ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 48 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Desarrollo de una estrategia de control para una válvula de autocierre en pozos de producción

Development of a control strategy for a self-stop valve in production wells

Diego Fernando Molina Ortega[1]
Camilo Ernesto Pardo Beainy[1]
Edgar Andrés Gutiérrez Cáceres[1]

[1] **Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Electrónica, Maestría en Ingeniería, Tunja, Boyacá, Colombia.**

Recibido: 12 junio 2026. Revisado: 20 agosto 2026. Aceptado: 27 agosto 2026. Publicado: 07 septiembre 2026.
Autor de correspondencia: Diego Fernando Molina Ortega

Cómo citar: D. F. Molina Ortega, C. E. Pardo Beainy, and E. A. Gutiérrez Cáceres, "Desarrollo de una estrategia de control para una válvula de autocierre en pozos de producción", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 48, sept. 2026, art. no. 4630, doi: 10.24054/rcta.v2i48.4630

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

Uno de los mayores retos en los pozos petroleros automatizados es mantener la continuidad de la operación frente a los cambios repentinos de presión que provocan paradas no programadas. Los esquemas tradicionales de control PID continuo se quedan cortos cuando el proceso se vuelve muy dinámico, mientras que alternativas avanzadas como la perforación con presión controlada (MPD) resultan costosas y difíciles de implementar por su complejidad técnica. En este artículo se presenta una alternativa basada en eventos y niveles de severidad operativa para operar válvulas de estrangulación (choke valves). El desarrollo combina controladores PLC, supervisión SCADA, escalamiento de alarmas y una reapertura gradual para controlar eventos críticos de forma autónoma. Durante las pruebas en campo, la arquitectura registró 62 intervenciones automáticas sin paros de planta, reaccionando en menos de 3 segundos y logrando una recuperación superior al 90 % en eventos transitorios. Esto demuestra que es posible estabilizar el proceso y reducir la dependencia del operador mas no eliminarlo de la operación mediante una solución práctica y fácil de integrar en plantas existentes.

Palabras clave: control basado en eventos, resiliencia operativa, automatización de válvulas de estrangulación, automatización industrial, control PLC, sistemas SCADA, sistemas de producción de petróleo, recuperación adaptativa.

Abstract:

One of the primary challenges in automated oil wells is maintaining operational continuity during abrupt pressure fluctuations that cause unscheduled shutdowns. Traditional continuous PID control schemes fall short when process dynamics become highly variable, while advanced alternatives like Managed Pressure Drilling (MPD) remain expensive and complex to implement. This paper presents an event-based alternative using operational severity levels to control choke valves. The architecture combines PLC control, SCADA supervision, alarm escalation, and a progressive reopening strategy to manage critical events autonomously. During field testing, the system recorded 62 automatic interventions without plant shutdowns, achieving response times under 3 seconds and recovery rates above 90% during transient events. This shows that it is possible to stabilize the process and reduce operator dependence, but not eliminate it from the operation, through a practical solution that's easy to integrate into existing plants.

Keywords: event-based control, operational resilience, choke valves, automation, industrial automation, PLC control, SCADA systems, oil production systems, adaptive recovery.

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, automatizar los procesos de producción se ha vuelto indispensable para mantener las plantas operando de forma continua, evitar paradas costosas y reaccionar a tiempo ante las variaciones del proceso [1]–[3]. Por eso, implementar esquemas de control autónomo ayuda a que las instalaciones sean más estables y requieran menos supervisión humana constante en el día a día[1],[2].

Problemática operacional

Mantener los pozos produciendo sin interrupciones es una tarea compleja, sobre todo cuando ocurren golpes de presión o variaciones inesperadas en el flujo [4]–[10]. En estos escenarios de alta variabilidad, los sistemas de control convencionales pueden quedarse cortos para reaccionar a tiempo, lo que termina provocando paradas no planificadas (shutdowns), pérdidas de crudo y la necesidad de que el operador intervenga manualmente[1],[2],[6],[8].

Problemas como las sobrepresiones, los cambios repentinos en los niveles de los separadores y las fluctuaciones propias del flujo multifásico se encuentran entre las causas de inestabilidad operacional en campo [6]–[10]. Además de desgastar los equipos, estas fallas restan continuidad y afectan la productividad total. Por esta razón, el sector busca cada vez más soluciones automatizadas que absorban estas perturbaciones y reduzcan la necesidad de maniobras manuales en el pozo [1]–[5].

Estado del arte

La mayoría de los sistemas de producción en la industria operan mediante lazos PID tradicionales pensados para regular presión y caudal de forma continua[13],[14]. Si bien funcionan adecuadamente en régimen permanente, este tipo de control puede presentar limitaciones cuando se presentan transitorios rápidos, no linealidades o cambios bruscos derivados del flujo multifásico dentro del pozo[6],[13],[14].

Ante variaciones severas en el proceso, las estrategias convencionales pueden reaccionar con retardo o presentar un desempeño reducido, lo que puede provocar oscilaciones de presión y obligar al personal de campo a intervenir manualmente[6],[13],[14]. Esta falta de respuesta rápida incrementa el riesgo de paros por shutdown, restándole disponibilidad al sistema y complicando el restablecimiento de las condiciones de operación[1],[2], [8]–[10].

Para resolver esto, existen tecnologías avanzadas como el control de presión durante la perforación (MPD), esquemas predictivos y algoritmos inteligentes que permiten amortiguar perturbaciones y controlar variables críticas del proceso [15]–[21]. No obstante, estas alternativas pueden exigir infraestructura adicional, modelos matemáticos de mayor complejidad y un nivel de cómputo elevado, lo que puede dificultar su adopción en campos o instalaciones convencionales [17]–[21].

En estas condiciones, el control basado en eventos se presenta como una opción práctica para gestionar perturbaciones discretas sin ejecutar continuamente acciones de control [22]–[24]. Al ejecutar acciones únicamente cuando la variable supera ciertos umbrales o condiciones críticas, se puede lograr una respuesta rápida, con un menor número de acciones de control y sin requerir necesariamente la complejidad de un modelo predictivo avanzado [22]–[24].

Gap científico

A pesar de los avances en la automatización de instalaciones petroleras, se identifica un vacío en la literatura revisada respecto a cómo integrar clasificaciones de severidad por niveles con mecanismos de recuperación gradual en infraestructuras industriales reales [1]–[24].

La mayoría de las investigaciones analizadas se enfocan en esquemas de control continuo, predictivo, robusto o adaptativo para responder ante cambios abruptos y fenómenos no lineales del flujo multifásico[6], [13]–[21]. Por ello, se plantea una arquitectura híbrida de supervisión que combine lógica por eventos con una reapertura adaptativa de la válvula choke, permitiendo contribuir a la prevención de paradas de planta (shutdowns) sin recurrir necesariamente a modelos predictivos de elevada complejidad para su procesamiento en campo [22]–[26].

Contribución del trabajo

Para resolver este problema, en este trabajo se propone una estrategia de control autónomo por eventos que clasifica las fallas por niveles de severidad en sistemas de producción petrolera. El sistema combina lógica en PLC, supervisión SCADA y un esquema de recuperación gradual para regular automáticamente la apertura de la válvula choke ante variaciones del proceso.

Las principales aportaciones de esta investigación se resumen a continuación:

1. Diseño de un control basado en eventos: Se desarrolló una lógica de control orientada a responder de forma automática ante perturbaciones transitorias en flujos multifásicos.

2. Clasificación por severidad: Se implementó un esquema por niveles que ajusta las acciones en la válvula choke según la gravedad de la perturbación en tiempo real.

3. Mecanismo de recuperación gradual (Slow Recovery): Se diseñó una estrategia de reapertura por etapas para evitar golpes de presión y prevenir la reactivación de alarmas tras controlar la falla.

4. Arquitectura estándar e industrial: La solución se integró sobre hardware comercial (PLC-HMI-SCADA), facilitando su implementación mediante retrofit en instalaciones existentes sin cambiar la infraestructura.

5. Validación en campo: Se comprobó el sistema en operación real, alcanzando tiempos de respuesta menores a 3 segundos, una recuperación automática superior al 90 % y reduciendo los paros de planta (shutdowns) en más de un 45 % comparado con el control tradicional.

El gráfico muestra la integración entre la lectura de variables de proceso, la lógica en PLC estructurada por severidades, la supervisión en SCADA/HMI y el ajuste gradual de la válvula choke.

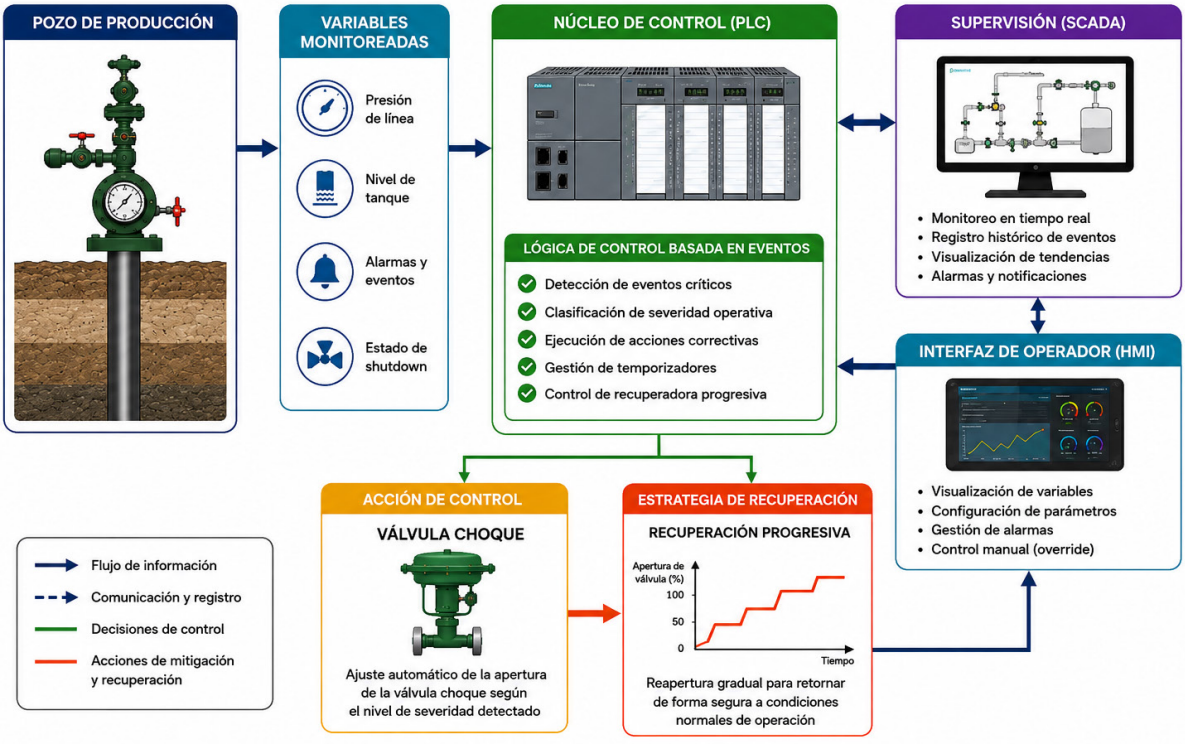


Fig. 1. *Esquema general de la estrategia de control propuesta para mitigar perturbaciones en pozos de producción.*
Fuente: El autor.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo metodológico se estructuró desde la perspectiva de la automatización industrial, con el objetivo de elevar la estabilidad operativa y evitar paradas no programadas en pozos petroleros. La solución combina la lógica por eventos, una jerarquización de alarmas por severidad y una reapertura gradual de la válvula choke, todo montado sobre una arquitectura estándar de PLC, SCADA e interfaz HMI [27]–[30].

El diseño se pensó para operar en instalaciones reales de campo, donde permite monitorear las variables clave del proceso y accionar de forma automática la válvula de estrangulación según la dinámica que presente el pozo.

Arquitectura del sistema

Se optó por una arquitectura modular que facilite la instalación del sistema en pozos que ya se encuentran operando, sin necesidad de modificar drásticamente su infraestructura. La estructura se organiza de manera jerárquica: incluye la instrumentación de campo, el controlador PLC, el sistema SCADA de supervisión y una pantalla HMI que permite la interacción con el operador y el seguimiento de las variables en tiempo real[29],[30].

La lógica programada monitorea de forma continua el comportamiento del pozo y acciona automáticamente la válvula choke cuando detecta una condición crítica, siguiendo el principio de actuación condicionada por eventos [22]–[24]. Al estar construida con componentes industriales de uso común, la plataforma garantiza compatibilidad con los entornos de automatización habituales y permite escalar la solución a otros pozos de la instalación[29],[30].

En la Figura 2 se aprecia la integración entre la lectura de instrumentos, la clasificación por niveles de severidad en el controlador y las acciones automáticas de mitigación y reapertura gradual sobre la válvula choke frente a eventos transitorios.

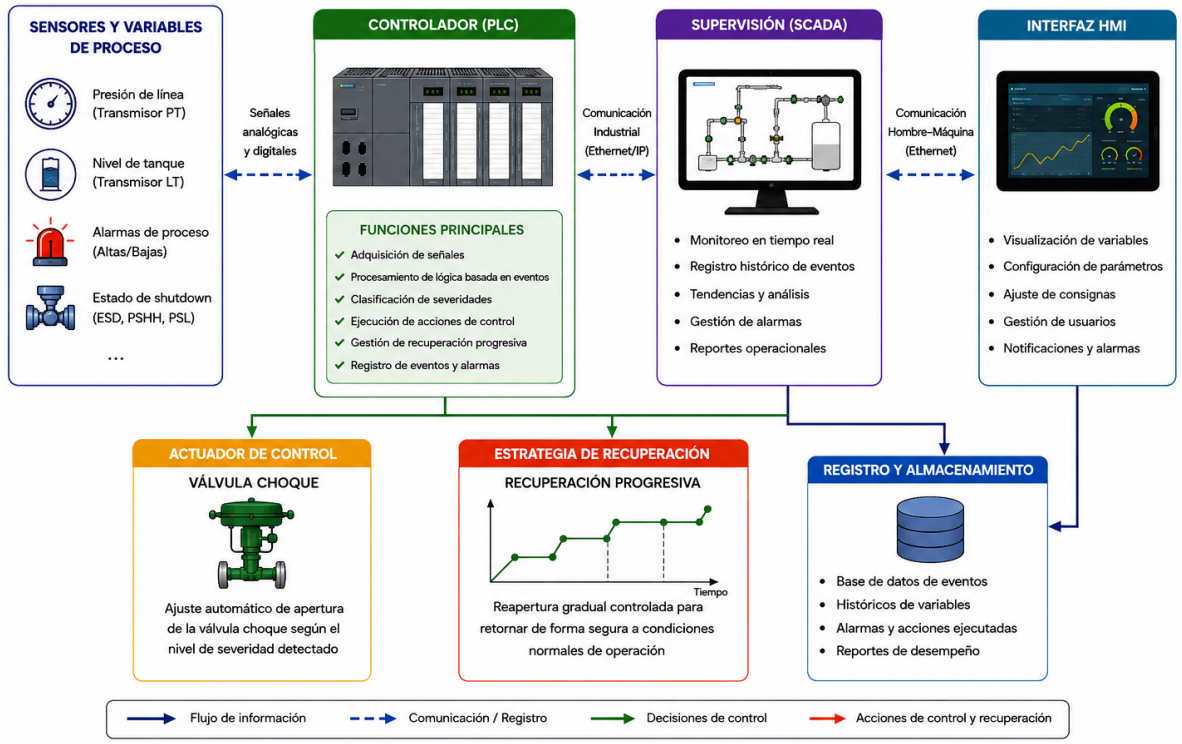


Fig. 2. *Estructura funcional del sistema PLC/SCADA propuesto.*
Fuente: El autor

Variables monitoreadas

El sistema lee de manera constante las variables clave del pozo para evaluar la estabilidad de la presión, los niveles en los tanques/separadores y los estados de paro de emergencia (shutdown). Todas estas señales ingresan al PLC, donde el algoritmo procesa la información para determinar las condiciones del proceso y ejecutar la respuesta correspondiente.

Dentro de los parámetros monitoreados están la presión de cabezal/línea, el nivel del recipiente, el historial de alarmas activas y las variaciones bruscas del flujo multifásico. La consideración conjunta de variables de proceso y alarmas permite disponer de información para detectar comportamientos anómalos y asignar el nivel de severidad del evento en tiempo real[27],[28]. Al integrar estas mediciones en el control, el sistema responde ante transitorios y minimiza las maniobras manuales que debe realizar el operador en situaciones críticas.

En la Tabla 1 se resumen las acciones aplicadas sobre la válvula choke y los tiempos de espera requeridos para confirmar la condición del proceso.

Tabla 1: Parámetros de monitoreo, niveles de severidad y tiempos de persistencia para la lógica de respuesta de la válvula de choke.

Severidad	Condición operacional	Acción aplicada	Tiempo persistencia
Nivel 1	Variación leve presión	Reducción moderada choke	5 s
Nivel 2	Persistencia alarma	Reducción progresiva	10 s
Nivel 3	Alta criticidad	Cierre agresivo choke	15 s
Nivel 4	Riesgo shutdown	Mitigación máxima	20 s

Fuente: El autor.

Modelo de severidades

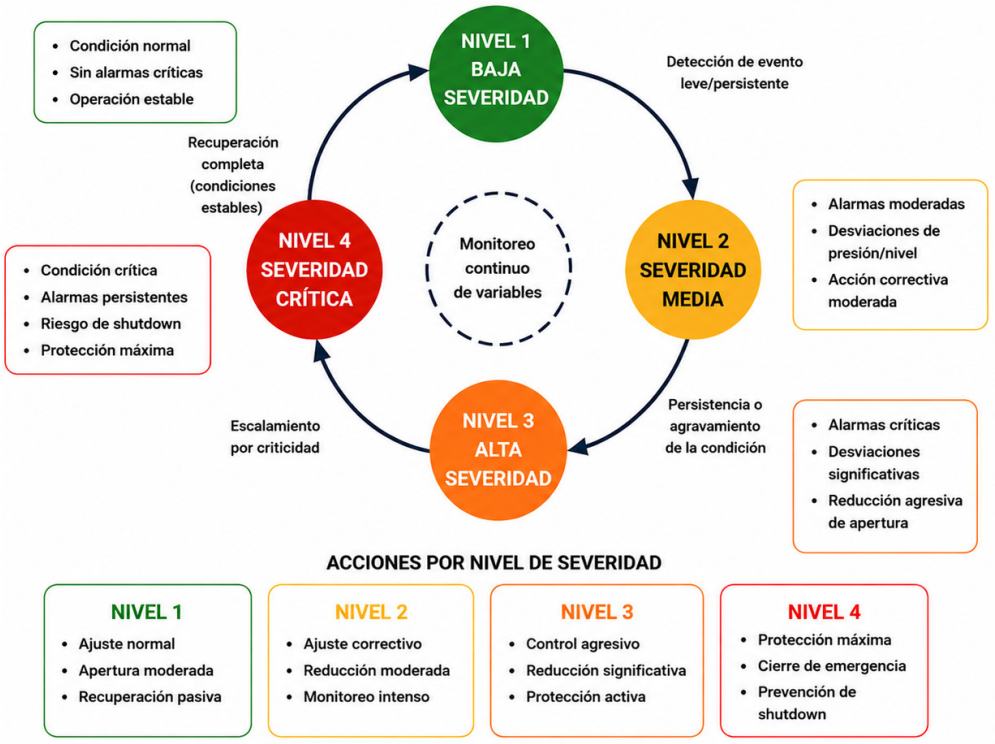
El núcleo de la estrategia se apoya en un modelo por niveles que clasifica la gravedad de las perturbaciones a medida que ocurren. De este modo, la respuesta del algoritmo ajusta su agresividad en función de qué tan crítica sea la condición detectada en el pozo. El esquema contempla cuatro estados de severidad. Cada nivel desencadena un movimiento específico en la válvula de estrangulación, tomando en cuenta la persistencia del fallo en el tiempo, la amplitud del pico de presión y el impacto general sobre la instalación.

Desde el punto de vista de la teoría de control, esta estructura puede representarse como un sistema dinámico híbrido impulsado por eventos, al combinar la respuesta continua de las variables del proceso con una lógica discreta de supervisión [22]–[26]. Así, cada salto de nivel representa una transición de estado que modifica la apertura o el cierre de la válvula para contener la perturbación sin desestabilizar la planta[25],[26].

$S(t+1) = f(S(t), P(t), L(t), A(t))$ donde $S(t)$ representa el estado de severidad operacional, $P(t)$ corresponde a las variables de presión del sistema, $L(t)$ representa las condiciones de nivel del separador y $A(t)$ el conjunto de alarmas activas en el instante de evaluación. Esta formulación permite modelar la evolución dinámica del sistema como un proceso discreto supervisado por eventos operacionales [25].

$u(t) = K_S * S(t)$ donde $u(t)$ representa la acción de control aplicada sobre la válvula choke y k_s corresponde al factor de mitigación asociado al nivel de severidad detectado. Bajo esta arquitectura, la apertura de la válvula no depende de una respuesta continua convencional, sino de una lógica jerárquica proporcional basada en criticidad operacional.

$E_C = P > P_{\max},\ L > L_{\max},\ A = 1$. Los eventos críticos se activan mediante la evaluación simultánea de la presión, el nivel y las alarmas operativas del pozo. Esta lógica permite tomar decisiones discretas para supervisar el proceso de forma automática, siguiendo un esquema de actuación condicionado por eventos [22]–[25]. De hecho, este enfoque híbrido permite conceptualizar la arquitectura Autochoque 1.0 como un sistema orientado a eventos con capacidad de responder ante cambios bruscos en el flujo multifásico. Así, el paso de un nivel de severidad a otro funciona como un mecanismo progresivo de mitigación que busca estabilizar la planta sin provocar cierres o golpes de presión repentinos.



Fuente: El autor.

Se observa cómo el algoritmo procesa las alarmas de campo, evalúa los tiempos de persistencia y conmuta entre los cuatro niveles de severidad para ajustar la apertura de la válvula.

El modelo ajusta sus estados de forma dinámica midiendo en tiempo real la presión, el nivel y las alarmas activas. Según el nivel alcanzado, la lógica aplica una acción determinada sobre la válvula choke, graduando la respuesta según qué tan fuerte y persistente sea el evento. Además, el algoritmo incluye una secuencia de retorno seguro para restablecer la operación normal una vez superada la falla.

Cuando la severidad es baja, la válvula realiza correcciones leves para estabilizar el proceso sin alterar el flujo. Si la condición empeora, el sistema cierra la válvula con mayor agresividad para contener el pico de presión, evitando que se disparen los paros de emergencia (shutdowns) y manteniendo el pozo en línea.

En la tabla 2. la estructura muestra cómo la lógica pasa de una etapa a otra evaluando la duración de las alarmas y el grado

de perturbación en el proceso, ejecutando el cierre o la reapertura gradual de la válvula según corresponda.

Tabla 2: Clasificación jerárquica de los cuatro niveles de severidad operacional definidos en el algoritmo.

Nivel	Severidad	Descripción	Condiciones típicas	Acción sobre válvula choke
1	Baja	Condición normal de operación sin alarmas críticas.	Presión y nivel dentro de rango. Sin desviaciones significativas.	Ajuste normal: incrementos/ decrementos moderados.
2	Media	Desviaciones moderadas que requieren acción correctiva.	Alarmas leves o persistentes. Variaciones moderadas de presión/nivel.	Reducción moderada de apertura.
3	Alta	Condiciones criticas con riesgo de afectación operacional.	Alarmas criticas activas. Desviaciones significativas. Tendencia al empeoramiento.	Reducción significativa de apertura. Protección activa.
4	Crítica	Condición critica con alto riesgo de shutdown.	Alarmas criticas persistentes. Sobrepresión / Sobrenivel. Riesgo inminente de shutdown.	Cierre de emergencia (0 % apertura). Protección máxima.

Fuente: El autor

Estrategia de recuperación

Una vez controlado el evento crítico, el sistema activa una fase de recuperación gradual para llevar el pozo de vuelta a sus parámetros normales sin volver a disparar las alarmas de campo. En lugar de abrir la válvula de golpe, el algoritmo incrementa la apertura por etapas, lo que amortigua los picos de flujo y mantiene estable la presión en la línea.

Esta reapertura automática se gestiona mediante temporizadores ajustables en el PLC, los cuales evalúan que las variables se mantengan en rangos seguros antes de dar el siguiente paso. De esta forma, el sistema ajusta el ritmo de recuperación según la respuesta real del pozo, protegiendo la producción continua ante transitorios complejos.

A diferencia de las estrategias tradicionales que reabren de forma abrupta, el método Slow Recovery actúa como un amortiguador entre el estado de falla y la operación normal. Esta transición suave evita oscilaciones secundarias en la presión, previene reincidencias en las alarmas y estabiliza el proceso durante todo el transitorio.

$V(t+1) = V(t) + \Delta V$ donde $V(t)$ representa el porcentaje de apertura de la válvula choke y ΔV corresponde al incremento progresivo aplicado durante la etapa de recuperación. Esta lógica busca prevenir golpes de presión repentinos y reducir las fluctuaciones secundarias que pueden ocurrir al abrir la válvula de manera rápida [8], [9].

Modelo dinámico simplificado del sistema

$$\frac{dP(t)}{dt} = -k_1 \left(P(t) - P_{ref}\right) - k_2 u(t)$$

donde $P(t)$ representa la presión del sistema, P_{ref} corresponde a la presión de referencia operacional, $u(t)$ es la acción de control aplicada sobre la válvula choke y k_1, k_2 representan constantes dinámicas asociadas al comportamiento hidráulico del proceso.

Esta formulación permite modelar el proceso mediante una dinámica simplificada de primer orden bajo la supervisión de un control híbrido por eventos[17], [22]–[26]. Con esta aproximación, la acción sobre la válvula altera directamente la respuesta transitoria de la presión ante los cambios bruscos en el flujo multifásico.

En términos de estabilidad operacional, la estrategia está diseñada para conducir el sistema hacia una zona segura de trabajo, siempre que la respuesta del algoritmo sea proporcional a la magnitud del evento y los cambios entre niveles de severidad no ocurran de forma acelerada. Bajo este criterio, la arquitectura busca preservar un comportamiento estable durante las transiciones entre los diferentes estados operacionales, siguiendo los principios generales de los sistemas híbridos[26]. No obstante, la estabilidad formal del sistema mediante métodos analíticos constituye un aspecto que deberá ser evaluado en trabajos posteriores.

Asimismo, la combinación de la reapertura gradual con las reglas jerárquicas de mitigación busca reducir las oscilaciones causadas por movimientos bruscos de la válvula[8],[9]. Esto facilita transiciones suaves entre los estados de falla y favorece el retorno del pozo a un estado operativo seguro.

RESULTADOS

Entorno experimental

La validación del sistema Autochoque 1.0 se realizó sobre una plataforma industrial con PLC, SCADA e instrumentación de campo, orientada a detectar y mitigar las perturbaciones por cambios de presión, nivel y dinámicas transitorias del pozo. La prueba permitió evaluar la lógica de clasificación por severidades y la respuesta automática en la válvula de estrangulación.

El montaje experimental incluyó sensores de presión y nivel, módulos de entradas y salidas analógicas/digitales, red industrial

EtherNet/IP y la pantalla SCADA para la supervisión en tiempo real, el registro de tendencias y la administración de alarmas. En el controlador se programó la jerarquía de severidades, las rutinas de mitigación y la secuencia de reapertura gradual.

Durante las pruebas en campo se registraron de manera continua la presión de línea, la posición de la válvula choke, la activación de alarmas y los tiempos de falla. El sistema respondió ante las desviaciones del proceso aplicando cierres progresivos y activando las protecciones por etapas.

Por su parte, la rutina de recuperación gradual se ejecutó únicamente cuando las variables de proceso se mantuvieron estables durante el tiempo de validación programado en el PLC, lo que previno aperturas bruscas que pudieran desestabilizar nuevamente la línea.

Desempeño operacional del sistema

Los resultados confirmaron que la estrategia Autochoque 1.0 responde de forma autónoma ante los transitorios del proceso, reduciendo la necesidad de maniobras manuales por parte del operador y manteniendo la estabilidad en los puntos críticos de trabajo. Durante la fase de pruebas, la plataforma registró 62 intervenciones automáticas ante perturbaciones sin que se disparara un solo paro de emergencia (shutdown). De igual forma, el algoritmo respondió en menos de 3 s ante picos de presión y logró una tasa de recuperación automática por encima del 90 % frente a variaciones en el flujo multifásico.

La Figura 4. Ilustra la respuesta en el tiempo de la presión de línea, la posición de la válvula choke y el nivel de severidad determinado por el PLC. En la tendencia se aprecia cómo el algoritmo detecta la perturbación a tiempo, aplica un cierre por etapas para contener la sobrepresión y ejecuta la reapertura gradual hasta estabilizar el flujo.

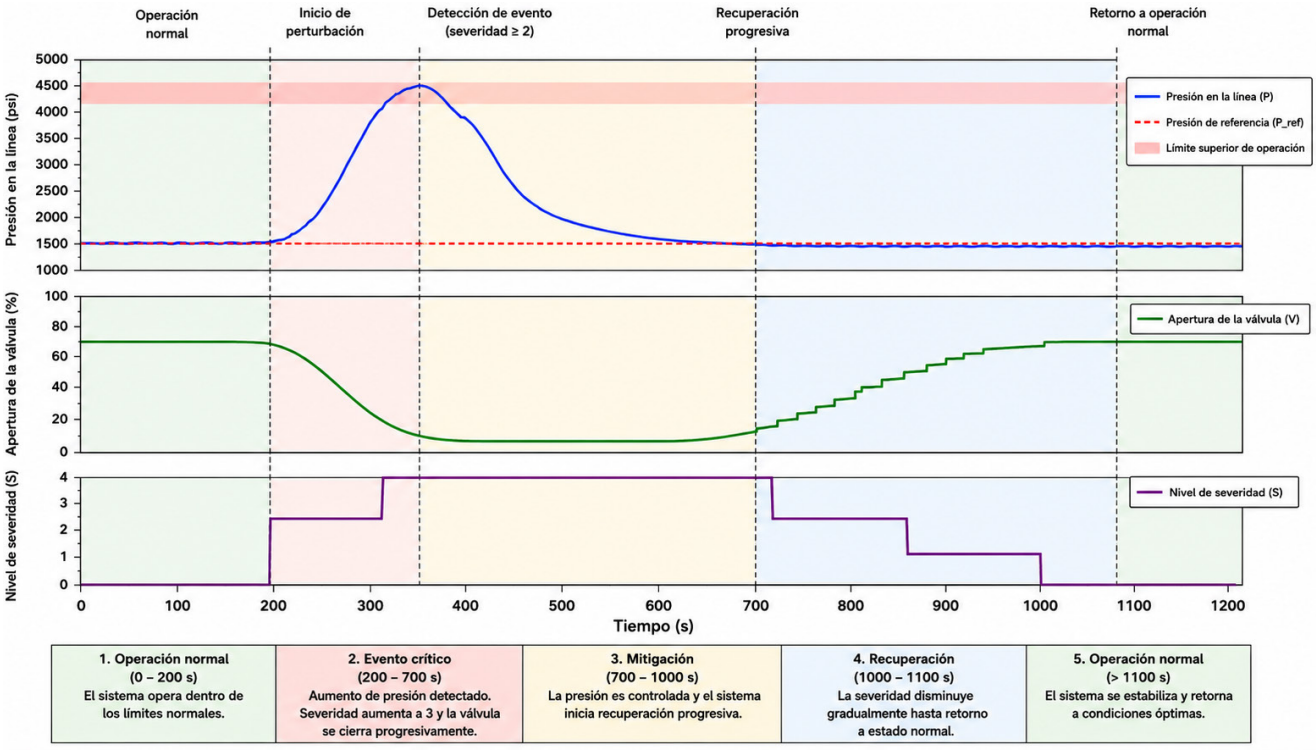


Fig. 4. *Respuesta dinámica del sistema Autochoque 1.0.*
Fuente: El autor.

Las pruebas en planta demuestran que el sistema mejora la disponibilidad operativa frente al control manual tradicional, sobre todo en transitorios de alta variabilidad donde el tiempo de reacción del operador resulta insuficiente.

Ante subidas anormales de presión o alarmas persistentes, el controlador responde según el nivel de falla. En condiciones de severidad media, aplica cierres moderados en la válvula choke, mientras que ante eventos críticos activa cierres más acelerados para evitar el disparo por shutdown.

Las pruebas confirmaron que la lógica por niveles logra filtrar perturbaciones menores de fallas graves. Esto evita que el sistema reaccione de forma exagerada ante cambios transitorios y previene paros totales innecesarios.

El monitoreo constante de las variables clave estabilizó la operación frente a las variaciones bruscas de presión y los baches de flujo multifásico habituales en la línea.

Por último, la reapertura gradual permitió devolver el pozo a sus parámetros normales mediante escalones de posición en la válvula. Esta estrategia redujo la reincidencia de alarmas críticas y eliminó las oscilaciones de presión durante producción.

Análisis comparativo

Al comparar la arquitectura Autochoque 1.0 con la operación manual o el control PID convencional, la estrategia propuesta mostró mayor flexibilidad para gestionar transitorios y adaptarse a la variabilidad observada durante las pruebas. Este comportamiento es consistente con trabajos que han reportado ventajas del control automático del choke y de estrategias avanzadas frente a condiciones operacionales variables[1],[2],[6],[13],[14].

El control manual depende directamente del criterio y del tiempo de reacción del operador, por lo que puede presentar variabilidad en la respuesta ante una falla. Por su parte, los lazos PID tradicionales pueden presentar degradación en su desempeño cuando operan ante no linealidades, cambios bruscos de presión y variaciones significativas del punto de operación[13],[14]. Estas limitaciones han motivado el desarrollo de estrategias robustas, predictivas y adaptativas para aplicaciones de control de presión mediante válvulas choke [15]–[21].

En cambio, la lógica híbrida del algoritmo combina la jerarquía de severidades con el monitoreo continuo, ejecutando acciones diferenciadas según la gravedad del evento. Esta respuesta por etapas mejora la mitigación preventiva y evita que una perturbación menor escale hasta un paro total del pozo (shutdown).

En la Tabla 3 se comparan los esquemas de operación manual, control PID y la arquitectura Autochoque 1.0, considerando el comportamiento observado durante las pruebas de campo y antecedentes reportados en la literatura para control automático y avanzado de válvulas choke[1],[2], [13]–[21].

Tabla 3: Comparación de estrategias de control: Manual vs PID vs Autochoque 1.0.

Criterio	Manual	PID Convencional	Autochoque 1.0 (Propuesta)
Tiempo de respuesta	Alto (variable)	Medio (seg-min)	Bajo (< 3 s)
Shutdown operacional	Frecuente	Moderado	Reducido (>45% de reducción)
Recuperación automática	Baja	Media	Alta (>90% recovery)
Intervención del operador	Alta	Media	Baja (autónoma)
Estabilidad operacional	Baja	Media	Alta
Adaptabilidad a perturbaciones	Baja	Media	Alta (niveles de severidad)
Prevención de eventos críticos	Baja	Media	Alta (mitigación progresiva)
Recuperación progresiva (Slow Recovery)	No aplica	Limitada o no implementada	Sí (incrementos graduales)
Dependencia de infraestructura avanzada	No	Media	Baja (PLC/SCADA estándar)
Compatibilidad con instalaciones existentes	Sí	Media	Alta (estrategia de retrofit)
Complejidad de implementación	Baja	Media	Media
Costo de implementación	Bajo	Alto (modelos, infraestructura)	Medio (infraestructura estándar)
Continuidad de producción	Baja	Media	Alta (mayor disponibilidad)
Capacidad de trabajo en condiciones múltiples	Baja	Media	Alta (eventos transitorios)

Fuente: El autor

Asimismo, la reapertura gradual ofrece una ventaja frente a una apertura abrupta, ya que permite estabilizar las variables de proceso antes de llevar el pozo nuevamente a su condición normal de producción. Este comportamiento es consistente con el uso del choke como elemento activo para mitigar oscilaciones del flujo multifásico reportado en otros estudios[8],[9].

Desde el punto de vista del control aplicado, la capacidad de diferenciar perturbaciones menores de condiciones de falla de mayor severidad constituye una característica distintiva de la estrategia propuesta frente a un lazo PID convencional. Esta característica resulta especialmente relevante en flujos multifásicos, donde pueden presentarse no linealidades y una elevada variabilidad operacional [6]–[10],[17].

Dinámica de recuperación progresiva

La fase de Slow Recovery mantuvo un comportamiento estable al restablecer la producción tras controlar los eventos críticos. El algoritmo aplicó escalones de apertura en la válvula únicamente cuando la presión y el nivel permanecieron dentro de los límites seguros durante los tiempos de validación en el PLC.

Este criterio eliminó los rebrotes de alarmas y evitó las fluctuaciones que suelen causar las aperturas bruscas. La lógica adaptativa redujo las oscilaciones en la línea, protegiendo la continuidad del flujo durante el transitorio de reapertura.

En conjunto, las pruebas demuestran que integrar rutinas de recuperación supervisada es una alternativa efectiva para aumentar la resiliencia en pozos con flujo multifásico, donde los eventos críticos y las variaciones de presión son recurrentes.

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que Autochoque 1.0 constituye una alternativa eficaz para mitigar fallas críticas en sistemas petroleros multifásicos bajo las condiciones evaluadas. A diferencia del control PID tradicional o la maniobra manual, la arquitectura integra una supervisión híbrida por severidades y una rutina de Slow Recovery enfocada en proteger la estabilidad del proceso.

La utilización de válvulas choke como elementos activos de regulación y mitigación de perturbaciones ha mostrado resultados favorables en aplicaciones de producción y sistemas multifásicos[1], [4]–[9].

La jerarquía por niveles logró diferenciar los transitorios menores de las condiciones de falla de mayor severidad, evitando respuestas excesivas del PLC y contribuyendo a prevenir paros no programados (shutdowns). Esta capacidad de respuesta resulta especialmente relevante en líneas multifásicas, donde pueden presentarse no linealidades y cambios bruscos de flujo [6]–[10],[17].

Desde el control automático, el algoritmo actúa como un sistema de supervisión orientado a eventos, al combinar variables continuas del proceso con transiciones discretas asociadas a las condiciones de severidad [22]–[26]. Esta característica proporciona una respuesta diferente a la de los lazos PID convencionales, los cuales actúan de forma continua y pueden presentar limitaciones de desempeño frente a cambios importantes del punto de operación y dinámicas no lineales[13],[14]. En este sentido, Autochoque 1.0 no busca sustituir necesariamente el control continuo existente, sino incorporar una capa de supervisión para responder ante eventos operacionales críticos.

Por su parte, la reapertura gradual mostró un comportamiento favorable frente a una apertura abrupta. Aplicar incrementos por etapas con validación en el PLC permitió reducir las oscilaciones de presión y la reincidencia de alarmas críticas durante el restablecimiento de la producción. Este resultado es consistente con investigaciones en sistemas multifásicos que muestran que la manipulación controlada de la apertura del choke influye directamente sobre la amplitud de las fluctuaciones de presión y puede utilizarse como mecanismo de estabilización[8],[9].

Una ventaja clave para la industria es que el algoritmo corre en plataformas PLC/SCADA estándar[29],[30]. Esto permite instalarlo sobre infraestructura existente mediante estrategias de retrofit, sin requerir necesariamente la incorporación de plataformas de control predictivo de mayor complejidad. Esta característica puede facilitar su aplicación en instalaciones existentes con restricciones de infraestructura o capacidad de procesamiento.

Sin embargo, el sistema depende de la calibración precisa de la instrumentación y del ajuste manual de umbrales según el pozo. Además, las pruebas se hicieron bajo condiciones específicas de campo y el modelo dinámico usó una aproximación simplificada de primer orden. Por ello, trabajos futuros deben incluir modelos multifásicos avanzados, pruebas formales de estabilidad y mecanismos de autoajuste adaptativo[17],[20],[21],[26].

Como desarrollo posterior, se contempla integrar algoritmos predictivos para la adaptación automática de severidades, el ajuste dinámico de parámetros y la detección temprana de fallas en producción[16],[18],[20],[21]. Estas herramientas podrían complementar la lógica basada en eventos, manteniendo la arquitectura supervisora propuesta y permitiendo ajustar sus parámetros de acuerdo con la evolución dinámica del proceso.

CONCLUSIONES

La estrategia Autochoque 1.0 consolidó un esquema autónomo de mitigación y recuperación operacional, reduciendo la ocurrencia de eventos críticos durante transitorios complejos en pozos multifásicos.

La arquitectura integró supervisión por severidades, cierres escalonados en la válvula choke y la rutina Slow Recovery, preservando la estabilidad del proceso y previniendo disparos por shutdown.

La lógica híbrida basada en eventos demostró ser superior al control manual y PID convencional al filtrar fluctuaciones menores de fallas persistentes, mejorando la continuidad de flujo y reduciendo la intervención humana.

La implementación directa sobre PLC/SCADA estándar confirma su viabilidad técnica y económica, ofreciendo una alternativa de bajo costo para modernizar la infraestructura de producción en campos maduros.

Este desarrollo sienta la base para incorporar a futuro algoritmos predictivos, esquemas adaptativos e inteligencia artificial aplicada al control autónomo en pozos y facilidades de producción.

En términos industriales, los resultados confirman que Autochoque 1.0 incrementa la resiliencia operativa y optimiza el tiempo en línea de los sistemas de producción sometidos a perturbaciones severas.

REFERENCIAS

[1] P. Kittilsen, K. Fjalestad, I. L. Sperle, and R. Aasheim, “Robust Automatic Well Choke Control – Physical Constraint Based Operation,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 7, pp. 296–301, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.308

[2] P. Kittilsen, K. Fjalestad, and R. Aasheim, “Stabilized and Increased Well Production Using Automatic Choke Control,” in Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (ADIPEC), Abu Dhabi, UAE, 2014, SPE-171859-MS. https://doi.org/10.2118/171859-MS

[3] F. C. Diehl, T. O. Machado, T. K. Anzai, C. S. Almeida, C. A. Moreira, G. A. Nery, M. C. M. M. Campos, M. Farenzena, and J. O. Trierweiler, "10% increase in oil production through a field applied APC in a Petrobras ultra-deepwater well," *Control Engineering Practice*, vol. 91, Art. no. 104108, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104108

[4] A. Plucenio, M. Campos, and A. F. Teixeira, "New Developments in the Control of Fluid Dynamics of Wells and Risers in Oil Production Systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 6, pp. 97–103, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.016

[5] M. Campos, T. Takahashi, F. Ashikawa, S. Simões, A. Stender, and O. Meien, "Advanced Anti-slug Control for Offshore Production Plants," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 6, pp. 83–88, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.014

[6] E. Jahanshahi, S. Skogestad, and A. H. Helgesen, "Controllability analysis of severe slugging in well-pipeline-riser systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 8, pp. 101–108, 2012. https://doi.org/10.3182/20120531-2-NO-4020.00014

[7] G. A. de Andrade and D. J. Pagano, "Boundary control for stabilization of slugging oscillations," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 6, pp. 77–82, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.013

[8] X. Zhao, Q. Xu, J. Fu, Y. Chang, Q. Wu, and L. Guo, "Study on eliminating severe slugging by manual and automatic choking in long pipeline-riser system," *Chemical Engineering Science*, vol. 292, Art. no. 119978, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.119978

[9] V. Banjara, C. Avila, D. Murugavel, and E. Pereyra, "Severe slugging mitigation by utilizing the active use of choke control valve," *Applied Ocean Research*, vol. 158, Art. no. 104547, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104547

[10] J. Chen, L. Dai, L. Xu, L. Zhou, P. Li, and S. Zou, "Optimization of Installation Position of Choke Valve for Severe Slugging Control on FPSO Units in Offshore Oilfield," *Processes*, vol. 14, no. 7, Art. no. 1164, 2026. https://doi.org/10.3390/pr14071164

[11] M. Leporini, A. Terenzi, and B. Marchetti, "Improvement of a multiphase flow model for wellhead chokes under critical and subcritical conditions using field data," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 11, pp. 1487–1503, 2021. https://doi.org/10.1007/s13202-021-01114-4

[12] S. A. Alarifi, "Workflow to predict wellhead choke performance during multiphase flow using machine learning," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 214, Art. no. 110563, 2022. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110563

[13] G. Nygaard and G. Nævdal, "Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling," *Journal of Process Control*, vol. 16, no. 7, pp. 719–732, 2006. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2006.01.002

[14] L. A. Carlsen, G. Nygaard, and M. Nikolaou, "Evaluation of control methods for drilling operations with unexpected gas influx," *Journal of Process Control*, vol. 23, no. 3, pp. 306–316, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2012.12.003

[15] D. G. Reitsma and Y. Couturier, "New Choke Controller for Managed Pressure Drilling," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 8, pp. 223–230, 2012. https://doi.org/10.3182/20120531-2-NO-4020.00049

[16] U. J. F. Aarsnes, B. Açıkmeşe, A. Ambrus, and O. M. Aamo, "Robust controller design for automated kick handling in managed pressure drilling," *Journal of Process Control*, vol. 47, pp. 46–57, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.09.001

[17] U. J. F. Aarsnes, T. Flåtten, and O. M. Aamo, "Review of two-phase flow models for control and estimation," *Annual Reviews in Control*, vol. 42, pp. 50–62, 2016. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.06.001

[18] J. Park, C. Price, D. Pixton, M. Aghito, R. Nybø, K. Bjørkevoll, and J. D. Hedengren, "Model predictive control and estimation of managed pressure drilling using a real-time high fidelity flow model," *ISA Transactions*, vol. 105, pp. 256–268, 2020. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.035

[19] O. Erge, Q. Gu, D. Chen, and E. van Oort, "MPD choke control considering the thixotropic gelation behavior of drilling fluids," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 208, Art. no. 109793, 2022. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109793

[20] S. Naderi Lordejani, B. Besselink, W. H. A. Schilders, and N. van de Wouw, "Model complexity reduction and controller design for managed pressure drilling automation," *Journal of Process Control*, vol. 122, pp. 69–83, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.11.012

[21] Z. Li, N. Hovakimyan, and G.-O. Kaasa, "Bottom hole pressure estimation and adaptive control in managed pressure drilling system," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 31, no. 4, pp. 545–561, 2017. https://doi.org/10.1002/acs.2672

[22] P. Tabuada, "Event-Triggered Real-Time Scheduling of Stabilizing Control Tasks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 9, pp. 1680–1685, 2007. https://doi.org/10.1109/TAC.2007.904277

[23] W. P. M. H. Heemels, K. H. Johansson, and P. Tabuada, "An introduction to event-triggered and self-triggered control," in Proc. 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012, pp. 3270–3285. https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6425820

[24] W. P. M. H. Heemels and M. C. F. Donkers, "Model-based periodic event-triggered control for linear systems," *Automatica*, vol. 49, no. 3, pp. 698–711, 2013. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.025

[25] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 25, no. 1, pp. 206–230, 1987. https://doi.org/10.1137/0325013

[26] M. S. Branicky, "Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, no. 4, pp. 475–482, 1998. https://doi.org/10.1109/9.664150

[27] P. Goel, A. Datta, and M. S. Mannan, "Industrial alarm systems: Challenges and opportunities," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 50, pp. 23–36, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.09.001

[28] F. E. Mustafa, I. Ahmed, A. Basit, U.-E.-H. Alvi, S. H. Malik, A. Mahmood, and P. R. Ali, "A review on effective alarm management systems for industrial process control: Barriers and opportunities," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 41, Art. no. 100599, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100599

[29] F. J. Folgado, D. Calderón, I. González, and A. J. Calderón, "Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision

Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends," *Electronics*, vol. 13, no. 4, Art. no. 782, 2024. https://doi.org/10.3390/electronics13040782

[30] G. Yadav and K. Paul, "Architecture and security of SCADA systems: A review," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 34, Art. no. 100433, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100433

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Diego Fernando Molina Ortega, Camilo Ernesto Pardo Beainy, Edgar Andrés Gutiérrez Cáceres.

Redacción - revisión y edición: Diego Fernando Molina Ortega, Camilo Ernesto Pardo Beainy, Edgar Andrés Gutiérrez Cáceres.