

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Análisis y Sintonía de Esquemas de Control
en Cascada”

Curso 2019/2020

Alumno/a:

Marta Leal Rueda

Director/es:

José Luis Guzmán Sánchez
Ángeles Hoyo Sánchez



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis y Sintonía de Esquemas de Control en Cascada

Alumna: Marta Leal Rueda

Director: José Luis Guzmán Sánchez

Codirector: Ángeles Hoyo Sánchez

Fecha: Noviembre de 2019

Marta Leal Rueda

José Luis Guzmán Sánchez

Ángeles Hoyo Sánchez

Índice general

	Página
Agradecimientos	VII
Dedicatoria	IX
Acrónimos	XI
Nomenclatura	XIII
Diagrama de bloques básico y señales asociadas.	XIII
Variables y parámetros.	XIV
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XIX
Resumen	XXI
Abstract	XXIII
1 Introducción	1
Introducción.	1
1.1 Motivación del trabajo de fin de grado.	1
1.2 Objetivos.	2
1.3 Contexto.	2
1.4 Resumen de resultados.	3
1.5 Fases del desarrollo del trabajo de fin de grado.	7
1.6 Planificación temporal.	7
1.7 Competencias utilizadas en el TFG.	8
1.8 Estructura del trabajo de fin de grado.	9

2	 Materiales y métodos	11
	Introducción	11
2.1	Esquema de control en cascada.	11
2.1.1	Elección de las variables de medida secundarias.	12
2.1.2	Metodología de Sintonía.	12
2.2	Sistema primer orden.	13
2.2.1	Sistema integrador.	13
2.3	Retardo de un sistema.	14
2.4	Controlador PID.	14
2.4.1	Configuraciones.	15
2.4.2	Algoritmos.	16
2.4.3	Sintonía controlador. Método analítico SIMC.	17
2.5	Problema de la saturación.	18
2.5.1	Esquema antiwindup.	19
2.5.2	Particularización para el esquema de control en cascada.	20
2.6	Métricas de rendimiento. Integral del error absoluto.	21
2.7	Matlab.	21
2.7.1	Simulink.	22
2.8	Revisión bibliográfica.	22
3	 Resultados	27
	Introducción	27
3.1	Rechazo perturbaciones. Primer orden.	27
3.1.1	Elección de modelos. Sintonía de controladores.	27
3.1.2	Comparación de control sin cascada y con cascada.	29
3.1.3	Saturación lazo interno.	31
3.1.4	Antiwindup lazo interno.	34
3.1.5	Propuesta de mejoras.	36
3.2	Rechazo perturbaciones. Integrador.	42
3.2.1	Elección de modelos. Sintonía de controladores.	42
3.2.2	Saturación del lazo interno.	44
3.2.3	Antiwindup lazo interno.	47
3.2.4	Propuesta de mejoras.	49

3.2.5	Variación constante de tracking	55
3.3	Cambio de referencia.	59
3.3.1	Saturación en lazo interno.	59
3.3.2	Antiwindup en lazo interno.	61
3.3.3	Propuesta de mejoras.	63
3.3.4	Variación de la constante de tracking	70
3.4	Evaluación de nuevas estrategias antiwindup.	73
4	Conclusiones.	77
	Apéndices	79
	A Scripts Matlab	81
A.1	Rechazo perturbaciones. Primer orden.	81
A.1.1	Comparación casos analizados.	81
A.1.2	Comparación términos integrales.	85
A.2	Rechazo perturbaciones. Integrador.	87
A.2.1	Comparación casos analizados	87
A.2.2	Comparación términos integrales.	91
A.2.3	Variación constante de tiempo de tracking.	92
A.3	Cambio de referencia.	95
A.3.1	Comparación casos analizados.	95
A.3.2	Comparación términos integrales.	98
A.3.3	Variación constante de tiempo de tracking.	100
A.4	Evaluación nuevas técnicas antiwindup	102
	Bibliografía	107

Agradecimientos

*Al Director **Dr. José Luis Guzmán Sánchez** y Codirectora **Ángeles Hoyo Sánchez** de este proyecto, por su dedicación y motivación, los cuales han sido determinantes para conseguir los resultados expuestos en el presente documento.*

*A la **Escuela Superior de Ingeniería** y al **Departamento de Informática** de la Universidad de Almería, así como al profesorado, por haberme formado y ayudado en todo lo posible.*

A todos ellos, gracias.

Dedicatoria

*El presente trabajo está dedicado a mi familia, la cual me ha acompañado en estos años de estudio. A mi madre **Luisa** y a mi padre **Francisco**, por ofrecerme todo su apoyo y confianza en todos los pasos que he dado, a mi hermano **Fco. Javier** por su interés y su cariño, que son siempre de gran ayuda.*

*A mi compañera **Ana**, la cuál ha sido una parte fundamental en los últimos años de estudio, por haber compartido alegrías y penas y juntas haber llegado al final de este grado.*

Acrónimos

PID	Proportional Integral Derivative Proporcional Integral Derivativo
TFG	Trabajo Fin de Grado
MATLAB	MATrix LABoratory LABoratorio de MATrices
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
PD	Proportional Derivative Proporcional Derivativo
PI	Proportional Integral Proporcional Integral
SIMC	Simple Internal Model Control Modelo Interno de Control Simple
IAE	Integral Absolute Error Error Integral Absoluto
ITAE	Integral Time Absolute Error Integral del Error Ebsoluto por el Tiempo

Nomenclatura

Diagrama de bloques y señales asociadas

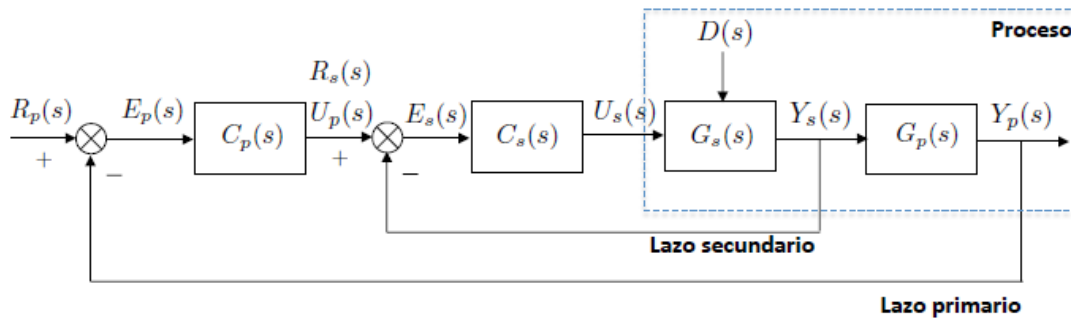


Diagrama de bloques característico de un sistema de control en cascada.

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>
<i>Señales y funciones de transferencia básicas</i>	
$R_p(s)$	Referencia del lazo primario
$E_p(s)$	Error del lazo primario
$C_p(s)$	Controlador del lazo primario
$R_s(s)$	Referencia del lazo secundario
$U_p(s)$	Entrada del lazo primario
$E_s(s)$	Error del lazo secundario
$C_s(s)$	Controlador del lazo secundario
$U_s(s)$	Entrada del lazo secundario
$G_s(s)$	Función de transferencia del lazo secundario
$D(s)$	Perturbación
$Y_s(s)$	Salida del lazo secundario
$G_p(s)$	Función de transferencia del lazo primario
$Y_p(s)$	Salida del lazo primario

Variables y parámetros

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
k	Ganancia estática del sistema	
τ	Constante de tiempo del sistema	s
t_r	Tiempo de retardo	s
K_p	Ganancia proporcional de un controlador PID	
K'	Ganancia proporcional de un controlador PID interactivo	
K''	Ganancia proporcional de un controlador PID paralelo	
K_d''	Ganancia derivativa de un controlador PID paralelo	
K_i''	Ganancia integral de un controlador PID paralelo	
T_i'	Término integral de un controlador PID interactivo	
T_d'	Término derivativo de un controlador PID interactivo	
T_i	Tiempo integral de un controlador PID	s
T_d	Tiempo derivativo de un controlador PID	s
T_t	Constante de tiempo de tracking(seguimiento)	s
τ_{bc}	Constante de tiempo en bucle cerrado	s

Lista de figuras

1.1	Respuestas del sistema de control en cascada sin saturación, con saturación y con esquema antiwindup en el lazo interno (primer orden)	3
1.2	Respuestas del sistema de control en cascada sin saturación, con saturación y con esquema antiwindup en el lazo interno (integrador) . . .	3
1.3	Comparativa entre el esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas (primer orden) . .	4
1.4	Comparativa entre el esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas (integrador) . . .	4
1.5	Respuestas sistema con cambio en referencia sin saturación, con saturación y con antiwindup	5
1.6	Respuestas de las dos mejoras aportadas y el sistema con antiwindup en el lazo interno (cambio de referencia)	5
1.7	Comparativa del término integral para ambos métodos antiwindup	6
1.8	Señal de control antes de la saturación para ambos métodos antiwindup . . .	12
2.2	Esquema de control en cascada.	13
2.3	Estructura del algoritmo de control PID no interactivo o ideal.	16
2.4	Estructura algoritmo de control PID interactivo.	17
2.5	Estructura algoritmo de control PID paralelo.	17
2.6	Controlador PID con mecanismo de protección antiwindup.	19
3.1	Esquema de control en cascada para dos sistemas de primer orden.	29
3.2	Diagrama de bloques sistema sin cascada.	30
3.3	Respuestas para un sistema con y sin cascada.	31
3.4	Esquema de control en cascada con saturación en el lazo interno.	31
3.5	Comparativa respuesta sistema con y sin saturación en el lazo interno. . . .	32
3.6	Comparativa término integral sistema con y sin saturación.	33
3.7	Esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno.	34
3.8	Comparativa de las respuestas del sistema sin saturación, con saturación y con esquema antiwindup en el lazo interno.	35

3.9	Comparativa término integral para los tres ensayos realizados.	36
3.10	Esquema de control en cascada con la implementación de la primera mejora.	37
3.11	Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora.	37
3.12	Término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora.	38
3.13	Esquema de control en cascada con la implementación de la segunda mejora.	39
3.14	Comparativa entre el esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno e implementación de la segunda mejora.	39
3.15	Término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la segunda mejora.	40
3.16	Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas.	41
3.17	Comparativa término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de las mejoras.	42
3.18	Esquema de control en cascada con integrador en lazo interno.	45
3.19	Esquema de control en cascada con saturación en el lazo interno (integrador lazo interno)	45
3.20	Comparativa respuesta con y sin saturación en el lazo interno (integrador lazo interno)	45
3.21	Comparativa termino integral con y sin saturación (integrador lazo interno)	47
3.22	Esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno (integrador lazo interno)	47
3.23	Comparativa de las respuestas del sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup en el lazo interno (integrador lazo interno)	48
3.24	Comparativa término integral para los tres ensayos realizados (integrador lazo interno)	49
3.25	Esquema de control en cascada con implementación de la primera mejora (integrador lazo interno)	50
3.26	Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora (integrador lazo interno)	50
3.27	Comparativa término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora (integrador lazo interno)	51
3.28	Esquema de control en cascada con la implementación de la segunda mejora (integrador lazo interno)	52
3.29	Comparativa respuestas sistema con antiwindup en lazo interno y con la segunda mejora (integrador lazo interno)	53

3.30	Comparativa término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la segunda mejora (integrador lazo interno) . . .	53
3.31	Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas (integrador lazo interno) . . .	54
3.32	Comparativa término integral del esquema del sistema con antiwindup y la implementación de las mejoras propuestas (integrador lazo interno) . . .	55
3.33	Variación de la constante de tracking del lazo externo para la primera mejora.	57
3.34	Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo para la primera mejora.	57
3.35	Variación de la constante de tracking del lazo externo para la segunda mejora.	58
3.36	Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo para la segunda mejora.	58
3.37	Esquema de control en cascada con cambio en la referencia e integrador en el lazo interno.	59
3.38	Esquema de control en cascada con cambio en la referencia y saturación en el lazo interno.	60
3.39	Respuestas del sistema con y sin saturación (cambio de referencia)	60
3.40	Comparativa término integral del sistema con y sin saturación (cambio de referencia)	61
3.41	Esquema de control en cascada con cambio en la referencia y antiwindup en el lazo interno.	61
3.42	Comparativa respuestas del sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup (cambio de referencia)	61
3.43	Comparativa término integral del sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup (cambio de referencia)	63
3.44	Esquema de control en cascada con cambio en la referencia e implementación de la primera mejora.	64
3.45	Comparativa respuestas sistema con antiwindup e implementación de la primera mejora (cambio en referencia)	65
3.46	Comparativa término integral del sistema con antiwindup y la primera mejora (cambio de referencia)	66
3.47	Esquema de control en cascada con cambio en la referencia e implementación de la segunda mejora.	66
3.48	Comparativa respuestas sistema con antiwindup y con la implementación de la primera mejora (cambio de referencia)	67
3.49	Comparativa término integral del sistema con antiwindup y la segunda mejora (cambio referencia)	68
3.50	Respuestas de las dos mejoras aportadas y el sistema con antiwindup en el lazo interno (cambio de referencia)	69

3.51	Comparativa término integral del sistema con antiwindup y las mejoras implementadas (cambio de referencia)	70
3.52	Variación de la constante de tracking del lazo externo de la primera mejora para el sistema con cambio en la referencia.	71
3.53	Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo de la primera mejora para el sistema con cambio en la referencia.	72
3.54	Variación de la constante de tracking del lazo externo de la segunda mejora para el sistema con cambio en la referencia.	72
3.55	Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo de la segunda mejora para el sistema con cambio en la referencia.	73
3.56	Diagrama de bloques de la implementación del método error recalculation en el lazo interno para un sistema con una dinámica de integrador en el lazo interno.	74
3.57	Aumento del esquema de implementación del error recalculation en el lazo interno.	75
3.58	Comparativa de las respuestas de ambos métodos antiwindup.	75
3.59	Comparativa del término integral para ambos métodos antiwindup.	76
3.60	Señal de control antes de la saturación para ambos métodos antiwindup.	76

Lista de tablas

1.1	Actividades previstas durante el proceso de ejecución del TFG.	7
1.2	Planificación temporal.	8
2.1	Reglas de sintonía del método SIMC para controladores PID.	18
3.1	Cálculo de parámetros del controlador PID con el método SIMC	28
3.2	Comparativa IAE entre el sistema con y sin saturación para el primario. . .	33
3.3	Comparativa IAE entre el sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup para el primario.	35
3.4	Comparativa IAE entre el sistema con antiwindup y la primera mejora para el primario.	37
3.5	Comparativa IAE entre el sistema con antiwindup y la segunda mejora para el primario.	40
3.6	Comparativa IAE de los tres casos analizados para el primario.	41
3.7	Cálculo de parámetros del controlador PID con el método SIMC (integrador lazo interno)	43
3.8	Comparativa IAE entre el sistema con y sin saturación para el primario (integrador lazo interno)	46
3.9	Comparativa IAE entre el sistema con saturación y con antiwindup para el primario (integrador lazo interno)	48
3.10	Comparativa IAE implementación mejora 1 para el primario (integrador lazo interno)	51
3.11	Comparativa IAE implementación mejora 2 para el primario (integrador lazo interno)	52
3.12	Comparativa IAE implementación mejoras para el primario (integrador lazo interno)	55
3.13	Comparativa IAE entre el sistema con y sin saturación para el primario (cambio de referencia)	61
3.14	Comparativa IAE entre el sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup para el primario (cambio de referencia)	63
3.15	Comparativa IAE del sistema con implementación de la primera mejora para el primario (cambio referencia)	64

3.16 Comparativa IAE del sistema con implementación de la primera mejora para el primario (cambio de referencia)	64
3.17 Comparativa IAE del sistema con implementación de las mejoras propuestas para el primario (cambio referencia)	69

Resumen

El control en cascada es uno de los métodos más exitosos para mejorar el rendimiento del control de un lazo único frente a rechazo a perturbaciones no medibles o reducción de efecto de no linealidades sobre la variable principal del proceso. Puede mejorar drásticamente el rendimiento de las estrategias de control, disminuyendo tanto la desviación máxima como el error integral para las respuestas a una perturbación. La combinación de facilidad de implementación y mejora del rendimiento de control ha provocado la aplicación generalizada de control en cascada durante muchas décadas.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) consiste en analizar cómo se distorsiona el sistema en ambos lazos de control bajo el efecto de la saturación y se incluirán mecanismos de saturación de efecto integral con el fin de que la saturación afecte al sistema lo mínimo posible. Para este fin, en primer lugar, se ha estudiado el sistema de control en cascada para el rechazo a perturbaciones, utilizando dos dinámicas distintas (primer orden con retardo e integrador con retardo en el lazo interno). Se ha provocado la saturación en el lazo interno y se ha comprobado cómo afecta al lazo externo. Para atenuar la saturación en ambos lazos, se proponen una serie de soluciones, que parten de la idea de que, para la salida de la saturación, se debe avisar al lazo externo de que satura, aspecto que no se plantea en las estrategias de control que se han revisado con anterioridad. Una vez que se ha analizado para el rechazo de perturbaciones, se propone realizar el mismo estudio en un sistema que no esté sometido a perturbaciones y que la saturación sea provocada por una gran demanda en el lazo primario, ya que este es un caso que se puede dar en la práctica. Para finalizar, se ha investigado en mejoras del esquema antiwindup y se ha aplicado una propuesta de esquema, comparándolo con el más utilizado en la industria.

Palabras clave: *Control en Cascada, Control PID, perturbaciones.*

Abstract

Cascade control is one of the most successful methods to improve the control performance of a single loop against rejection of non-measurable disturbances or reduction of the effect of non-linearities on the main process variable. It can dramatically improve the performance of control strategies, reducing both the maximum deviation and the integral error for responses to a load disturbances. The combination of easy implementation and improved control performance has led to the widespread application of cascade control for many decades.

The aim of this master thesis consists in analyzing how the system is distorted in both control loops under the effect of saturation and full effect saturation mechanisms will be included so that saturation affects the system as little as possible. To this end, in the first place, the cascade has been studied for disturbances rejection, using two different dynamics (first order and integrator in the internal loop). Saturation in the internal loop has been caused and it has been verified how it affects the external loop. To mitigate the saturation in both loops, a series of solutions are proposed, based on the idea that, for the saturation output, the external loop must be notified that it saturates, notice that this is not raised in the control strategies that have been published before. Once it has been analyzed for the rejection of disturbances, it is proposed to carry out the same study in a system that is not subject to disturbances and that saturation is caused by a high demand in the primary loop. Finally, research on improvements to the antiwindup scheme has been investigated and a proposal for a scheme has been applied, comparing it with the most used in the industry.

Keywords: *Cascade Control, Control PID, disturbances.*

1

Introducción

Introducción

En las carreras de ámbito ingenieril el Trabajo de Fin de Grado (TFG) supone la realización de un proyecto en el cual se apliquen y desarrollen los conocimientos adquiridos. Se realiza en la fase final del plan y está orientado a evaluar las competencias del título, siendo un requisito previo y fundamental para la obtención del título de Graduado. Se puede desarrollar el trabajo entre tres modalidades (Proyecto Técnico, Trabajo Técnico, Trabajo Monográfico), a través de las cuales se pueden llevar a cabo distintos tipos de trabajos, de forma que abarquen el conocimiento adquirido en el ámbito de la Ingeniería.

La realización del proyecto presenta la complejidad de la elección de un tema que, sea de interés para el alumno y del que se tenga cierto conocimiento. Además, debe presentar un interés teórico-práctico para la comunidad educativa, así como a los distintos campos de la Ingeniería Industrial. Es de vital importancia para la presentación de su obra, así como para futuros proyectos laborales, el cumplimiento de la normativa fijada en la realización del trabajo, con un formato cuidado. Para que el trabajo presentado tenga resultados con garantía de éxito, es necesario una adecuada planificación temporal y de los objetivos propuestos, así como el uso de una metodología apropiada, de forma que se cumpla con el propósito de nuestro estudio. Cuestiones esenciales que sostienen el desarrollo del presente TFG.

1.1 Motivación del trabajo fin de grado

Los sistemas de control en cascada tienen una gran importancia actualmente en la industria y, sin embargo, el tema de la saturación en este tipo de sistemas no ha sido ampliamente estudiado. Si se utiliza la acción integral en ambos lazos, es necesario implementar un esquema para evitar el fenómeno de la saturación del término integral.

En el lazo interno, se pueden implementar los esquemas estudiados para un único lazo de control, pero, para el lazo externo hay que seguir una serie de consideraciones.

De esta idea surge la motivación de este trabajo de fin de grado, de poder estudiar qué ocurre con estos sistemas cuando saturan, y el cómo esta saturación afecta a los distintos lazos de control. Cuando el lazo interno satura, el lazo externo no es consciente de la saturación. Es por ello que, en el presente trabajo, se va a proponer soluciones para conseguir que el lazo externo sea informado y conseguir una mayor atenuación.

Otra motivación es estudiar qué pasa cuando se le provoca un cambio brusco en el lazo primario a un sistema de control en cascada, ya que esta causa es una de las principales por las que se puede producir saturación y, sin embargo, tampoco se han encontrado trabajos donde se vea implementado este estudio.

También está presente la motivación de encontrar nuevas técnicas que eviten la saturación del término integral y que ofrezcan un mejor comportamiento frente a las técnicas ya conocidas y puedan ser de utilidad para el esquema de control en cascada.

1.2 Objetivos

El principal objetivo es encontrar soluciones para atenuar la saturación lo máximo posible en ambos lazos y, así, obtener un mejor rendimiento de control. Este objetivo se consigue evaluando las posibles casuísticas de saturación que se pueden dar en un esquema de control en cascada, jugando con la dinámica de los procesos y con la manera en la que se produce la saturación.

Otro de los objetivos planteados es evaluar otras técnicas para evitar la saturación del efecto integral, que puedan ser de utilidad en un sistema de control en cascada.

1.3 Contexto

El contexto que define el presente TFG se enmarca en el campo del control de procesos industriales, donde el uso del control en cascada está muy extendido, debido a las ventajas que ofrece frente al control con un único lazo. Es importante ser capaz de juzgar si el control en cascada puede aportar mejoras y seguir una metodología para la elección de la variable de medida secundaria. A nivel industrial se requiere, habitualmente, seguir una serie de pasos para la sintonización de los controladores de ambos lazos, utilizando reglas analíticas. El estudio aborda una dinámica amplia, considerando los procesos industriales en los que interfiere una perturbación y también aquellos sistemas en los que, por algún caso, se produce un cambio de consigna en el lazo principal. Se estudian dinámicas sencillas, primer orden con retardo e integrador con retardo.

1.4 Resumen de resultados

Se ha implementado el esquema de control en cascada para el rechazo de perturbaciones. Primero, para dos dinámicas de primer orden, una en el externo y otra en el interno y, posteriormente, para una dinámica de integrador en el lazo interno y una de primer orden en el externo. Para ambos ensayos se ha provocado saturación en el lazo interno, observándose como esta afecta al sistema y, posteriormente, se ha implementado un esquema antiwindup en el lazo interno. En la Figura 1.1 y Figura 1.2 se puede observar como la saturación afecta a ambas dinámicas y como la acción del esquema antiwindup atenúa el efecto de esta. El efecto se observa mejor para el caso del integrador en el lazo interno.

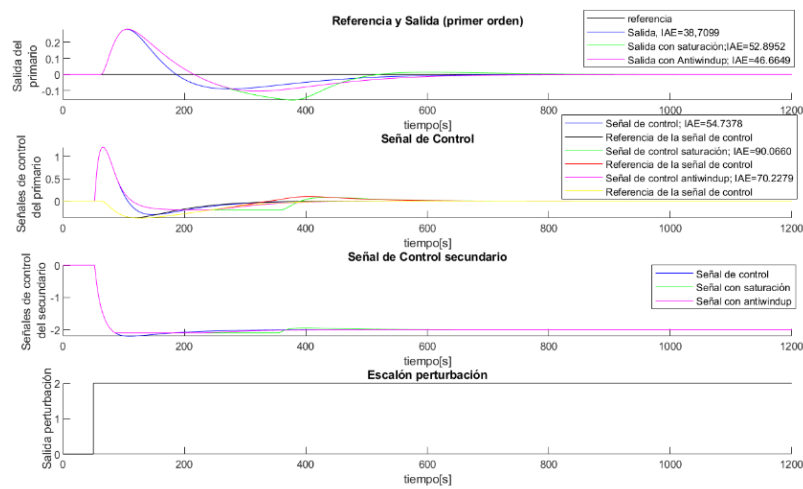


Figura 1.1: Respuestas del sistema de control en cascada sin saturación, con saturación y con esquema antiwindup en el lazo interno (primer orden)

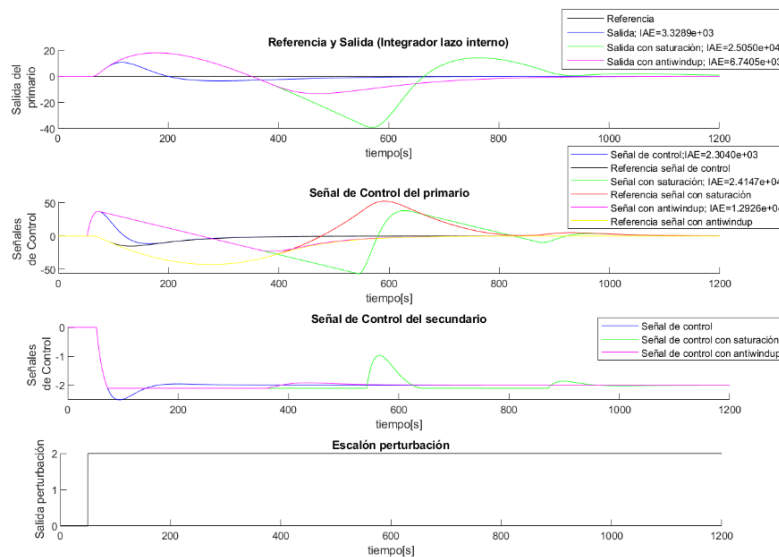


Figura 1.2: Respuestas del sistema de control en cascada sin saturación, con saturación y con esquema antiwindup en el lazo interno (integrador)

Para ambos casos, se han establecido dos mejoras en las que la señal de seguimiento del lazo interno se lleva también al externo, para avisar a este de que el interno está saturado. En la segunda mejora, se elimina el antiwindup del lazo interno y este únicamente afecta al externo. En la Figura 1.3 y 1.4 se puede percibir el efecto de las soluciones propuestas.

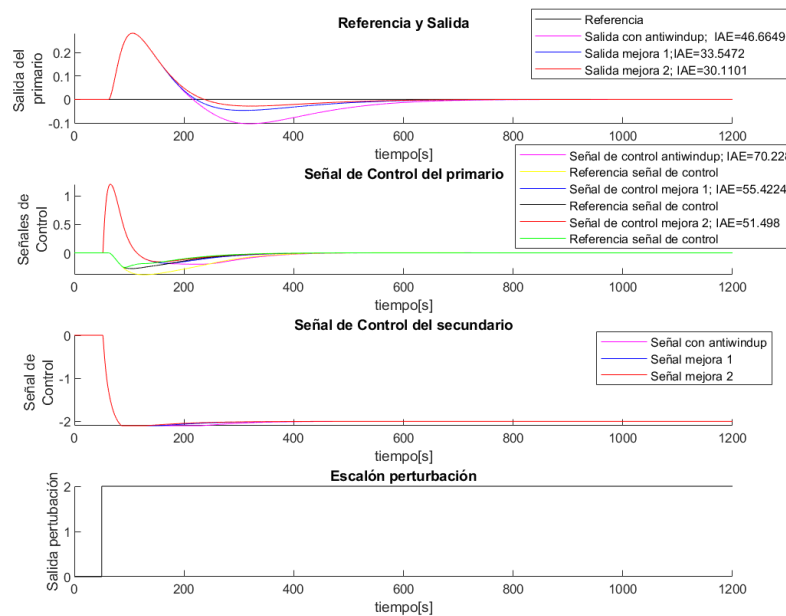


Figura 1.3: Comparativa entre el esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas (primer orden)

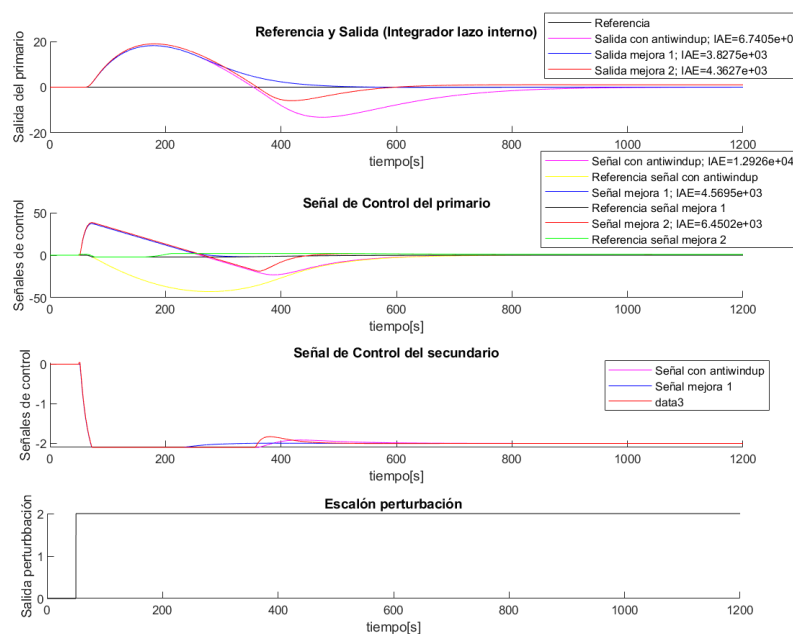


Figura 1.4: Comparativa entre el esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas (integrador)

Este mismo análisis se ha realizado para un sistema sin perturbación y con un cambio brusco de referencia en el lazo primario.

En la Figura 1.5 se observa cómo afecta la saturación al lazo interno, provocándose distorsión, y cómo esta se ve disminuida cuando se incluye el esquema antiwindup. En la Figura 1.6 se muestra las mejoras que se han propuesto y se ve que mejoran el rendimiento de control y la salida del sistema.

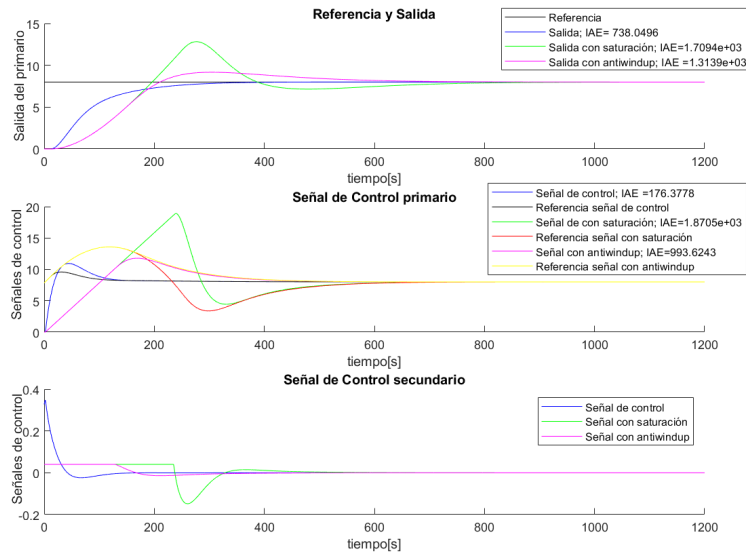


Figura 1.5: Respuestas sistema con cambio en referencia sin saturación, con saturación y con antiwindup

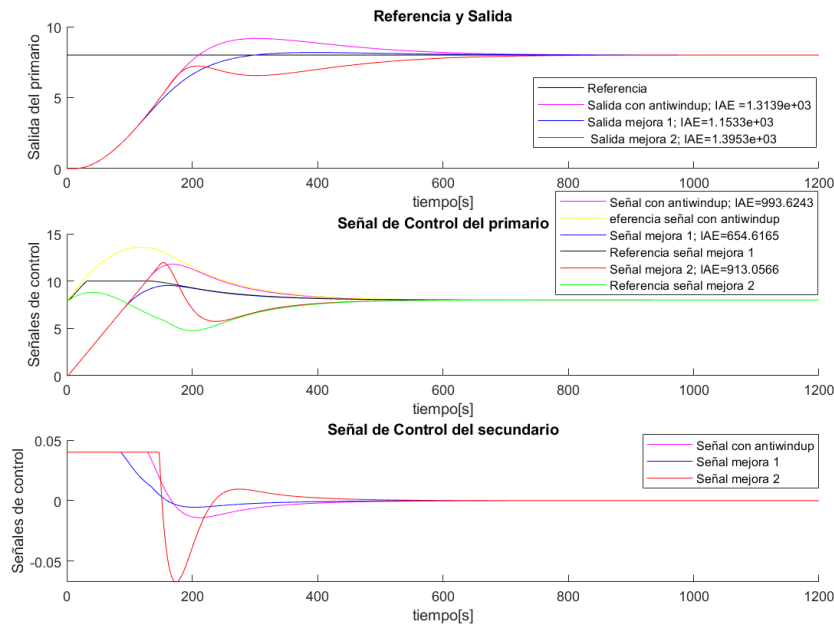


Figura 1.6: Respuestas de las dos mejoras aportadas y el sistema con antiwindup en el lazo interno (cambio de referencia)

Para finalizar, se han evaluado otras técnicas antiwindup y se ha propuesto un esquema nuevo (error recalculation), el cual se compara con el esquema utilizado para los ensayos anteriores (back-calculation). En la Figura 1.7 se muestra el término integral y en la Figura 1.8 la señal de control antes de la saturación, ya que en estas gráficas son donde se ha observado mejoría con respecto al esquema anterior.

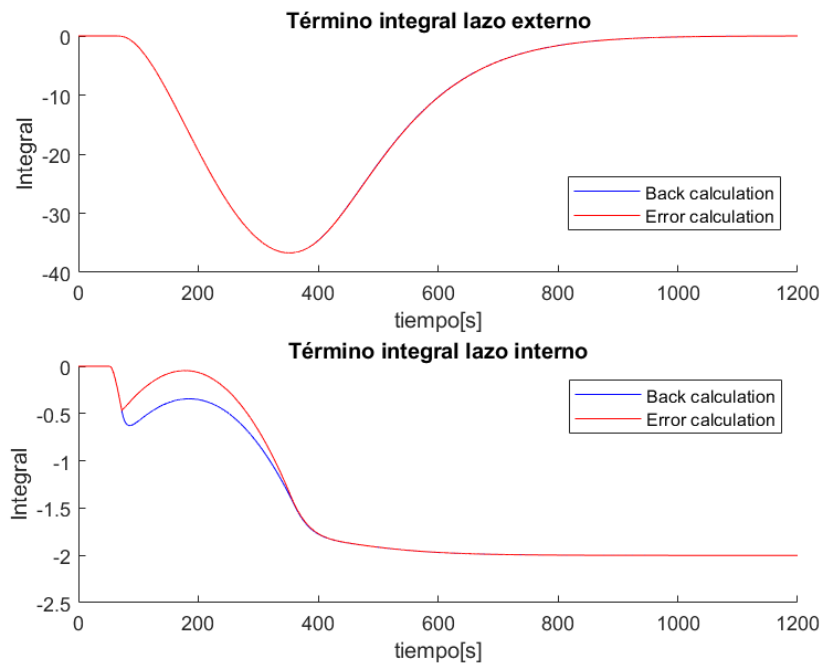


Figura 1.7: Comparativa del término integral para ambos métodos antiwindup

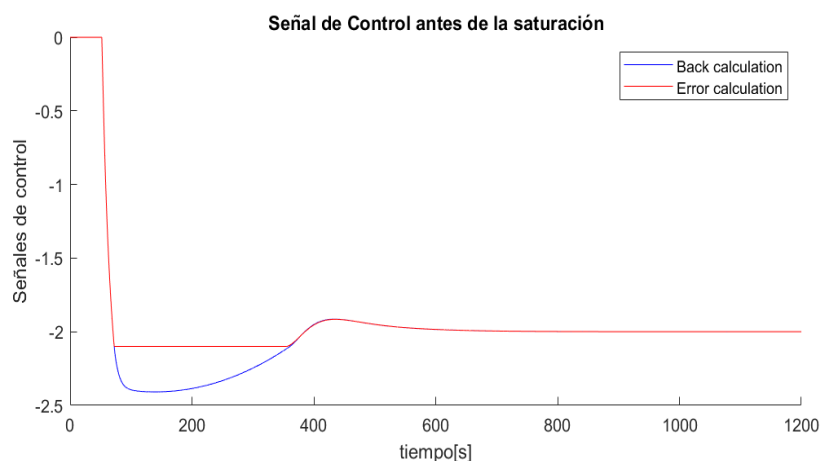


Figura 1.8: Señal de control antes de la saturación para ambos métodos antiwindup

1.5 Fases del desarrollo del trabajo fin de grado

Los resultados presentes en la Sección 1.4 son consecuencia de la ejecución sistemática de una serie de tareas, en diferentes fases y con una determinada planificación, durante aproximadamente seis meses de trabajo. A continuación, se muestra la Tabla 1.1 con el desglose de las actividades realizadas para la conclusión del TFG.

<i>Actividades</i>	<i>Descripción</i>
A	Revisión bibliográfica
B	Elección de los modelos a estudiar
C	Sintonía de los controladores para los modelos elegidos
D	Implementación en Simulink del Esquema en Cascada
E	Creación de Scripts en Matlab®
F	Evaluar los resultados obtenidos y sacar conclusiones
G	Plantear posibles mejoras para obtener mejores resultados
H	Implementación de las mejoras en Simulink
I	Creación de Scripts en Matlab para las mejoras
J	Análisis e interpretación de los resultados obtenidos
K	Redacción del documento final

Tabla 1.1: Actividades previstas durante el proceso de ejecución del TFG

1.6 Planificación temporal

En la Tabla 1.2 se detalla la planificación por semanas, meses y actividad ejecutada para la realización del TFG.

Tabla 1.2: Planificación temporal

Año		2019													Total mes
Mes	Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Total semana	Total mes	
	Semana														
Mayo	1	10											10	20	
	2	10											10		
Junio	3	10	3	5									18	45	
	4	5	2	5									12		
	5			2									2		
	6			3	5	5							13		
Julio	7				15	10							25	80	
	8					10	5						15		
	9							10	5			5	20		
	10							10	10				20		
Agosto	11		3						10				13	33	
	12		2						10	4			16		
	13									2			2		
	14										2		2		
Septiembre	15								5	5			10	43	
	16								5	8			13		
	17								5	2			7		
	18								5	3	5		13		
Octubre	19								5	5	5		15	98	
	20									2	5	10	12		
	21							5		2	5	15	32		
	22								2	2	5	30	39		
Noviembre	23									2	5	30	37	82	
	24										5	40	45		
Total horas	Por actividad	40	5	5	30	25	5	25	52	37	25	125		374	

1.7 Competencias utilizadas en el TFG

El grado de Ingeniería Electrónica Industrial otorga una formación apropiada para abarcar las necesidades de la Administración y de la Industria, en el ámbito de la Automática y la Electrónica Industrial. Este grado está enfocado a formar a especialistas que puedan llevar a cabo diversas actividades profesionales.

Para la realización del trabajo se han trabajado una serie de competencias, tanto básicas como transversales, dentro del marco de competencias para la obtención del grado de Ingeniería Electrónica Industrial.

Dentro de las competencias básicas se puede destacar el demostrar poseer y comprender los conocimientos en un área de estudio, saber aplicar los conocimientos a su trabajo de una forma profesional, tener la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes, saber transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público, tanto especializado como no, y, por último, haber desarrollado habilidades de aprendizaje indispensables para poder emprender estudios posteriores con autonomía.

Entre las competencias transversales se puede destacar poseer conocimientos básicos de la profesión, la habilidad en el uso de las TIC, presentar capacidad para la resolución de problemas, buena comunicación oral y escrita, capacidad de crítica y autocrítica, saber trabajar en equipo, compromiso ético, aprender una lengua extranjera, tener capacidad para trabajar de forma autónoma y poseer competencia social y ciudadanía global.

1.8 Estructura del trabajo fin de grado

El presente TFG está constituido por cuatro capítulos, los cuales son imprescindibles para el entendimiento del TFG. Aunque la estructura de trabajo monográfico no es fija, si tiene que tratar unos aspectos fundamentales que son los que se tratan en los capítulos en los que está compuesto este trabajo. Antes de estos capítulos se incluye un índice general, los agradecimientos y la dedicatoria, un listado de acrónimos y una sección de nomenclatura. A continuación, se facilita una lista con las tablas y figuras que aparecen a lo largo del documento. También se ha incluido un resumen del documento en castellano y en inglés. Los capítulos están constituidos por el siguiente contenido:

- **Introducción:** en este capítulo se desarrolla el interés de la realización del TFG, así como sus principales objetivos y la motivación de este. También se facilita un resumen de los resultados obtenidos, así como un cronograma de las actividades realizadas y la planificación de las tareas.
- **Capítulo 2:** en este capítulo se desarrollan los distintos conceptos teóricos, así como las herramientas que han sido utilizadas para el desarrollo del trabajo. Además, se realiza una revisión bibliográfica de distintos trabajos encontrados en la literatura sobre los esquemas de control en cascada y se transmite la principal idea de cada uno de ellos.
- **Capítulo 3:** en este capítulo se realiza un análisis del efecto de la perturbación en los esquemas de control en cascada, para dos dinámicas distintas y también se analiza el efecto de la saturación y, como esta, se puede atenuar mediante distintos esquemas propuestos. Por otro lado, se realiza un análisis del efecto de la saturación para un sistema con una demanda de entrada elevada. Por último, se analizan distintas técnicas para mitigar el efecto de la saturación. Se muestran los resultados de los estudios realizados.

- **Capítulo 4:** en este capítulo se escribe una conclusión del trabajo realizado y se analizan distintas líneas de investigación que se podrían seguir a continuación del presente trabajo.

Para finalizar, se incluye un apéndice con los scripts de Matlab que se han utilizado a lo largo del trabajo, así como las referencias bibliográficas que se han consultado en la realización de este.

2

Materiales y Métodos

Introducción

En este capítulo se describen los distintos conceptos teóricos y métodos o técnicas que han sido necesarios para la realización del TFG, así como los materiales y herramientas que se han utilizado. Se realiza una revisión bibliográfica de distintos trabajos encontrados en la literatura que trabajan con los sistemas de control en cascada y proponen soluciones para estos.

2.1 Esquema de control en cascada

A pesar de la gran potencia de los controladores PID y de sus variantes, están presentes ciertos problemas de control donde estos controladores muestran limitaciones a la hora de cumplir con algunas especificaciones de diseño [1]. Los problemas de rechazo a perturbaciones forman parte de algunas de estas limitaciones.

El Control en Cascada es una estrategia de control que presenta ventajas sobre un lazo de control simple, y es posible utilizarlo cuando hay distintas señales de medida y una variable de control. Es especialmente útil cuando se dan dinámicas lentas, como las grandes constantes de tiempo o los grandes retardos, entre la variable de control y la salida a controlar del proceso. El principal uso de esta estrategia es la compensación de las perturbaciones que influyen a las medidas intermediarias del proceso, con la finalidad de disminuir el efecto que produce en la salida principal del sistema que se quiere controlar. Otro de los usos es disminuir el efecto de no linealidades del proceso que se dan en las variables secundarias del proceso para debilitar el efecto en la salida principal del sistema a controlar [3].

El sistema con el que se construye el control en cascada está constituido por dos lazos. El lazo interno, que es denominado como lazo secundario, y el lazo externo o lazo primario. El lazo externo es el que opera con la señal de medida primaria, por eso se denomina lazo principal y el interno está asociado a la variable secundaria del proceso. También se puede dar un control en cascada con más lazos anidados [3].

2.1.1 Elección de las variables de medida secundarias

En la industria se dispone de diversas señales que sirven como variables secundarias en un esquema de control en cascada, por lo que es importante disponer de unas reglas básicas para elegir la variable más adecuada. Algunas de estas reglas son:

- Conviene que exista una relación bien definida entre la variable de medida primaria y la variable secundaria a escoger.
- Las perturbaciones fundamentales deben operar en el lazo interno.
- La dinámica del lazo interno debe ser al menos cinco veces más rápida que la del lazo externo.
- Debe ser posible que el lazo interno tenga una alta ganancia.

2.1.2 Metodología de Sintonía

La sintonía de un esquema de control en cascada conviene que se realice acorde a una serie de pasos, con el fin de capturar apropiadamente las dinámicas de ambos lazos de control para poder llevar a cabo un diseño adecuado [2].

1. En primer lugar, se realiza la sintonía del lazo secundario en base a la dinámica $G_s(s)$ que se muestra en la Figura 2.1, donde se intenta obtener un eficiente rechazo a perturbaciones [2].

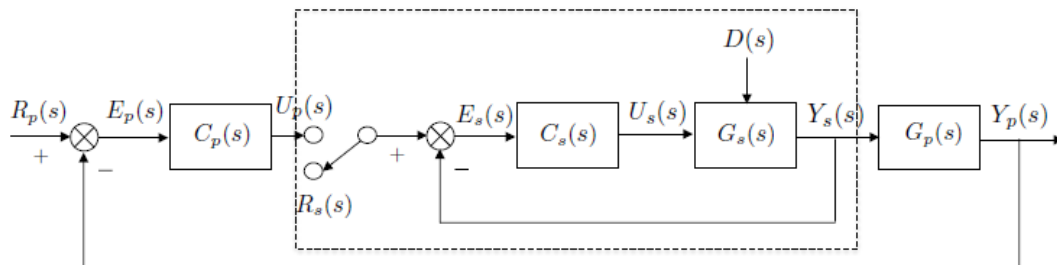


Figura 2.1: Esquema de control en cascada. Dinámica del lazo secundario

2. En segundo lugar, se coloca el lazo secundario en modo automático y se obtiene la dinámica $G_{p,s}(s)$, como la combinación de la función de transferencia en lazo cerrado del lazo secundario unido a $G_p(s)$. Esta dinámica se puede obtener de varias formas: experimentalmente, de forma analítica o mediante reglas heurísticas. El esquema de un sistema de control en cascada se puede ver en la Figura 2.2.
3. Finalmente, se realiza la sintonía del lazo primario en base a la dinámica de $G_{p,s}(s)$ y atendiendo a las especificaciones de diseño del problema.

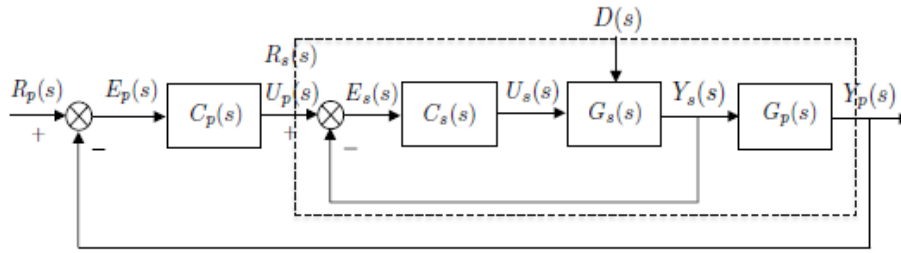


Figura 2.2: Esquema de control en cascada

2.2 Sistema de primer orden

Es un sistema definido por una ecuación diferencial de primer orden (función de transferencia de orden uno - polinomio característico de orden uno) y que está caracterizado por presentar una respuesta exponencial frente a una entrada en escalón [4]. La función de transferencia se define como el cociente de la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la señal de entrada en condiciones nulas. Por lo tanto, la función de transferencia de un sistema de primer orden viene designada de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

donde k es la ganancia estática, que representa la amplitud que muestra la respuesta del sistema en régimen permanente en función de la amplitud de la entrada al mismo y τ es la constante de tiempo, que simboliza el tiempo que tarda el sistema en obtener el 63% del valor final de la señal de salida desde el momento que empieza a variar el sistema frente a una entrada en escalón.

2.2.1 Integrador

Uno de los casos particulares de los sistemas de primer orden son los sistemas integradores, que están descritos por una ecuación diferencial de primer orden (función de transferencia de orden uno-polinomio característico de orden uno), en este caso, presenta una repuesta con forma de rampa frente a un escalón como entrada [4]. Su función de transferencia es la siguiente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_v}{s+1} \quad (2.2)$$

donde k_v define la pendiente de la respuesta a escalón.

2.3 Retardo de un sistema

El retardo de un sistema se produce cuando en un proceso real se le aplica un cambio a la entrada y la salida de este no reacciona inmediatamente, sino que transcurre un tiempo determinado. Este tiempo se conoce como tiempo de retardo, t_r . Si los sistemas de las ecuaciones (2.1) y (2.2) presentaran retardo, las funciones de transferencia se representarían de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \cdot e^{-t_r s} \quad (2.3)$$

$$G(s) = \frac{k/\tau}{s+1} e^{-t_r s} \quad (2.4)$$

2.4 Controlador PID

Es el controlador que más se utiliza en la industria (más del 95% de los lazos de control son gobernados por controladores PID, la mayoría de ellos PI) [8]. Su uso tan extendido se debe a las cuantiosas ventajas que este presenta, entre algunas de ellas cabe destacar la sencillez de su implementación, la disposición de diversos métodos de sintonía y la robustez. Posee la característica de generar una señal de control mediante tres operaciones matemáticas básicas sobre el error: una acción Proporcional en base al error actual, una acción Integral en base al error acumulado y una acción Derivativa en base a la tendencia del error [5]. La función de transferencia de un controlador PID es la siguiente:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.5)$$

donde K_p es la ganancia proporcional, T_i el tiempo integral y T_d el tiempo derivativo.

La **acción proporcional** del controlador tiene las siguientes características principales [5]:

- La salida del controlador es proporcional al error.
- Queda definido por la ganancia proporcional.
- Ante cambio de consigna o perturbaciones se suele producir un error de offset y no obtiene el valor deseado.
- A mayor ganancia, menor error, pero más oscilaciones.

La **acción integral** presenta las siguientes características:

- No existe error de offset en régimen permanente.

- Queda definido por un parámetro (tiempo integral, T_i), es el tiempo que tarda la acción integral en repetir la proporcional.
- Su utilización produce una respuesta más oscilatoria.
- A menor T_i , más rápido es el sistema, pero también, más oscilatorio.

La **acción derivativa** tiene las siguientes características principales:

- Queda definido por un parámetro (tiempo derivativo, T_d).
- Presenta una acción anticipativa y responde antes de que se produzca el error.
- No responde ante errores constantes ya que la derivada es cero.
- No recomendable en procesos con ruido.

2.4.1 Configuraciones

Las distintas carencias que se han encontrado en el controlador PID se han ido supliendo con leves modificaciones de la estructura de control original. El controlador PID está constituido por diversas configuraciones: controlador Proporcional (P), controlador Proporcional Integral (PI), controlador Proporcional Derivativo (PD) y Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) [5]:

- **Controlador Proporcional (P).** Está definido por el parámetro de ganancia proporcional (K_p). Este controlador ocasiona una señal de control proporcional al error. El error en estado estacionario disminuye con el aumento de la ganancia proporcional. La función de transferencia del controlador es la siguiente.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.6)$$

- **Controlador Proporcional Integral (PI).** Está definido por los parámetros de ganancia proporcional (K_p) y el tiempo integral (T_i). No presenta error en régimen permanente. La función de transferencia que describe este controlador es la siguiente:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p \left(\frac{1+T_i s}{T_i s} \right) \quad (2.7)$$

- **Controlador Proporcional Derivativo (PD).** Está definido por dos parámetros, ganancia proporcional (K_p) y tiempo derivativo (T_d). Presenta error de offset en régimen permanente. Otra característica es que la acción derivativa provoca la estabilidad del sistema, permitiendo el aumento de la ganancia del controlador y reduciendo el error en régimen permanente. La función de transferencia de esta configuración es la siguiente.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (2.8)$$

- **Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).** Está descrito por tres parámetros, la ganancia proporcional (K_p), el tiempo integral (T_i) y el tiempo derivativo (T_d). El control proporcional le proporciona forma a la curva de respuesta, de forma que se produce una mayor salida cuando el tiempo sea mayor. El control integral atenúa el efecto de la existencia del error, de forma que se produce más salida conforme más tiempo dure el error, eliminando el error en régimen permanente. El control derivativo atenúa el tiempo en el cual el error cambia, de forma que se predice con antelación el valor con el que cambia el error. La función de transferencia es la siguiente:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.9)$$

2.4.2 Algoritmos

- **No interactivo.** También conocido como algoritmo ideal. Su principal característica es que las acciones integral y derivativa son independientes y la ganancia proporcional influye en las tres acciones. A priori, sin evaluar la respuesta, se sabe cual va a ser el efecto de los parámetros sobre el lazo cerrado. Es por ello por lo que es el algoritmo más utilizado en la industria. Este algoritmo está descrito por la ecuación (2.9). En la Figura 2.3 se muestra el esquema del algoritmo:

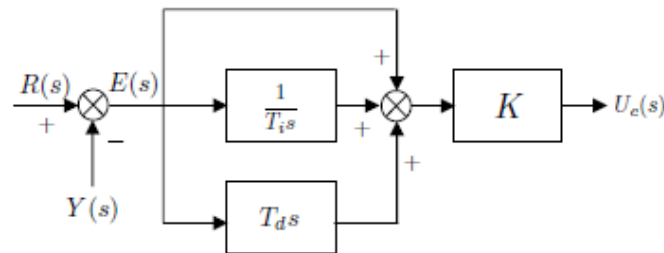


Figura 2.3: Estructura del algoritmo de control PID no interactivo o ideal

- **Interactivo.** También conocido como algoritmo en serie. Cualquier cambio que se produzca en el tiempo integral y derivativo afecta a las tres acciones. Una limitación de este algoritmo es que presenta únicamente raíces reales, mientras que el no interactivo permite raíces reales y complejas. Es de gran utilidad para los métodos analíticos como asignación de polos, ya que no hay que hacer ningún cálculo. La función de transferencia y el esquema de este algoritmo (Figura 2.4) se muestran a continuación:

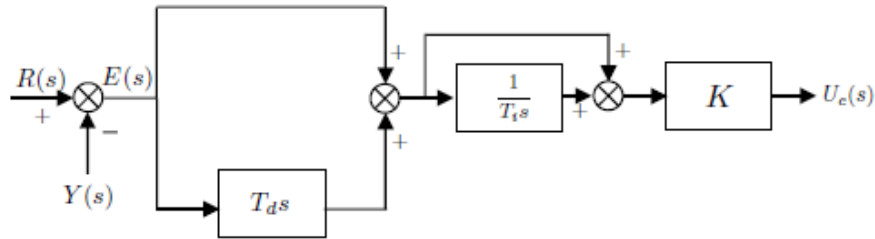


Figura 2.4: Estructura algoritmo de control PID interactivo

$$U_c(s) = K' \left(1 + \frac{1}{T_i' s} \right) (1 + T_d' s) E(s) \quad (2.10)$$

donde K' es la ganancia proporcional del interactivo, el término integral del interactivo y el término derivativo del interactivo.

- **Paralelo.** Este algoritmo admite la modificación de las tres acciones de forma separada. Es apropiado para el diseño en frecuencia y para los diseños analíticos, ya que permite el estudio de la aportación de cada una de la acción del controlador. La ecuación que se utiliza para este algoritmo y el esquema (Figura 2.5) se pueden observar a continuación:

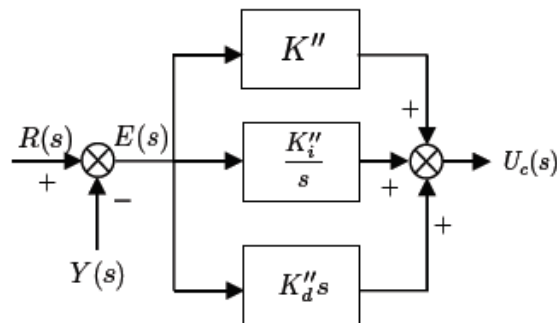


Figura 2.5: Estructura del algoritmo de control PID paralelo

$$U_c(s) = \left(K'' + \frac{K_i''}{s} + K_d'' s \right) E(s) \quad (2.11)$$

donde K'' es la ganancia proporcional del controlador, K_i'' la ganancia integral y K_d'' es la ganancia derivativa.

2.4.3 Sintonía controlador. Método analítico SIMC

Al proceso de dar valores a los parámetros del controlador se le conoce como Sintonía del Controlador [5].

El método analítico-heurístico SIMC (Simple Internal Model Control) se utiliza para controlar un sistema de primer orden con retardo en bucle abierto. Si las especificaciones están relacionadas con la eliminación del error en régimen permanente ante una determinada entrada.

Se requiere una respuesta de primer orden en lazo cerrado, con una determinada constante de tiempo frente a seguimiento de referencias. Este método admite un compromiso mejor frente al seguimiento de consignas y al rechazo de perturbaciones. Skogestad aportó reglas de sintonía en un artículo escrito en 2004 [6] mediante el método SIMC, en el que el único parámetro de ajuste es la constante de tiempo en bucle cerrado deseada. En la Tabla 2.1 [6] se resume la configuración resultante de aplicar el método analítico.

Process	$g(s)$	K_c	τ_1	τ_D^d
First-order	$k \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)}$	$\frac{1}{k} \frac{\tau_1}{\tau_c + \theta}$	$\min\{\tau_1, 4(\tau_c + \theta)\}$	–
Second-order, Eq. (4)	$k \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{k} \frac{\tau_1}{\tau_c + \theta}$	$\min\{\tau_1, 4(\tau_c + \theta)\}$	τ_2
Pure time delay ^a	$k e^{-\theta s}$	0	0 ^e	–
Integrating ^b	$k' \frac{e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{1}{k'} \frac{1}{(\tau_c + \theta)}$	$4(\tau_c + \theta)$	–
Integrating with lag	$k' \frac{e^{-\theta s}}{s(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{k'} \frac{1}{(\tau_c + \theta)}$	$4(\tau_c + \theta)$	τ_2
Double integrating ^c	$k'' \frac{e^{-\theta s}}{s^2}$	$\frac{1}{k''} \frac{1}{4(\tau_c + \theta)^2}$	$4(\tau_c + \theta)$	$4(\tau_c + \theta)$

Tabla 2.1 Reglas de sintonía del método SIMC para controladores PID

2.5 Problema de la saturación

Con el fin de capturar la dinámica de un proceso mediante el comportamiento dinámico de un sistema lineal es preciso tener en cuenta distintos factores y situaciones que pueden hacer el comportamiento del sistema deje de ser lineal [5]. Uno de estos puede ser la saturación.

Todos los actuadores tienen limitaciones: un motor tiene una velocidad limitada, una válvula no puede estar más que totalmente abierta o cerrada, etc. Para un sistema de control con un amplio rango de condiciones operativas, puede ocurrir que la variable de control alcance los límites del actuador. Cuando esto sucede, el lazo de realimentación se rompe y el sistema pasa a operar como un sistema en lazo abierto, porque el actuador permanecerá en su límite independientemente de la salida del proceso. Si se utiliza un controlador con acción integral, el error puede continuar siendo integrado si el algoritmo no se diseña adecuadamente.

Esto significa que el término integral puede hacerse muy grande o, coloquialmente realiza un <<windup>>.

Se precisa que el error tenga signo opuesto durante un largo período antes de que las cosas retornen a la normalidad. La consecuencia es que cualquier controlador con acción integral puede sufrir grandes transitorios cuando el actuador se satura.

La saturación del integrador (windup) puede ocurrir en conexión con grandes cambios en el punto de consigna, o puede ser causado por grandes perturbaciones o mal funcionamiento del equipo. El windup puede ocurrir también cuando se usan selectores de forma que algunos controladores están moviendo un actuador [3].

2.5.1 Esquema antiwindup

A pesar de que hay distintos métodos que contrarrestan el fenómeno windup, el que más se conoce en la literatura y más usado en la práctica es el esquema back-calculation (recálculo) o presentado como esquema antiwindup.

El back-calculation trabaja de la siguiente manera. Cuando la salida se muestra saturada, se recalcula el término integral en el controlador, de esta forma el nuevo valor da una salida en el límite de la saturación. Es conveniente no reiniciar el integrador instantáneamente sino dinámicamente con una constante de tiempo de seguimiento o constante de tracking (T_t) [3].

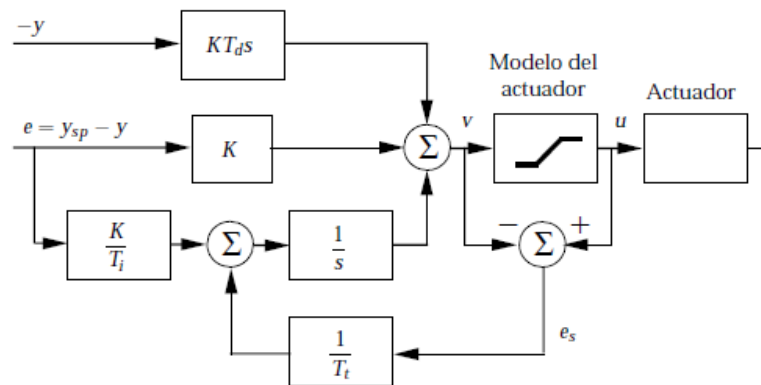


Figura 2.6: Controlador PID con mecanismo de protección antiwindup.

La Figura 2.6 [3] muestra un diagrama de bloques de un controlador PID con protección antiwindup basado en back-calculation. El sistema tiene un recorrido de realimentación extra que se crea midiendo la salida real del actuador, o la salida de un modelo matemático del actuador con saturación y estableciendo una señal de error (e_s) como la diferencia entre la salida del controlador (v) y la salida del actuador (u). La señal e_s se alimenta a la entrada del integrador a través de la ganancia $1/T_t$. La señal es cero cuando no hay saturación. Por lo tanto, no habrá ningún efecto sobre la operación normal cuando el actuador no esté saturado.

Cuando el actuador esté saturado, la señal e_s es distinta de cero. Se rompe el recorrido de realimentación normal alrededor del proceso porque la entrada al mismo persiste constante. Sin embargo, existe un camino de realimentación alrededor del integrador.

Debido a esto, la salida del integrador se mueve hacia un valor tal que la entrada del integrador se hace cero [3]. La entrada del integrador es la siguiente:

$$\frac{1}{T_t} e_s + \frac{K}{T_i} e \quad (2.12)$$

donde e es el error de control. Por tanto, en régimen permanente se tiene que:

$$e_s = -\frac{KT_t}{T_i} e \quad (2.13)$$

Y se consigue limitar el efecto windup deduciéndolo de la siguiente manera:

$$v = u_{\text{lím}} + \frac{KT_t}{T_i} e \quad (2.14)$$

donde $u_{\text{lím}}$ es el valor de la saturación de la variable de control. Las señales e y $u_{\text{lím}}$ tienen el mismo signo, por lo que v va a ser mayor que $u_{\text{lím}}$ en todo momento. Esto advierte al integrador del efecto windup. La velocidad de reinicio de la salida del controlador depende de la ganancia de la realimentación, $1/T_t$.

2.5.2 Particularización para el esquema de control en cascada

Si se utiliza la acción integral en ambos lazos de control, secundario y primario, es necesario tener un esquema para evitar el fenómeno de la saturación del término integral ó windup. El lazo interno se puede manejar de la manera típica, pero no es una tarea trivial evitar el windup en el lazo externo [7].

Hay tres casos en los que el lazo de realimentación se rompe y es importante asegurar que su modo integral se ajusta de forma adecuada. Para resolver el problema, en el caso en el que se utilizan dos controladores de forma independiente, se debe introducir la señal de seguimiento en el controlador primario. Las tres situaciones que se plantean y las soluciones que se proponen son las siguientes [7]:

- La señal de control del lazo interno puede saturarse. En este caso la variable de proceso del controlador secundario debe elegir una señal de seguimiento del controlador primario. Se requiere una transferencia digital desde el controlador secundario al primario enseñándole cuándo ocurre el seguimiento.
- El lazo de control secundario puede conmutarse al punto de consigna interno. En este caso el punto de consigna local se tendría que reenviar al controlador primario en forma de señal de seguimiento.

- El controlador secundario se conmuta de modo automático a manual. Para este caso, la variable de proceso del controlador secundario se tendría que reenviar al controlador primario en forma de señal de seguimiento.

2.6 Métricas de rendimiento. Integral del error absoluto

El IAE (Integral Del Valor Absoluto Del Error) es una métrica que nos indica el rendimiento de control. Su aplicación es la de suprimir errores pequeños y su ecuación es la siguiente:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.15)$$

Es la integral, en todo el tiempo de simulación, del valor absoluto del error, que en el sistema corresponde con la referencia menos el valor de la salida.

2.7 Matlab

MATLAB® (Matrix Laboratory) es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones que es utilizado por millones de ingenieros en todo el planeta para realizar un análisis y diseño de los sistemas y productos que tienen importante presencia en la actualidad. Se utiliza un lenguaje constituido por matrices, de esta forma, las matemáticas computacionales se pueden expresar de manera natural. Además, posibilita la integración de gráficas que hacen más fácil la visualización de los datos y la elaboración de información a partir de ellos [9].

Las principales características de MATLAB son:

- Posee un lenguaje de alto nivel para la realización de cálculos científicos y de ingeniería.
- Presenta un entorno de escritorio óptimo para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas.
- Se pueden añadir gráficas que permiten la visualización de los datos y que poseen herramientas para la creación de diagramas especializados.
- Dispone de aplicaciones que permiten la clasificación de datos, el ajuste de curvas, el análisis de señales y numerosas tareas.
- Toolboxes complementarias para conseguir una gran variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Herramientas que permiten construir aplicaciones con interfaces de usuario personalizables.
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®
- Tiene diferentes opciones de implementación libres de derechos permitiendo distribuir los programas obtenidos con los usuarios finales [9].

2.7.1 Simulink

Simulink es un entorno de diagramas de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. Admite diseño a nivel de sistema, simulación, generación automática de código y prueba y verificación continua de sistemas integrados. Simulink provee un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solucionadores para modelar y simular sistemas dinámicos [10].

Está integrado con MATLAB®, lo que facilita la incorporación de algoritmos de MATLAB en modelos y exportar los resultados de simulación a MATLAB para analizarlos posteriormente.

Las características principales de Simulink son:

- Está provisto de un editor gráfico que permite la construcción y la administración de diagramas de bloques escalonados.
- Tiene una biblioteca de bloques prefijados para el modelado de sistemas en tiempo continuo y discreto.
- Los resultados de las simulaciones se pueden visualizar en pantallas.
- Incluye herramientas para la gestión de los datos y proyectos que pueden tramitar archivos y datos de modelos.
- Contiene distintas herramientas que permiten analizar los modelos, de modo que se pueda depurar la arquitectura de estos e incrementar la velocidad de simulación.
- Se puede incluir un bloque de funciones MATLAB que importe a los modelos diferentes algoritmos.
- Posee una herramienta de código heredado que permite introducir código C y C++ en el modelo.

2.8 Revisión bibliográfica

En este apartado se va a realizar una revisión bibliográfica de distintos trabajos encontrados en la literatura que tratan sobre el esquema de control en cascada y proponen diferentes soluciones.

El artículo “*Quantitative Analysis of Cascade Control*” de R.G. Franks y C.W. Worley, del año 1956 [11], tiene como objetivo realizar un estudio para determinar cuantitativamente la mejora en la capacidad de control del sistema en cascada frente a un controlador único. Para hacer el estudio lo más general posible, se selecciona un proceso con cinco sistemas de primer orden en serie. La sintonía de los controladores se realiza mediante el “ultimate sensitivity method” optimizándose las configuraciones de los controladores para un sistema con tres perturbaciones.

Para realizar una medida cuantitativa del control óptimo, se utiliza la métrica de rendimiento ITAE (integral del error absoluto por el tiempo). Los resultados del estudio muestran que el control de muchos procesos se puede mejorar mediante el uso de un sistema de control en cascada. El índice ITAE prueba cómo la mejora que aporta el control en cascada varía con las características del proceso. Sin embargo, la economía del proceso puede ser tal, que un error mínimo no pueda justificar el gasto adicional, por lo que no se debe considerar los datos obtenidos, el único criterio para la selección de un sistema de control en cascada.

En el artículo “*PID Controller Tuning To Obtain Desired Closed Loop Responses for Cascade Control Systems*” de Y. Lee and S. Park, del año 1998 [12], se propone un nuevo método de sintonía de controladores PID para sistemas con modelos de control en cascada. El método consiste en encontrar, en primer lugar, el controlador ideal que proporcione la respuesta deseada de bucle cerrado y, en segundo lugar, la aproximación del controlador PID idónea mediante los tres primeros términos de la expansión de la serie McLaurin. El controlador secundario debe de diseñarse para rechazar las perturbaciones en el lazo interno de manera rápida y estable. Se realiza un extenso estudio de simulación en el que se ilustra que el método propuesto ofrece un mejor rendimiento en comparación con los métodos existentes. Este método tiene varias ventajas: es simple y fácil de usar, debido a que los parámetros de ajuste están de forma analítica, la sincronización de los controladores de bucle interno y externo se pueden realizar simultáneamente, y no se requiere de ningún paso de identificación adicional, incluso cuando el controlador secundario se vuelve a ajustar, porque el método de sintonización propuesto se basa en los parámetros del modelo del proceso.

El artículo “*Improved constrained cascade control for parallel processes*” de R. Lestage, A. Pormerleau y A. Desbiens, del año 1999 [13], aborda el problema del manejo de restricciones para un sistema con una entrada y múltiples salidas, donde una salida debe alcanzar un punto de ajuste determinado y las otras salidas deben estar entre los límites superior e inferior. En este documento se describen tres soluciones algebraicas basadas en el control en cascada. La primera solución utiliza controladores en cascada tradicionales, aplicados a las funciones de transferencia en serie. La segunda utiliza controladores en cascada aplicados a los procesos de la función de transferencia en paralelo, donde se muestra la sensibilidad a las perturbaciones y la sintonización de los bucles internos. Como tercera solución, se propone un método innovador, denominado controlador de pseudo cascada, destinado a las funciones de transferencia en paralelo. Este método permite la sintonización independiente de los controladores y no requiere ninguna función especial de recuperación antireinicio.

Además, permite el anidamiento de un gran número de bucles de control, con un ajuste simple e independiente para cada bucle. También se puede aplicar pseudo cascada a procesos multivariables con desacoplamiento.

El artículo “*PID tuning for cascade control system design*” escrito por R. Vilanova y O. Arrieto, que data de 2008 [14], aborda el problema de la sintonización del controlador PID dentro de una configuración del sistema de control en cascada. El hecho de que la sintonización de los controladores de bucle interno y externo se selecciona en consecuencia, motiva el uso de un ajuste que, para el controlador secundario, proporcione un rendimiento equilibrado de consigna/perturbación de carga y un ajuste robusto para el controlador primario. Es un problema de diseño que no se había abordado hasta el momento, aunque requiere de un análisis más profundo.

El artículo “*Two-Degree-of-Freedom PI/PID Tuning Approach for smooth Control on Cascade Control Systems*” escrito por V.M. Alfaro, R. Vilanova y O. Arrieta, que data del año 2008 [15], presenta un enfoque de diseño para controladores PID de dos grados de libertad dentro de una configuración de control en cascada que garantiza un control uniforme. El enfoque de diseño adoptado se basa en la especificación de una respuesta no oscilatoria para el bucle interno, para obtener un comportamiento lo más suave posible en el bucle interno. La misma filosofía se aplica en el lazo externo. Basado en estas observaciones, se propone un esquema de control en cascada donde el lazo externo se controla por un controlador PID de dos grados de libertad y el lazo interno por un controlador PI de dos grados de libertad. El uso de estos controladores introduce parámetros adicionales que deben ajustarse adecuadamente, por lo que el enfoque emprendido en el documento proporciona un conjunto completo de parámetros de ajuste para el controlador interno y el externo. La forma en la que se formula la sintonización automática permitirá automatizar el cálculo y el reajuste del controlador del bucle externo si la configuración del controlador del bucle interno cambia. Esta es una característica que no se ha encontrado antes en la literatura existente sobre el control de cascada.

En los artículos encontrados en la literatura se exponen unas soluciones para el control en cascada, pero ninguna de estas soluciones trata el tema del efecto de la saturación del término integral en ambos lazos tal y como se comentaba en el apartado 2.5.2. En estos estudios se plantean otras estrategias y otras configuraciones, pero ninguno plantea esa filosofía, que es la que motiva el presente trabajo.

En el artículo “*Analysis of Anti-windup Techniques in PID Control of Processes with Measurement Noise*” escrito por L. Silva, J.E. Normey-Rico y R.C. Flesh, que data de 2018 [16], se presenta un análisis del efecto de la medición del ruido en el rendimiento de lazo cerrado para tres estrategias antiwindup, utilizadas junto con un controlador PID. Lo interesante de este artículo para el estudio que se va a realizar en este trabajo, es la investigación de nuevas técnicas de antiwindup. En concreto, el error recalculation, que es una estrategia antiwindup propuesta en Bruciàglia y Apolonio (1986). Esta técnica se basa en utilizar la ecuación en diferencias del controlador en discreto y deducir cuales serían los errores que se van a tener en el siguiente instante para evitar la saturación. Si el sistema satura, es porque se le ha permitido tener errores mayores que los límites estipulados, por lo que se tendrían que definir de nuevo los errores máximos permitidos. Usándose esta estrategia, el controlador no satura, porque la señal de control se modifica para que siempre sea igual a la entrada de la planta y la señal de error se modifica para que todas las señales de error anteriores también sean firmes con el hecho de que la salida del controlador en un instante de tiempo se encuentra exactamente en el límite de saturación.

3

Resultados

Introducción

En este capítulo se va a realizar un estudio del esquema de control en cascada, haciendo hincapié en el efecto de la saturación en el lazo interno y como la saturación afecta al lazo externo. Para ello, en primer lugar, se partirá de un esquema de control en cascada en serie con dos funciones de transferencia de primer orden y, posteriormente, se modificará la dinámica del lazo interno por un integrador. Se propondrán distintas mejoras para atenuar el efecto de la saturación. Estos dos ensayos se realizan para rechazo de perturbaciones, que es uno de los principales usos del esquema de control en cascada.

Después, se analizará como se comporta el esquema cuando se modifica la referencia, sin perturbación existente en el lazo interno. Por último, se estudiarán otras técnicas para evitar la saturación del término integral y se compararán entre sí.

3.1 Rechazo perturbaciones. Primer orden

3.1.1 Elección de modelos y sintonía de controladores

El principal objetivo del sistema de control en cascada es compensar el efecto de las perturbaciones. Por eso, en primer lugar, se va a diseñar un sistema de control en cascada, al cual le llegue una perturbación en el lazo interno. Se van a diseñar dos dinámicas de primer orden con retardo para ambos lazos. La función de transferencia del lazo secundario es la siguiente:

$$G_s(s) = \frac{k_s}{\tau_s s + 1} \cdot e^{-t_{r_s}s} = \frac{2}{20s + 1} \cdot e^{-2s} \quad (3.1)$$

donde k_s es la ganancia estática del lazo secundario, τ_s es la constante de tiempo del lazo secundario y t_{r_s} el tiempo de retardo del lazo secundario.

La función de transferencia elegida para el lazo primario es la siguiente:

$$G_p(s) = \frac{k_p}{\tau_p s + 1} \cdot e^{-t_{r_p} s} \frac{1}{100s + 1} \cdot e^{-10s} \quad (3.2)$$

donde k_p es la ganancia estática del primario, τ_p es la constante de tiempo del lazo primario y t_{r_p} el tiempo de retardo del lazo primario.

Una vez escogidos los sistemas, se va a proceder al diseño de los controladores. Se va a realizar primero la sintonía del lazo secundario en base a la dinámica $G_s(s)$, donde se intenta conseguir un rechazo eficaz de las perturbaciones. Para diseñar la constante de tiempo de bucle cerrado se tiene en cuenta que el lazo interno tiene que trabajar al menos cinco veces más rápido que el externo, por lo que se definirá de la siguiente manera:

$$\tau_{bc,s} = \frac{\tau_p}{10} = \frac{100}{10} = 10s \quad (3.3)$$

Como método de sintonía de controladores se ha utilizado el SIMC [6], que es un método analítico que se utiliza para procesos con retardo. La regla de sintonía que propone este método para los sistemas de primer orden se muestra en la siguiente tabla (Tabla 3.1):

Proceso	$G(s)$	K_p	T_i	T_d
Primer orden Con retardo	$k \cdot \frac{e^{-t_r s}}{(\tau_1 s + 1)}$	$\frac{1}{k} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_c + t_r}$	$\min \{ \tau_1, 4(\tau_c + t_r) \}$	-

Tabla 3.1: Cálculo de parámetros del controlador PID con el método SIMC

Por lo tanto, los parámetros del controlador para el lazo secundario serán:

$$K_p = \frac{\tau_s}{k \cdot (\tau_{bc,s} + t_{rs})} = \frac{20}{2 \cdot (10 + 2)} = 0.8333 \quad (3.4)$$

$$T_i = \min \{ \tau_1, 4(\tau_{bc,s} + t_{rs}) \} = \min \{ 20, 48 \} = 20s \quad (3.5)$$

Teniendo en cuenta que el controlador calculado es un controlador PI, la ecuación de este será la siguiente:

$$C_s(s) = PI(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i_s}} \right) = 0.8333 \cdot \left(1 + \frac{1}{20s} \right) \quad (3.6)$$

La función de transferencia en bucle cerrado tiene la siguiente forma:

$$G_{bc,s}(s) = \frac{Y_s(s)}{R_s(s)} = \frac{k_{bc,s}}{\tau_{bc,s} + 1} \cdot e^{-t_{r_s} s} = \frac{1}{10s + 1} e^{-2s} \quad (3.7)$$

Para diseñar el controlador del lazo primario es necesario poner el lazo secundario en modo automático y obtener la dinámica resultante como la unión de ambos lazos. Esta dinámica se obtiene mediante reglas heurísticas de la siguiente manera:

$$G_{p,s}(s) = \frac{k_{p,s}}{\tau_{p,s}s+1} \cdot e^{-t_{p,s}s} = \frac{1}{100s+1} \cdot e^{-12s} \quad (3.8)$$

$$k_{p,s} = k_{bc,s} \cdot k_p$$

$\tau_{p,s} \approx \tau_p$; se considera τ_p porque es mucho mayor que $\tau_{bc,s}$

$$t_{rp,s} \approx t_{rp} + t_{rs}$$

La constante de tiempo en lazo cerrado en este caso se calcula con la siguiente especificación:

$$\tau_{bc,p,s} = 0.9 \cdot \tau_{p,s} = 90s \quad (3.9)$$

Los parámetros del controlador se obtienen de la misma forma:

$$K_p = \frac{\tau_{p,s}}{k \cdot (\tau_{bc,p,s} + (t_{rp} + t_{rs}))} = \frac{100}{1 \cdot (90 + (10 + 2))} = 0.9804 \quad (3.10)$$

$$T_i = \min \{ \tau_{p,s}, 4 (\tau_{bc,p,s} + (t_{rp} + t_{rs})) \} = \min \{ 100, 408 \} = 100s \quad (3.11)$$

La ecuación del controlador PI será la siguiente:

$$C_p(s) = PI(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i_s}} \right) = 0.9804 \cdot \left(1 + \frac{1}{100s} \right) \quad (3.12)$$

3.1.2 Comparación sistema con y sin cascada

Se van a ilustrar los beneficios de control en cascada mediante un ejemplo en el cual se compare el comportamiento de un esquema en cascada frente a un esquema con un único lazo de control. En primer lugar, se implementa el esquema de cascada en serie para los procesos anteriormente calculados en Simulink. El diagrama de bloques que se ha implementado se puede ver en la Figura 3.1.

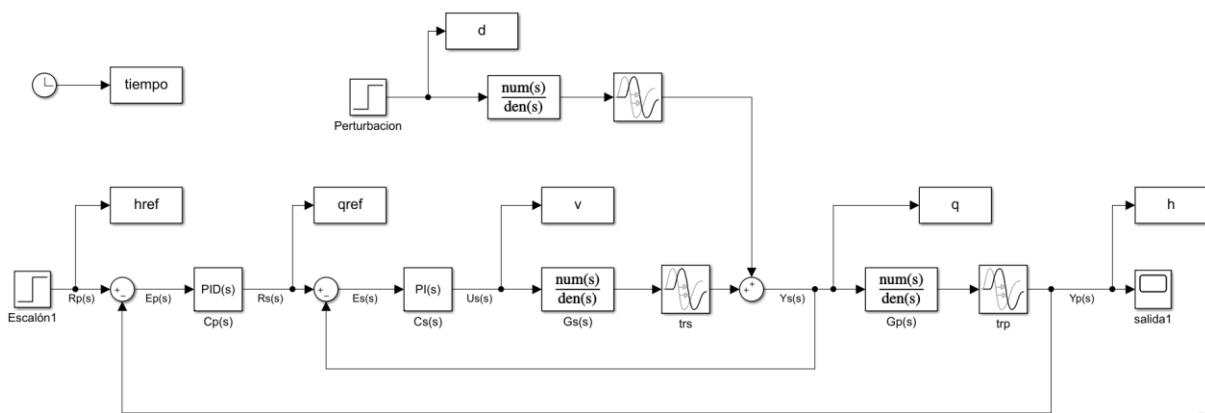


Figura 3.1: Esquema de control en cascada para dos sistemas de primer orden

Como se puede observar, el sistema está constituido por dos lazos, cada uno con sus respectivas funciones de transferencia y sus respectivos controladores, la perturbación se pone a la salida del proceso con la misma dinámica del propio proceso, esto es equivalente a poner una perturbación a la entrada.

En segundo lugar, se desarrolla el modelo y la sintonía del controlador para el sistema con un único lazo de control. Para diseñar el controlador se ha utilizado la función de transferencia correspondiente con la del lazo principal para el ejemplo anterior:

$$G(s) = \frac{1}{100s+1} \cdot e^{-10s} \quad (3.13)$$

La sintonía del controlador se realiza también con el método SIMC.

$$\tau_{bc} = 0.9 \cdot \tau = 90s \quad (3.14)$$

$$K_p = \frac{\tau}{k \cdot (\tau_{bc} + t_r)} = \frac{100}{1 \cdot (90 + 10)} = 1 \quad (3.15)$$

$$T_i = \min \{ \tau_1, 4(\tau_{bc,s} + t_r) \} = \min \{ 100, 400 \} = 100s \quad (3.16)$$

Este esquema se puede ver en la Figura 3.2, que se muestra a continuación:

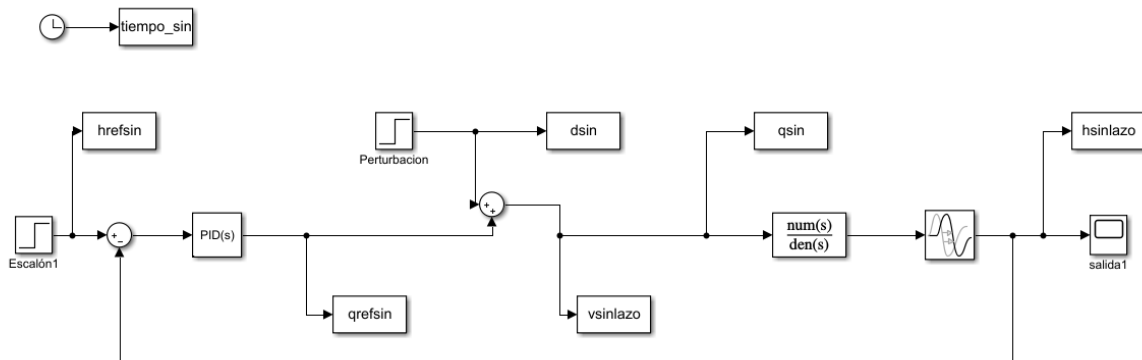


Figura 3.2: Diagrama de bloques sistema sin cascada

Se realiza una comparativa gráfica de los dos sistemas. En la Figura 3.3 se muestran distintas gráficas. La primera gráfica corresponde a la salida del lazo primario con su referencia, la segunda gráfica muestra la señal de control del lazo primario y la referencia de dicha señal, la tercera gráfica corresponde a la señal de control del lazo secundario y la última gráfica nos enseña el escalón que se ha dado como perturbación en el lazo secundario.

Como se puede observar, la respuesta del sistema con control en cascada rechaza las perturbaciones más rápido, esto se debe a que una gran parte de la perturbación se elimina en el lazo interno.

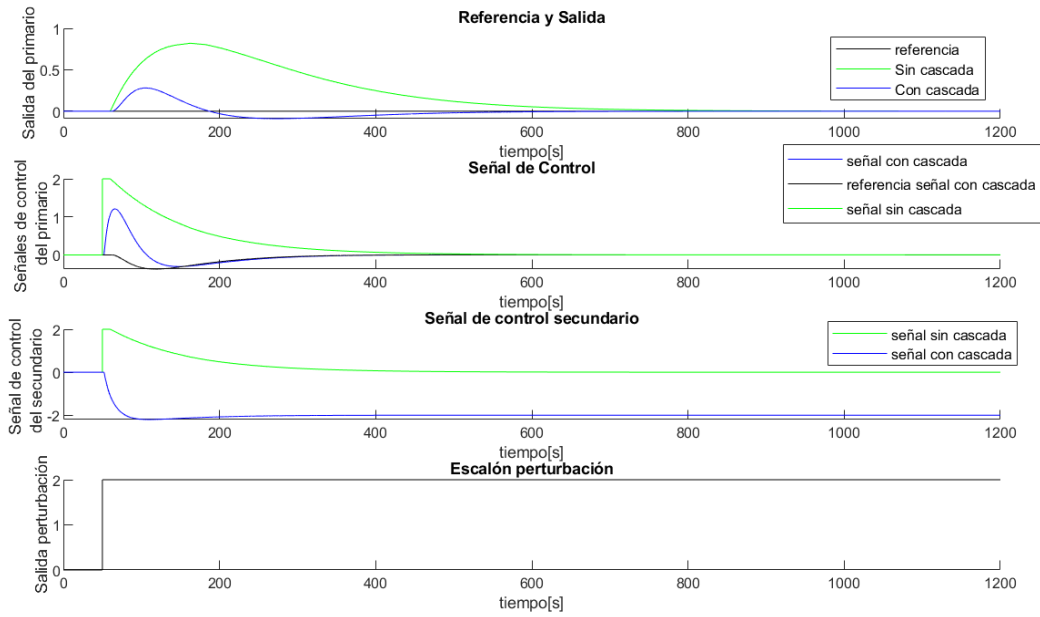


Figura 3.3: Respuestas para un sistema con y sin cascada

Con este ejemplo se consigue verificar el efecto del esquema de cascada frente a las perturbaciones y la mejoría que supone.

En este caso, la acción integral en el lazo secundario provoca una sobreelongación en la respuesta a perturbaciones. Esta sobreelongación se hace más acusada para el caso del controlador sin cascada.

3.1.3 Saturación lazo interno

En este apartado se va a partir del esquema en cascada desarrollado en los apartados anteriores y se va a analizar el comportamiento de este cuando se provoca la saturación en el lazo interno. En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de bloques del esquema a estudiar, sometido a saturación en el lazo interno.

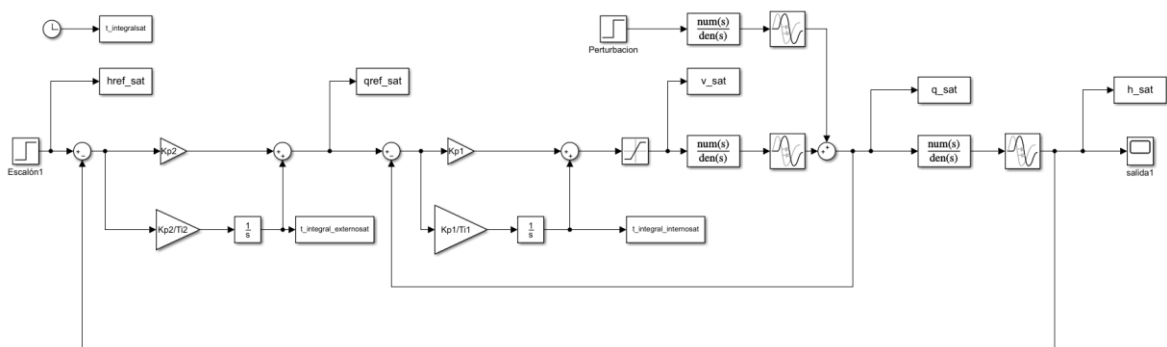


Figura 3.4: Esquema de control en cascada con saturación en el lazo interno

Tras observar la respuesta de la señal de control del lazo interno de la Figura 3.3 se provoca la saturación limitando la señal inferiormente con un valor de -2.1.

Para ver los efectos que provoca la saturación del lazo secundario se representa gráficamente una comparativa entre las respuestas del esquema con y sin saturación (Figura 3.5).

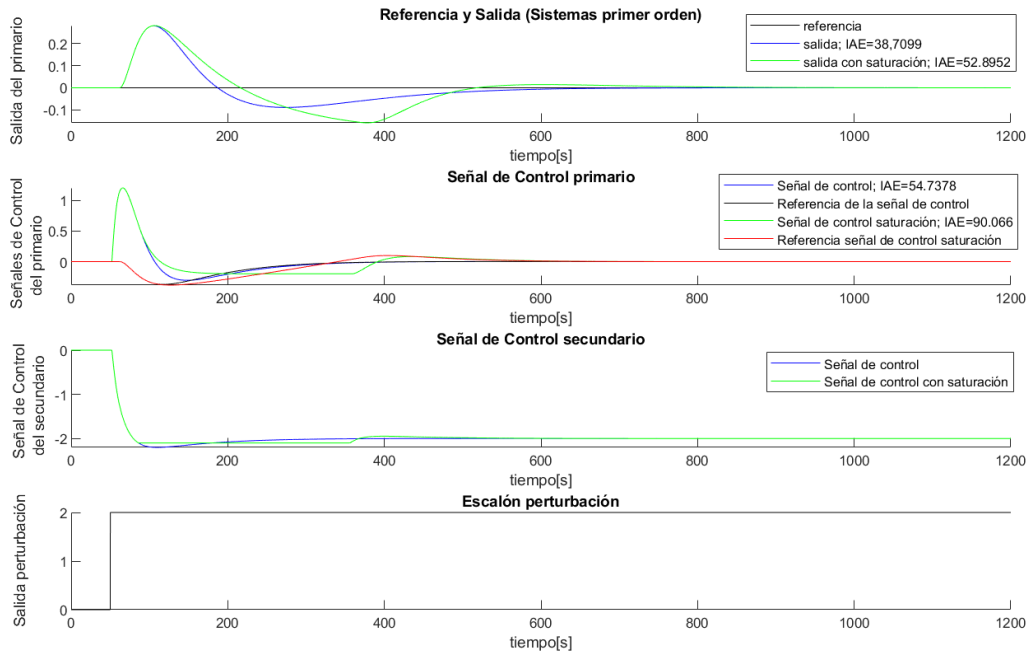


Figura 3.5: Comparativa respuesta sistema con y sin saturación en el lazo interno

Analizando las respuestas, se puede observar que, en la gráfica de la salida, la saturación afecta a esta considerablemente, haciendo que el lazo principal tarde más en cancelar la perturbación y provocando una salida más agresiva. En la segunda gráfica, correspondiente a la señal de control del lazo primario, se puede observar como el efecto de la saturación en el lazo interno se propaga también a esta señal, volviéndola más agresiva. Esto sucede cuando la saturación del lazo interno es potente y también puede deberse a que el controlador del lazo externo no es consciente de que está saturando, ya que se puede dar el caso en el que la señal de control del lazo interno esté saturada y la del lazo externo no, como es el caso. Por último, la tercera gráfica, muestra la señal de controlador del lazo secundario, donde se puede observar como se ha limitado dicha señal al valor de -2.1.

Para ver cómo afecta la saturación en el rendimiento de control, se ha recurrido al IAE (Integral del Error Absoluto), como se puede observar en la Figura 3.5, donde se muestran los índices en las dos primeras gráficas. En la Tabla 3.2 se va a realizar una comparativa de los IAE obtenidos para cada ensayo.

IAE	Sin saturación	Con saturación
Salida	38.7099	54.7378
Señal de control	54.7378	90.066

Tabla 3.2: Comparativa IAE entre el sistema con y sin saturación para el primario

El IAE da mayores resultados para el ensayo con saturación en el lazo interno, lo cual indica que este sistema presenta un peor rendimiento de control, como era de esperar. Este resultado coincide con los resultados observados gráficamente en la Figura 3.5 y, por lo tanto, se confirma que la saturación producida en el lazo interno afecta al comportamiento del lazo externo.

En la Figura 3.6 se va a representar la parte integral, tanto del lazo externo como del interno, para visualizar como afecta la saturación del lazo interno a la integral del proceso.

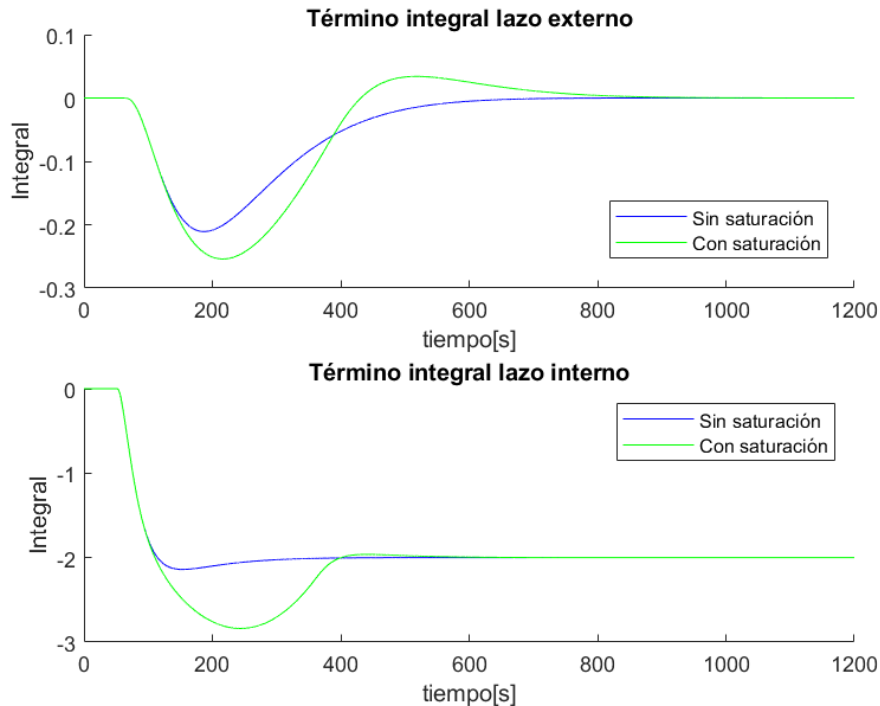


Figura 3.6: Comparativa término integral sistema con y sin saturación

En la gráfica se puede observar que, cuando se produce la perturbación, el término integral disminuye. Para el lazo interno, se puede ver cómo, en el caso sin saturación, disminuye hasta el límite inferior mientras que en el caso con saturación se produce una subbelongación durante un tiempo, hasta que el sistema sale de la saturación. En la gráfica del lazo externo se observa una gráfica con forma de campana, donde se comprueba que la saturación del lazo interno afecta a la integral del externo, empeorando la señal y haciendo la campana más grande.

3.1.4 Antiwindup en el lazo interno

En este apartado se va a implementar, en el lazo interno, un esquema que evite el fenómeno de la saturación del término integral o windup. El esquema que se va a implementar es el back-calculation. Para ello es necesario calcular la constante de tiempo de tracking o de seguimiento para el controlador del lazo secundario.

$$T_{t_s} = \sqrt{T_{i_s}} = \sqrt{20} = 4.4721s \quad (3.17)$$

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de bloques con el esquema antiwindup implementado en el lazo interno.

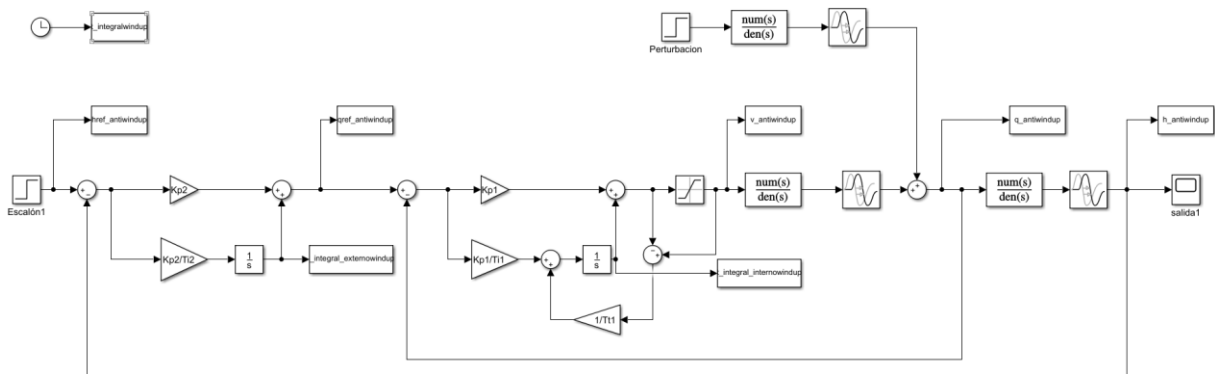


Figura 3.7: Esquema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno

Para ver los efectos que provoca el esquema antiwindup en el lazo secundario, se representa gráficamente una comparativa entre las respuestas del esquema en cascadas sin saturación, el esquema con saturación en el lazo interno y el esquema con antiwindup en el lazo interno (Figura 3.8).

En la gráfica correspondiente a la salida, se puede observar cómo el sistema que peor rechaza las perturbaciones es el que tiene saturación en el lazo interno y el esquema antiwindup mejora el comportamiento de este, rechazando antes las perturbaciones con mayor rapidez y haciendo la salida menos agresiva. Esta mejora también se observa en la señal de control del lazo externo. A pesar de la mejora que conlleva el esquema antiwindup en el lazo interno, la señal se sigue mostrando distorsionada.

Para confirmar los resultados gráficos se calcula el IAE, tanto de la salida como de la señal de control. En la Tabla 3.3 se puede ver la comparación de los índices de los tres ensayos realizados.

Por último, se va a analizar el término integral, tanto en el lazo interno como en el externo. En la Figura 3.9 se representa el término integral, donde se muestra como el esquema antiwindup es efectivo.

En el lazo externo se produce, al igual que en el caso de la saturación, una señal con forma de campana, pero, en este caso, rechaza antes la perturbación. En el caso del lazo interno, se observa como elimina el efecto de la saturación.

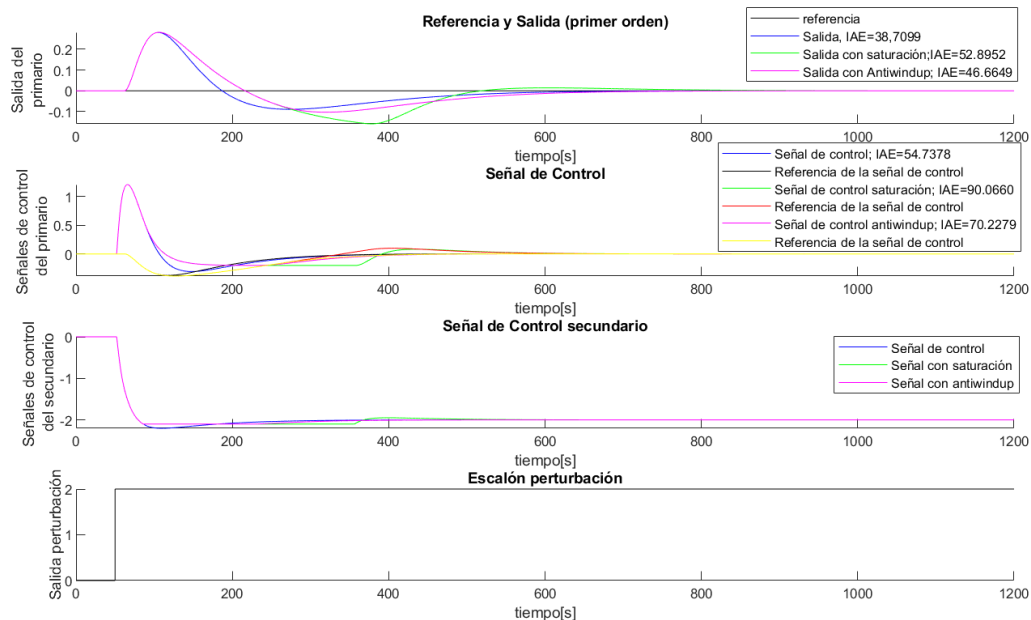


Figura 3.8: Comparativa de las respuestas del sistema sin saturación, con saturación y con esquema antiwindup en el lazo interno

IAE	Sin saturación	Con saturación	Con antiwindup
Salida	38.7099	54.7378	46.6649
Señal de control	54.7378	90.066	70.2799

Tabla 3.3: Comparativa IAE entre el sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup para el primario

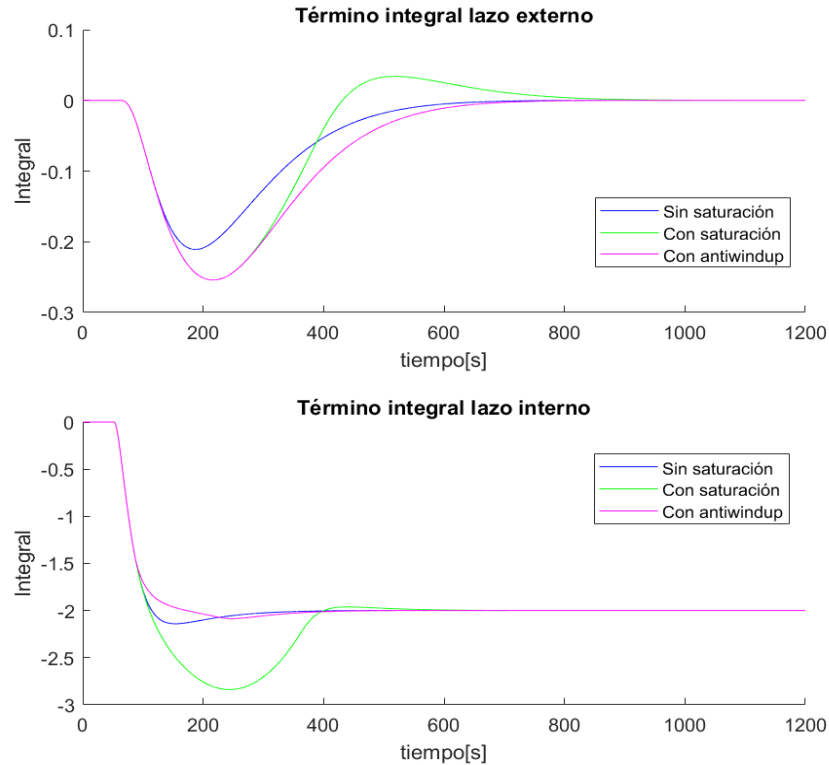


Figura 3.9: Comparativa término integral para los tres ensayos realizados

3.1.5 Propuesta de mejoras

Tal y como se plantea en el libro de Control PID Avanzado [3], si se utiliza la acción integral en ambos lazos de control es necesario plantear un esquema que evite la aparición de la saturación del término integral. En el lazo interno, se puede implementar, tal y como se ha realizado en el apartado anterior, pero la implementación del esquema antiwindup en el lazo externo no es una tarea trivial. Para poder solucionar el problema, se requiere introducir la señal de seguimiento en el controlador primario.

Partiendo del último ensayo realizado, con antiwindup en el lazo interno, se van a proponer mejoras basadas en el esquema antiwindup, pero incluyendo el efecto del lazo externo. Esta idea surge de la necesidad de desacoplar los lazos, ya que hasta ahora el lazo externo no es consciente de que el interno está saturado. La primera mejora que se va a proponer consiste en incluir el esquema antiwindup en el lazo externo y añadir otra sumatoria a la que vaya, además, el antiwindup del lazo interno. Con esta idea, se quiere conseguir que el integrador pierda fuerza, lo que hará indirectamente que baje su punto de consigna. Esta idea se ha implementado en Simulink mediante el diagrama de bloques de la Figura 3.10. Las respuestas de esta mejora, comparándola con el control en cascada con el esquema antiwindup en el lazo interno, se muestran en la Figura 3.11.

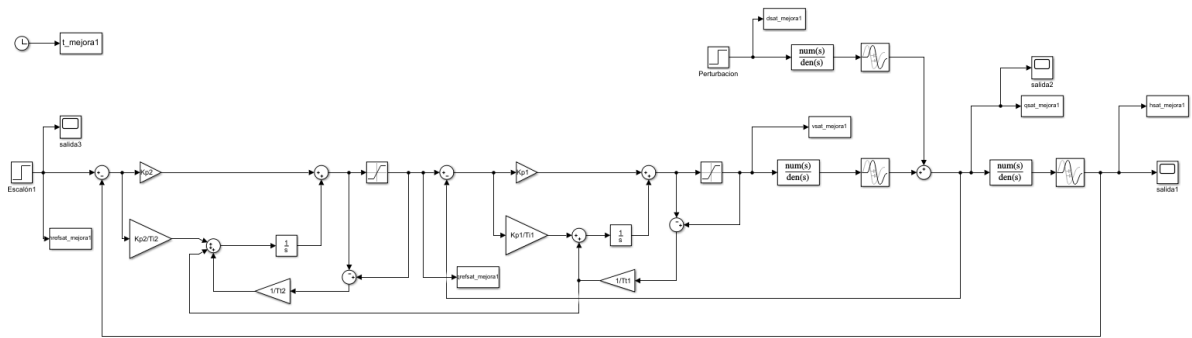


Figura 3.10: Esquema de control en cascada con la implementación de la primera mejora

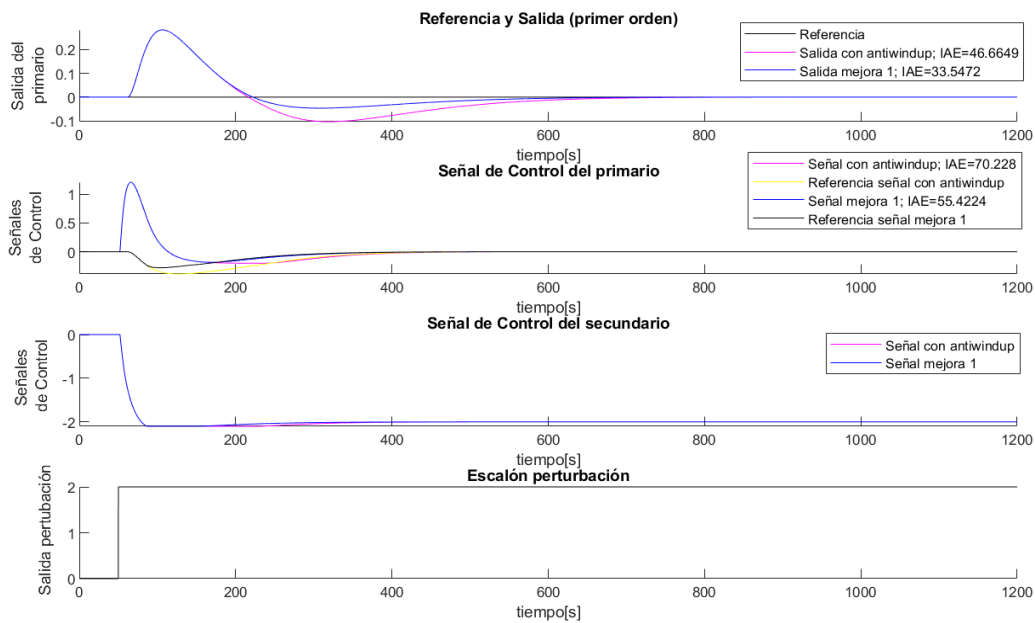


Figura 3.11: Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora

Con la implementación de esta mejora se ha conseguido un rechazo más rápido de la perturbación y la mejora es efectiva en la señal de control. Esto se ve reflejado en los índices IAE, tanto de la salida como de la señal de control del lazo primario. En la Tabla 3.4 se puede ver la comparación de los índices IAE.

IAE	Con antiwindup	Mejora 1
Salida	46.6649	33.5472
Señal de control	70.2799	55.4224

Tabla 3.4: Comparativa IAE entre el sistema con antiwindup y la primera mejora para el primario

Comparando los índices, se puede decir que estos disminuyen considerablemente para la mejora que se ha propuesto. La siguiente comparativa que es interesante realizar es la del comportamiento del término integral en ambos lazos. Este comportamiento se muestra en la Figura 3.12.

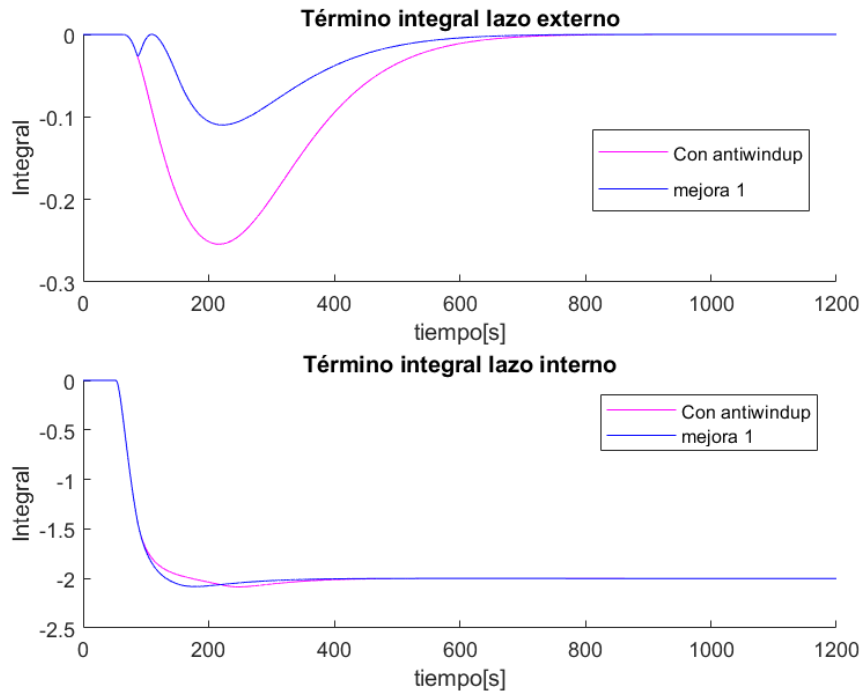


Figura 3.12: *Término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora*

El término integral del lazo interno varía muy poco, donde se ve realmente la acción de la mejora propuesta es en el término integral de lazo externo. Con la constante de tracking se pretende hacer la forma de campana más pequeña, lo cual se consigue con la mejora propuesta.

La siguiente mejora que se propone, consiste en ver qué sucede cuando se ponen los dos esquemas antiwindup en el lazo externo y se elimina el esquema del lazo interno. El diagrama de bloques para la implementación de esta mejora se muestra en la Figura 3.13. Además, se va a realizar una comparativa, al igual que para la mejora anterior, de las respuestas obtenidas para el sistema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno y la implementación de esta mejora. Esta comparativa se puede observar en la Figura 3.14, donde se observa que la mejora propuesta provoca, en la salida, un eficiente rechazo a perturbaciones, mejorando considerablemente la respuesta del sistema con antiwindup en el lazo interno. Esta mejora también se ve reflejada en la señal de control del lazo externo, donde la señal de control se ajusta mejor a la referencia de esta.

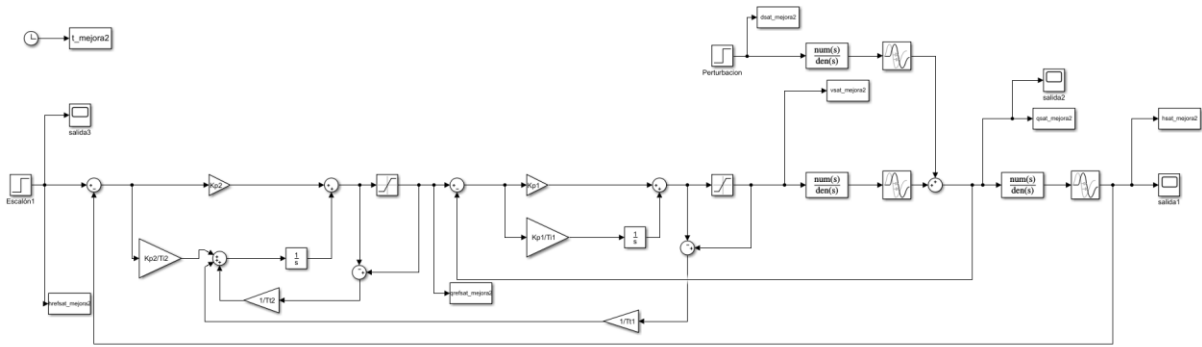


Figura 3.13: Esquema de control en cascada con la implementación de la segunda mejora

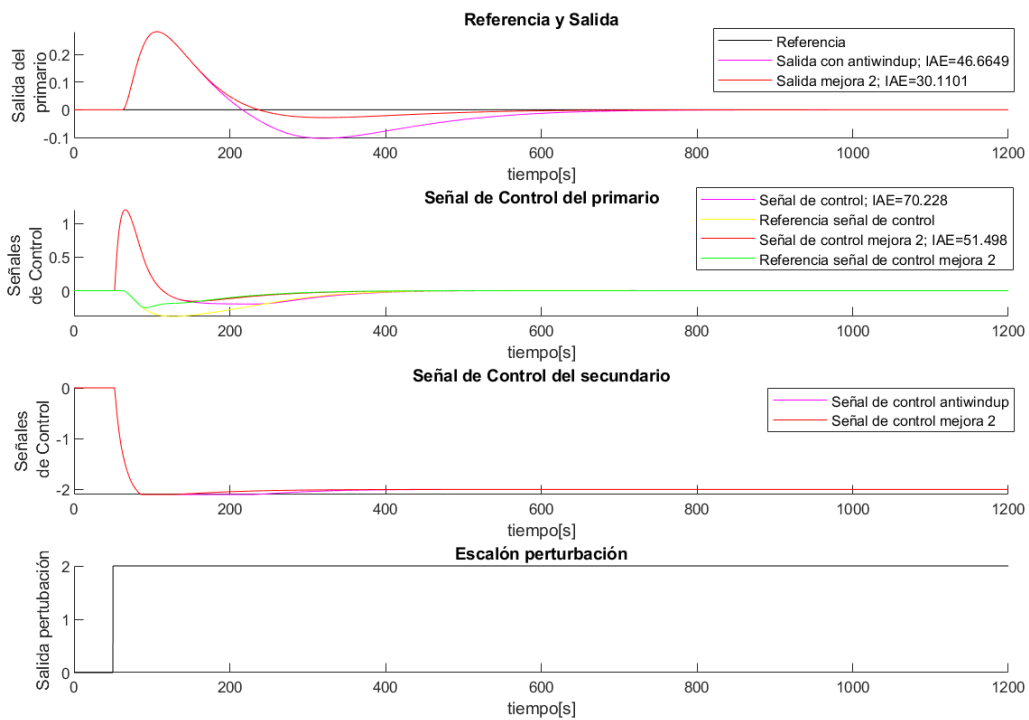


Figura 3.14: Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la segunda mejora

Para evaluar como este nuevo esquema mejora el rendimiento de control, se comparan los índices IAE. Esta comparativa se muestra en la Tabla 3.5. Efectivamente, el rendimiento de control mejor con el nuevo esquema propuesto, tanto en la salida del primario como en la señal de control, obteniendo índices menores.

IAE	Con antiwindup	Mejora 2
Salida	46.6649	30.1101
Señal de control	70.2799	51.498

Tabla 3.5: Comparativa IAE entre el sistema con antiwindup y la segunda mejora para el primario

Se va a realizar una comparativa del comportamiento del término integral entre la segunda propuesta que se ha implementado y el sistema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno. Esta comparativa se visualiza en la Figura 3.15.

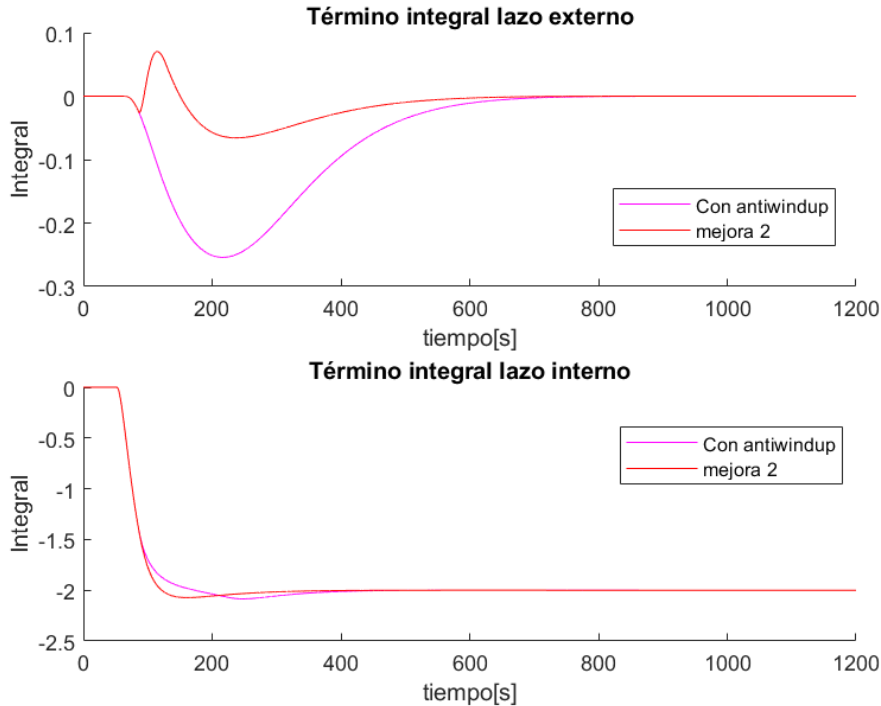


Figura 3.15: *Término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la segunda mejora*

La acción de la mejora propuesta en el término integral se observa principalmente para el lazo externo, donde la forma de campana se disminuye en comparación con el sistema con antiwindup en el lazo interno, pero, sin embargo, la integral cambia de signo, lo cual nos indica que es demasiado agresivo. Este comportamiento tiene que ver con la constante de tracking.

La última comparativa realizada, para el caso de un sistema de control en cascada con dos dinámicas de primer orden con retardo, ha sido comparar las dos mejoras propuestas con el sistema con solamente antiwindup en el lazo interno.

En la Figura 3.16 se expone las respuestas obtenidas para la comparativa de ambos sistemas. Repasando la gráfica de la salida, se contempla como ambas mejoras hacen que la perturbación se rechace de forma más eficaz, actuando un poco mejora la segunda propuesta. Esta mejora también se hace patente en la señal de control del lazo externo.

Para poder evaluar esta comparativa cuantitativamente se recurre al IAE. La comparativa de los índices para cada uno de los ensayos se contempla en la Tabla 3.6.

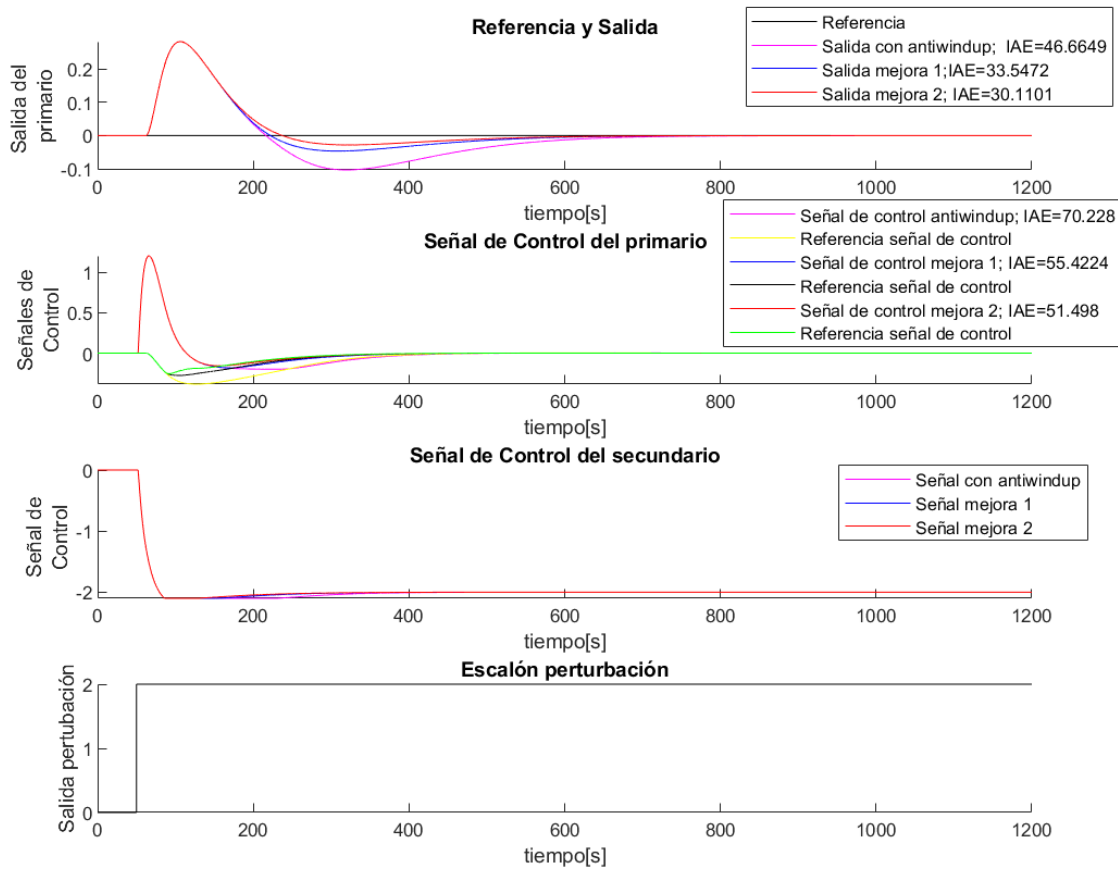


Figura 3.16: Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas

IAE	Con antiwindup	Mejora 1	Mejora 2
Salida	46.6649	33.5472	30.1101
Señal de control	70.2799	55.4224	51.498

Tabla 3.6: Comparativa IAE de los tres casos analizados para el primario

Esta comparativa ratifica el hecho de que la mejora que presenta mejor rendimiento de control es la segunda mejora propuesta, ya que presenta índices menores tanto en la salida como en la señal de control.

Curiosamente para este caso concreto, se observa que los resultados obtenidos con las propuestas de mejora son incluso mejores que para el caso sin saturación, pero esto es debido únicamente a que para este ejemplo en específico cuando el sistema está sin saturación sobreoscila mucho y hace que tenga más error.

Para finalizar, en la Figura 3.17, se representa el término integral de los tres casos analizados.

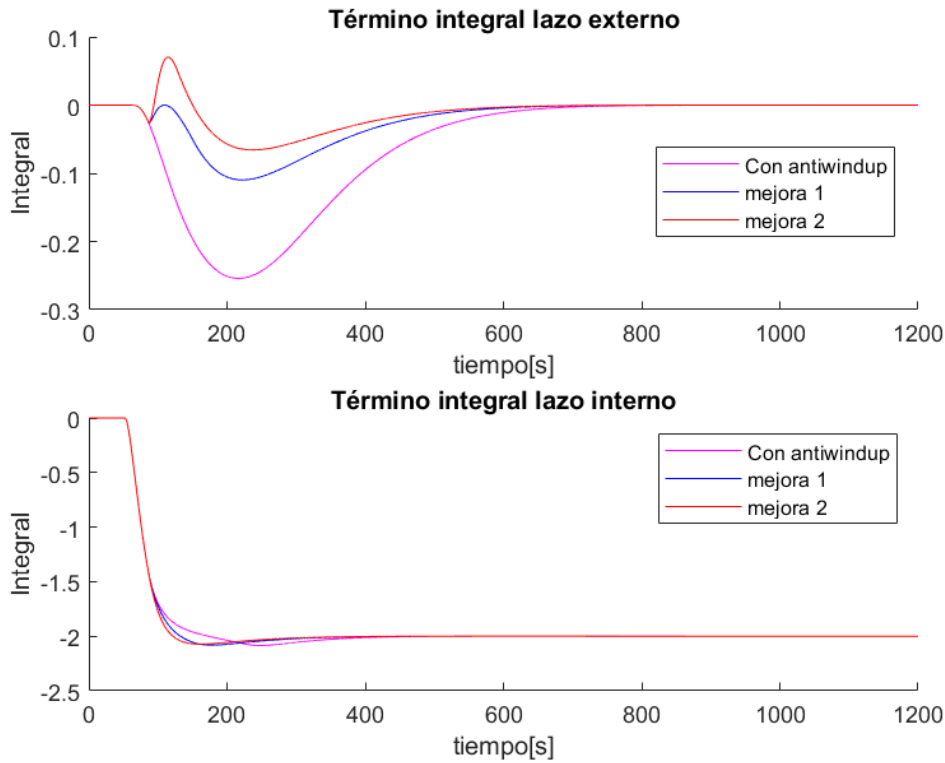


Figura 3.17: Comparativa término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de las mejoras

Como se ha dicho anteriormente, para el caso de la segunda mejora, la integral del lazo externo cambia de signo durante un tiempo, lo cual se debe a que el sistema ha sido muy exigente. Este comportamiento puede afectar a los resultados, provocando que esta mejora sea más efectiva, cuando, en teoría, la primera mejora debería de haber aportado mejores resultados, ya que se quita fuerza a la saturación por dentro y por fuera a la vez, lo que provoca que al lazo interno se le está eliminando integral y al externo se le está bajando la referencia.

3.2 Rechazo perturbaciones. Integrador.

3.2.1 Elección de modelos y sintonía de controladores

Para que se observe mejor el efecto de la saturación, se va a realizar un ensayo en el que la dinámica del lazo interno se sustituye por la de un integrador con retardo, por lo tanto, es necesario sintonizar los controladores nuevamente. La función de transferencia del lazo interno es:

$$G_s(s) = \frac{k_s}{s} \cdot e^{-t_{r_s}s} = \frac{2}{s} \cdot e^{-2s} \quad (3.17)$$

Una vez elegido el sistema, se procede al diseño de los controladores. Se realiza, en primer lugar, la sintonía del lazo secundario en base a la dinámica $G_s(s)$, donde se intenta conseguir un rechazo eficaz de las perturbaciones.

Para diseñar la constante de tiempo de bucle cerrado se tiene en cuenta que el lazo interno tiene que trabajar mucho más rápido que el externo, se definirá de la siguiente manera:

$$\tau_{bc,s} = \frac{\tau_p}{10} = \frac{100}{10} = 10s \quad (3.3)$$

Los parámetros del controlador para el lazo secundario se calculan con el método SIMC. Las reglas de sintonía que propone este método para un sistema integrador con retardo se muestran en la Tabla 3.7:

Proceso	$G(s)$	K_p	T_i	T_d
Integrador con retardo	$k \cdot \frac{e^{-t_r s}}{s}$	$\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\tau_{bc} + t_r}$	$4(\tau_{bc} + t_r)$	-

Tabla 3.7: Cálculo de parámetros del controlador PID con el método SIMC (integrador lazo interno)

$$K_p = \frac{1}{k \cdot (\tau_{bc,s} + t_{rs})} = \frac{1}{2 \cdot (10+2)} = 0.04167 \quad (3.18)$$

$$T_i = 4(\tau_{bc,s} + t_{rs}) = 48s \quad (3.19)$$

Si se tiene en cuenta que el controlador calculado es un controlador PI, la ecuación de este será la siguiente:

$$C_s(s) = PI(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{is}}\right) = 0.04167 \cdot \left(1 + \frac{1}{48s}\right) \quad (3.20)$$

La función de transferencia en bucle cerrado tiene la siguiente forma:

$$G_{bc,s}(s) = \frac{Y_s(s)}{R_s(s)} = \frac{k_{bc,s}}{\tau_{bc,s} + 1} \cdot e^{-t_{rs}s} = \frac{1}{10s+1} e^{-2s} \quad (3.7)$$

Se considera que la función de transferencia del lazo primario coincide con la definida en el apartado 3.11 y que la función en bucle cerrado del controlador secundario es igual a la obtenida en dicho apartado, se puede deducir que el controlador del lazo primario se calcula de la misma forma que para el apartado 3.11. Por lo tanto:

$$G_p(s) = \frac{k_p}{\tau_{p,s} + 1} \cdot e^{-t_{rp}s} = \frac{1}{100s+1} \cdot e^{-10s} \quad (3.2)$$

$$G_{p,s}(s) = \frac{k_{p,s}}{\tau_{p,s} + 1} \cdot e^{-t_{p,s}s} = \frac{1}{100s+1} \cdot e^{-12s} \quad (3.8)$$

$$k_{p,s} = k_{bc,s} \cdot k_p$$

$\tau_{p,s} \approx \tau_p$; se considera τ_p porque es mucho mayor que $\tau_{bc,s}$

$$t_{r_{p,s}} \approx t_{r_p} + t_{r_s}$$

La constante de tiempo en lazo cerrado en este caso se calcula con la siguiente especificación:

$$\tau_{bc_{p,s}} = 0.9 \cdot \tau_{p,s} = 90 \quad (3.9)$$

Los parámetros del controlador se obtienen de la misma forma:

$$K_p = \frac{\tau_{p,s}}{k \cdot (\tau_{bc_{p,s}} + (t_{r_p} + t_{r_s}))} = \frac{100}{1 \cdot (90 + (10 + 2))} = 0.9804 \quad (3.10)$$

$$T_i = \min \{ \tau_{p,s}, 4(\tau_{bc_{p,s}} + (t_{r_p} + t_{r_s})) \} = \min \{ 100, 408 \} = 100s \quad (3.11)$$

La ecuación del controlador PI será la siguiente:

$$C_p(s) = PI(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = 0.9804 \cdot \left(1 + \frac{1}{100s} \right) \quad (3.12)$$

3.2.2 Saturación lazo interno

Para analizar el efecto del integrador en el lazo interno, se sigue la misma dinámica que en el apartado 3.1. En primer lugar, se va a construir el diagrama de bloques para el control en cascada con un integrador en el lazo interno, que se muestra en la Figura 3.18.

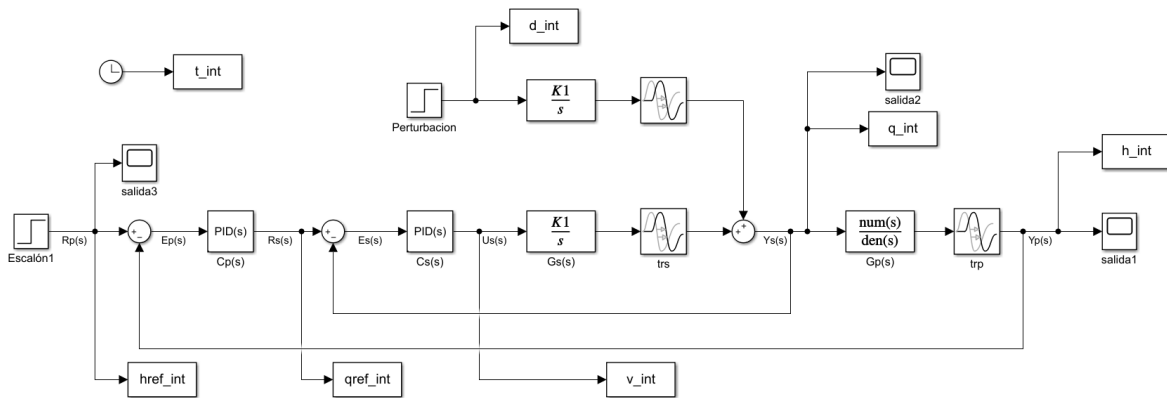


Figura 3.18: Esquema de control en cascada con integrador en lazo interno

Se va a provocar la saturación en el lazo interno, de la misma forma que en el apartado 3.2.1, limitando la señal de control del lazo interno en su límite inferior. La Figura 3.19 muestra el esquema de control en cascada incluyendo la saturación en el lazo interno.

Se realiza una comparativa gráfica de las respuestas del sistema para el esquema de control en cascada con y sin saturación. En la gráfica 3.20 se presenta la comparativa realizada:

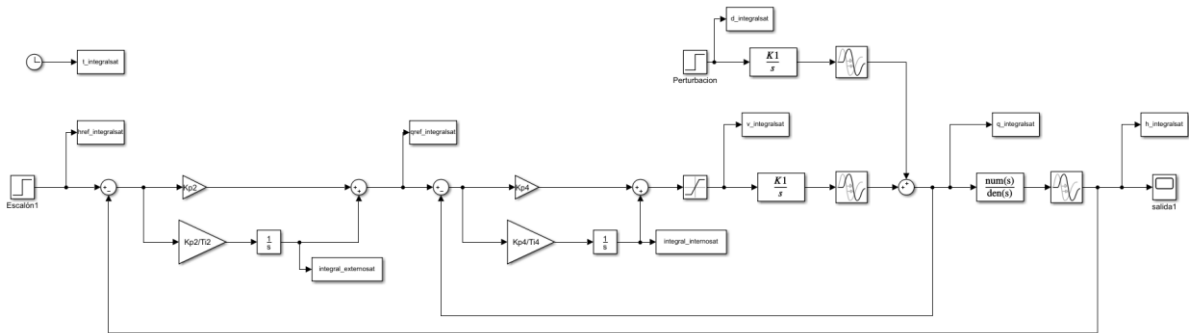


Tabla 3.19: Esquema de control en cascada con saturación en el lazo interno

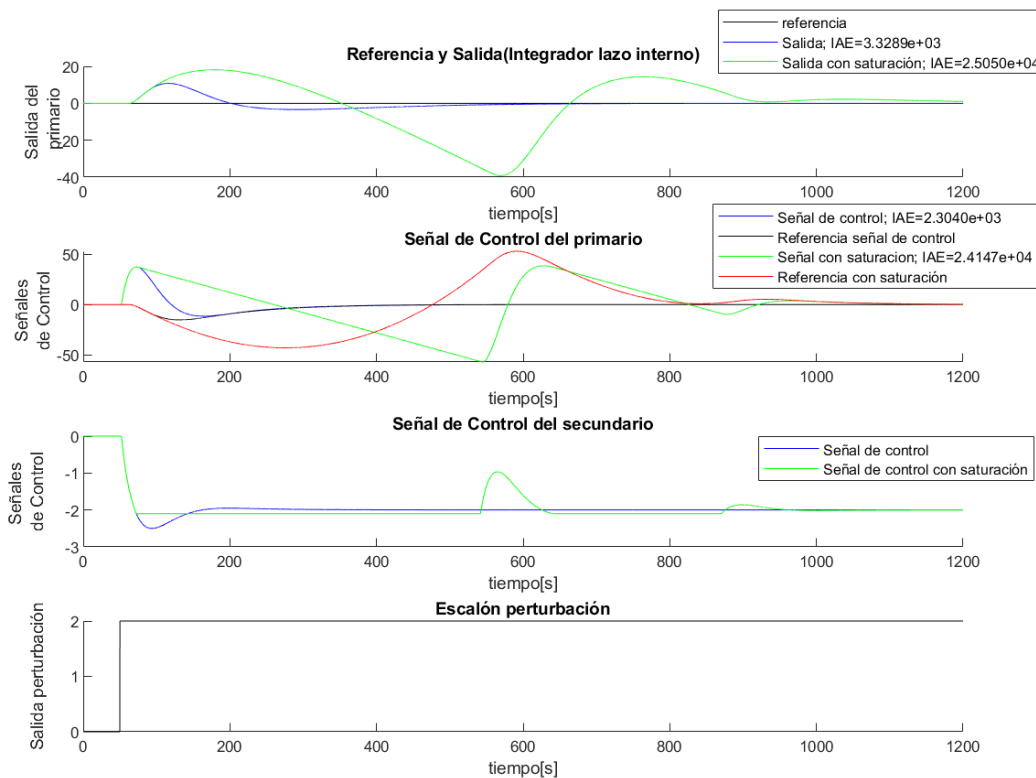


Figura 3.20: Comparativa respuesta con y sin saturación en el lazo interno

Analizándose las respuestas, se puede observar que, en la gráfica de la salida, la saturación afecta a esta considerablemente, en mayor medida que con un sistema de primer orden en el lazo interno. La saturación provoca que la salida tarde más tiempo en estabilizarse, provocando una respuesta oscilatoria. En la segunda gráfica, correspondiente a la señal de control del lazo primario, se puede observar como el efecto de la saturación en el lazo interno afecta también a esta señal, de una forma más agresiva que con el sistema de primer orden en el lazo interno. Por último, la tercera gráfica, muestra la señal de controlador del lazo secundario, donde se puede distinguir cómo se ha limitado dicha señal al valor de -2.1 y como en esta se produce una sobreelongación pasado un tiempo del ensayo.

Para ver cómo afecta la saturación en el rendimiento de control, se recurre al índice IAE, como se puede contemplar en la Figura 3.20, donde se muestran los índices en las dos primeras gráficas, calculados en función de la señal y su referencia para cada caso. En la Tabla 3.8 se elabora una comparativa de los IAE obtenidos para cada ensayo.

IAE	Sin saturación	Con saturación
Salida	$3.3289 \cdot 10^3$	$2.5050 \cdot 10^4$
Señal de control	$2.3040 \cdot 10^3$	$2.4147 \cdot 10^4$

Tabla 3.8: Comparativa IAE con y sin saturación en el lazo interno para el primario (integrador lazo interno)

Los índices obtenidos en la comparativa son sustancialmente mayores a los obtenidos para el ensayo anterior, lo cual se debe a la acción del integrador. Además, se contempla como la saturación provoca que el rendimiento de control sea mucho peor tanto en la salida como en la señal de control.

Para percibir cómo afecta la perturbación en el lazo interno, se va a realizar una comparativa del término integral para el sistema con y sin saturación, tanto en el lazo interno como en el externo. Esta comparativa se muestra en la Figura 3.21, donde se contempla como la saturación afecta considerablemente al lazo interno, provocando una subelongación mucho mayor que con el sistema de primer orden en el lazo interno, mientras que la señal sin saturación tiende más a una señal constante, presentando un pico muy reducido. Esta saturación afecta también al lazo externo produciendo una señal oscilatoria y teniendo un comportamiento agresivo en comparación con el sistema sin saturación, que también tiende a ser constante, con un pico muy pequeño.

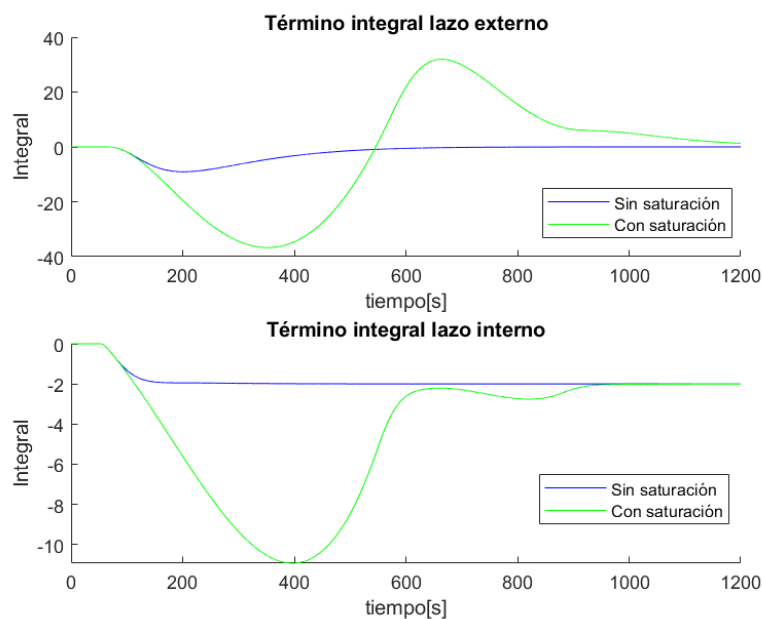


Figura 3.21: Comparativa término integral con y sin saturación

3.2.3 Antiwindup lazo interno

En este apartado se va a implementar en el lazo interno un esquema que evite el fenómeno de la saturación del término integral o windup.

El esquema que se va a implementar es el back-calculation. Para ello es necesario calcular la constante de tiempo de tracking o de seguimiento para el controlador del lazo secundario.

$$T_{ts} = \sqrt{T_{i_s}} = \sqrt{48} = 6.9282s \quad (3.21)$$

En la Figura 3.22 se muestra el diagrama de bloques con el esquema antiwindup implementado en el lazo interno.

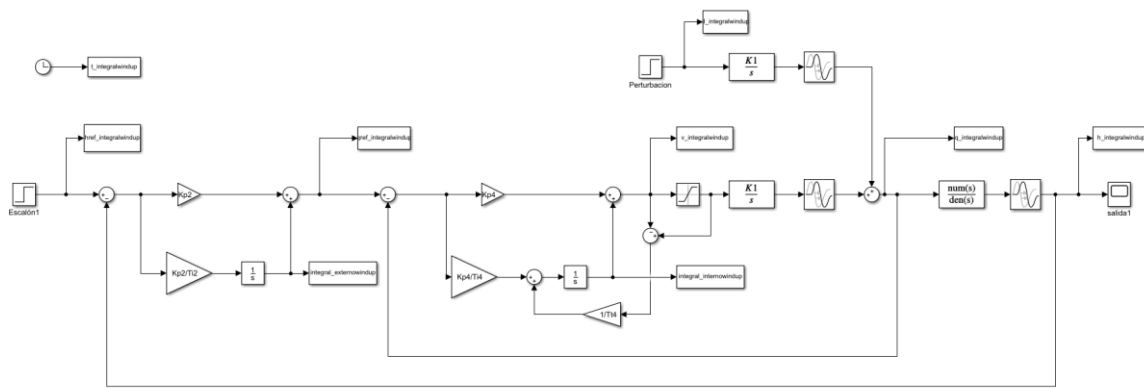


Figura 3.22: Diagrama control en cascada con esquema antiwindup en el lazo interno

Se hace una comparativa de las respuestas para el esquema de control en cascada general (sin saturación), el esquema con saturación en el lazo interno y este último ensayo con un esquema antiwindup en el lazo interno.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.23. En la primera gráfica, correspondiente a la salida, se puede observar cómo el esquema antiwindup atenúa la acción de la saturación, rechazando antes las perturbaciones y alcanzando más rápido la referencia. En la segunda gráfica, referente a la señal de control del primario, se puede observar que, efectivamente, el esquema antiwindup en el lazo interno también mejora la señal de control del externo.

Se va a evaluar el rendimiento de control mediante el índice IAE. La comparativa de estos índices se expone tanto en la Figura 3.23 como en la Tabla 3.9, donde se percibe con más detalle. Se confirma que, el esquema con peor rendimiento de control es el que incluye la saturación en el lazo interno. El esquema antiwindup mejora este comportamiento, pero teniendo un peor rendimiento que el esquema de control en cascada sin saturación.

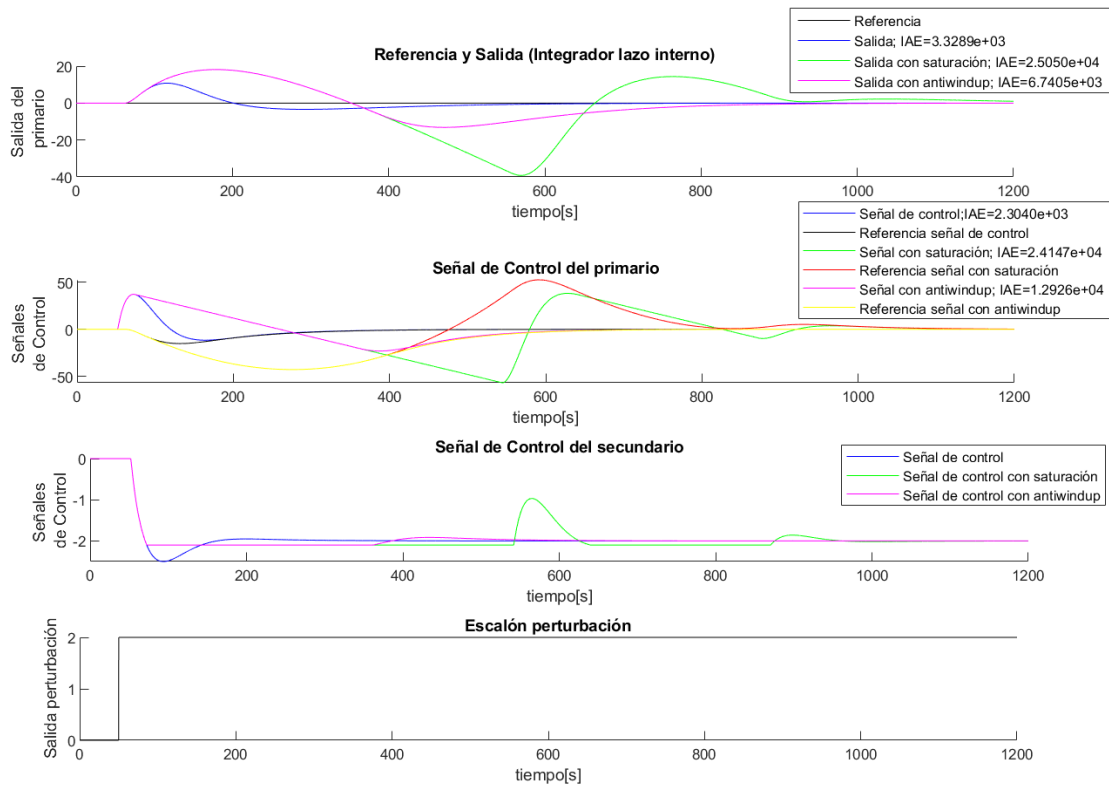


Figura 3.23: Comparativa de las respuestas del sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup en el lazo interno (integrador lazo interno)

IAE	Sin saturación	Con saturación	Con antiwindup
Salida	$3.3289 \cdot 10^3$	$2.5050 \cdot 10^4$	$6.7405 \cdot 10^3$
Señal de control	$2.3040 \cdot 10^3$	$2.4147 \cdot 10^4$	$1.2926 \cdot 10^4$

Tabla 3.9: Comparativa IAE entre el sistema con saturación y con antiwindup para el primario (integrador lazo interno)

Una vez analizadas las respuestas, se va a estudiar el comportamiento de la integral cuando se incluye el esquema antiwindup en el lazo interno.

En la Figura 3.24 se representa el término integral en ambos lazos y se puede apreciar como el esquema antiwindup consigue evitar la saturación del término integral en el lazo interno. En el lazo externo aparece una señal con forma de campana, mucho menor que para el caso de las dinámicas de primer orden, y se atenúa la respuesta oscilatoria que produce la saturación. La acción del esquema antiwindup en el lazo interno es determinante para la atenuación de la saturación del término integral del lazo interno.

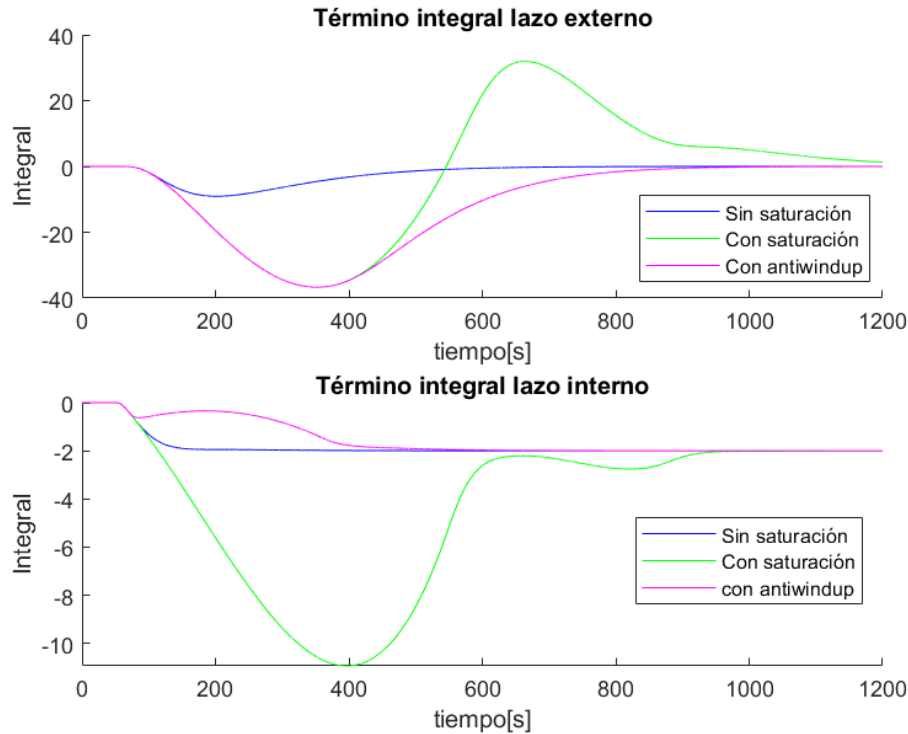


Figura 3.24: Comparativa término integral para los tres ensayos realizados (integrador lazo interno)

3.2.4 Propuesta de mejoras

En este apartado se van a implementar las mismas mejoras que las estudiadas en el apartado 3.1.4. Estas mejoras están basadas en la idea de introducir en el lazo externo la señal de seguimiento del lazo interno, de forma que el lazo externo sea consciente de la saturación del interno. Se requiere que el lazo primario perciba la saturación del lazo interno lo antes posible.

La primera mejora que se va a plantear es incluir el esquema antiwindup en el lazo externo y añadir otra sumatoria con el objetivo de que el integrador pierda fuerza. Esta idea se ha implementado en Simulink, en la Figura 3.25. Se realiza una comparativa que exponga las respuestas de la mejora propuesta y las respuestas del sistema con antiwindup en el lazo interno.

Esta comparativa se muestra en la Figura 3.26. Si se analiza la primera gráfica, correspondiente a las salidas, se puede estudiar cómo el nuevo esquema alcanza mucho antes la referencia y elimina la subelongación que en los ensayos anteriores estaba presente. Esta mejoría se hace patente en la señal de control del lazo principal, reconociendo como alcanza bastante antes la referencia sin provocar subelongación, lo cual confirma la efectividad de la mejora propuesta.

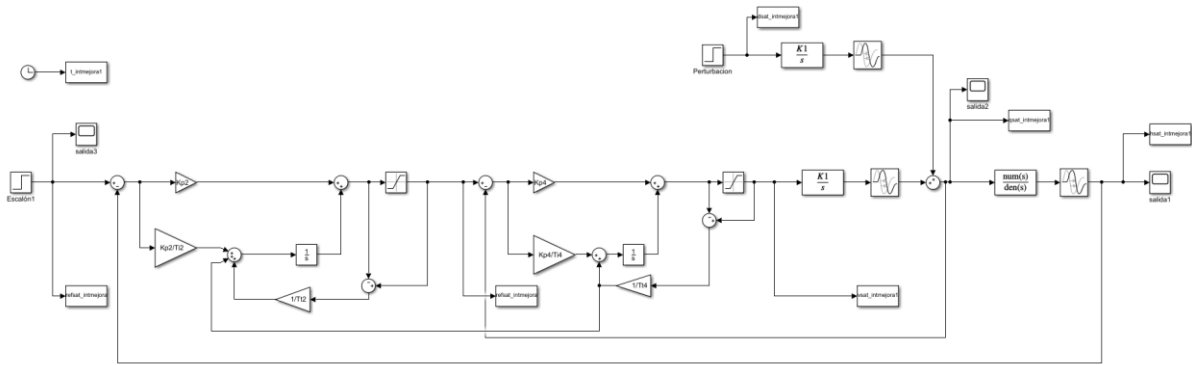


Figura 3.25: Esquema de control en cascada con implementación de la primera mejora (integrador lazo interno)

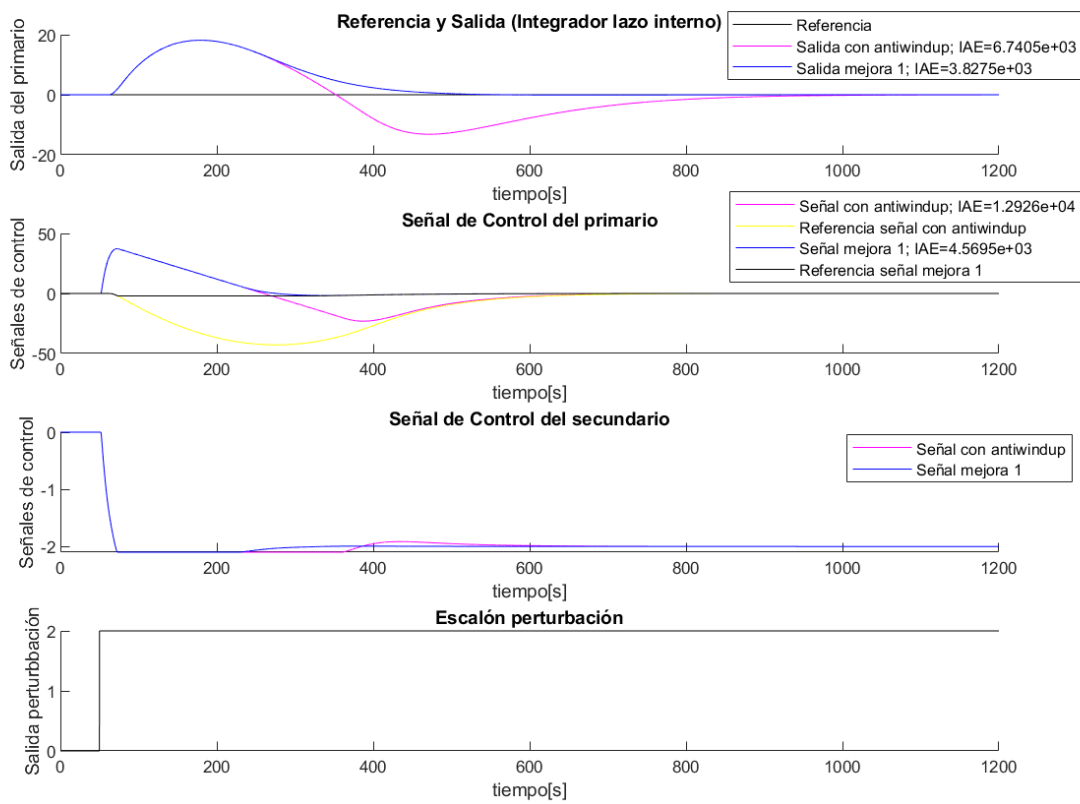


Figura 3.26: Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora (integrador lazo interno)

El rendimiento de control se analiza mediante la comparativa de los índices IAE obtenidos, que se encuentra en la Tabla 3.10.

IAE	Con antiwindup	Mejora 1
Salida	$6.7405 \cdot 10^3$	$3.8275 \cdot 10^3$
Señal de control	$1.2926 \cdot 10^4$	$4.5695 \cdot 10^3$

Tabla 3.10: Comparativa IAE implementación mejora 1 para el primario (integrador lazo interno)

Estudiándose los resultados, se puede reconocer como existe un mejor rendimiento de control para la mejora propuesta, ya que los valores de los índices son considerablemente menores que los índices del ensayo con antiwindup en el lazo interno.

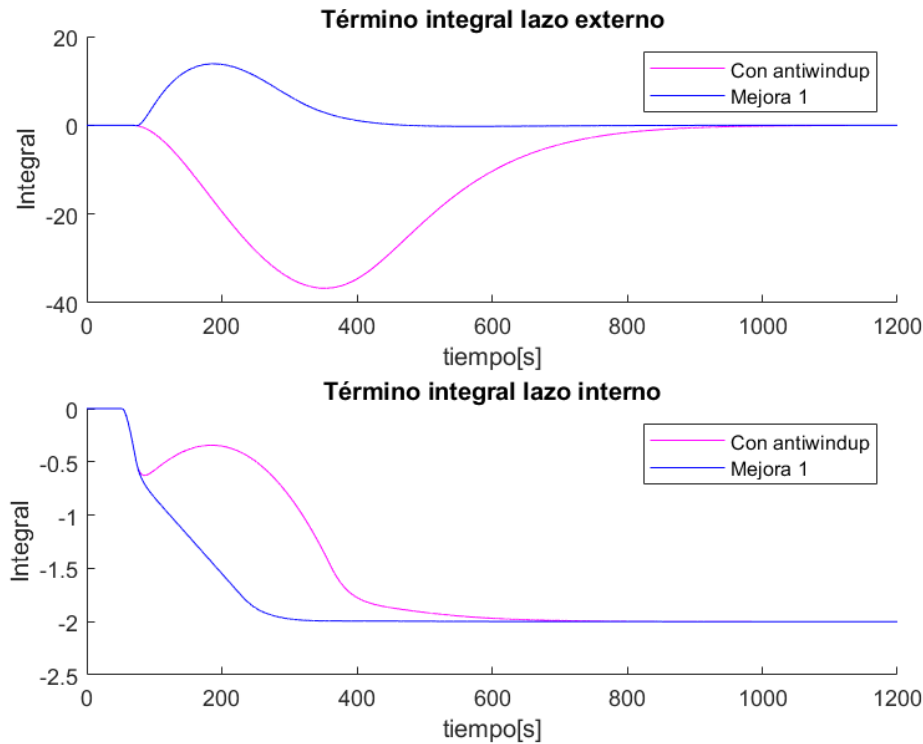


Figura 3.27: Comparativa término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la primera mejora (integrador lazo interno)

En la Figura 3.27 se representa el término integral para ambos lazos de control. Se confirma como la mejora propuesta elimina la saturación del término integral del lazo interno, optimizando la respuesta que proporcionaba el sistema con esquema antiwindup en el lazo interno.

Por otro lado, en el lazo externo, se observa como la forma de campana se disminuye en comparación con el sistema con antiwindup en el lazo interno, pero, sin embargo, la integral cambia de signo, lo cual indica que se está pasando de vueltas. Este comportamiento tiene que ver con la constante de tracking, por lo que posteriormente se analizará como afecta la variación del valor de la constante de tracking a la integral.

La siguiente mejora que se diseña, en situar los dos esquemas antiwindup únicamente en el lazo externo. El diagrama de bloques para la implementación de esta mejora se muestra en la Figura 3.28. Además, se va a realizar una comparativa, al igual que para la mejora anterior, de las respuestas obtenidas para el sistema de control en cascada con antiwindup en el lazo interno y la implementación de esta mejora. Esta comparativa se muestra en la Figura 3.29.

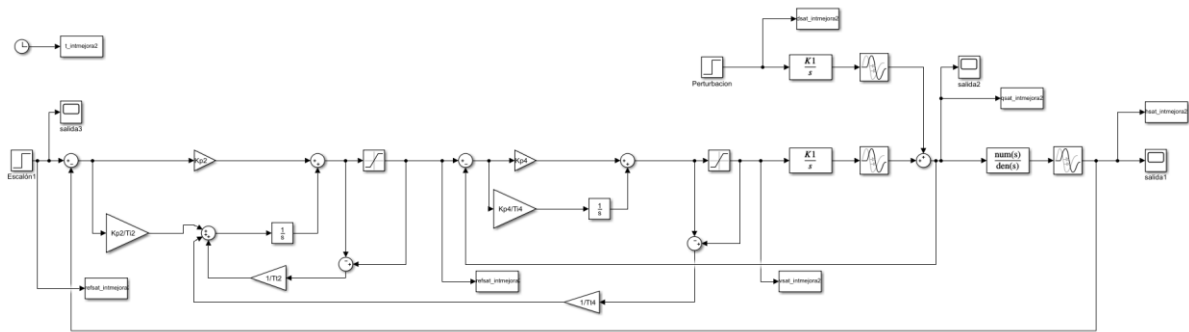


Figura 3.28: Esquema de control en cascada con la implementación de la segunda mejora (integrador lazo interno)

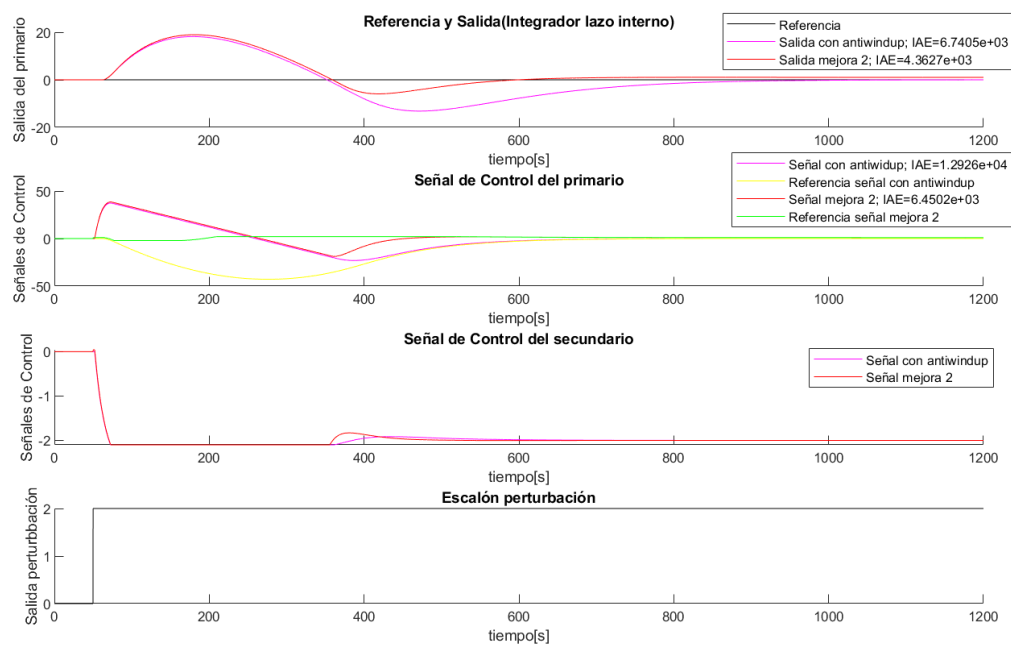


Figura 3.29: Comparativa respuestas sistema con antiwindup en lazo interno y con la segunda mejora (integrador lazo interno)

En la gráfica correspondiente a la salida se corrobora como la mejora propuesta hace que el sistema presente mejor rechazo a perturbaciones, por otro lado, en la gráfica de la señal de control del lazo primario se distingue como la señal alcanza mejor la referencia y se suaviza el comportamiento.

Para traducir estos resultados gráficos en resultados cuantitativos se calcula el IAE de ambos sistemas. En la Tabla 3.11 se muestra los resultados obtenidos.

Se representa el término integral de ambos lazos de control, realizando una comparativa entre la segunda mejora propuesta y el sistema con antiwindup en el lazo interno. La comparativa se muestra en la Figura 3.30.

IAE	Con antiwindup	Mejora 2
Salida	$6.7405 \cdot 10^3$	$4.3627 \cdot 10^3$
Señal de control	$1.2926 \cdot 10^4$	$6.4502 \cdot 10^3$

Tabla 3.11: Comparativa IAE implementación mejora 2 para el primario (integrador lazo interno)

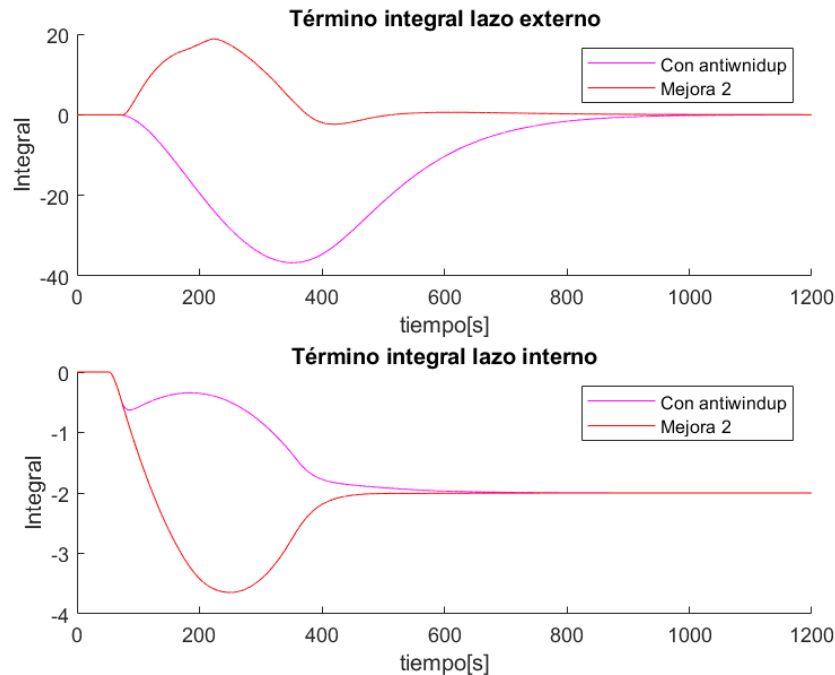


Figura 3.30: Comparativa término integral del sistema con antiwindup en el lazo interno e implementación de la segunda mejora (integrador lazo interno)

El término integral del lazo interno atenúa de forma eficiente la saturación, contrarrestando la señal provocada por el antiwindup. Por otro lado, en el lazo externo, se ve disminuida la forma de campana de la señal, en comparación con el sistema antiwindup, pero sigue dándose una integral en la que se produce un cambio de signo. Este comportamiento está relacionado con la constante de tracking.

La última comparativa realizada, para el caso de un sistema de control en cascada con dos dinámicas internas de integrador con retardo y externa de primer orden con retardo, ha sido comparar las dos mejoras propuestas con el sistema con solamente antiwindup en el lazo interno. Esta comparativa se ejecuta en la Figura 3.31.

Estudiando la gráfica de salida, se muestra como ambas mejoras rechazan la perturbación de forma más eficiente que el sistema con únicamente antiwindup en el lazo interno. En la señal de control del lazo primario también se representa la mejora producida por los esquemas propuestos frente al esquema con antiwindup.

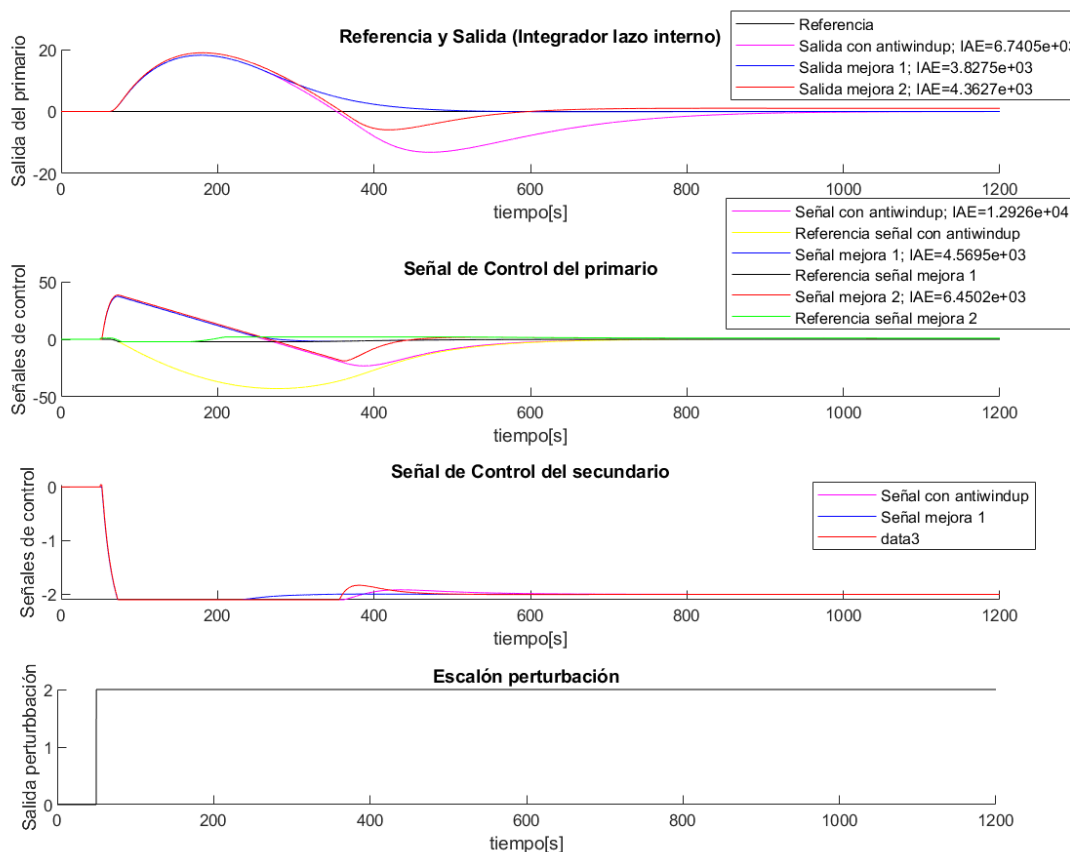


Figura 3.31: Comparativa entre el sistema con antiwindup en el lazo interno y la implementación de las mejoras propuestas (integrador lazo interno)

Si se comparan ambas mejoras entre sí, se expone que la primera mejora produce mejores resultados en ambas gráficas, lo cual tiene sentido, ya que en esta mejora se hace más débil la saturación debido al efecto de los dos esquemas antiwindup en el lazo primario, junto con el antiwindup en el secundario.

Para confirmar que los resultados gráficos corresponden con los obtenidos cuantitativamente, se comparan en la Tabla 3.12 los resultados obtenidos de IAE.

IAE	Con antiwindup	Mejora 1	Mejora 2
Salida	$6.7405 \cdot 10^3$	$3.8275 \cdot 10^3$	$4.3627 \cdot 10^3$
Señal de control	$1.2926 \cdot 10^4$	$4.5695 \cdot 10^3$	$6.4502e \cdot 10^3$

Tabla 3.12: Comparativa IAE implementación mejoras para el primario (integrador lazo interno)

Los índices garantizan que la primera mejora propuesta tiene mejor rendimiento de control, aunque ambas mejoras optimizan el rendimiento de control del sistema con antiwindup en el lazo interno solamente.

Se van a comparar las integrales de ambos procesos, con el fin de contrastar los resultados obtenidos, tanto cuantitativamente, como gráficamente. Esta comparación se realiza en la Figura 3.32:

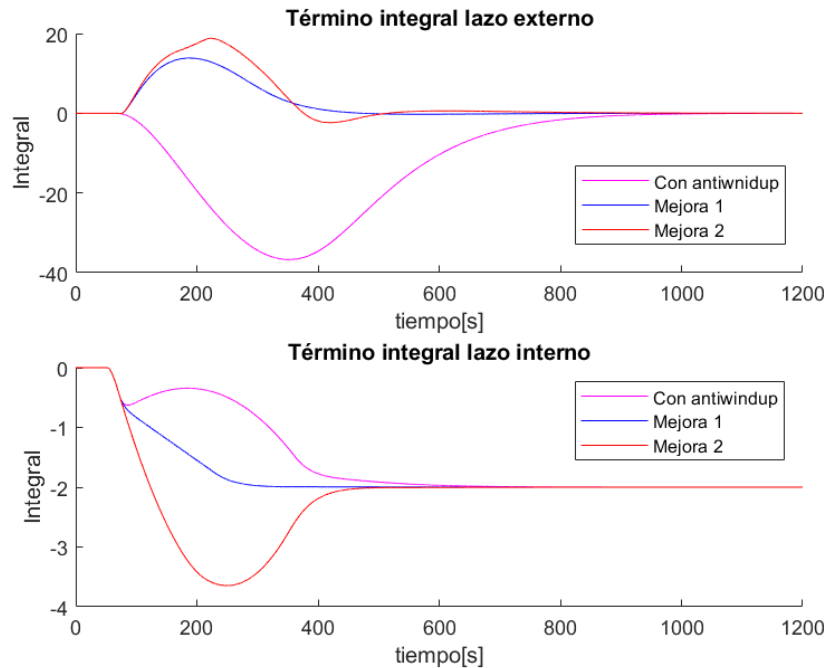


Figura 3.32: Comparativa término integral del esquema del sistema con antiwindup y la implementación de las mejoras propuestas (integrador lazo interno)

Se afirma que la primera mejora es la que mejor actúa frente a la saturación. En el lazo interno, se puede observar como para el caso de la primera mejora, se obtiene un comportamiento parecido al del sistema sin saturación en el lazo interno, mientras que, en el caso de la segunda mejora, esta da lugar a una subelongación. En el lazo externo, se observa que ambas mejoras atenúan la saturación en el lazo externo satisfactoriamente, observándose menos variación entre las dos mejoras para este caso.

3.2.5 Variación de la constante de tracking

Otro análisis que se ha elaborado sobre los dos casos de mejora es variar el valor de la constante de tiempo de tracking del lazo externo y ver si esta variación afecta a los resultados. Se ha decidido analizar cuatro valores de la constante de tiempo de tracking, multiplicando y dividiendo el valor original por 10 y por 20 y se van a comparar los resultados obtenidos con la constante original. Este análisis es interesante sobre todo en la gráfica de la integral, donde se observará para qué valor de T_{t_2} la integral no toma valores con signo cambiado, como se vio en la implementación de las mejoras.

En primer lugar, se realiza este ensayo para el caso de la primera mejora propuesta. La respuesta que se consigue para los distintos valores de T_{t2} se puede ver en la Figura 3.33.

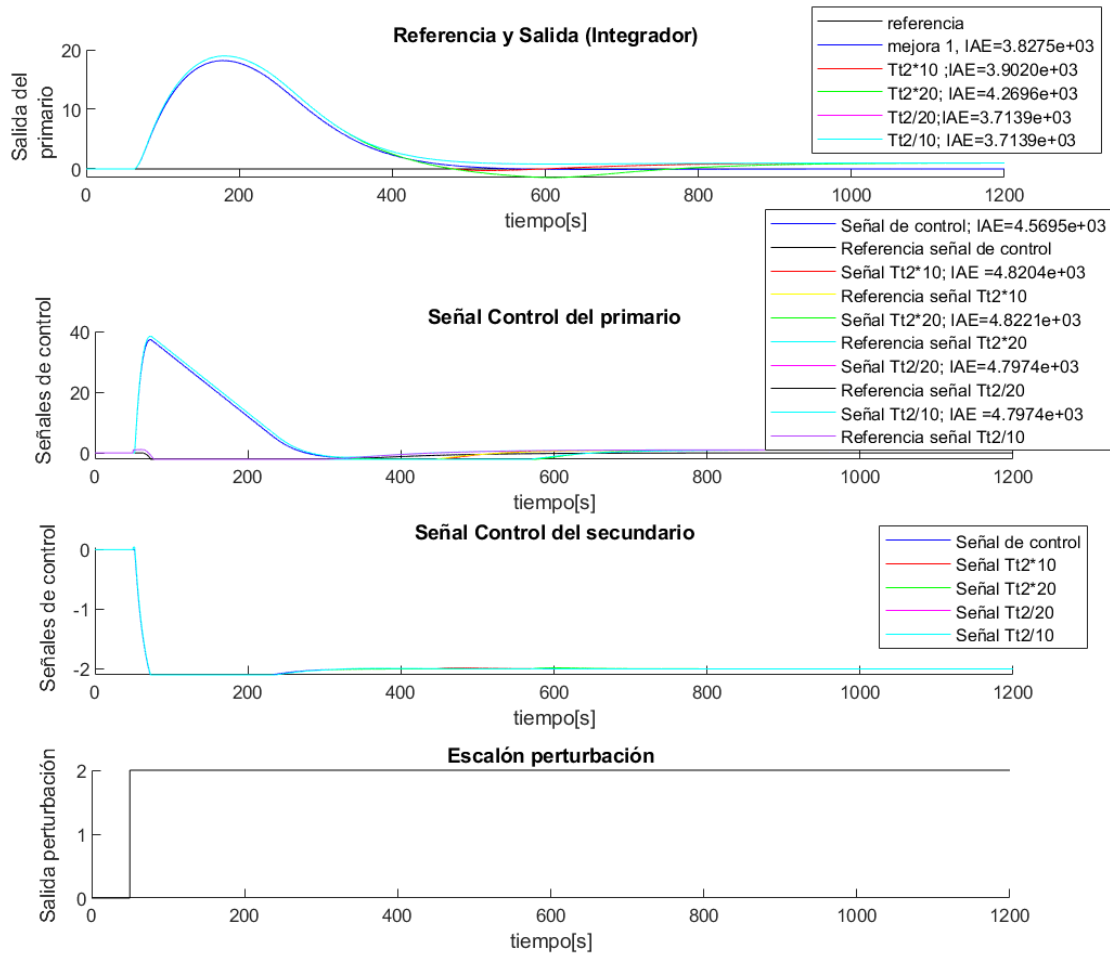


Figura 3.33: Variación de la constante de tracking del lazo externo para la primera mejora

Como se puede comprobar, apenas hay modificación en la salida, pero si se recurre al índice IAE se puede analizar que el sistema alcanza mejora la referencia y rechaza mejor la perturbación cuando la constante de tiempo de tracking disminuye, sin embargo, esto no ocurre en la señal de control del lazo primario, donde el sistema empeora el rendimiento de control para todas las variaciones planteadas.

En la Figura 3.34 se va a analizar el efecto que este ensayo tiene sobre el término integral, comprobándose que la integral apenas varía en el lazo interno, pero en el externo se muestra un cambio de señal, esto es debido que para menores valores de la constante de tracking la integral cambia de signo, como se vio en las mejoras planteadas, sin embargo, para valores mayores, se deja de producir este efecto, mejorando también la señal con respecto al ensayo con antiwindup.

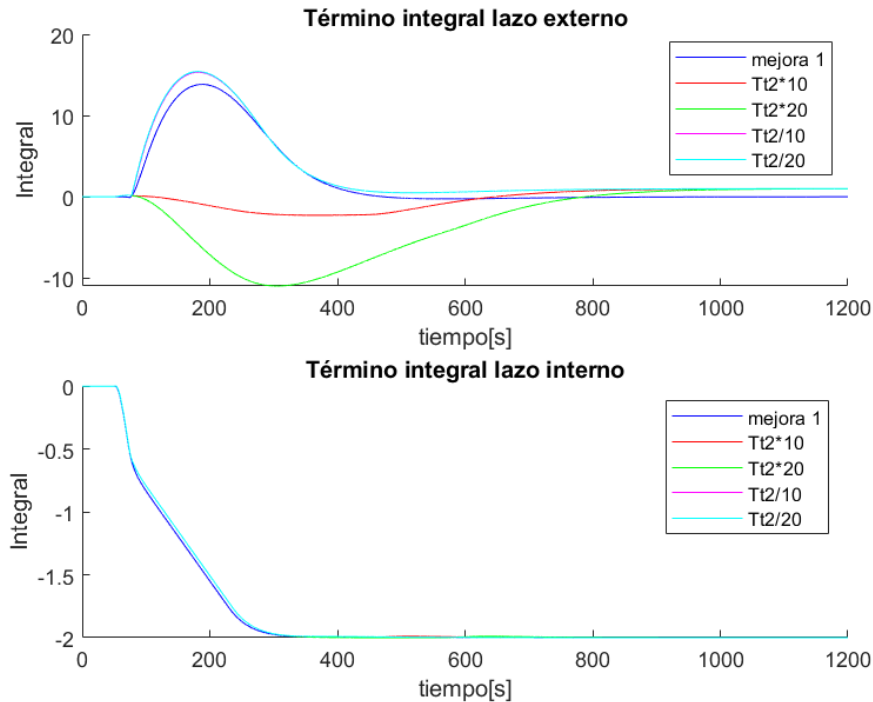


Figura 3.34: Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo para la primera mejora

Este mismo análisis se va a efectuar para la segunda mejora, examinando la respuesta que se obtiene y extrayendo conclusiones. La respuesta del esquema se visualiza en la Figura 3.35, donde se observa, tal y como ocurría para la primera mejora, el sistema presenta mejor rendimiento de control cuando la de T_{t_2} disminuye, esto tiene sentido ya que cuando hago la T_{t_2} más pequeña el término del antiwindup $1/T_{t_2}$ llega con un valor mayor y resta más integral.

También se va a analizar la gráfica de la integral con la variación de la constante de tiempo de tracking, esta comparativa se muestra en la Figura 3.36. Se puede advertir que, en el lazo interno, las variaciones que se producen son pequeñas, aunque el sistema actúa mejor cuando la T_{t_2} disminuye. En el lazo externo, también se presenta mejor comportamiento cuando disminuye la T_{t_2} , pero no ocurre como en el caso anterior que se cambia el signo de la integral, sino que para este ensayo en todas las variaciones que se han realizado de T_{t_2} , la integral presenta signo contrario al que debería.

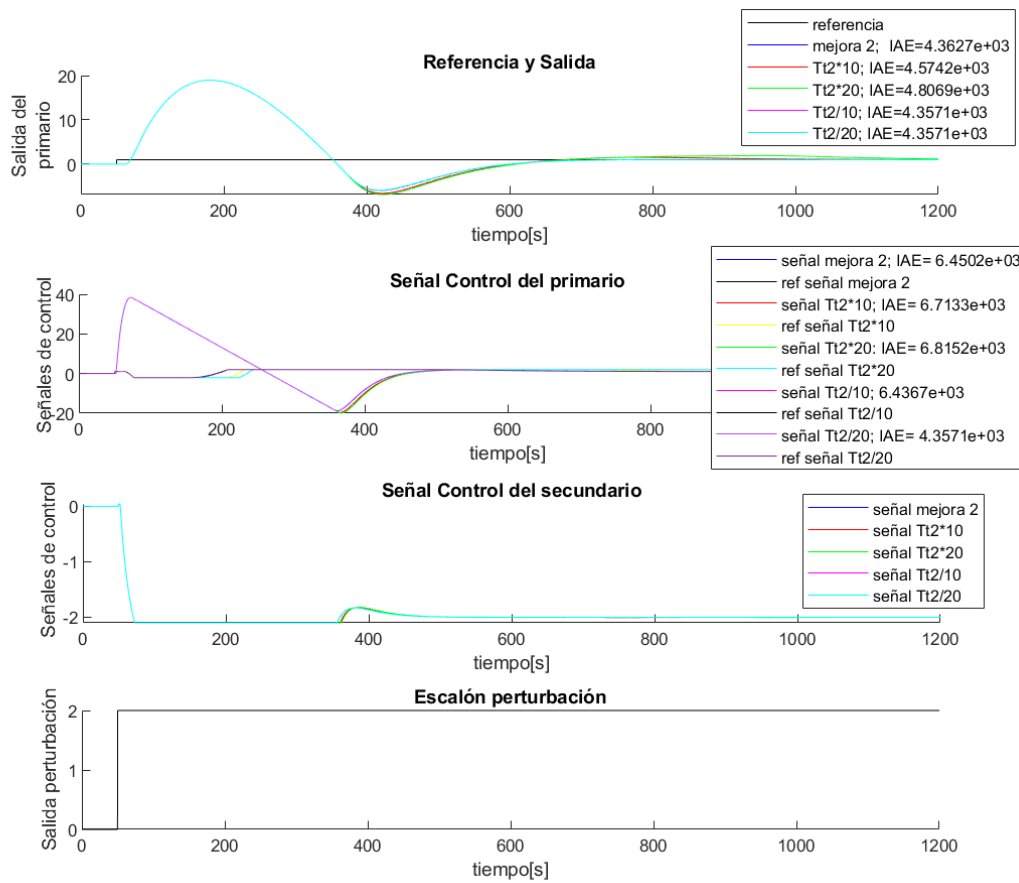


Figura 3.35: Variación de la constante de tracking del lazo externo para la primera mejora

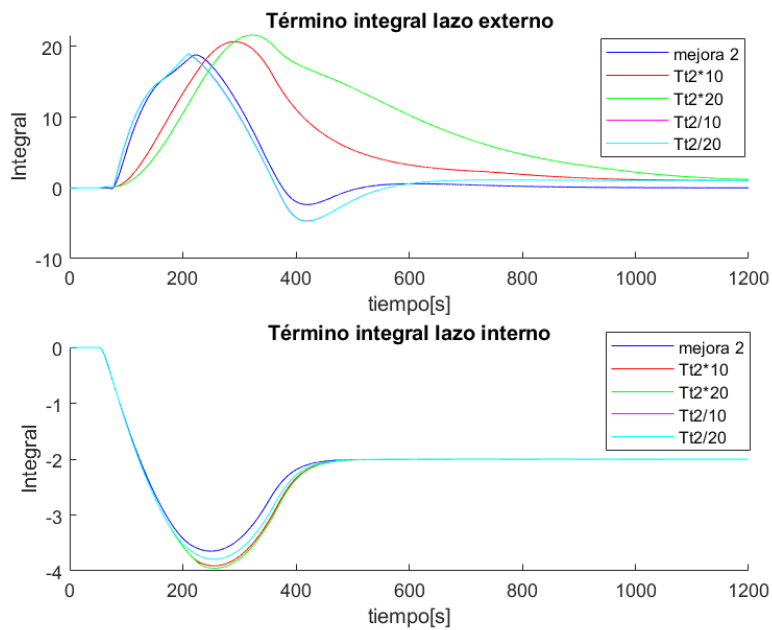


Figura 3.36: Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo de la segunda mejora

3.3 Cambio de referencia

Una vez analizado que ocurre con el rechazo a perturbaciones en un sistema de control en cascada, se va a realizar un ensayo en el cual no haya perturbación y la variación venga dada por un cambio brusco en la consigna. Este ensayo se contempla en el trabajo, ya que, si por cualquier motivo se provoca un escalón grande en el primario, esto va a impulsar un escalón muy grande en el secundario, lo cual puede causar problemas de saturación. En la práctica, el operario puede proporcionar una demanda muy grande al primario provocándose la saturación sin ser consciente de ello.

Se van a realizar los mismos ensayos que para el rechazo de perturbaciones, para el caso de un integrador en el lazo interno, ya que se han observado mejores resultados para el rechazo de perturbaciones. En primer lugar, se parte del diagrama de bloques de la figura 3.1, se elimina la perturbación del lazo interno y se introduce un escalón muy grande, de 0 a 8 para observar el comportamiento. El esquema resultante se muestra en la Figura 3.37:

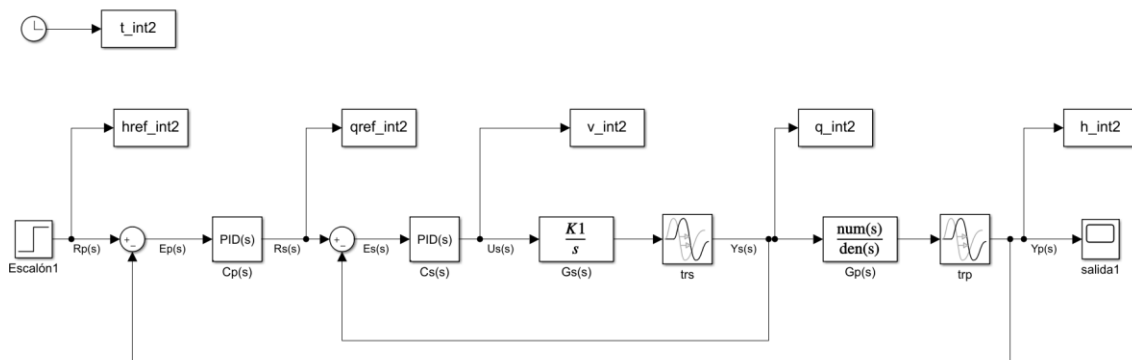


Figura 3.37: Esquema de control en cascada con cambio en la referencia e integrador en el lazo interno

3.3.1 Saturación lazo interno

A partir del esquema anterior, se provoca saturación en el lazo interno, en este caso, se satura el límite superior a 0.04, para forzar el sistema. En la Figura 3.38 se muestra el diagrama de bloques implementado en Simulink.

Se realiza una comparativa entre ambos esquemas, donde se vean las respuestas obtenidas. Esta comparativa se contempla en la Figura 3.39. En la gráfica se observa como la saturación afecta gravemente al sistema, desestabilizándolo y provocando un sobrepico tanto en la salida como en la señal de control del lazo primario.

Los resultados gráficos se cuantifican mediante el IAE y se puede realizar una comparativa de los índices obtenidos tanto en la salida como en la señal de control. Esta comparativa se muestra en la Tabla 3.13.

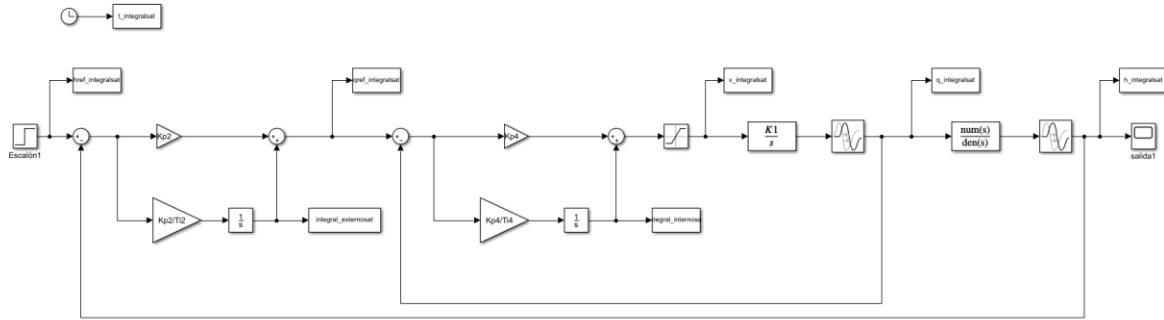


Figura 3.38: Esquema de control en cascada con cambio en la referencia y saturación en el lazo interno

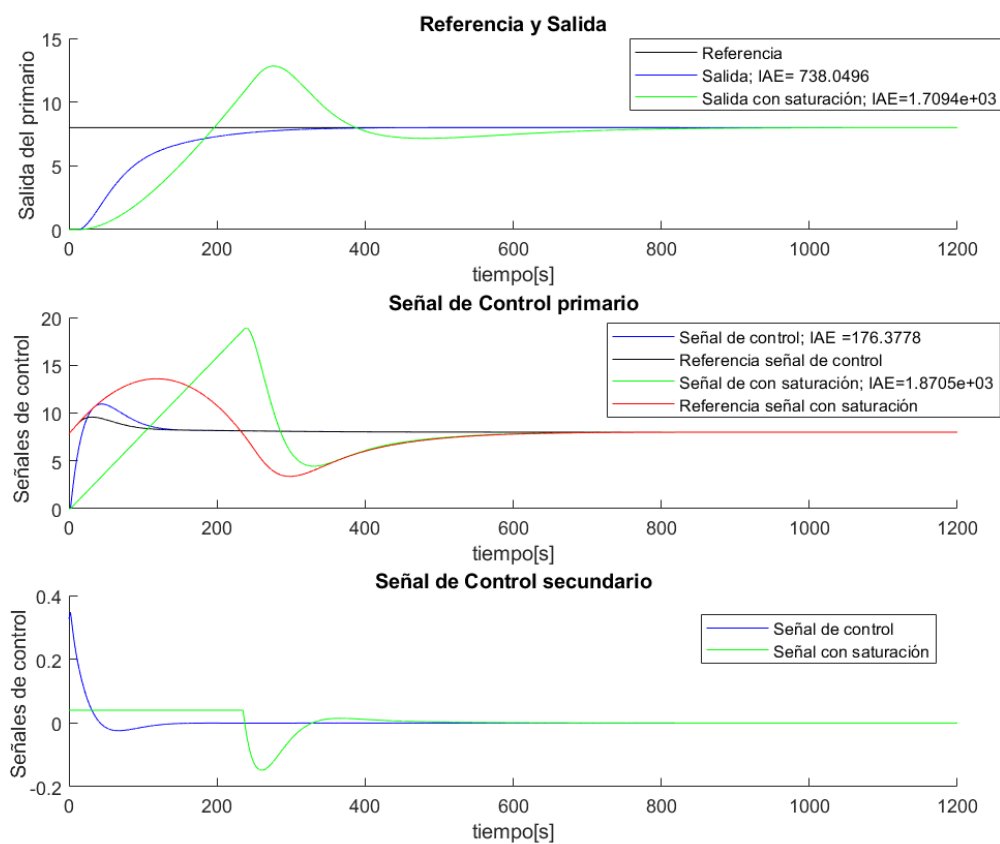


Figura 3.39: Respuestas del sistema con y sin saturación (cambio de referencia)

IAE	Sin saturación	Con saturación
Salida	738.0496	$1.7094 \cdot 10^3$
Señal de control	176.3778	$1.8705 \cdot 10^3$

Tabla 3.13: Comparativa IAE entre el sistema con y sin saturación para el primario (cambio de referencia)

Los resultados de la tabla confirman que la saturación afecta en gran medida al rendimiento de control.

Se va a analizar cómo afecta la saturación del lazo interno al término integral, para ello, en la Figura 3.40, se representa el término integral del sistema para ambos lazos, con y sin saturación en el lazo interno.

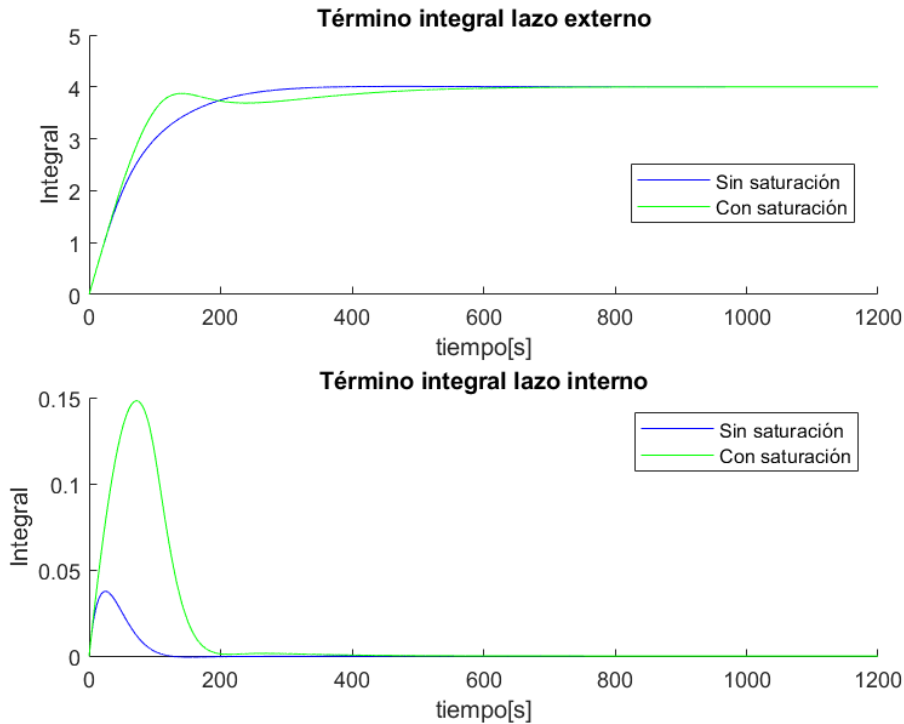


Figura 3.40: Comparativa término integral del sistema con y sin saturación (cambio de referencia)

En la figura se puede distinguir como la saturación en el lazo interno afecta bastante al término integral del lazo interno, aumentando el sobrepico de la integral considerablemente. Esta saturación del lazo interno también afecta al lazo externo, aunque en menor medida.

3.3.2 Antiwindup lazo interno

En este apartado se va a implementar, en el lazo interno, un esquema que evite el fenómeno de la saturación del término integral o windup. El esquema que se va a implementar es el back-calculation. Este esquema se implementa en la Figura 3.41.

Se realiza una comparativa, en la cual se muestren respuestas de los tres casos analizados, sin saturación, con saturación en el lazo interno y con antiwindup en el lazo interno. Esta comparativa se contempla en la Figura 3.42.

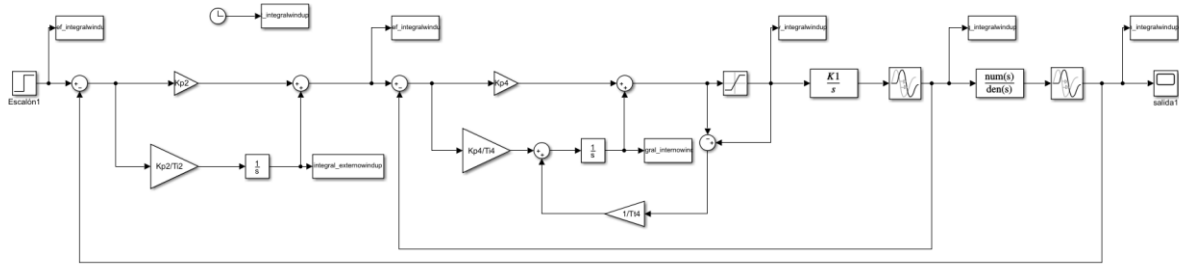


Figura 3.41: Esquema de control en cascada con cambio en la referencia y antiwindup en el lazo interno

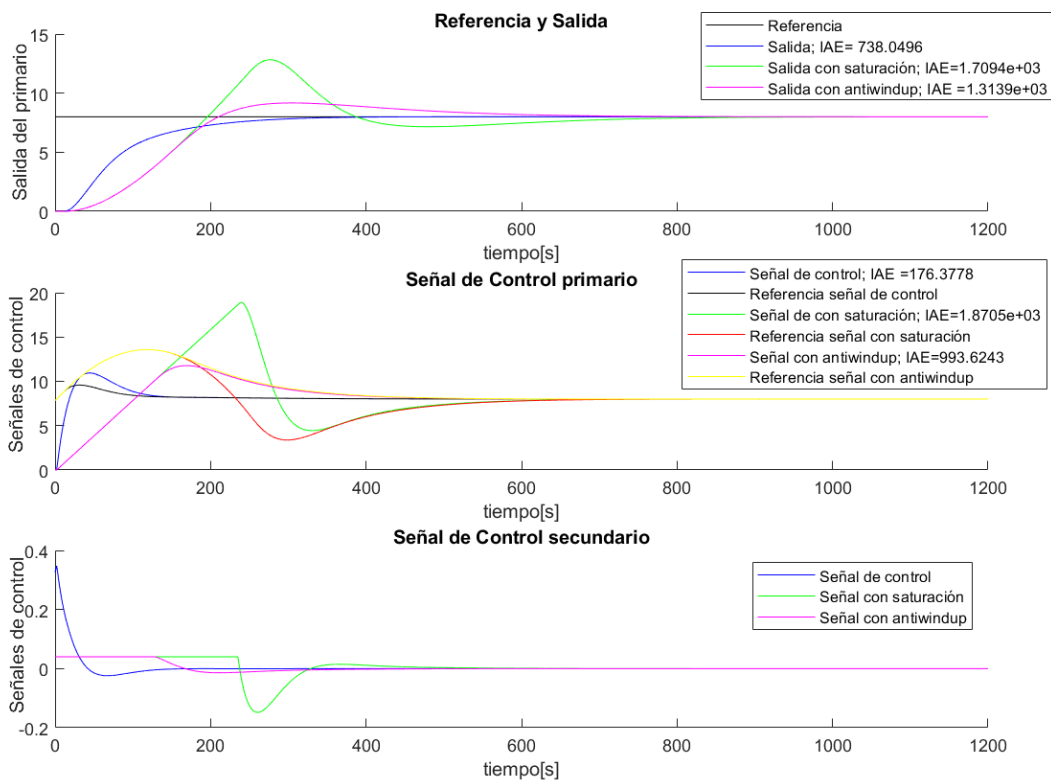


Figura 3.42: Comparativa respuestas del sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup (cambio de referencia)

El efecto de la saturación, tanto en la salida como en la señal de control del primario, se ve atenuado por la acción del esquema antiwindup, disminuyéndose considerablemente el sobrepico que presentaba tanto la salida como la señal de control para el caso con saturación. Estos resultados gráficos se cuantifican mediante el índice IAE, realizando una comparativa de los índices obtenidos en la Tabla 3.14.

De esta forma, se puede analizar como el esquema antiwindup mejora el rendimiento de control del sistema con saturación en el lazo interno, pero comportándose peor que el sistema sin saturación.

IAE	Sin saturación	Con saturación	Con antiwindup
Salida	738.0496	$1.7094 \cdot 10^3$	$1.3239 \cdot 10^3$
Señal de control	176.3778	$1.8705 \cdot 10^3$	993.6243

Tabla 3.14: Comparativa IAE entre el sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup para el primario (cambio de referencia)

El efecto del esquema antiwindup se verá reflejado en el término integral, por lo que en la Figura 3.43 se representa la integral del lazo interno y externo en los tres casos analizados.

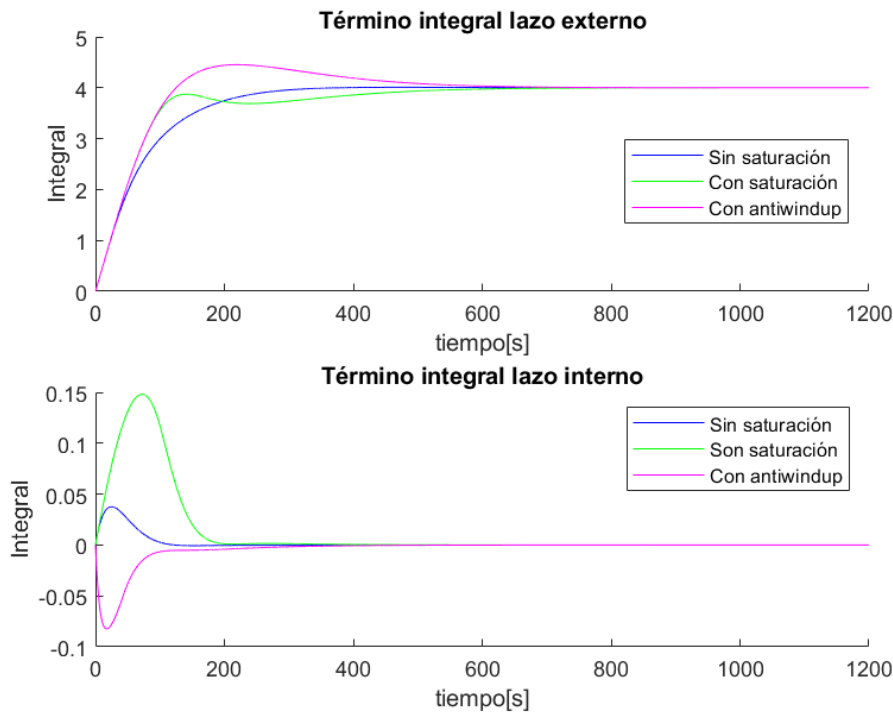


Figura 3.43: Comparativa término integral del sistema sin saturación, con saturación y con antiwindup (cambio de referencia)

La integral de lazo externo, para el caso del esquema antiwindup, empeora el efecto de la saturación, ya que la señal alcanza un valor más elevado que para el resto de los casos. Por otro lado, en el lazo interno, se muestra cómo la integral presenta forma de campana, como en los dos casos anteriores, pero, esta vez con el signo cambiado, lo cual indica que es demasiado agresivo.

3.3.3 Propuesta de mejoras

Para el caso que se trata, sin perturbación y con cambio en la referencia, se van a implementar mejoras similares a las que se han verificado para el rechazo de perturbaciones. La primera de ellas incluye el esquema antiwindup en ambos lazos y en el lazo externo se le asigna, además, la señal de seguimiento del lazo interno. Esta mejora se muestra implementada en la Figura 3.44.

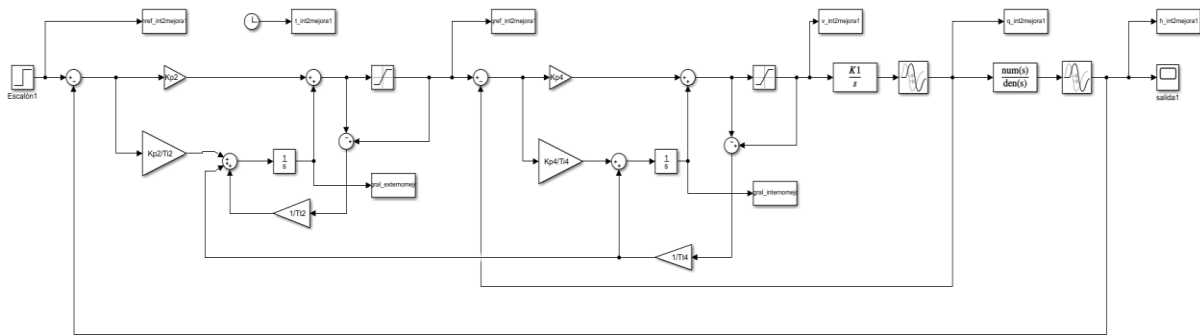


Figura 3.44: Esquema de control en cascada con cambio en la referencia e implementación de la primera mejora

Se van a representar gráficamente las respuestas obtenidas al simular la mejora, junto con las respuestas del sistema con antiwindup en el lazo interno. Esta comparativa se enseña en la Figura 3.45. En la gráfica referente a la salida del primario se muestra como el sistema con implementación de la mejora es más rápido que el sistema con antiwindup, haciendo que desaparezca el sobrepico producido por la saturación. Si se analiza la gráfica de la señal de control del primario, se observa como mejora la señal con respecto a la del antiwindup, llega antes a la referencia y se consigue una señal más suave. Estos resultados se corroboran con el índice IAE, que se puede ver en la Tabla 3.15:

IAE	Con antiwindup	Mejora 1
Salida del primario	$1.3239 \cdot 10^3$	$1.1533 \cdot 10^3$
Señal de control	993.6243	654.6165

Tabla 3.15: Comparativa IAE del sistema con implementación de la primera mejora para el primario (cambio referencia)

Efectivamente, se confirma que, tanto para la salida como para la señal de control, la primera mejora presenta un mejor rendimiento de control, por lo que se puede decir que la mejora propuesta es eficaz.

Se muestra también la integral de ambos lazos para la mejora, en comparación con el sistema con esquema antiwindup en el lazo interno. Esta comparativa se contempla en la Figura 3.46, donde se extrae, que la mejora sugerida atenúa la integral en ambos lazos, aunque a simple vista no se observa mucha diferencia entre las señales.

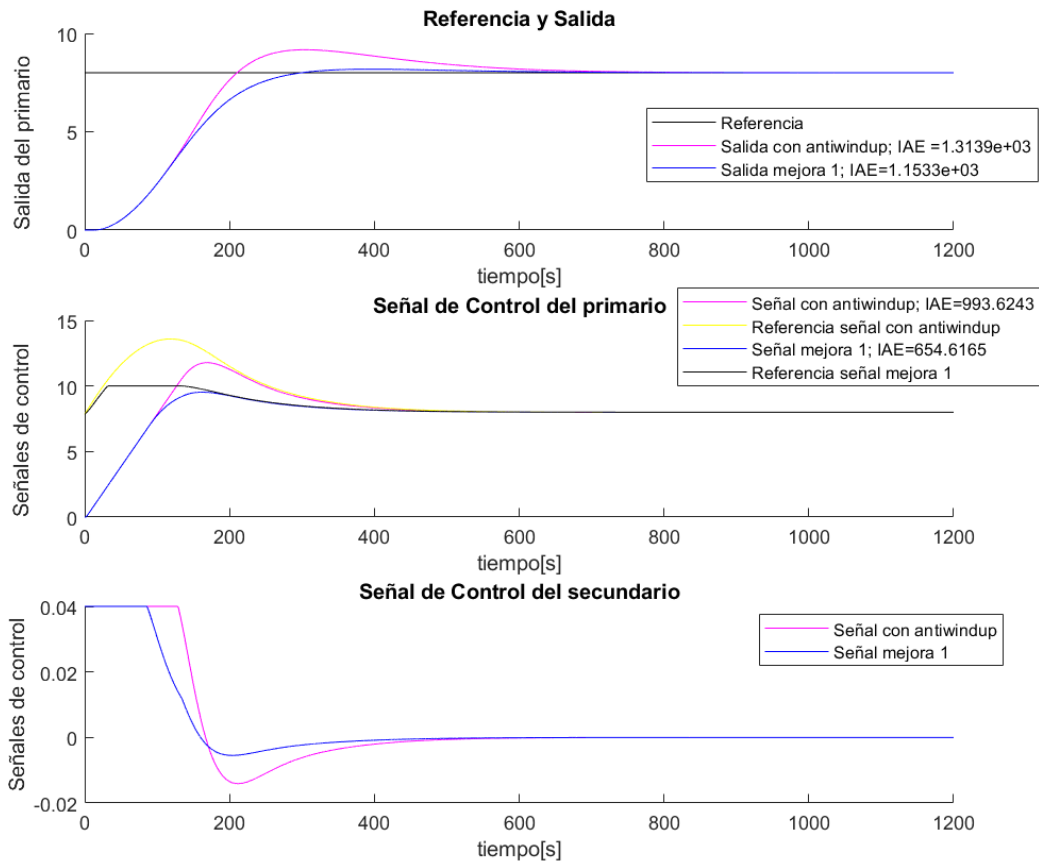


Figura 3.45: Comparativa respuestas sistema con antiwindup e implementación de la primera mejora (cambio en referencia)

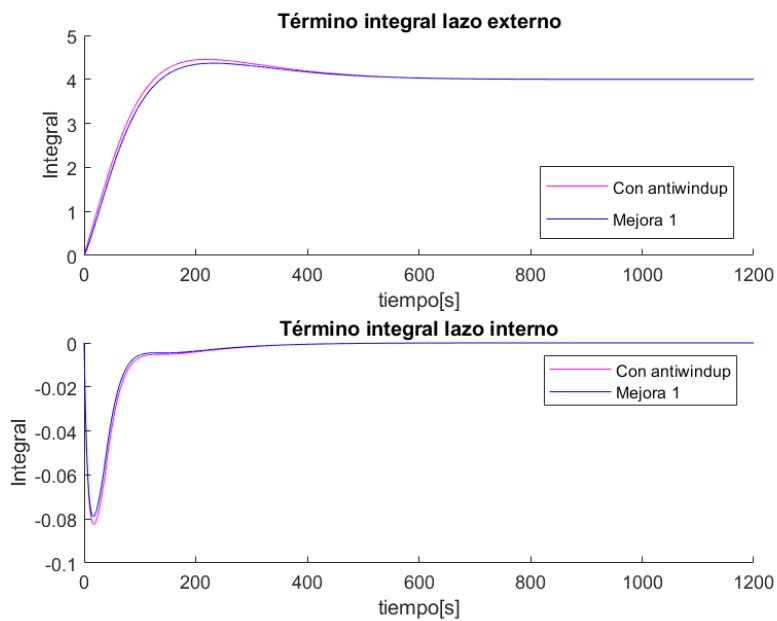


Figura 3.46: Comparativa término integral del sistema con antiwindup y la primera mejora (cambio de referencia)

La siguiente mejora que se va a proponer consiste en ver qué sucede cuando se ponen los dos esquemas antiwindup al lazo externo y se elimina el antiwindup del lazo interno. El esquema donde se implementa esta mejora se ve en la Figura 3.47.

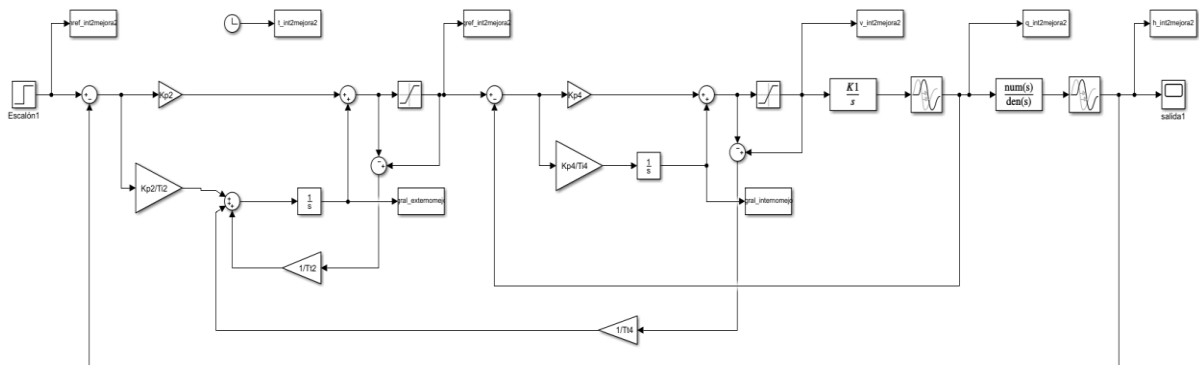


Figura 3.47: Esquema de control en cascada con cambio en la referencia e implementación de la segunda mejora

Se representa gráficamente la comparativa entre el esquema antiwindup en el lazo interno y la mejora propuesta en la Figura 3.48:

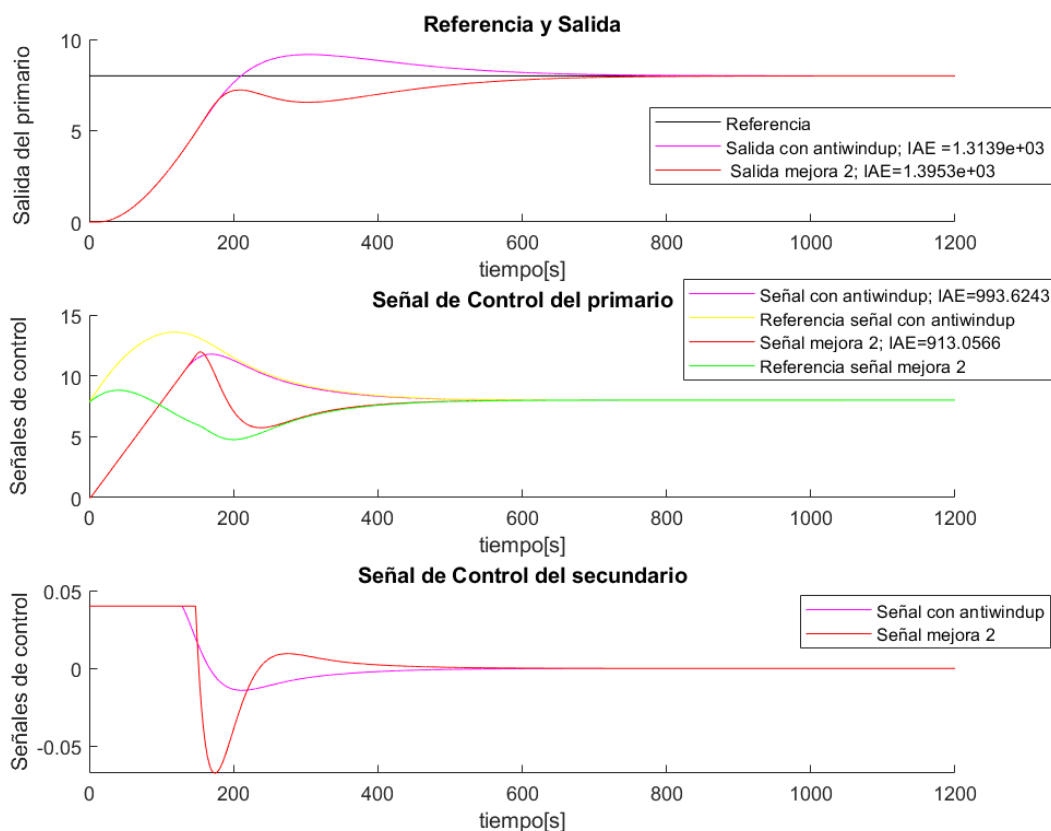


Figura 3.48: Comparativa respuestas sistema con antiwindup y con la implementación de la primera mejora (cambio de referencia)

Se puede contemplar que esta mejora propuesta solamente se hace efectiva en la señal de control del lazo primario. En la gráfica de salida, el sistema sigue peor la referencia, por lo que desde el punto de la salida esta mejora no aporta optimización. En la gráfica de la señal de control interna, se muestra como esta señal empeora para el caso de la mejora propuesta, lo cual es lógico ya que el esquema no presenta antiwindup en el lazo externo.

Las conclusiones extraídas de la gráfica se pueden comprobar haciendo uso del IAE, el cual nos indicará el rendimiento de control. Si se observa la Tabla 3.16 se puede concluir que esta mejora presenta peor rendimiento de control en la salida, aunque con muy poca diferencia y lo mejora con respecto a la señal de control del primario, siendo la diferencia también mínima.

IAE	Con antiwindup	Mejora 2
Salida	$1.3239 \cdot 10^3$	$1.3953 \cdot 10^3$
Señal de control	993.6243	913.0566

Tabla 3.16: Comparativa IAE del sistema con implementación de la primera mejora para el primario (cambio de referencia)

Se va a estudiar la representación gráfica del término integral, la cual se muestra en la Figura 3.49.

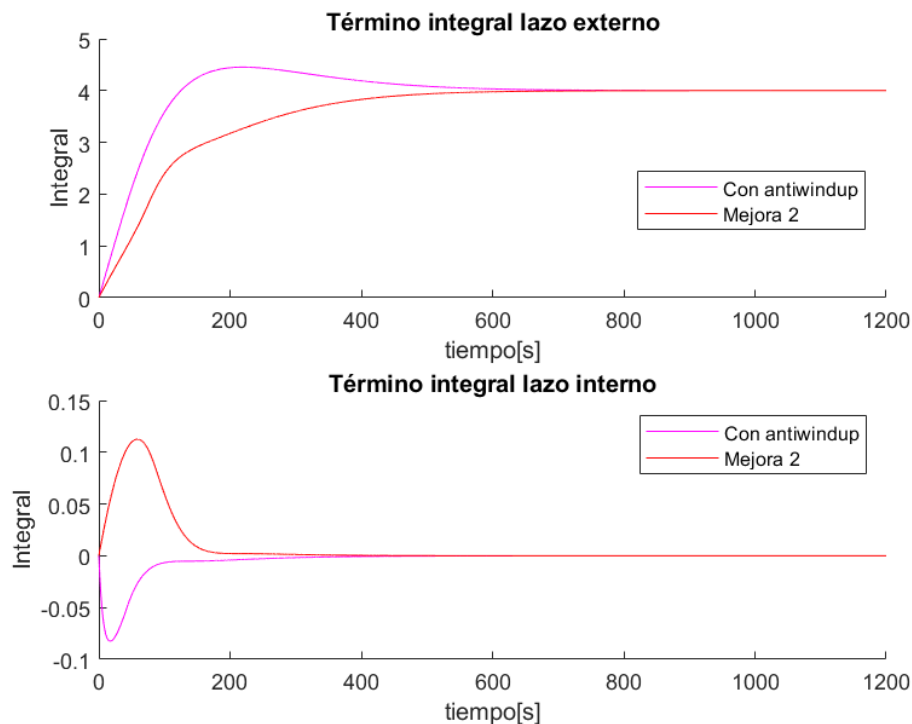


Figura 3.49: Comparativa término integral del sistema con antiwindup y la segunda mejora (cambio referencia)

La integral de lazo externo, para el caso de la segunda mejora, atenúa el efecto de la saturación, por otro lado, en el lazo interno, se muestra como la integral presenta forma de campana, como con el esquema antiwindup, pero con el signo cambiado con respecto al antiwindup. Como se vio en el apartado 3.3.2, el esquema antiwindup era demasiado agresivo en la integral del lazo interno e invertía el signo de la integral para el sistema sin saturación y con saturación. Con la utilización de la segunda mejora, se consigue que el signo se vuelva a invertir, obteniendo una señal con un sobrepico menos que para el caso de saturación en el lazo interno.

Para analizar que mejora es más efectiva de las dos, se van a representar las respuestas de ambas, junto con la respuesta del esquema con antiwindup en el lazo interno en la Figura 3.50.

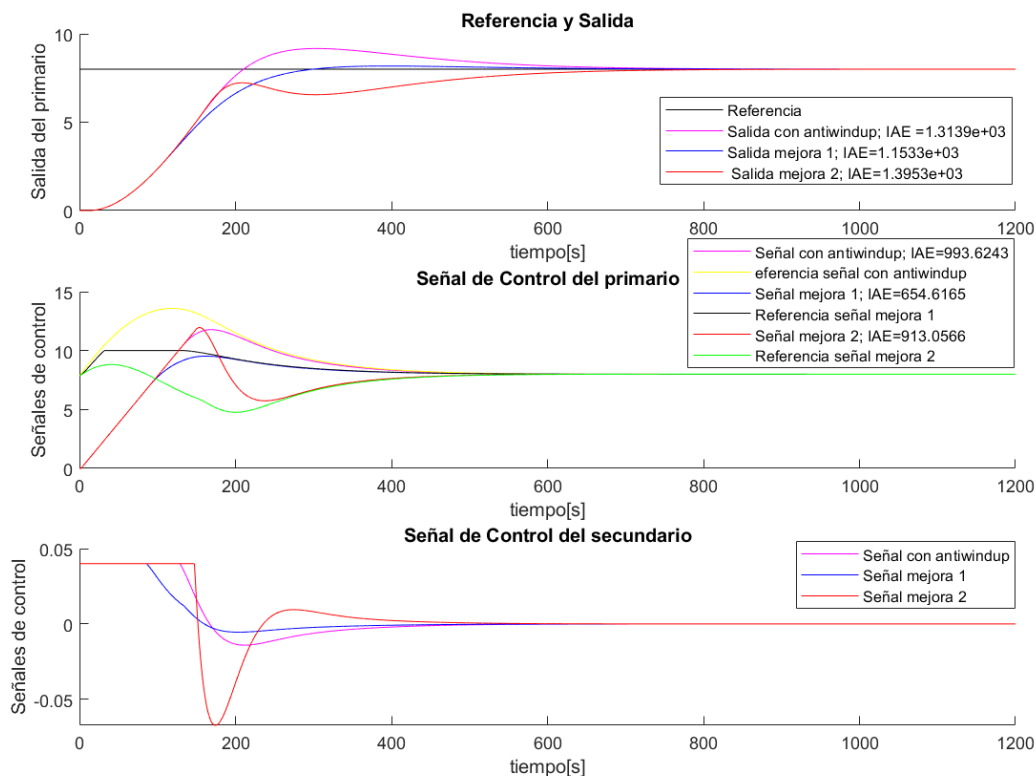


Figura 3.50: Respuestas de las dos mejoras aportadas y el sistema con antiwindup en el lazo interno (cambio de referencia)

En la gráfica correspondiente a la salida, se observa que el sistema que mejor sigue la referencia es el sistema con antiwindup en el lazo interno, seguido de la segunda mejora. La dinámica que presenta una respuesta más lenta es la de la primera mejora.

En la gráfica correspondiente a la señal de control del primario, se observa que, la dinámica que mejor sigue la referencia de control y atenúa el efecto de la saturación es la de la primera mejora, luego la de la segunda mejora y, por último, la del sistema con antiwindup en el lazo interno, que es la que peor actúa frente a la saturación en el lazo externo. En la gráfica que corresponde con la señal de control del secundario, se muestra que la dinámica que peor actúa frente a la saturación del lazo interno es la de la mejora 2, lo cual tiene sentido, ya que, para esta mejora, el lazo interno no tiene esquema antiwindup.

Para cuantificar los resultados que se han extraído de las gráficas se calcula el IAE para la salida y para la señal de control del primario. La comparativa de ambas se expone en la Tabla 3.17:

IAE	Con antiwindup	Mejora 1	Mejora 2
Salida	$1.3239 \cdot 10^3$	$1.1533 \cdot 10^3$	$1.3953 \cdot 10^3$
Señal de control	993.6243	654.6165	913.0566

Tabla 3.17: Comparativa IAE del sistema con implementación de las mejoras propuestas para el primario (cambio referencia)

Con la visualización de los IAE se confirma lo extraído gráficamente. El sistema con la primera mejora propuesta es el que mejor se comporta para la salida, seguido del sistema con antiwindup y siendo la segunda mejora la dinámica que más tarda en alcanzar la referencia.

Respecto al control del lazo principal, la primera mejora es la que más atenuación de la saturación consigue, seguida de la segunda mejora y siendo el sistema con antiwindup el que peor rendimiento de control presenta.

Para finalizar, se comparan las integrales de ambos lazos en la Figura 3.51, donde se observa que, en el lazo externo, el sistema con antiwindup y la primera mejora presentan una respuesta muy parecida, siendo la respuesta de la segunda mejora, una señal más atenuada. En el lazo interno, tanto el sistema con antiwindup como el de la primera mejora presentan una señal con forma de campana y con el signo contrario. Para el caso de la mejora 2, se presenta una señal con el signo positivo y que presenta un sobrepico menor que el obtenido para la saturación del lazo interno.

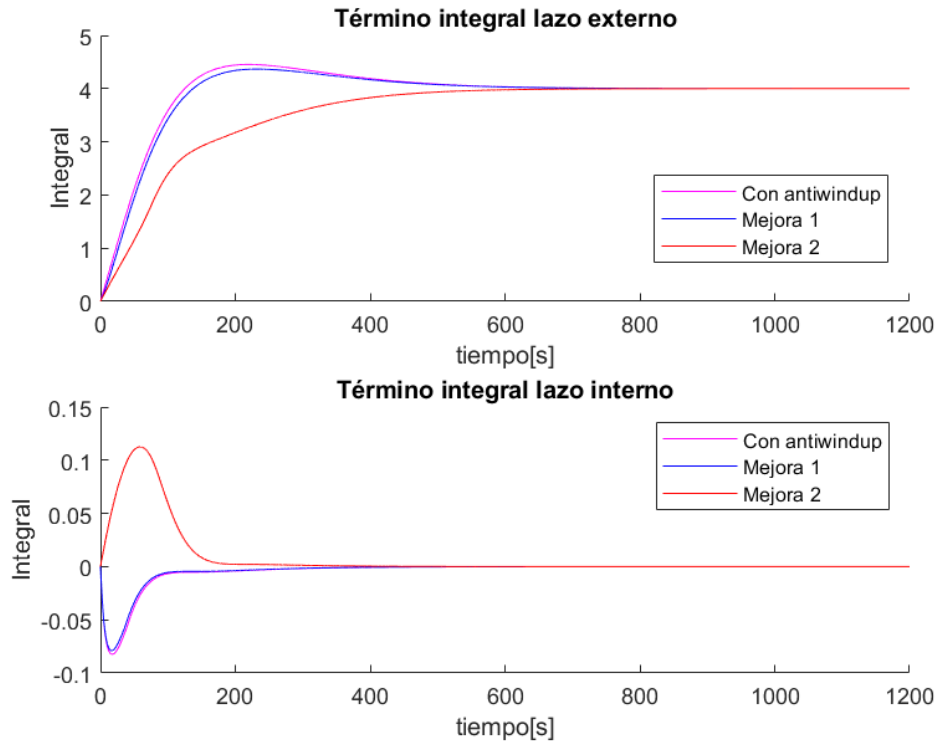


Figura 3.51: Comparativa término integral del sistema con antiwindup y las mejoras implementadas (cambio de referencia)

3.3.4 Variación de la constante de tiempo de tracking

Para las dos mejoras que se han planteado, se va a analizar que sucede cuando se varía el valor de la constante de tiempo de tracking del lazo externo. Se ha decidido analizar cuatro valores de la constante de tiempo de tracking, multiplicando y dividiendo el valor original por 10 y por 20 y se van a comparar los resultados obtenidos con la constante original.

En primer lugar, se va a analizar esta modificación para la primera mejora propuesta. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.52. Se extrae de la gráfica que, para la salida del primario la respuesta empeora conforme la constante de tracking es mayor. Esto ocurre también para las señales de control. Cuantitativamente, se extrae que cuando la T_{t2} es mayor, el IAE aumenta, constatándose que empeora el rendimiento. Sin embargo, cuando T_{t2} se disminuye, los valores del IAE son casi idénticos a los de la señal original.

Se va a representar la integral de ambos lazos con la variación de T_{t2} para ambos lazos en la Figura 3.53, donde se concluye que para valores mayores de T_{t2} la señal de la integral también se empeora.

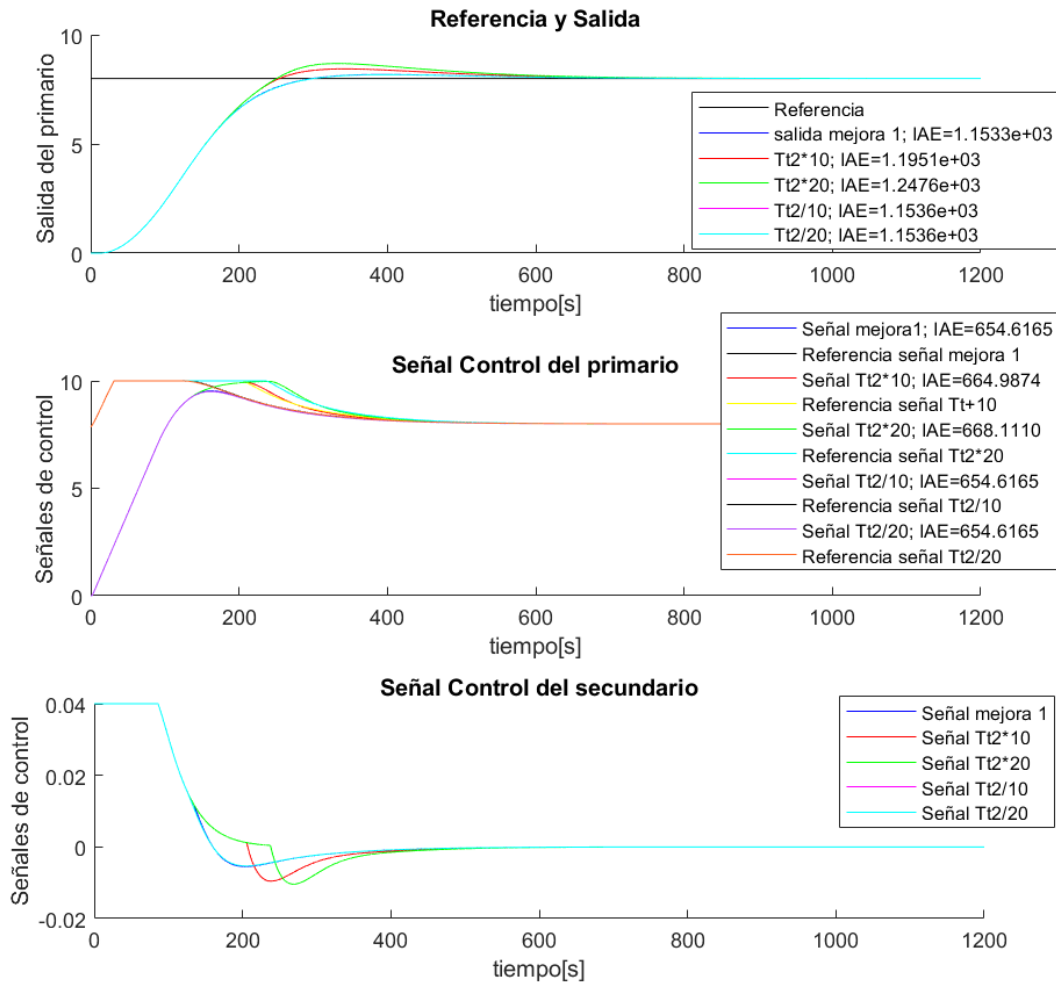


Figura 3.52: Variación de la constante de tracking del lazo externo de la primera mejora para el sistema con cambio en la referencia

En segundo lugar, se analiza esta modificación para la segunda mejora propuesta. La Figura 3.54 muestra las gráficas de las salidas y las señales de control para los diferentes valores de T_{t2} que se le dan a la segunda mejora. Como resultado, se puede extraer que, tanto para la gráfica de la salida, como de las señales de control no se muestra variación ninguna con respecto a la señal original.

En la Figura 3.55 se analiza el término integral de ambos lazos con la variación de T_{t2} , observándose que, para la integral, tampoco se producen modificaciones en la señal con respecto a la original.

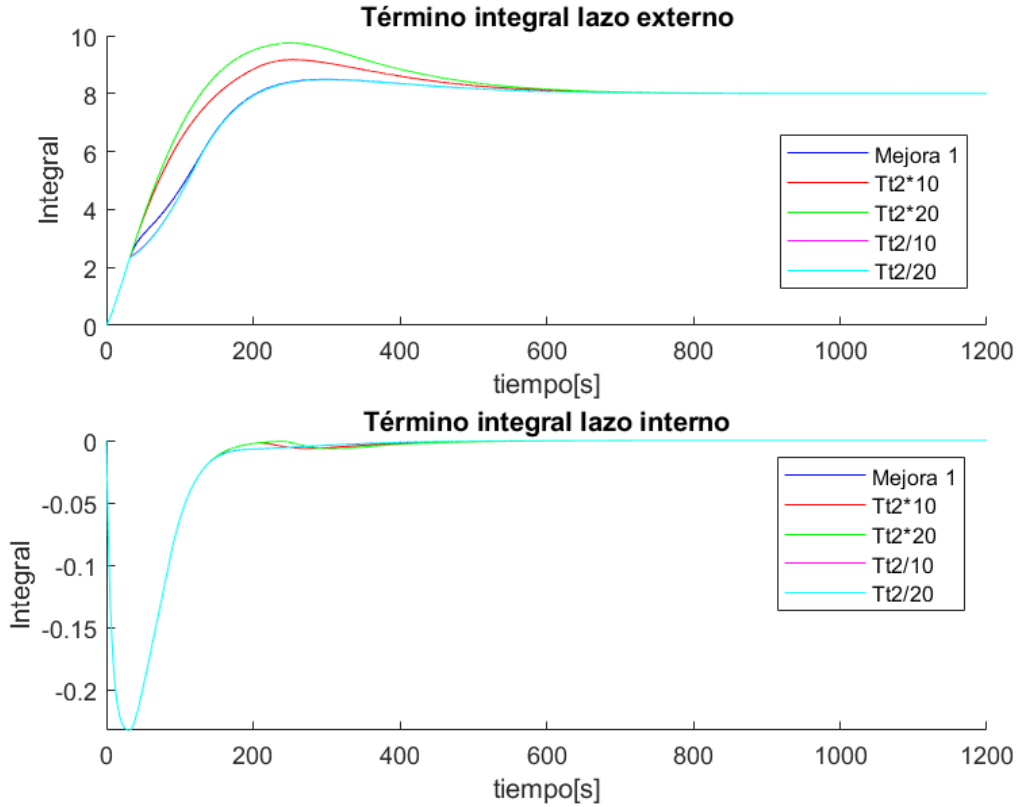


Figura 3.53: Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo de la primera mejora para el sistema con cambio en la referencia

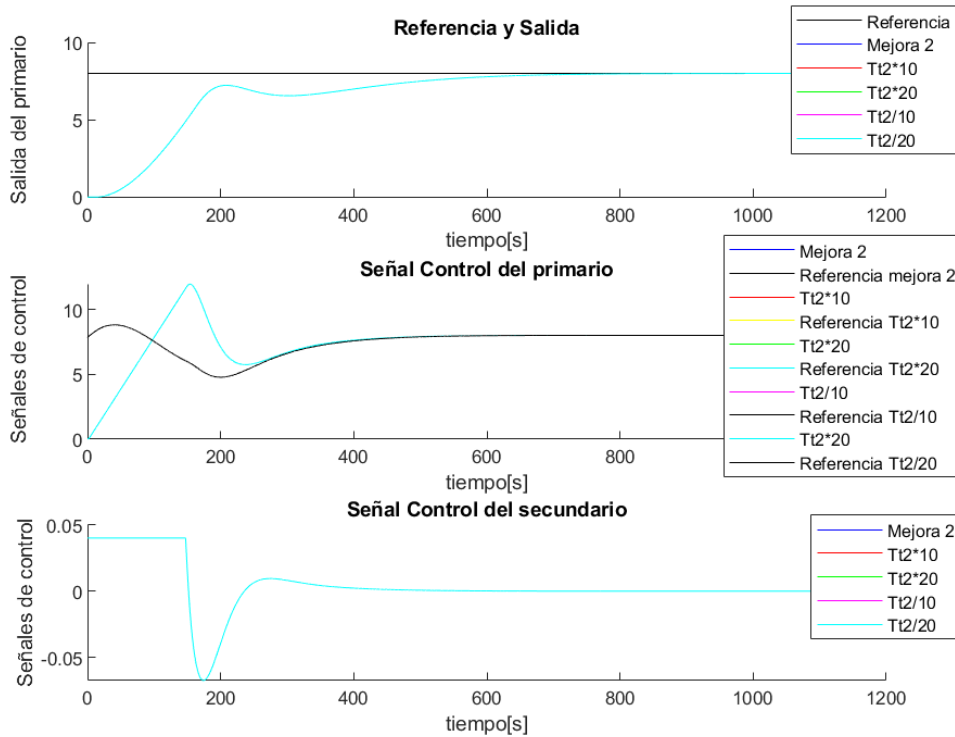


Figura 3.54: Variación de la constante de tracking del lazo externo de la segunda mejora para el sistema con cambio en la referencia

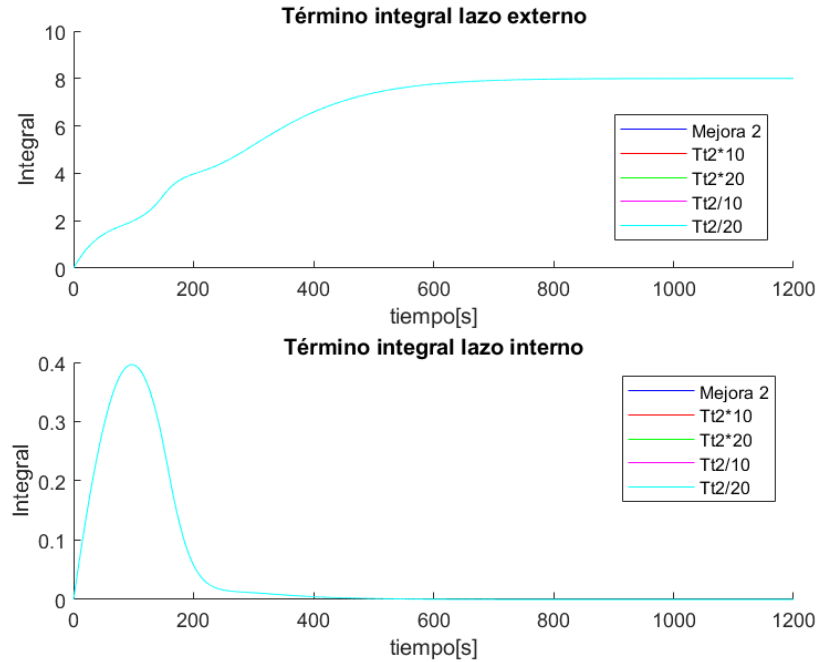


Figura 3.55: Integral para la variación de la constante de tracking del lazo externo de la segunda mejora para el sistema con cambio en la referencia

3.4 Evaluación de nuevas estrategias antiwindup

En los apartados anteriores, todas las mejoras que se han propuesto están basadas en el esquema back-calculation, que es el que se utiliza habitualmente para el antiwindup, pero el inconveniente que tiene este sistema es que genera un lazo de control interno que atenúa el efecto de la saturación paulatinamente. Siguiendo los consejos de otras técnicas para la mejora del esquema antiwindup [16], lo que se plantea es recalcular el valor de la integral, hacer un reset de la integral, para que instantáneamente el sistema se quede en modo lineal y no saturé. Esta idea se ha implementado en el ejemplo del integrador, para que se observe mejor el resultado, comparándose con el antiwindup por el método back-calculation.

Para implementar esta idea en Simulink, se ha seguido el siguiente procedimiento. En primer lugar, hay que pensar qué valor tiene que tomar la sumatoria del error para que el lazo interno no saturé, sino que se quede en el valor límite.

La ecuación que define el valor que tiene que adoptar la suma es la siguiente:

$$suma = u_{min} - K_p \cdot error$$

donde u_{min} corresponde con el límite inferior, ya que en el caso concreto que se estudia, el sistema está saturado por debajo.

Por lo tanto, para implementar esta idea en Simulink, es necesario reiniciar el integrador de forma que se quede justo en el valor límite cuando el sistema esté saturado. Para ello, se activa el reset del integrador, el cual tiene dos puertos, uno de los puertos es la operación suma y el otro define cuando interesa que sature, que para este caso coincide con un valor positivo de la resta del bloque de saturación. Además, para que la condición inicial del integrador sea cero, es necesario añadir un switch al reset del integrador, inicializando así la integral.

El esquema con el que se ha implementado el error recalculation se muestra en la Figura 3.56.

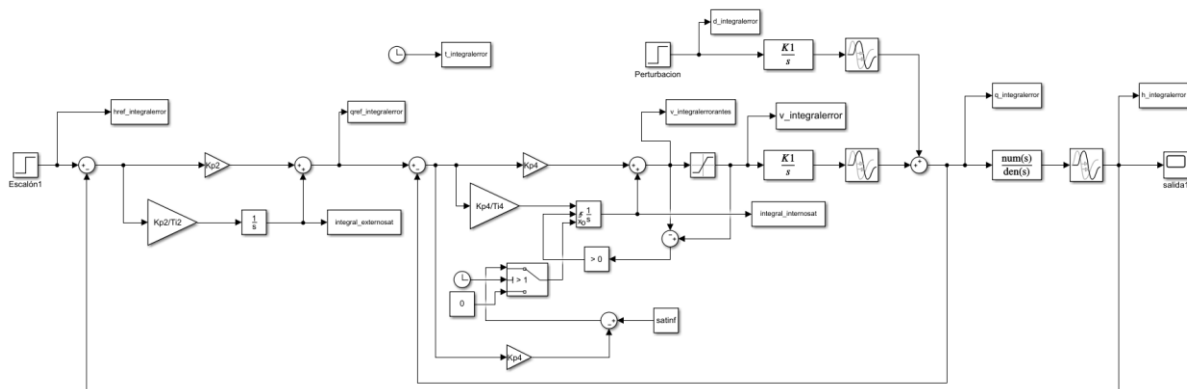


Figura 3.56: Diagrama de bloques de la implementación del método error recalculation en el lazo interno para un sistema con una dinámica de integrador en el lazo interno

En la Figura 3.57 se expone un aumento del esquema implementado para la dinámica del lazo interno.

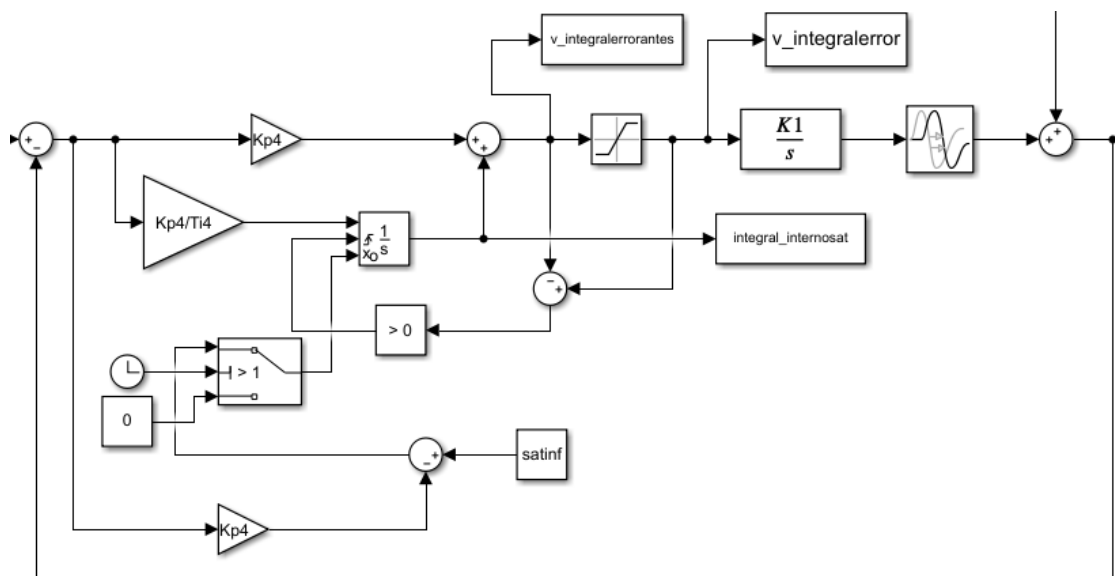


Figura 3.57: Aumento del esquema de implementación del error recalculation en el lazo interno.

Se quiere comparar el comportamiento del esquema propuesto con el esquema antiwindup por el método back-calculation, ya que es el que se ha utilizado para el resto de los ensayos. En la Figura 3.58 se presenta la comparativa de las respuestas de ambos esquemas antiwindup. Como se puede observar, la diferencia entre ambos métodos aparentemente no es visible, aunque el esquema propuesto realiza el antiwindup de manera instantánea, no por realimentación, por lo que debería salir antes de la saturación.

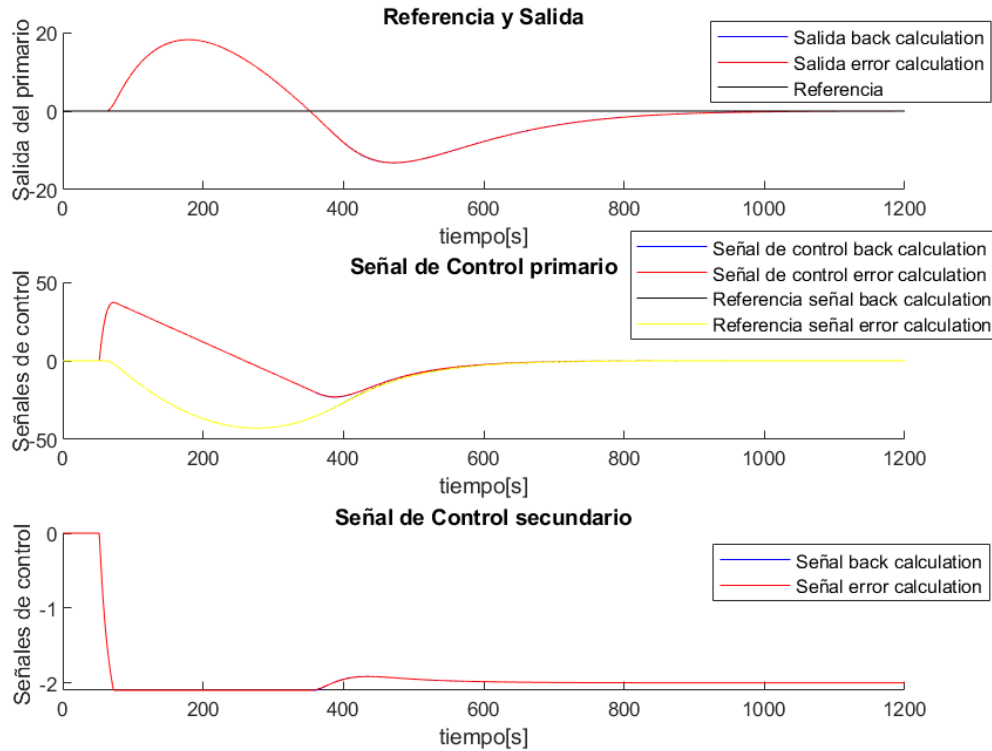


Figura 3.58: Comparativa de las respuestas de ambos métodos antiwindup

Se va a mostrar una comparativa de las respuestas de las integrales para ambos lazos, para ver si en esta se ve diferencia entre ambos esquemas. Esta gráfica se muestra en la Figura 3.59, donde se puede observar que el sistema sale antes de la saturación del lazo interno, para el nuevo esquema propuesto. Esto no se veía reflejado en la salida y las señales de control, ya que se satura durante un largo período de tiempo y al back-calculation le da tiempo a descargarse e irse al límite.

Otra manera de ver que con el nuevo método propuesto basado en el error recalculation se sale antes de la saturación, es representando la señal de control antes de la saturación. Esta señal se muestra en la Figura 3.60. En esta gráfica se ve como se sale antes de la saturación con el esquema error recalculation, mostrado en rojo.

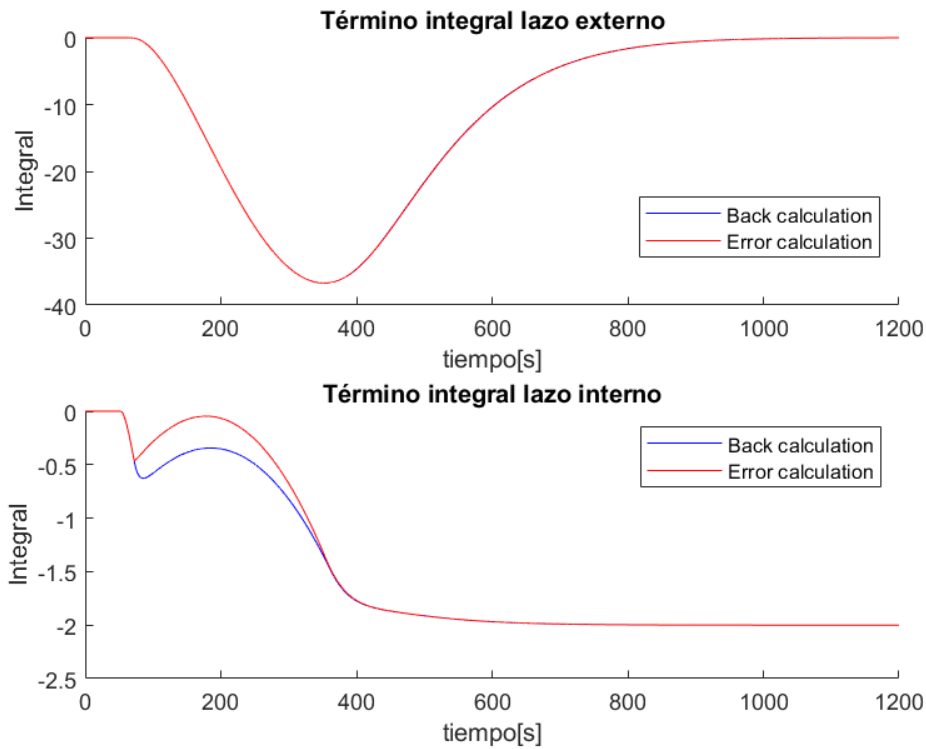


Figura 3.59: Comparativa del término integral para ambos métodos antiwindup

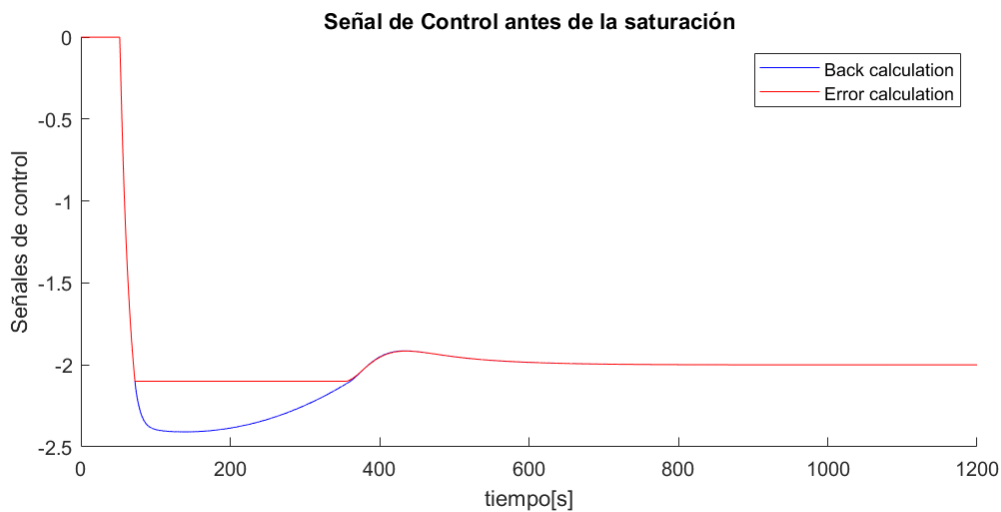


Figura 3.60: Señal de control antes de la saturación para ambos métodos antiwindup

Se puede apreciar que, el antiwindup propuesto, es lineal en todo momento y no pasa de los límites establecidos. Lo que se calcula es lo mismo que se le manda al sistema real, por lo que en ningún momento hay discrepancias. Esto no ocurre para el back-calculation, que puede tomar valores que pasen del límite establecido.

Para este método, se da el inconveniente de que no se han podido aplicar las mejoras de los ensayos anteriores, ya que no se conoce con claridad qué valor debe tener la integral del lazo externo.

4

Conclusiones

En el presente trabajo de fin de grado se han obtenido una serie de soluciones para atenuar el efecto de la saturación en los sistemas de control en cascada. Además, se han contemplado distintas dinámicas y así analizar distintos resultados. Para el rechazo de la perturbación se puede extraer la solución de que el esquema antiwindup en el lazo interno atenúa en mayor medida el efecto de la saturación, pero no evita que exista saturación en el lazo externo. Sin embargo, en las dos mejoras que se han propuesto sí se tiene en cuenta el efecto de la saturación en el lazo externo, por lo que se consiguen mejores resultados. Por otro lado, se ha analizado, como un cambio brusco de referencia en el lazo primario puede provocar igualmente saturación y se han aplicado las mismas soluciones propuestas para el rechazo de las perturbaciones. En este caso, las mejoras no hacen la dinámica más rápida, sino que la salida alcanza más tarde la referencia, con respecto al esquema antiwindup en el lazo interno, pero, sin embargo, si se obtiene un mayor rendimiento de control, por lo que se puede decir que las mejoras si ayudan en este ensayo a atenuar la saturación.

También se han analizado otras técnicas de antiwindup. Una de ellas (error recalculation) se ha implementado en Simulink mediante un diagrama de bloques y se ha comparado con la técnica back-calculation, obteniendo mejoría en la gráfica de la integral y la señal antes de la saturación. Como el sistema se encuentra saturado durante cierto tiempo, esta mejoría no se advierte en las demás respuestas del sistema.

El trabajo realizado abre la posibilidad a distintas líneas de estudio. Por ejemplo, otro estudio que es posible realizar es la implementación de los ensayos realizados en el esquema de control en cascada en paralelo, que es una alternativa al que se usa en este trabajo, el cual es en serie.

Por otro lado, siguiendo con la investigación de otras técnicas antiwindup, se podría intentar implementar las mejoras realizadas con el back-calculation con el nuevo método, y para ello habría que deducir que valor tendría que tomar la integral en el lazo externo.

Otra idea que se puede trabajar en el control en cascada a partir de lo expuesto en este trabajo es el estudio de las bandas proporcionales. Cuando la constante de tiempo de tracking toma un valor muy pequeño, esto genera efectos negativos. Aparentemente no afecta a las respuestas del sistema, pero, en ocasiones, en la señal de control aparecen bandas. Mientras que el sistema se encuentra saturado, la señal de control no sale de las bandas, una vez que el sistema deja de estar saturado, la curva se encuentra fuera de dichas bandas. Esto se podría implementar tanto con el esquema antiwindup como sin él. Sería interesante calcular analíticamente mediante unas ecuaciones los límites de las bandas y poder analizar estas bandas en ambos lazos del sistema de control en cascada.

Apéndices

Apéndices A

Scripts Matlab

En este apéndice se van a exponer todos los scripts de Matlab que se han elaborado para la obtención de los resultados. Los scripts facilitan la ejecución de las sentencias de MATLAB® y permiten simular los archivos de Simulink y efectuar comparativas entre las distintas simulaciones.

A.1 Rechazo perturbaciones. Primer orden

A.1.1 Comparación casos analizados

En el script que se presenta a continuación, se definen los valores principales y las funciones de transferencia, así como la sintonía de los controladores y el cálculo de parámetros, cuando el sistema de control en cascada está constituido por dos dinámicas de primer orden. Se simulan todos los diagramas correspondientes a los ensayos realizados, de manera que se permita comentar los ensayos que no se quieran mostrar para cada comparativa y así poder mostrar gráficamente, sólo los ensayos que se desean comparar para cada caso.

```
%TFG Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.  
%Marta Leal Rueda  
%Análisis de cascada en serie con primer orden  
clc  
clear all  
close all  
  
%VALORES INICIALES  
%-----  
tsim=1200;  
%tiempo escalón  
septime=0;  
iniciostep=0;  
finalstep=0;  
%tiempo perturbación
```

```

tpertur=50;
iniciopertur=0;
finalpertur=2;
%Valores saturación
satup=2;
satinf=-2.1;

%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
%-----
%Función transferencia lazo interno(secundario)
K1=2;
tau1=20;
tr1=2;
%Funcion de transferencia lazo externo(principal)
K2=1;
tau2=100;
tr2=10;

%CONTROLADORES
%-----
%Controlador lazo interno
tauc1=tau2/10;
Kp1=((1/K1)*(tau1/(tauc1+tr1)));
Ti1=tau1;
Tt1=sqrt(Ti1);
%Controlador lazo principal
tauc2=0.9*(tau2);
Kp2=((1/K2)*(tau2/(tauc2+(tr1+tr2))));
Ti2=tau2*0.9;
Tt2=sqrt(Ti2);
%Controlador sin cascada
Kp3=((1/K2)*(tau2/(tauc2+tr2)));
Ti3=tau2;

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_base.slx
sim cascada_serie_sat.slx
sim cascada_serie_satwindup.slx
sim cascada_serie_sinlazo.slx
sim cascada_serie_mejora1.slx
sim cascada_serie_mejora2.slx

%GRAFICAS
%-----
figure
%Salida y referencia
subplot(4,1,1);
title('Referencia y Salida')

```

```

xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida del primario');
hold on
plot(tiempo,href,'k');
% Cascada serie sin cascada
hold on
plot(tiempo_sin,hsinlazo,'g');
% Cascada serie
hold on
plot(tiempo,h,'b');
% Cascada serie saturación lazo interno
hold on
plot(t,hsat,'g');
% Cascada serie antiwindup lazo interno
hold on
plot(t_windup,hsat_windup,'m');

% Señal de control Caudal
%-----
subplot(4,1,2);
title('Señal de Control')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control del primario');
% Cascada serie
hold on
plot(tiempo,q,'b');
hold on
plot(tiempo,qref,'k');
% Sin cascada
hold on
plot(tiempo_sin,qsin,'g');
hold on
plot(tiempo_sin,qrefsin,'r');
% Cascada serie saturación lazo interno
hold on
plot(t,qsat,'g');
hold on
plot(t,qrefsat,'r');
% Cascada serie antiwindup lazo interno
hold on
plot(t_windup,qsat_windup,'m');
hold on
plot(t_windup,qrefsat_windup,'y');

% Perturbación
%-----
subplot(4,1,4);
title('Escalón perturbación')

```



```
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida perturbación');
hold on
plot(tiempo,d, 'k');

%GRAFICAS MEJORAS
%-----
Figure

%Salida y referencia
subplot(4,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida del primario');
hold on
plot(t_windup,hrefsat_windup,'k');
% Cascada serie antiwindup lazo interno
hold on
plot(t_windup,hsat_windup,'m');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_mejora1,hsat_mejora1,'b');
% Cascada serie mejora 2
hold on
plot(t_mejora2,hsat_mejora2,'r');

%Señal de control Caudal
subplot(4,1,2);
title('Señal de Control')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de Control del primario');
% Cascada serie antiwindup lazo interno
hold on
plot(t_windup, qsat_windup,'m');
hold on
plot(t_windup,qrefsat_windup,'y');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_mejora1,qsat_mejora1,'b');
hold on
plot(t_mejora1,qrefsat_mejora1,'k');
% Cascada serie mejora 2
hold on
plot(t_mejora2,qsat_mejora2,'r');
hold on
plot(t_mejora2,qrefsat_mejora2,'g');

%Señal de control válvula
subplot(4,1,3);
title('Señal de Control del secundario')
```

```

xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señal de Control del secundario');
% Cascada serie antiwindup lazo interno
hold on
plot(t_windup, vsat_windup, 'm');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_mejora1, vsat_mejora1, 'b');
% Cascada serie mejora 2
hold on
plot(t_mejora2, vsat_mejora2, 'r');

% Perturbación
subplot(4,1,4);
title('Escalón perturbación');
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida perturbación');
hold on
plot(t_windup, dsat_windup, 'k');

```

A.1.2 Comparación términos integrales

En este script se realiza la comparación de los términos integrales de ambos lazos para todos los casos analizados. Como las variables principales, las funciones de transferencia y los controladores son iguales que en el apartado anterior, el script se muestra a partir de la simulación de los archivos.

```

%TFG. Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
%Término integral del esquema de cascada para sistema de
primer orden
clc
close all
clear all

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_base_integral.slx
sim cascada_serie_base_integralsat.slx
sim cascada_serie_base_integralwindup.slx
sim cascada_serie_base_integralmejora1.slx
sim cascada_serie_base_integralmejora2.slx

%GRAFICAS
%-----
%INTEGRAL LAZO EXTERNO
subplot(2,1,1);
title('Término integral lazo externo')

```

```
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada base
hold on
plot(t_integral,t_integral_externo,'b');
%Integral cascada saturación
hold on
plot(t_integralsat,t_integral_externosat,'g');
%Integral cascada antiwindup
hold on
plot(t_integralwindup,t_integral_externowindup,'m');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integralmejora1,t_integral_externomejora1,'c');
%Integral cascada mejora 2
hold on
plot(t_integralmejora2,t_integral_externomejora2,'r');

%INTEGRAL LAZO INTERNO
subplot(2,1,2);
title('Término integral lazo interno')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');

%Integral cascada base
hold on
plot(t_integral,t_integral_interno,'b');
%Integral cascada saturación
hold on
plot(t_integralsat,t_integral_internosat,'g');
%Integral cascada antiwindup
hold on
plot(t_integralwindup,t_integral_internowindup,'m');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integralmejora1,t_integral_internomejora1,'c');
%Integral cascada mejora 2
hold on
plot(t_integralmejora2,t_integral_internomejora2,'r');
```

A.2 Rechazo perturbaciones. Integrador

A.2.1 Comparación casos analizados

En el script que se presenta a continuación, se definen los valores principales y las funciones de transferencia, así como la sintonía de los controladores y el cálculo de parámetros, cuando el sistema de control en cascada está constituido por una dinámica de integrador en el lazo interno y una de primer orden en el lazo externo. Se simulan todos los diagramas correspondientes a los ensayos realizados, de manera que se permita comentar los ensayos que no se quieran mostrar para cada comparativa y así poder exponer gráficamente, sólo los ensayos que se desean comparar para cada caso.

```
%TFG Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.

%Marta Leal Rueda
%Análisis de cascada en serie con primer orden y con
integrador
clc
clear all
close all

%VALORES INICIALES
%-----
tsim=1200;
%tiempo escalón
steptime=0;
iniciostep=0;
finalstep=0;
%tiempo perturbación
tpertur=50;
iniciopertur=0;
finalpertur=2;
%Valores saturación
satup=2;
satinf=-2.1;

%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
%-----
%Función transferencia lazo interno(secundario)
K1=2;
tau1=20;
tr1=2;
%Funcion de transferencia lazo externo(principal)
K2=1;
tau2=100;
tr2=10;
```

```

%CONTROLADORES
%-----
%Controlador lazo principal
tauc2=0.9*(tau2);
Kp2=((1/K2)*(tau2/(tauc2+(tr1+tr2))));
Ti2=tau2*0.9;
Tt2=sqrt(Ti2);
%Controlador integrador(SIMC)
Kp4=(1/K1)*(1/(tr1+tauc1));
Ti4=4*(tr1+tauc1);
Tt4=sqrt(Ti4);

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_baseint.slx
sim cascada_serie_satint.slx
sim cascada_serie_satintwindup.slx
sim cascada_serie_intmejora1.slx
sim cascada_serie_intmejora2.slx

%GRAFICAS
%-----
figure
%Salida y referencia
subplot(4,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida del primario');
% Cascada serie integrador lazo interno
hold on
plot(t_int,href_int,'k');
hold on
plot(t_int,h_int,'b');
% Cascada serie integrador lazo interno
hold on
plot(t_int2,h_int2,'c');
% Cascada serie saturación integrador lazo interno
hold on
plot(t_satint,hsat_int,'g');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_satintwindup,hsat_intwindup,'m');

%Señal de control Caudal
subplot(4,1,2);
title('Señal de Control')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control del primario');
% Cascada serie integrador lazo interno
hold on

```

```

plot(t_int,q_int,'b');
hold on
plot(t_int,qref_int,'k');
% Cascada serie saturación integrador lazo interno
hold on
plot(t_satint, qsat_int,'g');
hold on
plot(t_satint,qrefsat_int,'r');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_satintwindup, qsat_intwindup,'m');
hold on
plot(t_satintwindup,qrefsat_intwindup,'y');

% Señal de control válvula
subplot(4,1,3);
title('Señal de control secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señal de control del secundario');
% Cascada serie integrador
hold on
plot(t_int,v_int,'b');
% Cascada serie integrador saturación lazo interno
hold on
plot(t_satint,vsat_int,'g');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_satintwindup,vsat_intwindup,'m');

% Perturbación
subplot(4,1,4);
title('Escalón perturbación')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida perturbación');
hold on
plot(t_int,d_int,'k');

% GRAFICAS MEJORAS
%-----
figure
% Salida y referencia
subplot(4,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida del primario');
hold on
plot(t_satintwindup,hrefsat_intwindup,'k');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on

```

```
plot(t_satintwindup,hsat_intwindup,'m');
% Cascada integrador mejora 1
hold on
plot(t_intmejora1,hsat_intmejora1,'b');
% Cascada integrador mejora 2
hold on
plot(t_intmejora2,hsat_intmejora2,'r');

% Señal de control Caudal
subplot(4,1,2);
title('Señal de Control del primario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_satintwindup,qsat_intwindup,'m');
hold on
plot(t_satintwindup,qrefsat_intwindup,'y');
% Cascada serie antiwindup integrador mejora 1
hold on
plot(t_intmejora1,qsat_intmejora1,'b');
hold on
plot(t_intmejora1,qrefsat_intmejora1,'k');
% Cascada serie antiwindup integrador mejora 2
hold on
plot(t_intmejora2,qsat_intmejora2,'r');
hold on
plot(t_intmejora2,qrefsat_intmejora2,'g');

% Señal de control válvula
subplot(4,1,3);
title('Señal de Control del secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_satintwindup,vsat_intwindup,'m');
% Cascada serie integrador mejora 1
hold on
plot(t_intmejora1,vsat_intmejora1,'b');
% Cascada serie integrador mejora 2
hold on
plot(t_intmejora2,vsat_intmejora2,'r');
% Perturbación
subplot(4,1,4);
title('Escalón perturbación')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida perturbación');
hold on
plot(t_intmejora1,dsat_intmejora1,'k');
```

A.2.2 Comparación términos integrales

Se procede a enseñar el script referente a la representación del término integral de ambos lazos para cada uno de los casos analizados. Como las variables ya se han definido en el script anterior, en este solo se muestra el script a partir de las simulaciones de los archivos.

```

%TFG Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
clc
close all
clear all

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_baseint_integral.slx
sim cascada_serie_baseint_integralsat.slx
sim cascada_serie_baseint_integralwindup.slx
sim cascada_serie_baseint_integralmejora1.slx
sim cascada_serie_baseint_integralmejora2.slx

%GRAFICAS
%-----
%INTEGRAL LAZO EXTERNO
subplot(2,1,1);
title('Término integral lazo externo')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada base
%hold on
%plot(t_integral,integral_externo,'b');
%Integral cascada saturación
%hold on
%plot(t_integral,integral_externosat,'g');
%Integral cascada antiwindup
hold on
plot(t_integral,integral_externowindup,'m');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integral,integral_externomejora1,'b');
%Integral cascada mejora 2
hold on
plot(t_integral,integral_externomejora2,'r');

%INTEGRAL LAZO INTERNO
subplot(2,1,2);
title('Término integral lazo interno')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');

```



```

%Integral cascada base
%hold on
%plot(t_integral,integral_interno,'b');
%Integral cascada saturación
%hold on
%plot(t_integral,integral_internosat,'g');
%Integral cascada antiwindup
hold on
plot(t_integral,integral_internowindup,'m');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integral,integral_internomejora1,'b');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integral,integral_internomejora2,'r');

```

A.2.3 Variación constante de tiempo de tracking

Se va a mostrar el script donde se analiza cada una de las mejoras para un barrido de valores de la constante de tiempo de tracking del lazo externo. Se va a adjuntar el script para una sola de las mejoras, ya que el desarrollo es similar para ambas.

```

%Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
%Variación de la Tt2 en la mejora 1
clc
clear all
close all

%VALORES INICIALES
tsim=1200;
%tiempo escalón
steptime=0;
iniciostep=0;
finalstep=0;
%tiempo perturbación
tpertur=50;
iniciopertur=0;

finalpertur=2;
%Valores saturación
satup=2;
satinf=-2.1;

%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
%-----

```

```

%Función transferencia lazo interno
K1=2;
tau1=20;
tr1=2;
%Funcion de transferencia lazo principal
K2=1;
tau2=100;
tr2=10;

%CONTROLADORES
%-----
%Controlador lazo interno
tauc1=tau2/10;
%Controlador integrador (SIMC)
Kp4=(1/K1)*(1/(tr1+tauc1));
Ti4=4*(tr1+tauc1);
Tt4=sqrt(Ti4);
%Controlador lazo principal
tauc2=0.9*(tau2);
Kp2=((1/K2)*(tau2/(tauc2+(tr1+tr2))));
Ti2=tau2*0.9;
Tt=[sqrt(Ti2) sqrt(Ti2)*10 sqrt(Ti2)*20 sqrt(Ti2)/10
sqrt(Ti2)/20];
%Tt2=sqrt(Ti2);

for Tt2=Tt
    sim cascada_serie_intmejora1.slx

%GRAFICAS
figure
%Salida y referencia
subplot(4,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida controlador primario');
hold on
plot(t_intmejora1,hrefsat_intmejora1,'k');
%Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_intmejora1,hsat_intmejora1);

%Señal de control Caudal
subplot(4,1,2);
title('Señal Control del primario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
%Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_intmejora1,qsat_intmejora1);

```

```

hold on
plot(t_intmejora1,qrefsat_intmejora1);

%Señal de control válvula
subplot(4,1,3);
title('Señal de control del secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_intmejora1,vsat_intmejora1);

%Perturbación
subplot(4,1,4);
title('Escalón perturbación')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida perturbación');
hold on
plot(t_intmejora1,dsat_intmejora1,'k');
end

for Tt2=Tt
    sim cascada_serie_baseint_integralmejora1.slx
%GRAFICAS INTEGRAL
%-----
%INTEGRAL LAZO EXTERNO
subplot(2,1,1);
title('Término integral lazo externo')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integral,integral_externomejora1);

%INTEGRAL LAZO INTERNO
subplot(2,1,2);
title('Término integral lazo interno')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_integral,integral_internomejora1);
end

```

A.3 Cambio de referencia

A.3.1 Comparación casos analizados

Para el caso en el que se modifica la referencia y no se produce perturbación en el lazo interno se muestra el script en el que se describen los valores iniciales, se simulan los distintos diagramas de bloques y se realiza la comparación gráfica de dichos ensayos.

```
Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
%Análisis de sistema sin perturbación y con escalón
grande en la referencia
clc
clear all
close all

%VALORES INICIALES
%-----
tsim=1200;
%tiempo escalón
steptime=0;
iniciostep=0;
finalstep=8;
%tiempo perturbación
tpertur=50;
iniciopertur=0;
finalpertur=0;
%Valores saturación
satup=0.04;
satinf=-2.1;

%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
%-----
%Función transferencia lazo interno
K1=2;
tau1=20;
tr1=2;
%Funcion de transferencia lazo principal
K2=1;
tau2=100;
tr2=10;
%CONTROLADORES
%-----
%Controlador lazo interno (integrador)
tauc1=tau2/10;
Kp4=(1/K1)*(1/(tr1+tauc1));
Ti4=4*(tr1+tauc1);
Tt4=sqrt(Ti4)
```

```

%Controlador lazo principal
tauc2=0.9*(tau2);
Kp2=((1/K2)*(tau2/(tauc2+(tr1+tr2))));
Ti2=tau2*0.9;
Tt2=sqrt(Ti2);

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_baseint2.slx
sim cascada_serie_baseint2sat.slx
sim cascada_serie_baseint2windup.slx
sim cascada_serie_baseint2windup.slx
sim cascada_serie_baseint2mejora1.slx
sim cascada_serie_baseint2mejora2.slx

%GRAFICAS
%-----
figure
%Salida y referencia
subplot(3,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida del primario');
hold on
plot(t_int2,href_int2,'k');
%Cascada serie integrador lazo interno
hold on
plot(t_int2,h_int2,'b');
%Cascada serie saturación lazo interno
hold on
plot(t_int2sat,h_int2sat,'g');
%Cascada serie antiwindup lazo interno
hold on
plot(t_int2windup,h_int2windup,'m');

%Señal de control Caudal
subplot(3,1,2);
title('Señal de Control')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control del primario');
%Cascada serie integrador lazo interno escalón grande
hold on
plot(t_int2,q_int2,'b');
hold on
plot(t_int2,qref_int2,'k');
%Cascada serie saturación lazo interno escalón grande
hold on
plot(t_int2sat,q_int2sat,'g');
hold on

```

```

plot(t_int2sat,qref_int2sat,'r');
% Cascada serie antiwindup lazo interno escalón grande
hold on
plot(t_int2windup,q_int2windup,'m');
hold on
plot(t_int2windup,qref_int2windup,'y');

% Señal de control válvula
subplot(3,1,3);
title('Señal de control secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señal de control del secundario');
% Cascada serie integrador escalón grande
hold on
plot(t_int2,v_int2,'b');
% Cascada serie saturación escalón grande
hold on
plot(t_int2sat,v_int2sat,'g');
% Cascada serie antiwindup escalón grande
hold on
plot(t_int2windup,v_int2windup,'m');

% GRAFICAS MEJORAS
%-----
figure
% Salida y referencia
subplot(3,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida del primario');
hold on
plot(t_int2windup,href_int2windup,'k');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_int2windup,h_int2windup,'m');
% Cascada integrador mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,h_int2mejora1,'b');
% Cascada integrador mejora 2
hold on
plot(t_int2mejora2,h_int2mejora2,'r');

% Señal de control Caudal
subplot(3,1,2);
title('Señal de Control del primario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_int2windup, q_int2windup,'m');

```

```

hold on
plot(t_int2windup,qref_int2windup,'y');
% Cascada serie antiwindup integrador mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1, q_int2mejora1,'b');
hold on
plot(t_int2mejora1,qref_int2mejora1,'k');
% Cascada serie antiwindup integrador mejora 2
hold on
plot(t_int2mejora2, q_int2mejora2,'r');
hold on
plot(t_int2mejora2,qref_int2mejora2,'g');

% Señal de control válvula
subplot(3,1,3);
title('Señal de Control del secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_int2windup,v_int2windup,'m');
% Cascada serie integrador mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,v_int2mejora1,'b');
% Cascada serie integrador mejora 2
hold on
plot(t_int2mejora2,v_int2mejora2,'r');

```

A.3.2 Comparación términos integrales

Se procede a enseñar el script referente a la representación del término integral de ambos lazos para cada uno de los casos analizados. No se va a representar el valor de las variables iniciales, cálculo de función de transferencias y de controladores, ya que coincide con lo descrito en el script anterior.

```

%Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
%Termino integral del sistema con escalón grande en la
referencia
clc
close all
clear all

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_baseint2integral.slx
sim cascada_serie_baseint2satintegral.slx
sim cascada_serie_baseint2windupintegral.slx

```

```

sim cascada_serie_baseint2mejora1.slx
sim cascada_serie_baseint2mejora2.slx

%GRAFICAS
%-----
%INTEGRAL LAZO EXTERNO
%-----
subplot(2,1,1);
title('Término integral lazo externo')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada base
%hold on
%plot(t_integral,integral_externo,'b');
%Integral cascada saturación
%hold on
%plot(t_integral,integral_externosat,'g');
%Integral cascada antiwindup
hold on
plot(t_integral,integral_externowindup,'m');
%Integral cascada mejora 1
%hold on
%plot(t_int2mejora1,integral_externomejora1,'b');
%Integral cascada mejora 2
hold on
plot(t_int2mejora2,integral_externomejora2,'r');

%INTEGRAL LAZO INTERNO
%-----
subplot(2,1,2);
title('Término integral lazo interno')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada base
%hold on
%plot(t_integral,integral_interno,'b');
%Integral cascada saturación
%hold on
%plot(t_integral,integral_internosat,'g');
%Integral cascada antiwindup
hold on
plot(t_integral,integral_internowindup,'m');
%Integral cascada mejora 1
%hold on
%plot(t_int2mejora1,integral_internomejora1,'b');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora2,integral_internomejora2,'r');

```


A.3.3 Variación constante de tiempo de tracking

Se va a mostrar el script donde se analiza cada una de las mejoras para un barrido de valores de la constante de tiempo de tracking del lazo externo. Se va a adjuntar el script para una sola de las mejoras, ya que es exactamente igual para ambas.

```
%Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
%Variación de la Tt2 en la mejora 1
clc
clear all
close all

%VALORES INICIALES
%-----
tsim=1200;
%tiempo escalón
steptime=0;
iniciostep=0;
finalstep=8;
%tiempo perturbación
tpertur=0;
iniciopertur=0;
finalpertur=0;
%Valores saturación
satup=0.04;
satinf=-2.1;

%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
%-----
%Función transferencia lazo interno
K1=2;
tau1=20;
tr1=2;
%Funcion de transferencia lazo principal
K2=1;
tau2=100;
tr2=10;

%CONTROLADORES
%-----
%Controlador lazo interno(integrador)
tauc1=tau2/10;
Kp4=(1/K1)*(1/(tr1+tauc1));
Ti4=4*(tr1+tauc1);
Tt4=sqrt(Ti4);
%Controlador lazo principal
tauc2=0.9*(tau2);
```

```

Kp2=((1/K2)*(tau2/(tauc2+(tr1+tr2))));
Ti2=tau2*0.9;
Tt=[sqrt(Ti2) sqrt(Ti2)*10 sqrt(Ti2)*20 sqrt(Ti2)/10
sqrt(Ti2)/20];
%Tt2=sqrt(Ti2);

for Tt2=Tt
    sim cascada_serie_baseint2mejora1.slx

%GRAFICAS
%-----
%Salida y referencia
subplot(3,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Salida controlador primario');
hold on

plot(t_int2mejora1,href_int2mejora1,'k');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,h_int2mejora1);

%Señal de control Caudal
subplot(3,1,2);
title('Señal Control del primario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,q_int2mejora1);
hold on
plot(t_int2mejora1,qref_int2mejora1);

%Señal de control válvula
subplot(3,1,3);
title('Señal de control del secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
% Cascada serie mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,v_int2mejora1);
end

for Tt2=Tt
    sim cascada_serie_baseint2mejora1.slx

```

```

%GRAFICAS
%-----
%INTEGRAL LAZO EXTERNO
%-----
subplot(2,1,1);
title('Término integral lazo externo')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,integral_externomejora1);

%INTEGRAL LAZO INTERNO
%-----
subplot(2,1,2);
title('Término integral lazo interno')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral cascada mejora 1
hold on
plot(t_int2mejora1,integral_internomejora1);
end

```

A.4 Evaluación de nuevas estrategias antiwindup

Es este script se muestra la implementación del error recalculation, y la comparación de este con el back-calculation. Se definen todos los parámetros necesarios, así como los cálculos de los controladores.

```

%TFG Análisis y sintonía de esquemas de control en cascada.
%Marta Leal Rueda
%Análisis de cascada en serie con primer orden y con
integrador
clc
clear all
close all

%VALORES INICIALES
%-----
tsim=1200;
%tiempo escalón
steptime=0;
iniciostep=0;
finalstep=0;
%tiempo perturbación
tpertur=50;

```

```

iniciopertur=0;
finalpertur=2;
%Valores saturación
satup=2;
satinf=-2.1;

%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
%-----
%Función transferencia lazo interno(secundario)
K1=2;
tau1=20;
tr1=2;
%Funcion de transferencia lazo externo(principal)
K2=1;
tau2=100;
tr2=10;

%CONTROLADORES
%-----
%Controlador lazo interno
tauc1=tau2/10;
Kp1=((1/K1)*(tau1/(tauc1+tr1)));
Ti1=tau1;
Tt1=sqrt(Ti1);
%Controlador lazo principal
tauc2=0.9*(tau2);
Kp2=((1/K2)*(tau2/(tauc2+(tr1+tr2))));
Ti2=tau2*0.9;
Tt2=sqrt(Ti2);
%Controlador sin cascada
Kp3=((1/K2)*(tau2/(tau2+tr2)));
Ti3=tau2;
%Controlador integrador(SIMC)
Kp4=(1/K1)*(1/(tr1+tauc1));
Ti4=4*(tr1+tauc1);
Tt4=sqrt(Ti4);

%SIMULACIONES
%-----
sim cascada_serie_baseint_errorcalcultation.slx
sim cascada_serie_baseint_integralwindup.slx

%GRAFICAS
%-----
figure
%Salida y referencia
subplot(3,1,1);
title('Referencia y Salida')
xlabel('tiempo[s]')

```

```

ylabel('Salida del primario');
%Back calculation
hold on
plot(t_integralwindup,h_integralwindup,'b');
%Error recalculation
hold on
plot(t_integralerror,h_integralerror,'r');
hold on
plot(t_integralerror,href_integralerror,'k');

%Señal de control Caudal
subplot(3,1,2);
title('Señal de Control')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control del primario');
% Cascada serie antiwindup integrador lazo interno
hold on
plot(t_integralwindup,q_integralwindup,'b');
hold on
plot(t_integralerror,q_integralerror,'r');
hold on
plot(t_integralwindup,qref_integralwindup,'k');
hold on
plot(t_integralerror,qref_integralerror,'y');

%Señal de control válvula
subplot(3,1,3);
title('Señal de control secundario')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señal de control del secundario');
%Back calculation
hold on
plot(t_integralwindup,v_integralwindup,'b');
hold on
plot(t_integralerror,v_integralerror,'r');

figure
%INTEGRAL LAZO EXTERNO
%-----
subplot(2,1,1);
title('Término integral lazo externo')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral antiwindup back calculation
hold on
plot(t_integralwindup,integral_externowindup,'b');
%Integral antiwindup error calculation
hold on
plot(t_integralerror,integral_externosat,'r');

```

```
%INTEGRAL LAZO INTERNO
%-----
subplot(2,1,2);
title('Término integral lazo interno')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Integral');
%Integral antiwindup back calculation
hold on
plot(t_integralwindup,integral_internowindup,'b');
%Integral antiwindup error calculation
hold on
plot(t_integralerror,integral_internosat,'r');

figure
subplot
title('Señal de Control antes de la saturación')
xlabel('tiempo[s]');
ylabel('Señales de control');
%Back calculation
hold on
plot(t_integralwindup,v_integralwindupantes,'b');
>Error calculation
hold on
plot(t_integralerror,v_integralerrorantes,'r');
```


Bibliografía

- [1] M. Berenguel y J.L. Guzmán. *Tema 1. Control PID*. Trabajo presentado en clase de Técnicas de Control Industrial, Grado en Ingeniería Electrónica Industrial, Universidad de Almería, 2018.
- [2] M. Berenguel y J.L. Guzmán. *Tema 2. Control con variables auxiliares y de procesos con tiempo muerto*. Trabajo presentado en clase de Técnicas de Control Industrial, Grado en Ingeniería Electrónica Industrial, Universidad de Almería, 2018.
- [3] K.J. Aström y T. Häggglund. *Advanced PID Control*. ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC 27709, 2005.
- [4] Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. *Tema 2. Análisis de sistemas dinámicos continuos*, Departamento de Informática, Universidad de Almería, 2014.
- [5] Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. *Tema 3. Diseño de controladores de sistemas continuos*, Departamento de Informática, Universidad de Almería, 2014.
- [6] S. Skogestad. *Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning*. Journal of Process Control, 13(2003), 291-309, 2003.
- [7] K.J. Åström y T. Häggglund. *Control PID avanzado*. Pearson Educación S.A., 2009.
- [8] T. Häggglund. *Signal filtering in PID control*. En IFAC conference on Advances in PID Control (PID12), 2012.

-
- [9] *Descripción del producto MATLAB- MATLAB & Simulink- MathWorks* España. Recuperado el 15 de noviembre de 2019, de https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html, 2019.
- [10] *Simulink Documentation- MathWorks España*. Recuperado el 15 de noviembre de 2019, de <https://es.mathworks.com/help/simulink/index.html>, 2019.
- [11] R. Franks y C. Worley. *Quantitative Analysis of Cascade Control*. Industrial And Engineering Chemistry, 48(6), 1074-1079, 1956.
- [12] Y.Lee, M.Lee y S. Park. *PID Controller Tuning To Obtain Desired Closed Loop Responses*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 37(5), 1859-1865, 1998.
- [13] R. Lestage, A. Formerleau y A. Desbiens. *Improved constrained cascade control for parallel processes*. Control Engineering Practice, 7(1999), 969-974, 1999.
- [14] R. Vilanova y O. Arrieta. *PID tuning for cascade control system design* Telecommunication and System Engineering Department, Universitat Autònoma de Barcelona, 2008.
- [15] V.M. Alfaro, R.Vilanova y O. Arrieta. *Two-Degree-of-Freedom PI/PID Tuning Approach for smooth Control on Cascade Control Systems*. Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 2008.
- [16] L. Sivlia, R. Flesch y J. Normey-Rico. *Analysis of Anti-windup Techniques in PID Control of Processes with Measurement Noise*. 3rd IFAC Conference on Advances in ProportionalIntegral-Derivative Control, Ghent, Belgium, May 9-11, 2018.

El control en cascada es uno de los métodos más exitosos para mejorar el rendimiento del control de un lazo único frente a rechazo a perturbaciones no medibles o reducción de efecto de no linealidades sobre la variable principal del proceso. Puede mejorar drásticamente el rendimiento de las estrategias de control, disminuyendo tanto la desviación máxima como el error integral para las respuestas a una perturbación. La combinación de facilidad de implementación y mejora del rendimiento de control ha provocado la aplicación generalizada de control en cascada durante muchas décadas.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) consiste en analizar cómo se distorsiona el sistema en ambos lazos de control bajo el efecto de la saturación y se incluirán mecanismos de saturación de efecto integral con el fin de que la saturación afecte al sistema lo mínimo posible. Para este fin, en primer lugar, se ha estudiado el sistema de control en cascada para el rechazo a perturbaciones, utilizando dos dinámicas distintas (primer orden con retardo e integrador con retardo en el lazo interno). Se ha provocado la saturación en el lazo interno y se ha comprobado cómo afecta al lazo externo. Para atenuar la saturación en ambos lazos, se proponen una serie de soluciones, que parten de la idea de que, para la salida de la saturación, se debe avisar al lazo externo de que satura, aspecto que no se plantea en las estrategias de control que se han revisado con anterioridad. Una vez que se ha analizado para el rechazo de perturbaciones, se propone realizar el mismo estudio en un sistema que no esté sometido a perturbaciones y que la saturación sea provocada por una gran demanda en el lazo primario, ya que este es un caso que se puede dar en la práctica. Para finalizar, se ha investigado en mejoras del esquema antiwindup y se ha aplicado una propuesta de esquema, comparándolo con el más utilizado en la industria.

Palabras clave: Control en Cascada, Control PID, perturbaciones.

