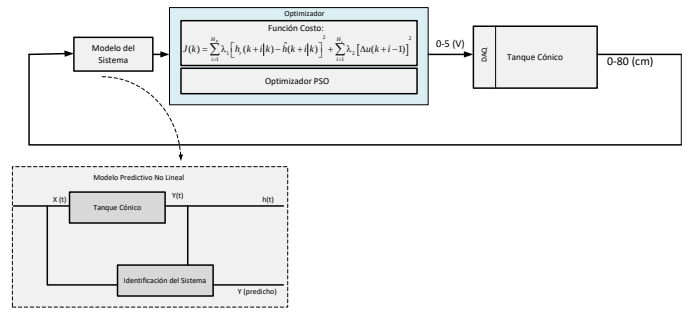


Fig. 5. Arquitectura de recuperación de modelos no lineales.

$$h_{pred} = \mathbf{A}h_{ant} + \mathbf{B}(u_{ant})^2 + \mathbf{C}\sqrt{h_{ant}} \quad (7)$$

La ecuación (7) expresa en forma general con datos históricos, donde los valores $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ y $\mathbf{C}$ se obtendrán mediante regresión lineal con mínimos cuadrados.

La técnica de regresión lineal por mínimos cuadrados se utiliza especialmente para formas no lineales, donde $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ y $\mathbf{C}$ se obtienen al dividir las salidas predichas por las entradas pasadas. La siguiente expresión (8) representa el modelo NARX de la planta de tanque cónico:

$$h_{pred} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} h_{ant}(k-1) \\ h_{ant}(k-2) \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_{ant}(k-1) \\ u_{ant}(k-2) \end{bmatrix}^2 + \mathbf{C} \cdot \sqrt{h_{ant}(k-1)} \quad (8)$$

donde, $\mathbf{A} = [1.3901 \ -0.3931]$, $\mathbf{B} = [0.0070 \ 0.0007]$ y $\mathbf{C} = -0.0579$

Se plantea dos soluciones para el optimizador del control MPC uno heurístico (PSO) y otro determinista (LS) que permiten obtener las acciones de control más eficientes para el control MPC.

C. Solución de MPC optimizado con PSO para un tanque cónico

La arquitectura del control MPC optimizado por PSO, que reemplaza al bloque optimizador genérico, se muestra en la Fig. 6. El optimizador PSO inicializa con un enjambre de partículas, donde cada partícula representa una posible solución (una secuencia de movimientos en la variable de control $\hat{u}$). Luego, cada partícula se evalúa mediante una función de aptitud que mide el error de seguimiento esperado al intercambiar información sobre sus mejores soluciones encontradas (p^*) y la solución global del enjambre (g^*) y, finalmente, las partículas encuentran la secuencia óptima $\hat{u}$.

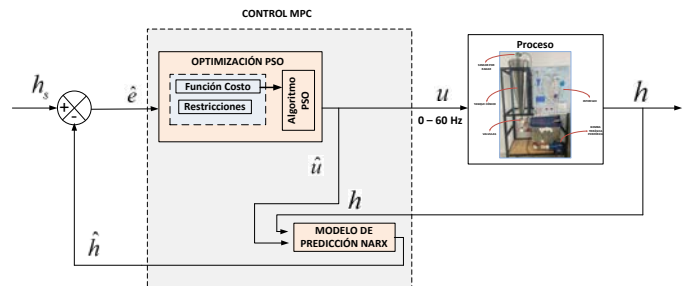


Fig. 6. Arquitectura del diagrama de control MPC-PSO.

Matemáticamente, el algoritmo PSO se describe mediante la

actualización del vector de velocidad, como en (9):

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 rand_1(p_i^*(t) - x_i(t)) \dots + c_2 rand_2(g^*(t) - x_i(t)) \quad (9)$$

y el vector de posición como en (10):

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (10)$$

donde $v_i(t)$ es la velocidad de la partícula i , w es el factor de inercia o peso, $\{c_1, c_2\}$ son los coeficientes de aceleración que garantizan la convergencia del algoritmo, $\{rand_1, rand_2\}$ son números aleatorios en el rango $[0, 1]$, $x_i(t)$ es la posición actual de la partícula i hasta ahora y $\{p_i^*, g^*\}$ son la mejor solución alcanzada por la partícula i y la solución global alcanzada por el enjambre.

El factor de inercia, o peso w es una nueva velocidad inicialmente alta que disminuye gradualmente de forma lineal en cada iteración (*iter*) para mejorar la búsqueda local y se actualiza iterativamente como en (11):

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \cdot iter \quad (11)$$

Los coeficientes de aceleración $\{c_1, c_2\}$ se actualizan en cada iteración de acuerdo a (12):

$$c_{\{1,2\}} = c_{\max} + \left(\frac{c_{\min} - c_{\max}}{iter_{\max}} \cdot iter \right) \quad (12)$$

Los valores de configuración del algoritmo PSO son: el número máximo de iteraciones, el tamaño del enjambre (número de partículas), los límites del coeficiente de aceleración y los límites del factor de inercia; cada uno de estos parámetros se estableció de acuerdo con los rangos sugeridos en [24] y depende de la perspicacia del programador al obtener la Tabla IV.

TABLA IV
PARÁMETROS DE AJUSTE DEL ALGORITMO PSO

Parámetros Ajustados	Valor
Número máximo de partículas	50
Tamaño de enjambre	20
Parámetro por Optimizar	Función Costo
Coefficientes de aceleración $\{c_1, c_2\}$	0.1 a 4
Factor Inercia w	0.5 a 0.9

D. Solución de MPC optimizado con LS para un tanque cónico

La arquitectura del control MPC optimizado por mínimos cuadrados (MPC-LS) se muestra en la Fig. 7. El optimizador por mínimos cuadrados (LS) donde (3) se define como entrada, al tomar como variable dependiente la acción de control, lo que delimita además el rango de operación de la acción de control de 0 a 60 Hz.

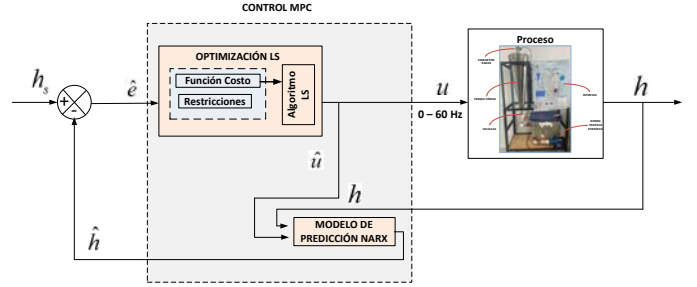


Fig. 7. Arquitectura del diagrama de control MPC-LS.

Por consiguiente, se recopilan 50 puntos de datos obtenidos de la función de costo al aplicar varias frecuencias de tal manera que se represente en un diagrama de dispersión. Luego, por medio de la función *polyfit* de MATLAB, se calcula los coeficientes de un polinomio de grado 2 que mejor se ajusta a los datos frecuencia vs función costo, lo que minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de la función costo y los valores del polinomio evaluado en la frecuencia. Posteriormente, se calcula el punto mínimo de la función polinómica de grado dos obtenida de la función *polyfit*, que constituye el valor óptimo $\hat{u}$.

IV. RESULTADOS

Se estudiaron tres métodos de control en un tanque cónico: uno fue el control PI clásico y los otros dos fueron controles avanzados (control no lineal MPC optimizado con PSO y control no lineal MPC optimizado con LS).

A. Resultados experimentales

Para las pruebas experimentales se evaluaron cinco set points (SPs) en intervalos de 300 s. Se parte con puntos de referencia desde el más alto y paulatinamente se intercala los valores de manera que se pueda visualizar el desempeño de los controladores en todos los puntos de operación.

La Fig. 8a presenta la respuesta de desempeño del controlador PI en azul, el control MPC con optimización basada en PSO (MPC-PSO) se indica en rojo y el control MPC con optimización por mínimos cuadrados (MPC-LS) se muestra en verde. Se observa que la respuesta del control PI presenta sobre impulso y un tiempo de estabilización más largo, en comparación con las respuestas de los controles MPC-PSO y MPC-LS, que muestran un tiempo de estabilización más rápido y sin sobre impulso. En la Fig. 8b, en azul para el controlador PI, en rojo para el control MPC-PSO y en verde para el control MPC-LS, se puede observar que las acciones de control son estables es decir se mantiene constante en los casos de control MPC-PSO y MPC-LS. La Fig. 8c ilustra el error relativo de cada controlador con respecto al punto de consigna, donde se evidencia que la señal roja, azul y verde responden con un impulso al momento del cambio del punto de consigna. Sin embargo, el controlador permite disminuir el error relativo a cero por lo que se mantiene en estado estable al comienzo en estado estacionario.

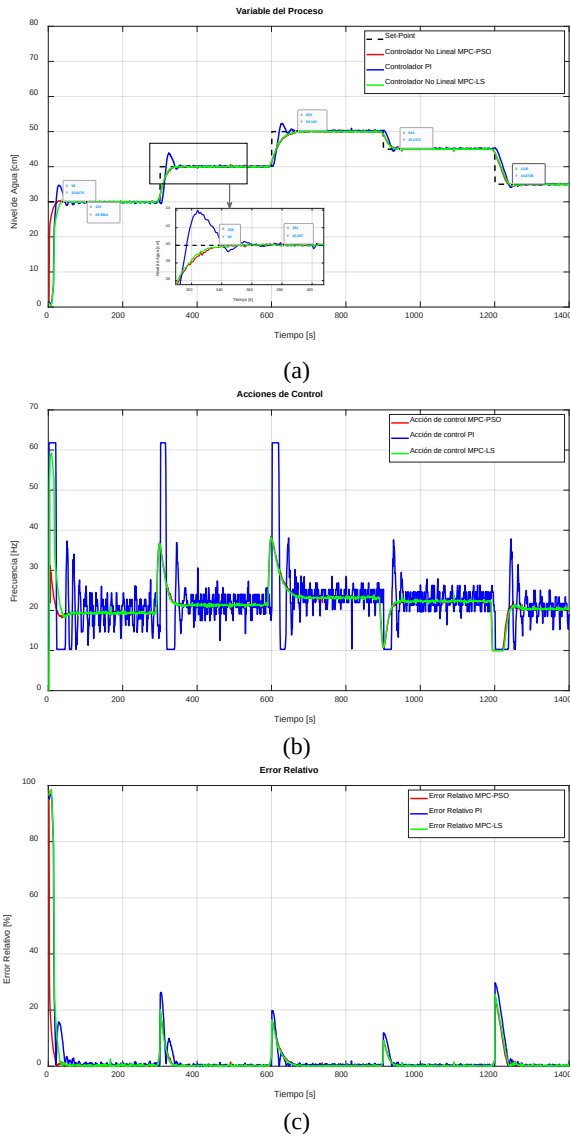


Fig. 8. Comparación de algoritmos experimentales de control de nivel de tanques cónicos: (a) Cambios de nivel vs. punto de ajuste, (b) Acciones de control, (c) error relativo.

La Tabla V resume el desempeño de los tres controladores implementados. Se obtuvo los siguientes resultados: el control PI muestra un sobre impulso (OS) del 15.6 % y un tiempo de estabilización (t_s) de 60.8 s en comparación con el control MPC-LS que tiene un tiempo de estabilización de 42.6 s sin sobre impulso y el control MPC-PSO de igual forma no tienen sobre impulso y su tiempo de estabilización es de 46 s.

TABLA V
ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

Método	t_r [s]	OS [%]	t_s [s]
Control no lineal MPC-PSO	31.5	0%	46
Control PID	27.66	15.6%	60.8
Control no lineal MPC-LS	30.66	0%	42.6

B. Resultados experimentales con perturbaciones

Para el análisis de los resultados experimentales frente a

perturbaciones, se aplicó la apertura en un porcentaje del 40% al 60% de la válvula manual ubicada a la salida del tanque cónico a los 590 s. La Fig. 9a muestra en rojo el comportamiento de la señal en presencia de perturbaciones con el control MPC-PSO, en azul con el control PI y en verde con el control MPC-LS. Cabe destacar que a los 590 s, cuando se produce la perturbación, el controlador PI reacciona rápidamente en comparación con los controles MPC-PSO y MPC-LS. Sin embargo, presenta un sobre impulso superior al 2%. Mientras que a los 900s se realiza un cambio de set point que muestra la presencia del 2% de sobre impulso al usar el control PI. Por lo contrario al usar los controles MPC-PSO y MPC-LS no presentan sobre impulso. La Fig. 9b ilustra que la acción de los controles MPC-PSO y MPC-LS es más estable en estado estacionario.

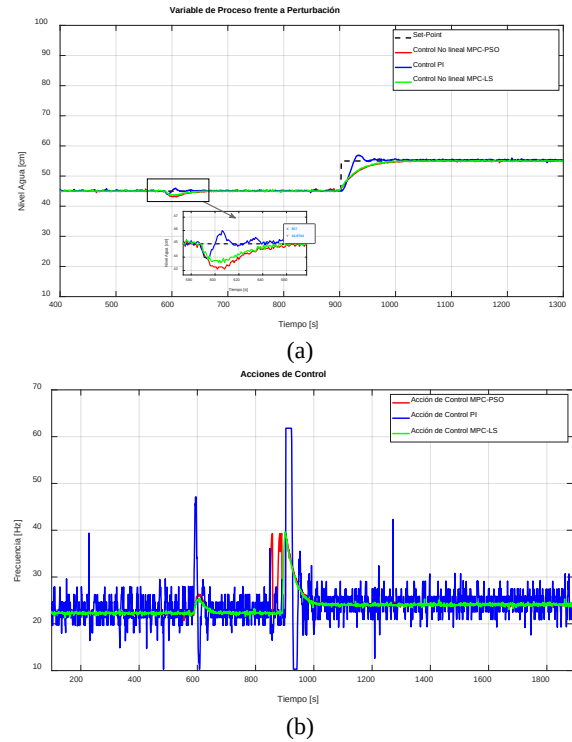


Fig. 9. Comparación del desempeño de los controladores PI, MPC-PSO y MPC-LS ante perturbación manual: (a) Nivel frente a perturbaciones, (b) Acciones de control.

En la Tabla VI se resume los tiempos promedios del desempeño de los tres controladores implementados y su comportamiento ante una perturbación manual, donde se obtienen los siguientes resultados: los tres controles responden rápidamente ante la perturbación con un tiempo de asentamiento promedio aproximado de 67.5 s, sin embargo, el control tradicional muestra la presencia de sobre impulso superior al 2%.

TABLA VI
ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

Método	t_r [s]	OS [%]	t_s [s]
Control no lineal MPC-PSO	45.7	0%	67.5
Control PID	7	2%	75.5
Control no lineal MPC-LS	45.7	0%	67.5

V. CONCLUSIONES

Los hallazgos de este estudio demuestran que al implementar un control avanzado MPC en contraste con un control PI tradicional, su desempeño en tiempos de establecimiento es del 23% más rápida su respuesta ante cambios de set points, a diferencia del control PI tradicional que muestra un 15.6% de sobre impulso y tiempo de estabilización de 60.8 s.

El control MPC ajustados con optimizador heurístico (PSO) se obtiene un tiempo de subida (t_r) de 30.66 s sin presencia de sobre impulso; y por optimizador determinístico (LS) con un tiempo de estabilización (t_s) de 42.6 s sin sobre impulso, lo que verifica tiempos con solución similar.

Los controladores propuestos MPC-PSO y MPC-LS alcanzan similares resultados en los indicadores de desempeño. Sin embargo, el control MPC-LS es el adecuado en el aspecto de respuestas rápidas a un bajo costo computacional, a diferencia del control MPC-PSO que requiere un esfuerzo computacional al calcular una posible solución por cada partícula, al buscar una solución global por cada iteración.

El trabajo sustenta que el uso del control PI tradicional no es óptimo. Si bien es rápido en el tiempo de subida, presenta un sobre impulso considerable, mientras que el control MPC-PSO y MPC-LS ofrecen rápidos tiempos de respuesta y no tienen presencia de sobre impulsos, lo que permite una mayor durabilidad de los componentes del tanque cónico.

Como trabajo futuro, se propone agregar pruebas de significancia estadística, al explorar la generalización a otros sistemas no lineales, con la ventaja de obtener más datos de diagnóstico para el modelo NARX.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) y al Laboratorio de Control Inteligente e Industria 4.0 su interés y apoyo en esta investigación, que proporcionaron los permisos necesarios para realizar el trabajo en sus instalaciones. Reconocemos el aporte de su profesora, Dra. Jacqueline Llanos, y de su asistente de laboratorio, Ing. Luis Vargas.

REFERENCIAS

- [1] G. Saravanakumar, S. Dinesh, S. Preteep, P. Sridhar, y others, "Controller tuning method for non-linear conical tank system", *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, vol. 1, n.o 2, pp. 224-228, 2017.
- [2] F. T. Cruz, R. D. Fernandez, A. G. Guizado, y J. F. Zorrilla, "A comparison of Gain Scheduling PID and μ -Synthesis Robust Level Control for a Conical Tank System", en *2021 IEEE XXVIII International*

- Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2021, pp. 1-4.
- [3] C. Jauregui, M. D. Mermoud, G. Lefranc, R. Orostica, J. C. T. Torres, y O. Beytia, "Conical tank level control with fractional PID", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 6, pp. 2598-2604, 2016.
- [4] C. Priya y P. Lakshmi, "Fractional order controller design and particle swarm optimization applied to a nonlinear system", en *2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRITIT)*, 2011, pp. 959-964.
- [5] D. Mercy y S. Girirajkumar, "An algorithmic approach based PSO-PID tuning of a real time conical tank process used in waste water treatment", en *International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2017, pp. 871-876.
- [6] S. E. Berrones Asqui, R. M. Barcia Macías, O. M. Escrig, y J. A. Romero Pérez, "Sintonización de controladores PID para control de velocidad de motores de corriente continua mediante algoritmos genéticos.", 2019.
- [7] V. Ravi y T. Thyagarajan, "Application of adaptive control technique to interacting Non Linear Systems", en *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, 2011, pp. 386-392.
- [8] V. Aparna, M. Hussain, D. N. Jamal, y M. M. Shajahan, "Implementation of gain scheduling multiloop PI controller using optimization algorithms for a dual interacting conical tank process", en *2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 2018, pp. 598-603.
- [9] M. A. George, D. V. Kamath, y I. Thirunavukkarasu, "An Optimized Fractional-Order PID (FOPID) Controller for a Non-Linear Conical Tank Level Process", en *IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*, 2020, pp. 134-138.
- [10] R. Valarmathi, P. Theerthagiri, y S. Rakeshkumar, "Design and analysis of genetic algorithm based controllers for non linear liquid tank system", en *IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)*, 2012, pp. 616-620.
- [11] V. Ravi, T. Thyagarajan, y M. M. Darshini, "A multiple model adaptive control strategy for model predictive controller for interacting non linear systems", en *International Conference on Process Automation, Control and Computing*, 2011, pp. 1-8.
- [12] K. Montaluisa, L. Vargas, J. Llanos, y P. Velasco, "Model Predictive Control for Level Control of a Conical Tank", *Processes*, vol. 12, n.o 8, p. 1702, 2024.
- [13] T. Madhubala, M. Boopathy, J. S. Chandra, y T. Radhakrishnan, "Development and tuning of fuzzy controller for a conical level system", en *International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing*, 2004, pp. 450-455.
- [14] K. Montaluisa, L. Vargas, J. Llanos, y C. Chaquinga, "Intelligent Control Algorithm Based on Fuzzy Logic for Level Control of a Conical Tank", en *IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2024, pp. 1-5.
- [15] J. B. D. C. Neto y O. M. Almeida, "Interval Type-2 Fuzzy Logic PID Controller Based on Phase and Margins Gains of the System Applied to a Non-Linear Control of a Conical Tank", en *14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2022, pp. 171-176.
- [16] G. Tamilselvan y P. Aarthy, "Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system", *Journal of applied research and technology*, vol. 15, n.o 5, pp. 492-503, 2017.
- [17] D. S. Aarti y N. Arun, "Liquid level control of quadruple conical tank system using linear PI and fuzzy PI controllers", en *2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 2021, pp. 1-5.
- [18] V. Ravi, T. Thyagarajan, y S. Y. Priyadharshni, "Gain scheduling adaptive model predictive controller for two conical tank interacting level system", en *Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT'12)*, 2012, pp. 1-7.
- [19] M. A. Duarte-Mermoud y F. Milla, "Model predictive power stabilizer optimized by PSO", en *IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 2016, pp. 1-7.
- [20] H. B. Novin y H. Ghadiri, "Particle swarm optimization base explicit model predictive controller for limiting shaft torque", en *5th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS)*, 2017, pp. 35-40.

- [21] Z. Cai, "Application of PSO Algorithm in Optimizing BP Neural Network", en *IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT)*, 2024, pp. 853-859.
- [22] L. Shi, X. Tang, y J. Lv, "PCA-based PSO-BP neural network optimization algorithm", en *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2015, pp. 1720-1725.
- [23] R. P. Borase, D. Maghade, S. Sondkar, y S. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications", *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, pp. 818-827, 2021.
- [24] J. Kennedy y R. Eberhart, "Particle swarm optimization", en *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 1995, pp. 1942-1948.

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (antigua Facultad de Ingeniería Electrónica) fue creado el 25 de abril de 1977 e inicia sus labores en octubre del mismo año en la modalidad presencial, con sus planes y programas de estudio encaminados a la formación del Ingeniero Electrónico. A partir de octubre de 1990, ofrece dos carreras con perfiles profesionales definidos: Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones e Ingeniería Electrónica en Computación.

En la propuesta actual del Departamento se integran en un solo perfil estas aspiraciones, ofreciendo las carreras de Ingeniería en Telecomunicaciones e Ingeniería en Electrónica y Automatización.

Además oferta los siguientes programas de posgrado: **Maestría de Investigación en Electrónica menciones en Automática y Telecomunicaciones**, Maestría en Redes de Información y Conectividad, y Maestría en Gerencia de Redes y Telecomunicaciones.

The Department of Electrical, Electronics, and Telecommunications (formerly the Faculty of Electronic Engineering) was created on April 25, 1977, and began its work in October of the same year in the face-to-face modality, with its study plans and programs aimed at the training of the Electronic Engineer. Since October 1990, it has offered two careers with defined professional profiles: Engineering in Telecommunications and Electronic Engineering in Computing.

The Department's current proposal integrates these aspirations into a single profile, offering the careers of Telecommunications Engineering, and Electronics and Automation Engineering.

It also offers the following graduate programs: **Research Master's in Electronics with mentions in Automation and Telecommunications**, Master's in Information Networks and Connectivity, and Master's in Network and Telecommunications Management.

Mayor información en <http://deee.espe.edu.ec/>
Further information <http://deee.espe.edu.ec/>



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE
Copyright © 2025