

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188
JUNIO 2026

Nro.
13
EDICIÓN
DIGITAL

INDEXADA AL DIALNET



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia García Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Ing. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición impresa N°13 Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD.
Ing. Oswaldo Terán Modragón PhD.
Ing. Mónica Lino Humerez PhD.
Ing. Franz Zenteno Benitez PhD.

Diseño Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM Latinoamericana

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Dirección:
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 13
JUNIO - 2026**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.	Rectora
Dr. Tito V. Estevez Martini	Vicerrector
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco	Decano Facultad de Ingeniería
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina	ViceDecano. Facultad de Ingeniería
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco	Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 13 - Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho
Ing. Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
Ing. Paula Mónica Lino Humerez Ph.D.
Ing. Franz Zenteno Benítez Ph.D.

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

Frente a la volatilidad social y económica actual, la 13ª edición de la Revista Científica INDUSTRIAL 4.0 demuestra cómo la ingeniería industrial actúa como un flujo sinérgico que transfiere innovación integral a las organizaciones. Este ecosistema unificado inicia en la transformación digital, donde el Control basado en eventos para la eficiencia energética optimiza el flujo de datos industriales en procesos complejos. Dicha eficiencia se traslada al ámbito de la salud con el Monitoreo inteligente mediante IoT en Farmacéutica, asegurando estricta trazabilidad térmica regulatoria, y se acopla a las decisiones comerciales y de inventarios con el Pronóstico de la demanda mediante el modelo Prophet, reduciendo drásticamente la incertidumbre logística.



Esta resiliencia operativa converge directamente con la sustentabilidad y el aprovechamiento de recursos. La autonomía energética industrial se impulsa con el Generador asíncrono en generación distribuida, mientras que el modelo de Inventario de Gases de Efecto Invernadero aplicado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA audita consumos para viabilizar la reducción de costos operativos, mismo que puede ser replicado en cualquier tipo de organización. Asimismo, la Modelación matemática de los niveles de presión sonora vehicular redefine el diseño de centros logísticos urbanos. En ingeniería de procesos y economía circular, el modelado térmico de Liofilización del Copoazú y de la Liofilización del Mango añade alto valor comercial a recursos amazónicos con bajo consumo energético, sincronizándose con el uso estratégico de Chamota en pastas cerámicas estructurales para reducir costos de materias primas en la construcción.

Finalmente, se abarcan temas de la gobernanza del entorno donde se consolidan estos analizando la Dinámica de exportaciones no tradicionales, los riesgos del Ciclo inmobiliario y las estructuras para Emprendimientos industriales. Para garantizar la

confiabilidad operativa en planta, el estudio contra el P-hacking previene decisiones erróneas por falsos positivos en el control de calidad. Este despliegue de valor es articulado y sostenido por el talento humano validado por la Acreditación ARCU-SUR en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA. Así, esta edición reafirma que la frontera científica no es un esfuerzo aislado, sino un engranaje integrado de alta eficiencia y productividad que potencia la sostenibilidad socioeconómica de las organizaciones, empresas, actores normativos a nivel local y regional.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/axon6239wp78h>

CONTROL BASADO EN EVENTOS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN INDUSTRIA 4.0: MITIGACIÓN DE SATURACIÓN DE DATOS EN PROCESOS DE MÚLTIPLES LAZOS

Jorge Antonio Nava Amador

ORCID: 0009-0009-1274-6233

janava@umsa.bo

Teléfono: 77225519

Ingeniero en Sistemas Electrónicos

Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

Karel Walter Gomez Orellana

ORCID: 0009-0001-2648-6737

karelgomez124@gmail.com

Teléfono: 60621578

Ingeniero Electrónico

Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

Cristhian Joel Apaza Flores

crissapazaf@gmail.com

Teléfono: 76265098

Ingeniero Electrónico

Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

RESUMEN

En el paradigma de la Industria 4.0, el control de procesos con múltiples variables MIMO, exige un uso intensivo de infraestructuras de comunicación compartidas. El muestreo periódico tradicional en estos sistemas genera un tráfico de datos redundante, induciendo latencia, saturación de la red y un elevado consumo energético. Este artículo postula al Control Basado en Eventos – CBE, como una

alternativa robusta para vencer estas limitaciones. A partir de investigaciones experimentales y cuantitativas desarrolladas en la Universidad Mayor de San Andrés - UMSA, se presenta la integración de una metodología de despliegue, basada en RUP y perfiles UML, y una heurística de benchmarking computacional. Los resultados demuestran que el CBE, aplicado a controladores lógicos programables (PLCs), reduce la carga computacional en más del 80% y mitiga drásticamente el tráfico de red. Se concluye que esta estrategia garantiza la estabilidad y el desempeño dinámico, ofreciendo una guía aplicable para la optimización y modernización de sistemas de control multivariable en la industria boliviana.

Palabras clave: Industria 4.0, Control Basado en Eventos, MIMO, Control en red

ABSTRACT

Within the Industry 4.0 paradigm, Multi-Input Multi-Output (MIMO) process control demands the intensive use of shared communication infrastructures. Traditional periodic sampling in these systems generates redundant data traffic, leading to latency, network congestion, and high energy consumption. This article proposes Event-Based Control (EBC) as a robust alternative to overcome these limitations.

Drawing on experimental and quantitative research conducted at the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), this paper presents the integration of a deployment methodology—based on RUP and UML profiles—alongside a computational benchmarking heuristic. The results demonstrate that EBC, when implemented in Programmable Logic Controllers (PLCs), reduces the computational load by over 80% and drastically mitigates network traffic. It is concluded that this strategy ensures both stability and dynamic performance, providing an actionable framework for the optimization and modernization of multivariable control systems within the Bolivian industry.

Keywords: Industry 4.0, Event-Based Control, MIMO, Networked Control

1. INTRODUCCIÓN

En el paradigma de la Industria 4.0, los procesos industriales se caracterizan por la integración de múltiples variables y lazos de control que operan simultáneamente en un mismo entorno físico y virtual. Estos sistemas comparten infraestructuras críticas de comunicación, tales como redes industriales alámbricas e inalámbricas, capacidad de procesamiento de los controladores y recursos energéticos. Si bien

esta convergencia ofrece ventajas en flexibilidad, diagnóstico y reducción de costos de instalación, también genera importantes desafíos para los sistemas de control tradicionales, especialmente cuando múltiples lazos de control compiten por el mismo medio de comunicación.

Los controladores periódicos convencionales, basados en muestreo a intervalos fijos (muestreo de Riemann), generan un tráfico constante de datos incluso cuando el sistema se encuentra en estado estacionario. Este comportamiento provoca saturación de la red, latencia variable, mayor consumo energético y degradación general del desempeño, limitando la capacidad de los lazos para recibir mediciones oportunas y afectando la estabilidad y eficiencia del proceso.

Ante estas limitaciones, el Control Basado en Eventos (CBE) emerge como una alternativa eficiente. A diferencia del control periódico, el CBE condiciona la ejecución y transmisión de las leyes de control únicamente a la ocurrencia de eventos significativos, reduciendo drásticamente el tráfico de red y el consumo de recursos sin comprometer el desempeño del sistema.

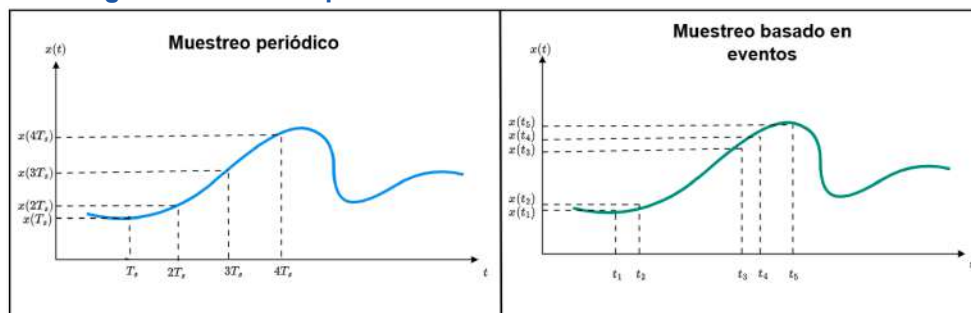
La automatización moderna enfrenta el desafío de gestionar procesos industriales altamente complejos, caracterizados por múltiples variables de entrada y salida MIMO que interactúan simultáneamente en entornos físicos y virtuales. Bajo el enfoque de la Industria 4.0, estos lazos de control comparten recursos críticos: redes de datos industriales, capacidad de CPU de los controladores y energía. El uso convencional de controladores periódicos (muestreo de Riemann) agrava este escenario, saturando las redes con información redundante cuando el sistema se encuentra en estado estacionario. Para mitigar este cuello de botella y promover la eficiencia energética, este trabajo investiga el Control Basado en Eventos - CBE, un paradigma que condiciona la ejecución y transmisión de las leyes de control a la ocurrencia de perturbaciones significativas. Apoyados en los trabajos de benchmarking de estrategias y metodologías de despliegue estructurado desarrollados en la carrera de Ingeniería Electrónica de la UMSA, este artículo expone cómo el CBE no solo descongestiona la red, sino que mantiene intacta la estabilidad asintótica del proceso.

2. ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS MULTIVARIABLES.

En los sistemas multivariantes (MIMO) típicos de la Industria 4.0, múltiples

variables de entrada y salida interactúan simultáneamente y comparten la misma infraestructura de comunicación. Los controladores periódicos convencionales, basados en muestreo a intervalos fijos (muestreo de Riemann), ejecutan acciones de control independientemente del estado real del proceso. Esta aproximación genera un tráfico constante de datos en la red, incluso cuando el sistema se encuentra en estado estacionario, provocando saturación de los medios de comunicación compartidos, retrasos variables, mayor consumo energético y degradación del desempeño global del sistema.

Figura 1. Muestreo periódico versus muestreo basado en eventos



Nota. Comparación gráfica entre el muestreo periódico (Riemann) y el muestreo activado por eventos (Lebesgue). El gráfico izquierdo muestra la ejecución constante del control periódico; el derecho ilustra la activación solo ante eventos significativos.

Estas limitaciones se agravan en entornos donde múltiples lazos de control comparten la misma red industrial, ya que el tráfico redundante reduce la disponibilidad de ancho de banda y compromete la llegada oportuna de mediciones a todos los nodos del sistema.

El Control Basado en Eventos (CBE) surge como una alternativa aperiódica fundamental para superar estas restricciones. A diferencia del control periódico, el CBE condiciona la ejecución y transmisión de las leyes de control únicamente a la ocurrencia de eventos significativos en el sistema (por ejemplo, cuando una variable supera un umbral predefinido o cuando el estado del sistema cambia de manera relevante). Se genera así un esquema de muestreo que no usa intervalos de tiempo fijo (Lebesgue) la diferencia en la forma de tomar muestras y ejecutar el control entre ambas aproximaciones se muestra en la Figura 1. El muestreo de Lebesgue reduce drásticamente el tráfico de red, el consumo computacional y el

gasto energético, permitiendo una telemetría más eficiente y una mejor utilización de la infraestructura compartida.

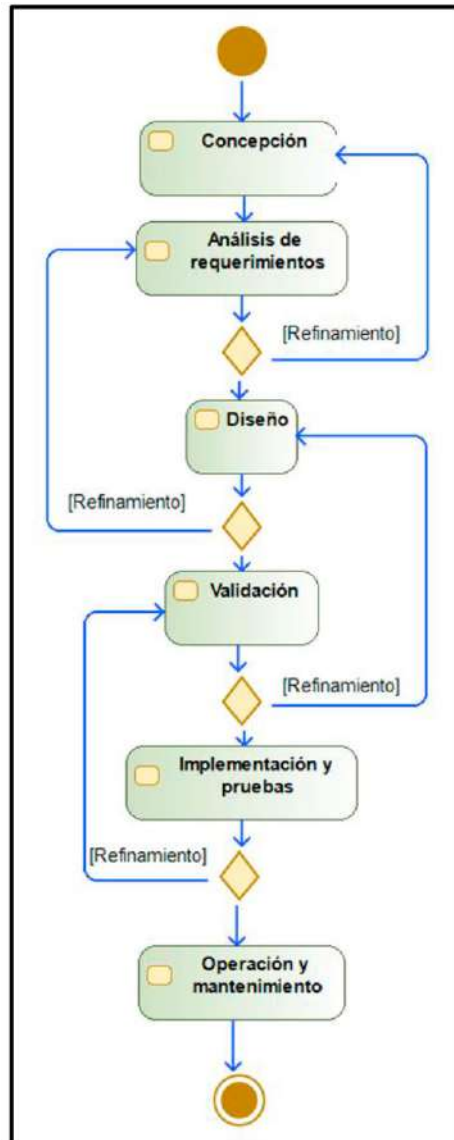
Entre las estrategias más representativas del CBE se encuentran Send-on-Delta, control sin condición de seguridad, retroalimentación de estados y control basado en funciones de Lyapunov. Todas ellas comparten el principio de activar el controlador solo cuando es necesario, pero difieren en el mecanismo de detección de eventos y en el grado de garantía de estabilidad.

Los fundamentos del CBE radican en su capacidad para optimizar recursos en sistemas multivariables con redes compartidas, manteniendo o mejorando el desempeño dinámico del proceso sin las sobrecargas inherentes al muestreo periódico.

3. METODOLOGÍA DE DESPLIEGUE Y EVALUACIÓN.

La metodología de despliegue y evaluación propuesta integra un marco estructurado para el diseño sistemático de sistemas de Control Basado en Eventos (CBE) con una herramienta computacional para su validación objetiva. Este enfoque permite tanto el desarrollo de nuevos proyectos como el rediseño de sistemas periódicos existentes, asegurando que la implementación sea reproducible y adaptada a entornos industriales con recursos compartidos.

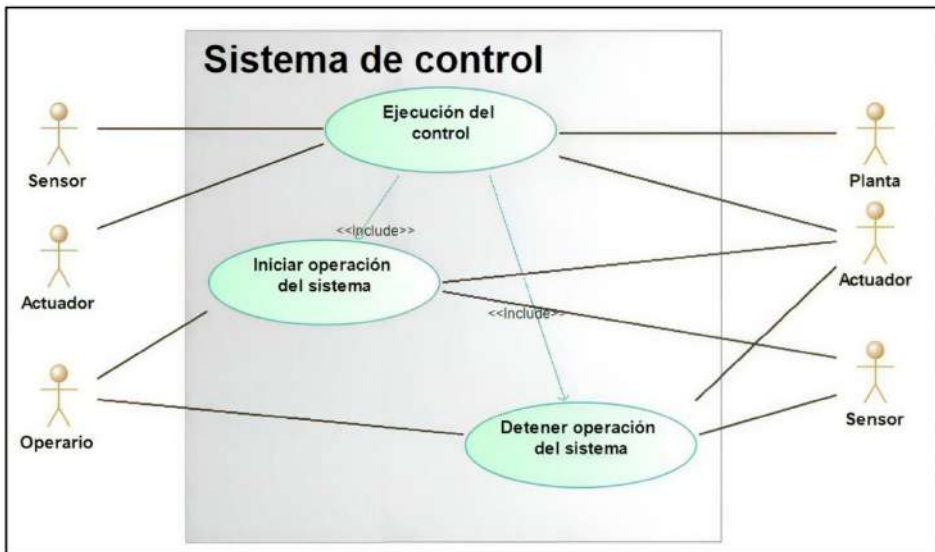
Figura 2. Esquema general de la organización en función del contenido (disciplinas) de la metodología



Nota. Representación de las disciplinas y niveles de detalle de la metodología de despliegue.

El proceso de diseño se organiza bajo el Proceso Unificado Rational (RUP), que estructura el desarrollo en disciplinas iterativas: Concepción, Análisis de Requerimientos, Diseño, Validación, Implementación y Pruebas, y Operación y Mantenimiento, como se muestra en la Figura 2. Cada disciplina se documenta en cuatro niveles de detalle (flujo general, principales, detallados y específicos), lo que proporciona una guía clara desde la visión global hasta los aspectos concretos de implementación.

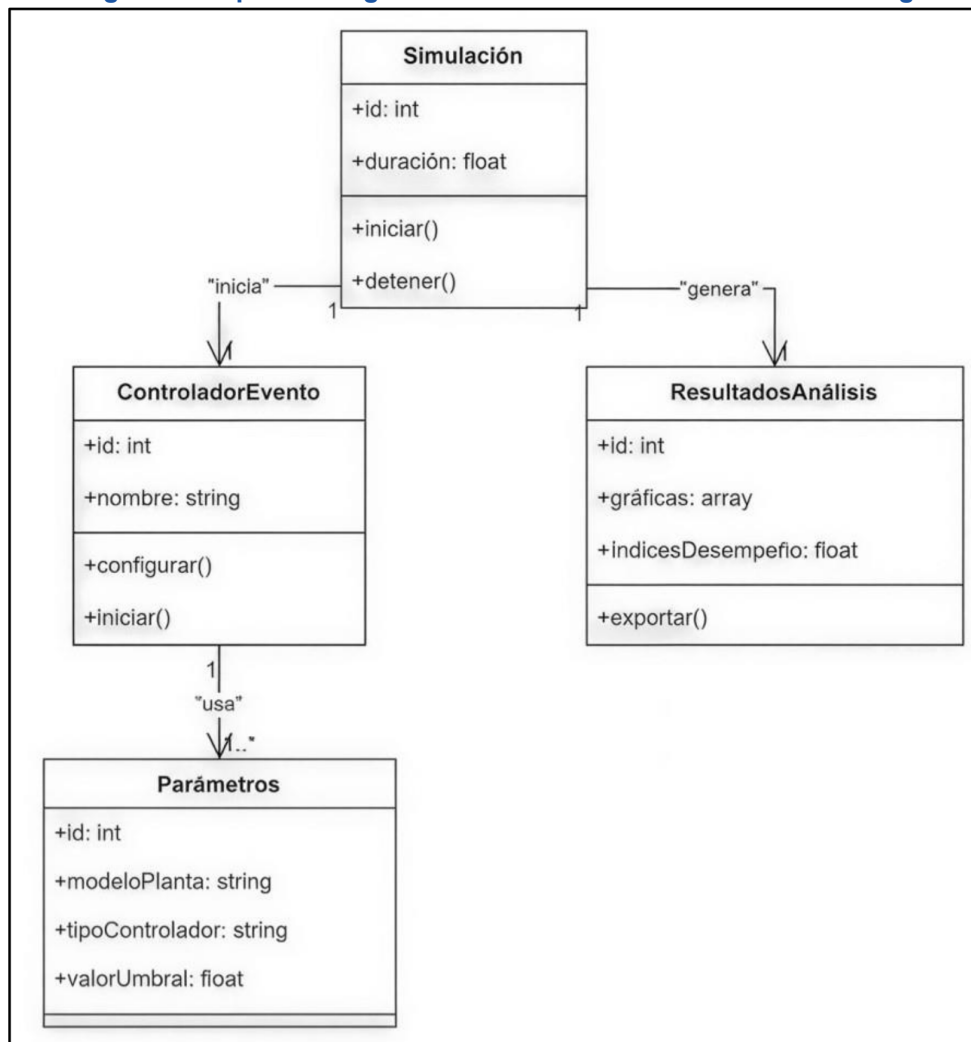
Figura 3. Diagrama de casos de uso genérico a un sistema de control



Nota. Representación UML del actor “Planta” y el sistema “Sistema de control” en un diagrama de casos de uso.

El modelado se complementa con el Lenguaje de Modelado Unificado (UML), que permite representar tanto la estructura estática (diagramas de componentes, despliegue y casos de uso) como el comportamiento dinámico (diagramas de secuencia, actividades y estados) del sistema CBE. De esta forma, se integra el modelado matemático tradicional con herramientas de ingeniería de software, facilitando la trazabilidad de requerimientos y la comunicación entre equipos multidisciplinarios. Un ejemplo del uso de diagramas UML para este propósito se muestra en la Figura 3.

Figura 4. Arquitectura general de la herramienta de benchmarking



Nota. Diagrama de capas de la herramienta que integra configuración, simulación, análisis comparativo y exportación de resultados.

Para la fase de evaluación y validación se emplea una heurística de benchmarking que permite comparar de forma objetiva el desempeño de diferentes estrategias CBE frente al control periódico. Esta heurística combina revisión bibliográfica, simulación

controlada, implementación física y análisis cuantitativo de métricas (tráfico de red, número de activaciones, carga computacional y tiempo de respuesta). Como herramienta de apoyo se utiliza una plataforma computacional que automatiza la configuración, ejecución y comparación de estrategias, facilitando el análisis rápido y reproducible de resultados. La arquitectura general de la herramienta de benchmarking se muestra en la Figura 4.

De esta manera, la metodología de despliegue (RUP + UML) proporciona el marco estructurado para el diseño, mientras que la heurística de benchmarking y su herramienta asociada garantizan una evaluación cuantitativa y sistemática del desempeño. La integración de ambos componentes permite seleccionar la estrategia CBE más adecuada según las características del proceso y validar su implementación en entornos industriales reales con múltiples variables y lazos compartidos.

4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL

La validación experimental se realizó en dos plantas piloto representativas de procesos industriales reales con múltiples variables y lazos de control que operan en un mismo entorno físico. Estas plantas simulaban condiciones típicas de sistemas multivariables donde distintos lazos compiten por recursos compartidos de comunicación y procesamiento. Esta validación se efectuó en dos plataformas situadas en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, bajo la supervisión académica de dicha dirección.

La primera planta es un sistema de nivel de líquido, un proceso continuo de dinámica lenta que representa aplicaciones típicas de control de tanques en industrias químicas, alimentarias y de tratamiento de aguas. Consiste en un tanque de almacenamiento, una bomba centrífuga controlada por variador de frecuencia, un sensor de nivel y un actuador que regula el caudal de entrada. La variable controlada es la altura del líquido, mientras que el caudal de entrada actúa como variable manipulada.

La segunda planta es la unidad de selección del proceso de manufactura, un sistema discreto con eventos intermitentes que simula líneas de producción con etapas secuenciales. Incluye una banda transportadora, sensores de posición y presencia,

actuadores neumáticos y un sistema de selección y rechazo de piezas. Este entorno representa procesos discretos donde múltiples lazos deben coordinarse en tiempo real sobre la misma infraestructura.

Para simular las condiciones reales de una red industrial compartida, se consideró una hipotética “red industrial” donde ambos sistemas (nivel y selección) operan simultáneamente y comparten un mismo medio de comunicación. En este escenario hipotético, múltiples lazos de control transmiten datos a través de una red industrial común (similar a una red PROFIBUS o Ethernet/IP), generando competencia por ancho de banda y poniendo a prueba la capacidad de la infraestructura compartida bajo carga.

Respecto a la aplicabilidad del trabajo, el desarrollo considera la perspectiva de los requirientes técnicos, tales como el personal de mantenimiento y los ingenieros de instrumentación, cuyo interés principal radica en la reducción de la latencia y la eficiencia del ancho de banda disponible. Del mismo modo, el estudio atiende las necesidades de los clientes finales del proceso, enfocados en la gerencia de producción y la supervisión de calidad, quienes requieren una mayor continuidad operativa, la reducción de costos energéticos y una telemetría eficiente que garantice el monitoreo de variables críticas sin comprometer los sistemas de información corporativos. Esta visión integral asegura que el despliegue del control basado en eventos no solo cumpla con los estándares académicos de desempeño, sino que responda de manera efectiva a los requerimientos de eficiencia y escalabilidad exigidos en un entorno industrial real.

La implementación se realizó en controladores lógicos programables (PLC) industriales de uso extendido en la industria boliviana:

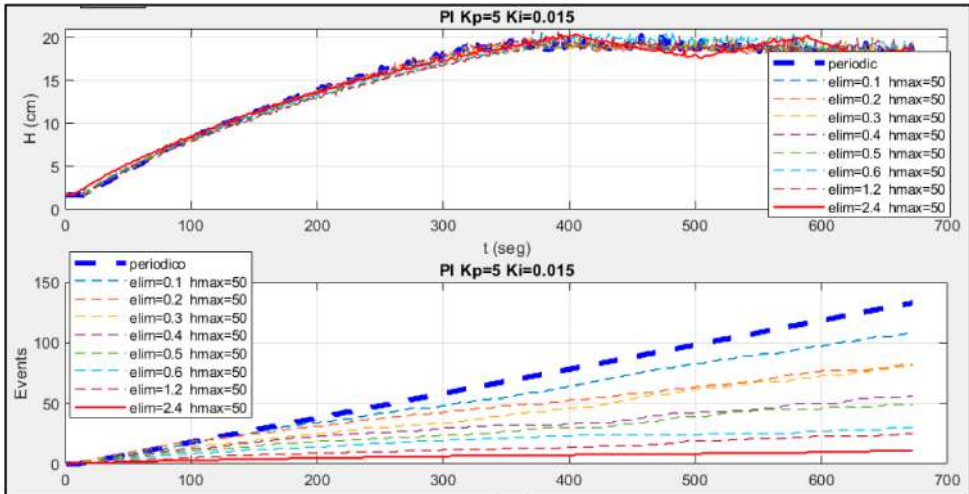
- PLC Allen-Bradley Micrologix 1100, utilizado para la ejecución del algoritmo de control y la lógica de eventos en el sistema de nivel.
- PLC Siemens S7-200, empleado en la unidad de selección para gestionar la secuencia de procesos y la comunicación con sensores y actuadores.

Ambos PLCs operaron en modo ladder, permitiendo la programación directa de las estrategias CBE y facilitando la medición precisa del tiempo de ejecución y la carga computacional.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación experimental permitió cuantificar el impacto del Control Basado en Eventos en entornos multivariables con infraestructura compartida. Se analizó tanto la reducción del tráfico de red como la eficiencia computacional real medida en los PLCs, junto con el comportamiento temporal de las variables controladas.

Figura 5. Respuesta temporal y número de accionamientos acumulados



Nota. Gráfico superior: respuesta temporal del sistema; gráfico inferior: número acumulado de accionamientos del controlador. Se comparan el control periódico (línea discontinua azul) y varios controladores basados en eventos.

En primer lugar, se evaluó la reducción del tráfico de red bajo una configuración hipotética de red industrial compartida. Mientras el control periódico genera transmisiones constantes a intervalos fijos, las estrategias CBE solo activan la comunicación cuando se detecta un evento significativo. Esta disminución del tráfico permite que todos los lazos de control reciban sus mediciones de manera oportuna, evitando la saturación de la red compartida y reduciendo los retrasos variables. Para ello, en la Figura 5, se muestran la respuesta temporal de distintos controladores, y más importante para este apartado, se muestran las activaciones acumuladas de cada controlador comparado con un controlador periódico (línea azul discontinua). En este caso se interpreta que una menor cantidad de activaciones de controlador implica directamente una menor transmisión de mensajes a través del medio de comunicación compartido.

En segundo lugar, se analizó la eficiencia computacional mediante mediciones directas del tiempo de ejecución en los PLCs. Los resultados se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Resumen de instrucciones ejecutadas con y sin activación de la condición de evento

Instrucción	Tiempo máximo de ejecución en microsegundos	Nro. de instrucciones en el algoritmo completo
ADD	13.34	4
SUB	13.46	2
ABS	9.71	1
MOV	9.21	4
AND	13.06	1
OR	13.06	1
LES	9.09	3
GRT	9.09	1
JMP	1.15	1
MUL	20.68	3
SCP	337.2	1
RET	1.68	1
Total en micro segundos		591,38

Instrucción	Tiempo máximo de ejecución en microsegundos	Nro. de instrucciones en el algoritmo completo
ADD	13.34	1
SUB	13.46	2
ABS	9.71	1
AND	13.06	1
LES	9.09	2
JMP	1.15	1
RET	1.68	1
Total en micro segundos		84.04

Nota. Comparación del número total de instrucciones en el caso de activación (tabla superior) del evento versus el caso sin activación (tabla inferior) de una estrategia CBE.

Tabla 2. Resumen de instrucciones usadas por un controlador Send-on-Delta

Instrucción	Tiempo máximo de ejecución en microsegundos	Nro. de instrucciones en el algoritmo completo
ADD	13.34	4
SUB	13.46	2
ABS	9.71	1
MOV	9.21	4
AND	13.06	1
OR	13.06	1
LES	9.09	3
GRT	9.09	1
JMP	1.15	1
MUL	20.68	3
SCP	337.2	1
RET	1.68	1
Total en micro segundos		591.38

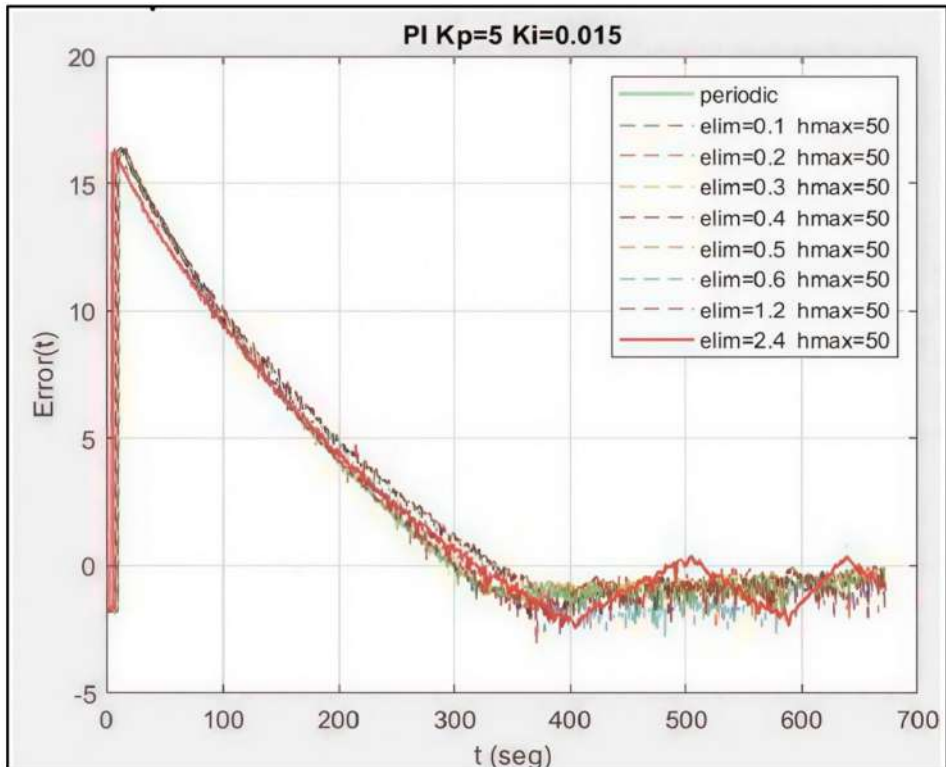
Nota. Número total de instrucciones ejecutadas por la estrategia de Send-on-delta.

El análisis del ciclo de scan en el PLC demostró que, sin activación del evento, el tiempo máximo de procesamiento cae de 591,38 μ s a tan solo 84,04 μ s. Esta reducción libera recursos del hardware y disminuye en paralelo las transmisiones por la red industrial.

Los resultados también mostraron que las estrategias CBE mantienen un comportamiento estable en el tiempo, mostrándose la respuesta temporal de varios controladores CBE en la Figura 5. En dicha figura se aprecia la respuesta temporal muy similar en cada controlador, pero con una marcada diferencia en la cantidad

de activaciones de los controladores frente al periódico. El error de seguimiento y el tiempo de establecimiento permanecen comparables al control periódico como se aprecia en la Figura 6, donde se ve el error de seguimiento.

Figura 6. Respuesta temporal del error de seguimiento para controlador Send-on-Delta



Nota. Se muestran la respuesta del sistema y el error de seguimiento en comparación con el control periódico.

La aplicación de la heurística de benchmarking en las plantas piloto reveló mejoras cuantificables a nivel de hardware y red. En sistemas multivariables continuos, la estrategia Send-on-Delta logró mantener el error de seguimiento (ver Figura 6) comparable al control periódico, pero con una drástica reducción en la ejecución algorítmica. El análisis del ciclo de scan en el PLC demostró que, sin activación de

evento, el tiempo máximo de procesamiento cae de 591.38 μ s a tan solo 84.04 μ s. Esta reducción de carga computacional libera recursos del hardware y disminuye en paralelo las transmisiones por la red industrial. En términos de eficiencia energética, evitar la transmisión continua del vector de estados evita el consumo ocioso en los transceptores de red, mitigando la latencia en la infraestructura compartida sin llegar a la degradación por efecto Zeno.

6. CONCLUSIONES Y APLICABILIDAD EN LA INDUSTRIA NACIONAL

El Control Basado en Eventos se consolida como una solución estructural para superar las limitaciones del control periódico en arquitecturas industriales multivariables que operan sobre redes compartidas. La investigación documental, cuantitativa y experimental realizada en la UMSA ratifica que la transición hacia el CBE reduce los costos computacionales y de telemetría hasta en un 80%, asegurando una gestión superior de la eficiencia energética. La metodología de modelado en UML combinada con la heurística de benchmarking proporciona a la industria en Bolivia un marco de referencia estructurado, formal y empíricamente validado. Estos hallazgos recomiendan enfáticamente el replanteamiento de los lazos de control actualmente implementados, dotando a la ingeniería local de herramientas para desplegar la verdadera Industria 4.0 mediante arquitecturas eficientes, resilientes y sostenibles.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Apaza Flores, C. J. (2025). Benchmarking de estrategias de control basado en eventos para entornos industriales con recursos compartidos [Proyecto de Grado]. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Gómez Orellana, K. W. (2025). Metodología de despliegue de sistemas de control basado en eventos utilizando RUP y UML para procesos industriales [Proyecto de Grado]. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Årzén, K.-E. (1999). A simple event-based PID controller. En Proceedings of the 14th IFAC World Congress (pp. 423-428). Elsevier.
- Aranda-Escolástico, E., Guinaldo, M., & Dormido, S. (2020). Event-based control: A survey. Annual Reviews in Control, 49, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.01.001>
- Heemels, W. P. M. H., Johansson, K. H., & Tabuada, P. (2012). An introduction to

event-triggered and self-triggered control. En Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control (pp. 3270-3285). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6425820>

Lunze, J., & Lehmann, D. (2010). A state-feedback approach to event-based control. *Automatica*, 46(1), 211-215. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.10.035>

Miskowicz, M. (2004). Send-on-delta concept: An event-based data reporting strategy. *Sensors*, 6(1), 49-63. <https://doi.org/10.3390/s6010049>

Tabuada, P. (2007). Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9), 1680-1685. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.904277>

Seva, J., García, M., & López, A. (2021). Industrial communication networks in Industry 4.0: Challenges and opportunities. *IEEE Access*, 9, 45678-45695. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067890>



Estado Plurinacional de Bolivia
Ministerio de Educación
Yach'a Kamani
Yachay Kanachiq
Morosboerendat'heero Arakuarupi

N° 000011

**COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS - CNACU**

En sujeción y al amparo de la Ley de Educación N° 070
"Avelino Siñani - Elizardo Pérez" del 20 de diciembre de 2010



CERTIFICA

Que la carrera de

**INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

de la

**UNIVERSIDAD MAYOR
DE SAN ANDRÉS**

con sede académica en la ciudad de La Paz, cumple con los criterios definidos para la

ACREDITACIÓN

del Sistema ARCU-SUR
del SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR

La Comisión Nacional de Acreditación de la Carreras Universitarias (CNACU), en uso de sus atribuciones conferidas por la Ley de la Educación N° 070 "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", reconoce la calidad académica universitaria con alcance regional en el MERCOSUR por un periodo de (6) seis años, a partir de la fecha de su emisión.

La Paz, marzo de 2026.


MARÍA YVONNE PACHECO ANGULO
PRESIDENTA
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


DIEGO CAMACHO VELAZCO
VICEPRESIDENTE
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


FREDDY MENDOZA ESPINOZA
VOCALES CELB
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


JUAN MARCELO SANZURI LIMA
SECRETARIO GENERAL
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


GUSTAVO SACRO ORTEGA ZELADA
VOCALES ANEP
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NUEVAMENTE ACREDITADA AL SISTEMA ARCU - SUR
DEL SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

© TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
LA PAZ - BOLIVIA
JUNIO / 2026