



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniera en Automática

Autora

Alicia Revilla Navarro

Tutores

MSc. Luisa Villafruela Loperena

Dr.C. Leonardo Peña Pupo

Noviembre, 2023



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática**

TRABAJO DE DIPLOMA

Título

**Evaluación de controladores en procesos con dinámica
compleja.**

Autora

Alicia Revilla Navarro

Tutores

MSc. Luisa Villafruela Loperena

Dr. C. Leonardo Peña Pupo

Noviembre, 2023



Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime convenientes, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Tutor

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Carrera

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Departamento

Fecha

Dedicatoria

A mi abuelo Roberto, que contribuyó a mi formación desde pequeña y dedicó su vida a mi formación, sin escatimar sacrificios; con el anhelo de verme convertida algún día en profesional y presenciar este sueño.

Agradecimientos

A Dios, por su infinita bondad y misericordia para conmigo.

A mi esposo, por su comprensión y apoyo en todo este proceso.

A mis padres, por su preocupación, cuidado y acompañamiento.

A mis abuelos, por sus consejos y motivación para seguir adelante.

A mis tutores, por poner sus conocimientos a mi disposición y encontrar siempre un huequito en su apretada agenda para atenderme.

A mis compañeros de aula, por la ayuda brindada en el transcurso de la carrera y empeño a pesar de las dificultades.

A mis familiares y amigos, por el apoyo brindado siempre en el momento necesario.

A todas las personas, que de una manera u otra han contribuido en la realización de este trabajo y en mi formación personal y profesional.

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

IMC: Control por Modelo Interno.

m: Horizonte de control

MPC: Controlador de Modelo de Control Predictivo o Control Predictivo.

p: Horizonte de predicción.

PID: Controlador Proporcional, Integral, Derivativo.

Listado de imágenes

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas	I
Listado de imágenes	II
Listado de tablas	V
Resumen.....	VI
<i>Abstract</i>	VII
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. Fundamentación teórica del comportamiento de los sistemas de fase no mínima.....	7
1.1 Caracterización de los sistemas de fase no mínima.....	7
Figura 1.1. Sistema con respuesta inversa	8
1.1.1 Características dinámicas de sistemas con respuesta inversa.....	8
Figura 1.2 Dos sistemas de primer orden con dinámicas opuestas	9
Figura 1.3 Respuesta ante una señal paso de dos sistemas con dinámicas opuestas, ganancia positiva	9
1.1.2 Comportamiento dinámico del sistema con un único cero en el semiplano derecho.	10
1.1.3 Ángulo de fase de un sistema con respuesta inversa.....	12
1.1.4 Características adicionales de la respuesta al paso unitario	13
Figura 1.4 Respuesta del sistema al adicionar: a) un polo, b) un cero, c) un cero y un polo	14
1.2 Estrategias de control para sistemas de fase no mínima.....	15
1.2.1 PID Clásico.	15
Figura 1.5 Esquema de control a lazo cerrado.....	15
Figura 1.6. Esquema del lazo cerrado con controlador PID	17
Figura 1.7. Diagrama de bloques de un PID.	17
1.2.2 Estado del arte de algoritmos basados en modelos predictivos.....	18
1.2.3 Controlador por Modelo Interno (IMC).	19

Tabla 1.1. Reglas de sintonía basadas en IMC para controladores PI y PID ideales y PID con filtro para un sistema de primer orden con retardo.	20
Tabla 1.2. Reglas de sintonía IMC-PID para plantas de primer y segundo orden sin integrador y con cero de fase no mínima $\beta > 0$	20
1.2.3.1 Configuración del controlador.....	21
Figura 1.8 Esquema de control del IMC	22
1.2.3.2 Procedimiento de diseño del control por el modelo interno. [49]22	
Figura 1.9. Compensador por Modelo Interno mediante la inversión de la parte invertible del modelo de proceso.....	23
1.2.3.3 Metodología de diseño	23
1.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo.....	24
Figura 1.10 Diagrama de bloques general para la implementación del MPC.	25
Figura 1.11 Metodología del MPC.....	26
1.2.4.1 Funcionamiento del MPC	30
Figura 1.12 Esquema del control por MPC.....	30
1.2.4.2 Optimización.....	30
Figura 1.13. Implementación de un control MPC en un reactor.....	31
Conclusiones parciales	32
CAPITULO 2. Implementación de los algoritmos PID, IMC y MPC.....	34
2.1 Características del modelo a implementar	34
Figura 2.1 Diagrama de polos y ceros del sistema a analizar	35
Figura 2.2 Diagrama de Nyquist para el modelo dado.	35
2.1.2 Diseño de las estrategias de control para sistema de fase no mínima	36
Figura 2.3 Diagrama en bloques del sistema SISO correspondiente a la ecuación 2.1	36

Figura 2.4 Diagrama de Bode donde se visualiza los valores aproximados a la frecuencia de corte resultante	37
Figura 2.5 Respuesta del sistema ante un escalón en la entrada correspondiente al controlador PID.	38
Figura 2.6 Diagrama de bloques del control IMC.	39
Figura 2.7 Comportamiento usando el controlador IMC	39
Tabla 2.1 MPC para el modelo correspondiente a la ecuación 2.1, ante cambio en la referencia.	40
Figura 2.8 Diagrama en bloques del control MPC, teniendo en cuenta el modelo de estudio.	40
Figura 2.9 Comportamiento del controlador MPC con los parámetros correspondientes a la tabla 2.1.....	41
Tabla 2.2 Parámetros del MPC ante cambios en m y p.	41
Figura 2.10 Comportamiento del controlador ante la variación de los parámetros de la tabla 2.2 respectivamente.....	42
2.1.3 Resultados de las simulaciones.....	43
Figura 2.11 Diagrama en bloques de las dos técnicas de control estudiadas, PID, IMC y MPC.....	43
Figura 2.12 Salidas correspondientes a los controladores PID, IMC y MPC.	44
Figura 2.13 Relación entre los errores de cada técnica implementada con el modelo dado.	45
Tabla 2.3 Comparación entre las estrategias de control aplicadas.	46
Conclusiones parciales	46
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFIA	50

Listado de tablas

Tabla 1.1. Reglas de sintonía basadas en IMC para controladores PI y PID ideales y PID con filtro para un sistema de primer orden con retardo.	20
Tabla 1.2. Reglas de sintonía IMC-PID para plantas de primer y segundo orden sin integrador y con cero de fase no mínima $\beta > 0$	20
Tabla 2.1 MPC para el modelo correspondiente a la ecuación 2.1, ante cambio en la referencia.	40
Tabla 2.2 Parámetros del MPC ante cambios en m y p.	41
Tabla 2.3 Comparación entre las estrategias de control aplicadas.	46

Resumen

Los fenómenos de respuesta inversa y retraso de transporte son comunes en el control de procesos industriales y tienen un impacto significativo en la eficiencia y estabilidad del sistema. Muchos de los procesos que encontramos en la industria presentan estos fenómenos, sin embargo, los algoritmos de control que se suelen impartir en el pregrado no tienen en cuenta las características de estos sistemas. El presente trabajo analiza los algoritmos más empleados en el control de procesos que presentan un comportamiento dinámico complejo, inestable, de fase no-mínima y sistemas con retardos. Se refiere, el estado del arte a partir de publicaciones científicas comprendidas entre los años 1980 a la actualidad, indexadas en bases de prestigio internacional para esta área de investigación. Siguiendo las tendencias internacionales, se propone el uso del Método de Control Predictivo (MPC) como tipo de control ideal en el manejo de dichas restricciones de una manera sistemática durante el diseño del modelo de la planta para lograr un buen compromiso con las características de funcionamiento del controlador. Se realiza el diseño y simulación, utilizando las estrategias PID, y Control Predictivo basado en Modelo, aplicadas a los casos de estudio mediante la herramienta de programación Matlab. Esta propuesta contribuye a demostrar la superioridad del MPC ante otros algoritmos generalizados y su fiabilidad para ser implementado en el efecto de las perturbaciones, permitiendo al controlador conducir la salida a la trayectoria de referencia deseada, en aras de elevar la eficiencia y el rendimiento del proceso.

Palabras claves: Control por modelo predictivo, Procesos con respuesta inversa, Sistemas con dinámica compleja, Sistemas con fase no mínima.

Abstract

Inverse response and transport delay phenomena are common in industrial process control and have a significant impact on system efficiency and stability. Many of the processes that we find in the industry present these phenomena, however, the control algorithms that are usually taught in undergraduate studies do not take into account the characteristics of these systems. This report analyzes the most widely used algorithms in the control of processes that exhibit complex, unstable, non-minimum phase dynamic behavior and systems with delays. It refers to the state of the art based on scientific publications from the 1980s to the present, indexed in databases of international prestige for this area of research. Following international trends, the use of the Predictive Control Method (CPM) is proposed as the ideal type of control in the management of such constraints in a systematic way during the design of the plant model to achieve a good compromise with the operating characteristics of the controller. The design and simulation are carried out, using PID and Model-Based Predictive Control strategies, applied to the case studies using the Matlab programming tool. This proposal contributes to demonstrate the superiority of the MPC over other generalized algorithms and its reliability to be implemented in the effect of perturbations, allowing the controller to drive the output to the desired reference path, in order to increase the efficiency and performance of the process.

Key-words: *Predictive Model Control, Inverse Response Processes, Systems with Complex Dynamics, Systems with No Minimum Phase.*

ÍNDICE

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas	I
Listado de imágenes	II
Listado de tablas	V
Resumen	VI
<i>Abstract</i>	VII
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. Fundamentación teórica del comportamiento de los sistemas de fase no mínima.....	7
1.1 Caracterización de los sistemas de fase no mínima.	7
1.1.1 Características dinámicas de sistemas con respuesta inversa	8
1.1.2 Comportamiento dinámico del sistema con un único cero en el semiplano derecho.	10
1.1.3 Ángulo de fase de un sistema con respuesta inversa.....	12
1.1.4 Características adicionales de la respuesta al paso unitario	13
1.2 Estrategias de control para sistemas de fase no mínima.....	15
1.2.1 PID Clásico.	15
1.2.2 Estado del arte de algoritmos basados en modelos predictivos.....	18
1.2.3 Controlador por Modelo Interno (IMC).	19
1.2.3.1 Configuración del controlador.....	21
1.2.3.2 Procedimiento de diseño del control por el modelo interno. [49]	22
1.2.3.3 Metodología de diseño	23
1.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo.....	24
1.2.4.1 Funcionamiento del MPC	30
1.2.4.2 Optimización.....	30
Conclusiones parciales	32
CAPITULO 2. Implementación de los algoritmos PID, IMC y MPC.....	34

2.1 Características del modelo a implementar	34
2.1.2 Diseño de las estrategias de control para sistema de fase no mínima	36
2.1.3 Resultados de las simulaciones.....	43
Conclusiones parciales	46
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFIA	50

INTRODUCCION

Los sistemas industriales en aras de mejorar sus procesos para seguir siendo competitivos en entornos internacionales, se han visto en la necesidad de organizar y controlar las actividades propias de sus plantas. Los controladores industriales, en su mayoría PID, permiten medir varias variables de un proceso por medio de varios sensores. Estos controladores entregan una base de datos a una unidad de procesamiento, comparando tanto el valor medido como el *set point* o valor de referencia. Además, estos controladores permiten ejecutar algoritmos de control que determinan cómo se modifican esos valores de las variables cuando actúan como una entrada del proceso que se va a controlar siendo capaces de mantener la estabilidad y el rendimiento óptimo de los procesos, adaptándose a las variaciones y perturbaciones que puedan ocurrir.

[1]

Los algoritmos de control son expresiones matemáticas que establecen la relación entre la(s) variable(s) de entrada y la salida de un controlador. Se corresponde con la evaluación de la modificación requerida en la variable manipulada para anular el error detectado sobre la variable controlada. [2]

Existen múltiples sistemas dinámicos cuyos modelos matemáticos se caracterizan por ser de primer orden y parámetros variables con el tiempo. En estos casos las herramientas clásicas no siempre logran un sistema de control que posea un sistema dinámico, rechace adecuadamente las perturbaciones y prediga el comportamiento del proceso cuando el modelo se desvía del nominal al cual se realizó el diseño. [3]

Su campo de aplicación y estructura básica apenas han sido modificadas a pesar de haber aparecido nuevas tecnologías y técnicas de control más poderosas y eficaces. La utilidad de los algoritmos de control radica en el hecho de poder aplicarlos en la mayoría de los sistemas de control aun cuando el modelo matemático de la planta es desconocido o se conoce poco sobre él y se logre sintonizar los controladores “aceptablemente” [4].

Los procesos con dinámica compleja presentan características como no linealidades, retardos, interacciones entre variables y comportamientos no estacionarios. Estos procesos requieren de algoritmos más avanzados que

tengan un carácter anticipatorio y/o predictivo para garantizar un desempeño óptimo.

Los sistemas de fase no mínima son lentos en su respuesta, debido a su comportamiento defectuoso al inicio de la respuesta. Al diseñar un sistema, si se requiere una velocidad de respuesta rápida, no deben usarse componentes de fase no mínima, (un ejemplo común de elementos de fase no mínima que pueden estar presentes en un sistema de control es el retardo de transporte).

El retardo de transporte tiene un comportamiento de fase no mínima y tiene un atraso de fase excesivo sin atenuación en frecuencias altas. Estos retardos de transporte ocurren, por lo común en los sistemas térmicos, hidráulicos y neumáticos (industria de procesos). [5]

En este contexto, se utilizan diferentes estrategias de control avanzado, como el control predictivo, el control adaptativo y el control robusto. Estos controladores aplican modelos matemáticos más sofisticados y algoritmos de control más avanzados para enfrentar la complejidad de estos procesos, logrando una mayor precisión y estabilidad en el control tales como Control de Modelo Interno (IMC por sus siglas en inglés), PID clásico y Control Predictivo basado en Modelo [6], [7], [8].

En el campo del control automático se han realizado modificaciones a diferentes estrategias de control con el objetivo de mejorar el comportamiento de los sistemas de fase no mínima. El Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) constituye una de las técnicas más significativas [9], la misma se basa fundamentalmente en modelos lineales y se han obtenido resultados al utilizarse con modelos no lineales. El MPC presenta una gran habilidad para manipular las restricciones en la entrada y salida mediante su incorporación directa en la optimización. Entre sus ventajas esta su capacidad de manipular sistemas con grandes retardos de tiempo y su aplicación resulta directa para el caso de sistemas multivariables [10].

El Control Predictivo se desarrolló a finales de los setenta y ha tenido un desarrollo considerable desde entonces. El término Control Predictivo no designa a una estrategia de control particular, sino a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener una señal de control minimizando una función objetivo. Estos métodos de control

llevan a controladores que tienen básicamente la misma estructura y los mismos elementos [11] :

- Uso explícito de un modelo para predecir la evolución del proceso en los instantes futuros.
- Minimización de una función objetivo
- Utilización de un horizonte de control infinito y deslizante que implica el cálculo de la secuencia de control para todo el horizonte, pero con la aplicación de la primera señal de la secuencia y la repetición de todo el proceso en el siguiente instante de muestreo.

Los procesos con respuesta inversa y/o retraso de transporte presentan desafíos adicionales en el diseño de algoritmos de control avanzado. Aquellos procesos en el cual, frente a un cambio escalón dan primero una respuesta negativa y luego un cambio gradual ascendente en forma de S son conocidos como procesos con respuesta Inversa [12]. Por otro lado, el retraso de transporte introduce un tiempo de retardo entre la acción de control y su efecto en el proceso.

Los algoritmos de control avanzado, como el control predictivo y el control adaptativo, deben tener en cuenta estas características para lograr un control efectivo. Las técnicas utilizadas en muchas industrias, como la estimación de estados, la predicción del comportamiento futuro y la compensación del retraso de transporte, garantizan una respuesta adecuada y evitan oscilaciones o inestabilidades en el proceso [13].

A nivel mundial, los controladores en procesos con dinámica compleja se utilizan en diversas industrias, como la química, petroquímica, alimentos, automotriz, energética, entre otras. Estos controladores permiten mejorar la eficiencia, la calidad del producto y la seguridad de los procesos, así como reducir costos y minimizar el impacto ambiental logrando optimizaciones significativas en la operación y mejorando la competitividad de las empresas.

En Cuba, también se ha trabajado en la aplicación de algoritmos de control en sistemas que presentan una dinámica compleja, como es el caso de las calderas de vapor en la industria azucarera, la industria petroquímica y la industria alimentaria, para mejorar la eficiencia y la productividad [14]. Aunque el acceso a tecnologías y recursos puede presentar limitaciones, se han

realizado esfuerzos para desarrollar soluciones adaptadas a las necesidades locales.

Aunque los desafíos pueden ser mayores en comparación con otros países, Cuba ha demostrado capacidad para adaptar y desarrollar soluciones de control en procesos con dinámica compleja, contribuyendo al desarrollo de la industria nacional.

Muchos de los procesos que encontramos en la industria se caracterizan por mostrar una respuesta inversa (fase no mínima) y/o retraso de transporte, sin embargo, los algoritmos de control que se suelen impartir en el pregrado no tienen en cuenta estas características de los procesos. En base a lo dicho anteriormente se plantea como **problema de investigación** insuficiencia en la evaluación de algoritmos de control predictivo en plantas que poseen un nivel de complejidad determinado (sistema con respuesta inversa) en el logro de una mejor respuesta y desempeño del proceso. Como **objeto de la investigación** los sistemas con dinámica compleja.

El **objetivo de la investigación** es: evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de control en procesos caracterizados por respuesta inversa (dinámica compleja) a través de simulaciones en Matlab.

Como **campo de acción** se tiene los algoritmos de control predictivos para sistemas con dinámica compleja usando los *Toolbox* del Matlab.

Por tanto, se plantea como **idea a defender** la siguiente: si se realiza el análisis y simulación de las diferentes estrategias de control para los sistemas que se caracterizan por mostrar una respuesta inversa con la correspondiente obtención de los resultados deseados, a través del Matlab, podrá demostrarse que el algoritmo de control MPC es eficiente en el manejo de dichas restricciones de una manera sistemática durante el diseño del modelo de la planta. Se contribuye al enriquecimiento de los conocimientos en los estudiantes acerca de estos sistemas y su tratamiento, para lograr un buen compromiso entre la robustez y las características de funcionamiento del controlador en el logro de una mejor respuesta.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes **tareas de investigación**:

1. Estudiar los fenómenos de respuesta inversa y retraso de transporte. Modelado matemático, características dinámicas.
2. Estudiar los fundamentos de los algoritmos de control del tipo PID clásico, IMC y MPC
3. Estudiar los ejemplos de los *Toolbox* del Matlab relacionados con estos algoritmos de control propuestos
4. Implementar y ajustar los controladores propuestos para el modelo dado (1er orden con fase no mínima)
5. Realizar la evaluación de los resultados obtenidos con cada uno de los controladores propuestos y fundamentar los mismos.

Dichas tareas han sido desarrolladas utilizando como base las siguientes **técnicas y métodos**:

1. Análisis de fuentes documentales
2. Método teórico:
 - Análisis – síntesis:
Se refiere al estado del arte a partir de publicaciones científicas comprendidas entre los años 1980 a la actualidad, indexadas en bases de prestigio internacional relacionadas con las características de los sistemas con dinámica compleja y los algoritmos de control predictivos.
3. Métodos empíricos:
 - Diseño y simulación.
Se diseñaron modelos, usando los controladores PID y MPC a través de los *Toolbox* de *Simulink*, Matlab.

Como **aporte de la investigación** se tiene la demostración de la eficiencia de los métodos de control predictivo en el diseño del control de procesos industriales que presentan una dinámica compleja.

En este trabajo se exponen algunas de las estrategias de control aplicadas a sistemas de fase no mínima, de manera que pueda constituir material de apoyo para el estudio del tema en la formación de pregrado. Las simulaciones realizadas son ejemplos prácticos de la aplicación de dichas estrategias a estos sistemas, lo cual puede ser útil para estudiantes interesados en el control de

procesos. También, se presentan los resultados del análisis y simulación de las estrategias de control aplicadas a procesos industriales, mediante el Matlab, herramienta de programación de gran explotación en la especialidad.

El trabajo se encuentra estructurado, en resumen, introducción, desarrollo en dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos.

En el primer capítulo, se abordan aspectos generales relacionados con los procesos con respuesta inversa y sus características dinámicas esenciales. En él aparecen dos epígrafes dedicados a los algoritmos de control que se usan en sistemas que presentan dicho fenómeno, sus características distintivas, parámetros fundamentales.

En el segundo capítulo, se realiza un análisis de las características fundamentales del conjunto de ensayo a utilizar en la comprobación de la generalidad del método de diseño de control MPC implementado en el propio capítulo; posteriormente, se muestran los resultados a través de gráficos y de tratamientos estadísticos básicos. Por último, se comparan los resultados obtenidos vía simulación de los métodos PID y MPC.

CAPITULO 1. Fundamentación teórica del comportamiento de los sistemas de fase no mínima.

Introducción

En este capítulo se caracterizan los sistemas de respuesta inversa, se describen los factores que propician la aparición de este fenómeno en procesos que exhiben una dinámica compleja: inestable, de fase no-mínima y sistemas con retardos. Se presenta, además, las características y ventajas de los algoritmos de control más usados en estos procesos: IMC, PID y MPC.

1.1 Caracterización de los sistemas de fase no mínima.

Los sistemas de fase no mínima, si bien presentan un comportamiento particular que los identifica (lentos en su respuesta, retardo de transporte, inestabilidad y/o respuesta inversa), también pueden ser reconocidos fácilmente si se tiene su modelo matemático, ya que las funciones de transferencia de fase no mínima tienen un polo y/o cero en el semiplano positivo complejo. [5]

Los fenómenos de respuesta inversa y retraso de transporte son comunes en el control de procesos industriales y pueden tener un impacto significativo en la eficiencia y estabilidad del sistema. La respuesta inversa se produce cuando la salida de un proceso no se comporta de manera proporcional a la entrada; en lugar de seguir directamente los cambios en la entrada, la respuesta del proceso puede ser opuesta o puede tener un comportamiento no lineal, esto puede deberse a factores como la inercia, los tiempos de retardo y los efectos acumulativos del sistema. [12]

Aquellos procesos en los cuales, frente a un cambio escalón dan primero una respuesta negativa (una inversión inicial en la respuesta), es decir, el proceso inicia con una pendiente inicial contraria en la dirección de su valor final en estado estacionario y luego un cambio gradual ascendente en forma de S son conocidos como procesos con respuesta Inversa, como se muestra en la figura 1.1. Este tipo de fenómeno es posible encontrarlos en procesos químicos tales como una caldera de vapor, reactor tubular exotérmico y la columna de destilación; estos procesos son difíciles de ser controlados con un controlador típico de procesos. Se dice que un sistema presenta una dinámica compleja en

los siguientes casos: al presentar tiempos de respuesta con retardos elevados y cuando su respuesta inicia con una dirección contraria hacia su valor en estado estacionario. [15]

El control de procesos en la actualidad, requiere tratar a menudo con problemáticas tales como: inestabilidad en el comportamiento del proceso al desviarse la variable controlada de la trayectoria deseada, respuesta inversa, retardos de transporte y otras.

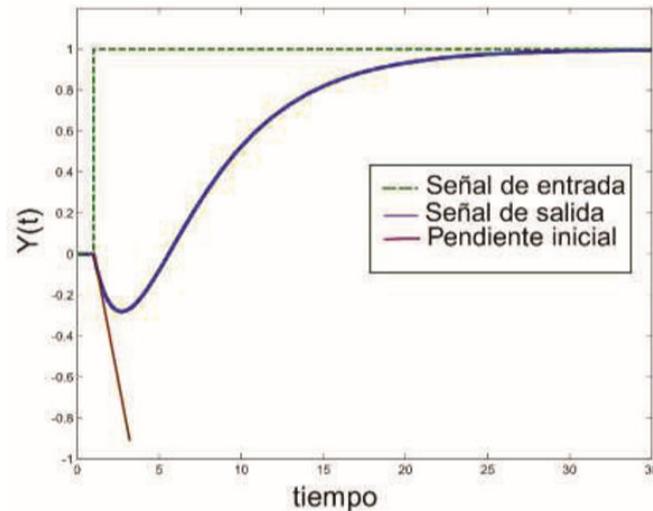


Figura 1.1. Sistema con respuesta inversa [15].

1.1.1 Características dinámicas de sistemas con respuesta inversa

La respuesta inversa se da cuando dos sistemas con dinámicas opuestas interactúan entre sí, como se observa en la figura 1.3. Al inicio de la operación del sistema de control el error aumenta en vez de reducirse; sin embargo, durante este período la derivada del error será negativa, con lo cual coadyuva a reducir el error de la señal de control, mostrado en la ecuación (1.1)

$$u = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt - T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (1.1)$$

El signo negativo antes del término derivativo pone de relieve el punto anterior. Cuando termina el período de inversión, la parte derivativa se vuelve ahora en positiva, con lo cual contribuye a incrementar la magnitud de la acción de control.

Si se tiene dos sistemas $G_1(S)$ y $G_2(S)$, representados por la ecuación (1.2); debido a que el segundo “modo” $G_2(S)$, parece estar en oposición al primer “modo” $G_1(S)$, (en virtud del signo negativo) se refiere a $G_1(S)$ como representante del modo “principal” y a $G_2(S)$ como modo “oposición” [16]. El

sistema opuesto tiene una ganancia menor, pero es más rápido, además, es el responsable del direccionamiento opuesto inicial, mientras que $G_1(S)$ tiene una ganancia mayor, es más lento y finalmente domina la respuesta del sistema.

$$G(S) = G_1(S) - G_2(S) \quad (1.2)$$

Para un sistema compuesto por dos sistemas de primer orden se tiene la ecuación (1.3). La respuesta ante una entrada paso de este sistema tiene como resultado la diferencia ante la misma entrada paso, pero de cada sistema de forma individual (figura 1.2) [15].

$$G(S) = \frac{K_1}{T_1s+1} - \frac{K_2}{T_2s+1} \quad (1.3)$$

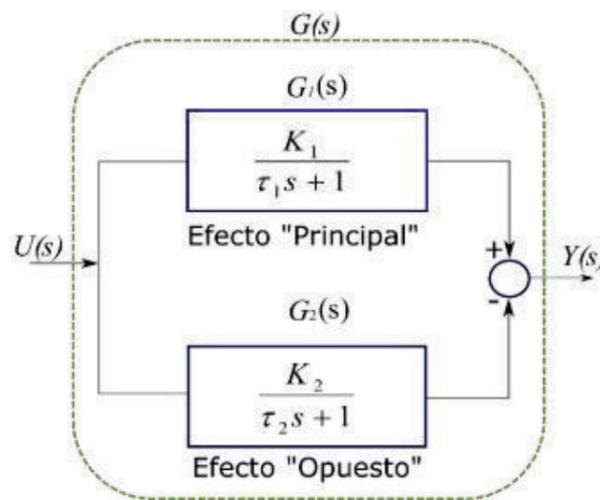


Figura 1.2 Dos sistemas de primer orden con dinámicas opuestas [15].

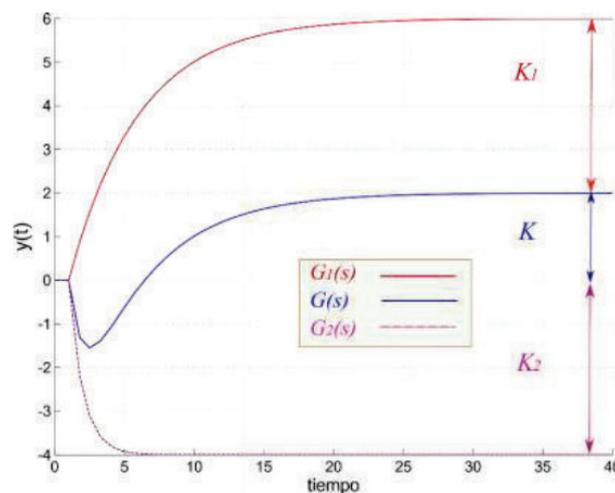


Figura 1.3 Respuesta ante una señal paso de dos sistemas con dinámicas opuestas, ganancia positiva [15].

El valor final en estado estacionario depende de las ganancias de los sistemas $G_1(S)$ y $G_2(S)$ mostrado en la figura 1.3, [15]. Se define la ganancia del sistema

por la ecuación (1.4), como la diferencia de las ganancias individuales (teorema del valor final).

$$y(\infty) = K = K1 - K2 \quad (1.4)$$

Al resolver la ecuación (1.3) se obtiene la ecuación representada con la ecuación (1.5). Se pueden dar dos situaciones dependiendo el valor de las ganancias; en el primer caso cuando las ganancias son positivas $(K1 - K2) > 0$, y la relación entre las pendientes resulta un valor negativo; y en el segundo caso, cuando las ganancias son negativas, $(K1 - K2) < 0$, y la relación entre las pendientes resulta un valor positivo.

$$G(s) = \frac{(K1-K2)\left(\frac{K1\tau2-K2\tau1}{K1-K2}s+1\right)}{(\tau1s+1)(\tau2s+1)} \quad (1.5)$$

Teniendo en cuenta que η es el coeficiente del término en s del numerador, el sistema simplificado es:

$$G(s) = \frac{K(\eta s+1)}{(\tau1s+1)(\tau2s+1)} \quad (1.6)$$

$$\eta = \left(\frac{K1}{\tau1} - \frac{K2}{\tau2}\right)\left(\frac{\tau1\tau2}{K1-K2}\right) \quad (1.7)$$

En cada uno de los casos se pretende tener un cero en la parte derecha del plano "s", asumiéndose características de fase no mínima. Dicho esto, las condiciones para que exista un cero positivo en la función de transferencia en el sistema analizado, y por consiguiente respuesta inversa en el mismo dado por la ecuación (1.8)

$$\frac{T1}{T2} > \frac{K1}{K2} > 1 \quad (1.8)$$

1.1.2 Comportamiento dinámico del sistema con un único cero en el semiplano derecho.

Para procesos de primer orden en oposición la respuesta inversa se requiere que la función de transferencia general $G(S)$ tenga un cero en el semiplano derecho. Se considera el comportamiento dinámico del proceso de función de transferencia como se muestra en la ecuación (1.9) a) sistema de respuesta inversa de segundo orden sin retardo, b) sistema de respuesta inversa con retardo θ :

$$G(S) = \frac{K(-ns+1)}{(T1S+1)(T2S+1)} \quad \text{a)} \quad (1.9)$$

$$G(s) = \frac{K(-ns+1)e^{-\theta s}}{(T1S+1)(T2S+1)} \quad \text{b)} \quad (1.9)$$

Donde $n > 0$, la función de transferencia posee dos polos $S_1 = -1/T_1$ y $S_2 = -1/T_2$, pero su único cero se ubica en $S = 1/\eta$, es decir, un cero positivo. Debido a la ubicación del cero en la mitad derecha del plano complejo, tales ceros se denominan comúnmente como ceros del semiplano derecho (RHP). La respuesta al escalón unitario para este sistema se puede obtener usando la ecuación (1.9) y el modelo habitual de función de transferencia con $u(s) = 1/s$, representado por la ecuación (1.10).

$$y(s) = \frac{K(-ns+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)} * \frac{1}{s} \quad (1.10)$$

Sea $dy(t)/dt$ la derivada de la función de respuesta al escalón unitarios, se puede usar el teorema de valor final de la transformada de Laplace para obtener el valor de la pendiente de respuesta inicial en el origen usando la ecuación (1.11) en la 1.12.

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{dy(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left(sL \left(\frac{dy}{dt} \right) \right) = \lim_{s \rightarrow \infty} (s^2 y(s)) \quad (1.11)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{dy(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{sK(-ns+1)}{(\tau_1s+1)(\tau_2s+1)} \right) \quad (1.12)$$

Dado que τ_1, τ_2 son valores positivos entonces, la pendiente inicial toma el signo opuesto de la ganancia del proceso; lo que demuestra que el sistema siempre mostrará una respuesta inversa.

Ceros de fase no mínima

Los ceros de fase no mínima imponen limitaciones similares a las de un retardo de transporte (aunque comparativamente menos severas). De hecho, los sistemas de fase no mínima son tan comunes como los retardos, ya que estos últimos se pueden expresar como una aproximación de Padé ecuación (1.13).

$$e^{-st} \approx \left(\frac{-ts+2k}{ts+2k} \right)^k, k = 1, 2, \dots \quad (1.13)$$

Respecto a un cero de fase mínima, un cero de igual frecuencia, pero de fase no mínima, introduce retardo adicional de fase en el lazo, disminuyendo los márgenes de estabilidad del sistema. Un cero de fase no mínima en la planta impondrá un límite superior al máximo ancho de banda de lazo cerrado alcanzable.

Polos inestables

Los polos inestables son polos de la función transferencia del sistema con parte real no negativa. Los polos inestables, a diferencia de los ceros de fase no

mínima, imponen un límite inferior al ancho de banda de lazo cerrado. Es decir, requieren una respuesta rápida del sistema para no comprometer el desempeño.

El término de fase no mínima proviene de las características de cambio de fase del sistema cuando está sujeto a entradas sinusoidales. Para sistemas con la misma característica de magnitud, el rango del ángulo de fase de cualquier función de transferencia de fase no mínima es mayor que el mínimo entre todos los sistemas de ese tipo. Para un sistema de fase no mínima su función de transferencia no se puede determinar sólo a partir de la curva de magnitud. Las situaciones de fase no mínima surgen en dos formas distintas; una es simplemente cuando un sistema incluye uno o más elementos de fase no mínima, la otra ocurre cuando un lazo menor es inestable [5].

1.1.3 Ángulo de fase de un sistema con respuesta inversa.

Un sistema de fase mínima es un proceso normal con n polos y m ceros, su ángulo de fase se aproxima a $(n - m) \times (-90)$ asintóticamente a altas frecuencias, luego se tiene que:

$$g(s)|_{s=j\omega} = g(j\omega) = Re(\omega) + jIm(\omega) \quad (1.14)$$

$$AR = |g(j\omega)| = \sqrt{Re(\omega)^2 + Im(\omega)^2} \quad (1.15)$$

$$\varphi = \arg(g(j\omega)) = \tan^{-1}\left(\frac{Im(\omega)}{Re(\omega)}\right) \quad (1.16)$$

Si $(AR_1 = AR_2 = \dots = AR_n)$ y el ángulo de fase ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$) de los cuales se designa el mínimo φ_{min} . Si $\varphi_n \neq \varphi_{min}$, los sistemas se denominan sistemas de fase mínima.

En sistemas con respuesta inversa, con las funciones de transferencia de los dos "modos", su ángulo de fase se expresa como:

$$g_1(s) = g^\circ(s)(l + \eta s) \quad (1.17)$$

$$g_2(s) = g^\circ(s)(l + \eta s) \quad (1.18)$$

$$AR_1 = AR_2 \quad (1.19)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - 180^\circ \quad (1.20)$$

Considerando el proceso de primer orden como sistema inestable de bucle abierto, se tiene:

$$g_1(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.21)$$

$$g_2(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.22)$$

$$AR1 = AR2 \quad (1.23)$$

$$\varphi2 = -180^\circ + \varphi1 \quad (1.24)$$

Dependiendo de la función de transferencia que tenga el proceso se tendrán las condiciones de respuesta inversa [15]:

- Sistema integral menos un sistema de primer orden $G(S)$ ecuación (1.25) y su condición para que exista respuesta inversa, ecuación (1.26).

$$G(s) = \frac{1}{\tau_1 s} - \frac{K}{\tau_2 s + 1} \quad (1.25)$$

$$\tau_1 > \tau_2 \quad (1.26)$$

- Diferencia entre dos sistemas de primer orden ecuación (1.3) y su condición para que exista respuesta inversa, ecuación (1.25).
- Sistema de segundo orden menos un sistema de primer orden, ecuación (1.27) y su condición para que exista respuesta inversa, ecuación (1.28).

$$G(s) = \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} - \frac{K_2}{\eta s + 1} \quad (1.27)$$

$$K_1 > K_2 \quad (1.28)$$

Debido a que las funciones de transferencia de fase no mínima, presentes en procesos con la misma denominación, poseen elementos que conducen a la inestabilidad, el control clásico con simple lazo realimentado no es efectivo en el tratamiento de dichos sistemas. Ante tal situación se han realizado modificaciones a diferentes estrategias de control con el objetivo de mejorar el comportamiento de dichos sistemas tales como el IMC, PID clásico y el MPC. [17]

1.1.4 Características adicionales de la respuesta al paso unitario

- Las características más destacadas de la respuesta al escalón unitario del sistema de respuesta inversa es su inversión inicial y posterior reversión, lo que requiere que la respuesta pase por un mínimo en algún momento
- La característica de la respuesta inversa a un paso unidad es que la pendiente inicial posee un signo diferente del valor final de modo que, con la pendiente inicial negativa y un valor final positivo, la respuesta del proceso experimenta un giro en el punto donde pasa por un mínimo.

- La adición de términos de retraso (que contribuyen a los polos) tiene el efecto neto de ralentizar la respuesta; por otro lado, la adición de términos principales (que aportan los ceros) tiene el efecto neto de acelerar la respuesta del sistema. Lo mismo ocurre con el sistema de repuesta inversa cuya función de transferencia tiene un único RHP: los polos adicionales tenderán a ralentizar la respuesta mientras que los ceros adicionales tenderán a acelerarla, como se muestra en la figura 1.4.

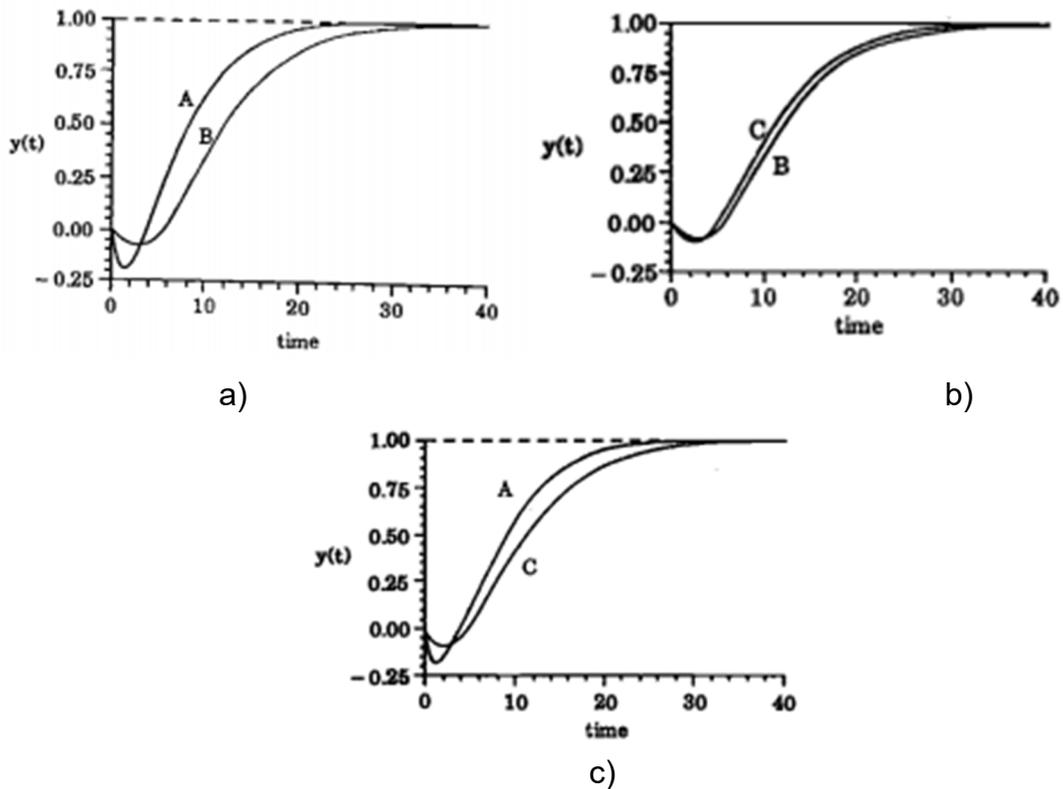


Figura 1.4 Respuesta del sistema al adicionar: a) un polo, b) un cero, c) un cero y un polo[18].

El sistema con un número impar de ceros RHP exhibe una respuesta inversa. En el sentido de la que la dirección inicial de la respuesta escalonada siempre sea opuesta a la dirección del estado estacionario final, no depende del número de inversiones involucradas en esta respuesta.

La porción inicial de la respuesta escalonada de un sistema con un número par de ceros RHP exhibe el mismo número par de inversiones antes de dirigirse en la dirección del estado estacionario final (pero en la dirección inicial es siempre la misma que la dirección del estado). Un sistema que contiene un elemento de fase no mínimo: un polo en el semiplano derecho, un cero en el semiplano derecho o un retardo de tiempo es un sistema de fase no mínima. [18]

1.2 Estrategias de control para sistemas de fase no mínima.

1.2.1 PID Clásico.

Un control PID es un algoritmo de control que ofrece la posibilidad de dominar el tiempo de respuesta y aumentar la precisión de ella; además, es un sistema de ajuste y predicción automático.

El control PID es un control realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario sea cero de manera asintótica en el tiempo. Esta respuesta la acción integral entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta. Además, el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro en muy cortos intervalos de tiempo a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo en la salida del proceso.

En la figura 1.5 se muestra el diagrama en bloques de un sistema de control a lazo cerrado con algoritmo de control PID.

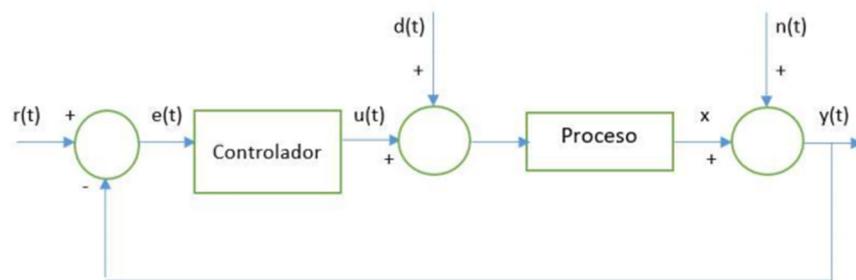


Figura 1.5 Esquema de control a lazo cerrado. Fuente: Adaptado de [19].

Donde:

$r(t)$ = señal de referencia, *set point*

$e(t)$ = error

$u(t)$ = señal de control, variable manipulable

$d(t)$ = disturbio

$x(t)$ = salida del proceso

$n(t)$ = ruido

$y(t)$ = variable de salida

La mayoría de los controladores industriales que se utilizan en la actualidad usan esquemas de control PID o PID modificado. La utilización de los controladores PID radica en que se aplican en forma casi general en la mayoría de los procesos industriales que tienen sistemas de control. Pese al sorprendente desarrollo de la teoría de control y el soporte tecnológico que se

utiliza para su implementación, este se emplea casi con exclusividad en el ambiente industrial de todo el mundo. Generalmente, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, no es posible emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles[20].

Para el diseño de los controladores PID se puede utilizar las reglas de sintonía de *Ziegler - Nichols*, el método convencional de respuesta en frecuencia y el método de optimización computacional.

Los parámetros fundamentales del control PID son:

✓ Acción Proporcional (K_p)

El elemento proporcional o “ganancia proporcional” es una razón entre el cambio de la señal de salida y el cambio de la señal de entrada. El K_p es proporcional a la señal del error, donde: error = referencia – variable de salida. Su parámetro de sintonización (K_p) es adimensional. La ganancia proporcional se ajusta a los requerimientos de la salida del sistema al igual que su signo; de tal manera que, el error puede aumentar o disminuir si es lo que se está buscando. Sin embargo, no garantiza un error nulo; es decir, que no existan diferencias entre la señal de referencia y la variable de salida, a no ser que el proceso ya cuente con un integrador puro.

✓ Acción Integral (T_i)

El componente integral asegura un error nulo en estado estacionario. Es decir, que la variable de salida sea igual a la referencia. El regulador integral depende de la integral de la señal de error, y se utiliza en conjunto con un controlador de ganancia proporcional, como se muestra en la ecuación (1.29):

$$u(t) = k * e(t) + k \int_{t_0}^t \frac{e(t)}{T_i} dt \quad (1.29)$$

Su parámetro de sintonización es T_i , mayormente dado en segundos. Se debe realizar una evaluación en estacionario, de tal manera que la señal $u(t)$ sea una constante para garantizar un error nulo. Por lo que se puede decir que el regulador integral proporciona un *reset* automático cuando la señal $u(t)$ sea constante en el estacionario.

✓ Acción Derivativa (T_d)

El regulador derivativo depende de la derivada de la señal de error, y se utiliza en conjunto con un controlador de ganancia proporcional, como se muestra en la ecuación (1.30):

$$u(t) = k * e(t) + K * Td * \frac{de(t)}{dt} \quad (1.30)$$

Su parámetro de sintonización es Td , mayormente dado en segundos. El componente derivativo amplifica el ruido en forma proporcional a la frecuencia. Esto afecta directamente a la variable de control, creciendo por la presencia de ruidos a alta frecuencia, por lo que se requiere de un componente adicional, lo cual es un filtro pasa bajo para atenuar las ganancias elevadas.[19]

Los tres componentes juntos conforman un controlador PID, donde la parte proporcional se ajusta a los requerimientos de salida del sistema para regular el nivel de error deseado, el integrador garantiza error nulo, el derivador garantiza una estabilidad en estado estacionario.

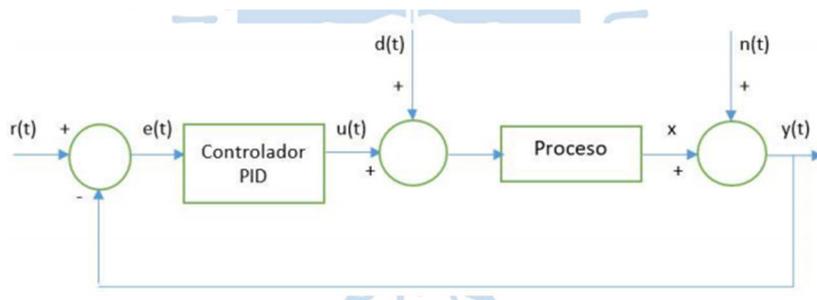


Figura 1.6. Esquema del lazo cerrado con controlador PID. Fuente: Adaptado de [19]. Al momento de incrementarse la ganancia del controlador proporcional ocasiona inestabilidad. De igual manera, la acción integral produce oscilaciones en la respuesta de la variable de control, lo que genera una inestabilidad al sistema. Por lo que, se considera agregar una acción derivativa al controlador, para contrarrestar este efecto integrador y favorecer la estabilidad del sistema, además de que dicha acción disminuye el tiempo que el proceso demora en llegar al estado estacionario, conocido como tiempo de establecimiento o “*settling time*”.

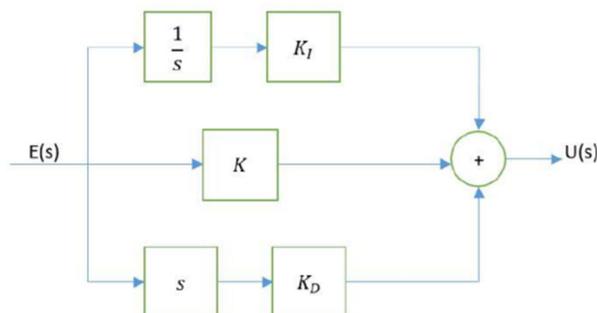


Figura 1.7. Diagrama de bloques de un PID. Fuente: Adaptado de [19].

Aunque este algoritmo presenta beneficios en diferentes campos tales como:

- ✓ Control del tiempo necesario para la respuesta: disminuye el tiempo preciso para una respuesta, aumentando la rapidez de la fabricación.
- ✓ Optimización de la precisión de la respuesta al obtener una respuesta más rápida y más precisa se mejora la producción.
- ✓ Mejoramiento de los errores previos: reduce los fallos como vibraciones o faltas de equilibrio.
- ✓ Posibilidad de alcanzar el ajuste preciso de manera automática, sin la necesidad de emplear obreros que regulen el funcionamiento de la máquina industrial.

En el área de control de procesos, es un hecho común que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio, sin embargo, en muchas situaciones específicas no aportan un control óptimo.

A pesar de poseer todas estas ventajas, frente a sistemas que presentan una respuesta inversa y /o retraso de transporte no es tan efectivo debido a que:

1. es utilizado en reguladores basados en señal, no incorpora conocimiento explícito del proceso
2. posee 3 parámetros de sintonía K_p , T_i , T_d
3. presenta diversas modificaciones según los fabricantes.
4. en la industria de procesos, los reguladores PID solucionan bien la mayoría de los problemas de control monovariable (caudal, presión, entre otras)
5. en sistemas más complejos con interacción entre variables, límites en el valor de otras, perturbaciones, etc. se recurre a estructuras de control complicadas implementadas en los sistemas de control por ordenador
 - Difíciles de mantener.
 - En muchas ocasiones no tienen comportamientos suficientemente

buenos. [21]

1.2.2 Estado del arte de algoritmos basados en modelos predictivos.

Los sistemas con respuesta inversa son trabajados y analizados desde la década pasada [6, 8, 9, 12, 22-24]. Existen en la literatura varias anotaciones

acerca del control predictivo aplicado a diversos procesos debido a su amplia aplicación en la industria azucarera y petroquímica (un informe bastante completo sobre las aplicaciones del control predictivo en el sector petroquímico durante los años 80 se puede encontrar en [24, 25], como, por ejemplo: generadores de vapor [26], aplicaciones en la industria de cemento [27], columnas de destilación [28], anestesia clínica [29] y robots [11, 30, 31]. Dicho control llegó a ser popular, debido a la simplicidad del algoritmo y a la utilización del modelo de respuesta ante impulso que, aunque requiriendo muchos más parámetros que las formulaciones en el espacio de estado o en el dominio de entrada y salida, resulta más intuitivo y requiere mucha menos información a priori para la identificación.

Se observó que en los trabajos relacionados con el control predictivo se establecen comparaciones entre los algoritmos IMC, PID clásico y MPC [4, 20, 32, 33]. El controlador PID es el más conocido, con una destacada importancia y difusión en aplicaciones industriales [34]. Los controladores predictivos utilizan un modelo del sistema para predecir el comportamiento futuro anticipando desviaciones de la referencia [35]. El MPC predice el comportamiento futuro del sistema considerándolo el algoritmo que determina la trayectoria óptima de la variable manipulada [20, 36, 37].

En consonancia con el aumento de la potencia computacional y a medida que los modelos de procesos complejos están cada vez más disponibles para todo tipo de sistemas diferentes [38-41], el MPC permite el control de sistemas que antes eran impensables. Artículos de revisión ampliamente conocidos tanto de teoría [9],[42],[22], como de aplicaciones [43] demuestran la viabilidad, estabilidad y robustez de controladores de este tipo [44].

1.2.3 Controlador por Modelo Interno (IMC).

El control por modelo interno (IMC) es un procedimiento sistemático para el diseño de sistemas de control basados en el concepto de la parametrización, que constituye el fundamento de muchas técnicas de diseño de control modernas, [45]. El procedimiento de diseño IMC aplicado a funciones de transferencia de bajo orden, que son comunes en las aplicaciones de control de procesos, dan como resultado reglas de sintonía basadas en modelos para controladores PID, tal como se muestra en las figuras 1.8 y 1.9. Un único

parámetro ajustable en estas reglas de sintonía (constante de tiempo, T_r) IMC-PID especifica la velocidad de respuesta en lazo cerrado y al mismo tiempo tiene una influencia directa sobre su robustez, [23]. Por otra parte, a nivel experimental, se ha encontrado que este controlador mejora el comportamiento del sistema ante perturbaciones y minimiza las interacciones del controlador. [46]

Tabla 1.1. Reglas de sintonía basadas en IMC para controladores PI y PID ideales y PID con filtro para un sistema de primer orden con retardo.

Controlador	$K K_c$	τ_I	τ_D	τ_F	Recomendable $\frac{\lambda}{\theta} (\lambda > 0.2\tau \text{ siempre})$
PI	$\frac{2\tau}{(2\lambda + \theta)}$	τ	-	-	>0.8
PI Alternativo	$\frac{2\tau + \theta}{(2\lambda)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	-	-	>1.7
PID	$\frac{2\tau + \theta}{(2\lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{(2\tau + \theta)}$	-	>0.8
PID con filtro	$\frac{2\tau + \theta}{2(\lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{(2\tau + \theta)}$	$\frac{\lambda\theta}{2(\lambda + \theta)}$	>0.25

Tabla 1.2. Reglas de sintonía IMC-PID para plantas de primer y segundo orden sin integrador y con cero de fase no mínima $\beta > 0$.

Modelo	$K K_c$	τ_I	τ_D	τ_F
$\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\beta + \lambda}$	τ	-	-
$\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1}$	$\frac{2\xi\tau}{\beta + \tau}$	$2\xi\tau$	$\frac{\tau}{2\xi}$	-
$\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1}$	$\frac{2\xi\tau}{2\beta + \lambda}$	$2\xi\tau$	$\frac{\tau}{2\xi}$	$\frac{\beta\lambda}{2\beta + \lambda}$

Hay varios enfoques para el ajuste del controlador en el control por el modelo interno, el más popular se basa en un modelo de lazo abierto. Este modelo se expresa típicamente en términos de la ganancia de la planta (K), la constante de tiempo (T) y el retardo de tiempo (θ o L). Para un modelo de planta dado, los ajustes del controlador se obtienen a menudo por síntesis directa [47].

Los enfoques originales de síntesis directa dan un desempeño muy bueno para los cambios en el punto de operación, pero muestran respuestas lentas a las

perturbaciones de entrada (carga) para los procesos con constantes de tiempo dominantes (incluyendo la integración) con $\frac{\theta}{T} < 0.1$ [23] .

El enfoque IMC-PI determina el desempeño del controlador PI principalmente a través de la estructura del filtro IMC. La mayoría de los reportes encontrados en los artículos sobre el diseño del IMC-PI tienen la estructura del filtro IMC diseñada tan simple como sea posible, satisfaciendo los requisitos de desempeño necesarios del controlador IMC.

Por ejemplo, el orden del término principal en el filtro IMC está diseñado lo suficientemente pequeño como para anular los polos dominantes del proceso y el término de retraso se establece simplemente para hacer que el controlador IMC se pueda realizar. Por lo tanto, en el diseño IMC-PID, la estructura óptima del filtro IMC debe seleccionarse teniendo en cuenta el desempeño del controlador PID resultante en lugar del controlador IMC.[48]

1.2.3.1 Configuración del controlador.

El control basado en un modelo interno de las perturbaciones es la extensión directa de la idea de agregar la acción integral a la compensación de las perturbaciones que pueden modelarse mediante funciones de transferencia.

El control por el modelo interno se basa en el Principio del Modelo Interno, (PMI), el cual establece que, para rechazar asintóticamente una perturbación en forma exacta, el controlador debe incluir un modelo de la perturbación.

Una condición suficiente para la compensación asintótica de perturbaciones es que su polinomio generador se incluya como parte del denominador de la función de transferencia del controlador. La compensación obtenida es robusta, ya que se conserva aún frente a errores moderados de modelado [48].

El Control por el Modelo Interno es el esquema de control que incorpora el modelo de la planta al controlador; como se muestra en la Figura 1.8.

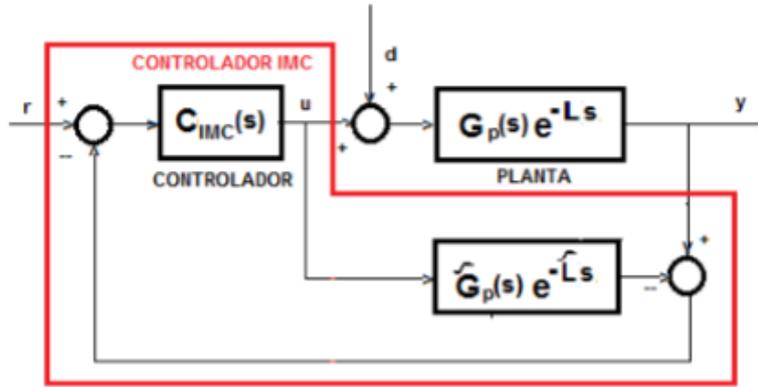


Figura 1.8 Esquema de control del IMC. [48]

\hat{G} y \hat{L} , son las versiones nominales de G y L , respectivamente, la función de transferencia es la del controlador por el modelo interno, la cual debe ser elegida de manera adecuada entre las funciones estables y racionales con parámetros de diseño.

1.2.3.2 Procedimiento de diseño del control por el modelo interno. [49]

1) dividir el modelo del proceso en una parte invertible («parte buena») y una parte no invertible («parte mala» o sea la que contiene el retardo de transporte y los ceros en el semiplano derecho):

2) Formar la función de transferencia del compensador por Modelo Interno mediante la inversión de sólo la parte invertible del modelo de proceso, multiplicada por la función de transferencia de un filtro:

El filtro básico se escoge considerando que la función de transferencia del compensador tiene que ser racional y estrictamente propia (orden del denominador mayor que el orden del numerador), con expresión genérica como se muestra en la ecuación (1.31)

$$F(s) = 1 / (\lambda s + 1) \quad n \geq 2 \quad (1.31)$$

El parámetro λ es un número real positivo que caracteriza la velocidad a lazo cerrado y debe ser convenientemente escogido.

La figura 1.9 muestra el compensador por el Modelo Interno mediante la inversión de la parte invertible del modelo de proceso.

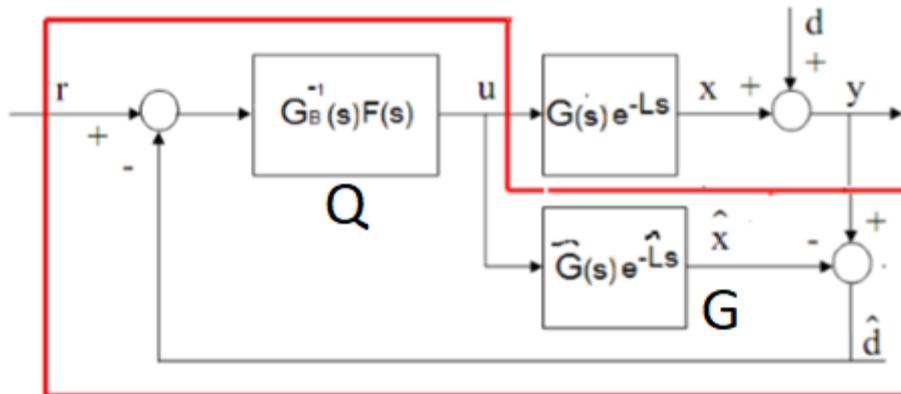


Figura 1.9. Compensador por Modelo Interno mediante la inversión de la parte invertible del modelo de proceso.[48]

Regla general (válido para cualquier tipo de controlador de retroalimentación) [49]:

- si un proceso tiene un tiempo muerto, el lazo cerrado también tendrá un tiempo muerto,
- si es un proceso de fase no mínima, el lazo cerrado también será de fase no mínima.

1.2.3.3 Metodología de diseño

Si M se interpreta como un modelo de referencia deseado.

- M debe contener los elementos de fase no mínima y retardos de G para que Q sea estable, no anticipativo (M los cancela de G^{-1} y no están en Q). M debe ser paso-bajo para que Q sea realizable.
- M debe tener una respuesta escalón “satisfactoria”: ganancia estática cercana a 1 (error de posición pequeño), o igual a 1 (error posición cero).
- Dinámica suficientemente rápida La respuesta temporal de Q, $(I - M)$, G debe también ser satisfactoria.

Aunque el diagrama de bloques con modelo interno (IMC) responde a la idea intuitiva de que, formalmente, la realimentación debe manejar las diferencias entre la “simulación” y la “medida”. Solo funciona con procesos estables (si son inestables, esa diferencia tiende a infinito).

Se suele hacer $Q = G^{-1}M$, siendo M el modelo deseado y $y = Mr$.

Para que Q sea estable, causal, y realizable, M no puede ser arbitrario: debe ser paso-bajo y contener retardo y fase no mínima de G . [50]

1.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo.

El Control Predictivo Basado en Modelo constituye una de las técnicas más significativas. El MPC presenta una gran habilidad para manipular las restricciones en la entrada y salida mediante su incorporación directa en la optimización. [17]

El control predictivo tiene como objetivo resolver problemas de control y automatización de procesos industriales, que presentan un comportamiento dinámico difícil, inestables, de fase no-mínima, sistemas con retardos y perturbaciones; además, puede interpretarse como una estrategia de control que utiliza de forma explícita un modelo matemático interno del proceso a controlar (modelo de predicción). Este modelo se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal de predicción; de este modo se pueden calcular las variables manipuladas futuras para lograr que, en el horizonte de predicción, las variables controladas converjan a los valores de referencia. Una de las propiedades más atractivas del MPC es su formulación abierta que permite la incorporación de distintos tipos de modelos de predicción, así como la consideración de restricciones sobre las señales del sistema. [36], [51]

El control predictivo se puede considerar una técnica madura para sistemas lineales y no muy rápidos como los encontrados normalmente en la industria de procesos [52] ,aunque en los últimos años se han desarrollado con éxito aplicaciones a sistemas rápidos, como los del campo de la robótica [53] , [54]. En la figura 1.10 se muestra el diagrama de bloques general para la implementación del MPC. [32]

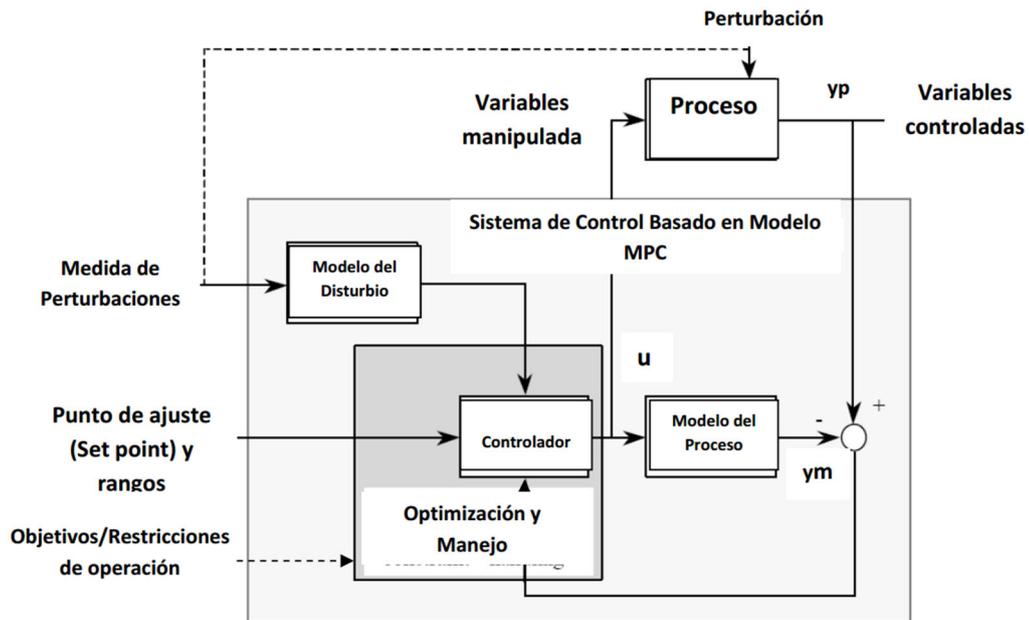


Figura 1.10 Diagrama de bloques general para la implementación del MPC.

El éxito actual del MPC en la industria se debe a tres razones principales:

- La incorporación de un modelo explícito del proceso en los cálculos permite al controlador tratar con todas las características importantes de la dinámica del proceso.
- La consideración del comportamiento del proceso a lo largo de un horizonte futuro permite tener en cuenta el efecto de las perturbaciones en realimentación y pre-alimentación, permitiendo al controlador conducir la salida a la trayectoria de referencia deseada.
- La consideración de restricciones en la fase del diseño del controlador evita en lo posible su violación, resultando en un control más preciso en torno al punto óptimo de operación. La inclusión de restricciones es quizás la característica que más distingue al MPC respecto a otras metodologías.[51]

La técnica del Control Predictivo basado en modelo se representa en la Figura 1.11. Se supone que se parte del instante k y haciendo uso del modelo del proceso se predicen las futuras salidas para un determinado horizonte. Estas salidas predichas dependen de los valores conocidos hasta el instante k (entradas y salidas pasadas) y de las señales de control futuras. Dicho horizonte N_p comienza en el instante $k + N_c$ y finaliza en el instante $k + N_p$. El horizonte de control es el intervalo para el cual la acción de control será

calculada. El conjunto de señales de control futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia. Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la señal de salida predicha y la trayectoria de referencia. [32]

El controlador realiza una optimización interna con la que intenta encontrar la mejor entrada u sobre un lapso de tiempo, conocido como horizonte de control (CH), que haga que el sistema se acerque al objetivo. La entrada u encontrada se aplica al sistema para controlarlo. Si el sistema no llegó al objetivo el proceso se repite, y así en cada paso de tiempo. Si hay perturbaciones el controlador las compensa con el tiempo.

El controlador, al utilizar un modelo, puede optimizar a valores poco realistas, y estos valores pueden estar fuera de los límites físicos del sistema. Una ventaja es que se pueden establecer límites para las entradas u para evitar ese inconveniente.

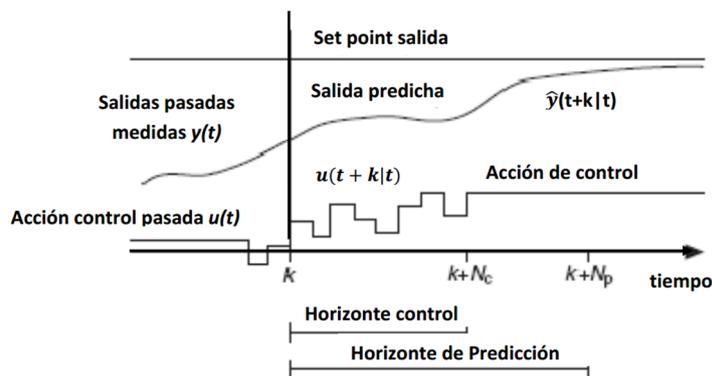


Figura 1.11 Metodología del MPC.

Todos los controladores predictivos poseen elementos comunes y para cada uno de estos elementos se pueden elegir diversas opciones, dando lugar a distintos algoritmos. Estos elementos son:

1. Modelo de predicción:

Es la piedra angular del MPC. Un diseño completo debe incluir los mecanismos necesarios para la obtención del mejor modelo posible, el cual debe ser completo para capturar al máximo la dinámica del proceso y debe ser capaz de permitir el cálculo de las predicciones a la vez que sea intuitivo y permita un análisis teórico. El uso del modelo del proceso viene determinado por la necesidad del cálculo de la salida predicha en

instantes futuros. Las diferentes estrategias de MPC pueden usar distintos modelos para representar la relación de las salidas con las entradas medibles, algunas de las cuales serán variables manipuladas y otras se pueden considerar como perturbaciones medibles, que pueden ser compensadas por acción *feedforward*. Además, se tendrá en cuenta un modelo de las perturbaciones, para intentar describir el comportamiento que no aparece reflejado en el modelo del proceso, englobándose aquí el efecto de las entradas no medibles, el ruido y los errores de modelado. [55]

2. Función objetivo:

Los diversos algoritmos de MPC proponen distintas funciones de coste para la obtención de la ley de control. En general se persigue que la salida futura en el horizonte considerado siga una determinada señal de referencia, al mismo tiempo que se pueda penalizar el esfuerzo de control requerido para hacerlo. Dicha función $(N1, N2, Nu)$, es función de $N1, N2, Nu$. Donde $N1$ y $N2$, son los horizontes mínimo y máximo de coste (o de predicción) respectivamente, los cuales marcan los límites de los instantes en que se desean que la salida siga la referencia. Así si se toma un valor grande de $N1$ es porque no importa que haya errores en los primeros instantes, lo cual provocaría una respuesta suave del proceso. Y Nu es el horizonte de control, que no tiene por qué coincidir con el horizonte máximo.[55]

3. Obtención de la ley de control:

Para obtener los valores de Δu será necesario minimizar la función de costo. Para ello se calcula los valores de las salidas predichas en función de valores pasados de entradas y salidas y de señales de control futuras, haciendo uso del modelo que se haya elegido y se sustituyen en la función de coste, obteniendo una expresión cuya minimización conduce a los valores buscados. Para el criterio cuadrático si el modelo es lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución analítica, en otro caso se debe usar un método iterativo de optimización. [55]

Los diversos algoritmos MPC proponen distintas funciones de costo (FC) para obtener la ley de control. La finalidad general es que la salida futura (y) en el horizonte considerado debe seguir una determinada señal de referencia (r) y al mismo tiempo, el esfuerzo de control (Δu) necesario para hacerlo debe ser penalizado. La FC más utilizada en la literatura es la cuadrática que se presenta a continuación:

$$FC[y(k), u(k)] = \sum_{i=1}^P Q_i (r(k+i) - \hat{y}(k+i|k))^2 + \sum_{i=1}^M R_i [\Delta u(k+i-1)]^2 + \sum_{i=1}^P W_i [\Delta \hat{y}(k+i|k)]^2 \quad (1.32)$$

Donde:

\hat{y} es la salida predicha,

$\Delta u(k+i-1)$ es el cambio en la acción de control,

$\Delta \hat{y}(k+i|k)$ es el cambio estimado en la salida predicha,

Q, R y W son términos de ponderación dependientes de la aplicación que efectúan un escalado.

En algunos métodos el segundo sumando, que considera el esfuerzo de control, no se tiene en cuenta, mientras que en otros también aparecen directamente los valores de la señal de control (no sus incrementos). En la función de costo se pueden considerar:

- Parámetros: N1 y N2 son los horizontes mínimo y máximo de costo (o de predicción) y es el horizonte de control, que no tiene por qué coincidir con el horizonte máximo, como se verá posteriormente. El significado de N1 y N2 resulta bastante intuitivo: marcan los límites de los instantes en que se desea que la salida siga a la referencia. Así, si se toma un valor grande de N1 es porque no importa que haya errores en los primeros instantes, lo cual provocará una respuesta suave del proceso. Nótese que para procesos con tiempo muerto no tiene sentido que N1 sea menor que dicho valor puesto que la salida no empezará a evolucionar hasta el instante $t+d$. Además, si el proceso es de fase no mínima, este parámetro permite eliminar de la función objetivo los primeros instantes de respuesta inversa.

Los coeficientes $\delta(j)$ y $\lambda(j)$ son secuencias que ponderan el comportamiento futuro. Usualmente se consideran valores constantes o secuencias exponenciales.

Todos estos valores pueden ser usados como parámetros de sintonización, obteniendo un abanico muy amplio de posibilidades con las que se puede cubrir una extensa gama de opciones, desde un control estándar hasta una estrategia diseñada a medida para un proceso en particular.

Trayectoria de referencia: Una de las ventajas del control predictivo es que, si se conoce a priori la evolución futura de la referencia, el sistema puede empezar a reaccionar antes de que el cambio se haya efectivamente realizado, evitando los efectos del retardo en la respuesta del proceso.

En el criterio de minimización (ecuación 1.32), la mayoría de los métodos suelen usar una trayectoria de referencia $w(t+k)$ que no tiene por qué coincidir con la referencia real. Normalmente será una suave aproximación desde el valor actual de la salida $y(t)$ a la referencia conocida mediante un sistema de primer orden

$$w(t)=y(t).$$

- Restricciones: En la práctica, todos los procesos están sujetos a restricciones. Los actuadores tienen un campo limitado de acción, así como una determinada velocidad de cambio (*slewrates*), como es el caso de las válvulas, limitadas por las posiciones de totalmente abierta o cerrada y por la velocidad de respuesta. Razones constructivas, de seguridad o medioambientales o bien los propios alcances de los sensores pueden causar límites en las variables de proceso, tales como niveles en depósitos, caudales en tuberías o temperaturas y presiones máximas. Además, normalmente las condiciones de operación vienen definidas por la intersección de ciertas restricciones por motivos fundamentalmente económicos, con lo que el sistema de control operará cerca de los límites. Todo lo expuesto anteriormente hace necesaria la introducción de restricciones en la función a minimizar [11, 37].

En la formulación del problema, las restricciones se enuncian de la forma:

$$\begin{aligned} u_{min} &\leq u(t) \leq u_{max} \\ \Delta u_{min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq \Delta u_{max} \\ y_{min} &\leq y(t) \leq y_{max} \end{aligned} \quad (1.33)$$

donde, los subíndices min y max significan valor mínimo y máximo respectivamente, $u(t)$ y $\Delta u(t)$ son la señal de entrada y el valor de cambio, y $y(t)$ es la salida. La combinación de una función objetivo cuadrática, un modelo y un

conjunto de restricciones (planteadas como desigualdades) lineales resulta en un problema de programación cuadrática (QP por sus iniciales en inglés).

Los parámetros de sintonía característicos del MPC son, el horizonte de predicción P , el horizonte de control M , el intervalo de muestreo T y los coeficientes de peso Q , R y W .

1.2.4.1 Funcionamiento del MPC

El MPC esencialmente realiza un proceso de optimización basado en un modelo del sistema. Ejecuta predicciones de diferentes estrategias de control sobre el modelo. La predicción se hace en un período de tiempo conocido como horizonte de predicción (PH). Esencialmente se determina la próxima acción del controlador basada en la optimización. Una vez que se aplica la acción de control, se avanza el tiempo de predicción y se rehace la optimización para encontrar las próximas entradas de control.

En la figura 1.12 se tiene un esquema del control por MPC. Una señal de control U definida por el controlador, se aplica a un sistema para controlar la variable Y , y hay un *set point* al que se debe de llegar o mantenerse en él.

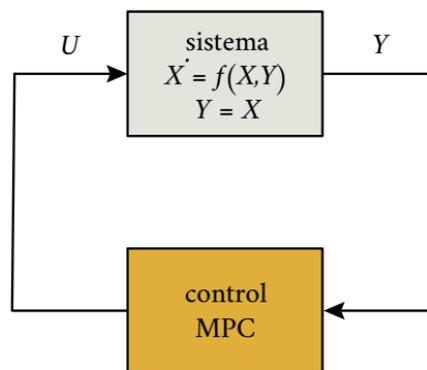


Figura 1.12 Esquema del control por MPC.

1.2.4.2 Optimización

La optimización es un poco demandante en recursos computacionales, porque se ejecuta en cada paso de tiempo, por eso se suele utilizar ecuaciones del sistema linealizadas, incluso si se tiene un sistema no-lineal. El modelo no-lineal se linealiza sobre un estado en particular y luego se hace una optimización lineal. El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia pues proporciona las acciones de control. Si la función de coste es cuadrática, el mínimo se puede obtener como una función explícita de las entradas y salidas pasadas y de la trayectoria de referencia. Sin embargo, cuando existen

restricciones de desigualdad la solución debe ser calculada por métodos numéricos con más carga de cálculo.

La programación cuadrática permite abordar un problema de optimización con una función objetivo cuadrática sujeta a restricciones lineales, que se visualiza como una superficie cuadrática convexa.

En la figura 1.13 se muestra un ejemplo de la implementación de un control MPC en un reactor.

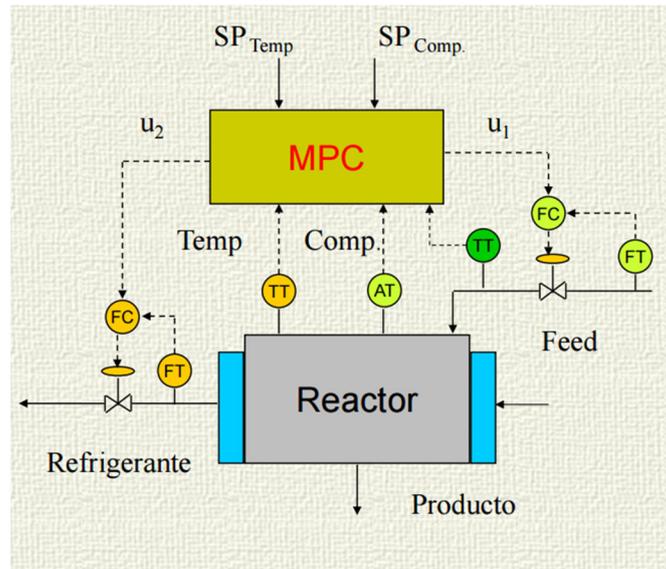


Figura 1.13. Implementación de un control MPC en un reactor.

Control Predictivo Basado en Modelos (MPC/MBPC) es aplicable en [21] :

- ✓ procesos mono o multivariable, incluso con distinto número de variables manipuladas y controladas
- ✓ procesos estables o inestables en lazo abierto con dinámica difícil: respuesta inversa, interacción, con grandes retrasos de tiempo y procesos no lineales...
- ✓ permite trabajar con restricciones sobre las variables manipuladas y controladas de una manera sistemática durante el diseño y la implementación del controlador.
- ✓ compensación de perturbaciones medibles (acción *feedforward*)
- ✓ buen compromiso entre la robustez y las características de funcionamiento
- ✓ Fácil de comprender por los usuarios
- ✓ fácil de mantener

- ✓ el modelado en línea abre el camino de la supervisión, el diagnóstico, la optimización económica.
 - ✓ son adecuadas las técnicas de diseño asistido por ordenador.
 - ✓ Las razones principales para el incremento de la aceptación de la tecnología
 - ✓ Es fácil de sintonizar, en principio hay varios parámetros básicos a ser sintonizados.
- Sin embargo, presenta algunas desventajas tales como:
- ✓ Requiere un modelo dinámico del sistema y de las perturbaciones para predecir el comportamiento del sistema. Esto es fundamental ya que condiciona el desempeño del controlador.
 - ✓ Se requiere un algoritmo de optimización on-line para la implementación del controlador. Esto lleva a tener altos costos en la implementación.
 - ✓ Se suele aplicar en sistemas de dinámica lenta debido al costo computacional que requiere.

Conclusiones parciales

La revisión bibliográfica realizada, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- 1 La fundamentación teórica de los sistemas de fase no mínima, mostró las principales características de estos y las razones por las cuales pueden aparecer dichas situaciones, permitiendo conocer el comportamiento en particular de estos sistemas.
- 2 El análisis contextual e histórico de las técnicas PID, IMC y MPC, permitió delimitar los campos de aplicación y ventajas sobre técnicas precedentes.
- 3 A pesar que el controlador PID posee un enfoque clásico ampliamente utilizado para el control de sistemas dinámicos en la industria de manera general, no es el algoritmo más adecuado para sistemas con respuesta inversa o dinámicas complicadas.
- 4 El IMC es más avanzado y permite un control preciso y robusto, pero requiere el conocimiento del modelo interno del proceso.
- 5 El modelo de control predictivo proporciona un mejor rendimiento en sistemas más complejos y una identificación precisa del modelo, tiene en cuenta restricciones y objetos múltiples, por lo que es el más adecuado

para el análisis de sistemas que presentan una dinámica compleja donde se requiere un control óptimo y flexible.

- 6 El MPC utiliza un algoritmo de optimización para encontrar la solución óptima en cada momento, lo que permite ajustar continuamente las acciones de control en función de las condiciones actuales del sistema. En contraste, el PID y el IMC requieren una sintonización manual o una estimación precisa del modelo del sistema, lo que puede limitar su capacidad para adaptarse a cambios inesperados.

CAPITULO 2. Implementación de los algoritmos PID, IMC y MPC.

Introducción.

En este capítulo se realizará la comparación entre los algoritmos más usados en el control predictivo (PID, IMC y MPC) para esto el diseño y simulación de las técnicas aplicadas a los casos de estudio se realizan utilizando los *Toolbox*: MPC y *Simulink*, del Matlab. Se hará el análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los modelos con el apoyo visual de gráficos y tablas, demostrando la superioridad del MPC y las mejoras introducidas por este en la obtención de un compromiso entre rendimiento y robustez.

2.1 Características del modelo a implementar

Para el modelo a implementar se considera un sistema, cuya función de transferencia a lazo abierto posee un comportamiento propio de un sistema con respuesta inversa. El modelo escogido posee un cero positivo y dos polos negativos [18] y viene dado por la función de transferencia siguiente:

$$G(s) = \frac{(-3s+1)}{(1+2s)(1+5s)} \quad (2.1)$$

Para comprobar que el modelo presentado es de fase mínima, se debe corroborar que al menos posea un cero en el semiplano derecho. La presencia de polos en el semiplano izquierdo denota que se está trabajando con un sistema estable. En las figuras 2.1 y 2.2 se muestra el comportamiento de la estabilidad del sistema. Mediante el gráfico de polos y ceros, se demuestra que el sistema cumple con los requisitos para ser un sistema de fase mínima.

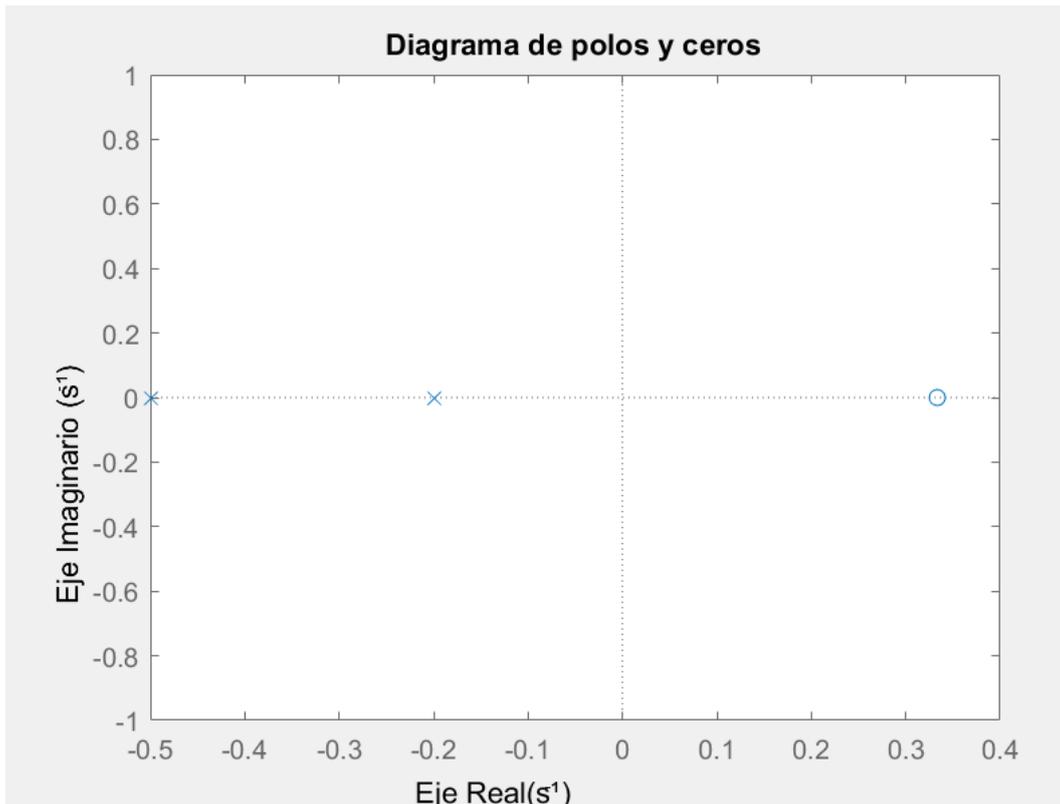


Figura 2.1 Diagrama de polos y ceros del sistema a analizar.

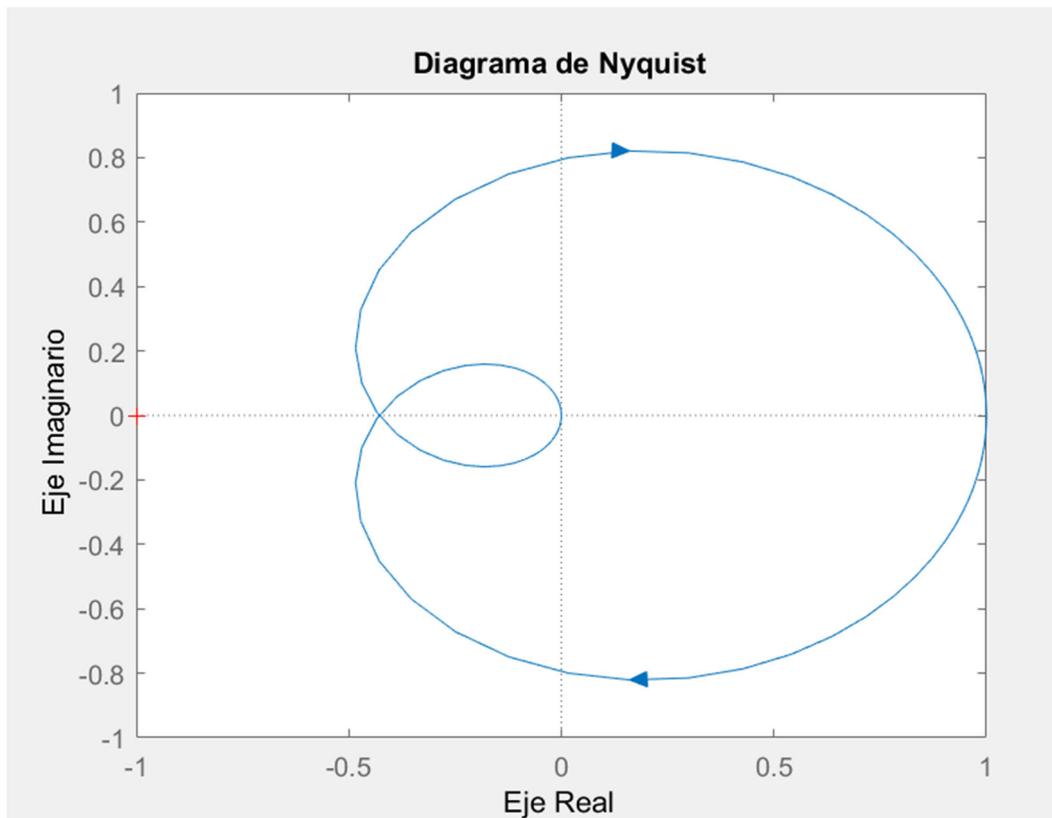


Figura 2.2 Diagrama de Nyquist para el modelo dado.

2.1.2 Diseño de las estrategias de control para sistema de fase no mínima

Estrategia PID:

En el diagrama de bloques diseñado en el *Simulink* del Matlab, se realiza la simulación del lazo simple usando el control típico PID, como se muestra en la figura 2.3. La función de transferencia ingresada es única del sistema, en el bloque correspondiente al controlador PID, se puede realizar los cambios para los valores de las ganancias previamente sintonizados a través del método de las oscilaciones mantenidas de *Ziegler-Nichols*.

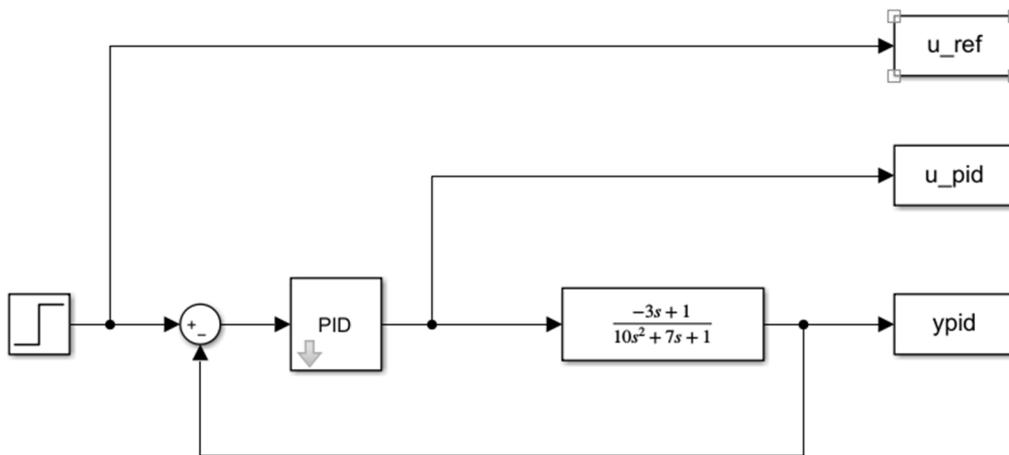


Figura 2.3 Diagrama en bloques del sistema SISO correspondiente a la ecuación 2.1 Para sintonizar el controlador se trabaja con la función de transferencia del proceso expresándola en el dominio frecuencial, como se visualiza en la ecuación (2.2).

Se expresa el modelo de la planta en $(j\omega)$:

$$G(s) = \frac{(-3j\omega+1)}{(1+2j\omega)(1+5j\omega)} \quad (2.2)$$

Una vez colocada la función de transferencia en el editor de Matlab, se le asignan los comandos Gm, Pm, Wcg, Wcp; correspondientes al margen de ganancia, margen de fase, frecuencia de cruce de ganancia y frecuencia de cruce de fase respectivamente. La frecuencia de corte también se visualiza en la figura 2.4 mediante el diagrama de *Bode*.

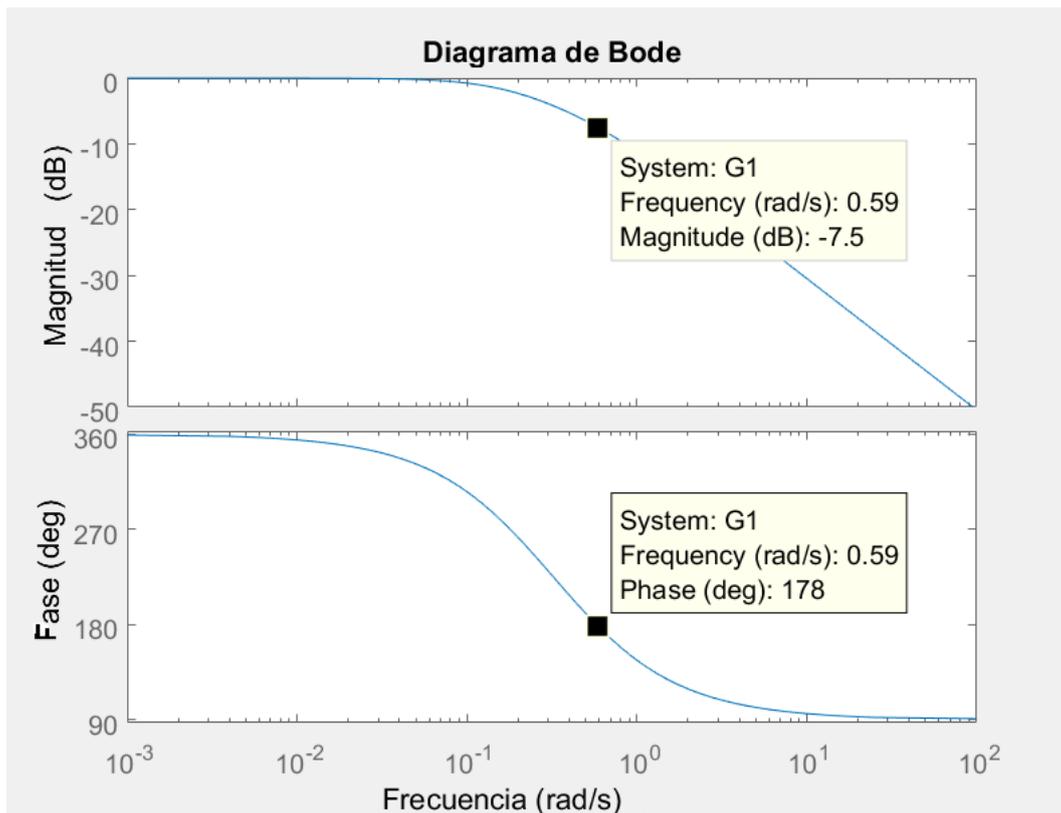


Figura 2.4 Diagrama de Bode donde se visualiza los valores aproximados a la frecuencia de corte resultante.

Para estos requerimientos de MF (margen de fase) de -180° , la frecuencia de corte resulta $\omega_c = 0.577 \text{ rad/s}$, $G_m = 2.3333$.

A través de los del margen de ganancia (ganancia última) y de fase (período último), se determinan los parámetros para el controlador PID, por el método de las oscilaciones mantenidas:

$$Ku = 2.3333$$

$$Tu = \frac{2*3.14}{\omega_c} = \frac{2*3.14}{0.577} = 10.8828 \text{ s} \quad (2.3)$$

Ganancia del controlador:

$$Kc = \frac{Ku}{1.7} = \frac{2.3333}{1.7} = 1.37 \quad (2.4)$$

Los valores de los tiempos de integración y derivativo, resultan de:

$$Ti = \frac{Tu}{2} = \frac{10.8828}{2} = 5.4414 \text{ s} \quad (2.5)$$

$$Td = \frac{Tu}{8} = \frac{10.8828}{8} = 1.3604 \text{ s} \quad (2.6)$$

La expresión para el controlador, queda:

$$G_c(s) = Kc * \left[\frac{Ts+1}{Tis} + Tds \right] \quad (2.7)$$

$$G_1(s) = 1.37 * \left[\frac{5.4414s+1}{5.4414s} + 1.3604s \right] \quad (2.8)$$

Obtenidos los valores de ajuste para el controlador, se configura el simple lazo realimentado cuyo modelo se presentó en la figura 2.1.

En la figura 2.2 se presenta la respuesta de la configuración en simple lazo, obtenidas a través del *Simulink* del Matlab para controlador PID ante un escalón en la entrada para un sistema de segundo orden subamortiguado sin perturbaciones en 40 segundos. En la figura 2.5 se muestra dicho comportamiento.

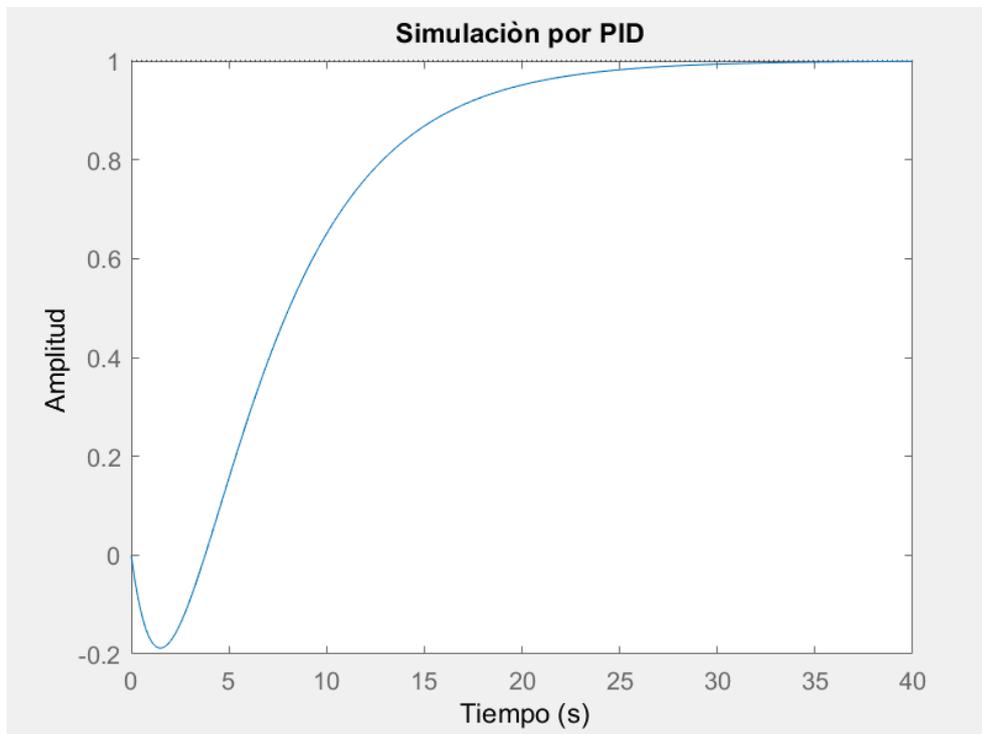


Figura 2.5 Respuesta del sistema ante un escalón en la entrada correspondiente al controlador PID.

Estrategia IMC:

Una de las primeras estrategias de control predictivo a analizar exige tener el modelo interno de la planta, para de esta manera simular el comportamiento del proceso (ver código completo en Anexo1).

En el diagrama de bloques diseñado en el *Simulink* del Matlab, se realiza la simulación del lazo simple usando el control IMC, como se muestra en la figura 2.6.

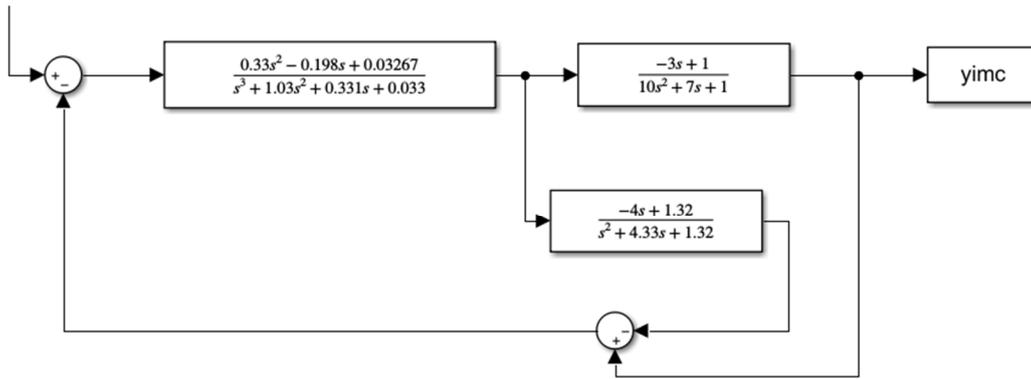


Figura 2.6 Diagrama de bloques del control IMC.

El comportamiento de la planta en comparación con el modelo dado sería el mostrado en la figura 2.7, teniendo en cuenta que T es la multiplicación entre el modelo interno y el parámetro Q y M1_ideal la respuesta del controlador:

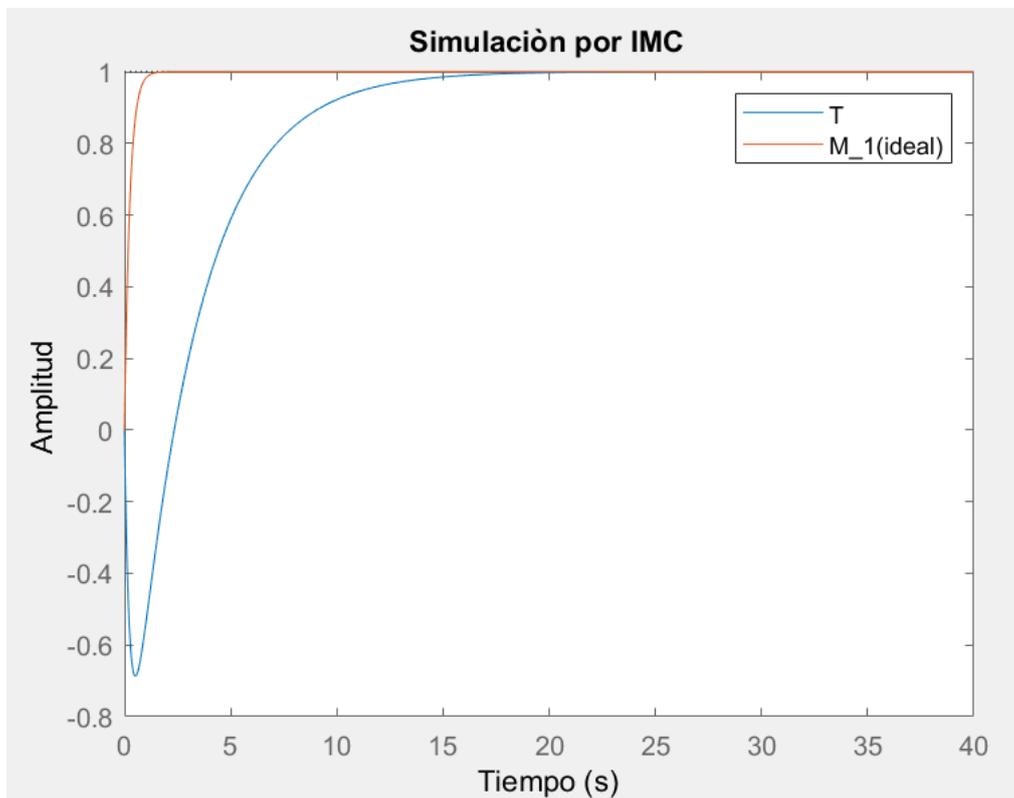


Figura 2.7 Comportamiento usando el controlador IMC.

Estrategia MPC:

Con el objetivo de mejorar la respuesta del proceso analizado, con comportamiento de fase no mínima, en lo adelante se implementa la técnica Control Predictivo basado en Modelo, abordado histórica y conceptualmente en el capítulo 1, el mismo constituye un método más avanzado de control, a su vez, de fácil aplicación y entendimiento.

La simulación se realiza en la ventana *MPC Designer*, con la ayuda del *Simulink* del Matlab. Los parámetros del controlador son los siguientes:

- Horizonte de predicción (p): Indica el número de muestras futuras que el controlador considera para predecir la salida del sistema. Su valor debe ser positivo.
- Horizonte de control (m): Es el número de muestras futuras que el controlador considera para calcular la acción de control. Su valor debe ser positivo y menor que el horizonte de predicción.

La tabla 2.1 contiene los parámetros de diseño del controlador predictivo ante cambios en la referencia.

Tabla 2.1 MPC para el modelo correspondiente a la ecuación 2.1, ante cambio en la referencia.

Parámetros	Valor
Duración de la simulación (t_{final})	40
Horizonte de predicción ($N1$)	50
Horizonte de control ($N2$)	3
Tiempo de muestreo	0.1

Para el diseño del controlador predictivo, se utiliza el *Toolbox* MPC de Matlab.

En la figura 2.8 se muestra el diagrama en bloques del control MPC de simple entrada, simple salida.

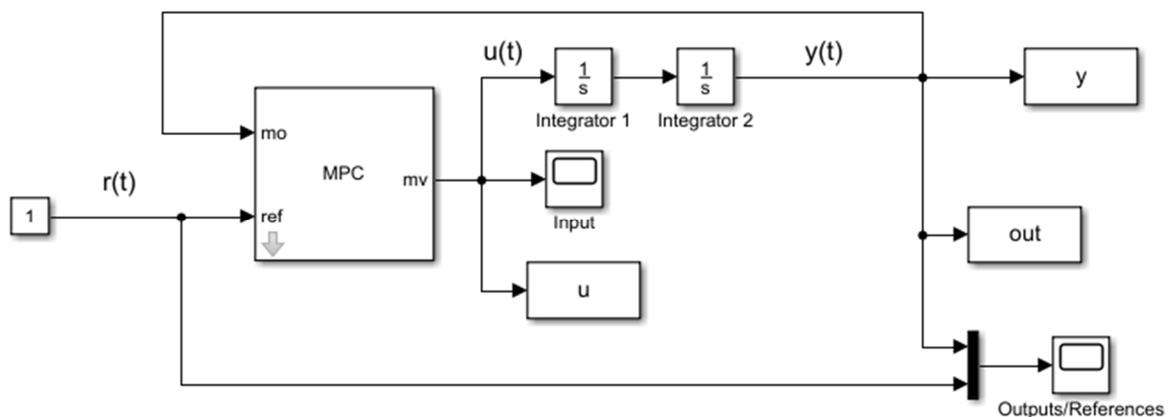


Figura 2.8 Diagrama en bloques del control MPC, teniendo en cuenta el modelo de estudio.

En la figura 2.9 se presenta la respuesta de la configuración en simple lazo, obtenidas a través del *Simulink* del Matlab correspondiente al control predictivo

ante un escalón en la entrada, para un sistema de segundo orden subamortiguado sin perturbaciones.

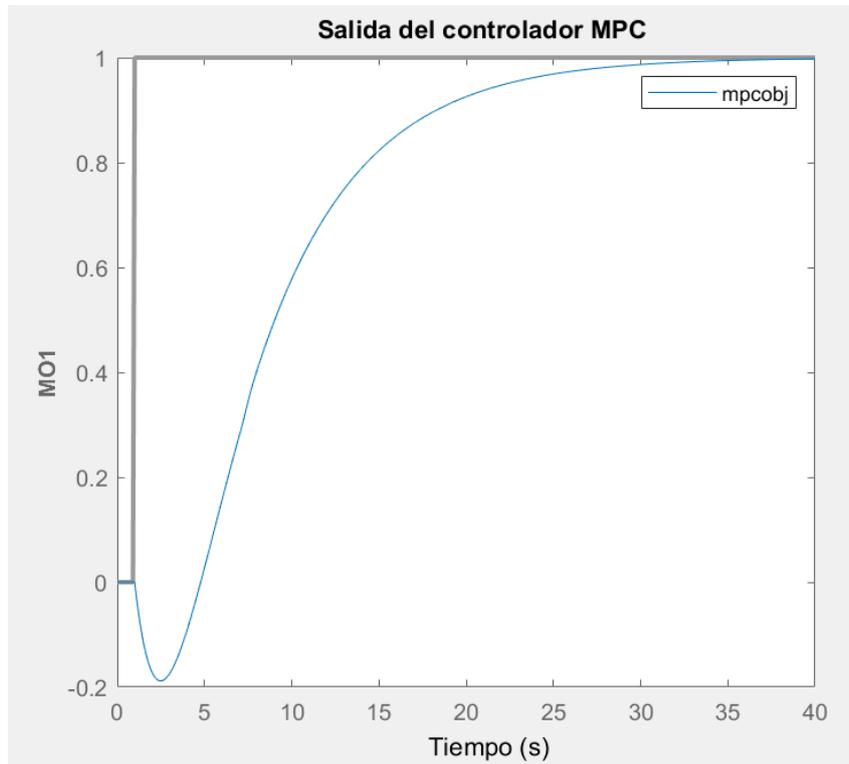


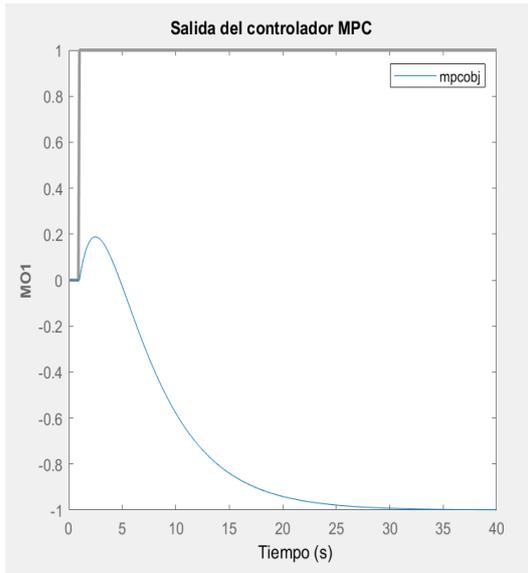
Figura 2.9 Comportamiento del controlador MPC con los parámetros correspondientes a la tabla 2.1.

Para comprobar cuáles son los valores de los parámetros que más se acercan al modelo deseado, se realizó la evaluación de sus comportamientos variando los horizontes de predicción y control, como lo muestra la tabla 2.2.

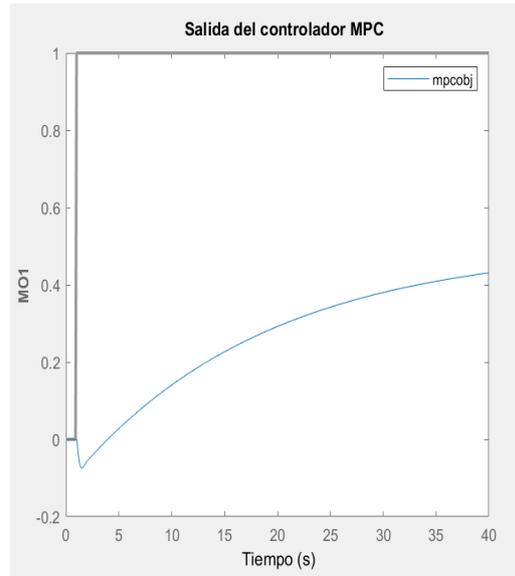
Tabla 2.2 Parámetros del MPC ante cambios en m y p.

Parámetros	Evaluación	Evaluación	Evaluación	Evaluación
	1	2	3	4
Valor de referencia	1	1	1	1
m	3	3	3	10
p	10	40	50	60
Tiempo de muestreo	0.1	0.1	0.1	0.1

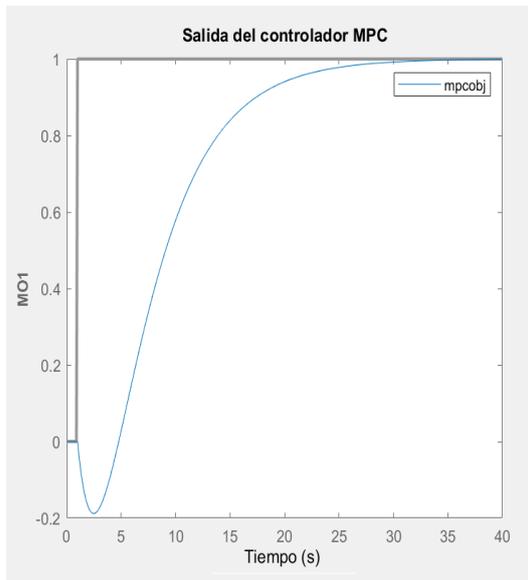
En la figura 2.10 se muestra el comportamiento del controlador ante la variación de los parámetros de la tabla 2.2.



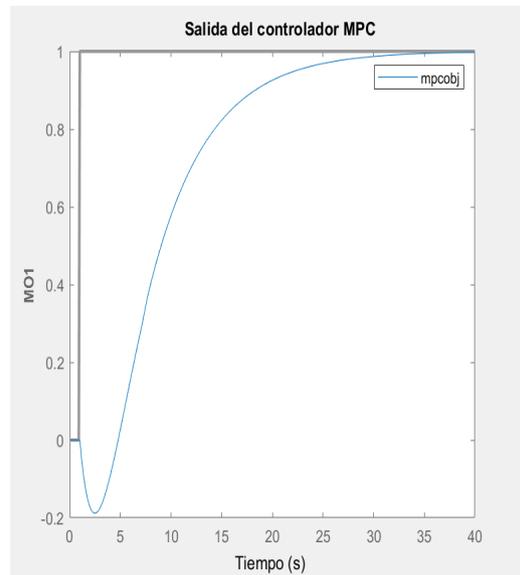
1



2



3



4

Figura 2.10 Comportamiento del controlador ante la variación de los parámetros de la tabla 2.2 respectivamente.

Al observar el comportamiento del proceso, variando sus parámetros m y p , se puede observar que, mientras aumenta el valor del horizonte de predicción, la respuesta converge y se va acercando al valor de referencia. El horizonte de predicción predice la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal especificado por el operador, de este modo se puede calcular las variables manipuladas futuras (señal de control futura) para lograr que en dicho horizonte.

2.1.3 Resultados de las simulaciones

A través de la herramienta de programación Matlab, se simularon las estrategias de control: PID, IMC y Predictivo, en igualdad de consideraciones (sin disturbios, sistemas SISO) para el sistema escogido en este epígrafe (ecuación 2.1). La figura 2.11 muestra los diagramas de bloques combinados en el *Simulink*, ante un mismo tiempo de muestreo, en este caso 0.1 segundos.

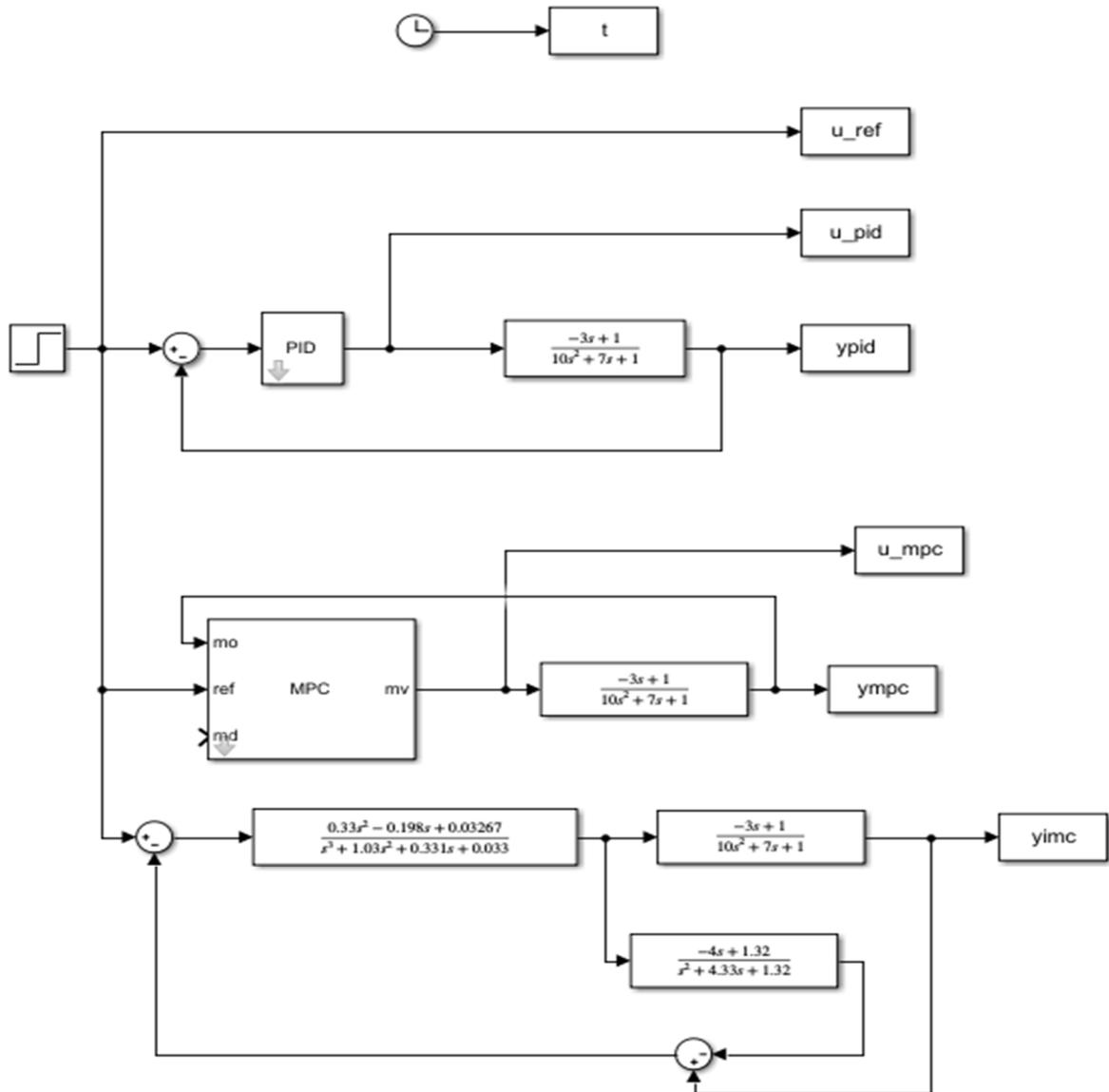


Figura 2.11 Diagrama en bloques de las dos técnicas de control estudiadas, PID, IMC y MPC.

La figura 2.12 presenta la simulación correspondiente a las salidas del proceso para las mismas técnicas de control ante un escalón, pero esta vez graficadas

en la misma ventana. De esta manera se evidencia la respuesta inversa de ambos sistemas.

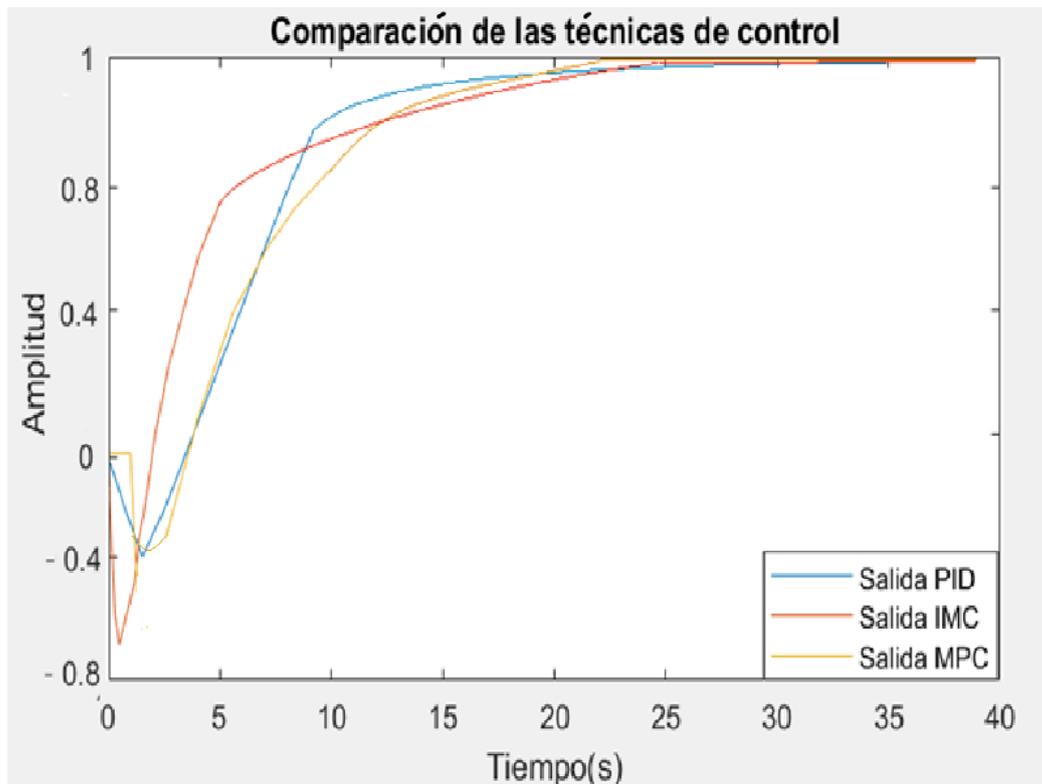


Figura 2.12 Salidas correspondientes a los controladores PID, IMC y MPC.

Se puede notar que con las tres estrategias se logra seguir los cambios de referencia establecidos. La señal de control se comporta de manera similar para las estrategias analizadas (PID, IMC, MPC).

El control PID posee una respuesta inversa menos apreciada en comparación con el resto de las estrategias; este comportamiento puede mejorarse con la inclusión de restricciones en la entrada, pero provocaría un deterioro del tiempo de establecimiento, por lo cual debe valorarse dependiendo de los objetivos de control particulares y las características propias de los actuadores del proceso en específico a analizar. La técnica PID, aunque converge con mayor rapidez a las aproximaciones del valor de referencia, tarda unos segundos más que las otras estrategias en estabilizarse, su tiempo de establecimiento es de 28 segundos. La respuesta del sistema posee un mayor sobrepaso.

El control IMC, aunque se anticipa a la respuesta, tarda más tiempo en estabilizarse en el valor de referencia (en estos casos de escalón = 1). Su valor de respuesta inversa es mayor que en el caso del controlador MPC de aproximadamente - 0.2; la respuesta del sistema posee un menor sobrepaso

en comparación con las estrategias anteriores. Su tiempo de establecimiento es de aproximadamente 25 segundos.

El control MPC, en sistemas de fase no mínima posee un mejor desempeño en comparación con las otras técnicas graficadas. Aunque tarda unos segundos en anticiparse a la respuesta del sistema (como es el caso del IMC), posee un tiempo de establecimiento de aproximadamente 21 segundos, más rápido en comparación con las respuestas de las otras estrategias.

Para poder visualizar mejor el comportamiento y valorarlo de manera cuantitativa, se debe proceder a trabajar con los errores correspondientes a cada sistema siguiendo la relación de la señal de salida con respecto al valor de referencia en la entrada. Al realizar la gráfica del error de cada técnica implementada en el proceso, se obtiene la respuesta mostrada en la figura 2.13.

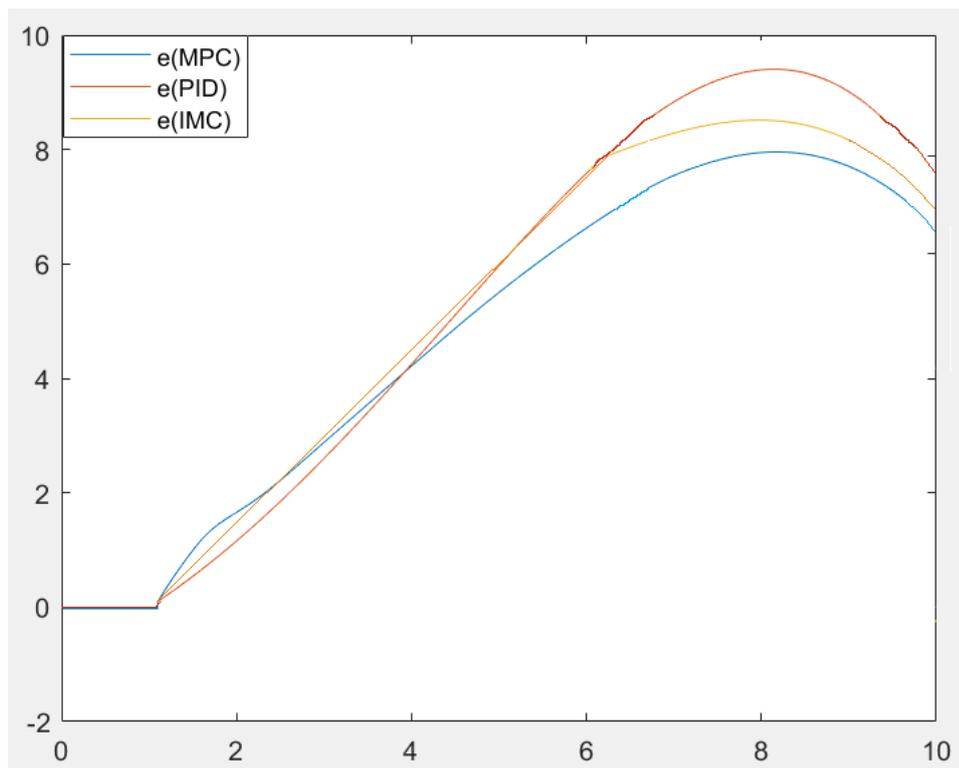


Figura 2.13 Relación entre los errores de cada técnica implementada con el modelo dado.

Como se puede observar el margen de error del controlador MPC es mucho menor en sistemas de fase no mínima. El controlador PID muestra mayor

margen del error, y por la tanto ofrece una respuesta no adecuada ante sistemas con esta característica.

Para mostrar el error que hay entre los conjuntos de datos, en este caso, de los controladores a evaluar, se calcula el error cuadrático medio (EMC) y así llegar a conclusiones con respecto a un rendimiento mejorado en la valoración de los controladores MPC, IMC y PID respectivamente. Para llegar a los valores del error cuadrático medio mostrados en la tabla 2.3 se utiliza la ecuación (2.9).

$$EMC = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2.9)$$

Como se puede apreciar el EMC del PID es mayor en aproximadamente 8 unidades al error cuadrático del MPC, lo que demuestra la idoneidad de este último controlador en relación con el primero en sistemas de fase no mínima. Según los resultados experimentales obtenidos, el control MPC tiene mejor comportamiento dinámico, con un tiempo y una curva menor que el control PID. Se observa que el desempeño del control predictivo en el comportamiento del sistema, es superior, teniendo en cuenta, que se requiera para el control, precisión, y velocidad en la respuesta.

Tabla 2.3 Comparación entre las estrategias de control aplicadas.

Estrategias de control	Pico de respuesta inversa	Tiempo de subida	Tiempo de establecimiento	Error cuadrático medio
PID	-0.2	10	28	41.0268
IMC	-0.7	5	25	37.0523
MPC	-0.18	12	21	30.4822

Conclusiones parciales

1. Se diseñó y simuló las estrategias de control PID y MPC, utilizando como herramienta de software el Matlab®.
2. Estas estrategias se aplicaron a un modelo SISO (simple entrada, simple salida), lo que permitió determinar, según las características dinámicas del modelo, cuál de estas tiene un mejor comportamiento para seguir cambios en la referencia en sistemas de fase no mínima.

3. A partir de los resultados mostrados en las simulaciones, de las especificaciones de la respuesta temporal y con los índices de desempeño calculados (pico de respuesta inversa, tiempo de subida, tiempo de establecimiento, error cuadrático medio) se concluye que para sistemas estables el controlador predictivo tuvo un comportamiento superior y brindó mejores prestaciones.
4. Se evidenció el mejor comportamiento de dicha estrategia para las incertidumbres en la ganancia, lo cual es muy importante en este tipo de estrategias de control que dependen de un modelo del sistema ya que en la práctica industrial siempre habrá diferencias entre la planta real y el modelo.
5. Este trabajo tendría una aplicación práctica en cualquier industria, principalmente en la industria química pues los reactores, torres de destilación, evaporadores son comunes en varios tipos de industria y en ocasiones su comportamiento es el no deseado, debido a la falta de aplicación de esta técnica.

CONCLUSIONES

1- La fundamentación teórica de los sistemas de fase no mínima, mostró las principales características de estos. El análisis contextual e histórico de las técnicas, PID y Predictivo, permitió delimitar los campos de aplicación, principales líneas de investigación, limitaciones y ventajas sobre técnicas precedentes de cada una de ellas.

2- Se realizó el diseño y simulación del control utilizando la estrategia PID, demostrándose las limitaciones de la misma sobre los procesos analizados en cuanto a especificaciones de desempeño, tales como precisión y velocidad de respuesta.

3- La aplicación del control Predictivo, también a través del Matlab, a los procesos analizados, comprobó la eficiencia y fiabilidad de esta técnica, demostrándose la capacidad de seguir cambios en la referencia, eliminar el efecto de disturbios no medidos, agregando además precisión, estabilidad y velocidad de respuesta al sistema.

RECOMENDACIONES

1- Realizar el diseño y simulación utilizando la estrategia PID para procesos con comportamiento de fase no mínima, mediante métodos de ajustes más robustos para estos controladores, que propicien un mejor desempeño de la estrategia en el tratamiento de estos sistemas.

2- Realizar el diseño y simulación del MPC a sistemas de fase no mínima con retardo de transporte, y analizar el comportamiento ante cambios en la referencia considerando disturbios medidos y no medidos, incluyendo el filtrado de ruidos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Arbildo-López, "El control de procesos industriales y su influencia en el mantenimiento," *Ingeniería industrial*, pp. 35-49, 2011.
- [2] V. H. M. Sifuentes, *Simulación de procesos en Ingeniería Química*: Plaza y Valdes, 2000.
- [3] O. Regalón Anias, V. Rodríguez Díez, L. López Rodríguez, J. García Parrado, Y. Paneque Díaz, S. Bardanca Consuegra, *et al.*, "Automatización integral del proceso de secado de bioproductos," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 36, pp. 1-14, 2015.
- [4] H. Astudillo Roblero, J. Gallardo Arancibia, and C. Ayala Bravo, "Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 28, pp. 612-628, 2020.
- [5] O. Katsuhiko, "Ingeniería de control moderna," *Minnesota, PEARSON EDUCACION*, pp. 669-843, 1998.
- [6] B. Hogg and N. El-Rabaie, "Multivariable generalized predictive control of a boiler system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, pp. 282-288, 1991.
- [7] V. r. Havlena and J. Findejs, "Application of model predictive control to advanced combustion control," *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 671-680, 2005.
- [8] B. Hogg and N. El-Rabaie, "Generalized predictive control of steam pressure in a drum boiler," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, pp. 485-492, 1990.
- [9] M. Morari and J. H. Lee, "Model predictive control: past, present and future," *Computers & chemical engineering*, vol. 23, pp. 667-682, 1999.
- [10] A. Luzón-Cervantes, I. Bausa-Ortiz, and G. O. Borges-Ortiz, "CONTROL PREDICTIVO EN UN FERMENTADOR NO LINEAL," *Ciencia en su PC*, pp. 86-95, 2010.
- [11] E. F. Camacho and C. Bordons Alba, "Control predictivo: Pasado, presente y futuro," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1 (3), 5-28., 2004.
- [12] R. Machado Villacres, "Método de control para un proceso con respuesta," Universidad Nacional de La Plata, 1975.
- [13] V. F. Baidal Alvarado, "Optimación de la Dinámica del Control para una Torre de Destilación de la Industria del Petróleo Ecuatoriano," 2022.
- [14] M. Lorenzo, A. Aguado, and H. J. Garcini, "Sistema de control predictivo multivariable para un evaporador cuádruple efecto," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 40, pp. 40-53, 2006.
- [15] E. C. Asimbaya Shuguli and H. P. Cabrera Cevallos, "Diseño y simulación de un esquema de control dinámico en modo deslizante para sistemas con respuesta inversa," Quito, 2017., 2017.
- [16] B. A. Ogunnaike and W. H. Ray, "Process dynamics, modeling, and control," (*No Title*), 1994.
- [17] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*: Springer-Verlag, London, 2004.
- [18] K. Veluvolu, "Controller Design for processes with Difficult Dynamics."
- [19] W. Ipanaqué Alama, R. Rodríguez Torres, and M. Alamo Viera, "Modelado y simulación de un sistema de nivel de líquidos, utilizando Simulink® Matlab®," *U. d. Piura, Ed*, 2012.
- [20] L. E. Mayorga Miranda, "Diseño e implementación de una plataforma para el estudio comparativo de un controlador predictivo (MPC) con controladores PID y FUZZY, aplicado al control de velocidad de un motor DC," 2019.
- [21] V. Miranda and C. de Prada, "Controlador predictivo explícito de un evaporador," *Universidad de Valladolid*. URL: http://www.ecosimpro.com/download/articles/ESC_2006_02_es.pdf, 2006.
- [22] M. A. Henson, "Nonlinear model predictive control: current status and future directions," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, pp. 187-202, 1998.

- [23] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal model control: PID controller design," *Industrial & engineering chemistry process design and development*, vol. 25, pp. 252-265, 1986.
- [24] C. E. Garcia, D. M. Prett, and M. Morari, "Model predictive control: Theory and practice—A survey," *Automatica*, vol. 25, pp. 335-348, 1989.
- [25] L. A. A. Toro and O. Sotomayor, "INTEGRACIÓN OPTIMIZACIÓN—CONTROL PREDICTIVO Y APLICACIÓN A LA PLANTA TENNESSEE EASTMAN," *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, vol. 11, pp. 47-59.
- [26] J. Richalet, A. Rault, J. Testud, and J. Papon, "Model predictive heuristic control," *Automatica (journal of IFAC)*, vol. 14, pp. 413-428, 1978.
- [27] D. W. Clarke, "Application of generalized predictive control to industrial processes," *IEEE Control systems magazine*, vol. 8, pp. 49-55, 1988.
- [28] J. Richalet, "Industrial applications of model based predictive control," *Automatica*, vol. 29, pp. 1251-1274, 1993.
- [29] D. Clarke, "Advances in model-based predictive control," (*No Title*), 1994.
- [30] J. G. Ortega and E. Camacho, "Mobile robot navigation in a partially structured static environment, using neural predictive control," *Control Engineering Practice*, vol. 4, pp. 1669-1679, 1996.
- [31] D. F. Sendoya, "¿ Qué es el control predictivo y hacia dónde se proyecta?," *Publicaciones e Investigación*, vol. 7, pp. 53-59, 2013.
- [32] E. Estremera Toledo, A. Lussón Cervantes, and I. Bausa Ortiz, "Estudio comparativo en sistemas multivariables con retardo: modificaciones del Predictor de Smith y Control Predictivo," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 38, pp. 49-64, 2017.
- [33] A. González Sorribes, "Controladores digitales basados en predictor para sistemas con retardos variables en el tiempo," Universitat Politècnica de València, 2012.
- [34] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 13, pp. 559-576, 2005.
- [35] J. B. Rawlings, "Tutorial overview of model predictive control," *IEEE control systems magazine*, vol. 20, pp. 38-52, 2000.
- [36] R. Salcedo and R. Correa, "Sicompc: Simulador para control predictivo basado en modelos," *Dyna*, vol. 75, pp. 89-98, 2008.
- [37] M. Sivianes, P. Velarde, A. Zafra, and C. Bordons, "Gestión de energía en comunidades energéticas mediante Blockchain y MPC estocástico y distribuido," in *XLIV Jornadas de Automática*, 2023, pp. 370-375.
- [38] E. D. Mañay, M. D. Chilingua, H. E. Y. Ugsha, and P. S. Castillo, "Diseño por simulación de un control Fuzzy y MPC para un proceso de nivel," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 6, pp. 1951-1970, 2022.
- [39] A. Namigtle-Jiménez, O. Bautista-Merino, J. Namigtle-Jiménez, O. Cortés-Vázquez, and L. E. Namigtle-Jiménez, "Implementación de un MPC en un intercambiador de calor usando LabVIEW," *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 9, pp. 56-64, 2022.
- [40] M. Francisco and P. Vega, "Diseño Integrado de procesos de depuración de aguas utilizando Control Predictivo Basado en Modelos," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 3, pp. 87-97, 2006.
- [41] B. Valadez Hernández, "Control de modelo predictivo (MPC) No-lineal para una columna petlyuk: Cosimulación Matlab-Aspen," *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*, 2022.
- [42] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," *Automatica*, vol. 36, pp. 789-814, 2000.
- [43] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," *Control engineering practice*, vol. 11, pp. 733-764, 2003.

- [44] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, "Review on model predictive control: An engineering perspective," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, pp. 1327-1349, 2021.
- [45] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust process control: Morari*, 1989.
- [46] D. Castellanos-Cárdenas and F. Castrillón-Hernández, "New tuning rules for PID controllers based on IMC with minimum IAE for inverse response processes," *Dyna*, vol. 82, pp. 111-118, 2015.
- [47] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle III, *Process dynamics and control*: John Wiley & Sons, 2016.
- [48] J. A. Zambrano García, "Desarrollo de estrategias de control por el modelo interno (IMC) para procesos con grandes retardos de tiempo," Espol, 2017.
- [49] R. Keyser, "Industrial Control Engineering," October 2014 2014.
- [50] A. Sala, "Control por modelo interno (IMC): Metodología de diseño con retardo y procesos de fase no mínima," Universidad Politécnica de Valencia, 2023.
- [51] H. Cevallos, "Implementación de un prototipo de túnel de calentamiento para analizar el comportamiento del control predictivo basado en modelo (mbpc) vs control proporcional integral derivativo (pid) utilizando so," 2010.
- [52] D. M. Lima, J. E. Normey-Rico, and T. L. M. Santos, "Temperature control in a solar collector field using filtered dynamic matrix control," *ISA transactions*, vol. 62, pp. 39-49, 2016.
- [53] G. Franzè and W. Lucia, "An obstacle avoidance model predictive control scheme for mobile robots subject to nonholonomic constraints: A sum-of-squares approach," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, pp. 2358-2380, 2015.
- [54] A. Acosta, A. Marquez-Ruiz, and J. J. Espinosa, "Nonlinear model predictive control of a passenger vehicle for automated lane changes," *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones (RIELAC)*, vol. 38, pp. 48-56, 2017.
- [55] R. J. C. Coneo, P. R. M. Barandita, and M. E. S. Mejía, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO TIPO GPC PARA UN REACTOR DE LABORATORIO."