



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

**“IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE FUNCIONALES OBJETIVO EN
SISTEMAS DE CONTROL E INCORPORANDO HERRAMIENTAS DE
OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA EN PROCESOS QUÍMICOS”**

PRESENTA:

ING. HENRY FABIAN MARCILLO CHANGOLUISA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ENRIQUE JAIME LEAL

Aguascalientes, Ags., México

Enero del 2026



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **19/enero/2026**

Oficio No. DEPI 058/2026

Asunto: Autorización impresión tesis

C. HENRY FABIAN MARCILLO CHANGOLUISA
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos **constar** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: **"Implementación y evaluación de funcionales objetivo en sistemas de control e incorporando herramientas de optimización estocástica en procesos químicos"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE


DR. JOSÉ ENRIQUE JAIME LEAL

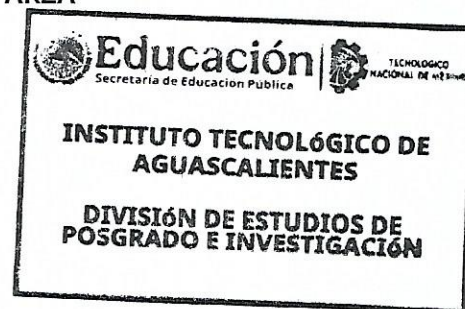
SECRETARIO


DR. JAIME MORENO PÉREZ

VOCAL


DR. JOSÉ CRUZ MUÑOZ ESPARZA

ccp. Archivo
JFLH/yevo



2026
año de
**Margarita
Maza**





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
«Departamento»

Ciudad de México, **16/enero/2026**

Asunto: **Oficio de originalidad**

**CONSEJO DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE**

El director de tesis de el alumno C. **Henry Fabián Marcillo Changoluiza**, estudiante de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Química** con número de control **G24153062**, hace constar que, después de haber realizado la revisión del informe de originalidad generado con la herramienta Turnitin, el trabajo **“Implementación y Evaluación de Funcionales Objetivo en Sistemas de Control e Incorporando Herramientas de Optimización Estocástica en Procesos Químicos”** es original conforme a los criterios establecidos. El porcentaje de similitud es de **20 %** y se adjunta resumen del reporte.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

Vo.Bo.

DR. JOSÉ ENRIQUE JAIME LEAL
DIRECTOR DE TESIS
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUÍMICA

DRA. NORMA AUREA RANGEL VÁZQUEZ
COORDINADORA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUÍMICA

ccp. Archivo



2026
año de
Margarita Maza





AUTORIZACIÓN DE USO DE DERECHOS DE AUTOR OTORGADO POR

Henry Fabián Marcillo Changoluiza, mayor de edad, con domicilio ubicado en **Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Bona Gens**, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada **“Implementación y Evaluación de Funcionales Objetivo en Sistemas de Control e Incorporando Herramientas de Optimización Estocástica en Procesos Químicos”** quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrá por las clausulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: EL AUTOR Y/O TITULAR, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada **“Implementación y Evaluación de Funcionales Objetivo en Sistemas de Control e Incorporando Herramientas de Optimización Estocástica en Procesos Químicos”**, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, EL AUTOR Y/O TITULAR autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de **EL AUTOR Y/O TITULAR**, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA – AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

Aguascalientes, Aguascalientes, a 16 días del mes de enero de 2026.

Autor de la Tesis

C. Henry Fabián Marcillo Changoluiza

Director de Tesis

Dr. José Enrique Jaime Leal



2026
año de
Margarita Maza



AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme escribir estas palabras, por guiar mi camino día a día y haber conseguido este pequeño logro.

A mi familia por darme la fortaleza y la fuerza, las palabras de aliento que tanto necesité en este trayecto.

A mis grandes amigos y maravillosas personas que conocí en este hermoso país, México.

A los excelentes profesionales que brindaron sus conocimientos en las aulas de tan sublime institución.

Un agradecimiento especial al Dr. José Enrique Jaime Leal, por su tiempo y paciencia, por ir más allá de enseñanza técnica y científica, por llegar a la parte curiosa de todo estudiante; infinitas gracias.

Y finalmente a la Secretaria de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la gran oportunidad y apoyo económico para el desarrollo de este trabajo de investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	5
1.5.1 Dominio de Aplicación	5
1.5.2 Alcance Metodológico	6
1.5.3 <i>Benchmarking</i> y Validación.....	6
1.5.4 Limitaciones.....	6
1.5.5 Modelo de Perturbaciones.....	6
2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Fundamentos de Estrategias de Control	7
2.1.1 Control PID	7
2.1.2 Control por Modos Deslizantes.....	8
2.2 Índices de Desempeño.....	8
2.2.1 Criterios Basados en la Integral del Error	9
2.2.2 Característica de la Respuesta Transitoria	10
2.3 Optimización con Restricciones.....	10
2.3.1 Problemas de Optimización	10
2.3.2 Métodos de Penalización	11

2.4	Algoritmos Metaheurísticos de Optimización.....	11
2.4.1	Optimización por Enjambre de Partículas.....	11
2.4.2	Evolución Diferencial	11
2.4.3	Búsqueda de Cucú.....	12
2.4.4	Algoritmo de Flujo de una Corriente de Agua.....	12
2.5	Dinámicas de Sistemas.....	12
2.5.1	Sistemas de Fase No Mínima.....	12
2.5.2	Sistemas con Retardo de Tiempo.....	13
3	METODOLOGÍA.....	14
3.1	Enfoque General.....	14
3.1.1	Selección y Clasificación Estructural de Casos de Estudio	14
3.1.2	Implementación y Validación Cualitativa de Modelos	14
3.1.3	Optimización Estocástica y Establecimiento del Óptimo	14
3.1.4	Evaluación Sistemática y Estadística del Rendimiento Final	15
3.2	Selección y Descripción de Casos de Estudio.....	15
3.2.1	Caso de Estudio 1: Diseño de controlador PID mediante algoritmo PSO para sistemas de reactores CSTR.....	15
3.2.2	Caso de Estudio 2: Análisis del rendimiento de un reactor químico isotérmico mediante controladores PID, SSC y SMC.	16
3.2.3	Caso de Estudio 3: Diseño de control de estructura variable de plantas de proceso basado en el enfoque de modo deslizante	18
3.2.4	Caso de Estudio 4: Comparación de esquemas de control para reactores químicos tipo CSTR.....	19
3.2.5	Protocolo de Simulación Numérica	20
3.3	Estrategias de Control y Algoritmos de Optimización.....	20
3.3.1	Modelos de Controladores	20
3.3.2	Estrategia de Optimización:	22
3.3.3	Selección de Algoritmos de Optimización.....	23

3.4	Formulación de la Función Objetivo.....	24
3.4.1	Índices de Desempeño Para la Línea base	24
3.4.2	Diseño de la Función Objetivo Compuesta con Restricción de Sobreimpulso	25
3.5	Protocolo de Evaluación Estadística	28
3.5.1	Estandarización del Esfuerzo Computacional.....	28
3.5.2	Mecanismo de Protección contra Inestabilidad.....	29
3.5.3	Recolección de Datos y Métricas Estadísticas	30
3.5.4	Definición de Restricciones para la Fase Compuesta	30
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1	Comparación de Índices de Desempeño Base.....	31
4.1.1	Análisis del Caso de Estudio 1.....	31
4.1.2	Análisis del Caso de Estudio 2.....	33
4.1.3	Análisis del Caso de Estudio 3.....	36
4.1.4	Análisis del Caso de Estudio 4.....	39
4.2	Evaluación Global de Estrategia de Control y Validación.....	41
4.2.1	Análisis del Caso de Estudio 1.....	42
4.2.2	Análisis del Caso de Estudio 2.....	51
4.2.3	Análisis del Caso de Estudio 3.....	61
4.2.4	Análisis del Caso de Estudio 4.....	69
4.3	Análisis Comparativo de Algoritmos de Optimización	79
4.3.1	Evaluación de Tasa de Éxito	79
4.3.2	Evolución de Convergencia	80
4.4	Análisis de Sensibilidad de Hiperparámetros.....	83
5	CONCLUSIONES.....	85
6	REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Justificación de los Algoritmos Seleccionados	24
Tabla 3.2. Análisis Comparativo de Funciones de Penalización y Justificación de Selección.	27
Tabla 3.3. Configuración del espacio de búsqueda para la optimización.	29
Tabla 4.1. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 1.....	34
Tabla 4.2. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 2.....	34
Tabla 4.3. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 3.....	38
Tabla 4.4. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 4.....	38
Tabla 4.5. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 1.	45
Tabla 4.6. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 1.	45
Tabla 4.7. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 1	49
Tabla 4.8. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 1	49
Tabla 4.9. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 2.....	53
Tabla 4.10. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 2.	53
Tabla 4.11. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 2.	58
Tabla 4.12. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 2.....	58
Tabla 4.13. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 3.....	63
Tabla 4.14. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 3.	63
Tabla 4.15. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 3.	67

Tabla 4.16. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 3.	67
Tabla 4.17. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 4.	72
Tabla 4.18. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 4.	72
Tabla 4.19. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 4.	76
Tabla 4.20. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 4.	76
Tabla 4.21. Tasa de éxito (%) de los algoritmos de optimización en la sintonización base bajo los criterios de error ISE, ITSE, IAE e ITAE.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Características de desempeño para la respuesta al escalón de un proceso subamortiguado.	10
Figura 3.1. Representación esquemática de la función propuesta.....	26
Figura 4.1. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 1).....	32
Figura 4.2. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 2).....	35
Figura 4.3. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 3).....	37
Figura 4.4. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 4).....	40
Figura 4.5. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1 (ISE).....	43
Figura 4.6. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1 (ITSE)	47
Figura 4.7. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1 (IAE).....	48
Figura 4.8. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1 (ITAE)	50
Figura 4.9. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2 (ISE).....	52
Figura 4.10. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2 (ITSE)	55
Figura 4.11. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2 (IAE).....	57
Figura 4.12. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2 (ITAE)	60
Figura 4.13. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3 (ISE)	62
Figura 4.14. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3 (ITSE)	65
Figura 4.15. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3 (IAE).....	66
Figura 4.16. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3 (ITAE)	68
Figura 4.17. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4 (ISE)	70
Figura 4.18. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4 (ITSE)	73
Figura 4.19. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4 (IAE).....	75
Figura 4.20. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4 (ITAE)	78
Figura 4.21. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 1 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.	80
Figura 4.22. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 2 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.	81
Figura 4.23. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 3 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.	82
Figura 4.24. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 4 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.	82
Figura 4.25. Análisis de sensibilidad para el Caso de Estudio 3 (IAE): Comparativa de la respuesta temporal bajo diferentes ponderaciones de los hiperparámetros α_1 y α_2	84

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) es el instrumento más fundamental en la automatización industrial, empleado esencial para la regulación de variables críticas como la presión, temperatura, caudal y velocidad en procesos complejos. El posicionamiento del PID en la industria se ve reflejado en su solidez económica, con un mercado global que se proyecta crecer hasta cerca de 1.94 millones de dólares para el año 2029. La evidencia de la importancia del controlador PID es; su aplicación en sectores intensivos en procesos como la producción química, el petróleo y gas, la industria farmacéutica, el procesamiento de alimentos y bebidas, donde la alta actividad, la eficiencia y el cumplimiento de normas operacionales son fundamentales para el éxito. En este contexto, los responsables de la toma de decisiones han priorizado plataformas fiables de control de procesos para reforzar la continuidad y trascendencia del negocio. El mercado se orienta hacia el perfeccionamiento continuo de la tecnología PID para asegurar la estabilidad operativa y la gestión de procesos multivariables, afirmando que la necesidad de mecanismos de control altamente precisos y estables es la clave para la competitividad industrial (Fortune Business Insight, 2025; Research and Markets, 2025).

Los fenómenos naturales, y por ende cualquier tipo de sistema, puede ser representado (hasta cierto grado) mediante los denominados modelos, que son estructuras matemáticas de los mecanismos que los gobiernan (Tedeschi, 2006). El modelado matemático es una herramienta indispensable en la ingeniería, empleada para diseñar y optimizar sistemas, como el análisis de estructuras o en el control de procesos. Esta versatilidad se debe a que pueden representar desde sistemas simples hasta sistemas de complejidad considerable, permitiendo estimar o predecir de manera incluso precisa los casos de estudio mediante la implementación de herramientas óptimas (Debreu, 1984; Adiga, y otros, 2020; Destro & Barolo, 2022).

La introducción de sistemas inteligentes en la ingeniería de procesos se estableció fuertemente debido a la premisa de que el conocimiento es la ventaja competitiva trascendental en la fabricación industrial (Stephanopoulos & Han, 1996). Tecnologías como los sistemas expertos, las redes neuronales y los sistemas difusos impulsaron el desarrollo de una Inteligencia Artificial (IA) útil, aplicable al diseño y práctica de la ingeniería.

El objetivo de un sistema de control es mantener un conjunto de parámetros de proceso en un punto fijado o rastrearlas a lo largo de una trayectoria de referencia establecida. Esto se logra de manera eficiente mediante la retroalimentación de cierta información medida del proceso (control de bucle cerrado) (Winkler & Neubert, 2014).

En la industria de procesos el comportamiento de los equipos y etapas suelen ser sistemas muy complejos, tienen retardos temporales y pueden presentar distintos tipos de no linealidades. Por lo tanto, no siempre es posible controlarlos con un esquema de control clásico. No obstante, el controlador PID sigue siendo uno de los más implementados dentro de la industria, y una de las principales razones es su relativa facilidad de sintonización (Kumar, Singla, & Chopra, 2015).

A la hora de diseñar un controlador PID, la correcta sintonización de sus parámetros (K_p, K_i, K_d) es fundamental. Muchas plantas industriales exigen un rigor estricto ante problemas de alto orden, retardos y no linealidades. A lo largo de los años, se han propuesto varios métodos típicos para la sintonización, como el método de Ziegler y Nichols o métodos basados en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, con el desarrollo de la tecnología informática y la inteligencia artificial, han surgido algoritmos avanzados para la sintonización óptima de los controladores PID, como el Algoritmo Genético (GA), el Algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) (Ou & Lin, 2006) (Zhou & Liao, 2013), el Algoritmo de Evolución Diferencial (DE) (Storn & Price, 1997), *Cuckoo Search* o Algoritmo de Búsqueda de Cuco (CS) (Yang & Deb, 2017) y *Lake Algorithm* o Algoritmo del Flujo de una Corriente de Agua (FS) (Esparza & Leal, 2024). Estos métodos son esenciales para superar las limitaciones de los enfoques clásicos y abrir el camino a una optimización de desempeño que cumpla las nuevas exigencias de las empresas (Joseph, Dada, Abidemi, Oyewola, & Khammas, 2022).

No obstante, la capacidad de estas metaheurísticas para la sintonización de los parámetros de un controlador, en la mayoría de los estudios aún se enfocan en la minimización de un solo índice de desempeño (como el Error Absoluto Integral, IAE; el Error Cuadrático Integral, ISE; el Error Absoluto Integral Ponderado por el Tiempo, ITAE; o el Error Cuadrático Integral Ponderado por el Tiempo, ITSE). Esta práctica obliga al diseñador a aceptar un compromiso (*trade-off*) subóptimo entre velocidad y estabilidad. Las aplicaciones existentes requieren cumplir numerosas condiciones de rendimiento simultáneamente, y estas condiciones, como la alta precisión y la eficiencia energética, están usualmente en conflicto. Por ello, la sintonización moderna requiere un enfoque multiobjetivo, donde la función de costo se diseñe explícitamente para integrar la minimización del error con la gestión directa de las restricciones de seguridad operativa (Bernstein, 2002; Bansal, Sharma, & Shreeraman, 2012; Kushwahn & Patra, 2014; Abbasi & Naghavi, 2017).

Adicionalmente, la naturaleza estocástica de los algoritmos metaheurísticos introduce un desafío de fiabilidad. Una solución "óptima" encontrada en una única ejecución puede ser una anomalía estadística, lo que impide asegurar la robustez del controlador. El ajuste de los parámetros del controlador debe lograr objetivos relacionados con la estabilidad, el seguimiento del rendimiento,

el rechazo de perturbaciones y la robustez contra incertidumbres ambientales. Por lo tanto, cualquier metodología avanzada de sintonización debe incluir un análisis estadístico para verificar la consistencia (Fister, Fister, Fister, & Šafarič, 2016). Se debe considerar contrastar el rendimiento de la metodología mencionada contra un estándar de robustez reconocido, como el Control de Modos Deslizantes (SMC), el cual ha demostrado ser eficaz contra las perturbaciones, permitiendo establecer el límite de desempeño y fiabilidad que el PID optimizado debe intentar igualar o superar (Zulu & John, 2014).

1.2 Planteamiento del problema

El diseño de un sistema de control óptimo es fundamental para cualquier industria de procesos, especialmente en sectores críticos como el farmacéutico y el químico, donde la precisión es clave para garantizar la calidad, estabilidad y eficacia del producto final (Benitez Gonzalez, Rivas Perez, Feliu Batlle, & Castillo Garcia, 2015). No obstante, la implementación de enfoques clásicos de sintonización de controladores PID a menudo resulta en un doble efecto indeseable: por un lado, se obtiene un producto de calidad inadecuada y, por otro, se consume ineficientemente grandes cantidades de recursos (Juneja, y otros, 2021). Este bajo rendimiento es consecuencia de la no linealidad característica de los procesos químicos y la existencia inherente de restricciones de entrada y seguridad, factores que dificultan la elección de estrategias de operación óptimas (Rajesh, Gupta, Kusumakar, Jayaraman, & Kulkarni, 2001).

El rendimiento de un controlador se evalúa por el nivel de desviación que ocurre al intentar estabilizar un sistema, la cual está influenciada por factores críticos como el sobreimpulso (M_p), su magnitud y duración, y el tiempo total de estabilización (t_s). Esta desviación se cuantifica mediante índices de desempeño establecidos en la literatura, transformando el ajuste de los parámetros del controlador en un problema de optimización cuyo objetivo es minimizar el costo total representado por dichos índices. Los algoritmos numéricos de control óptimo basado en modelos han recibido mucha atención como enfoques eficaces para resolver estos problemas (Wu, Lei, Zhang, & Cheng, 2017).

Sin embargo, persiste un desafío fundamental: la mayoría de los estudios se enfocan en la optimización de parámetros basándose en un solo índice de desempeño, sin considerar el compromiso que debe existir entre las métricas de velocidad (reducir el error rápidamente) y las restricciones de seguridad (restricción de la desviación máxima transitoria o limitar el sobreimpulso). Este es el problema central: un enfoque de objetivo único resulta insuficiente porque no integra las restricciones explícitas de seguridad requeridas por la industria, lo que conduce a controladores teóricamente

eficientes, pero operativamente inaceptables. Se necesita una función de costo que vincule rigurosamente el desempeño de minimización con los límites de seguridad preestablecidos.

1.3 Justificación

Esta investigación busca analizar a profundidad el control en procesos químicos específicos mediante la evaluación de las funciones objetivo existentes, abordando restricciones de operación a través de la incorporación de técnicas de optimización estocástica. La razón de centrar el estudio en este enfoque radica en la creciente complejidad y variabilidad de los procesos en ingeniería química, donde los métodos deterministas tradicionales pueden resultar insuficientes. Por otra parte, la necesidad de un control riguroso en sectores como la farmacéutica es crucial para garantizar la calidad, estabilidad y eficacia del producto final. Autores como Benitez G., Rivas P., Feliu B., y Castillo G.; Juneja, y colaboradores, mencionan que la ineficiencia del control clásico se traduce en el consumo inadecuado de recursos. Al integrar estrategias estocásticas, se busca superar estas limitaciones, ofreciendo soluciones más robustas y eficientes.

El principal aporte metodológico de esta investigación radica en la formalización y validación de una función objetivo compuesta. A diferencia de los métodos de índice único, este marco permite gestionar el compromiso entre objetivos en conflicto (Jia, Fischer, & Dyer, 1998; Gunantara, 2018). La tesis introduce un mecanismo de barrera hiperbólica, denominada así ya que el término empleado corresponde a una función racional homográfica cuya representación gráfica es una hipérbola rectangular, con asíntota vertical en $Y_{max} = Y_{limite}$, y con asíntota horizontal en el valor nulo ($J = 0$). Este uso de término ‘hiperbólica’ hace referencia a la forma geométrica de la gráfica y no a las funciones hiperbólicas clásicas ($\sinh(x)$, $\cosh(x)$, $\tanh(x)$). De manera complementaria, se emplea una penalización externa sobre el sobreimpulso. Esta estructura garantiza la seguridad operativa al repeler activamente al optimizador de las zonas de inestabilidad, evitando la violación de límites críticos y cumpliendo con los estándares de control riguroso exigidos en procesos críticos (Benitez Gonzalez, Rivas Perez, Feliu Batlle, & Castillo Garcia, 2015).

El estudio contribuye al rigor de la investigación en metaheurísticas. La naturaleza estocástica de los algoritmos exige una validación robusta para asegurar que los resultados sean fiables (Joseph, Dada, Abidemi, Oyewola, & Khammas, 2022). La investigación aborda este desafío mediante un protocolo general de 100 ejecuciones, lo que permite cuantificar la tasa de éxito y la fiabilidad de convergencia de cada algoritmo (Shilane, Martikainen, Dudoit, & Ovaska, 2008). Además, la comparación directa del rendimiento del PID optimizado frente a un controlador avanzado de referencia, como el SMC, establece un estándar de buen desempeño, permitiendo cuantificar el

óptimo balance entre el desempeño dinámico y la seguridad operativa que ofrece el método propuesto. (Zulu & John, 2014).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar y validar una estrategia de sintonización robusta para sistemas de control en procesos químicos, mediante el diseño de una función objetivo compuesta con restricciones de seguridad implementando algoritmos de optimización estocástica.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Seleccionar y caracterizar estructuralmente un conjunto representativo de casos de estudio que actúen como estándares de referencia (*benchmarks*), realizando la validación cuantitativa de sus modelos dinámicos mediante simulación numérica para asegurar la fidelidad del comportamiento transitorio y estacionario.
2. Evaluar las limitaciones de los índices de desempeño convencionales (IAE, ISE, ITSE, ITAE) en la sintonización de controladores, estableciendo una línea base de rendimiento para identificar el compromiso entre la velocidad de respuesta y la estabilidad del sistema.
3. Diseñar una función objetivo compuesta que integre la minimización del error y restricciones de seguridad y mediante el uso de funciones de penalización, permitiendo obtener un balance óptimo entre desempeño dinámico y seguridad operativa.
4. Implementar algoritmos metaheurísticos (PSO, DE, CS y FS) para la optimización de los parámetros de controladores PID y de SMC, aplicando el esquema de evaluación propuesto a los casos de estudio seleccionados.
5. Validar la robustez y fiabilidad de la metodología propuesta mediante un análisis estadístico de tasa de éxito y realizar un estudio comparativo del desempeño frente al control clásico y al SMC.

1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES

La presente investigación se enfoca en el diseño, optimización y validación de estrategias de control para procesos químicos comunes, priorizando específicamente sistemas que presentan desafíos dinámicos no triviales.

1.5.1 Dominio de Aplicación

Este estudio abarca la sintonización de controladores para una selección representativa de cuatro *benchmarks* de procesos, caracterizados principalmente por dinámicas de sistemas de segundo

orden, Segundo Orden más Tiempo Muerto (SOPDT) y con la finalidad de cubrir las principales dificultades de control reportadas en la literatura:

- Sistemas Lineales de Fase No Mínima (NMP): Caso 1.
- Sistemas Lineales NMP, múltiples consignas: Caso 2.
- Sistemas con Retardo de Transporte: Caso 3.
- Sistemas No Lineales de Fase No Mínima: Caso 4.

1.5.2 Alcance Metodológico

La metodología se centra en la implementación de algoritmos metaheurísticos estocásticos (PSO, DE, CS, FS) para la sintonización offline de controladores PID. La propuesta se limita al diseño y validación de una función objetivo compuesta que integra índices de desempeño integrales (IAE, ISE, ITAE, ITSE) con restricciones de operación explícitas a través del uso de funciones de barrera hiperbólica para la limitación del sobreimpulso.

1.5.3 *Benchmarking* y Validación

El análisis comparativo se establece frente a dos estándares: la sintonización reportada en cada caso de estudio, como línea base de desempeño, y SMC como referencia. La validación de los resultados tiene un alcance estadístico, fundamentado en un protocolo de 100 ejecuciones, independientes para cuantificar la tasa de éxito y la fiabilidad de convergencia de los algoritmos.

1.5.4 Limitaciones

El estudio se limita a la simulación numérica mediante el software *MATLAB*. La implementación física en planta piloto o pruebas adicionales queda fuera del alcance de este trabajo.

1.5.5 Modelo de Perturbaciones

Aunque se evalúa la robustez, el análisis se centra en la respuesta ante cambios tipo escalón en la referencia y en la validación de estabilidad. El análisis exhaustivo de rechazo a perturbaciones estocásticas complejas (ruido de sensor de alta frecuencia) no es el foco central de la optimización propuesta.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de Estrategias de Control

La robustez, estabilidad y el eficiente desempeño de los sistemas o plantas ante perturbaciones o dinámicas complejas es abordado por los estudios de diseño de control automático. Este trabajo emplea dos enfoques fundamentales de este ámbito, el control clásico PID y el control SMC.

2.1.1 Control PID

Es la estrategia más usada en la industria debido a su eficacia y simple estructura (Ecuación 2.1), siendo la combinación de tres acciones con sus respectivas ventajas, las cuales se mencionan a continuación (Cusido, 2023):

- La acción proporcional es la encargada de manipular el elemento final de control (válvula y actuador) en proporción al error entre la referencia y la medida de salida del sistema. Su acción es instantánea y agresiva.
- La acción integral es la encargada de manipular la velocidad de movimiento del elemento final de control, la cual es proporcional a la señal del error. Su efecto es conservador y progresivo hasta eliminar la desviación persistente.
- La acción derivativa se encarga de mover el elemento final de control de manera proporcional a la velocidad de cambio del error. Esto genera un efecto de anticipación.

La suma algebraica de cada acción de control conlleva a la ecuación del PID.

$$y = G(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde

y = Salida del controlador

e = Señal de error

G = Ganancia

T_i = Tiempo integral

T_d = Tiempo derivativo

O'dwyer indica que la ecuación por sola no garantiza un desempeño eficiente de la planta, por lo que es necesario determinar las mejores constantes de cada acción mediante el uso de reglas de sintonización, tal como:

- Reglas de sintonización basada en la respuesta al escalón.
- Reglas de sintonización basado en minimización de índices de desempeños.
- Reglas de sintonización por método de oscilación última.
- Otras reglas que dependan de la ganancia proporcional para lograr una razón de decaimiento de un cuarto del primer sobreimpulso.

2.1.2 Control por Modos Deslizantes

El control por modos deslizante es una interesante propuesta de control no lineal derivado de los sistemas de estructura variable, lo que lo vuelve robusto frente a incertidumbres de los modelos analizados.

Uno de los trabajos más extensos del estudio de este tipo de controlador, es el de (Utkin, 2003) quien explica que el SMC obliga a los estados del sistema a alcanzar y mantenerse en una superficie establecida en espacio de estados (superficie de deslizamiento). Cuando ocurre esto, la dinámica del sistema se vuelve altamente no sensible a variaciones por parte de perturbaciones, así, solo es dependiente de los parámetros que define la superficie.

La ley de control $U(t)$ (Ecuación 2.2) reportada por (Camacho & Smith, 2000) consta de dos partes; un control equivalente, $U_C(t)$, que mantiene al sistema en la superficie y un control discontinuo o conmutado, $U_D(t)$, encargada de forzar la trayectoria hacia la misma.

$$U(t) = U_C(t) + U_D(t) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Primariamente $U_D(t)$ se desarrolla a partir de una función tipo relé; $U_D(t) = \alpha \text{sign}(S(t))$, que permite el acercamiento hacia la superficie, sin embargo, la acción ocurre a una velocidad hipotéticamente infinita, lo que hace imposible de implementarlo en esta forma, este fenómeno es conocido como *chattering*, y es indeseable en un sistema físico debido al desgaste que esta alta frecuencia produciría al elemento final de control.

2.2 Índices de Desempeño

En la sintonización de los controladores las diferentes maneras de determinar los parámetros de control, hacen necesario compararlos mediante una evaluación cuantitativa y objetiva mediante criterios basados en la acumulación del error. Joseph, Dada, Abidemi, Oyewola, y Khammas sintetizan este análisis de evaluación del desempeño del control PID mediante metaheurísticas, en categorías que se menciona en los siguientes puntos.

2.2.1 Criterios Basados en la Integral del Error

Son funciones muy usadas para guiar la búsqueda de parámetros de alta calidad a través de algoritmos de optimización. Los principales criterios de desempeño son expresados matemáticamente mediante las ecuaciones detalladas a continuación (Schultz & Rideout, 1961):

- Integral de Error Cuadrático

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Este índice de desempeño penaliza mayormente las desviaciones, (e), de gran magnitud, lo cual ocurre al inicio de un proceso, debido a que el error se encuentra elevado al cuadrado. Esta respuesta rápida lleva consigo una estabilización menor, ya que tiene tendencias a presentar oscilaciones agresivas.

- Integral del Valor Absoluto del Error

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Este índice minimiza el error acumulado total sin presentar excesivos valores de sobreimpulsos.

- Integral del Valor Absoluto del Error Ponderado en el Tiempo

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Schultz y Rideout manifiesta que este índice de desempeño se originó como propuesta de mejora de los índices anteriores, produciendo respuestas con un amortiguamiento ideal y con tiempos de estabilización mínimos. Al integrar el factor tiempo, penaliza los erros que persisten en la respuesta del sistema.

- Integral del Error Cuadrático Ponderado en el Tiempo

$$ITSE = \int_0^T te^2dt \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Similar al anterior índice, pero su penalización es cuadrática, castigando críticamente los erros de gran magnitud.

2.2.2 Característica de la Respuesta Transitoria

La minimización de los índices de desempeño busca satisfacer métricas del sistema en el dominio del tiempo. Åström y Hägglund indican que los parámetros como siguientes son críticos para evaluar la estabilidad y desempeño de las plantas.

- Al Sobreimpulso Máximo, M_p , Seborg, Edgar, Mellichamp, y Doyle III lo define como el cociente entre a/b multiplicado por 100% (Figura 2.1). La minimización de esta característica es sumamente importante para la seguridad operativa en la industria química, ya que puede generar saturaciones en variables como presión o temperatura o degradación de producto químico.

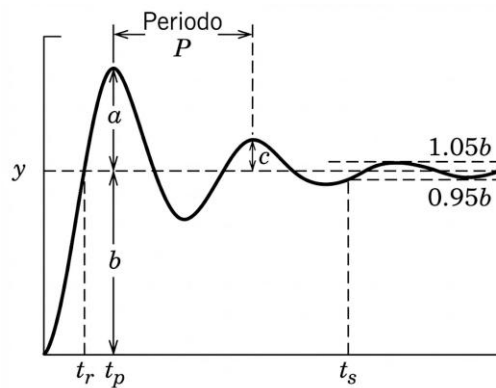


Figura 2.1. Características de desempeño para la respuesta al escalón de un proceso subamortiguado (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle III, 2016).

- El Tiempo de Estabilización, t_s , es el tiempo que requiere el proceso para que la salida logre permanecer dentro de un margen igual a $\pm 5\%$ del cambio total en y (en procesos rigurosos se emplea $\pm 1\%$).

2.3 Optimización con Restricciones

Más allá de la optimización de un problema o sistema químico se busca garantizar el cumplimiento estricto de restricciones operativos y de seguridad.

2.3.1 Problemas de Optimización

Diwekar señala que un problema de optimización es la búsqueda matemática de un vector de parámetros x que sea capaz de minimizar o maximizar una función de costo $f(x)$, la cual generalmente está sujeta a restricciones de desigualdad.

La necesidad de manejar múltiples objetivos en un mismo problema implica gestionar de manera eficiente dichos objetivos. De acuerdo con Helfrich, Herzel, Ruzika, y Thielen, la técnica de escalarización permite realizar modificaciones de problemas complejos de optimización en

problemas escalares reducidos, ayudando a la convergencia de las estrategias de optimización hacia soluciones de alta calidad mediante métodos como el de ponderación.

2.3.2 Métodos de Penalización

Gran cantidad de algoritmos estocásticos han sido diseñados originalmente para trabajar en espacios de búsqueda sin mayores restricciones. En procesos reales se requiere cumplir con consideraciones físicas de seguridad. Rahimi, Gandomi, Chen, y Mezura-Montes; y Rao, explica que el método más efectivo en el uso de algoritmos poblacionales es el empleo de funciones de penalización, transformando el problema original agregando un término que eleva drásticamente el costo de la función objetivo cuando se viola los límites establecidos.

Para garantizar criterios de alto grado de importancia, como lo es la seguridad, se emplean estrategias infranqueables. Rao también describe el uso de funciones inversas para crear un efecto opuesto al valor deseado, con el objetivo de minimizar lo indeseable.

2.4 Algoritmos Metaheurísticos de Optimización

Talbi menciona que, aunque no existe una definición formal única, estas herramientas están bien consolidadas en el área científica ya que permiten resolver problemas donde métodos exactos no son eficientes. A continuación, se detalla los fundamentos de algoritmos estocásticos con diferentes sesgos inductivos.

2.4.1 Optimización por Enjambre de Partículas

Originalmente propuesto por el psicólogo James Kennedy y el ingeniero eléctrico Russell Eberhart, el algoritmo fue inspirado en el comportamiento social de las bandadas de aves y bancos de peces. Su premisa es la resolución de problemas a través de la inteligencia colectiva y el conocimiento compartido de cada individuo.

La implementación matemática denomina a cada solución como “partícula”, la cual explora el espacio de búsqueda. Según Zhou & Liao, cada partícula modifica su velocidad y trayectoria basándose en dos vectores de interacción: la mejor solución o experiencia individual (P_{best}) y la mejor solución o experiencia comunicada por el grupo (G_{best}), permitiendo encontrar soluciones de alta calidad.

2.4.2 Evolución Diferencial

Presentado en 1997 por Rainer Storn y Kenneth Price. ED es una técnica basada en evolucionismo, teoría que relaciona la selección natural y la evolución de las especies, la cual mejora iterativamente. La mayor aportación de este algoritmo es una mutación vectorial, la cual genera

nuevas soluciones sumando la diferencia ponderada entre dos individuos a un tercero ($v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$). Storn & Price indican que esta operación permite adaptar automáticamente la magnitud de la búsqueda a la topología del problema, mejorando la exploración en espacios continuos.

2.4.3 Búsqueda de Cucú

Este algoritmo fue desarrollado en 2009 por Yang & Deb en el 2017, inspirado en la biología y comportamiento social de algunas aves de cucos, especialmente en el parasitismo de cría y coevolución con especies distintas o aves anfitrionas. Matemáticamente junta esta estrategia de supervivencia con los Vuelos de Lévy, un comportamiento observado en la naturaleza que consiste en un patrón de caminata aleatoria con pasos largos ocasionales. La premisa de este método es la inclusión de una probabilidad (P_a) que simula que el huevo intruso en un nido de la especie anfitriona sea descubierto y sea descartado, lo que equivale a la eliminación de las peores soluciones.

2.4.4 Algoritmo de Flujo de una Corriente de Agua

Es una propuesta metaheurística desarrollada por Esparza & Leal en el 2024, inspirada en la dinámica física de una corriente de agua fluyendo por gravedad a través de una superficie irregular.

Con base en la simulación la fluidez de una corriente por el camino de menor resistencia, y el llenado de depresiones del terreno. Con una innovación clave en la cual se implementa una lista tabú física, así, cuando el algoritmo encuentra un mínimo local, lo inunda o penaliza, obligando a la corriente a buscar nuevas rutas y de esta manera evita el estancamiento prematuro.

2.5 Dinámicas de Sistemas

En la industria, muchos procesos son modelados asumiendo sistemas de segundo orden, siendo afectados por fenómenos no lineales y presentando retardos por la estructura espacial de cada proceso, causando que la sintonización de los parámetros de control tenga un grado de complicación considerable.

2.5.1 Sistemas de Fase No Mínima

Según literatura clásica, como en (Serborg, Doyle, Edgar, & Mellichamp, 2016) un sistema de fase no mínima ocurre cuando su función de transferencia presenta uno o más ceros en el semiplano derecho del plano complejo s .

Los procesos que generan esta dinámica tienen la característica de una respuesta inversa ante un cambio escalón en la entrada, esto hace que la variable del sistema, inicialmente, se dirija en

dirección opuesta al valor final del estado estacionario. Este fenómeno genera confusión a los controladores PID estándar, que tienden a amplificar el error en la dirección equivocada.

2.5.2 Sistemas con Retardo de Tiempo

Este efecto, en su mayoría, se presenta en procesos de transporte de fluidos. Jean-Pierre define como el intervalo de tiempo que transcurre tras la aplicación de una acción en la variable de control y el momento en que la variable del sistema comience a manifestarla. El mismo autor expone que el tiempo muerto se modela matemáticamente en el dominio de Laplace mediante; $e^{-\theta s}$.

A pesar que el retardo en el tiempo no afecta la ganancia del sistema, genera un retraso de fase puro que crece proporcionalmente con la frecuencia.

3 METODOLOGÍA

3.1 Enfoque General

El presente trabajo de investigación desarrolla una metodología de análisis comparativo basado en simulación numérica conformado por cuatro fases secuenciales, permitiendo determinar la efectividad y la fiabilidad de las estrategias de sintonización y control frente a diferentes dinámicas de proceso.

3.1.1 Selección y Clasificación Estructural de Casos de Estudio

La primera fase se enfoca en la identificación de un conjunto limitado de procesos químicos de la literatura que presenten desafíos no triviales para el control. La selección y clasificación estructural de estos casos es fundamental, ya que se deben abarcar las principales clases de dinámicas: sistemas de fase no mínima, procesos con retardo temporal, y sistemas de segundo orden no lineales. Así, se permite que el protocolo de sintonización sea probado a una variedad de dificultades que se encuentran comúnmente en procesos químicos industriales.

3.1.2 Implementación y Validación Cualitativa de Modelos

Una vez definidos los casos, se procede a la implementación de los modelos dinámicos en el entorno *MATLAB*. El objetivo de esta fase es la validación cualitativa, verificando que el código de simulación replique fielmente el comportamiento reportado por los autores, por lo que se considera que el análisis de margen de estabilidad (Ganancia Última, K_u y Período Último, T_u) no es necesario puesto que los casos de referencia muestran ya la sintonización desarrollada por los autores.

3.1.3 Optimización Estocástica y Establecimiento del Óptimo

En esta fase se emplean los algoritmos metaheurísticos (CS, DE, FS, PSO). La optimización se realiza en dos niveles jerárquicos:

- Línea Base de Optimización: Se establece la eficiencia inicial de cada algoritmo al minimizar los índices de desempeño integrales por separado (IAE, ISE, ITAE, ITSE).
- Obtención del Compromiso: Se obtienen los parámetros finales del controlador PID mediante la minimización de la función objetivo compuesta. Esta función integra los índices de desempeño con la restricción de sobreimpulso, buscando el mejor compromiso entre velocidad y seguridad.

Asimismo, se realiza la sintonización de los parámetros del SMC para establecer la referencia comparativa.

3.1.4 Evaluación Sistemática y Estadística del Rendimiento Final

La fase final es la de análisis y conclusión en la cual se lleva a cabo una evaluación sistemática y comparativa que incluye:

- Análisis de Fiabilidad: Aplicación de un protocolo estadístico de 100 ejecuciones para cuantificar la tasa de éxito y la robustez de convergencia de cada algoritmo.
- Cuantificación del Desempeño: Elaboración de tablas comparativas de las métricas clave: Tiempo de Estabilización (t_s), Sobreimpulso (M_p) y Costo (J) para cada estrategia.
- Demostración de la Mejora Relativa: Evaluación del mejor balance alcanzado por la función compuesta y su comparación directa frente a los reportados en la literatura y al generado por el controlador SMC.

3.2 Selección y Descripción de Casos de Estudio

Con el objetivo de evaluar las estrategias de control bajo una variedad de dinámicas realistas, se seleccionaron cuatro casos de estudio. Los principales criterios de selección fueron:

- Pertenencia al dominio: Sistemas que representen procesos pertenecientes al ámbito de la industria química.
- Complejidad dinámica y diversidad: Sistemas con comportamientos lineales y no lineales, de fase mínima y no mínima, retardos de tiempo, de primero y segundo orden, de esta manera generalizar los resultados de la investigación.
- Verificabilidad: Existencia de publicaciones previas que describan el modelo, así como los parámetros de los sistemas reportados para su reproducción y validación.

A continuación, se describe cada caso de estudio seleccionado:

3.2.1 Caso de Estudio 1: Diseño de controlador PID mediante algoritmo PSO para sistemas de reactores CSTR

- Referencia: Sultaniya, S., & Gupta, R (2014). Design of PID Controller using PSO Algorithm for CSTR System. International Journal of Electronic and Electrical Engineering, 7(9), 971-977.
- Modelo Matemático: El sistema de estudio describe un CSTR representado por su respectiva función de transferencia de segundo orden linealizada alrededor de un punto de operación, cuya dinámica del proceso se describe mediante la siguiente función de transferencia:

$$G_p(s) = \frac{-1.175s + 3.1472}{s^2 + 4.6429s + 5.3821} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El modelo captura el comportamiento dinámico del reactor, presentando polos reales en - 2.24 y - 2.41. El análisis de amortiguamiento revela un factor $\zeta \approx 1$, lo que caracteriza al sistema como sobreamortiguado, con comportamiento cercano a críticamente amortiguado, indicando una respuesta natural estable y sin oscilaciones inherentes.

Para la implementación computacional y la simulación en el dominio del tiempo, se empleó la representación equivalente en Espacio de Estado (SS), definida por las matrices:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$y = Cx + Du \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

$$A = \begin{bmatrix} -4.6429 & 5.3821 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [-1.1700 \quad 3.1472], \quad D = [0]$$

- Comportamiento Dinámico: El sistema exhibe características dinámicas particulares:
 1. Fase No Mínima: La existencia de un cero en el Semiplano Derecho (RHP), $s = +2.6899$, indica que el sistema es de fase no mínima, lo que genera una Respuesta Inversa ante una entrada de tipo escalón.
 2. Respuesta del Sistema: El trabajo base reporta un tiempo de subida (t_r) de 20.63 segundos, un *undershoot* de 104.74 %, un sobreimpulso de 0 % y un tiempo de estabilización de 41.75 segundos.

Este caso de estudio fue seleccionado por ser un *benchmark* clásico, representando dos desafíos de control clásico: 1) un comportamiento de fase no mínima, introduciendo una respuesta inversa, y 2) una dinámica sobreamortiguada.

3.2.2 Caso de Estudio 2: Análisis del rendimiento de un reactor químico isotérmico mediante controladores PID, SSC y SMC.

- Referencia: Sarzosa, M., Yandún, A., & Garcés, L. (2018). Análisis del Rendimiento de un Reactor Químico Isotérmico Mediante Controladores PID, SSC y SMC. Revista Politécnica, 40(2), 19-24.

- **Modelo Matemático:** Este caso de estudio describe un proceso de segundo orden caracterizado por una dinámica de fase no mínima. La función de transferencia del sistema, linealizada alrededor del punto de operación, es:

$$G_p(s) = \frac{-1.1170s + 3.1472}{s^2 + 4.6429s + 5.3421} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

El análisis estructural revela polos reales en -2.09 y -2.54 . El sistema es sobreamortiguado $\zeta > 1$, lo que garantiza una estabilidad natural en lazo abierto. Ante el escalón la ganancia estática del sistema es $K = 0.589$, indicando que la salida en estado estacionario alcanza aproximadamente el 59% de la magnitud de la entrada si no existe acción integral de control. Para la validación y simulación numérica en el dominio del tiempo, se estableció la representación en *SS* mediante las siguientes matrices de coeficientes:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} -4.6429 & 5.3421 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= [-1.1170 \quad 3.1472], & D &= [0]\end{aligned}$$

- **Comportamiento Dinámico:** El sistema exhibe características dinámicas particulares:
 1. **Fase No Mínima:** El sistema presenta un cero en el Semiplano Derecho (RHP) ubicado en $s \approx +2.817$. Esta característica impone una respuesta inversa inicial ante cambios en la entrada.
 2. **Capacidad de Seguimiento:** A diferencia del caso anterior centrado en regulación, el estudio base evalúa la respuesta del sistema ante una trayectoria de referencia variable, es decir cambios escalonados múltiples. Esto pone a prueba la capacidad del controlador para transitar entre diferentes puntos de operación.

Este caso cumple con dos funciones metodológicas; primero, actúa como una validación de consistencia, demostrando que la eficacia de la estrategia propuesta es robusta frente a variaciones paramétricas dentro de la clase de sistemas de respuesta inversa. Segundo, evaluar el desempeño en modo de seguimiento de consigna, verificando que los parámetros optimizados con la función compuesta mantengan el cumplimiento de las restricciones de seguridad no solo en el arranque del sistema.

3.2.3 Caso de Estudio 3: Diseño de control de estructura variable de plantas de proceso basado en el enfoque de modo deslizante

- Referencia: Tahir, H., & Al-Rawi, A. (2006). Variable structure control design of process plant based on sliding mode approach. *Chinese Control Conference*, 932-937.
- Modelo Matemático: Este caso modela un sistema de control de nivel de líquido en un tanque de capacitancia que incluye un canal de retardo. La dinámica del proceso se describe mediante una función de transferencia de segundo orden con tiempo muerto:

$$G_p(s) = \frac{3.68e^{-0.25s}}{(1.1s + 1)(0.21s + 1)} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

El análisis estructural muestra dos polos reales negativos en -0.909 y -4.76. Al no poseer ceros en el semiplano derecho, es un sistema de fase mínima. Para la simulación computacional, se separó el retardo de transporte de la dinámica racional; de esta manera fue implementado de forma discreta y exacta mediante un búfer de memoria tipo FIFO (*First-In, First-Out*). La parte racional se modeló en espacio de estados mediante las siguientes matrices:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} -5.671 & -4.329 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 7.2727 \end{bmatrix}, & D &= \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

- Comportamiento Dinámico: El sistema exhibe características dinámicas particulares:
 1. Retardo de Transporte (*Dead Time*): Aquí el desafío es la presencia del retardo, lo cual significa que la salida del sistema tarda un tiempo considerable en reaccionar después de que cambia la entrada.
 2. Respuesta del Sistema: El estudio de referencia reporta un desempeño base con un controlador PID convencional caracterizado por un tiempo de subida de 0.84 min, un sobreimpulso del 7.7% y un tiempo de estabilización de 4.5 min.

La selección de este *benchmark* se justifica por la necesidad de validar la capacidad de robustez de las estrategias de optimización frente al tiempo muerto.

3.2.4 Caso de Estudio 4: Comparación de esquemas de control para reactores químicos tipo CSTR

- Referencia: Cargua, W., Gallegos, M., Leica, P., Guzmán-Beckmann, L., & Camacho, O. (2018). Comparación de esquemas de control para reactores químicos tipo CSTR. *Ciencia e Ingeniería*, 39(2), 177-189.
- Modelo Matemático: Este caso se trata de un reactor de tanque agitado continuo isotérmico donde ocurren reacciones competitivas de tipo Van de Vusse ($A \rightarrow B \rightarrow C$ y $2A \rightarrow D$). A diferencia de los casos vistos anteriormente los cuales eran lineales, este sistema se describe mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales que representan los balances de masa de los componentes:

$$\frac{dC_A(t)}{dt} = \frac{F_r(t)}{V} [C_{Ai}(t) - C_A(t)] - k_1 C_A(t) - k_3 C_A^2(t) \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$\frac{dC_B(t)}{dt} = -\frac{F_r(t)}{V} C_B(t) + k_1 C_A(t) - k_2 C_B(t) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

donde:

$C_A(t)$: Concentración del reactivo A, $mol\ l^{-1}$.

$C_B(t)$: Concentración del reactivo B, $mol\ l^{-1}$.

$F_r(t)$: Flujo del proceso, $l\ mol^{-1}$.

V : Volumen del reactor, l .

La optimización estocástica y la validación final se las realizaron directamente sobre estas ecuaciones.

- Comportamiento Dinámico: El sistema exhibe características dinámicas particulares:
 1. Respuesta Inversa: Lo interesante de este sistema es que muestra una respuesta inversa muy marcada cuando cambiamos el flujo de entrada, esto provoca que, al inicio, la salida se mueva en dirección contraria a la consigna o *setpoint*.
 2. No Linealidad: La presencia del término cuadrático ($C_A^2(t)$) hace que el sistema se comporte de manera distinta si se opera en puntos muy diferentes.

Se seleccionó este sistema debido a la necesidad de evaluar si la estrategia propuesta es capaz de manejar la no linealidad y la interacción de las variables que representan el sistema.

3.2.5 Protocolo de Simulación Numérica

Para la resolución computacional de los modelos detallados anteriormente se implementó un solucionador de paso fijo (h) basado en el método de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4), el cual fue seleccionado por su alta estabilidad numérica y su excelente precisión. El esquema iterativo se define por la actualización de estados siguiendo las ecuaciones:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde x representa el vector de estados del sistema, en los casos de estudios pueden representar temperaturas o concentraciones, mientras que k_i son las pendientes estimadas en el intervalo.

Se estableció un paso de integración fijo $h = 0.001$ unidades de tiempo para todos los casos de estudio. Esta alta frecuencia de muestreo asegura que la simulación capture fielmente las dinámicas rápidas y no lineales, manteniendo la estabilidad del método numérico.

3.3 Estrategias de Control y Algoritmos de Optimización

3.3.1 Modelos de Controladores

3.3.1.1 Controlador PID

En la actualidad, pese a varias propuestas de muchos mecanismos de control robustos y adaptativos, la popularidad del control PID en sistemas de control retroalimentados es inigualable (Bharat, Ganguly, Chatterjee, & Basak, 2019). El funcionamiento de este controlador es el resultado de la suma de tres acciones que pueden interpretarse como: el manejo de efectos futuros; por una extrapolación lineal del error, $e(t)$, dado por el término derivativo, el presente; por el término proporcional, y pasado; por la acción integral del error. Esto da lugar a los denominados parámetros del controlador; Ganancia proporcional (K), Tiempo integral (T_i), Tiempo derivativo (T_d) (Åström & Hägglund, 2009):

Para la metodología manejada en este trabajo, se implementó la estructura del control PID en su forma paralela, como resultado, el control genera una señal de salida, $u(t)$. A través de las acciones mencionadas anteriormente y regida por la ley de control en el dominio del tiempo, el controlador puede ser representado por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

donde:

$u(t)$: Señal de salida del controlador PID.

$e(t)$: Error actual (diferencia entre la señal de entrada y salida del sistema).

K_p : Ganancia proporcional.

K_i : Ganancia integral.

K_d : Ganancia derivativa.

Las ganancias K_p , K_i , y K_d , son los parámetros a optimizar.

3.3.1.2 Controlador por Modo Deslizante

Como se comentó anteriormente, existen varias propuestas de mecanismos de control robustos y adaptativos, uno de ellos es el SMC, el cual estriba en que el controlador lleve al sistema a un estado deseado establecido, definido por una superficie de deslizamiento, también se debe mencionar que el controlador posee dos partes, una parte continua y otra discreta, siendo la parte continua responsable de que la salida del sistema permanezca en la superficie deseada, mientras que la parte discontinua es responsable de que el sistema llegue a la superficie (Báez, Bravo, Leica, Chávez, & Camacho, 2017).

En este caso el controlador se implementó partiendo de las ecuaciones de (Camacho & Smith, 2000) las cuales se especifican a continuación:

1. Superficie de Deslizamiento: Definida como una función lineal del error, su integral y su derivada:

$$S(t) = \text{sign}(K) \left(\frac{d e(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) dt \right) \quad \text{Ecuación 3.10}$$

donde:

$S(t)$: Superficie de deslizamiento.

K : Ganancia estática.

$y(t)$: Señal de salida del sistema.

$r(t)$: Valor de la consigna.

$e(t) = r(t) - y(t)$: Error del seguimiento.

λ_1 y λ_0 : Coeficientes de la superficie.

2. Ley de Control: La señal de salida del controlador, $u(t)$, está compuesta por un término equivalente o continuo ($u_c(t)$), y un término de conmutación robusto discontinuo ($u_D(t)$), este último determina la forma de llegada del sistema hacia la superficie y cuya dicha acción genera oscilaciones de alta frecuencia (*chattering*), su implementación toma la forma (Camacho, Rojas, & García, 1999):

$$u(t) = u_c(t) + u_D(t) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

donde:

$$u_c(t) = \frac{t_0 \tau}{K} \left[\frac{y(t)}{t_0 \tau} + \lambda_0 e(t) \right] \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$u_D = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Los términos de las ecuaciones se definieron previamente en la sección del marco teórico.

3. Estrategia de Optimización: Los parámetros de diseño, se derivaron de un conjunto reducido de variables (t_0, τ, K), los cuales constituyeron el espacio de búsqueda de los algoritmos metaheurísticos. Las relaciones de dependencia implementadas son:

$$\lambda_1 = \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau}, \quad \lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{4} \quad \text{Ecuación 3.14 y 3.15}$$

$$K_D = \frac{0.51}{|k|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76}, \quad \delta = 0.68 + 0.12 |K| K_D \lambda_1 \quad \text{Ecuación 3.16 y 3.17}$$

3.3.2 Estrategia de Optimización:

3.3.2.1 Discretización y algoritmos numéricos de control

La simulación computacional de las estrategias de control mencionadas, fue llevada a cabo en el entorno de *MATLAB*, y se estandarizó el cálculo de los operadores integrales y diferenciales de manera discreta mediante métodos numéricos de alta estabilidad y bajo costo computacional, con lo que se garantiza la consistencia en la evolución de los cálculos requeridos, como el cálculo del error y sus variaciones. La estandarización se la realizó bajos los siguientes criterios:

- Acción integral: Se empleó una aproximación para integrales definidas basado en la regla del trapecio cuya ecuación recursiva es definida por (Spiegel & Liu, 1998):

$$I_k = I_{k-1} + \frac{h}{2}(e_k + e_{k-1}) \quad \text{Ecuación 3.18}$$

donde:

I : Valor aproximado de la integral.

$k, k - 1$: Instante actual y anterior.

h : Paso de integración o tiempo de muestreo.

e : Error.

Este método fue empleado debido a su precisión de segundo orden, reduciendo el error acumulado de integración de las simulaciones en comparación con una aproximación rectangular.

- Acción derivativa: Para el cálculo diferencial, en este trabajo se implementó una aproximación basada en el método de diferencias finitas regresivas de primer orden de Newton, definido como (Spiegel & Liu, 1998):

$$D_k = \frac{e_k - e_{k-1}}{h} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

donde:

D : Valor aproximado de la derivada.

e : Error.

$k, k - 1$: Instante actual y anterior.

h : Paso de integración.

Esta implementación asegura la dependencia exclusiva de datos pasados y actuales del sistema, al igual que la acción integral, este método es una implementación estándar para sistemas de control digital en tiempo real.

3.3.3 Selección de Algoritmos de Optimización

En esta sección se describe las estrategias de optimización estocástica que se eligieron para la sintonización de los parámetros óptimos de cada controlador. (Talbi, 2009) aclara que los algoritmos metaheurísticos no son aconsejables para resolver problemas en los que se dispone de algoritmos exactos eficientes, más no menciona si alguna estrategia es mejor que otra para ser empleada en algún sector industrial o problema específico, por lo que a pesar que las metaheurísticas son muy aceptadas y ampliamente usadas en la investigación, no existe una definición formal y verificable que delimite claramente qué cual entra en la categoría y cual no. La selección de estas estrategias busca cubrir, de manera general el mayor rango de los diferentes sesgos o principios en los que se clasifican ordinariamente la optimización metaheurística, de esta manera asegurar que la

solución óptima encontrada sea una característica propia del controlador, y no un artefacto de sesgos de las herramientas empleadas. La siguiente tabla muestra los algoritmos empleados en este trabajo.

Tabla 3.1. Justificación de los Algoritmos Seleccionados

Algoritmo	Categoría	Criterio de Selección para el Estudio
PSO	Inteligencia de Enjambre	Se seleccionó por su velocidad de convergencia reconocida en la literatura de control. Dado su fuerte sesgo de explotación, servirá como referencia de desempeño rápido, aunque sus resultados se contrastarán con métodos más exploratorios para descartar convergencia prematura.
DE	Evolutivo	Elegido por su robustez para manejar la diversidad de la población, siendo un candidato ideal para navegar espacios de parámetros PID donde la correlación entre variables (K_p , K_i , K_d) es alta.
CS	Bio-inspirado / Físico	Seleccionado por su capacidad de exploración agresiva mediante Vuelos de Lévy. Esta característica es crítica para este estudio debido a la función de barrera hiperbólica implementada; los largos pasos del CS le permiten superar las discontinuidades de la barrera y acceder a cuencas de atracción inalcanzables para métodos locales.
FS	Basado en Física	Se incorpora como estrategia novedosa frente a los algoritmos consolidados. Su mecanismo de llenado de depresiones y lista tabú ofrece un enfoque determinista para evitar la re-exploración de mínimos locales, proporcionando una validación cruzada y aumentar la probabilidad de asegurar que el óptimo global encontrado es genuino.

3.4 Formulación de la Función Objetivo

En esta sección se describe los criterios matemáticos que se emplearon para la evaluación de la calidad de los controladores diseñados evaluados por los algoritmos de optimización.

3.4.1 Índices de Desempeño Para la Línea base

Se seleccionaron cuatro índices integrales estándar para establecer una línea base de rendimiento y cuantificar las limitaciones de los enfoques convencionales mediante las métricas de la respuesta. La determinación de los parámetros de control fue empleada en la primera fase de la experimentación mediante los funcionales objetivos sin ninguna restricción adicional, con el objetivo

de observar el comportamiento general de los algoritmos y de las respuestas de los *benchmarks* cuando se minimizó exclusivamente el error.

Los índices de desempeño implementados son definidos matemáticamente como (Joseph, Dada, Abidemi, Oyewola, & Khammas, 2022):

1. Error Absoluto Integral

$$J_{IAE} = \int_0^t |e(t)| dt$$

2. Error Cuadrático Integral

$$J_{ISE} = \int_0^t e^2(t) dt$$

3. Error Absoluto Integral Ponderado por el Tiempo

$$J_{ITAE} = \int_0^t t \cdot |e(t)| dt$$

4. Error Cuadrático Integral Ponderado por el Tiempo

$$J_{ITSE} = \int_0^t t \cdot e^2(t) dt$$

La evaluación independiente de los índices de desempeño mencionados, permitió corroborar que, si bien logran minimizar el error matemático, la estrategia con la que fueron sintonizados los parámetros óptimos pueden generar agresividad excesiva en la respuesta de los sistemas, provocando picos o sobreimpulsos que podrían violar límites operativos o de seguridad del proceso.

3.4.2 Diseño de la Función Objetivo Compuesta con Restricción de Sobreimpulso

Para manejar la problemática comúnmente generado por tratar de eliminar el error de manera rápida empleando los índices desempeños simples, se desarrolló una función objetivo compuesta (J_{total}). Debido al compromiso generado por la adición de la función que maneja la restricción de sobreimpulso a la función de cualquier índice integral estándar seleccionado, esta formulación emplea la técnica de escalarización ponderada para transformar el problema multiobjetivo en uno de objetivo único que sea manejable por los algoritmos de optimización estocásticos (Burachik, Kaya, & Rizvi, 2014).

La función de costo global a minimizar propuesta en este trabajo se define como:

$$J_{total}(x) = \alpha_1 J_{base}(x) + P_{restricción}(Y_{max}) \quad \text{Ecuación 3.20}$$

donde:

x : Vector decisión.

J_{base} : Costo de desempeño (ISE, ITSE, IAE o ITAE)

$P_{restricción}$: Costo asociado a la restricción del sobreimpulso.

α_1 : Factor de ponderación asociado con el desempeño dinámico.

La formulación de la función de barrera se basó estrictamente en la manipulación de la variable del margen de seguridad: $Y_{lim} - Y_{max}$, y no en la definición estándar de sobreimpulso: $Y_{max} - Y_{setpoint}$, permitiendo que el gradiente de la función guíe al optimizador libremente hacia el *setpoint*. La innovación de esta propuesta es la implementación de un término basado en una función racional. Su premisa es condicionar la salida del sistema y a su vez generar un gradiente asintótico:

$$P_{restricción} = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_{max} \leq Y_{setpoint} \\ \frac{\alpha_2}{Y_{lim} - Y_{max}} & \text{si } Y_{setpoint} < Y_{max} < Y_{límite} \\ 10^6 & \text{si } Y_{max} \geq Y_{límite} \end{cases}$$

Para facilitar la interpretación física de estos parámetros y el comportamiento de la barrera, la Figura 3.1 ilustra la relación entre la respuesta temporal del sistema y el costo de penalización generado. parte izquierda de la figura define las variables críticas (Y_{max} , Y_{lim}) sobre la dinámica del sistema, mientras que la figura de la derecha muestra el crecimiento asintótico del costo que actúa como fuerza de repulsión.

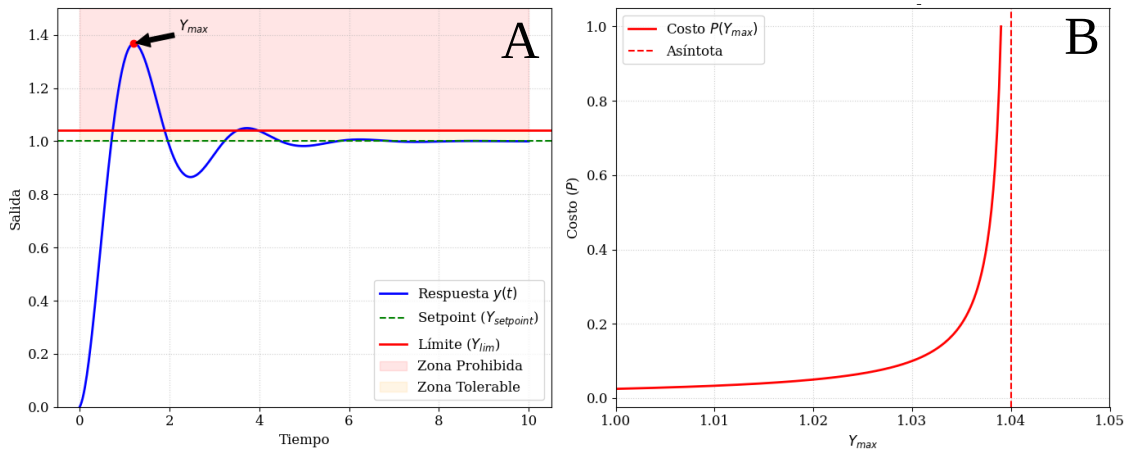


Figura 3.1. Representación esquemática de la función propuesta. (A) Definición de variables sobre la respuesta temporal: Y_{max} (pico evaluado), Y_{lim} (restricción). (B) Perfil de la función de racional (hipérbola).

La siguiente tabla resume criterios técnicos de comparación entre la función racional y la función logarítmica como $P_{restricción}(Y_{max})$.

Tabla 3.2. Análisis Comparativo de Funciones de Penalización y Justificación de Selección.

Función de Penalización y Ecuación General	Comportamiento del Gradiente	Limitaciones Técnicas
Logarítmica $-\alpha \ln(Y_{lim} - Y)$	Inverso a la Distancia $\left(\frac{1}{d}\right)$: El gradiente de repulsión crece de manera inversamente proporcional a la distancia al límite.	• Es una barrera válida, pero su fuerza de repulsión $\left(\frac{1}{d}\right)$ puede ser demasiado suave para detener partículas con alta velocidad. • No ofrece la agresividad inmediata necesaria en la última fracción de distancia antes del choque.
Racional $\alpha \frac{1}{Y_{lim} - Y}$	Cuadrado Inverso de la Distancia $\left(\frac{1}{d^2}\right)$: Posee un gradiente que crece con el cuadrado de la cercanía, generando una acción explosiva inmediata.	• Esta mayor agresividad actúa con una gran repulsión en la vecindad inmediata del límite. • Es esencial para contrarrestar la naturaleza estocástica (como la inercia del PSO) y garantizar matemáticamente que ninguna solución cruce la frontera.

En suma, la integración de esta función genera un gradiente de información continua, permitiendo que el algoritmo “tantee” la proximidad del límite y utilice sus mecanismos de aprendizaje para corregir la trayectoria de búsqueda de manera anticipada, evitando la aglomeración de soluciones en la frontera de riesgo.

Para la determinación de los pesos α_1 y α_2 no se realizó de manera arbitraria, sino se siguió un protocolo de normalización y ajuste por sensibilidad en tres etapas:

- Exploración Inicial: Se ejecutaron simulaciones exploratorias con pesos unitarios 1:1 para cuantificar las magnitudes naturales de J_{perf} y $P_{restricción}$. Esto permitió identificar la disparidad de escalas entre los valores de contribución del error acumulado y el valor de la barrera en J_{final} .

- Normalización de Pesos: Con base en los datos exploratorios, se calcularon factores de normalización para igualar la contribución relativa de ambos objetivos, evitando que un término domine numéricamente al otro por defecto.
- Ajuste por Sensibilidad: Durante la optimización, se detectó que la fuerza de repulsión de la barrera hiperbólica podía ser excesiva, impidiendo que el sistema alcanzara el *setpoint* con tal de mantenerse lejos del límite. Para solucionar esto, se aplicó un análisis de sensibilidad, incrementando progresivamente la proporción de α_1 . Este ajuste permitió que el algoritmo genere la acción suficiente para vencer el gradiente inicial de la barrera y converger al *setpoint*, manteniendo el cumplimiento estricto de la restricción de seguridad.

3.5 Protocolo de Evaluación Estadística

Para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados, se diseñó un protocolo de experimentación sistemático aplicado individualmente a cada uno de los cuatro casos de estudio. La implementación computacional se implementó en tres módulos simultáneos: el Módulo de Simulación (Sistema Dinámico + Controlador/RK4), el Módulo de Optimización (Algoritmo Metaheurístico) y el Módulo de Gestión de Datos (Ejecución y almacenamiento). A continuación, se detallan los criterios de estandarización y análisis:

3.5.1 Estandarización del Esfuerzo Computacional

Con el objetivo de realizar una comparación equitativa entre algoritmos con diferentes mecánicas de búsqueda, se estableció el Número de Evaluaciones de la Función Objetivo (NFE) como la métrica base de terminación. Para todos los experimentos, se fijó un presupuesto computacional de 5000 evaluaciones por ejecución independiente. La configuración específica se adaptó a la naturaleza de cada algoritmo:

- Algoritmos Poblacionales (PSO, DE, CS): Se configuraron con una población de 20 individuos evolucionando durante 250 generaciones. Esto resulta en 5000 llamadas a la función de costo.
- Algoritmo de Flujo de Corriente (FS): Al operar como un agente único basado en trayectorias, se configuró directamente 5000 evaluaciones de la función objetivo.
- Para cada caso de estudio, se definieron límites de búsqueda superiores e inferiores específicos para los parámetros de decisión de cada uno de los controladores, restringiendo la optimización a una región de operación físicamente realizable. A continuación, los límites del espacio de búsqueda se detallan en la Tabla 3.3. Se puntualiza que el límite inferior se fijó en, $Ub = 0.001$ para todos los parámetros.

Tabla 3.3. Configuración del espacio de búsqueda para la optimización. Se detalla el límite superior, U_b , asignado a cada parámetro según el caso de estudio.

Estrategia	Parámetro	Símbolo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
PID	Ganancia Proporcional	K_p	5	10	10	10
	Ganancia Integral	K_i	5	10	10	10
	Ganancia Derivativa	K_d	5	10	5	5
SMC	Ganancia del Modelo	K	15	10	5	3
	Constante de Tiempo	τ	15	10	20	15
	Tiempo Muerto	t_0	15	10	5	3

Para asegurar que los algoritmos metaheurísticos trabajen de manera eficiente y no desperdicien recursos computacionales explorando zonas inviables, se definieron los límites de búsqueda siguiendo criterios matemáticos y experimentales. Se fijó el valor del límite inferior en 0.001 para todos los parámetros con el fin de evitar indeterminaciones, prevenir errores matemáticos, como divisiones por cero, y descartar soluciones triviales

Los valores máximos se determinaron combinando la teoría con la práctica, se tomaron como base los parámetros reportados en los trabajos de referencia, ampliando el rango superior para dar holgura al algoritmo. Además, se realizaron simulaciones cortas de prueba, identificando los valores aproximados de convergencia.

3.5.2 Mecanismo de Protección contra Inestabilidad

Dada la naturaleza estocástica de los algoritmos, existe la posibilidad de que se exploren combinaciones de parámetros que inestabilicen la simulación numérica que pueden generar valores infinitos (Inf) o no numéricos (NaN). Para gestionar esto sin detener el proceso experimental, se implementó una rutina de seguridad interna: si la simulación detecta una divergencia numérica, se interrumpe inmediatamente el cálculo de esa iteración ahorrando tiempo de cómputo y asigna automáticamente un valor de penalización masiva 10^6 a la función de costo. Esto alerta al algoritmo de optimización que dicha región del espacio de búsqueda es inviable, forzándolo a redirigir la búsqueda hacia zonas estables.

3.5.3 Recolección de Datos y Métricas Estadísticas

El protocolo de validación consistió en ejecutar 100 veces independientemente cada combinación de algoritmo y caso de estudio. El módulo de gestión de datos generó matrices de resultados que integran:

- 1) Vectores de Decisión: Son los parámetros óptimos obtenidos en cada ejecución.
- 2) Costo Final: Es el valor mínimo alcanzado de la función objetivo.
- 3) Historial de Convergencia: Es la evolución del mejor costo iteración a iteración.

A partir de esta información, se generó el siguiente análisis:

- Curvas de Convergencia Promedio: Para evaluar la velocidad y estabilidad de la búsqueda de cada algoritmo, se generaron curvas de convergencia representativas del comportamiento global. Dado que una ejecución individual puede estar sesgada por condiciones iniciales favorables o desfavorables, la curva de convergencia reportada se calculó como el promedio aritmético del valor de la función de costo en cada iteración sobre el total de las 100 ejecuciones independientes
- Tasa de Éxito: Definida como el porcentaje de las 100 ejecuciones que lograron converger a una solución estable bajo el criterio matemático de éxito. Para una ejecución i se estableció la tolerancia absoluta respecto a la mejor solución encontrada por el algoritmo en la totalidad de las pruebas de manera tal que: $|J_i - J_{min}| \leq 1 \times 10^{-4}$, donde J_i es el costo final de la ejecución actual y J_{min} es el costo mínimo absoluto hallado entre las 100 ejecuciones. Este criterio estricto permite discriminar entre las ejecuciones que realmente encontraron el óptimo y aquellas que quedaron atrapadas en óptimos locales subóptimos o que divergieron.

3.5.4 Definición de Restricciones para la Fase Compuesta

Para la etapa de optimización con la función objetivo compuesta, se aplicó un criterio adaptativo para definir los límites de la barrera de seguridad. El límite máximo de sobreimpulso permitido para cada caso no se fijó arbitrariamente, sino que se definió basándose en el valor máximo de sobreimpulso registrado durante la fase previa de optimización mono-objetivo. Este enfoque asegura que la restricción impuesta sea un reto significativo pero alcanzable, obligando al algoritmo a mejorar sustancialmente el desempeño de seguridad respecto a la sintonización convencional.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Comparación de Índices de Desempeño Base

En esta etapa se presenta los primeros resultados de la investigación, los cuales consisten en la evaluación del desempeño de los controladores PID determinados a través de la optimización de los índices de desempeños clásicos como funcional objetivo única. El objetivo de esta etapa es buscar establecer una línea base del comportamiento del sistema sin ninguna restricción técnica especificada, de esta manera analizar e identificar la agresividad característica de cada índice integral, cuantificando la magnitud de los picos o sobreimpulsos generados.

Los compromisos que implica la optimización de los funcionales objetivos; ISE, ITSE, IAE, e ITAE, se enfocan en la rápida eliminación del error y la estabilidad del sistema. Los resultados obtenidos tras ejecutar 100 veces cada algoritmo independientemente. Se destaca que para el establecimiento de la línea base de esta etapa, los cuatro algoritmos de optimización empleados en este trabajo convergieron consistentemente en las regiones prometedoras, generando el mismo vector de decisión final en cada caso de estudio y por cada índice integral, por lo cual se denominará como estrategia de optimización metaheurística (Opt. MH) a CS, PSO, FS y DE, en tablas y gráficas posteriores.

Las métricas de desempeño alcanzadas por la estrategia de optimización metaheurística seleccionadas se comparan frente a los valores reportados en cada caso de estudio. La comparación se desglosa según el índice de desempeño minimizado, detallando los parámetros del controlador PID, el costo final de la función objetivo, el porcentaje de sobreimpulso y el tiempo de estabilización. Esta tabulación permite evaluar directamente la ganancia en velocidad y la reducción del costo integral lograda respecto a la sintonización base.

Para definir el límite de seguridad operativo, Y_{lim} , aplicable a la optimización con la función objetivo compuesta, se estableció un criterio de diseño basado en la reducción del riesgo a una aproximación del 50%. Esta decisión técnica busca establecer un margen de seguridad conservador que garantice la operatividad del sistema lejos de los límites de saturación o inestabilidad, transformando el problema de control de una simple minimización de error a un desafío de desempeño restringido, donde el algoritmo debe demostrar su capacidad para encontrar soluciones eficientes dentro de una región de factibilidad significativamente acotada.

4.1.1 Análisis del Caso de Estudio 1

La respuesta del primer caso de estudio ante el escalón generó una variabilidad significativa dependiendo el funcional objetivo seleccionado en el diseño del controlador PID.

La información de la Tabla 4.1 indica efectivamente la presencia del pico que excede significativamente la consigna antes de conseguir estabilizarse, tal es el caso del ITAE con un sobreimpulso aproximado de ocho por ciento. La interpretación gráfica de la tabla anterior se encuentra en la Figura 4.1.

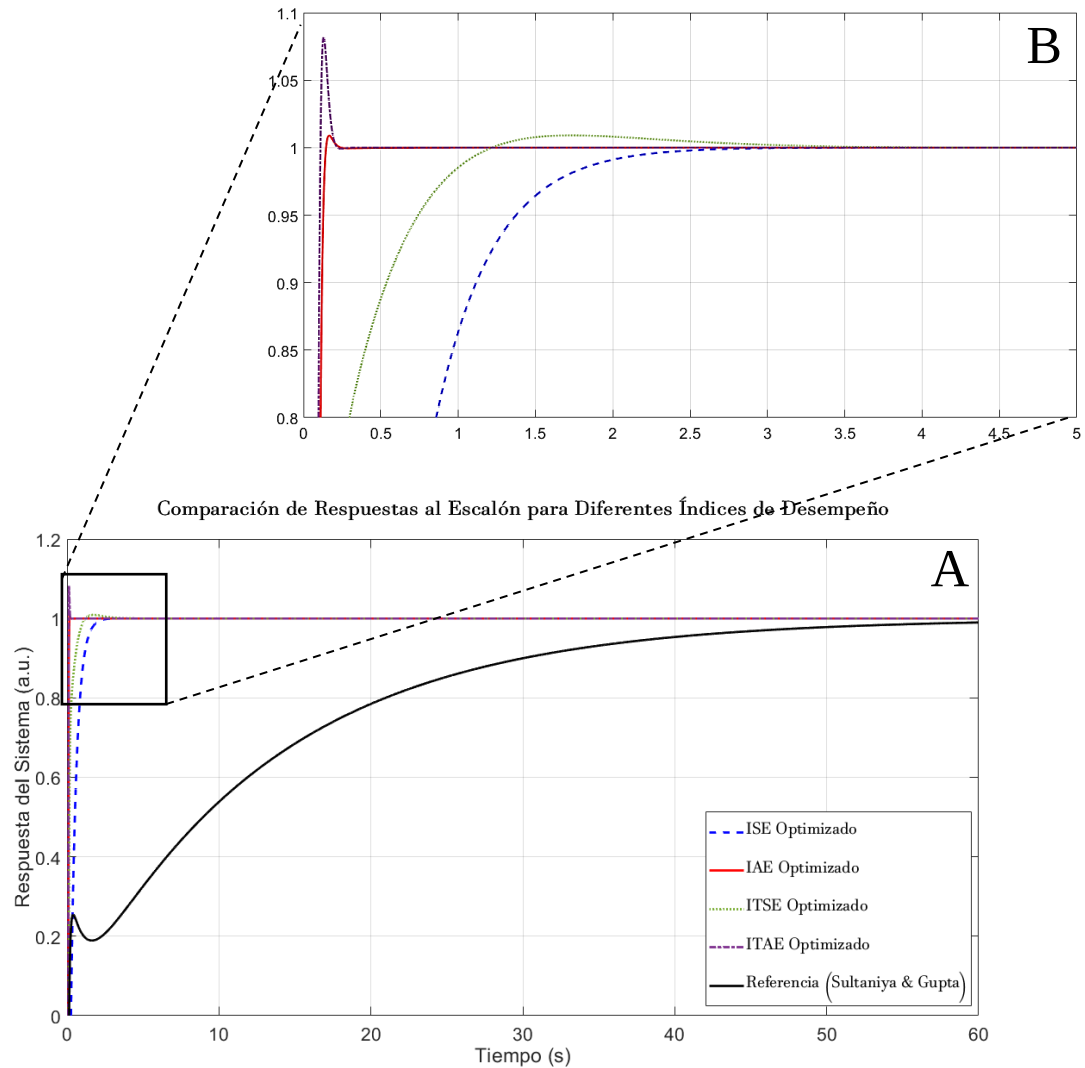


Figura 4.1. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 1). (A) Vista general de la respuesta del sistema. (B) Detalle de la respuesta transitoria.

La Figura 4.1 muestra claramente cómo la minimización estricta del IAE e ITAE (líneas roja y magenta) hace que el sistema genere una subida abrupta, en el intento de eliminar rápidamente el error. Así, el hallazgo más importante de la tabla y figura anterior fue la magnitud de la desviación transitoria. La optimización mono-objetivo generó picos de sobreimpulso que alcanzaron valores que pueden ser inaceptables para una operación segura.

Este comportamiento valida la hipótesis del compromiso de la optimización mono-objetivo. Con base en este hallazgo, se define el criterio de diseño para la siguiente etapa de implementación de la función objetivo compuesta, así, el valor límite, Y_{lim} , se fijó en 1.04 (4%). Este valor corresponde a restringir el sobreimpulso a aproximadamente la mitad del máximo registrado (8.27%).

4.1.2 Análisis del Caso de Estudio 2

La evaluación de desempeño para el segundo caso se resume en la Tabla 4.2 la cual muestra las métricas de la respuesta comparando la solución optimizada frente a la referencia.

El caso 2, caracterizado por tener varios cambios en la consigna genera una dinámica particular al ser evaluados por los distintos índices de desempeño, así, se puede analizar los sobreimpulsos que genera cada minimización, siendo el ITAE el que presenta un mayor pico entre todos los índices integrales, además se puede observar valores muy próximos de los parámetros del controlador diseñado con el IAE y el ITAE, esta cualidad es más evidente en sistemas con dinámicas complejas como sistemas con retardo o de fase no mínima, ya que la región de factibilidad es extremadamente pequeña, provocando que incluso más de dos criterios de desempeños optimizados con metaheurísticas converjan hacia el mismo límite de desempeño. El comportamiento de este caso de estudio se visualiza en la Figura 4.2.

Tabla 4.1. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 1.

Criterio de Desempeño	Estrategia de Sintonización	Parámetros del Controlador (K_p, K_i, K_d)	Costo Opt. (J_{base})	Costo Referencia (J_{base})	Sobreimpulso, M_p (%)	Tiempo de Estabilización, t_s (s)
Definida por la referencia	PSO	0.232, 0.134, 0.458			0	51.10
ISE	Opt. MH	1.978, 2.297, 0.427	0.7452	6.184	0.0034	1.71
ITSE	Opt. MH	3.108, 3.686, 0.742	0.0521	41.65	0.91	0.95
IAE	Opt. MH	3.613, 4.190, 0.777	0.409	12.64	0.97	0.14
ITAE	Opt. MH	3.640, 4.222, 0.783	0.015	160.2	8.27	0.18

Tabla 4.2. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 2.

Criterio de Desempeño	Estrategia de Sintonización	Parámetros del Controlador (K_p, K_i, K_d)	Costo Opt. (J_{base})	Costo Referencia (J_{base})	Respuesta Transitoria (%)			Tiempo de Estabilización, t_s (s)		
					M_{p1}	M_{p2}	M_{p3}			
No especificada	No especificada	2.612, 2.786, 0.469			2.66	0.45	1.34	2.26	0.63	0.73
ISE	Opt. MH	2.071, 2.387, 0.447	0.853	0.889	0.005	0	0	1.63	1	1.39
ITSE	Opt. MH	2.175, 2.503, 0.470	2.705	2.790	0.01	0	0	1.51	0.93	1.29
IAE	Opt. MH	3.776, 4.346, 0.812	0.626	1.00	0.94	0.16	0.47	0.13	0.11	0.13
ITAE	Opt. MH	3.777, 4.347, 0.812	3.935	6.592	1.01	0.17	0.5	0.13	0.11	0.13

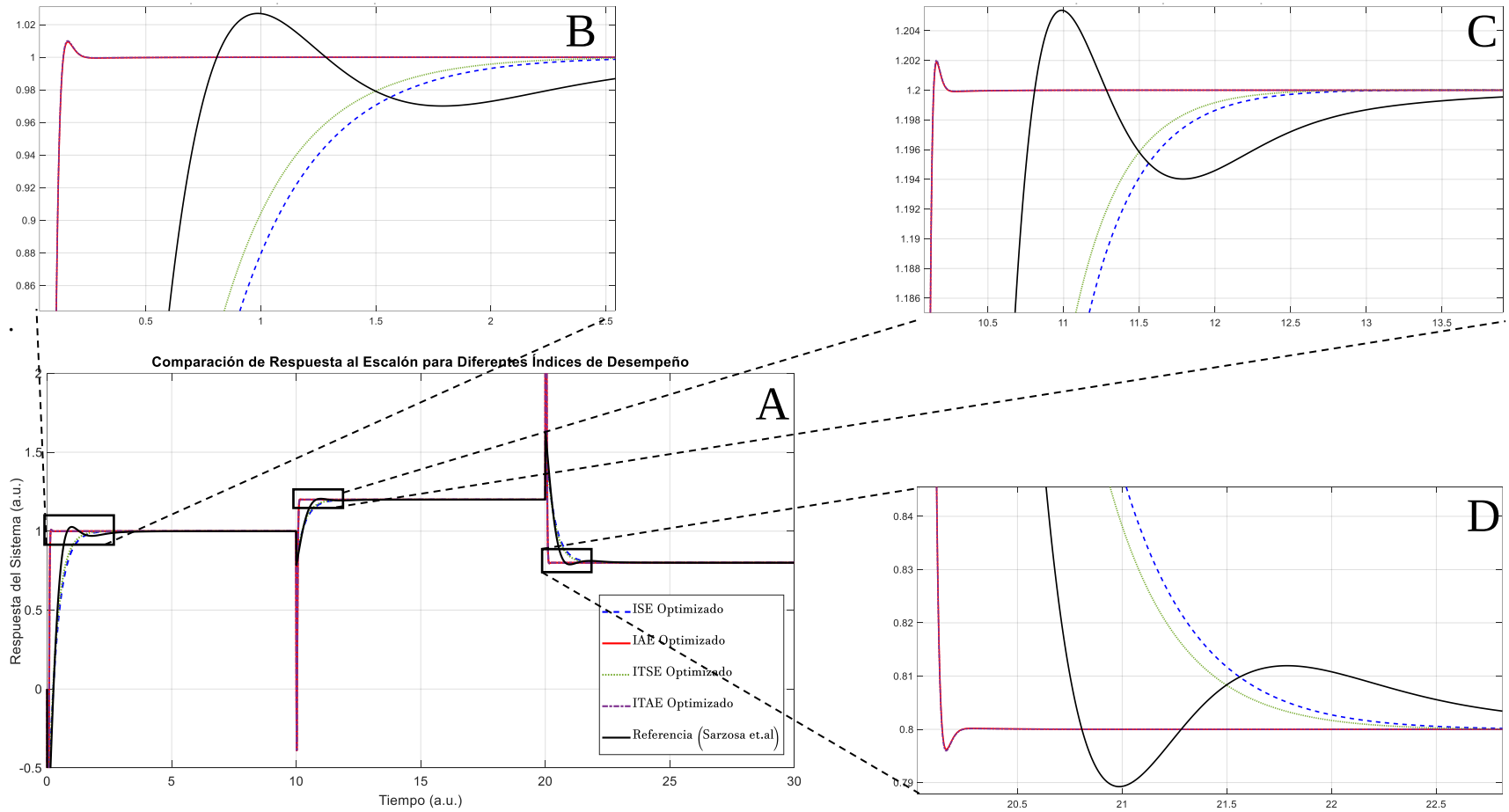


Figura 4.2. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 2) ante cambios escalonados de referencia. (A) Vista general de la trayectoria de seguimiento para los diferentes índices de desempeño y la referencia base. (B) Detalle del transitorio inicial. (C) Detalle del cambio de consigna intermedio (D) Detalle del último cambio de consigna y estado estacionario final.

La Figura 4.2 muestra y valida nuevamente que la minimización IAE e ITAE (líneas roja y magenta) induce una respuesta de características agresivas, en todos los cambios de consigna, lo que genera picos en el intento de compensar la dinámica inversa inicial. El hallazgo más relevante de este análisis fue la magnitud de la desviación transitoria presentado por la respuesta ante el primer escalón, así, se define el criterio de diseño para la implementación de la función objetivo compuesta. El valor máximo observado servirá como línea base para establecer el límite de seguridad. El valor límite (Y_{lim}) se fijó en: 1.005 (0.5%). Este valor corresponde a restringir el sobreimpulso a aproximadamente la mitad del máximo registrado (1.01%), imponiendo un margen de estabilidad robusto que el algoritmo deberá respetar en la siguiente fase.

4.1.3 Análisis del Caso de Estudio 3

Para este caso de estudio, el cual presenta un retardo de transporte, el comportamiento dinámico presentó una fuerte dependencia del criterio de desempeño seleccionado. Mostrando discrepancias notables entre los índices, característica que no se observó en los casos previos. La Tabla 4.3 presenta el resumen de las métricas de este caso de estudio.

La Tabla 4.3 revela que, se logró efectivamente la reducción de los tiempos de estabilización en comparación con la referencia, índices como el ISE provocan picos transitorios críticos con un máximo de 15.28%. La interpretación gráfica de esta tabla, es mostrada en la Figura 4.3 presentando la respuesta del sistema en dominio del tiempo.

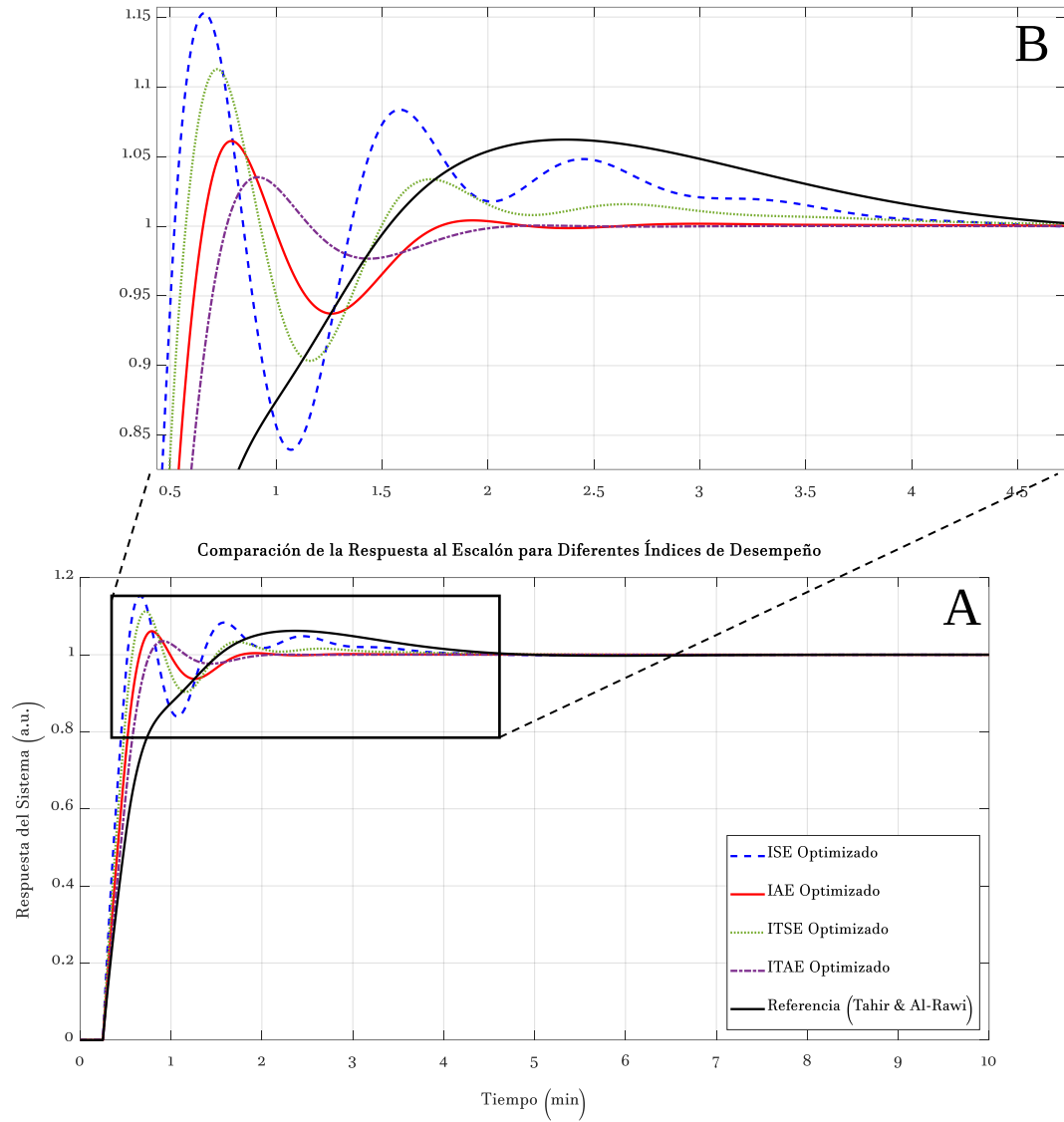


Figura 4.3. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 3). (A) Vista general de la respuesta del sistema. (B) Detalle de la respuesta transitoria.

Se evidencia en la Figura 4.3 que la minimización estricta del error cuadrático, correspondiente a la línea azul, genera una subida abrupta en el intento de anular rápidamente las grandes desviaciones iniciales, ignorando la penalización por oscilación. Así, el hallazgo más importante de esta etapa fue la magnitud de la desviación transitoria. El valor límite se fijó en 1.08 (8%), valor corresponde a restringir el sobreimpulso generado por el ISE a aproximadamente la mitad del máximo registrado (15.28%).

Tabla 4.3. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 3.

Criterio de Desempeño	Estrategia de Sintonización	Parámetros del Controlador (K_p, K_i, K_d)	Costo Opt. (J_{base})	Costo Referencia (J_{base})	Sobreimpulso, M_p (%)	Tiempo de Estabilización, t_s (s)
Definida por la referencia	Ziegler y Nichols	1.2, 1.25, 0.36			6.212	3.821
ISE	Opt. MH	1.931, 1.911, 0.683	0,343	0.426	15.28	3.08
ITSE	Opt. MH	1.980, 1.612, 0.565	0.0671	0.116	11.26	1.95
IAE	Opt. MH	1.892, 1.371, 0.469	0.467	0.696	6.11	1.59
ITAE	Opt. MH	1.763, 1.291, 0.381	0.141	0.549	3.516	1.57

Tabla 4.4. Análisis comparativo de desempeño dinámico y convergencia de la solución: Sintonización Metaheurística vs. Referencia para el Caso de Estudio 4.

Criterio de Desempeño	Estrategia de Sintonización	Parámetros del Controlador (K_p, K_i, K_d)	Costo Opt. (J_{base})	Costo Referencia (J_{base})	Sobreimpulso, M_p (%)	Tiempo de Estabilización, t_s (s)
Definida por la referencia	Síntesis Dahlin	1.943, 2.639, 0.497			5.124	101
ISE	Opt. MH	5.305, 3.676, 1.390	5.997	8.008	7.614	100.5
ITSE	Opt. MH	5.376, 3.712, 1.390	601	804.3	7.61	100.5
IAE	Opt. MH	9.005, 4.914, 1.519	1.491	3.520	9.284	100.3
ITAE	Opt. MH	9.010, 4.914, 1.520	149.09	354.9	9.284	100.3

4.1.4 Análisis del Caso de Estudio 4

Para este último caso de estudio, caracterizado por presentar una respuesta inversa y una fuerte no linealidad, al igual que el resto de casos demostró una dependencia ante el criterio de desempeño seleccionado.

Se puede observar en la Tabla 4.4 una reducción en el valor del tiempo de estabilización respecto a la evaluación con la sintonización Dahlin. Los índices de desempeños basados en el error absoluto generaron respuestas más agresivas del conjunto empelado con un sobreimpulso máximo de 9.28%.

Un hallazgo relevante fue que ambos índices convergieron prácticamente al mismo valor de la función de costo, generando los mismos parámetros del controlador. Este fenómeno se atribuye a la complejidad dinámica derivado de su naturaleza no lineal, modelado mediante EDO y a la presencia de la respuesta inversa la cual genera una convergencia forzada por restricción estructural.

Otro aspecto interesante es el comportamiento al ser evaluación con los índices de desempeño basados en el cuadrado del error, los cuales demuestran ser más conservadores, atribuyendo este efecto al castigo severo de la desviación inversa inicial generada. La representación gráfica de esta información se muestra en la Figura 4.4.

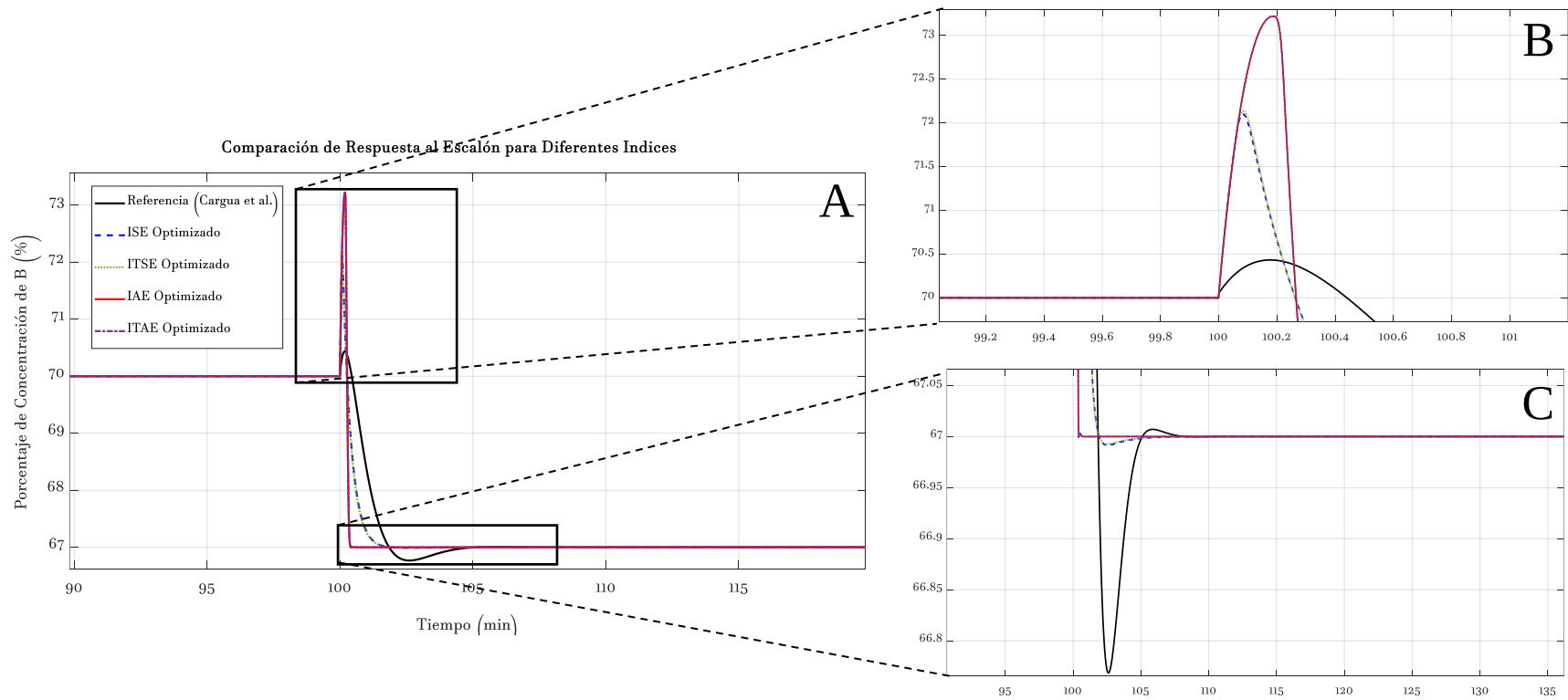


Figura 4.4. Respuesta al escalón sintonizado con diferentes índices (Caso 4). (A) Vista general de la respuesta del sistema. (B) Detalle de la respuesta inversa. (C) Detalle del cambio de consigna y estado estacionario final.

La Figura 4.4, muestra claramente el detalle de la respuesta inversa inicial. El cambio de la consigna genera un incremento transitorio de la concentración antes de llevar al sistema al nuevo *setpoint*. Se observa que la minimización con los índices absolutos genera un seguimiento de la consigna mucho más rápida, pero a costa de un sobreimpulso inaceptables para algunos procesos prácticos, el cual superó un 9% de la consigna final.

Tras analizar el comportamiento de este sistema particular, es evidente que cualquiera de las respuesta optimizadas son inaceptables, puesto que si se habla de un producto sumamente costoso, la elevación de esta concentración podría afectar críticamente la operación, es por eso que se ha decidido evaluar el comportamiento de la función objetivo compuesta, limitando la respuesta inversa con base a la dinámica de referencia, así, se define el criterio de diseño para la función objetivo compuesta, cuyo valor límite se fijó en 70.21% de concentración de B.

Independientemente de las particularidades de cada caso, el análisis global revela que la optimización mono-objetivo es estructuralmente inconsistente en términos de seguridad. En todos los escenarios, al menos uno de los índices provocó violaciones de las restricciones operativas, validando la necesidad de incorporar una barrera explícita. Esta comparación reveló una correlación clave: los índices que generaron mayor sobreimpulso fueron también los que lograron el tiempo de subida más rápido. Esta característica es fundamental para la estrategia propuesta. La lógica de la función objetivo compuesta busca aprovechar la capacidad de reacción rápida de los índices agresivos. En lugar de sacrificar velocidad para ganar seguridad, la estrategia permite al optimizador buscar las altas ganancias necesarias para minimizar el tiempo de subida, desacoplando el sobreimpulso natural mediante una restricción geométrica. De esta forma, la barrera actúa como un método de repulsión que permite la aceleración inicial para subir rápido, pero penaliza drásticamente cualquier intento de cruzar el límite de amplitud establecido. El resultado es una respuesta que conserva la agilidad de los índices rápidos, pero obligada a mantenerse dentro de una zona segura definida.

4.2 Evaluación Global de Estrategia de Control y Validación

Una vez identificadas las limitaciones que presenta la optimización mono-objetivo para este trabajo, en esta sección se evalúa el desempeño de la función propuesta con el objetivo de validar la capacidad de las estrategias metaheurísticas para sintetizar controladores que logren cumplir con las restricciones de sobreimpulso impuestas.

Así, se realizó la implementación de la función racional tomando en cuenta el criterio de desempeño base determinado en la etapa anterior. A continuación, se presenta el análisis comparativo entre la sintonización restringida frente a la sintonización libre de cada caso de estudio.

Para dotar de mayor robustez al análisis, se incluyó una comparación con un controlador por modos deslizantes estándar. El propósito de esta inclusión no es evaluar el diseño del SMC, sino utilizarlo como una referencia de desempeño para contrastar la capacidad de la estrategia propuesta frente a controladores no lineales conocidos por su robustez y bajo sobreimpulso.

Es importante precisar que, para la definición de las estructuras de control del control PID, y las ecuaciones de síntesis del SMC, se tomó como referencia la metodología basada en la aproximación de sistemas de primer orden con tiempo muerto (FOPDT). Si bien los sistemas analizados en los distintos casos de estudio presentan dinámicas de orden superior, esta aproximación es una práctica estándar que permite establecer un punto de partida de diseño basado en la dinámica dominante del proceso, aquí, los algoritmos evaluados ajustan los parámetros finales evaluando la respuesta de la planta real completa, compensando así las discrepancias entre el modelo reducido de diseño y la dinámica real del sistema.

4.2.1 Análisis del Caso de Estudio 1

Definido el límite operativo de sobreimpulso máximo $Y_{lim} = 1.04$, valor establecido a partir de la necesidad de reducir la respuesta oscilatoria observada en la sintonización base del ITAE.

Previo a la comparación final, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad sobre el factor de peso para cada función objetivo compuesta. Este procedimiento permitió evaluar el compromiso entre la agresividad del control y el cumplimiento de la restricción. A partir de este análisis, se seleccionó el controlador correspondiente a una relación de pesos: $\alpha_1 = 4$, $\alpha_2 = 1$ para el ISE, $\alpha_1 = 4$, $\alpha_2 = 1$ para el ITSE, $\alpha_1 = 6$, $\alpha_2 = 1$ para el IAE y $\alpha_1 = 6$, $\alpha_2 = 1$ para el ITAE, ya que estas configuraciones demostraron el mejor balance de desempeño, minimizando el error sin violar la barrera establecida.

4.2.1.1 Evaluación bajo el criterio ISE

En este análisis se contrastan tres escenarios: la sintonización base, la sintonización propuesta, y como referencia de robustez, se incluyen los resultados de un controlador por modos deslizantes.

La información de la Tabla 4.5, muestra un comportamiento de alta convergencia entre las funciones evaluadas. La sintonización base bajo el criterio ISE generó, de manera natural, una respuesta con un desempeño dinámico excelente y un sobreimpulso marginal del 0.0034%.

Pese a que el límite operativo se estableció con una holgura hasta 1.04, la función barrera hiperbólica demostró ser lo suficientemente estricta como para impedir que el sistema siquiera se acercara a esta frontera. Gracias al manejo adecuado de los factores de peso en la función de costo

compuesta, el algoritmo penalizó asintóticamente cualquier tendencia oscilatoria, forzando la solución hacia un sobreimpulso estricto de 0%. Esto demuestra que la estrategia prioriza la seguridad absoluta sobre el aprovechamiento del margen de tolerancia.

Lo más destacable es que esta restricción rigurosa no tuvo un efecto agresivo en la velocidad de respuesta. El tiempo de establecimiento se mantuvo prácticamente inalterado, de 1.71 s a 1.73 s. Esto valida que la propuesta logra mantener la consigna rápidamente.

En la columna del costo base se observa una equivalencia práctica casi perfecta con valores de 0.745 vs 0.744. La similitud en los parámetros del PID confirma que ambos métodos convergieron al mismo mínimo global. Frente al SMC, el PID propuesto ofrece un mejor desempeño costo y velocidad, considerando que las ecuaciones se basan en un FOPTD, demostrando la misma robustez y generando un sobreimpulso de 0%. El comportamiento dinámico del caso de estudio enfocado en el ISE se ilustra en la Figura 4.5.

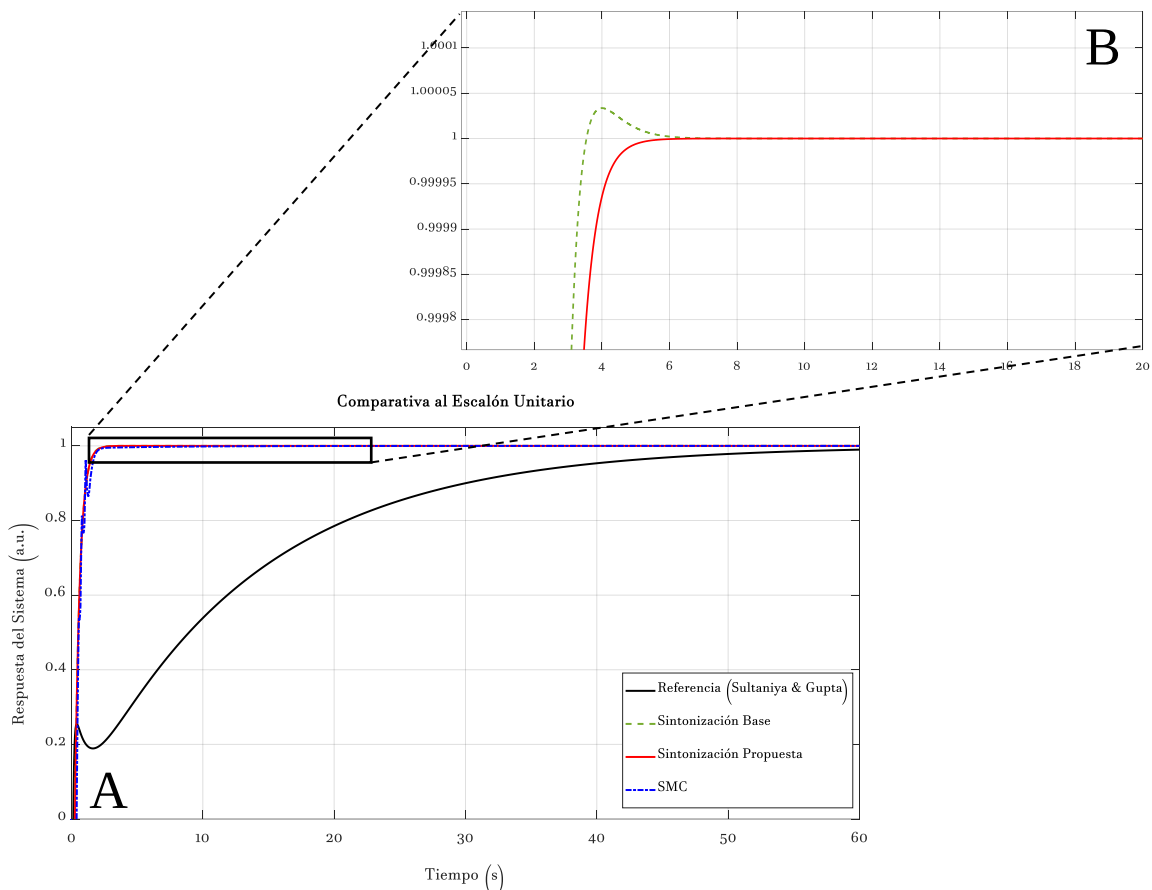


Figura 4.5. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1. (A) Desempeño de la sintonización base (ISE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

La Figura 4.5 muestra claramente que el controlador de referencia presenta una respuesta sobreamortiguada y extremadamente lenta cerca de 51 segundos. Los diseños de control en este trabajo logran una subida casi instantánea en comparación con la referencia, validando la mejora en la velocidad de respuesta.

Como se anticipaba por la similitud numérica en la Tabla 4.5, las curvas de respuesta de la sintonización base, línea discontinua verde, y la sintonización propuesta, línea roja continua, presentan una superposición visual casi total.

La importancia de la estrategia propuesta radica en su capacidad de "ajuste fino": aunque la diferencia es imperceptible a escala global, el algoritmo con barrera garantizó matemáticamente la eliminación del remanente de sobreimpulso del 0.024 al 0% sin distorsionar la trayectoria de subida rápida que ya presentaba la optimización base.

Finalmente, la respuesta del PID Propuesto replica casi idénticamente el comportamiento del SMC. Ambas señales alcanzan la referencia con precisión y sin sobrepaso. Esto confirma que la estrategia propuesta logró dotar al PID de la robustez del SMC, manteniendo la eficiencia de una ley de control lineal y evitando comportamientos agresivos innecesarios gracias a la correcta gestión de los pesos en la función objetivo.

Tabla 4.5. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 1.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (s)
PID (Sultaniya & Gupta)	PSO	0.233	0.134	0.458	N/A	N/A	N/A	6.184	0	51.10
PID (ISE)	Opt. MH	1.978	2.297	0.427	N/A	N/A	N/A	0.745	0.0034	1.71
PID (Función Compuesta)	CS	1.979	2.292	0.426	N/A	N/A	N/A	3.804 0.744	0	1.73
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.583	5.0019	1.174	0.823	0	1.85

Tabla 4.6. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 1.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (s)
PID (Sultaniya & Gupta)	PSO	0.233	0.134	0.458	N/A	N/A	N/A	41.65	0	51.10
PID (ITSE)	Opt. MH	3.108	3.686	0.742	N/A	N/A	N/A	0.0521	0.910	0.95
PID (Función Compuesta)	CS	3.202	3.514	0.738	N/A	N/A	N/A	25.05 0.053	$1.98 \cdot 10^{-6}$	1.25
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.468	5.329	1.274	0.587	0.87	1.15

4.2.1.2 Evaluación bajo el criterio ITSE

La información de la Tabla 4.6, revela que la naturaleza del índice ITSE condujo a la sintonización base a priorizar la velocidad, logrando un tiempo de establecimiento de 0.95 s. Sin embargo, esta agresividad conllevó la aparición de un sobreimpulso del 0.91%. Aunque este valor es numéricamente bajo, puede representar una violación a la restricción estricta de diseño, evidenciando que la optimización libre tiende a sacrificar márgenes de seguridad para ganar milisegundos de respuesta.

La sintonización propuesta muestra la capacidad de reducir la agresividad del ITSE. El algoritmo convergió a una solución con un sobreimpulso prácticamente nulo ($1.98 \cdot 10^{-6}$). Esta acción generó un costo moderado en el tiempo de establecimiento de 0.95 s a 1.25 s, un valor muchísimo más aceptable y muy superior a la referencia.

Un aspecto crucial es la comparación del costo base real, es decir la evaluación de los parámetros de función compuesta en el sistema original. La propuesta obtuvo un valor de 0.053, marginalmente superior al de la base 0.0521. Esta diferencia mínima demuestra que, a pesar de la adición de la función barrera, convergió a una solución óptima que satisface las restricciones impuestas, sin reducir la capacidad del controlador para minimizar el ISE.

Se puede realizar un contraste directo del comportamiento dinámico de las cuatro estrategias evaluadas frente al escalón unitario en la Figura 4.6, revelando la naturaleza del ITSE, representada por la línea discontinua verde, la cual prioriza la velocidad de subida, generando un sobreimpulso visible del 0.91% (Figura 4.6 (B)). La línea roja continua representa la acción de la función propuesta, demostrando la fortaleza de la barrera hiperbólica. Se observa la eliminación del pico de la sintonización base, cuya reacción se da por un incremento marginal en el tiempo de establecimiento; de 1.25 s vs 0.95 segundos.

En relación al desempeño comparativo frente a el controlador por modos deslizantes, la información de la tabla y la gráfica indican que, bajo las consideraciones hechas, el SMC presentó un ligero sobreimpulso del 0.87%. En este sentido, la propuesta del presente trabajo cumple con la restricción incluso con un sobreimpulso nulo, demostrando su validez frente a los casos de comparación.

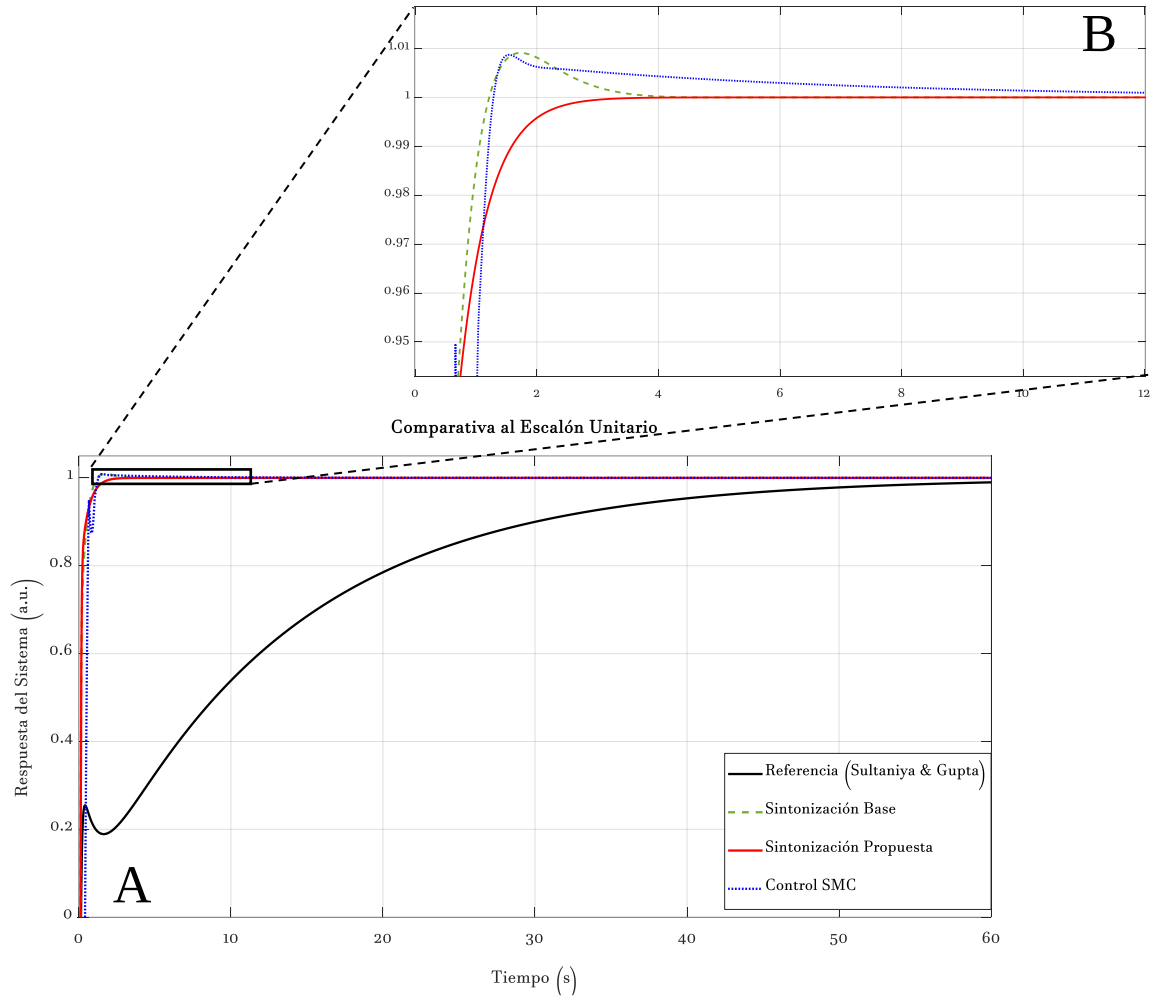


Figura 4.6. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1. (A) Desempeño de la sintonización base (ITSE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

4.2.1.3 Evaluación bajo el criterio IAE

La Tabla 4.7 presenta el resumen de las métricas resultantes para este particular. La evaluación bajo el criterio de desempeño condujo a la sintonización base que logró un tiempo de establecimiento extremadamente rápido de 0.136 s, esto generó un sobreimpulso de 0.97%, y aunque este valor es numéricamente bajo puede representar una violación a la restricción estricta de seguridad.

La sintonización propuesta ofrece contrarrestar eficientemente esta acción agresiva, la cual presentó una solución similar, pero con un impulso prácticamente nulo ($4 \cdot 10^{-5}$), junto con un incremento marginal en el tiempo de establecimiento de 0.15 segundos.

Los parámetros obtenidos en la sintonización de la función compuesta fueron evaluados en la función objetivo base, generando un valor de 0.41 frente al costo mono-objetivo, que fue de 0.40,

esta mínima diferencia demuestra que la adición de la función barrera logra garantizar la seguridad operativa sin degradar la funcionalidad del controlado. La figura 4.7 muestra el contraste de este resumen.

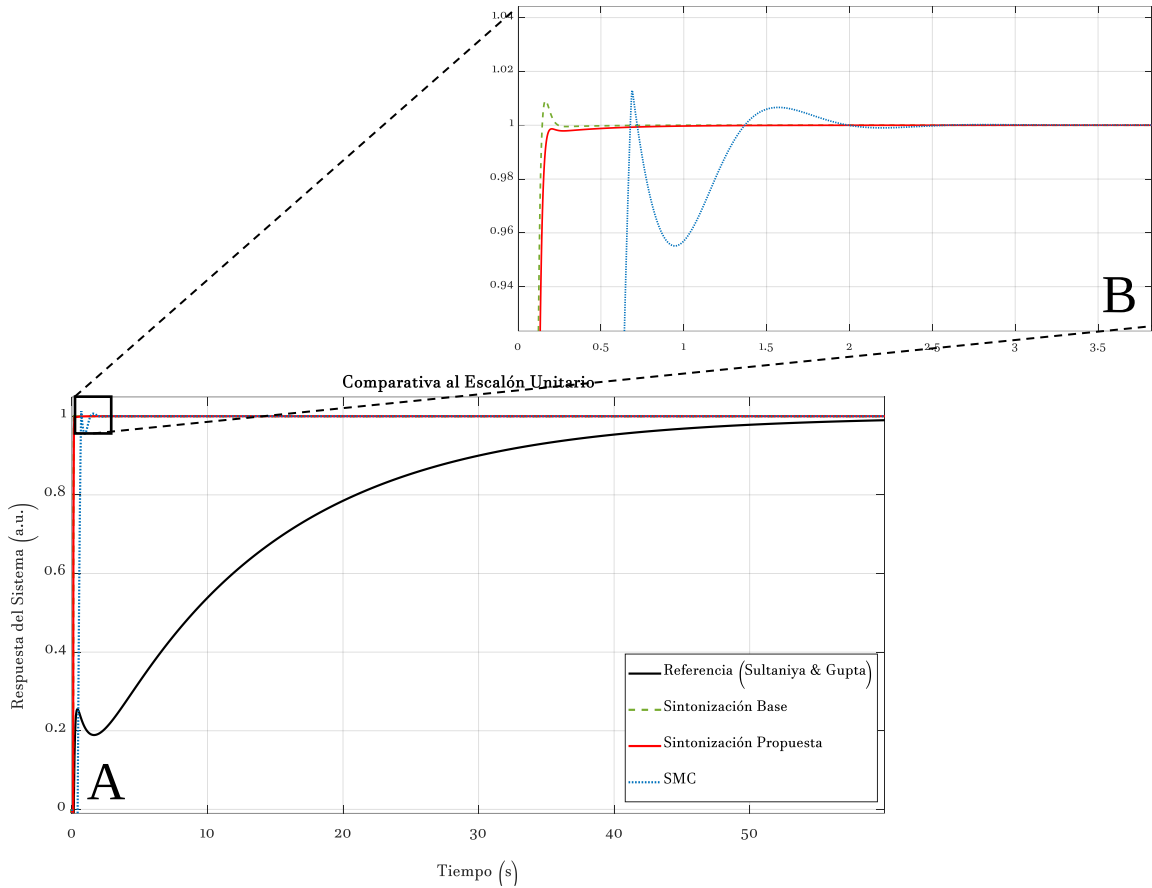


Figura 4.7. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1. (A) Desempeño de la sintonización base (IAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

En la Figura 4.7, la línea de color verde, revela la naturaleza del IAE, respondiendo agresivamente a la reducción del error acumulado, generando un sobreimpulso visible de 0.97%. La línea de color rojo continúa representando la función propuesta, demostrando nuevamente la característica de su geometría. Lo más destacado, es la eliminación total del pico de la sintonización base.

En relación al desempeño comparativo frente al controlador SMC, tanto la tabla como la gráfica de este particular, muestra un sobreimpulso de aproximadamente 1.30%. En este sentido, la propuesta cumple con la restricción de diseño de manera más rigurosa.

Tabla 4.7. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 1

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (s)
PID (Sultaniya & Gupta)	PSO	0.233	0.134	0.458	N/A	N/A	N/A	12.64	0	51.10
PID (IAE)	Opt. MH	3.613	4.190	0.777	N/A	N/A	N/A	0.409	0.970	0.14
PID (Función Compuesta)	CS	3.597	4.167	0.774	N/A	N/A	N/A	26.44 0.410	$4 \cdot 10^{-5}$	0.15
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.417	5.104	1.390	0.704	1.295	1.19

Tabla 4.8. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 1

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (s)
PID (Sultaniya & Gupta)	PSO	0.233	0.134	0.458	N/A	N/A	N/A	160.2	0	51.10
PID (ITAE)	Opt. MH	3.641	4.224	0.783	N/A	N/A	N/A	0.015	8.27	0.18
PID (Función Compuesta)	FS	3.606	4.182	0.775	N/A	N/A	N/A	0.107 0.015	0.39	0.15
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.396	4.859	1.425	0.195	1.93	0.67

4.2.1.4 Evaluación bajo el criterio ITAE

La Tabla 4.8 resume las métricas para la evaluación mencionada. La información revela que el índice ITAE, forzó a la sintonización base a una respuesta muy agresiva. El resultado sobresaliente es el tiempo de estabilización de 0.18 s, sin embargo, se generó un sobreimpulso de 8.27%. Este valor representa la mayor violación de sobreimpulso observado entre todos los criterios evaluados para este caso.

En contraste, la información relativa a la función compuesta indica que no solo redujo el sobreimpulso de 8.27% a 0.39%, sino que, mejoró notablemente el tiempo de estabilización de 0.18 a 0.15 s. Además, la evaluación de la función compuesta en la sintonización base genera prácticamente el mismo costo, al igual que en los anteriores casos. La representación gráfica de este resumen se muestra en la siguiente figura.

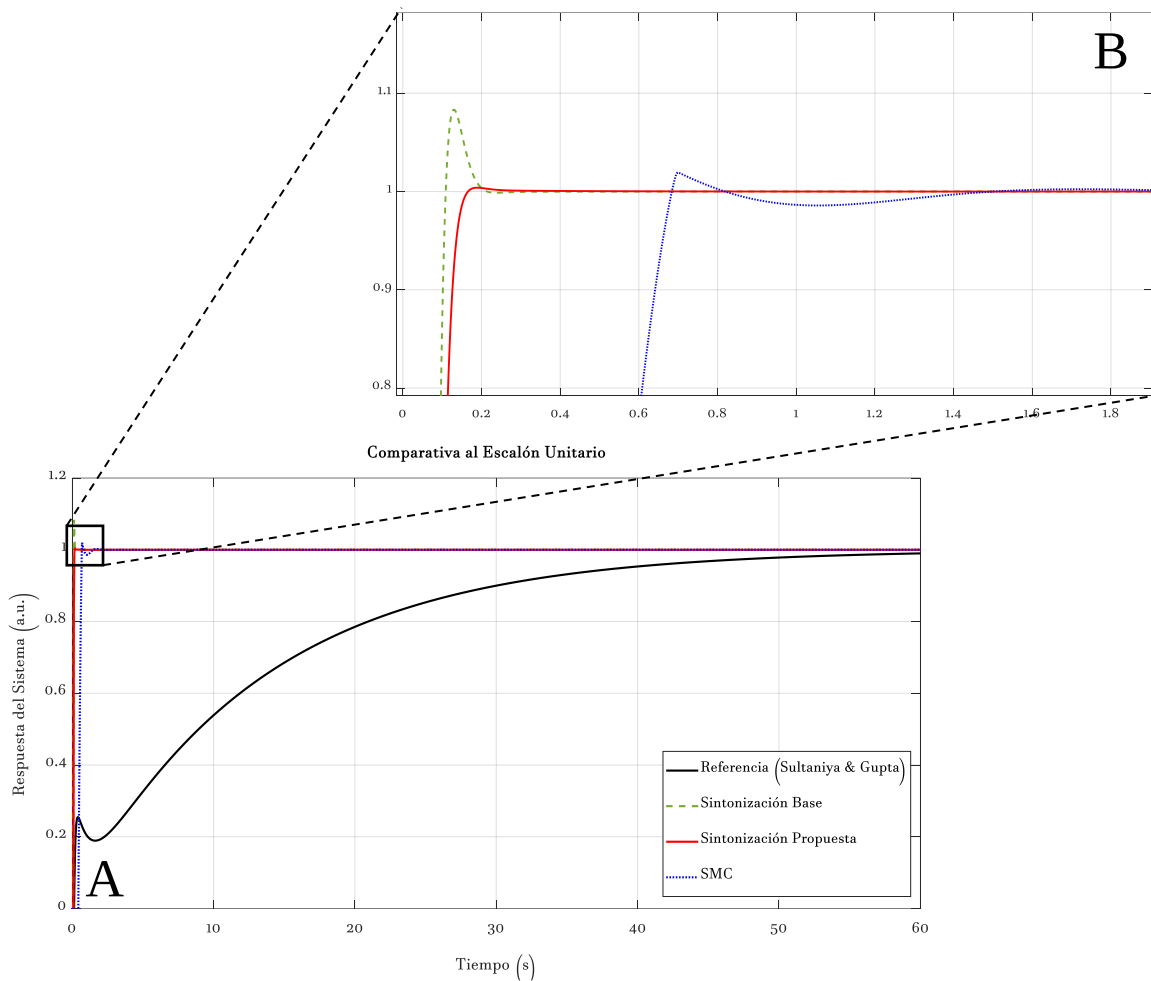


Figura 4.8. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 1. (A) Desempeño de la sintonización base (ITAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

Se puede visualizar la respuesta de la sintonización base como la curva discontinua de color verde la cual exhibe un pico pronunciado con un valor cercano a 1.1, mientras la línea de color roja muestra una trayectoria sin mayor sobreimpulso.

Al comparar esta respuesta desarrollada en este trabajo frente al SMC, este último presentó un desempeño inferior, lo que confiere a la sintonización propuesta un mejor balance global, superando tanto a la agresividad del control clásico optimizado como a la respuesta del SMC.

4.2.2 Análisis del Caso de Estudio 2

Para el análisis de este caso se definió el límite operativo de sobreimpulso máximo en: $Y_{lim} = 1.005$, valor establecido a partir de la necesidad de reducir la respuesta oscilatoria de muy baja presencia, y así evaluar el comportamiento de la propuesta en estos tipos de escenarios.

Al igual que en el caso anterior, se realizó el respectivo análisis de sensibilidad sobre el factor de peso para cada función objetivo compuesta con el fin de observar el cumplimiento de la restricción operativas que se impusieron. A partir de este análisis, se seleccionó el controlador correspondiente al diseño obtenido con la relación de: $\alpha_1 = 6$, $\alpha_2 = 1$ para el ISE, $\alpha_1 = 6$, $\alpha_2 = 1$ para el ITSE, $\alpha_1 = 6$, $\alpha_2 = 1$ para el IAE y $\alpha_1 = 20$, $\alpha_2 = 1$ para el ITAE, puesto que, dichas configuraciones demostraron el mejor balance de desempeño, minimizando el error y cumpliendo con la restricción de sobreimpulso.

4.2.2.1 Evaluación bajo el criterio ISE

De acuerdo con la información de la Tabla 4.9, la sintonización base ISE mostró un comportamiento competente, con un sobreimpulso marginal de 0.005% y un tiempo de estabilización de 1.63 unidades de tiempo. La estrategia propuesta supero significativamente estos valores, logrando una respuesta rápida de entre todas las comparaciones con un tiempo de estabilización de 1.04 u.t., además de eliminar por completo el sobreimpulso. El incremento en el costo base es mínimo justificándose por la ganancia en velocidad y estabilidad.

La Figura 4.9 detalla la curva propuesta, ehibiendo una subida agresiva pero controlada, alcanzado el *setpoint* antes que el SMC. Confirmando la eficacia de la sintonizacion propuesta maximizando la velocidad de subida sin violar restricciones.

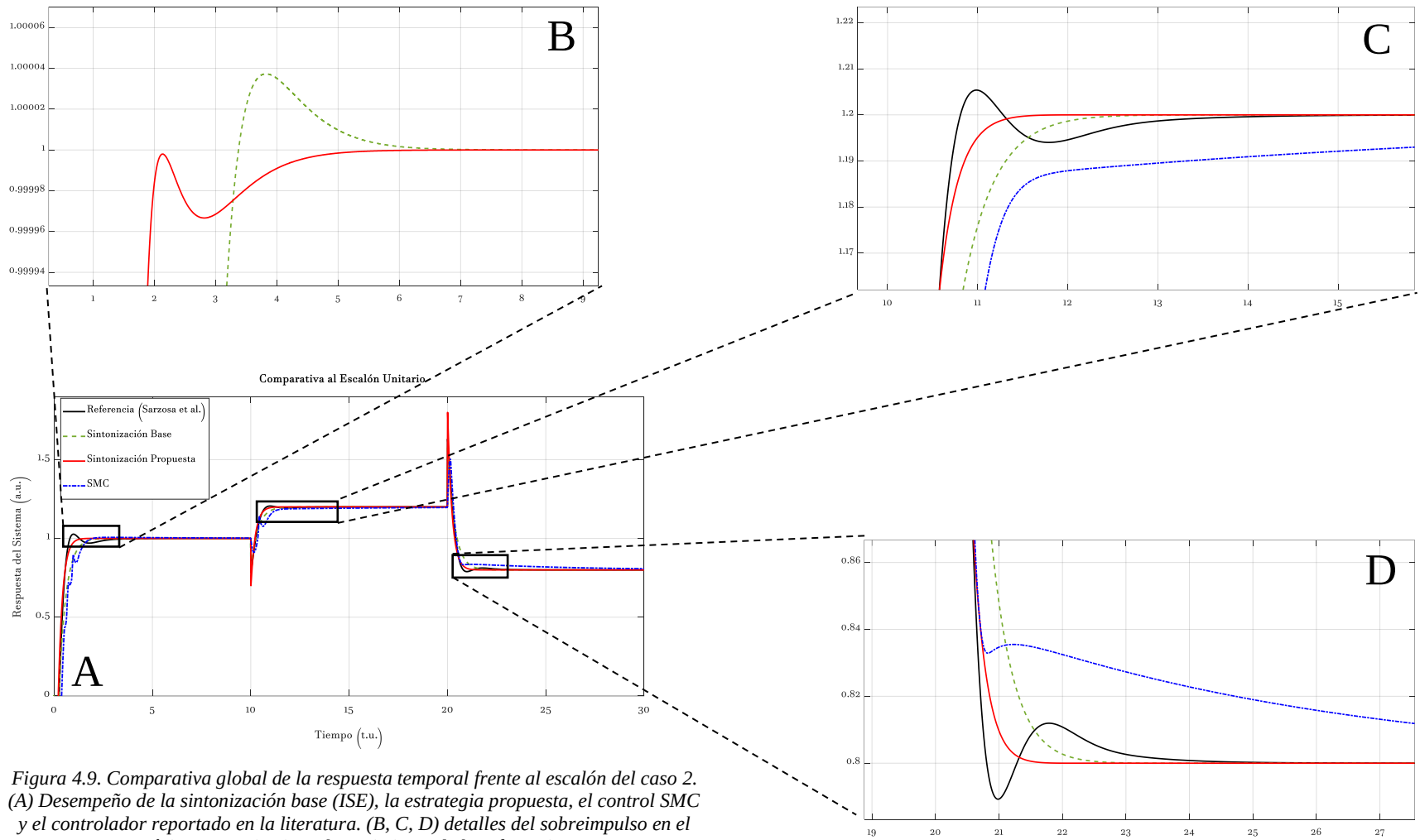


Figura 4.9. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2. (A) Desempeño de la sintonización base (ISE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C, D) detalles del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

Tabla 4.9. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 2.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Sarzos et al.)	No especificada	2.612	2.786	0.469	N/A	N/A	N/A	0.889	2.66	2.26
PID (ISE)	Opt. MH	2.071	2.381	0.445	N/A	N/A	N/A	0.853	0.005	1.63
PID (Función Compuesta)	DE	2.558	2.95	0.547	N/A	N/A	N/A	150.06 0.901	0	1.04
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.594	4.548	1.103	0.948	0.68	1.65

Tabla 4.10. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 2.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Sarzos et al.)	No especificada	2.612	2.786	0.469	N/A	N/A	N/A	2.790	2.66	2.26
PID (ITSE)	Opt. MH	2.175	2.503	0.470	N/A	N/A	N/A	2.705	0.01	1.51
PID (Función Compuesta)	DE	2.345	2.715	0.498	N/A	N/A	N/A	150.413 2.723	0	1.22
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.594	4.548	1.103	3.545	0.67	1.65

4.2.2.2 Evaluación bajo el criterio ITSE

La sintonización con ITSE (Tabla 4.10) mostró un desempeño estable, con un sobreimpulso un mayor que el caso anterior, el cual fue de 0.01% y un tiempo de estabilización de 1.51 unidades de tiempo. Se observa también que la estrategia propuesta mejoró ambas métricas, logrando eliminar el sobreimpulso en su totalidad y reduciendo el tiempo de estabilización a 1.22 u.t., siendo la respuesta más rápida de todas las evaluaciones de este caso. Y aunque el costo aumento levemente de 2.705 a 2.723, este puede considerarse despreciable considerando las mejoras.

En la Figura 4.10 reportada, la línea de color rojo, muestra una subida limpia, es decir directa al seguimiento de la consigna. Al ser comparado con el SMC y con la sintonización base, la propuesta resuelta superior.

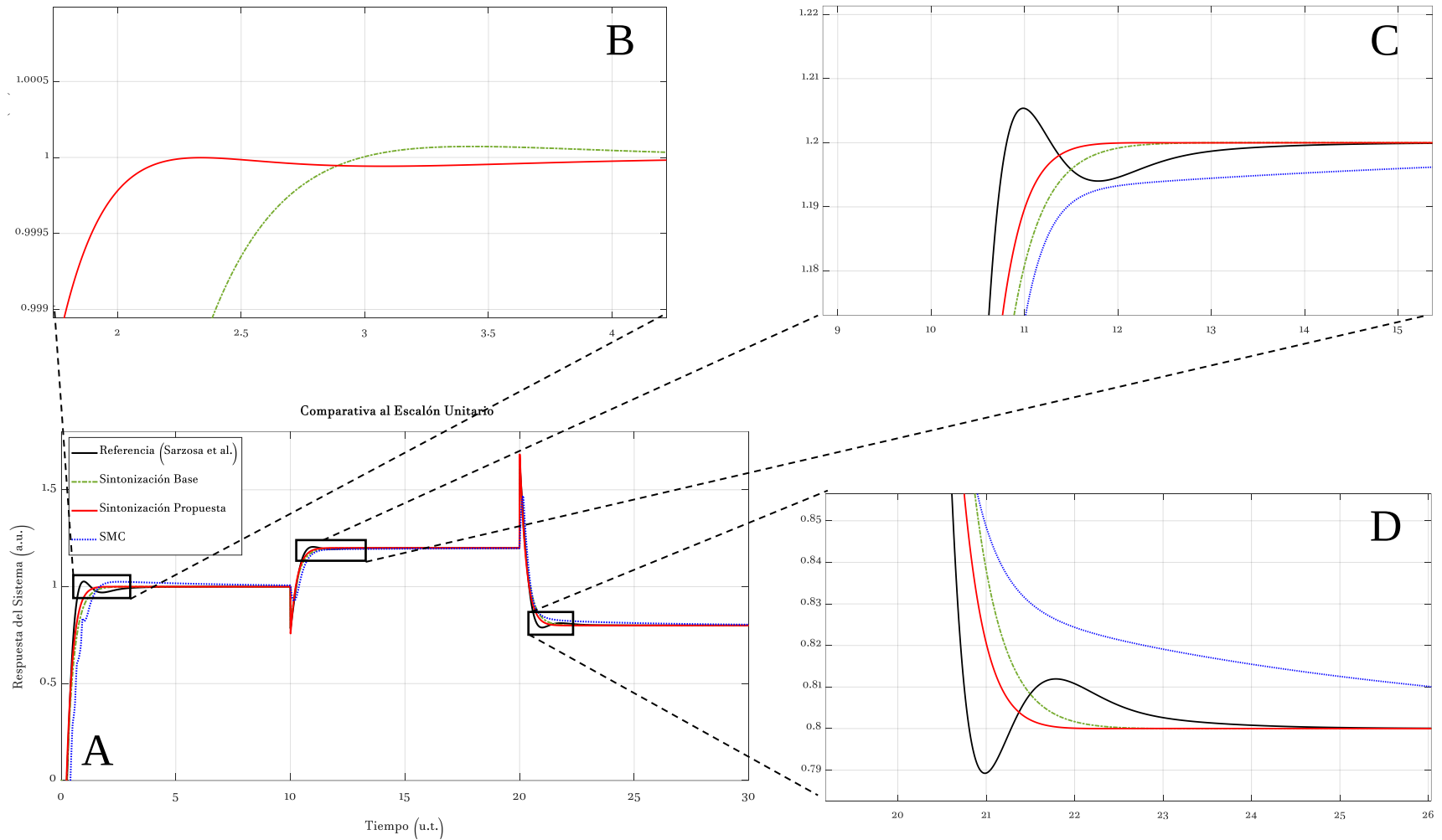


Figura 4.10. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2. (A) Desempeño de la sintonización base (ITSE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C, D) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

4.2.2.2 Evaluación bajo el criterio IAE

Dada la información de la Tabla 4.11, se observa que la sintonización base con IAE ha priorizado la velocidad extrema, logrando un tiempo de establecimiento de 0.13 unidades de tiempo, lo que trae consigo un sobreimpulso de 0.94%. Frente a la estrategia propuesta este problema fue eliminado por completo, ya que el sobreimpulso es de 0% con una penalización comprensible en el aumento leve del tiempo de estabilización de 0.17 unidades de tiempo. Mientras que la diferencia entre los costos evaluadas en la función objetiva base es despreciable de 0.626 y 0.639 respectivamente, esto indica que se ganó estabilidad sin sacrificar la eficiencia del controlador.

En la Figura 4.11, la tendencia de la sintonización propuesta prevalece. La línea de color rojo muestra un desempeño suave hacia el punto de referencia y sin generar ningún sobreimpulso, este desempeño en comparación con el SMC es significativo demostrando que la restricción de la propuesta implementada es superior en este caso específico.

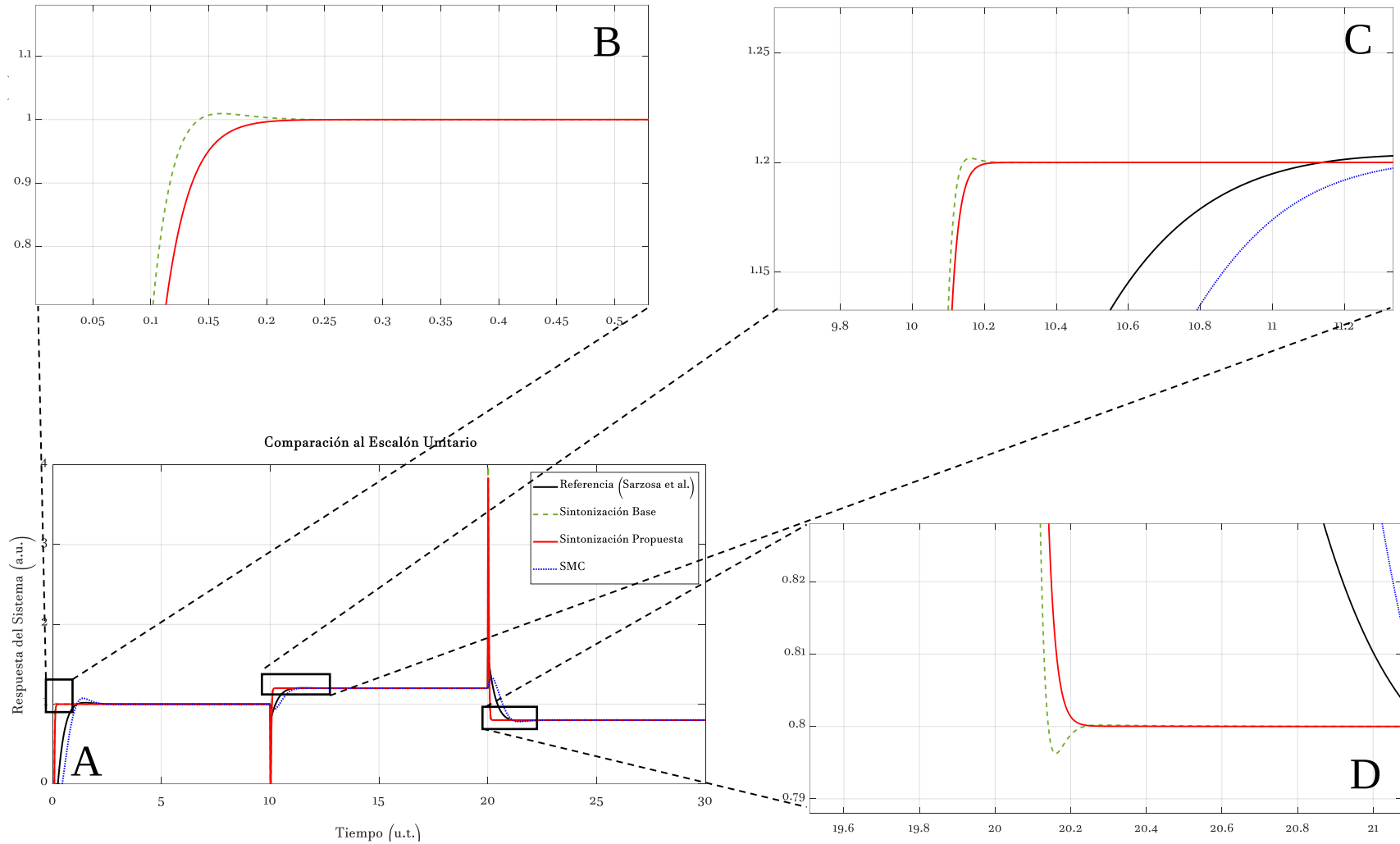


Figura 4.11. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2. (A) Desempeño de la sintonización base (IAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C, D) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

Tabla 4.11. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 2.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Sarzos et al.)	No especificada	2.612	2.786	0.469	N/A	N/A	N/A	1.00	2.66	2.26
PID (IAE)	Opt. MH	3.776	4.357	0.812	N/A	N/A	N/A	0.626	0.94	0.13
PID (Función Compuesta)	PSO	3.748	4.314	0.806	N/A	N/A	N/A	2.388 0.629	0	0.17
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	9.978	2.193	0.597	1.366	7.41	1.98

Tabla 4.12. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 2.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Sarzos et al.)	No especificada	2.612	2.786	0.469	N/A	N/A	N/A	6.59	2.66	2.26
PID (ITAE)	Opt. MH	3.777	4.347	0.812	N/A	N/A	N/A	3.94	1.01	0.13
PID (Función Compuesta)	CS	3.755	4.315	0.809	N/A	N/A	N/A	0.02 3.96	0	0.15
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	9.979	2.167	0.597	8.96	8.03	1.98

4.2.2.3 Evaluación bajo el criterio ITAE

El resumen de las métricas generadas por esta (Tabla 4.12) muestra un comportamiento agresivo típico de este criterio, de igual manera que el caso 1, aquí el índice ITAE ha alcanzado el tiempo de estabilización más bajo de entre todo el grupo, con un valor de 0.13 unidades de tiempo, incurriendo el efecto de generar el mayor sobreimpulso, siendo de un 1.01%.

La anulación de esta característica ha sido la respuesta de la estrategia propuesta, logrando un sobreimpulso de 0%. El impacto del tiempo de establecimiento ha sido mínimo el cual fue de 0.15 unidades de tiempo. Es destacable mencionar que el costo evaluado en la función objetivo base se mantuvo prácticamente igualado con 3.94 en esta última vs a 3.96 en la propuesta, demostrando que la restricción de la seguridad se satisfizo sin necesidad de un aumento crítico en la calidad de las soluciones generadas por los algoritmos de optimización. Esto es corroborado en la figura que se presenta a continuación.

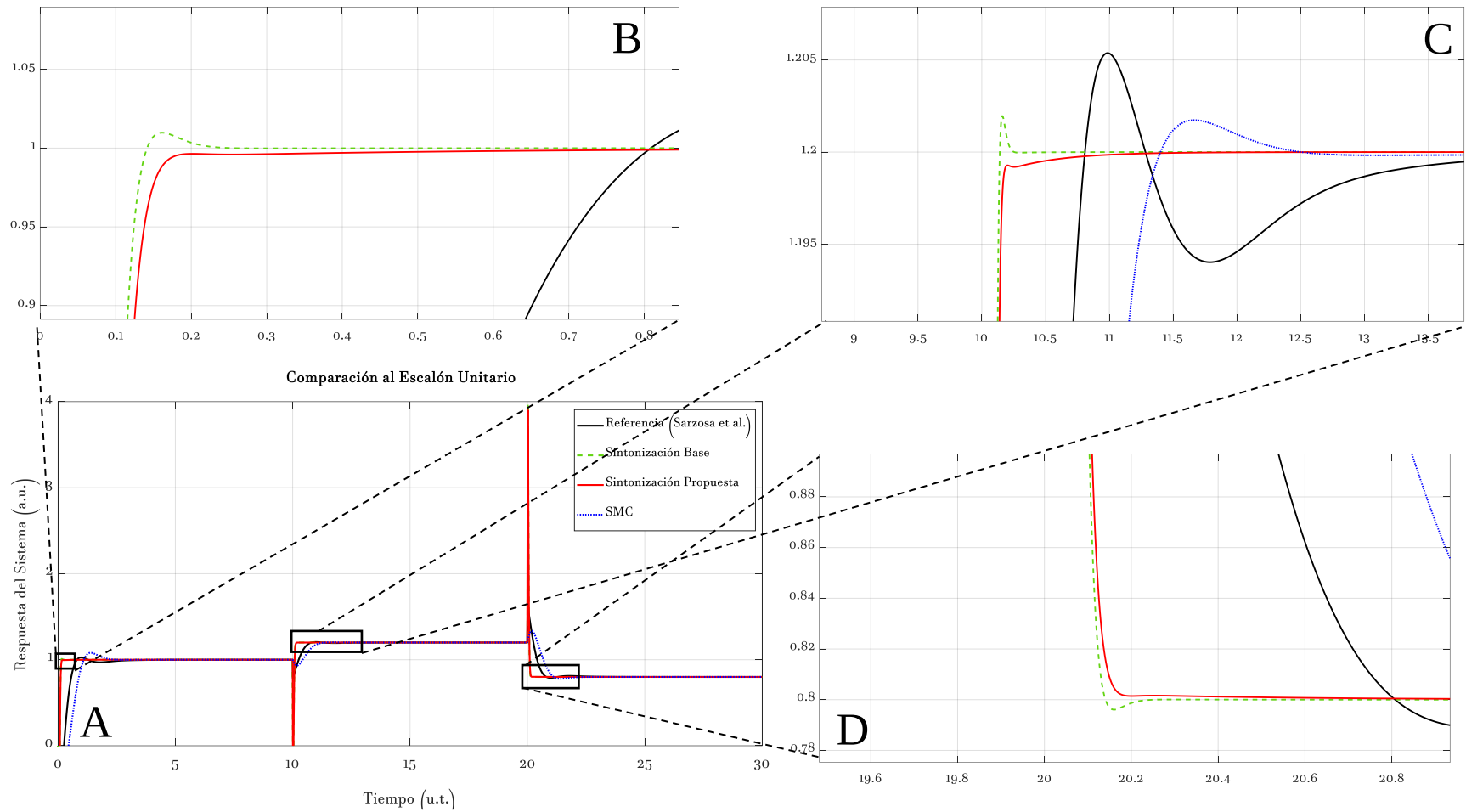


Figura 4.12. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 2. (A) Desempeño de la sintonización base (ITAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C, D) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

La Figura 4.12 muestra las dinámicas resumidas en la tabla respectiva, en la que se observa la propuesta representada con la línea de color rojo, la cual evita el pico transitorio generada por la sintonización base, la propuesta presenta una trayectoria de subida estable, superando evidentemente los efectos de la estabilización que presentaron las otras estrategias en este caso.

4.2.3 Análisis del Caso de Estudio 3

En este particular se define el límite de sobreimpulso máximo en $Y_{lim} = 1.08$, correspondiente a aproximadamente al 50% del valor reportado por el ISE, siendo este índice el que mayor oscilación presentó para garantizar márgenes de seguridad.

Previamente a la presentación de la comparativa final, se llevó a cabo el análisis de sensibilidad sobre los pesos de cada función objetiva compuesta, permitiendo de esta manera evaluar el compromiso entre la agresividad para eliminar el error acumulado y el cumplimiento de la restricción. A partir de este análisis, se ha seleccionado los diferentes diseños correspondientes a una relación de pesos de: $\alpha_1 = 25$, $\alpha_2 = 1$ para el ISE, $\alpha_1 = 8$, $\alpha_2 = 1$ para el ITSE, $\alpha_1 = 8$, $\alpha_2 = 1$ para el IAE y $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 1$ para el ITAE, debido a que estas configuraciones a demostrado el mejor balance de desempeño ya mencionado.

4.2.3.1 Evaluación bajo el criterio ISE

En la Tabla 4.13 se resumen las métricas obtenidas para este análisis. La sintonización base con el índice ISE generó una respuesta rápida con un tiempo de estabilización de 3.08 minutos, a costa de un sobreimpulso significativo de 15.28%. La estrategia propuesta logro un desempeño en estas categorías, eliminando totalmente el sobreimpulso y reduciendo el tiempo de estabilización a 2.37 min, logrando una respuesta más rápida de todo el conjunto de pruebas. Se observa un aumento marginal del costo total de 0.343 a 0.361 justificado por la ganancia en estabilidad y velocidad.

La Figura 4.13 muestra claramente la superioridad de la sintonización propuesta, representada por la línea de color rojo, la cual asciende directamente hacia la consigna sin la característica oscilatoria de la sintonización base. El SMC y la referencia mostraron dinámicas más lentas o con mayores oscilaciones.

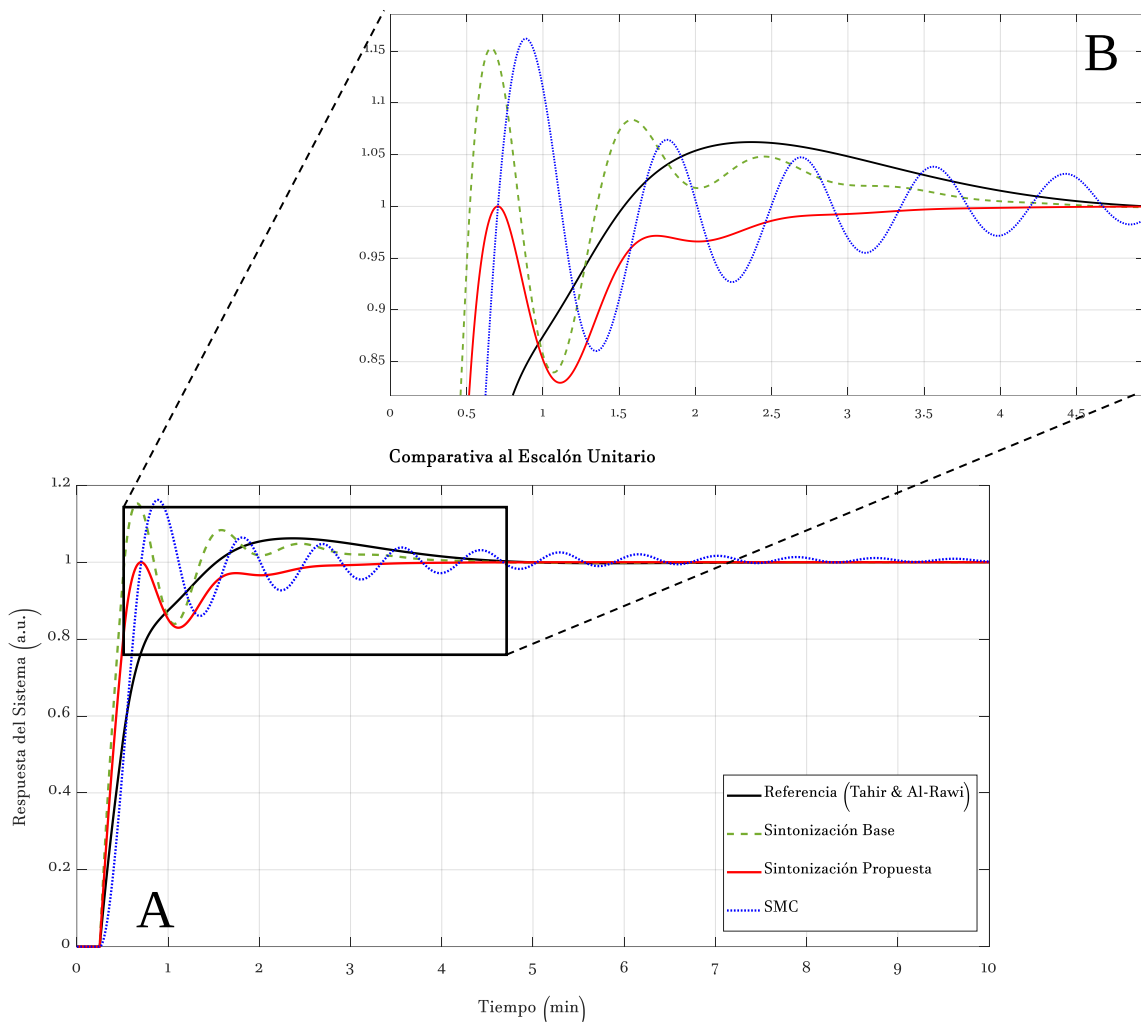


Figura 4.13. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3. (A) Desempeño de la sintonización base (ISE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

Tabla 4.13. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 3.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (min)
PID (Tahir & Al-Rawi)	Ziegler y Nichols	1.2	1.25	0.36	N/A	N/A	N/A	0.426	6.21	3.82
PID (ISE)	Opt. MH	1.931	1.911	0.683	N/A	N/A	N/A	0.343	15.28	3.08
PID (Función Compuesta)	ED	1.717	1.117	0.553	N/A	N/A	N/A	16.33 0.361	0	2.37
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.789	16.961	2.676	0.461	16.206	6.19

Tabla 4.14. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 3.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Tahir & Al-Rawi)	Ziegler y Nichols	1.2	1.25	0.36	N/A	N/A	N/A	0.116	6.21	3.82
PID (ITSE)	Opt. MH	1.980	1.612	0.565	N/A	N/A	N/A	0.0671	11.26	1.95
PID (Función Compuesta)	PSO	1.747	1.196	0.476	N/A	N/A	N/A	6.864 0.075	0.0078	1.71
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.716	15.40	2.99	0.7981	10.88	2.83

4.2.3.2 Evaluación bajo el criterio ITSE

La Tabla 4.14 muestra un resumen de las métricas obtenidas para el índice ITSE. En este caso, la sintonización bajo el criterio ITSE prioriza la agresividad ante la reducción del error, generando un tiempo de estabilización de 1.95 min, efecto que se mira en el sobreimpulso presentado, cuyo valor es de 11.26%, casi duplicando el de la referencia.

La estrategia propuesta logró contrarrestar estas cualidades, con la reducción del sobreimpulso a un valor marginal de 0.0078% y, además, mejorando la velocidad de estabilización a 1.71 minutos. El incremento mínimo del costo de la función demuestra que la restricción guio al algoritmo a una solución más eficiente, presentando superioridad ante los escenarios comprados.

La Figura 4.14 demuestra estas cualidades. La sintonización propuesta, representada por la línea de color rojo muestra una trayectoria suave, alcanzando la consigna de manera rápida y sin presencias de sobreimpulsos, contrariamente, presenta la sintonización base representada con la línea de color verde e iguales desventajas al presentado por el SMC. Este comportamiento eficiente valida la capacidad para eliminar las desviaciones causadas por los índices clásicos.

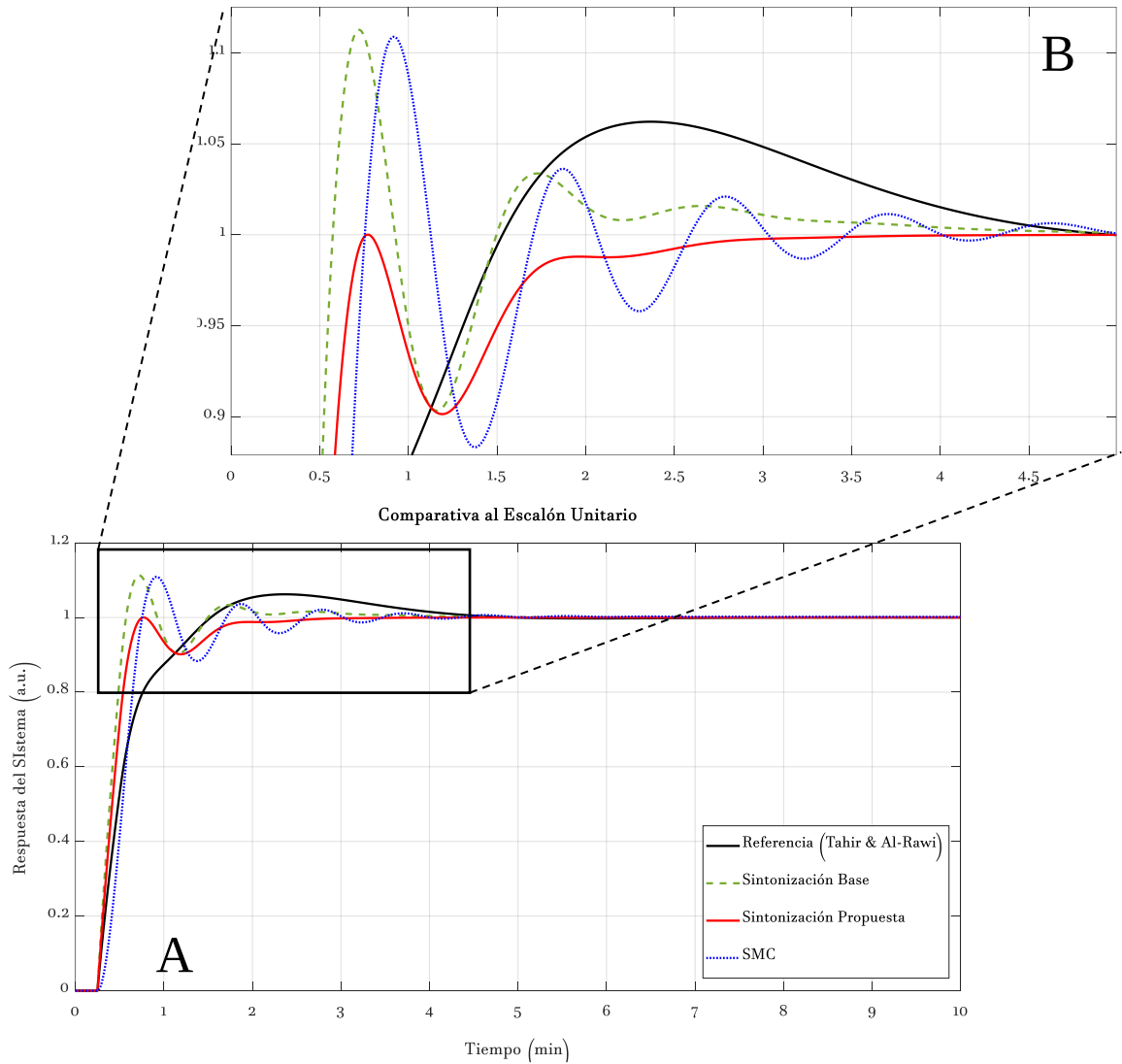


Figura 4.14. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3. (A) Desempeño de la sintonización base (ITSE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

4.2.3.3 Evaluación bajo el criterio IAE

En la Tabla 4.15 se describe los parámetros y métricas correspondientes las evaluaciones bajo el índice IAE. La sintonización base con el índice IAE muestra un a eficiencia visible en la velocidad del sistema, reduciendo el tiempo de establecimiento a 1.59 minutos, pero admitiendo un sobreimpulso de 6.11%. La estrategia propuesta se encargó de mejorar consistentemente estos defectos, obtenido un sobreimpulso de 0.0013% y con aumento marginal en el tiempo de estabilización de 1.68 minutos lo que lo consagra como la estrategia más eficiente en esta comparativa. En la Figura 4.15 se gráfica estas dinámicas.

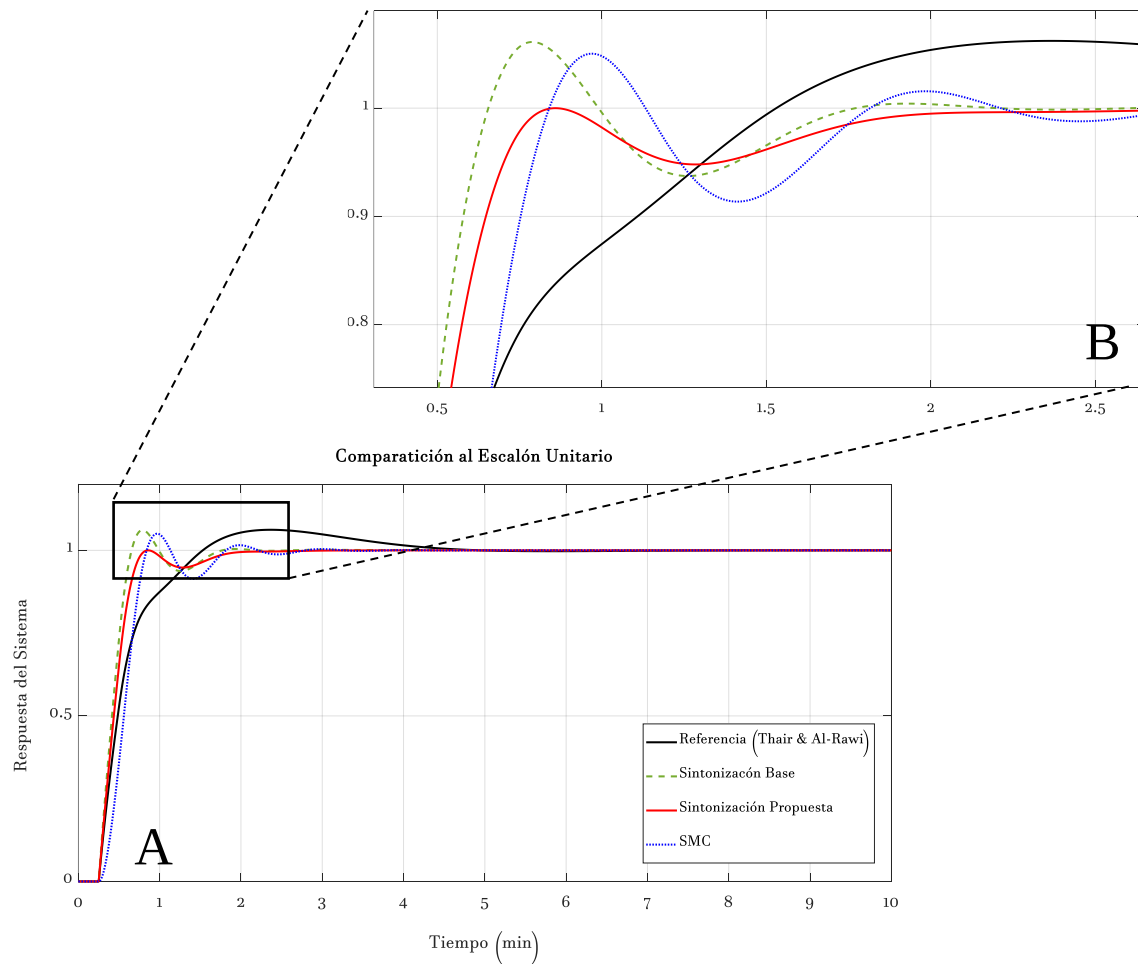


Figura 4.15. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3. (A) Desempeño de la sintonización base (IAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

De acuerdo a la Tabla 4.15 pese a que el valor de la función objetivo tuvo en leve aumento de 0.467 a 0.487 la gráfica muestra que esta diferencia es virtualmente nula, ya que la dinámica que representa la estrategia propuesta, la línea de color rojo, demuestra una respuesta suave y precisa a la hora de llegar a la consigna, evitando sobreimpulsos presentados por las estrategias de comparación.

Tabla 4.15. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 3.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Tahir & Al-Rawi)	Ziegler y Nichols	1.2	1.25	0.36	N/A	N/A	N/A	0.696	6.21	3.82
PID (IAE)	Opt. MH	1.892	1.371	0.469	N/A	N/A	N/A	0.467	6.11	1.59
PID (Función Compuesta)	CS	1.717	1.223	0.413	N/A	N/A	N/A	15.70 0.487	0.0013	1.68
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.629	12.795	3.326	0.616	5.03	1.72

Tabla 4.16. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 3.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Tahir & Al-Rawi)	Ziegler y Nichols	1.2	1.25	0.36	N/A	N/A	N/A	0.549	6.21	3.82
PID (ITAE)	Opt. MH	1.763	1.291	0.381	N/A	N/A	N/A	0.141	3.52	1.57
PID (Función Compuesta)	DE	1.589	1.172	0.329	N/A	N/A	N/A	12.62 0.154	0	0.89
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.460	8.365	3.963	0.196	3.87	1.31

4.2.3.1 Evaluación bajo el criterio ITAE

La Tabla 4.16 resume los resultados del último enfoque de diseño para el Caso 3. En esta tabla se obtiene valores que indican que la sintonización base por el criterio ITAE logra un tiempo de estabilización de 1.57 minutos, mostrando también un comportamiento oscilatorio con un sobreimpulso de 3.52%. Mientras que la estrategia propuesta demuestra un desempeño máximo tras la eliminación total del sobreimpulso, y reduciendo el tiempo de establecimiento a 0.89 minutos, convirtiéndose en la respuesta más rápida registrada en todas las evaluaciones del caso de estudio 3, y aunque la variación del costo fue levemente mayor, de 0.154 a 1.141, se confirma a través de la gráfica posterior que se logró acelerar la respuesta sin comprometer la estabilidad y respetando los límites establecidos.

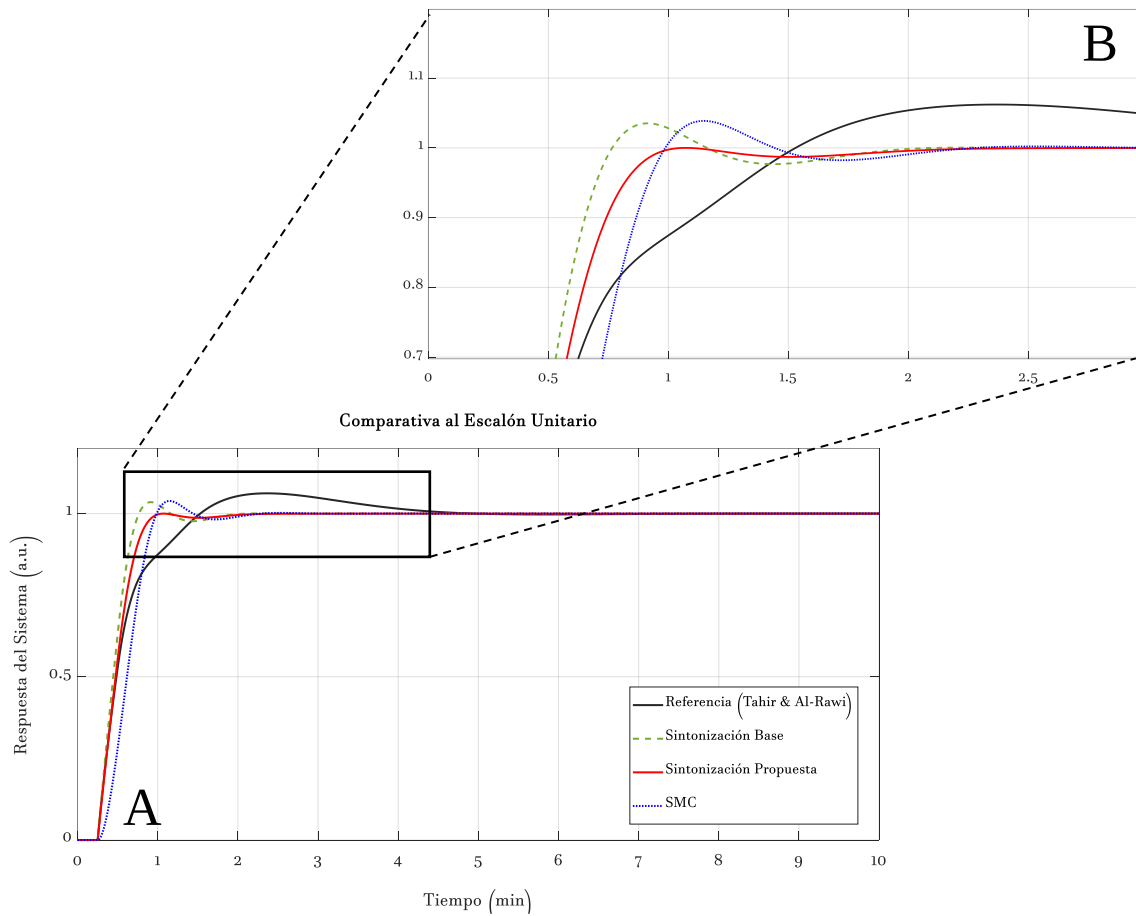


Figura 4.16. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 3. (A) Desempeño de la sintonización base (ITAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B) detalle del sobreimpulso en el régimen transitorio y el seguimiento de la referencia.

La Figura 4.16 es la evidencia de que la sintonización propuesta exhibe un ascenso vertical y limpio hacia la consigna, es decir sin presencia de oscilaciones. Al contraponer dicha sintonización con la sintonización base y el SMC, se observa que las curvas tardan más en estabilizarse; efecto

producido por las oscilaciones que presenta cada una de ellas, así se valida la superioridad de la estrategia propuesta en términos de velocidad y precisión.

4.2.4 Análisis del Caso de Estudio 4

En este caso de estudio se ha considerado la naturaleza de la respuesta inversa que presenta el problema, por lo que se define el límite operativo máximo en $Y_{lim} = 70.22\%$. Este valor fue definido como referencia del pico máximo generado por el diseño establecido en la literatura el cual fue de 70.43%; puesto que las sintonizaciones base tendieron a generar respuestas inversas excesivas, el objetivo se centró en analizar la capacidad de la propuesta para limitar a la desviación por debajo de la referencia, y obtener una mejora en la seguridad operativa.

De manera similar a los casos anteriores, el análisis de sensibilidad de los pesos para cada función objetivo compuesta ha sido desarrollada, con el fin de observar el cumplimiento de las restricciones operativas especificadas frente a la acción de la dinámica inversa. Así, se seleccionó los diseños de control correspondiente a las siguientes relaciones: $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 8$ para el ISE, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 4$ para el ITSE, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 8$ para el IAE y $\alpha_1 = 8$, $\alpha_2 = 1$ para el ITAE, ya que dichas configuraciones demostraron el mejor balance de desempeño.

4.2.4.1 Evaluación bajo el criterio ISE

La Tabla 4.17 muestra los resultados para este sistema basado en el enfoque ISE. La sintonización base prioriza una reducción rápida del error, con un tiempo de establecimiento de 100.5 minutos, con un pico de 7.61%.

Aquí, la estrategia propuesta actuó como un mecanismo de contención para limitar el pico generado por la respuesta inversa, las respuestas de sintonización de los algoritmos redujeron drásticamente las constantes, en especial la ganancia proporcional, sacrificando velocidad por seguridad. El resultado de este mecanismo fue la disminución del pico mencionado a uno de 4.51%. Esta reducción tan drástica tuvo como consecuencia natural un control más suave, con un tiempo de establecimiento de 103.2 minutos. Este resumen puede observarse de mejor manera en la Figura 4.17.

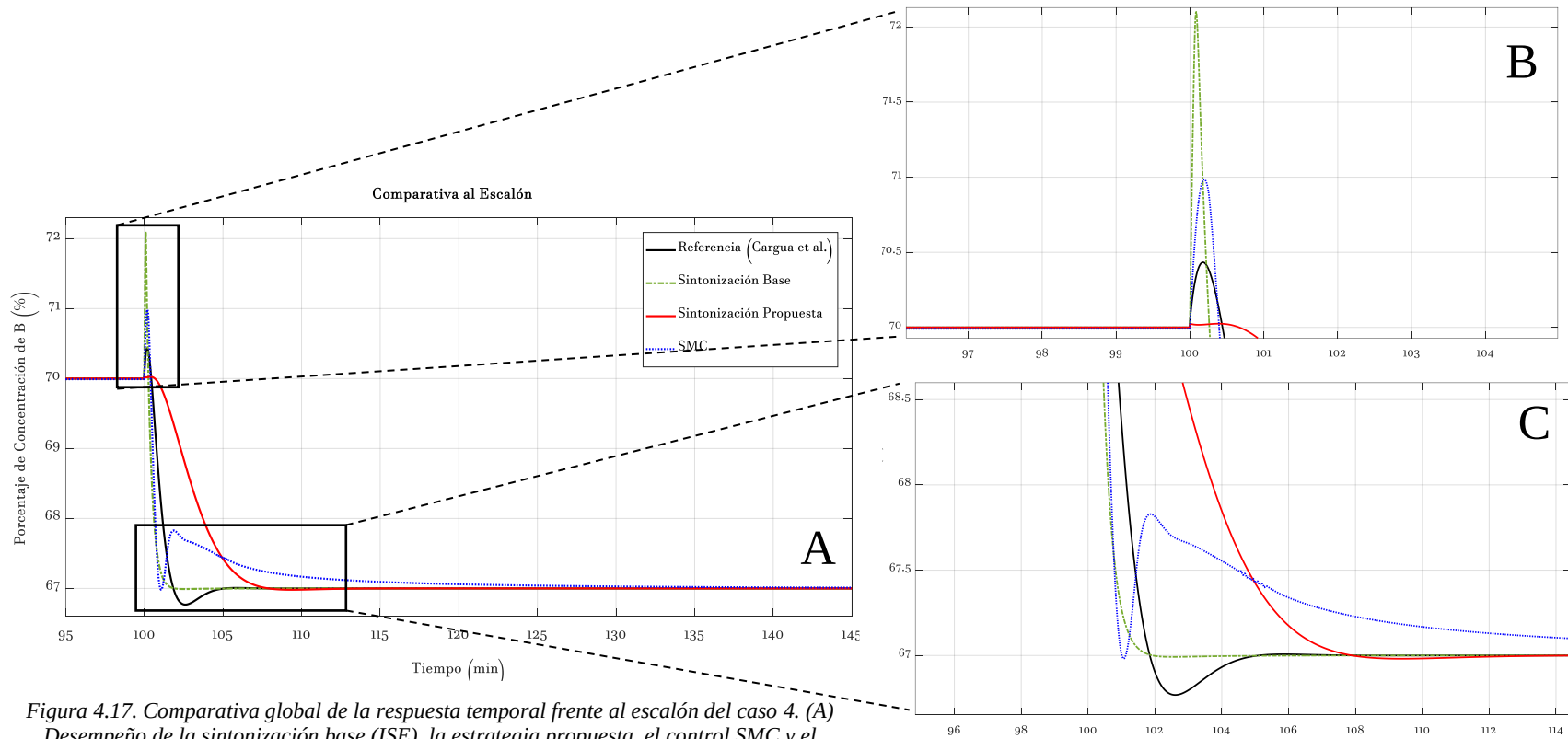


Figura 4.17. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4. (A) Desempeño de la sintonización base (ISE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C) detalle de la respuesta inversa y seguimiento de la referencia.

La gráfica anterior muestra la dinámica de la propuesta representada por la línea de color rojo, limitando drásticamente el pico de la respuesta inversa respecto a la sintonización base, e incluso a la de referencia literaria. A pesar de que el tiempo de estabilización es más lenta, la trayectoria es menos agresiva, validando la capacidad de la estrategia propuesta para imponer estabilidad en proceso donde la minimización del error tiende a generar respuestas agresivas.

4.2.4.2 Evaluación bajo el criterio ITSE

La Tabla 4.18 presenta las métricas del desempeño bajo el criterio del error cuadrático ponderado en el tiempo. La sintonización base con el índice ITSE, aplicó una ganancia proporcional elevada ($K_p \approx 5.38$) para reducir el error integral, logrando un excelente tiempo de estabilización, sin embargo, el problema sigue siendo muy notorio en este tipo de minimización, el cual generó un pico de respuesta inversa de 7.61%.

Se observa que la sintonización propuesta genera un $K_p \approx 0.027$, acción que amortigua el pico representado por la línea de color verde en la Figura 4.18 a 4.51%, valor que mejora sustancialmente al generado por la referencia, cuyo valor fue de 5.12%. La Figura 4.18 evidencia la información de la Tabla 4.18.

Tabla 4.17. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ISE y SMC para el caso de estudio 4.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (min)
PID (Cargua et al.)	Síntesis Dahlin	1.943	2.639	0.497	N/A	N/A	N/A	8.008	5.12	101
PID (ISE)	Opt. MH	5.305	3.676	1.390	N/A	N/A	N/A	5.998	7.61	100.5
PID (Función Compuesta)	FS	0.0180	0.765	0.0130	N/A	N/A	N/A	56.73 21.11	4.51	103.2
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.496	7.988	1.222	9.18	5.95	100.6

Tabla 4.18. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITSE y SMC para el caso de estudio 4.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Cargua et al.)	Síntesis Dahlin	1.943	2.639	0.497	N/A	N/A	N/A	804.3	5.12	101
PID (ITSE)	Opt. MH	5.376	3.712	1.390	N/A	N/A	N/A	601	7.61	100.5
PID (Función Compuesta)	FS	0.0266	1.181	0.020	N/A	N/A	N/A	$8.1 \cdot 10^5$ 1677.9	4.51	103.2
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.559	9.30	1.234	1284.4	5.77	122.03

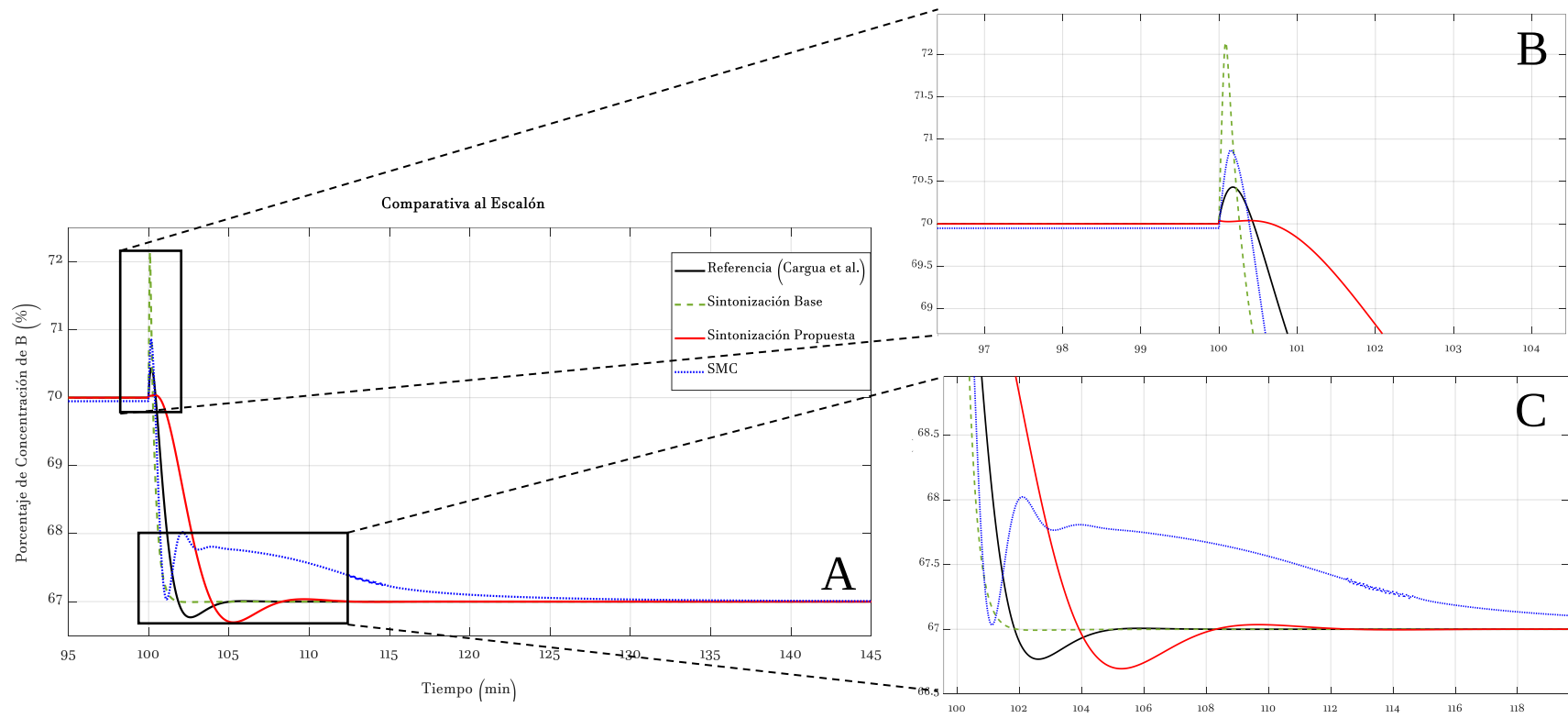


Figura 4.18. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4. (A) Desempeño de la sintonización base (ITSE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C) detalle de la respuesta inversa y seguimiento de la referencia.

La línea de color roja, representa la estrategia propuesta, la cual actúa eficientemente a la hora de contener el pico causado por la respuesta inversa del sistema, el efecto de esta acción conlleva a un aumento aceptable del tiempo de estabilización de 2.7 minutos adicionales a cambio de garantizar que la reacción inversa no desestabilice el sistema.

4.2.4.3 Evaluación bajo el criterio IAE

Los resultados empleando como base el criterio de desempeño IAE se muestran en la Tabla 4.19. Este índice de desempeño, al ser evaluada como función mono-objetivo generó ganancias excesivas en el intento de minimizar la integral del error absoluto con un tiempo de subida extremadamente rápido. Esto generó que el tiempo de estabilización sea muy competitivo, pero a raíz de esto, la dinámica generada tiene una desviación inicial de la respuesta inversa crítica, siendo el mayor pico registrado para este caso: 9.28%. Este comportamiento se puede visualizar en la Figura 4.19.

Con base en la Tabla y Figura 4.19 se observa que la línea de color rojo, es decir, la estrategia propuesta es suave debido a la capacidad efectiva de limitar la respuesta inversa del sistema a 4.51%. Esta acción no tiene comparación con el pico generado por la sintonización base del índice de desempeño IAE, que presento un pico de 9.28%. Se observa que la línea de color rojo presenta un leve aumento en la amortiguación que llevó al sistema a tener un incremento en el tiempo de estabilización la cual paso a 103.1 minutos.

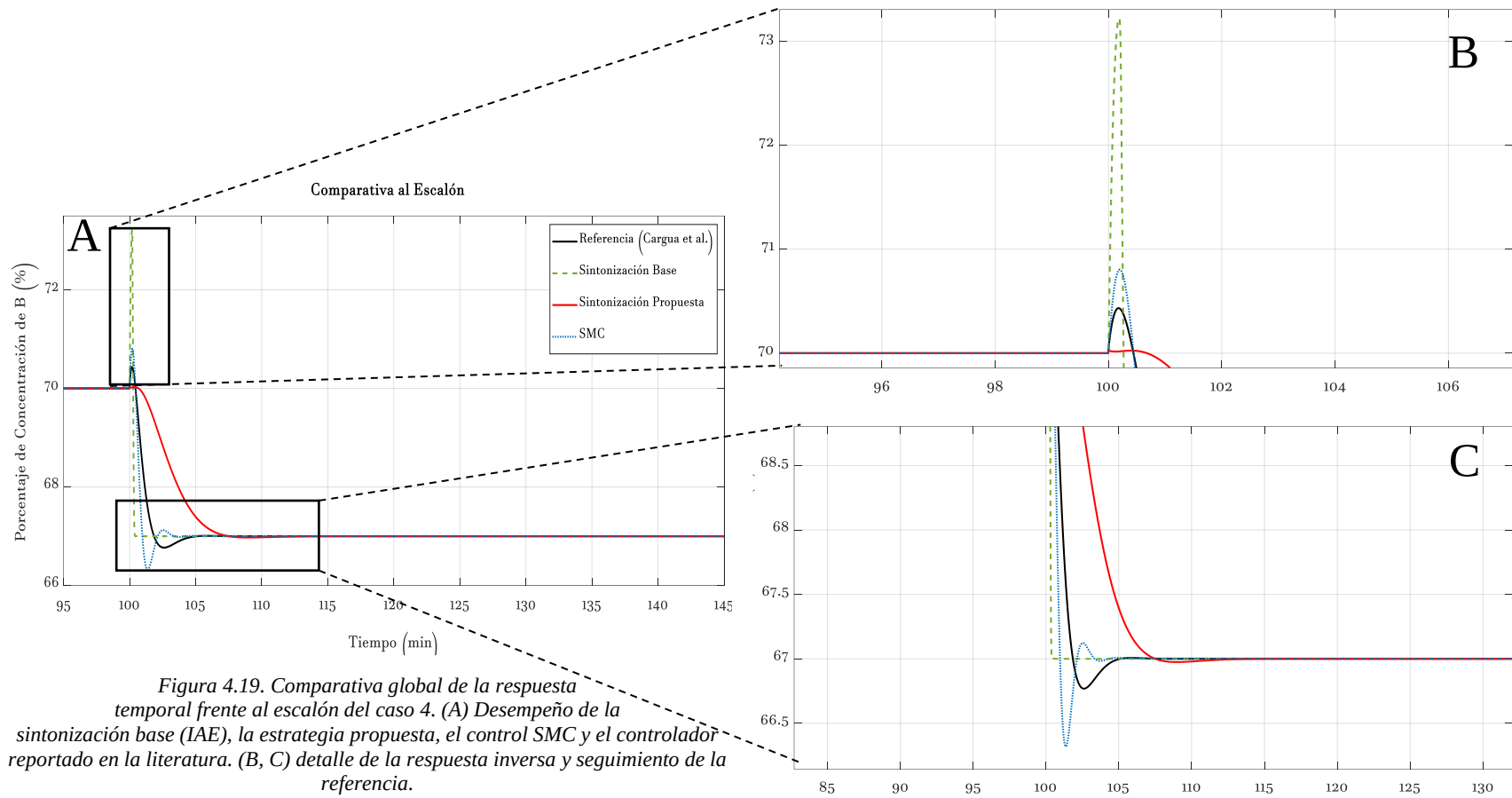


Figura 4.19. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4. (A) Desempeño de la sintonización base (IAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C) detalle de la respuesta inversa y seguimiento de la referencia.

Tabla 4.19. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional IAE y SMC para el caso de estudio 4.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Cargua et al.)	Síntesis Dahlin	1.943	2.639	0.497	N/A	N/A	N/A	3.520	5.12	101
PID (IAE)	Opt. MH	9.005	4.914	1.519	N/A	N/A	N/A	1.491	9.28	100.3
PID (Función Compuesta)	CS	0.01	0.777	0.013	N/A	N/A	N/A	53.667 9.588	4.51	103.1
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.072	0.904	1.21	3.52	5.68	100.70

Tabla 4.20. Resumen comparativo de parámetros y métricas de desempeño: Estrategia Propuesta frente a la referencia, sintonización convencional ITAE y SMC para el caso de estudio 4.

Estrategia de Control	Método de Sintonización	Parámetros del Controlador PID			Parámetros del SMC			Métricas de Desempeño		
		K_p	K_i	K_d	τ	t_0	δ	Cost. Comp. (J_{total}) / Base (J_{base})	Sobreimp. (%)	T. Estab. (u.t)
PID (Cargua et al.)	Síntesis Dahlin	1.943	2.639	0.497	N/A	N/A	N/A	354.86	5.12	101
PID (ITAE)	Opt. MH	9.010	4.914	1.52	N/A	N/A	N/A	149.09	9.28	100.3
PID (Función Compuesta)	CS	0.807	1.637	0.019	N/A	N/A	N/A	33.413 492.6	4.73	101.56
SMC	Opt. MH	N/A	N/A	N/A	0.067	0.767	1.214	31.53	5.60	100.73

4.2.4.4 Evaluación bajo el criterio ITAE

La Tabla 4.20 detalla los parámetros de la sintonización propuesta y base con sus respectivas métricas de desempeño basado en el criterio IATE. La sintonización base en función del índice mencionado muestra un gran incremento en la constante proporcional con un valor de $K_p = 9.01$, dicho valor genera el sobreimpulso más alto registrado en este caso de estudio con un valor de 9.28%. La estrategia propuesta demostró alta eficiencia para gestionar el compromiso de la seguridad operativa, mediante la restricción se redujo la agresividad del controlador a $K_p = 0.81$, logrando disminuir el pico de la respuesta inversa a un 4.73%, es considerable el aumento ligero del tiempo de estabilización a 101.56 minutos. La gráfica siguiente muestra la dinámica generada por este resultado.

En la Figura 4.20 la línea de color rojo muestra la dinámica de la estrategia propuesta para este último caso, este exhibe el pico de respuesta inversa por debajo de la restricción operativa impuesta, evitando el comportamiento agresivo de sus contrapartes.

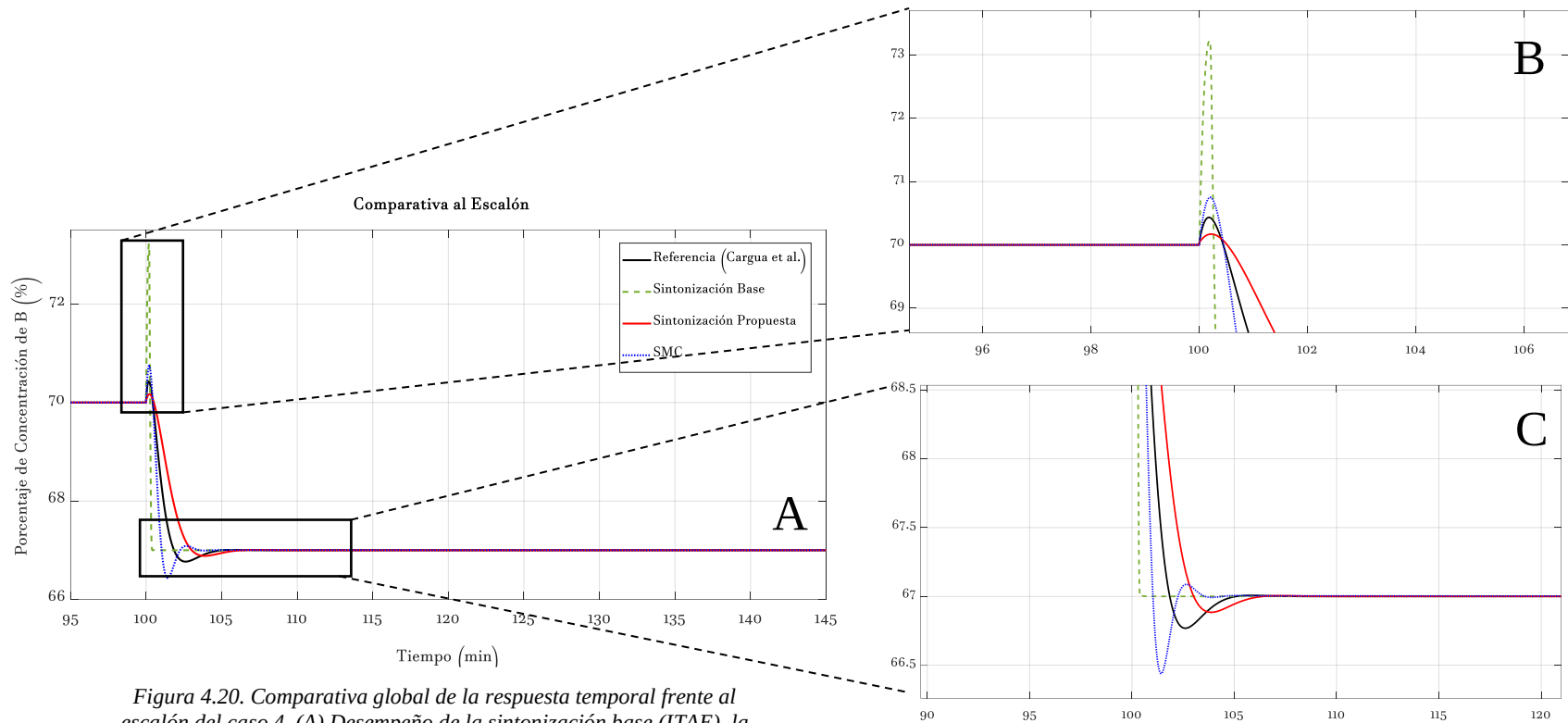


Figura 4.20. Comparativa global de la respuesta temporal frente al escalón del caso 4. (A) Desempeño de la sintonización base (ITAE), la estrategia propuesta, el control SMC y el controlador reportado en la literatura. (B, C) detalle de la respuesta inversa y seguimiento de la referencia.

4.3 Análisis Comparativo de Algoritmos de Optimización

En esta sección se evalúa el desempeño de los algoritmos de optimización PSO, DE, CS y FS en relación a la velocidad de convergencia y de su tasa de éxito, con el objetivo de validar la capacidad del manejo idónea de cada método de búsqueda para resolver el problema de sintonización en escenarios de sistemas lineales y no lineales representados por los casos de estudio.

4.3.1 Evaluación de Tasa de Éxito

A continuación, se presenta la consistencia de cada método de optimización estocástico para presentar las soluciones de alta calidad validada dentro de los criterios de diseño establecidos, para la sintonización del controlador PID evaluada con la función objetivo base.

La Tabla 4.21 muestra el porcentaje de éxito para las funciones estándar ISE, ITSE, IAE, ITAE, en un total de 100 pruebas por cada algoritmo de optimización y con un NFE equivalente a 5000.

Tabla 4.21. Tasa de éxito (%) de los algoritmos de optimización en la sintonización base bajo los criterios de error ISE, ITSE, IAE e ITAE.

Caso N°	ISE				ITSE				IAE				ITAE			
	CS	FS	DE	PSO	CS	FS	DE	PSO	CS	FS	DE	PSO	CS	FS	DE	PSO
1	100	100	100	95	100	100	100	95	100	100	98	95	100	9	99	41
2	100	100	100	65	100	100	100	68	18	100	96	70	13	95	83	75
3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81	100
4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	18	97	100	100	4	97	73

La información de la Tabla 4.21 indica un contraste evidente entre las métricas basadas en el error cuadrático y las de error absoluto. Así, para los criterios ISE e ITSE, la tasa de éxito de la mayoría de algoritmos alcanzan un 100% en casi todos los casos de estudio, infiriendo que las funciones objetivo presentan superficies de búsqueda menos complejas para las metaheurísticas.

Por otra parte, los índices de desempeño IAE e ITAE actuaron como verdaderas pruebas de robustez, específicamente el criterio ITAE que resultó ser más exigente que el resto, ya que provocó caídas drásticas en el desempeño de los algoritmos. Se puntualiza que el FS, a pesar que fue competente en ciertos escenarios, su tasa de éxito en el Caso 1 y Caso 4 fue muy bajo, con un 9% en ITAE y 4% en ITAE respectivamente.

Para efectos comparativos, DE demostró ser el algoritmo más robusto y consistente, con tasas de éxito superiores al 83%, generando el 100% en la mayoría de las pruebas, por lo que se considera

que su mecanismo de mutación se adapta de mejor manera a los espacios generados por las diferentes funciones objetivo.

4.3.2 Evolución de Convergencia

En relación a la evaluación de la velocidad y eficiencia de búsqueda, se observa la evolución del valor de costo de los criterios de desempeño a lo largo de las iteraciones, considerando el promedio de las ejecuciones independientes para cada metaheurística y con un esfuerzo computacional de 5000 evaluaciones de función por ejecución, permitiendo visualizar el comportamiento medio esperado y descartar el sesgo de la estocasticidad inherentes a los algoritmos empelados. A continuación, la Figura 4.21 presenta el comportamiento de la convergencia generada para el Caso 1.

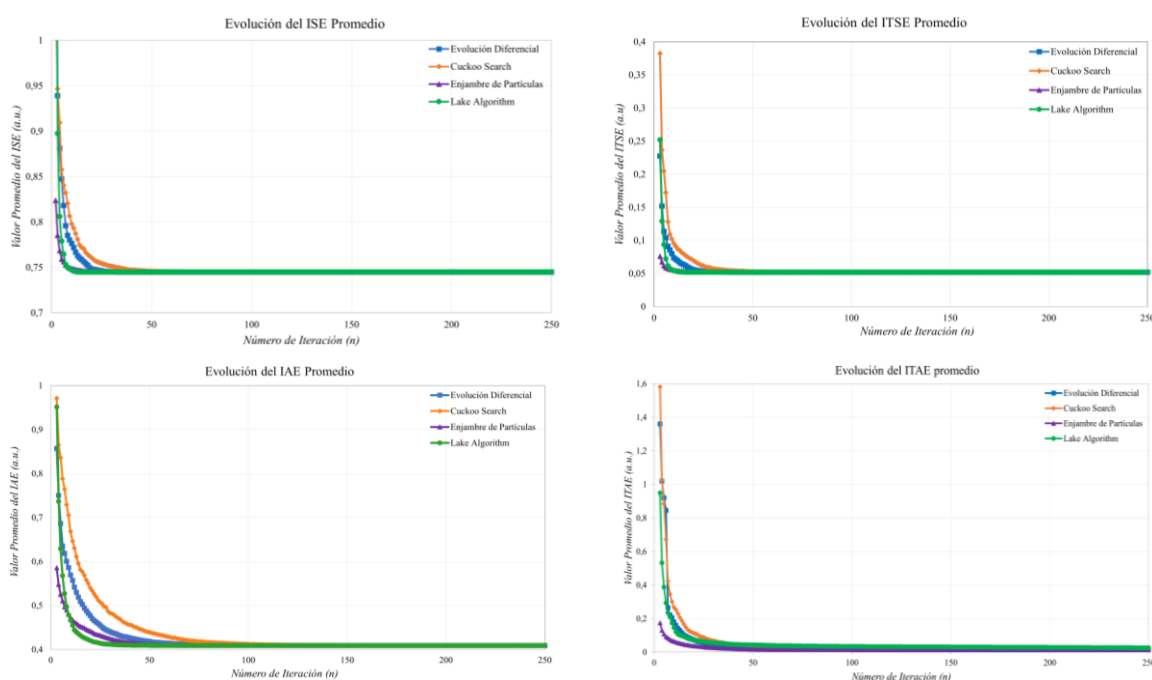


Figura 4.21. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 1 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.

Al analizar las curvas de convergencia relativas al Caso 1, estas exhiben un comportamiento consistente en las cuatro funciones objetivo evaluadas. PSO y FS demuestran una velocidad de convergencia agresiva, llegando al valor de la función de costo a una zona cercana del valor de alta calidad en aproximadamente diez iteraciones.

Por el contrario, se observa una diferencia particular con CS, presentando una velocidad de convergencia más lenta entre todas las metaheurísticas. A pesar que CS alcanza el mismo valor de alta calidad que sus competidores, este requiere un número mayor de iteraciones. DE presenta un desempeño intermedio, equilibrando velocidad y precisión. Es importante puntualizar, que independientemente de los valores y velocidades iniciales, los cuatro algoritmos convergen al mismo

costo final, lo que, valida la robustez de los métodos para encontrar la solución de alta calidad en este caso de estudio, y siendo corroborado por la tabla de tasa de éxito reportada.

La Figura 4.22 muestra la evolución de los índices de desempeños para el Caso 2.

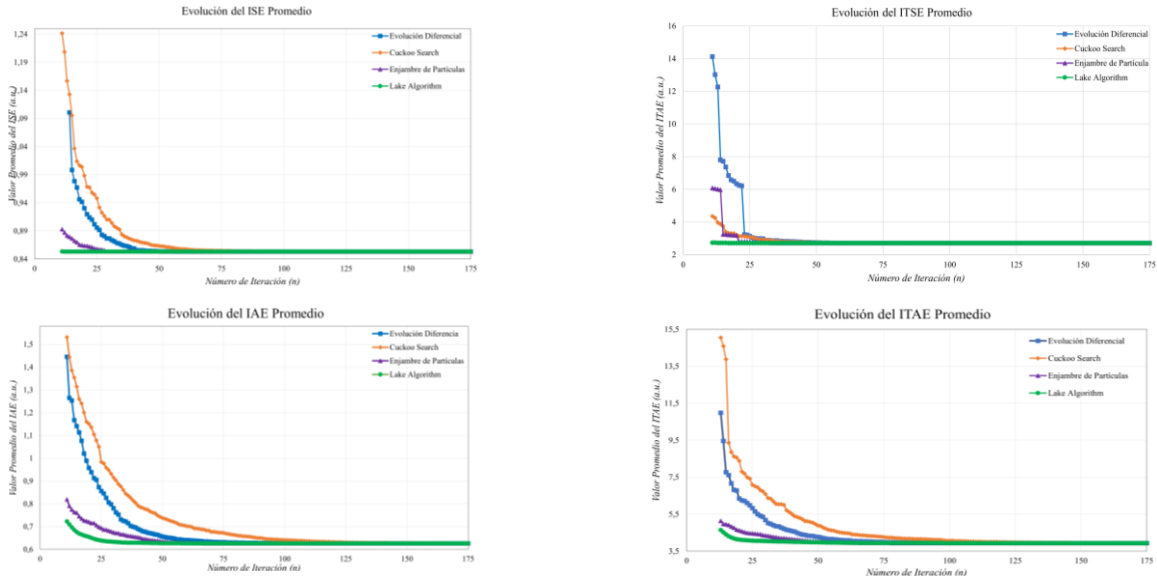


Figura 4.22. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 2 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.

En las gráficas mostradas se observa una diferencia significativa entre las velocidades de búsqueda. De manera similar al caso anterior, los algoritmos PSO y FS exhiben una velocidad de convergencia inicial superior mostrando valores bajos que los dos restantes. En este caso PSO y FS logran encontrar regiones prometedoras de manera rápida.

DE y CS muestran una fase de exploración más prolongada. Se observa un comportamiento particular en forma de escalones para DE y PSO en ITSE, lo que indicaría que estos métodos quedan atrapados momentáneamente en óptimos locales antes que sus mecanismos de exploración permitan conseguir una solución mejor.

Analizando las gráficas de convergencia para el caso de estudio 3 se destaca la superioridad del método FS, seguido del PSO. FS inicia la búsqueda con soluciones de muy alta calidad desde el inicio de las iteraciones, observándose una curva casi plana desde el principio.

Por el contrario, CS presenta una evolución de convergencia más lenta de entre todos los métodos, además de iniciar con costos elevados. De manera particular, DE sigue manteniendo su postura intermedia, superando a CS en velocidad de convergencia, pero sin alcanzar la agresividad de FS y PSO.

La Figura 4.23 y 4.24 muestran la velocidad de convergencia para el Caso 3 y 4, respectivamente.

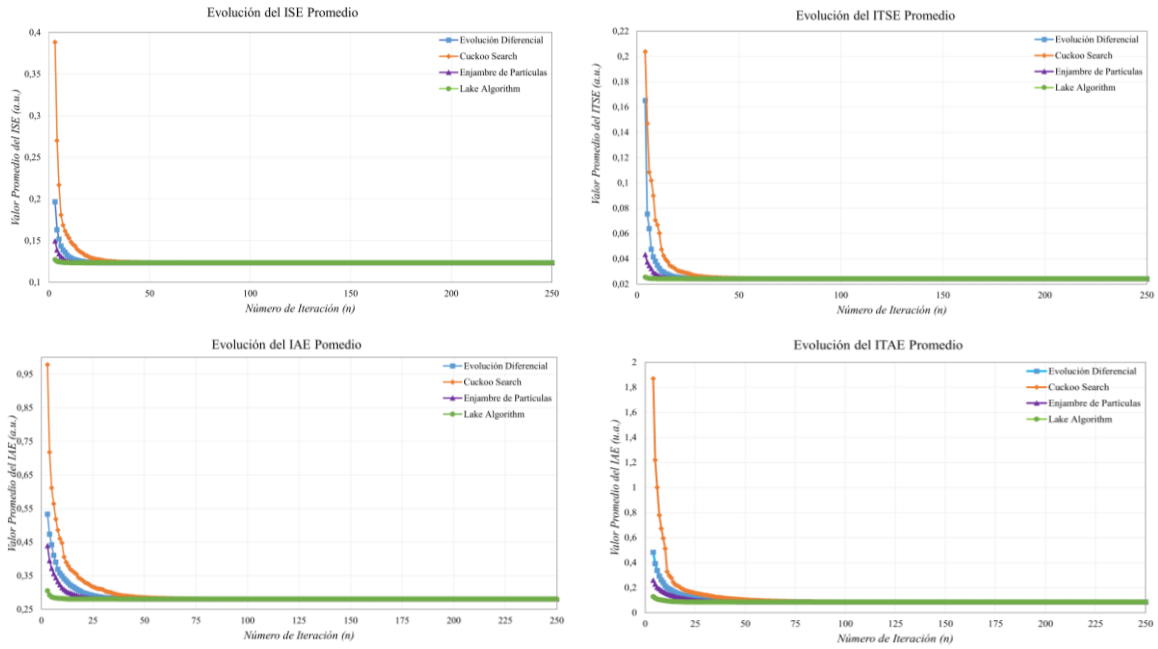


Figura 4.23. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 3 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.

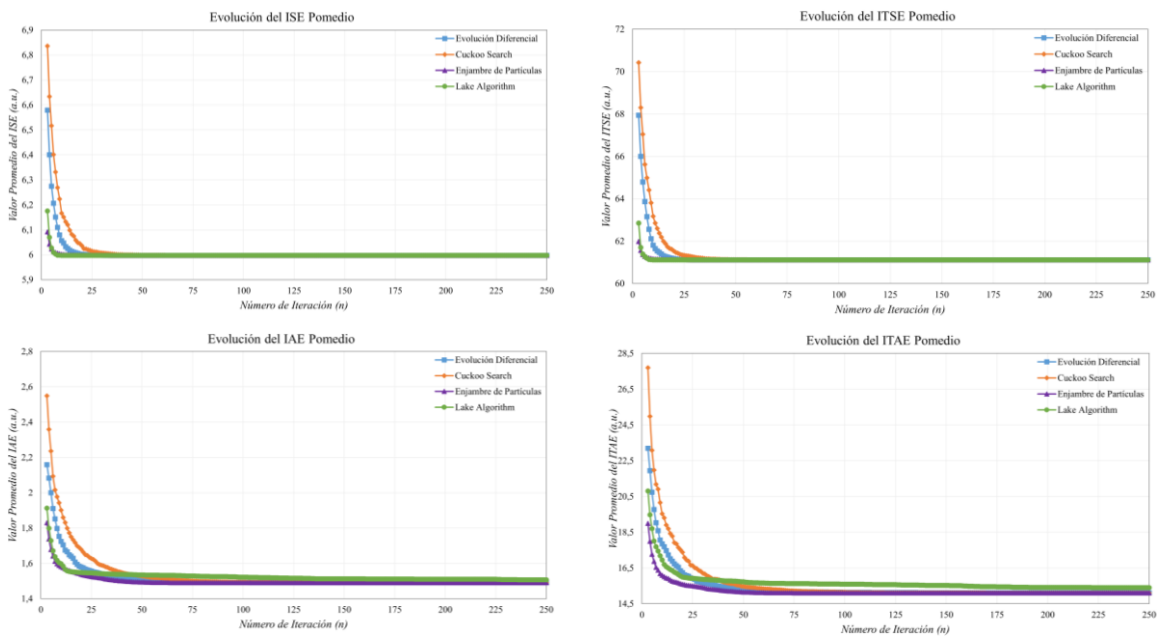


Figura 4.24. Curvas de convergencia promedio para el Caso de Estudio 4 bajo los criterios ISE, ITSE, IAE e ITAE.

En el análisis de este caso de estudio se evidencia claramente que PSO se consolida como el método más eficiente para obtener valores de alta calidad, en los casos específicos evaluados con los índices de desempeño basado en la minimización del error absoluto. FS y PSO demuestran su eficiencia al ser evaluado con el criterio ISE e ITSE.

Nuevamente CS muestra una desventaja considerable en la inicialización, indicando que este algoritmo posee un mayor enfoque en la etapa exploratoria. A pesar de estas diferencias generales, es menester mencionar que en la etapa final estas curvas se solapan perfectamente. Así se confirma que, aunque la velocidad de convergencia es diferente según el método de búsqueda, la precisión final es consistentes para la mayoría de algoritmos de los casos de estudios.

4.4 Análisis de Sensibilidad de Hiperparámetros

El término enfocado a limitar el sobreimpulso implementado en la función objetivo, motivo de este trabajo, introduce dos hiperparámetros de ponderación, α_1 y α_2 , encargados de manipular el compromiso entre la minimización del error y el límite de seguridad. Puesto que el comportamiento dinámico ante la variación de estos pesos ha presentado patrones similares en los cuatro casos de estudio, se ha seleccionado el caso de estudio 3 como muestra representativa para analizar el efecto de la sintonización de esos hiperparámetros en la respuesta del sistema en el dominio del tiempo.

Siguiendo la descripción de la sección de la metodología propuesta, se contrastan cuatro escenarios de sintonización generados mediante los algoritmos de optimización:

- Razón 1:1: Es el resultado de la primera simulación de la sintonización de la función compuesta, usando los pesos sin normalizar, es decir, en una proporción unitaria.
- Propuesta Normalizada: Se asigna al término que involucra el límite de seguridad un valor igual a la relación entre el costo asociado al término del índice de desempeño entre el costo asociado al término del sobreimpulso obtenido en la etapa de simulación anterior (1:1).
- Prioridad al Límite de Seguridad: Se especifica una magnitud de 8 veces más, al peso que se enfoca al término encargado de limitar el sobreimpulso α_2 , frente al α_1 normalizado.
- Prioridad al Error: Se asigna una magnitud de 8 veces superior al peso del error α_1 frente al α_2 normalizado.

La Figura 4.25 muestra la respuesta ante el escalón unitario bajo estas cuatro propuestas.

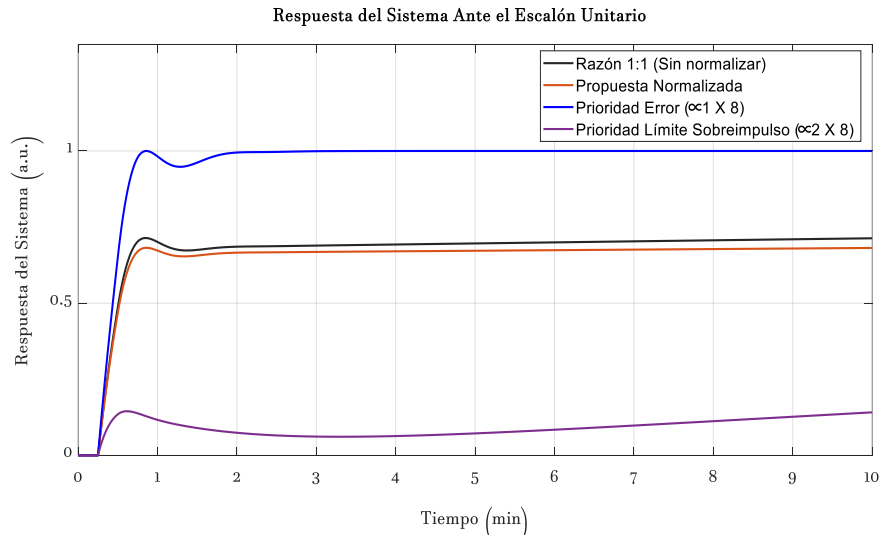


Figura 4.25. Análisis de sensibilidad para el Caso de Estudio 3 (IAE): Comparativa de la respuesta temporal bajo diferentes ponderaciones de los hiperparámetros α_1 y α_2 .

En la gráfica anterior se observa cómo la variación de los coeficientes α_1 y α_2 altera drásticamente a la dinámica del controlador sintonizado, evidenciando la sensibilidad del método a estos parámetros, y cuyos efectos se pueden considerar a continuación:

- Efecto con Razón de 1:1 (curva de color negro): Este caso produce una respuesta conservadora, indicando que la función de barrera inversa es sumamente efectiva para limitar consideraciones como el sobreimpulso. Esto justifica la necesidad de la normalización propuesta, demostrando que las magnitudes referentes tanto al IAE y la del costo por sobreimpulso no son directamente comparables; sin la normalización el término del límite de seguridad domina implícitamente a la función de costo total.
- Efecto por Normalización (curva de color roja): La sintonización con la normalización presenta un equilibrio aparente asociados a cada término que compone el costo total, dicho equilibrio permite manipular proporcionalmente y de manera justa los parámetros α_1 y α_2 .
- Efecto de Priorizar la Eliminación del Error (curva de color azul): Al priorizar el error con una magnitud de 8 unidades se obtiene una respuesta agresiva, con un tiempo de subida más rápido, sin embargo, la elevación de esta magnitud hará que la respuesta del sistema presente sobreimpulsos.
- Efecto de Priorizar la Seguridad (curva de color magenta): al penalizar excesivamente el término correspondiente al sobreimpulso el sistema es extremadamente cauteloso por la naturaleza de la función implementada, tanto que el controlador es incapaz de llevar la salida a la referencia.

5 CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó exitosamente una estrategia de sintonización para controladores PID enfocado hacia el ámbito de procesos químicos, el cual se basa en el diseño de una función objetivo que integra costos asociados a la reducción del error de seguimiento y a la seguridad operativa. La metodología integró restricciones para limitar el sobreimpulso a través de la adición de una penalización de barrera hiperbólica, mostrando gran eficiencia al restringir las desviaciones transitorias y logrando alcanzar el punto de consigna sin sacrificar la velocidad de la respuesta del sistema. La implementación de los algoritmos de optimización estocástica permitió encontrar soluciones de alta calidad dentro de los espacios de búsqueda complejos, lo cual garantiza un desempeño que equilibra la precisión del control con la seguridad del proceso.

Se determinó inicialmente la validez de un conjunto de cuatro casos de estudio con dinámicas que incluyen sistemas lineales, no lineales, de fase no mínima y con retardos. La caracterización inicial estructural y la simulación numérica confirmaron que los modelos seleccionados reproducen fielmente las no linealidades y características temporales típicas de la industria química, generando una base confiable para la evaluación comparativa. Así, sobre estos casos se corrobora que una sintonización exclusivamente basada en los índices de desempeños convencionales; IAE, ISE, ITSE, ITAE, presentan una desventaja crítica; esta sintonización tiende a generar oscilaciones elevadas y sobreimpulso, especialmente en los casos 2 y 3, estos pueden ser peligrosos para procesos químicos estrictos, y aunque las métricas basadas en el error absoluto resultaron ser más desafiantes para los optimizadores, la estrategia de control propuesta mantuvo coherencia en las respuestas temporales.

Se concluye que el diseño de la función objetivo compuesta por un índice de desempeño clásico y la función racional logró resolver eficazmente el conflicto entre el desempeño dinámico y la seguridad operativa. Se evidencia que la función de barrera hiperbólica crea un gradiente de repulsión progresivo que aumenta asintóticamente al límite impuesto, guiando a los algoritmos hacia zonas estables y logrando mantener el sobreimpulso por muy debajo de los límites establecidos sin comprometer el tiempo de establecimiento ni el tiempo de subida.

En la implementación de las metaheurísticas se observaron comportamientos distintivos en la sintonización de los parámetros del PID, destacando a DE como el método más robusto, indicando una mayor consistencia a la hora de evadir óptimos locales en escenarios complejos manteniendo tasa de éxito superiores al 90% donde el resto de sus competidores fallaron, como en los casos 2 y 4, mientras que PSO y FS mostraron una velocidad de convergencia superior, lo cual sugiere el empleo de estos algoritmos como ideales para aplicaciones con esfuerzos computacionales limitados.

El análisis estadístico de la tasa de éxito sobre las 100 ejecuciones independientes ha validado la metodología propuesta, descartando que los resultados obtenidos sean anomalías o desviaciones estocásticas. Además, al comparar el desempeño de la sintonización propuesta, logra equiparar la robustez del SMC en los casos específicos de estudio, pero con la ventaja de evitar el fenómeno de ruido o *chattering* inherente a este último, traducido como una reducción importante en el desgaste del elemento final de control y favoreciendo la eficiencia energética del proceso global.

Se evidenció que la sintonización del controlador PID evaluada con la función compuesta con una razón de 1:1 resulta en un sistema dominado por el término relacionado con la seguridad operativa, generando respuestas conservadoras, es decir, sobreamortiguadas y lentas, por lo que se recomienda la manipulación de los pesos para determinar una proporción eficiente para el equilibrio ideal entre la mitigación de la agresividad causado por los índices de desempeños y sin caer en la lentitud excesiva provocada por el término de seguridad.

6 REFERENCIAS

- Abbasi, E., & Naghavi, N. (2017). Offline auto-tuning of a PID controller using extended classifier system (XCS) algorithm. *Journal of Advances in Computer Engineering and Technology*, 3(1), 39-44.
- Adiga, A., Dubhashi, D., Lewis, B., Marathe, M., Venkatramanan, S., & Vullikanti, A. (2020). Mathematical models for covid-19 pandemic: a comparative analysis. *Journal of the Indian Institute of Science*, 100(4), 793-807.
- Åström, K., & Hägglund, T. (2009). *Control PID*. Madrid: Pearson.
- Báez, E., Bravo, Y., Leica, P., Chávez, D., & Camacho, O. (2017). Dynamical sliding mode control for nonlinear systems with variable delay. In *2017 IEEE 3rd Colombian conference on automatic control (CCAC)* (págs. 1-6). Colombia: IEEE.
- Bansal, H., Sharma, R., & Shreeraman, P. (2012). PID controller tuning techniques: a review. *Journal of control engineering and technology*, 2(4), 168-176.
- Benitez Gonzalez, I. O., Rivas Perez, R., Feliu Batlle, V., & Castillo Garcia, F. J. (4 de Abril de 2015). Temperature Control Based on a Modified Smith Predictor for Injectable Drug Formulations. *IEEE Latin America Transactions*, 13(4).
- Bernstein, D. (2002). What makes some control problems hard? *IEEE Control Systems Magazine*, 22(4), 8-19.
- Bharat, S., Ganguly, A., Chatterjee, R., & Basak, B. (2019). A Review on Tuning Methods for PID Controller. *Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT)*, 5(1).
- Burachik, R., Kaya, C., & Rizvi, M. (2014). A new scalarization technique to approximate Pareto fronts of problems with disconnected feasible sets. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 162(2), 428-446.
- Camacho, O., & Smith, C. (2000). Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes. *ISA transactions*, 39(2), 205-218.

- Camacho, O., Rojas, R., & García, W. (1999). Variable structure control applied to chemical processes with inverse response. *ISA transactions*, 38(1), 55-72.
- Cargua, W., Gallegos, M., Leica, P., Guzmán-Beckmann, L., & Camacho, O. (2018). Comparación de esquemas de control para reactores químicos tipo CSTR. *Ciencia e Ingeniería*, 39(2), 177-189.
- Cusido, A. (2023). Cusido, A. R. (2023). Control automático de procesos industriales: con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC. En A. Cusido, Cusido, A. R. (2023). *Control automático de procesos industriales: con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC* (págs. 150-152). Madrid: Díaz de Santos.
- Debreu, G. (1984). Economic theory in the mathematical mode. *The American Economic Review*, 74(3), 267-278.
- Destro, F., & Barolo, M. (2022). A review on the modernization of pharmaceutical development and manufacturing—Trends, perspectives, and the role of mathematical modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 620.
- Diwekar, U. (2020). *Introduction to applied optimization* (Vol. 22). Illinois: pringer Nature.
- Esparza, J., & Leal, J. (2024). A Novel Metaheuristic Algorithm Inspired by the Flow of a Stream of Water. *Revista de química teórica y aplicada*, 81(604), 309-319.
- Fister, D., Fister, J., Fister, I., & Šafarič, R. (2016). Parameter tuning of PID controller with reactive nature-inspired algorithms. *Robotics and Autonomous Systems*, 84, 64-75.
- Fortune Business Insight. (03 de 11 de 2025). *PID Controller Market*. Recuperado el 20 de 11 de 2025, de PID Controller Market Size, Share, Growth & COVID-19 Impact Analysis, By Type (Temperature PID Controllers, Pressure PID Controllers, Flow PID Controllers, Motion PID Controllers), By Application (Oil & Gas, Food & Beverage, Power, Chemical, and Others),: <https://www.fortunebusinessinsights.com/pid-controller-market-106844>
- Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 150-242.

- Helfrich, S., Herzel, A., Ruzika, S., & Thielen, C. (2024). Using scalarizations for the approximation of multiobjective optimization problems: towards a general theory. *Mathematical Methods of Operations Research*, 100(1), 27-63.
- Jean-Pierre, C. (2017). *Process Control* (Segunda ed.). Switzerland: Springer nature.
- Jia, J., Fischer, G., & Dyer, J. (1998). Attribute weighting methods and decision quality in the presence of response error: a simulation study. *Journal of Behavioral Decision Making*, 11(2), 85-105.
- Joseph, S., Dada, E., Abidemi, A., & Oyewola, B. (2022). Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems. *Heliyon*, 8(5).
- Juneja, P. K., Sunori, S. K., Sharma, A., Pathak, H., Joshi, V., & Bashin, P. (2021). A review on control system applications in industrial processes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1022, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- Kumar, R., Singla, S. K., & Chopra, V. (2015). Comparison among some well known control schemes with different tuning methods. *ournal of applied research and technology*, 13(3), 409-415.
- Kushwahn, M., & Patra, A. (2014). uning PID controller for speed control of DC motor using soft computing techniques-A review. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 4(2), 141-148.
- O'dwyer, A. (2009). Handbook of PI and PID controller tuning rules. En *Handbook of PI and PID controller tuning rules* (págs. 16-18). Londres: World Scientific.
- Ou, C., & Lin, W. (2006). Comparison between PSO and GA for parameters optimization of PID controller. *International conference on mechatronics and automation IEEE*, 2471-2475.
- Rahimi, I., Gandomi, A., Chen, F., & Mezura-Montes, E. (2023). A review on constraint handling techniques for population-based algorithms: from single-objective to multi-objective optimization. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(3), 2181-2209.

- Rajesh, J., Gupta, K., Kusumakar, H. S., Jayaraman, V. K., & Kulkarni, B. D. (2001). Dynamic optimization of chemical processes using ant colony framework. *Computers & Chemistry*, 25(6), 583-595.
- Rao, S. (2019). *Engineering optimization: theory and practice* (4 ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Research and Markets. (11 de 2025). *PID Controllers Market - Global Forecast 2025-2032*. Recuperado el 20 de 11 de 2025, de https://www.researchandmarkets.com/report/pid-controller?utm_source=BW&utm_medium=PressRelease&utm_code=mq3927&utm_campaign=1915122+-+Global+PID+Controllers+Strategic+Market+Report%2c+2022+and+2023-2030&utm_exec=chdo54prd
- Sarzosa, M., Yandún, A., & Garcés, L. (2018). Análisis del Rendimiento de un Reactor Químico Isotérmico Mediante Controladores PID, SSC y SMC. *Revista Politécnica*, 40(2), 19-24.
- Schultz, W., & Rideout, V. (1961). Control system performance measures: Past, present, and future. *IRE transactions on automatic control*(1), 22-35.
- Seborg, D., Edgar, T., Mellichamp, D., & Doyle III, F. (2016). *Process dynamics and control*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Shilane, D., Martikainen, J., Dudoit, S., & Ovaska, S. (2008). A general framework for statistical performance comparison of evolutionary computation algorithms. *Information Sciences*, 178(14), 2870-2879.
- Spiegel, M., & Liu, J. (1998). *Schaum's Mathematical Handbook of Formulas and Tables* . Schaums Outlines.
- Stephanopoulos, G., & Han, C. (1996). Intelligent systems in process engineering: A review. *Computers & Chemical Engineering*, 20(6-7), 743-791.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.

- Sultaniya, S., & Gupta, R. (2014). Design of PID controller using PSO Algorithm for CSTR System. *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 7(9), 971-977.
- Tahir, H., & Al-Rawi, A. (2006). Variable structure control design of process plant based on sliding mode approach. *Chinese Control Conference*, 932-937.
- Talbi, E. (2009). *Talbi, E. G. (2009). Metaheuristics: from design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Tedeschi, L. O. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural systems*, 89(2-3), 225-247.
- Utkin, V. (2003). Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(2), 212-222.
- Winkler, J., & Neubert, M. (2014). Handbook of Crystal Growth. *Elsevier*, 1143-1184.
- Wu, X., Lei, B., Zhang, K., & Cheng, M. (2017). Hybrid stochastic optimization method for optimal control problems of chemical processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 126, 297-310.
- Yang, X., & Deb, S. (2017). Cuckoo search: state-of-the-art and opportunities. *International Conference on Soft Computing & Machine Intelligence (ISCMI), IEEE Publication*, 55-59.
- Zhou, F., & Liao, Z. (2013). A particle swarm optimization algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 303, 1369-1372.
- Zulu, A., & John, S. (2014). A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors. *Open Journal of Applied Sciences*, 4, 547-556.