

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**ESCUELA DE POSGRADO**



***“DESARROLLO DE UN PREDICTOR DE SMITH MODIFICADO PARA EL CONTROL DE PLANTAS INDUSTRIALES CON RETARDO DE TIEMPO DOMINANTE Y SOMETIDAS AL EFECTO DE PERTURBACIONES EXTERNAS”***

***Tesis para optar el Grado de:***

***Magister en Ingeniería de Control y Automatización***

***Autor: Ing. Dante Jesús Rueda Bergamino***

***Asesor: D.Sc Raúl Rivas Pérez***

***Lima-Perú***

***2017***

## **RESUMEN**

*En esta tesis se desarrolla el diseño de un sistema de control basado en un predictor de Smith modificado mediante un compensador anticipatorio, para el control efectivo de plantas con retardos de tiempo dominante y sometidas al efecto de perturbaciones externas.*

*En el capítulo 1 se expone el estado del arte de los sistemas de control de plantas con retardos de tiempo dominante, mostrando las principales contribuciones científicas realizadas en los últimos 30 años abordando la problemática actual.*

*En el capítulo 2 se muestran algunos ejemplos de plantas típicas con retardos de tiempo inherentes, la caracterización de las mismas y los problemas asociados. Como objeto de estudio se seleccionó un horno siderúrgico de una industria de fabricación de planchones de acero. Mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas se obtiene un modelo matemático de dicha planta.*

*En el capítulo 3, se diseña un controlador basado en un PS modificado mediante un compensador anticipatorio para el control de plantas con retardos de tiempo y sometidas al efecto de perturbaciones medibles, localizadas en la entrada de la planta, sobre la planta y a la salida de la planta. Se muestran resultados comparativos de simulación del sistema de control desarrollado.*

*En el capítulo 4 se realiza un análisis de robustez del controlador diseñado considerando diferentes escenarios de perturbaciones externas. Para tal fin, se utilizaron los índices de desempeño IAE (integral del error absoluto) e ISE (integral del error cuadrático). Se realiza una propuesta de implementación práctica del controlador diseñado.*

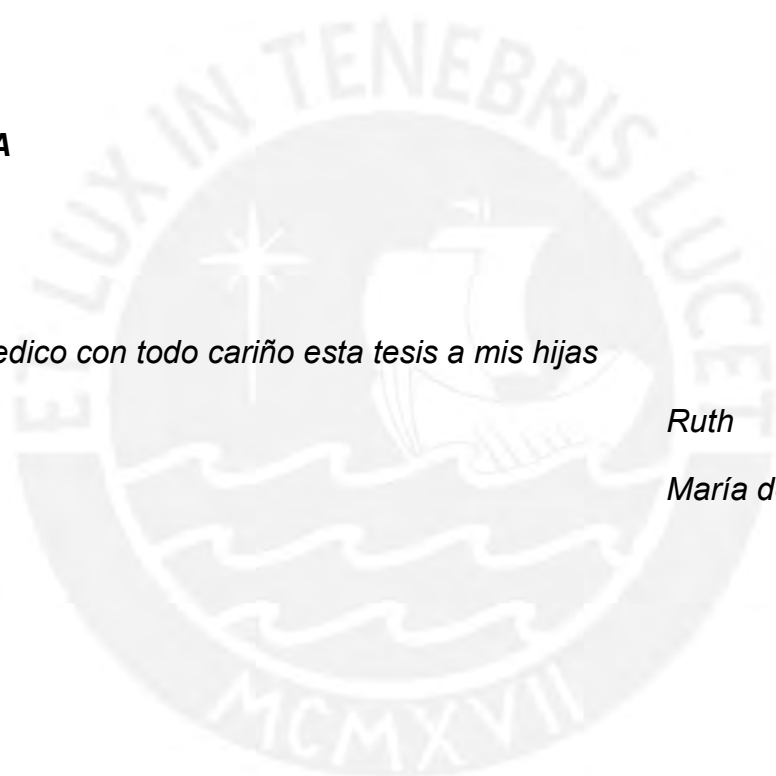
*Finalmente, se ofrecen las conclusiones generales y las recomendaciones.*

**DEDICATORIA**

*Dedico con todo cariño esta tesis a mis hijas*

*Ruth*

*María del Pilar.*



## **AGRADECIMIENTOS**

*En primer lugar, agradezco a los profesores de la Maestría de Ingeniería de Control y Automatización de la PUCP, del período 2014-2016, especialmente a Gustavo Pérez, Antonio Morán, Javier Sotomayor, y particularmente al profesor Raúl Rivas, mi asesor de Tesis.*

*Agradezco la acogida de los compañeros de la Maestría, especialmente a los de Concytec.*

*Agradezco también, por su colaboración a los compañeros de la maestría Anibal Bonilla y Víctor Sánchez.*

*Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP.*

## INDICE

	PAG
<i>Introducción</i>	
<b>I. Capítulo 1: Estado del arte de los sistemas de control de plantas Industriales con retardo de tiempo.</b>	<b>4</b>
1.1. <i>Introducción</i>	4
1.2. <i>Problemática actual de los sistemas de control con retardo de tiempo</i>	5
1.3. <i>Estado del arte de los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo.</i>	7
1.4. <i>Objetivos de la tesis</i>	12
<b>II. Capítulo 2: Dinámica de plantas industriales con retardo de tiempo</b>	<b>14</b>
2.1. <i>Introducción</i>	14
2.2. <i>Caracterización de las plantas industriales con retardo de tiempo.</i>	14
2.2.1. <i>Planta típicas</i>	14
2.2.2. <i>Representación del retardo de tiempo en el dominio de la frecuencia.</i>	19
2.2.3. <i>Aproximaciones polinómicas del retardo de tiempo</i>	23
2.2.4. <i>Problemas de control asociados al retardo de tiempo</i>	27
2.3. <i>Modelado de plantas con retardo de tiempo</i>	32
2.3.1 <i>Generalidades</i>	32
2.3.2 <i>Identificación del comportamiento dinámico de una planta con retardo de tiempo.</i>	32
2.3.3. <i>Validación del modelo.</i>	36
2.4. <i>Conclusiones</i>	39

<b>III. Capítulo 3: Diseño de un predictor de Smith modificado para el control de plantas industriales con retardo de tiempo y perturbaciones</b>	<b>40</b>
3.1. <i>Introducción</i>	40
3.2. <i>El predictor de Smith como estrategia de control de plantas con retardo de tiempo.</i>	41
3.3. <i>Propuesta de modificación del predictor de Smith para el control de plantas con retardos de tiempo y perturbaciones externas.</i>	52
3.4. <i>Resultados de simulación.</i>	70
3.5. <i>Conclusiones</i>	73
<b>IV. Capítulo 4: Análisis de robustez del controlador diseñado y propuesta de implementación</b>	<b>74</b>
4.1. <i>Introducción</i>	74
4.2. <i>Índices de robustez</i>	74
4.3. <i>Análisis de índices de robustez y resultados comparativos.</i>	76
4.4. <i>Propuesta de Implementación de los sistemas de control diseñados con base en el predictor de Smith.</i>	78
4.5. <i>Conclusiones</i>	80
<i>Conclusiones generales</i>	81
<i>Recomendaciones</i>	82
<i>Referencias bibliográficas</i>	83

## **INTRODUCCION**

*El retardo de tiempo es un fenómeno frecuentemente encontrado en los sistemas dinámicos, tales como reactores nucleares, procesos químicos y biológicos y recientemente en procesos controlados en forma remota (via internet). Las causas de los retardos son diversas, pueden ser parte de la naturaleza de un proceso (fenómenos de transporte), o debido al tiempo en la medición de una variable o una señal de transmisión. Muchas veces es el retardo el que origina la inestabilidad y degradación en el desempeño. En algunos sistemas el tamaño del retardo es tal que sus efectos se pueden despreciar, sin embargo hay otros en los cuales su magnitud es tal que no es posible omitirlo. En las últimas dos décadas surgieron numerosas contribuciones en la literatura sobre el tema. Una de las razones principales consiste en que el retardo del tiempo continua siendo una significativa limitante para los sistemas de control, que puede conllevar a la pérdida de estabilidad y por consiguiente debe ser considerado tanto en las etapas de análisis como en las de diseño de los controladores, por lo que esta temática representa un problema abierto de investigación.*

*El retardo de tiempo aparece en muchos procesos industriales, así como de otros campos. Se origina debido al tiempo necesario para el transporte de masa, energía o de información, sistemas de bajo orden conectados en serie, el tiempo de procesamiento necesario para que los sensores entreguen los resultados de las mediciones, el tiempo requerido para el cálculo de los algoritmos de control en los controladores. Los procesos con retardo de tiempos considerables son difíciles de controlar utilizando controladores tradicionales, debido a que su presencia en los lazos de control tiene al menos dos importantes consecuencias: se complica el análisis de estabilidad y los diseños de los controladores, y es más difícil de lograr un control satisfactorio en procesos con este fenómeno. Estas dificultades se pueden explicar en el dominio de la frecuencia porque el tiempo de retardo introduce una disminución adicional en la fase de sistemas que pueden causar inestabilidad*

*El estudio de los sistemas de control con retardos temporales representa actualmente una nutrida línea de investigación en la que se pueden encontrar numerosas contribuciones en la literatura moderna de ingeniería de control.*

*En la actualidad, en muchos procesos industriales en la que los tiempos de retardo constituyen parte fundamental de su dinámica, no se llega al ajuste eficiente de los controladores, ya que la compensación que se hace en controladores clásicos, tipo PID, para contrarrestar el retardo de tiempo en la respuesta provoca que el sistema presente un comportamiento lento y bajo*



rechazo a perturbaciones. Por tanto, se requiere de soluciones efectiva de esta problemática.

El predictor de Smith (PS), propuesto en 1957 por el Norteamericano Otto Smith constituye sin lugar a dudas el compensador de retardo de tiempo más utilizado en el control de plantas con retardo tiempo debido a su elevada efectividad y simple implementación. Esta estructura de control surgió con la idea de mejorar el desempeño de los controladores clásicos (PI o PID) en el control de plantas con retardo de tiempo dominante; sin embargo,

a) Requiere de un modelado exacto del proceso a controlar, en caso contrario se deterioran sus prestaciones.

b) Su efectividad se degrada cuando los procesos se encuentran sometidos al efecto de perturbaciones externas no medibles.

c) Esta estructura de control no es capaz de acelerar la dinámica de rechazo a las perturbaciones.

d) No se puede usar en el control de procesos integradores o de procesos inestables, porque su estructura es intrínsecamente inestable, lo que quiere decir que si entra una perturbación, el sistema de control se inestabiliza para estos dos tipos de procesos.

Es por ello que la problemática relacionada con el diseño de controladores avanzados que se basan en modificaciones del predictor de Smith que posibiliten el control efectivo de plantas con retardos de tiempo dominantes y sometidas al efecto de fuertes perturbaciones externas, constituye un tema novedoso y de interés científico.

### **Objetivo general y objetivos específicos de la tesis:**

#### **Objetivo general:**

Diseñar un sistema de control en el dominio del tiempo continuo basado en un predictor de Smith modificado mediante un compensador anticipatorio (feedforward) para el control efectivo de plantas con retardos de tiempos dominantes y sometidas al efecto de fuertes perturbaciones externas.

#### **Objetivos específicos:**

1) Estudio del estado del arte de los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo.

2) Obtención mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas de un modelo matemático de una planta con retardo de tiempo dominante y sometida al efecto de perturbaciones externas.



3) *Diseñar un sistema de control en el dominio del tiempo continuo basado en un predictor de Smith modificado mediante un compensador anticipatorio para el control de una planta industrial con retardo de tiempo dominante y sometida al efecto de fuertes perturbaciones externas medibles.*

4) *Análisis de la robustez del sistema de control diseñado y propuesta de su implementación práctica.*

*Para alcanzar estos objetivos, la presente tesis ha sido estructurada en cuatro capítulos:*

*En el primer capítulo, referido al estado del arte de los sistemas de control con retardo de tiempo, se describen algunos procesos donde se manifiestan más claramente los retardos de tiempo, las dificultades que surgen en la sintonización de los controladores clásicos, y las soluciones planteadas a través del tiempo por diversos investigadores, como los controladores predictivos MPC (Model Predictive Control), siendo el compensador de retardo de tiempo DTC (Dead Time Compensator) y el controlador predictivo (MPC) los más usados en la industria hasta el día de hoy*

*En el segundo capítulo, se aborda la dinámica de los procesos con retardos de tiempo, describiendo algunas plantas típicas, la representación del retardo de tiempo en el dominio de la frecuencia, así como los problemas que surgen en el control para este tipo de plantas. Se modela una planta con retardo de tiempo dominante, se efectúa su identificación, luego su validación, seleccionando una planta para su análisis posterior para diferentes escenarios de perturbaciones.*

*En el tercer capítulo, se desarrollan estrategias de control basado en un predictor de Smith modificado mediante un compensador anticipatorio para el control de plantas con retardo de tiempo dominante y sometidas al efecto de perturbaciones externas. Se presentan resultados de simulaciones del sistema de control desarrollado.*

*En el cuarto capítulo se realiza un análisis de robustez del sistema de control diseñado, mostrando resultados de los mismos y se comparan los resultados obtenidos. Asimismo, se muestra una propuesta de implementación práctica de los controladores diseñados.*

*Finalmente, se muestran las conclusiones generales.*

## CAPITULO 1.

### ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PLANTAS INDUSTRIALES CON RETARDOS DE TIEMPO.

#### 1.1 Introducción.

Actualmente, existe un creciente interés de la comunidad internacional en los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo [6, 11, 12, 21, 36, 57, 83, 87], debido a que el retardo de tiempo constituye un fenómeno muy común en el comportamiento dinámico de diversas plantas industriales [2, 3, 5, 13], unidades de procesos [15, 16, 20, 22], sistemas ecológicos [35, 52, 46], agrícolas [27, 33, 34, 37, 43, 44, 47, 55, 56, 58, 60], biotecnológicos [26, 102], etc.

El retardo de tiempo es un fenómeno frecuentemente encontrado en los sistemas dinámicos, tales como transporte de energía o masa [7, 32, 40, 41, 42], en los reactores nucleares, procesos químicos y biológicos [7, 8, 25, 102], y últimamente en procesos controlados en forma remota [59, 61, 70].

El retardo de tiempo se define como el tiempo que transcurre desde que se realiza un cambio en las señales de entrada de una planta hasta que su efecto comienza a observarse en las variables de salida [13, 86, 95]. Durante ese intervalo de tiempo, la planta no responde en absoluto a las señales de entrada, y cualquier intento de manipular las variables de salida antes de que finalice el retardo conlleva inevitablemente al fracaso [45].

Las causas que conllevan a que los procesos, independientemente de su naturaleza, presenten retardo de tiempo son diversas, por ejemplo: el retardo de tiempo puede ser parte de la naturaleza física de un proceso (fenómenos de transporte), o debido al tiempo de demora en la medición, transmisión o control de variable señal [38, 49, 68, 69, 71, 72, 101], también se encuentra en sistemas de bajo orden conectados en serie. La acción de control que se aplica basada en el error presente trata de corregir una situación que se originó algún tiempo anterior [13].

Muchos esfuerzos de investigación se han concentrado en el análisis de estabilidad de sistemas con retardo de tiempo, ya que a menudo es el retardo el que origina la inestabilidad y la degradación en el desempeño de los sistemas de control [13, 88, 90, 92].

En algunos sistemas la magnitud del retardo es tal que sus efectos se pueden despreciar, sin embargo hay otros sistemas en los cuales su magnitud es tal que no es posible omitirlo [18, 19, 23, 28, 50, 53, 63, 65]. En general, el comportamiento dinámico de los sistemas de control es muy perceptivo al retardo de tiempo [1, 10, 13, 14].

*En la actualidad, el diseño de sistemas de control de plantas con retardo de tiempo constituye una fructífera línea de investigación con numerosas contribuciones, ver por ejemplo [4, 17, 24, 29, 54, 62, 64, 73, 77, 81, 93, 96]. Una de las razones principales de la importancia de esta temática consiste es que sigue siendo un campo abierto de investigación y que aún existen diversos problemas teórico-prácticos que no han sido resueltos [100].*

## **1.2 Problemática actual de los sistemas de control con retardo de tiempo.**

*Objetivamente, las investigaciones en el campo del retardo de tiempo comenzaron en el siglo XVIII con los trabajos de D. Bernoulli, L. Euler, J. D'Alembert, dentro de un entorno meramente teórico, donde por primera vez se abordan las ecuaciones diferenciales con retardos [100, 103].*

*En las plantas MIMO el retardo de tiempo puede encontrarse en el vector de estado [90, 104], en el vector de control [105], en el vector de salida [106] y/o en los vectores de estado y de control de forma simultánea [57, 60].*

*El retardo de tiempo puede ser dominante o no dominante [13]. Las plantas presentan retardo de tiempo dominante cuando la relación  $\tau/T > 1$ , donde  $\tau$  es el retardo de tiempo y  $T$  es la mayor constante de tiempo de la planta [13]; en caso contrario ( $\tau/T < 1$ ) el retardo de tiempo es no dominante. El retardo de tiempo dominante es característico en el comportamiento dinámico de: plantas con transporte o transferencia de masa/energía, por ejemplo en la distribución de agua en canales de riego [30, 31, 74, 71, 110]; plantas conectadas en serie [13]; plantas térmicas, entre las que se destacan intercambiadores de calor [102], hornos de calentamiento de combustible [107], horno de recalentamiento de palanquillas [40, 41], hornos de arco eléctricos [42], calderas [66, 67, 78, 80]; en plantas de ósmosis inversa [51, 76, 109], plantas con fases de incubación, por ejemplo fermentadores [26, 108], etc.*

*Los procesos con retardos de tiempo dominantes y sometidos al efecto de perturbaciones fuertemente perturbantes son difíciles de controlar utilizando controladores tradicionales (PID), debido a que el retardo de tiempo dominante origina al menos dos importantes consecuencias [84, 86]: 1) complica el análisis de estabilidad y el diseño de los controladores; 2) dificulta el desempeño de los sistemas de control. La razón fundamental se debe a que el atraso de fase que introduce el retardo de tiempo (tiempo muerto) del proceso (fase negativa y grande incluso a bajas frecuencias) implica “desajustar” el controlador (por ejemplo en los PID, disminuir la ganancia proporcional y aumentar la constante de integración) para asegurar la estabilidad del sistema en lazo cerrado [13]. Este “desajuste” del controlador provoca que el sistema en lazo cerrado de este tipo de procesos presente un comportamiento lento y un bajo rechazo a las perturbaciones. Por ende,*

cuando la relación entre el tiempo muerto del proceso y la constante de tiempo dominante es mayor que 1 es aconsejable utilizar algoritmos específicos de compensación del tiempo muerto para controlar el proceso.

Una amplia gama de controladores de procesos que se utilizan en la industria son del tipo proporcional integral derivativo o comúnmente llamado controlador PID [1, 22, 39, 87], los cuales en muchos casos presenta la dificultad de no presentar un ajuste efectivo [87]. El procedimiento de sintonía de los controladores PID es tedioso y requiere en muchos casos de la experticia de los operadores [87], por lo que el desempeño del sistema de lazo cerrado principalmente depende de la experiencia y del conocimiento de los operadores del proceso. Se reconoce, que en la práctica muchos lazos cerrados de control industrial están pobremente sintonizados [87]. Por consiguiente, las técnicas de sintonización automática, llaman la atención cada vez más de los investigadores y de los ingenieros en ejercicio [87].

Actualmente, en muchos procesos industriales en los que el retardo de tiempo constituye una parte fundamental de su dinámica, no se logra el ajuste eficiente de los controladores, debido a que la compensación que se hace en los controladores clásicos, tipo PID, para contrarrestar el retardo de tiempo en la respuesta provoca que el sistema presente un comportamiento lento y un bajo rechazo al efecto de las perturbaciones. Actualmente, uno de los principales desafíos que presenta el PID consiste precisamente en mejorar su degradado desempeño frente a plantas con retardo de tiempo dominante [13, 87].

Las principales tendencias actuales en el control de plantas con retardo de tiempo se basan en el diseño de: controladores convencionales avanzados [87], controladores predictivos [13, 34, 51, 54], controladores de orden fraccional [38, 40, 42, 66, 82], controladores por modelo interno [111], controladores robustos [108], el predictor de Smith [94], así como sus múltiples extensiones [13, 85, 89, 91, 97, 98, 99].

El predictor de Smith (PS), propuesto en 1957 por el norteamericano Otto Smith [94] sin lugar a dudas es el controlador de plantas con tiempo muerto más utilizado debido a su elevada efectividad y simple implementación [13]. Este controlador se desarrolló para mejorar el desempeño de los controladores convencionales (PID) en el control de plantas con retardo de tiempo dominante. Su principal ventaja consiste en que elimina el retardo de tiempo de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado, cuando su modelo interno describe de forma perfecta el comportamiento dinámico de la planta. No obstante, esta estructura de control en su versión inicial presenta limitaciones, entre las que se destacan:

a) Requiere de un modelado exacto del proceso a controlar, en caso contrario se deterioran sus prestaciones.



b) Su efectividad se degrada cuando los procesos se encuentran sometidos al efecto de perturbaciones externas no medibles.

c) Su estructura no es capaz de acelerar la dinámica del rechazo al efecto de las perturbaciones.

d) No se puede usar en el control de procesos integradores o nestables, porque su estructura es intrínsecamente inestable, lo que quiere decir que si se origina una perturbación, la estructura se inestabilizará para estos dos tipos de procesos.

Es por ello que el diseño de nuevos controladores basados en modificaciones del predictor de Smith que permitan mejorar su desempeño con modelos inciertos y en presencia de fuertes perturbaciones externas, constituye un tema novedoso y de interés científico.

### **1.3 Estado del arte de los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo.**

Los retardos entre las variables de entrada y salida de los procesos aparecen en muchas plantas industriales. Los sistemas de control con retardos temporales aparecen frecuentemente en aplicaciones prácticas: o bien de forma intrínseca al propio proceso o bien de forma inducida por la propia plataforma (tiempos de cómputo, retardos de comunicación en el intercambio de datos entre dispositivos, etc.). Los retardos pueden afectar a la entrada, la salida o al estado interno del proceso.

Los retardos en un sistema de control pueden aparecer por diversos motivos. Cabe citar al respecto:

**Retardos inherentes al proceso físico:** Algunos sistemas físicos presentan retardos como propiedad intrínseca al mismo. Cabe citar, por ejemplo, procesos en los que tiene lugar operaciones de transporte de fluidos, por ejemplo, a través de tuberías de larga distancia. En general, cualquier proceso en los que los retardos de transporte siempre están asociados con el medio controlado que se desplaza de una ubicación física a otra dentro del propio proceso (transporte de masas). Un ejemplo típico cotidiano es el calentador de agua, en el que la temperatura no evoluciona hasta pasado un cierto tiempo.

**Aproximación de modelos de orden elevado:** En ocasiones puede resultar conveniente modelar un proceso de orden elevado a partir de un modelo de orden reducido en serie con un retardo puro (aproximación de Padé) con el objeto de simplificar la tarea de identificación, análisis y el diseño de controladores. Por ejemplo, un horno o un calentador de agua, donde la evolución de la temperatura resulta mucho más sencilla de modelar a partir de un proceso con retardo que a partir de una función de transferencia

racional de orden elevado.

**Sistemas de control basados en red:** La proliferación y el avance tecnológico de las redes de comunicaciones en las últimas décadas ha motivado colateralmente el estudio de los denominados sistemas de control basados en red (SCBR) (o de sus siglas en inglés, NCS) desde la perspectiva de la ingeniería de control, donde los retardos desempeñan un papel fundamental. Los SCBR se caracterizan esencialmente por su arquitectura distribuida: es decir, el controlador se encuentra ubicado en un emplazamiento físico distinto al proceso a controlar y el intercambio de datos se produce a través de un medio de comunicación. Por ejemplo: buses de campo (DeviceNet, Control-Net, Profibus), redes de propósito general (Ethernet, TCP/IP) o redes inalámbricas. También cabe incluir al respecto aplicaciones de Teleoperación. Por tanto, la aparición de retardos en el lazo de control es inevitable. Además, los retardos normalmente son de naturaleza variable y aleatoria, ya que éstos dependen por ejemplo de posibles congestiones puntuales en nodos intermedios, del propio protocolo de arbitraje de acceso al medio, etc. Además, con el propósito de economizar costos en infraestructura y mantenimiento el medio de comunicación generalmente es compartido por varias aplicaciones, lo que contribuye a la aleatoriedad y variabilidad del retardo inducido.

**Estadísticamente, según estudios desarrollados, en las industrias los mayores problemas en los sistemas de control se deben a efecto negativo de los retardos de tiempo:**

Según Normey, en un artículo publicado en la revista *Journal of Process Control*, por los investigadores Takatsu, Itoh y Araki, titulado "Future needs for the control theory in industries-report and topics of the control technology survey in the Japanese industry" se muestran los resultados de varias encuestas realizadas en las industrias japonesas en los últimos años.

Los resultados de este trabajo apuntan que los problemas causados por los retardos de tiempo en los sistemas de control representan, conjuntamente con los problemas causados por las perturbaciones y las interacciones entre variables, más del 60% de los problemas importantes encontrados en la industria de procesos.

Esto implica, según la interpretación de dichos autores, que actualmente los ingenieros de control están considerando el retardo de tiempo y las características multivariadas de los procesos, como los elementos del comportamiento dinámico de las plantas que introducen mayor dificultad en el diseño de los sistemas de control.

Utilizando los datos de esta encuesta y aceptando que los resultados pueden extenderse a las industrias de otros países, es posible concluir que

las investigaciones que contribuyen y contribuirán en el futuro próximo a la mejora de los sistemas de control de procesos en la industria son las orientadas a la solución de los problemas causados por el retardo de tiempo en los sistemas de control (tanto en el caso monovariable, como en el de plantas multivariables) usando técnicas de DTC (compensador de tiempo muerto) y MBPC (control predictivo basado en modelo). También es posible concluir que aún hay que realizar investigaciones orientadas a la simplificación de los procedimientos de ajuste y a la optimización del comportamiento de estos controladores.

En líneas generales, las prestaciones de los sistemas de control presentan una notoria sensibilidad al retardo de tiempo. De hecho, desde la perspectiva del control clásico, la presencia de retardos de tiempo contribuye a reducir el margen de fase y por ende, el margen de ganancia de los sistemas de control, pudiendo llegar a la pérdida de estabilidad del sistema de control en lazo cerrado, si éstos no son considerados fase de diseño.

De un lado, el retardo de tiempo aumenta considerablemente la fase del sistema, lo que produce una disminución de los márgenes de ganancia y de fase de los sistemas de control. Por otro lado, las relaciones entradas – salidas dejan de ser racionales, por lo que el diseño de controladores es más difícil.

**Por consiguiente, resulta conveniente para el control de plantas con retardo de tiempo diseñar controladores con compensación del retardo.**

Uno de los principales desafíos que presenta el PID consiste en mejorar su bajo desempeño en el control de plantas con retardo de tiempo dominante [13]. Esta temática, constituye una importante línea de investigación con numerosas contribuciones y con un marcado interés de la comunidad científica internacional [2, 6, 13, 18, 34, 51, 59].

El predictor de Smith (PS), constituye el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de plantas con retardo de tiempo debido a su elevada efectividad y simple implementación [13]. Esta estructura de control surgió con la idea de mejorar el desempeño de los controladores clásicos (PI o PID) en el control de plantas con retardo de tiempo dominante [13].

En los últimos 30 años se han desarrollado diversas contribuciones científicas dirigidas a mejorar el desempeño del PS convencional [13, 85, 89, 91, 97, 99], siendo objeto de diferentes modificaciones con la finalidad de mejorar su capacidad de rechazo a perturbaciones medibles y no medibles, posibilitar su aplicación en el control de plantas inestables, permitir su uso en diversos entornos industriales, mejorar su robustez y facilitar el ajuste del controlador para aumentar su aplicabilidad.



En la Tabla 1 se muestra un resumen en orden cronológico de las principales modificaciones realizadas al PS para su aplicación en el control de plantas SISO.

La nomenclatura usada es:

Tipo de planta: (E): estable, (I) : inestable, (INT): integrador.

Tipo de estructura: (UGrL): un grado de libertad, (DGrL): dos grados de libertad.

Modelo de planta utilizado en el ajuste del controlador: (Simple): modelo de primer orden y (Complejo) modelo de orden más alto.

Objetivo de la modificación: (R): para analizar o mejorar la robustez, (RP): para mejorar el rechazo al efecto de perturbaciones, y (SR): para el seguimiento de la referencia .

Metodología utilizada en el ajuste del controlador: (SIM) Simple y (COM) compleja.

Tabla 1.  
Principales modificaciones realizadas al PS

<b>1mer autor, año</b>	<b>Planta</b>	<b>Control</b>	<b>Modelo</b>	<b>Objetivo</b>
Watanabe, 1981	E/INT	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Palmor, 1985	E	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Rivas-Perez, 1987	E	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Kao, 1988	E	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Huang, 1990	E	DGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Astrom, 1994	INT	DGrL	Simple	RP+SR
Hagglund, 1996	E	UGrL	Simple	RP+SR

Normey, 1999	E/INT	DGrL	Simple	RP+SR+R
Kaya, 2001	E	UGrL	Simple	RP+SR+R
Zhong, 2002	INT	DGrL	Complejo	RP+SR
Tao, 2004	I/INT	DGrL	Complejo	RP+SR
Xiang, 2005	I/INT	DGrL	Complejo	RP+SR
Han-Qin, 2007	E/I	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Feliu-Batlle, 2009	E	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Normey, 2009	E/I/INT	DGrL	Complejo	RP+SR+R
Uma, 2010	E/INT	UGrL	Complejo	RP+SR+R
Mataušek, 2012	E/I/INT	DGrL	Complejo	RP+SR+R
Rivas-Perez, 2014	E	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones
Benitez-Gonzalez, 2015	E	UGrL	Complejo	Rechazo de Perturbaciones

Una revisión de las principales modificaciones realizadas al PS en estos años permite clasificarlas en analíticas y estructurales.

Dentro de las principales modificaciones analíticas están:

- la aplicación de expresiones analíticas para el ajuste de controladores [88],
- el uso de algoritmos de optimización para el ajuste de controladores [89],
- el uso de aproximaciones para definir los modelos que describen el comportamiento dinámico de las plantas [90], y
- el uso de aproximaciones para representar el retardo de tiempo [2].

Entre las principales modificaciones estructurales se encuentran:

- la introducción de realimentaciones internas [70],

- el uso de estructuras de control anticipatorio [68],
- el uso de estructuras de control en cascada [66],
- el uso de filtros [33],
- la introducción de observadores [91], y
- el uso de inteligencia artificial, sistemas expertos y de algoritmos bio-inspirados [92].

*Sin embargo, es notorio destacar que en estas revisiones no se aborda la problemática relacionada con los retos y desafíos actuales del control de plantas con retardo de tiempo mediante la aplicación del predictor de Smith.*

*El análisis desarrollado sobre el estado del arte de las modificaciones del PS revela que aún existen problemas no resueltos, de carácter teórico y práctico, que imposibilitan la obtención de un elevado desempeño en el control de plantas con retardo de tiempo dominante con esta clase de estructura de control. Muchas modificaciones del PS propuestas tienen un carácter teórico o académico, por lo que no han sido implementadas en la práctica industrial y su efectividad no ha podido ser comprobada.*

*Por ello, la solución efectiva de las actuales limitaciones del PS constituye un importante desafío para la comunidad científica internacional para el desarrollo de nuevas investigaciones encaminadas a mejorar el desempeño del PS en el control de plantas con retardo de tiempo dominante, variante en el tiempo y sometidas al efecto de perturbaciones externas medibles y no medibles.*

*También constituye un reto para los ingenieros de plantas en adecuar o mejorar las modificaciones de las estructuras de control basadas en PS, al comportamiento de su planta en particular, dentro de su rango de operación.*

#### **1.4. Objetivo general y objetivos específicos de la tesis.**

##### **1.4.1. Objetivo general.**

*Diseñar un sistema de control basado en un predictor de Smith modificado, mediante un compensador anticipatorio (feedforward) para el control efectivo de plantas con retardos de tiempos dominantes y sometidas al efecto de perturbaciones externas.*

##### **1.4.2. Objetivos específicos.**

1) *Estudio del estado del arte de los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo.*

2) *Obtención mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas de un modelo matemático de una planta con retardo de tiempo dominante y sometida al efecto de perturbaciones externas.*

3) *Diseño de un sistema de control basado en un predictor de Smith modificado para el control de una planta industrial con retardo de tiempo dominante y sometida al efecto de perturbaciones externas medibles.*

4) *Análisis de la robustez del sistema de control diseñado y propuesta de su implementación práctica.*



## **CAPITULO 2.**

### **DINAMICA DE PLANTAS INDUSTRIALES CON RETARDO DE TIEMPO**

#### **2.1 INTRODUCCION**

*Los retardos de tiempo aparecen en muchos procesos de la industria y en otros campos. Son causados por el tiempo necesario para el transporte de masa, energía o de información, la acumulación de retardos de tiempo en un gran número de sistemas de bajo orden conectados en serie, el tiempo de procesamiento necesario para los sensores, como los controladores que necesitan algún tiempo para aplicar un complicado algoritmo de control o de proceso.*

*Procesos con retardos de tiempos considerables son difíciles de controlar utilizando los controladores tradicionales, debido a que su presencia en los lazos de control tienen al menos dos importantes consecuencias: 1) Se complica mucho el análisis de estabilidad y el diseño de los controladores para estos sistemas. 2) Es más difícil de lograr un control satisfactorio en procesos con este fenómeno. Estas dificultades se pueden explicar en el dominio de la frecuencia porque el retardo de tiempo introduce una disminución adicional en el margen de fase de los sistemas que puede causar la inestabilidad.*

#### **2.2 CARACTERIZACION DE LAS PLANTAS INDUSTRIALES CON RETARDO DE TIEMPO**

##### **2.2.1.- Plantas típicas**

##### **2.2.1.1 Retardo de tiempo por transporte de masa**

*El transporte de masa es un caso típico de retardo inherente al proceso, por el desplazamiento del medio controlado de una ubicación física a otra dentro del propio proceso.*

*Por ejemplo, un calentador de agua con tubería de cierta dimensión, al final del cual se recoge el agua a cierta temperatura, como se muestra en la figura 2.1.*

*Cuando la tubería se llena de agua a la temperatura inicial  $T_0$ , este cambio no es inmediatamente percibido en la salida, y es necesario esperar hasta que el agua caliente alcance el final de la tubería antes de ser percibido. Por tanto, después de un tiempo muerto, definido por el flujo (caudal) y la longitud de la tubería, la temperatura de salida empieza a aumentar con la misma dinámica como la de la temperatura dentro del tanque calentador.*

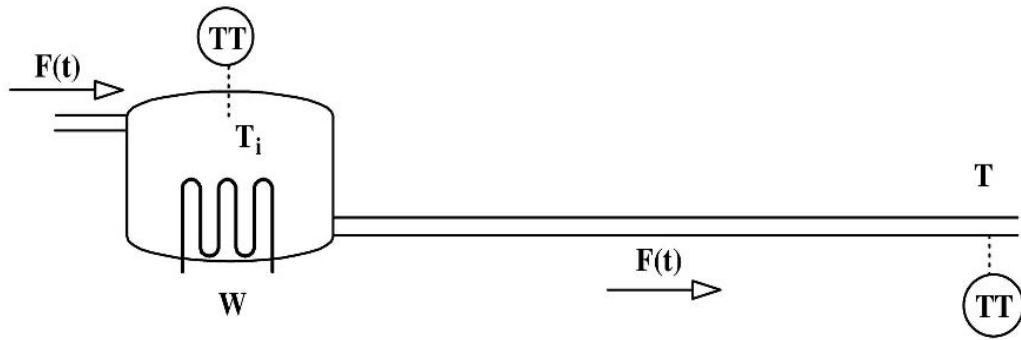


Figura 2.1. Tanque calentador con tubería larga.

donde,

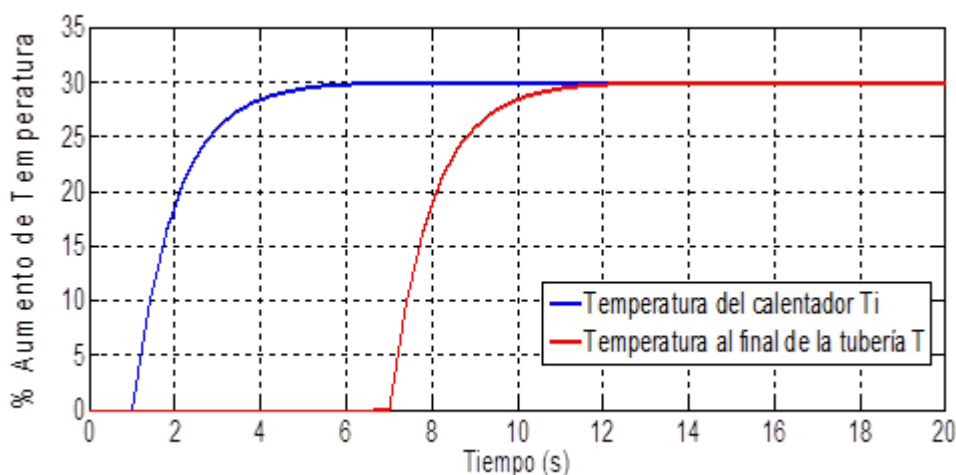
$T_i$ : ..... Temperatura del calentador.

$T$ : ..... Temperatura al final de la tubería.

$W$ : ..... Potencia del calentador.

En la figura 2.2 se muestra el comportamiento de la temperatura  $T$  cuando se aplica un paso al voltaje del calentador. En este ejemplo, el voltaje (y por consiguiente la potencia) cambia en un 30% en el tiempo  $t = 1$  s, y la temperatura se incrementa en 30%. Notar que la temperatura dentro del tanque  $T_i$  empieza a aumentar a partir del tiempo  $t = 1$  s, mientras que la temperatura al final de la tubería sólo reacciona a partir de  $t = 6$  s, por tanto hay un tiempo muerto de 5 s debido al tiempo necesario para el transporte de masa.

Es posible relacionar las dos temperaturas  $T_i(t) = T(t+5)$ .





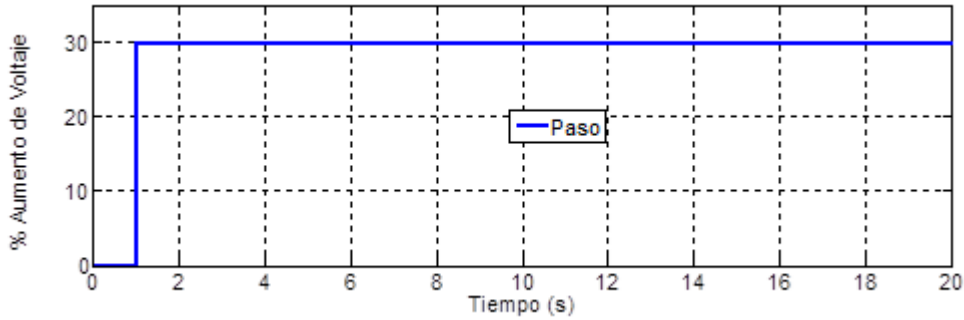


Figura 2.2. Respuesta paso del proceso de temperatura en el tanque calentador.

Supongamos que usamos un modelo lineal para representar la relación dinámica entre las variaciones de  $T_i$  ( $\Delta T_i$ ) y las variaciones de  $W$  ( $\Delta W$ ). La función de transferencia entre  $\Delta T_i$  y  $\Delta W$  es dada por:

$$G(s) = \frac{\Delta T_i(s)}{\Delta W(s)}, \text{ o sea, } \Delta T_i(s) = G(s) \cdot \Delta W(s). \quad (2.1)$$

Si consideramos un tiempo muerto general  $L$ , la transformada de Laplace es:

$$\mathcal{L}\{x(t+L)\} = e^{Ls} \mathcal{L}\{x(t)\}, \quad (2.2)$$

$$\text{entonces, } \Delta T_i(s) = e^{Ls} \Delta T(s), \quad (2.3)$$

$$\Delta T(s) = \Delta T_i(s) \cdot e^{-Ls} \quad (2.4)$$

Por consiguiente,

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta W(s)} = G(s) \cdot e^{-Ls} \quad L > 0. \quad (2.5)$$

Éste es el modelo lineal más usado para representar el comportamiento de procesos con tiempo muerto.

### 2.2.1.2 Retardo de tiempo por acumulación de sistemas de bajo orden en serie.

En muchos casos el retardo de tiempo es causado por el efecto producido por la acumulación de un gran número de sistemas de bajo orden.

Por ejemplo, un grupo de  $n$  tanques conectados en serie, como se muestra en la figura 2.3.



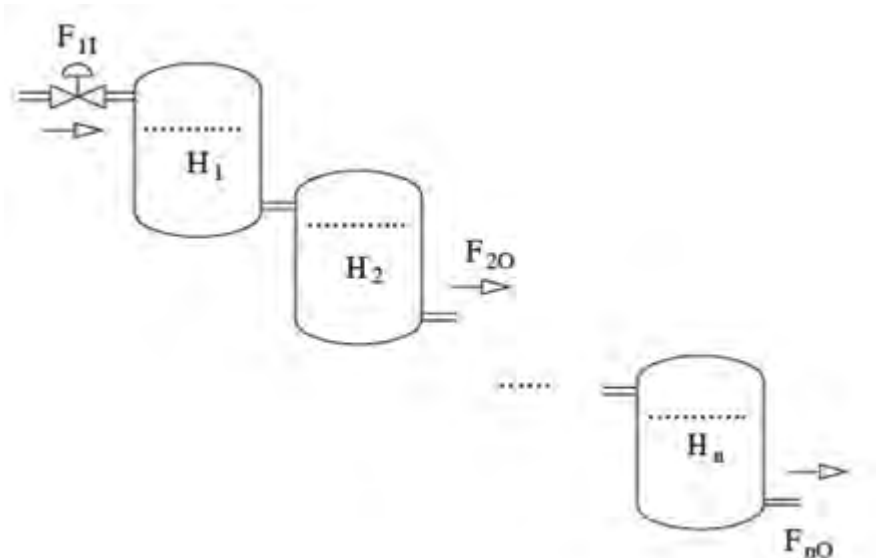


Figura 2.3. Tanques conectados en serie.

En este sistema el flujo de salida del tanque  $i$  ( $F_{i0}$ ) alimenta el tanque  $i+1$ ; esto es, el flujo de entrada del tanque  $i+1$  es  $F_{(i+1)I} = F_{i0}$ . Cuando los niveles de los tanques están cerca al punto de operación, el comportamiento dinámico del nivel en cada tanque  $H_i$  puede ser modelado por un sistema lineal,

$$A \frac{dH_i}{dt} = F_{iI} - F_{iO}, \quad (2.6)$$

$$F_{iO} = KH_i, \quad (2.7)$$

donde  $A$  es el área del base del tanque y  $K$  es una constante que depende de las características del tanque. Por tanto, la función de transferencia que relaciona el flujo de salida en el tanque  $i$  y su nivel es:

$$H_i(s) = \frac{1}{K(Ts+1)} F_{iI}(s), \quad (2.8)$$

$$\text{donde } T = \frac{A}{K} \quad (2.9)$$

Para el tanque 1:

$$H_1(s) = \frac{1}{K(Ts+1)} F_{1I}(s). \quad (2.10)$$

y para el tanque 2:

$$H_2(s) = \frac{1}{K(Ts+1)} F_{2I}(s) = \frac{1}{K(Ts+1)} F_{1O}(s), \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{K(Ts+1)} F_{10}(s) = \frac{1}{K(Ts+1)} KH_1(s). \quad (2.12)$$

Usando la expresión de  $H_1(s)$ , se obtiene:

$$H_2(s) = \frac{1}{(Ts+1)} \frac{1}{K(Ts+1)} F_{11}(s) = \frac{1}{K(Ts+1)^2} F_{11}(s). \quad (2.13)$$

Si este procedimiento es aplicado recursivamente, la función de transferencia ( $P(s)$ ) relacionando con el nivel en el tanque  $n$  ( $H_n(s)$ ) es

$$H_n(s) = P(s) F_{11}(s) = \frac{K_e}{(Ts+1)^n} F_{11}(s), \quad (2.14)$$

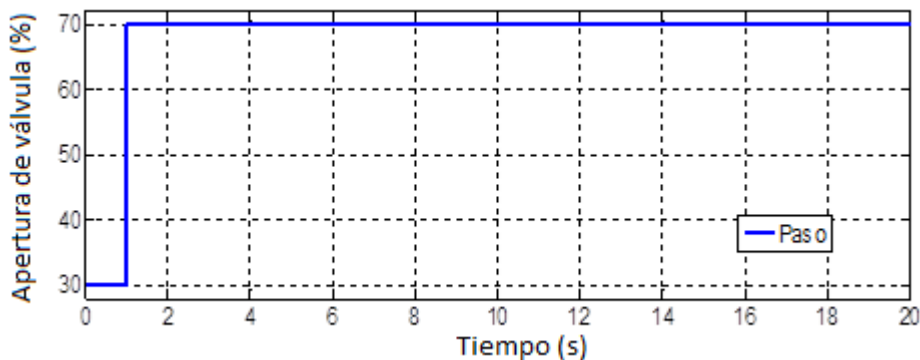
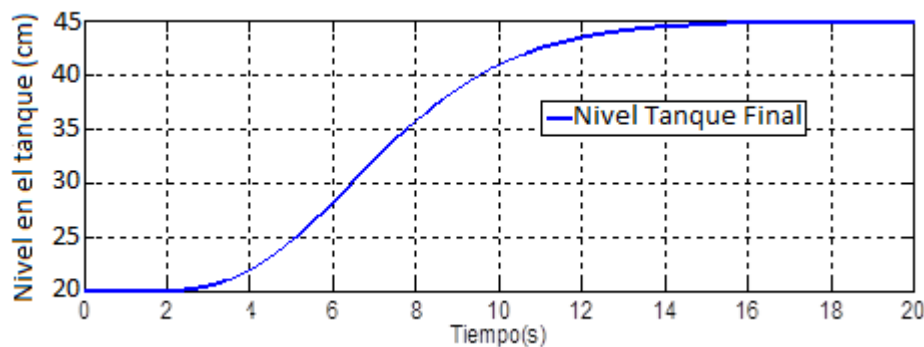
donde  $K_e = \frac{1}{K}$ .

Ejemplo:

Consideremos la respuesta paso de un sistema con  $n=8$ ,  $K=2$  y  $T=1$  s. En este caso,

$$P(s) = \frac{0.5}{(s+1)^2}. \quad (2.15)$$

La figura 2.4 muestra el comportamiento dinámico del sistema frente a una variación de un 40% en la entrada. Como se observa, un tiempo muerto de aproximadamente 2 s aparece en la respuesta paso del sistema.



*Figura 2.4 Respuesta paso de la variación de nivel en el último tanque.*

*El análisis previo es posible generalizarlo para cualquier proceso teniendo  $N$  elementos de primer orden conectados en serie, cada uno con una constante de tiempo  $L/N$ . Esto es, la función de transferencia (por simplicidad consideramos una ganancia unitaria) es:*

$$G(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{L}{N}s\right)^N} \quad (2.16)$$

*Cuando una constante de tiempo es más grande que las otras (como en muchos procesos), las constantes de tiempo más pequeñas trabajan juntas para producir un atraso que actúa como un tiempo muerto puro. En esta situación los efectos dinámicos son principalmente debido a la constante de tiempo mayor. Por consiguiente, es posible aproximar el modelo de un proceso de muy alto orden, complejo, y dinámico con un modelo simplificado consistente en procesos de primer orden combinado con un elemento de tiempo muerto.*

### **2.2.2. Representación del retardo de tiempo en el dominio de la frecuencia.**

*Consideramos el modelo lineal de un tiempo muerto puro  $L$ , dado por*

$$G(s) = e^{-Ls} \text{ con } L > 0 \dots \quad (2.17)$$

*La respuesta en frecuencia se obtiene computando*

$$G(j\omega) = e^{-j\omega L} \text{ para } \omega \in \mathbb{R}, \omega > 0 \dots \quad (2.18)$$

*La ganancia y atraso de fase del sistema  $G(s)$  vienen dadas por:*

$$|G(j\omega)| = |e^{-j\omega L}| = 1 \dots \quad (2.19)$$

$$\phi G(j\omega) = \phi e^{-j\omega L} = -\omega L \text{ para todo } \omega > 0 \quad (2.20)$$

*Notar que la magnitud es igual a uno, el tiempo muerto sólo afecta al diagrama de fase.*

*La respuesta en frecuencia de un sistema de tiempo muerto puede ser fácilmente deducida de la figura 2.5.*

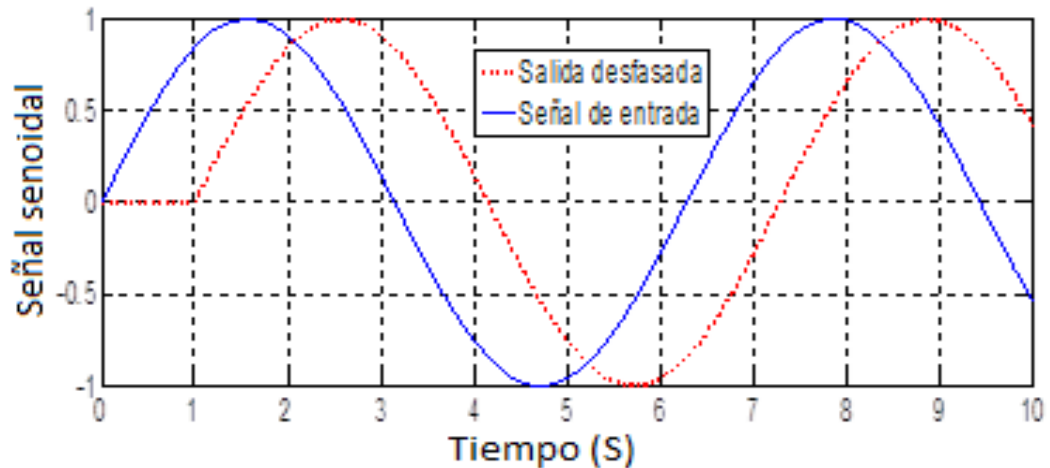


Fig. 2.5. Ondas senoidales desfasadas por un tiempo  $L=1s$

donde se muestra una onda senoidal de período  $T_p$  y la misma señal retrasada por  $L$  seg. Se puede ver que la amplitud de la señal retrasada es igual a la amplitud de la señal original, por tanto la ganancia para todas las frecuencias es 1. La fase puede ser fácilmente computada como

$$\varphi = \frac{-L}{T_p} 2\pi = -\omega_p L. \quad (2.21)$$

Considerando la frecuencia normalizada ( $w_n$ ):

$$w_n = \omega L. \quad (2.22)$$

donde  $L$  es en segundos,  $\omega$  en rad/s y  $w_n$  en radianes.

En la figura 2.6 se muestra el diagrama de fase del factor de tiempo muerto  $e^{-Ls}$ . En esta figura, se muestra el valor de la fase para diferentes frecuencias. Se observa que  $\varphi = -w_n$ ; esta es una relación lineal y tiene una forma exponencial en la escala logarítmica de los gráficos.

Código Matlab para obtener diagrama de fase de tiempo muerto  $e^{-Ls}$

```
% CURVA NORMALIZADA RETRASO
% data
T=1;K=1;
L=1;
% fase sin retardo
[m,phg,w]=bode(K,[1]);
% fase tiempo muerto
phd=-w*180/pi;
% fase total
ph=phg+phd;
% plot
semilogx(w,ph);
```

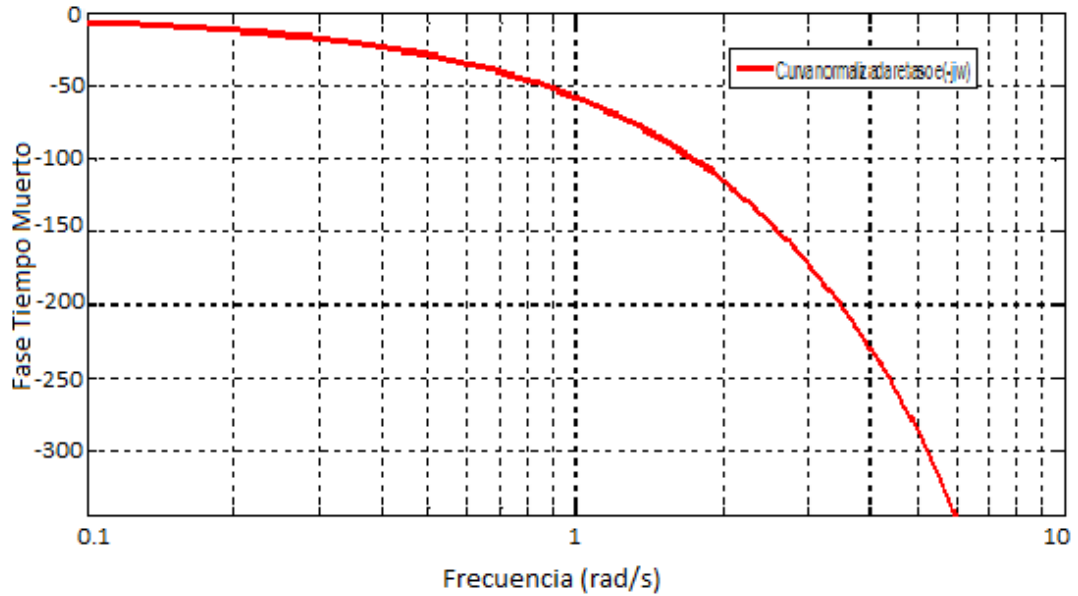


Figura 2.6 Diagrama de fase del factor de tiempo muerto  $e^{-Ls}$ .

Por otro lado, la figura 2.7, muestra el grafico para un sistema de segundo orden

$$P(s) = \frac{1}{(1+s)^2} e^{-Ls}, \quad L \in \{0, 0.1, 1\} \quad (2.23)$$

El código en Matlab para obtener curvas de retraso para diferentes tiempos muertos, es el siguiente:

```
% data
T=1;K=1;L1=0;L2=.1;L3=1;
% phase without dead time
[m,phg,w]=bode(K,[T*T 2*T 1]);
% dead-time phase
phd1=-L1*w*180/pi; phd2=-L2*w*180/pi; phd3=-L3*w*180/pi;
% total phase
ph1=phg+phd1; ph2=phg+phd2; ph3=phg+phd3;
% plot
semilogx(w,ph1,w,ph2,'--',w,ph3,'-.');
```

legend('L=0','L=0.1','L=1');

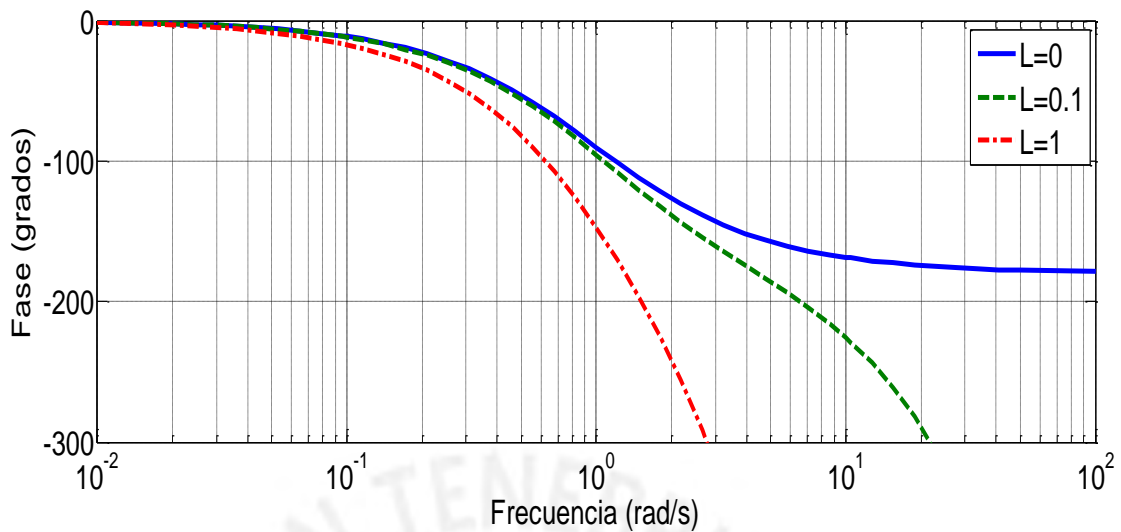


Figura 2.7. Diagrama de fase de  $\frac{1}{(1+s)^2} e^{-Ls}$  para diferentes valores de  $L$ .

La fase del sistema de tiempo muerto libre  $\varphi \rightarrow -180^\circ$  cuando  $w \rightarrow \infty$ . Notar que con un pequeño valor de tiempo muerto  $L = 0.1$  este valor es casi alcanzado en  $w = 5$  rad/s. En la figura 2.7 el diagrama de fase con la variable tiempo muerto se muestra para  $L=0$ ,  $L=0.1$  y para  $L=1$ . Notar el rápido decremento de la fase para altos valores de  $L$ .

Ejemplo: Consideremos un tanque calentador, representado por el modelo

$$P(s) = \frac{5}{(1+2s)} e^{-s} = G(s)e^{-s} \quad (2.24)$$

La respuesta en frecuencia es obtenida, calculando:

$$|P(jw)| = \frac{5}{\sqrt{1+(2w)^2}} \quad (2.25)$$

$$\varphi P(jw) = -\arctan(2w) - w \quad (2.26)$$

Es posible ver el efecto del tiempo muerto en la fase del sistema. Como se puede ver en la figura 2.8 el efecto del tiempo muerto en la fase hace decrecer el margen de fase del sistema. En este caso particular, el margen de fase del sistema sin tiempo muerto es positivo, mientras que con tiempo muerto es negativo, lo cual muestra el efecto negativo del tiempo muerto en la estabilidad del sistema.

Código en Matlab para obtener el diagrama de Bode, para observar efecto del tiempo muerto en el decremento del margen de fase

### % Efectos del Tiempo Muerto en el Margen de Fase

```
%data
%T=1;K=1;%L1=0;L2=.1;
%L=1;
% phase without dead time
[m,phg,w]=bode(5,[2 1]);
% dead-time phase
%phd1=-L1*w*180/pi; phd2=-L2*w*180/pi;
phd=-w*180/pi;
% total phase
%ph1=phg+phd1; ph2=phg+phd2;
ph=phg+phd;
%plot;
figure (1);
loglog(w,m,'-');grid
figure(2);
semilogx(w,phg,'-',w,ph,'r');grid
```

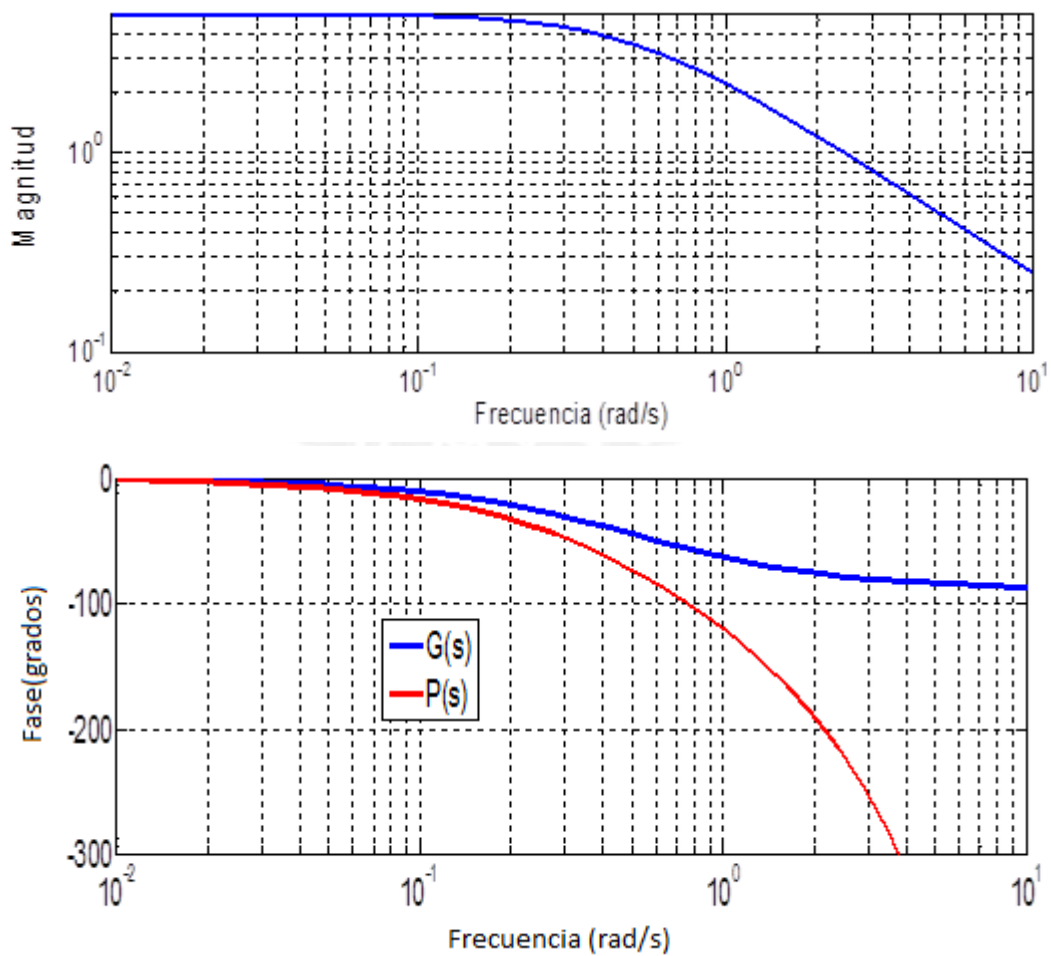




Figura 2.8. Diagramas de Bode para observar efecto del tiempo muerto.

### 2.2.3 Aproximaciones polinomiales del retardo de tiempo

En el dominio de la frecuencia el retardo de tiempo puede ser directamente representado, por tanto los métodos de frecuencia de análisis y diseño pueden ser usados sin aproximaciones en procesos de tiempo muerto. Sin embargo, a causa de que la función de transferencia de un retardo de tiempo no es racional, cuando la representación polo-cero es necesaria, como en los métodos de lugar de las raíces o de asignación de polos, las aproximaciones polinomiales de tiempo muerto son usadas.

La representación no racional de tiempo muerto  $e^{-Ls}$  puede ser aproximada por una función de transferencia de la forma  $F(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$ , usando diferentes aproximaciones, como son:

Expansión por serie de Taylor de  $e^{-Ls} = \frac{1}{e^{Ls}}$

$$T_i(s) = \frac{1}{(1 + \sum_{i=1}^i \frac{(Ls)^i}{i!})} \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.27)$$

-Una función de transferencia de múltiple atraso

$$G_i(s) = \frac{1}{(1 + \frac{Ls}{i})^i} \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.28)$$

que trunca con orden  $i$  la expresión:

$$e^{-Ls} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(1 + \frac{Ls}{i})^i} \quad (2.29)$$

En la representación de Padé de orden  $i-j$ , aunque estas aproximaciones pueden ser computadas para un orden genérico, las más usadas en la práctica son las aproximaciones de primer orden  $P11(s)$  y de segundo orden  $P22(s)$  dadas por:

$$P11(s) = \frac{1 - \frac{L}{2}s}{1 + \frac{L}{2}s} \quad , \quad (2.30)$$

$$P22(s) = \frac{1 - \frac{L}{2}s + \frac{L^2}{12}s^2}{1 + \frac{L}{2}s + \frac{L^2}{12}s^2} \quad (2.31)$$

Para propósitos de control, cuando los modelos son simples, son usadas las aproximaciones polinomiales de bajo orden de tiempo muerto.

Un estudio simple es presentado para orden 1 que es el caso más usado en aproximaciones clásicas. Notar que cuando se utilizan modelos simples para representar dinámicas de tiempo muerto libre, se obtiene un modelo completo de bajo orden del proceso.

También notar que  $G1 = T1$ .

En el dominio de la frecuencia  $P11$ , se verifica

$$|P11(s)|_{s=jw}=1; \forall w \quad (2.32)$$

Por ende, el error en la magnitud es cero para todas las frecuencias. En el análisis de fase, el error es infinito cuando  $w$  tiende a infinito para todos los métodos de aproximación; sin embargo es posible definir un error máximo admisible  $e_m$  y calcular el rango de frecuencias cuando el error de aproximación es menor que  $e_m$ .

La figura 2.9 muestra la respuesta en frecuencia normalizada del atraso y aproximaciones de Padé.

Como puede verse de la figura 2.9,  $P11$  presenta mejor resultado que  $G1$ , y  $P22$  aún mejor todavía. Por ejemplo, para un error de 10% en la fase, las aproximaciones  $P11$  y  $P22$  pueden ser consideradas aceptables hasta  $w_n \cong 1$ ; mientras  $G1$  es sólo aceptable hasta  $w_n \cong 0.6$ .

El análisis puede ser ejecutado en el dominio del tiempo usando la respuesta del proceso a una prueba de paso unitario y, por ejemplo, la integral del error cuadrático (ISE) entre la respuesta aproximada y la real, puede ser usada para comparar modelos diferentes. En este caso, el modelo  $P11$  tiene un  $ISE=5.23$  y el modelo  $G1$  un  $ISE=2.22$ .

Código en Matlab para la aproximación de Padé

```
clear;
close all;
clc;
% data
%T=1;
K=1;
L1=1;
```

```

L2=1;
L3=1;
% phase without dead time
%[m,phg,wo]=bode(1,[1 0]);
[m1,phg1,w1]=bode(K,[1 1]);
[m2,phg2,w2]=bode([-1 2],[1 2]);
[m3,phg3,w3]=bode([1 -6 12],[1 6 12]);
% dead-time phase
phd1=-L1*w1*180/pi;
phd2=-L2*w2*180/pi;
phd3=-L3*w3*180/pi;
% total phase
ph1=phg1+phd1;
ph2=phg2+phd2;
ph3=phg3+phd3;
% plot
figure(1);
loglog(w1,m1,w2,m2,w3,m3);grid
figure(2);
semilogx(w1,ph1,w2,ph2,w3,ph3);grid

```

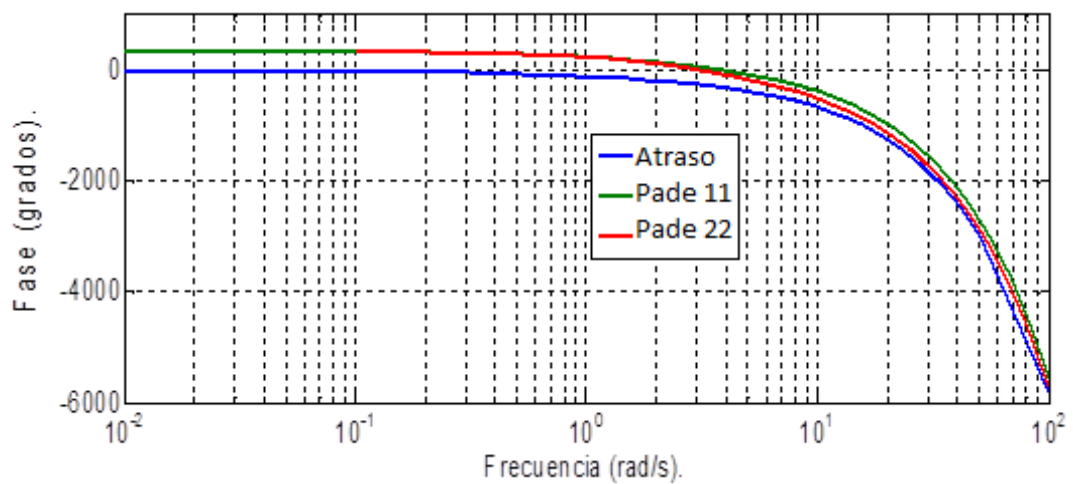
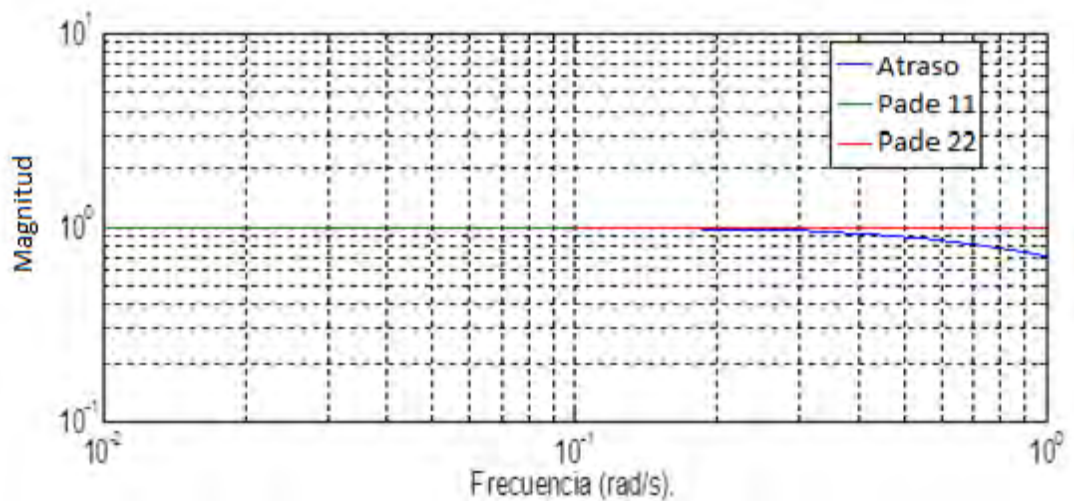


Figura 2.9. Diagrama de Bode, usando las aproximaciones de Padé.

La figura 2.10 muestra la respuesta paso de G1, P11 y P22 para un tiempo muerto unitario. La entrada paso es aplicada en  $t=1$ ; más aún, como puede verse en la figura P11 y P22 presentan comportamientos no mínimos. La selección de la aproximación más apropiada depende del tipo de análisis a ser ejecutado. En este análisis, G1 es claramente superior si es necesario un modelo de simulación, pero P11 y P22 parecen ser mejores para un diseño de control basado en la frecuencia.

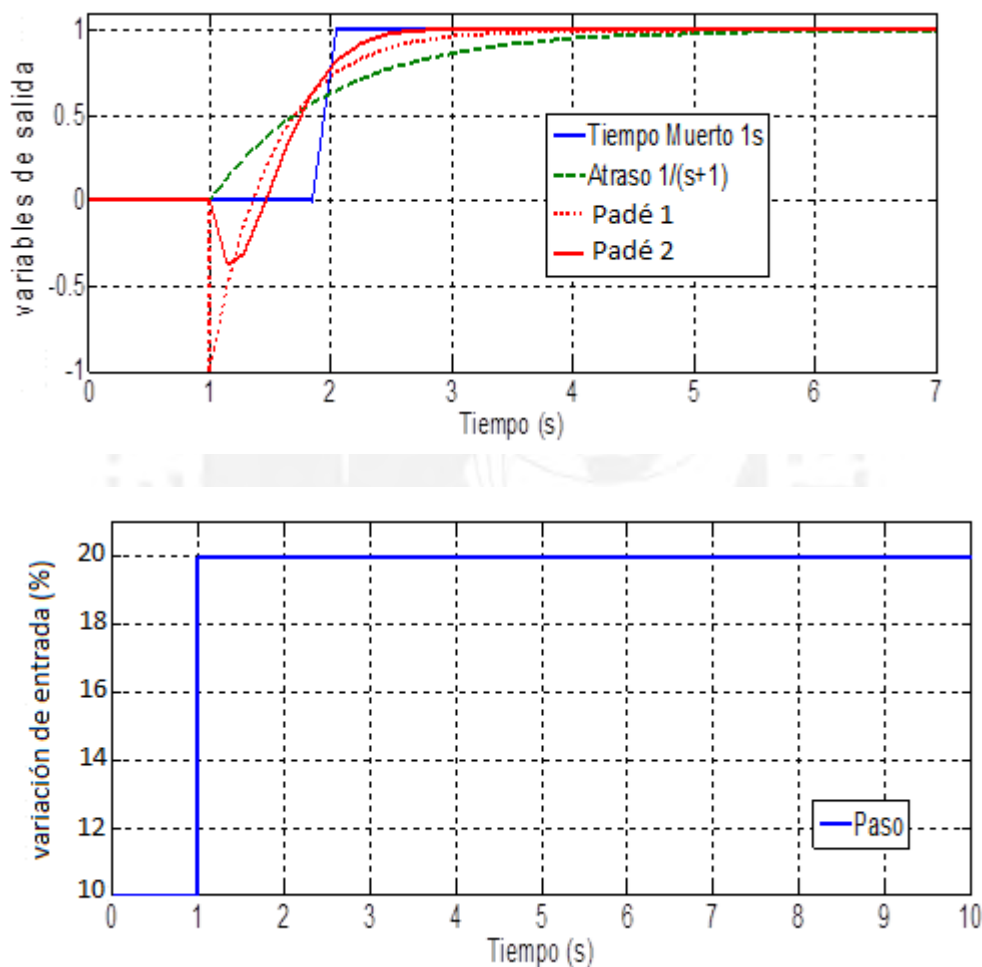


Figura 2.10. Respuesta paso, atraso y aproximaciones Padé.

#### 2.2.4. Problemas de control asociados al retardo de tiempo

Como ha sido mencionado previamente, el retardo de tiempo produce un deterioro en la respuesta temporal de los sistemas de control a causa del efecto negativo en la fase del sistema. Para ilustrar este efecto, consideremos el siguiente caso:

Un modelo de segundo orden con retardo de tiempo es considerado como el modelo de proceso del tanque calentador con tubería larga presentado en la sección 2.2.1

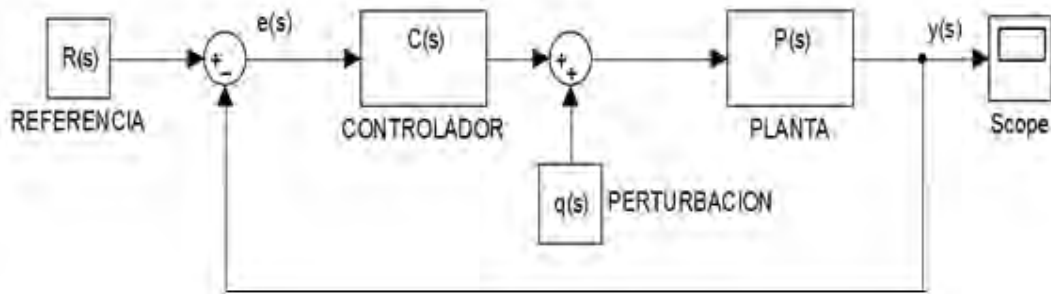


Figura 2.11. Diagrama de bloques de planta con controlador de lazo cerrado

La función de transferencia de la planta con retardo de tiempo es:

$$P(s) = G(s)e^{-Ls} = \frac{1}{(1+1.5s)(1+0.4s)} e^{-Ls} \quad (2.33)$$

Primero, asumimos que  $L = 0$ ; esto es, el sensor de temperatura es localizado en el tanque. Un simple controlador proporcional integral PI

$$C(s) = K_c \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (2.34)$$

Puede ser sintonizado para este proceso para obtener una respuesta paso con un sobreimpulso de menos de 5% y más rápido que en lazo abierto. Usando un diagrama de lugar de raíces y un asignación de polos de polos dominantes, escogemos  $T_i = 1.2$   $K_c = 1$ .

La figura 2.12 muestra la respuesta obtenida para un paso unitario aplicado en  $t = 1$  s. Consideremos ahora que el sensor de temperatura es localizado al final de la tubería causando un retardo de tiempo  $L = 1.5$ . Hay dos efectos principales causados por el tiempo muerto en la respuesta de lazo cerrado: a) el retraso de tiempo también aparece en la salida de la planta en lazo cerrado (el controlador no puede evitar esto); b) la respuesta del lazo cerrado después del retraso de tiempo también se deteriora (algo puede ser hecho acerca de esto).

Notar que con los mismos parámetros el PI ahora una respuesta muy oscilatoria como puede verse en la figura antes dicha, entonces es necesario usar valor más alto de  $T_i$  y/o un valor más pequeño de  $K_c$  para

evitar oscilaciones. En este caso el PI es resintonizado con  $K_c = 0.3$  y  $T_i = 1.2$ . Note que las oscilaciones desaparecen y el precio es una respuesta paso más lenta, esto es, aun considerando el retraso de tiempo y conociendo su valor, el controlador no puede dar una buena respuesta de lazo cerrado.

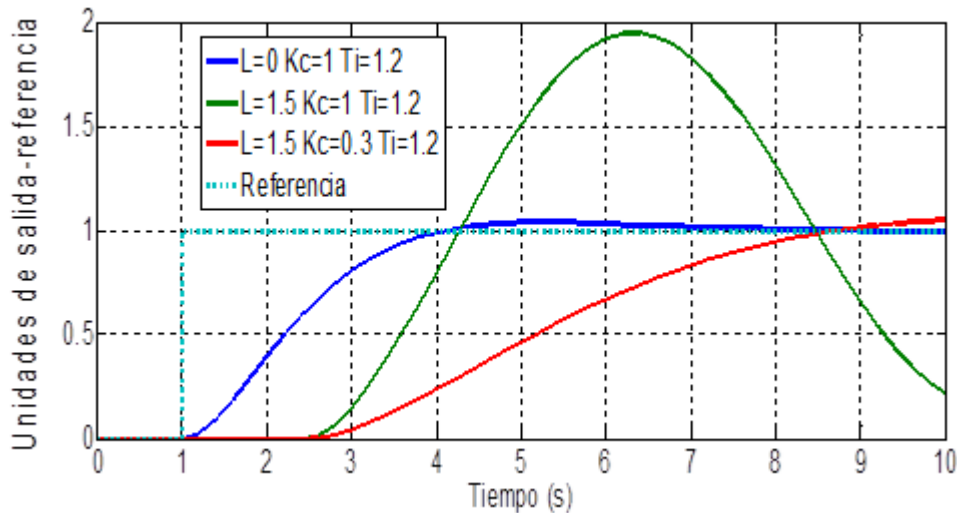


Figura 2.12 Respuesta paso y acción de control para diferentes parámetros del controlador PI y diferentes tiempos muertos

Esto puede también ser interpretado usando la aproximación en el dominio de la frecuencia. Para los parámetros de sintonía escogidos del controlador PI, la función de transferencia en lazo abierto se representa como:

$$C(s)P(s) = \frac{K_c(1+1.2s)e^{-Ls}}{1.2s(1+0.4s)(1+1.5s)} \quad (2.35)$$

El margen de fase (PM) y la frecuencia de cruce ( $w$ ) del sistema se muestran en la figura 2.13 para el caso previo.

Código en Matlab para la respuesta frecuencia para diferentes parámetros del controlador y diferentes tiempos muertos.

```
% data
%T=1;
K=1;
L1=0;
L2=1.5;
L3=1.5;
% phase without dead time
[m,phg,w]=bode([1.2*K K],[0.72 2.28 1.2 0]);
[m1,phg1,w]=bode([1.2*K*0.3 K*0.3],[0.72 2.28 1.2 0]);
% dead-time phase
```



```

phd1=-L1*w*180/pi;
phd2=-L2*w*180/pi;
phd3=-L3*w*180/pi;
% total phase
ph1=phg+phd1;
ph2=phg+phd2;
ph3=phg1+phd3;
% plotfigure (1);
loglog(w,m,'b',w,m1,'--r');grid
figure(2); semilogx(w,ph1,w,ph2,w,ph3,'-.');grid

```

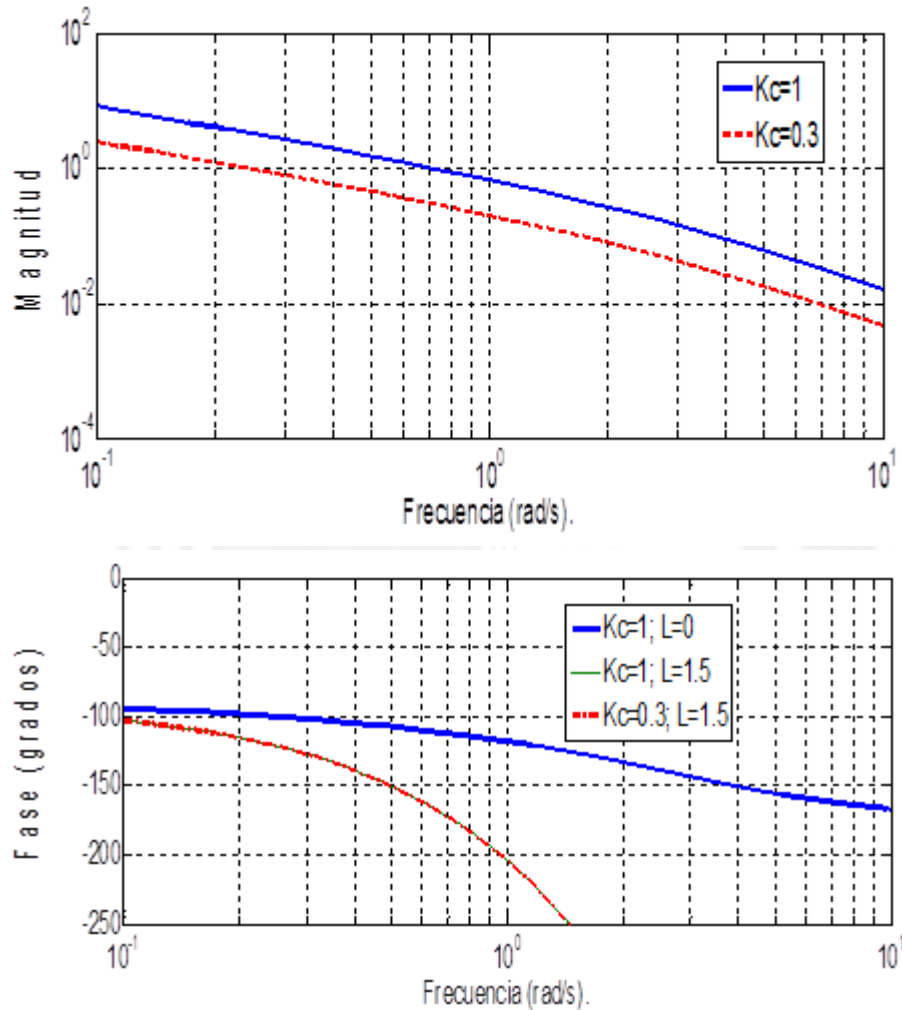


Figura 2.13 Respuesta en frecuencia para diferentes parámetros del controlador y diferentes tiempos muertos

Note que con  $L=0$  el sistema tiene un PM aproximadamente de 70 grados y  $w = w_1 > 0.7$  rad/s. Cuando  $L = 1.5$  el PM  $\cong 5^\circ$ , dando sistema de lazo cerrado pobremente amortiguado. Para obtener una respuesta no oscilatoria, la ganancia  $K_c$ , tiene que ser disminuida hasta que se obtenga un PM  $> 60^\circ$ , que causa un pequeño valor de la frecuencia de cruce  $w_2 < w_1$ . Este nuevo valor de  $w$  de 0.25 rad/s da un transitorio más pequeño después del tiempo muerto y es el resultado de la fase introducida por el tiempo muerto. Notar



que un PID podría ser usado para mejorar el comportamiento obtenido por el PI, para el caso de ese pequeño tiempo muerto. Esto es esperado, porque un controlador PID puede ser interpretado como un controlador de adelanto-atraso donde la acción derivativa es empleada para avanzar la fase del lazo abierto de la función de transferencia  $C(s)P(s)$  cerca de la frecuencia de corte, dando un mejor margen de fase. Sin embargo, si una respuesta más rápida de lazo cerrado es especificada o un proceso con un tiempo muerto más alto es considerado, la fase avanzada del PID no será suficiente para ejecutar el desempeño de lazo cerrado. Entonces, el orden del controlador podría ser incrementado, para mejorar el desempeño del PID, pero este proceso no tiene fin. Un enfoque diferente a este problema puede ser considerado, como se verá.

La figura 2.14 muestra el diagrama de bloques de una planta con retardo de tiempo y controlador clásico.

Como se ha mostrado, en un sistema de control de plantas con retardo de tiempo y controlador PI bien ajustado, la respuesta es bastante lenta.

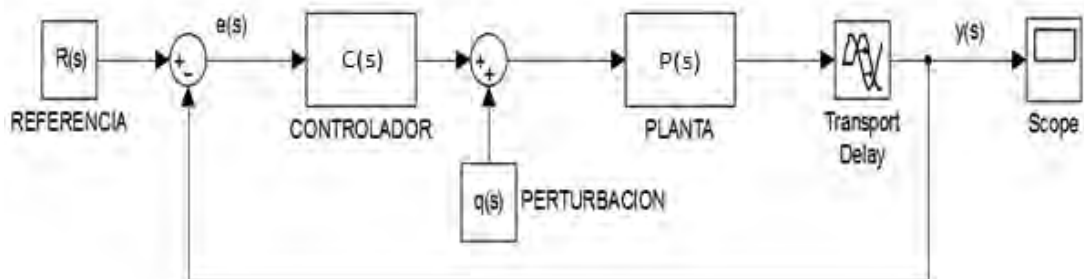


Figura 2.14. Planta con retardo tiempo y controlador clásico.

La función de transferencia de lazo cerrado, es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)e^{-Ls}}{1+C(s)P(s)e^{-Ls}} \quad (2.36)$$

la cual es una función irracional, debido a que el retardo aparece en la ecuación característica.

En control, el tiempo muerto puede tratarse de diferentes maneras:

- 1) Ignorarlo: conduce a sistemas pobremente regulados
- 2) Usando la aproximación de Padé: permite tratar el retardo por medio de una aproximación lineal que incrementa el orden del sistema.
- 3) Usando un predictor de Smith: permite la aplicación de los métodos de diseño tradicionales a plantas con retardos de tiempo debido. Este sistema de control se estudia en el siguiente capítulo

Existen modificaciones del PS para reducir el efecto de las perturbaciones externas, que es el tema que nos ocupa en esta tesis.

- 4) Cualquier tipo de compensador de retardo: por ejemplo compensador de Watanabe.

## **2.3. MODELADO DE PLANTAS CON RETARDO DE TIEMPO**

### **2.3.1. Generalidades**

Mediante la identificación de plantas con retardo de tiempo, es posible obtener un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico de la planta frente a señales de entrada y perturbaciones. Este modelo nos permitirá diseñar la estructura de control más adecuada.

Existen básicamente dos métodos de modelado: el modelado analítico, o “modelamiento interno”, para lo cual se requiere plantear las ecuaciones diferenciales que reflejen la interacción entre los parámetros físicos a partir de los principios físicos fundamentales, hasta obtener un modelo aceptable que relacione, dentro de un rango de operación, la variable o variables de entradas con la variable o variables de salidas que se requiere controlar. Este es un procedimiento que requiere un conocimiento muy especializado de la tecnología del proceso y muchas veces es inviable.

El otro método es la identificación, que es experimental, del tipo “entrada-salida”, aplicando señales del tipo escalón, rampa, impulso, senoidal o señales pseudoaleatorias.

La respuesta al escalón nos da una primera aproximación del modelo a obtener, sobre todo el orden.

La señal pseudoaleatoria, que es una señal persistente y abarca un amplio rango de frecuencias, nos da una mejor aproximación, para un cierto rango de operación.

### **2.3.2 Identificación del comportamiento dinámico de una planta con retardo de tiempo**

Un caso típico de planta con retraso o tiempo muerto, puede ser por ejemplo un horno siderúrgico del proceso de fabricación de planchones de acero. En los trabajos [18,40] relacionados con el modelado del proceso de variación de temperatura en un horno siderúrgico utilizado en el recalentamiento de planchones de acero se realizan el procedimiento de identificación de sistema, se asume como variable de entrada el flujo de combustible (a través de la magnitud de apertura de la válvula) y como variable de salida la temperatura en el interior del horno.

En estos artículos, los autores obtienen un modelo matemático del tipo “entrada-salida” para la planta, representado mediante la función de transferencia:

$$G_p(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-\tau s} \quad (2.37)$$

En base a esta función de transferencia de referencia, elegimos para nuestra planta de estudio, la siguiente función de transferencia.

$$G_p(s) = \frac{23.66}{(8.10s+1)(8.21s+1)} e^{-20t} \quad (2.38)$$

Como se observa, la ecuación característica es de segundo orden, y la planta tiene retardo de tiempo dominante (mayor en más de dos veces que la mayor constante de tiempo de la planta). Para nuestro estudio, consideramos esta ecuación con retardo de tiempo de 20 segundos y otros tiempos de retardo. Inicialmente, desarrollamos la Identificación de este proceso, generando datos a partir de la función de transferencia señalada.

En la figura 2.15 se muestra un diagrama de bloques con el comportamiento dinámico de la planta objeto de estudio

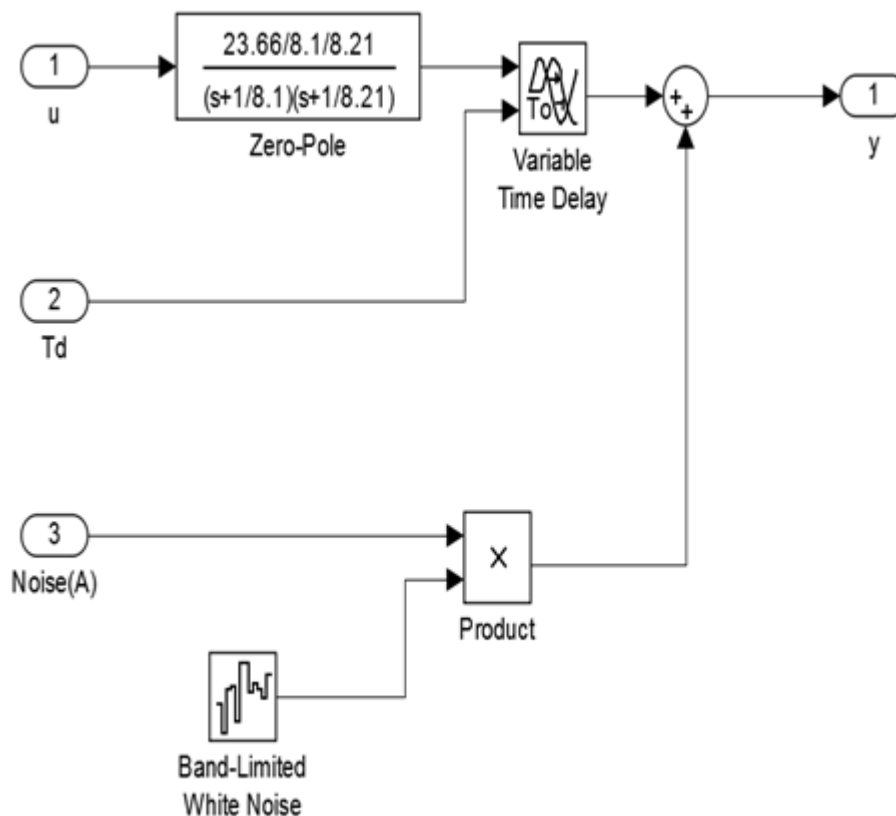


Figura 2.15. Diagrama de bloques de la planta seleccionada.

En la figura 2.16 se exhibe un diagrama de bloques con el procedimiento utilizado para la identificación de la planta objeto de estudio

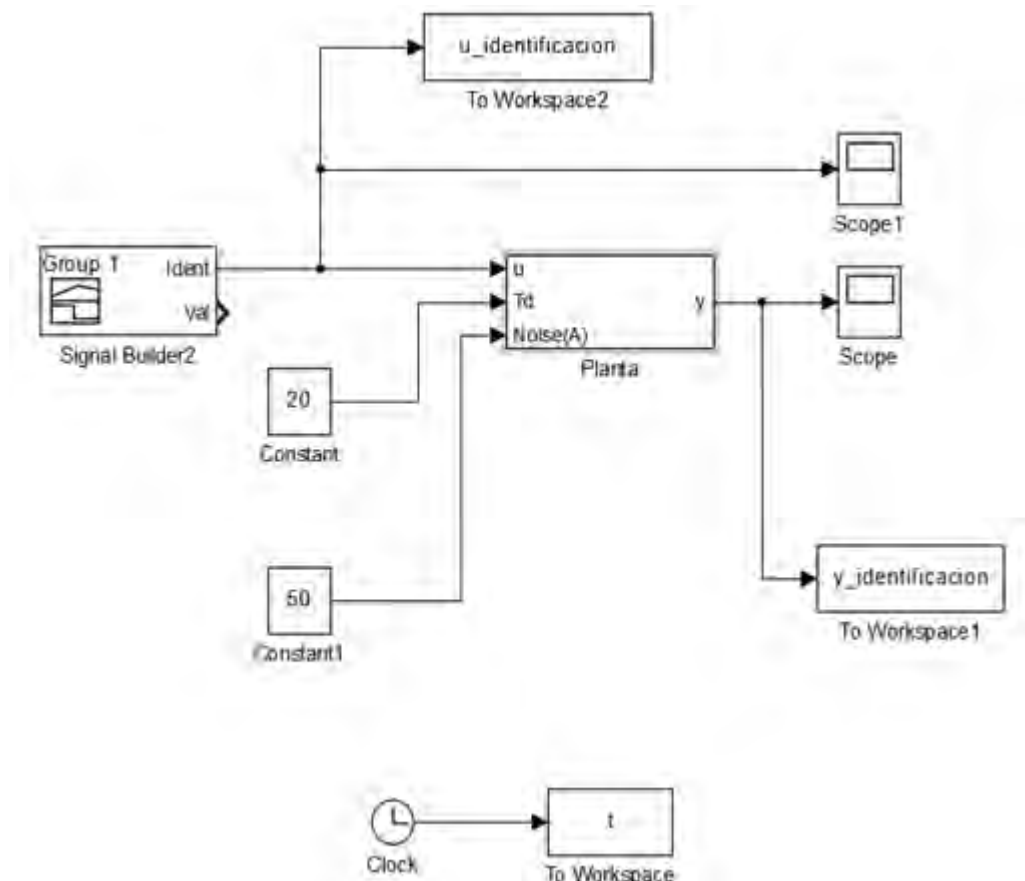


Figura 2.16. Diagrama de bloques para la identificación de la planta seleccionada.

En la figura 2.17 se muestra un diagrama con los datos de entrada de la planta para la identificación

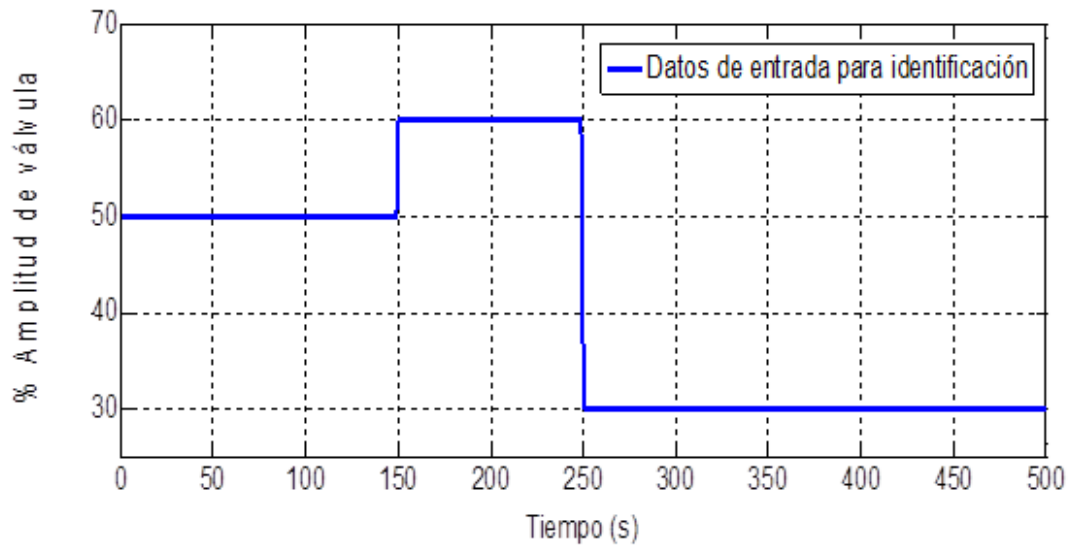


Figura 2.17. Datos de entrada de la planta para la identificación.

En la figura 2.18 se muestra un diagrama con los datos de salida de la planta para la identificación.

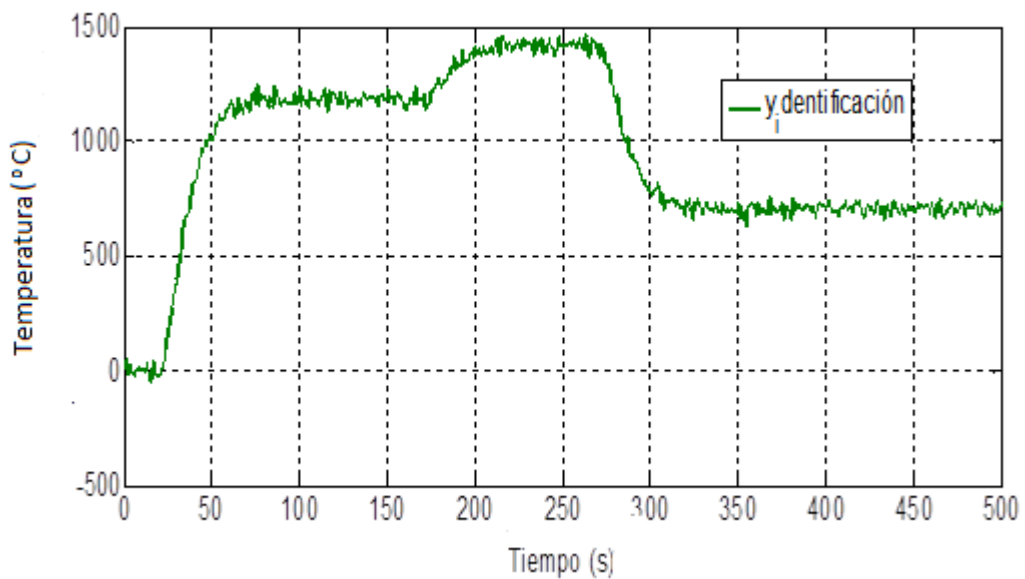


Figura 2.18. Datos de salida de la planta para la identificación.

### 2.3.3. Validación del modelo.

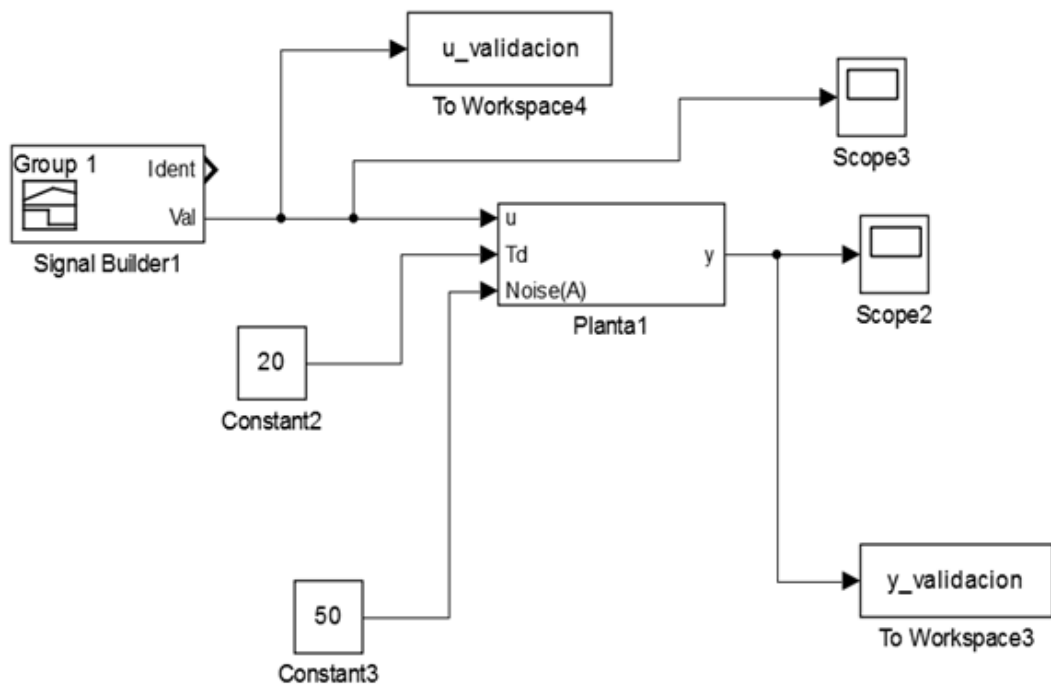


Figura 2.19. Diagrama de bloques para la validación

En la figura 2.20 se muestra un gráfico con los datos de entrada de la planta para la validación del modelo.

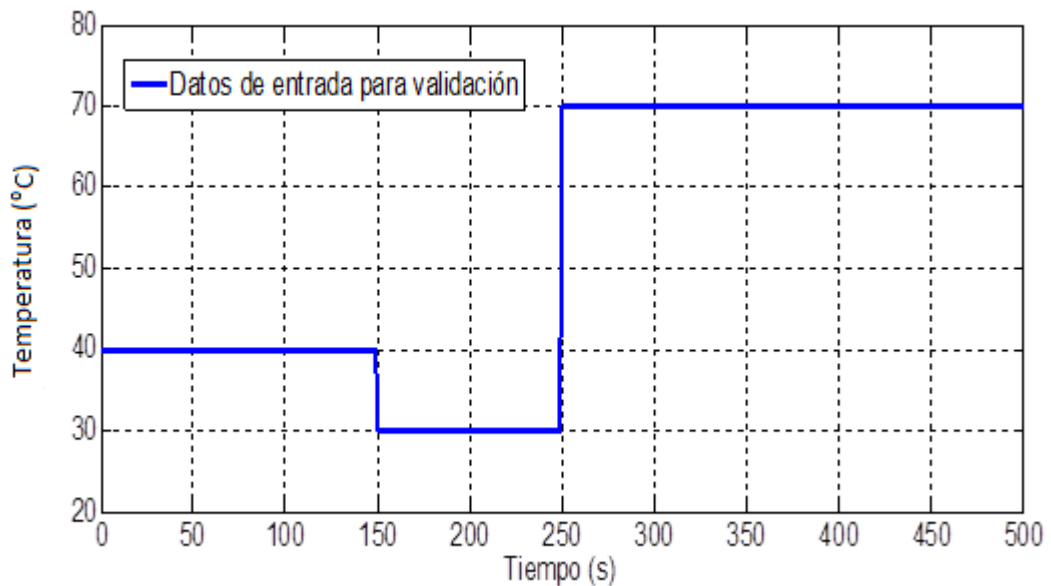


Figura 2.20. Datos de entrada para la validación.



En la figura 2.21 se muestra un gráfico con los datos de salida de la planta para la validación de modelo.

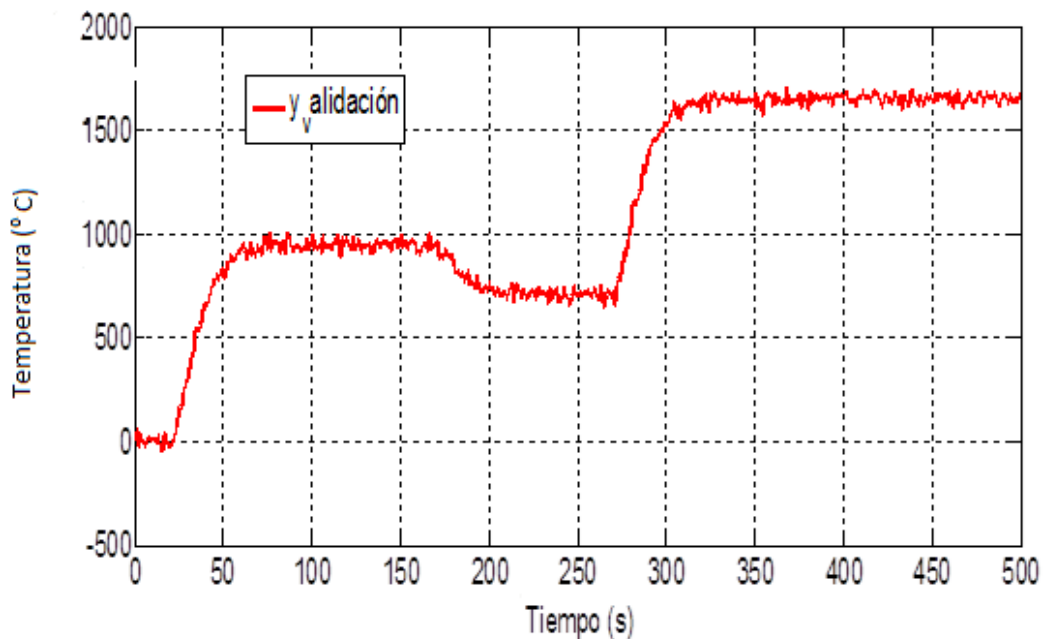


Figura 2.21. Datos de salida de la planta para la validación

El código de Matlab para la identificación y validación del proceso se muestra a continuación.

Código de Matlab para la identificación y validación del proceso.

```
close all; clc;

%correr simulink con señal de identificación
u_ident = u_identificacion(101:401,:);
y_ident = y_identificacion(101:401,:);
t_ident = t(101:401,:);
%correr simulink con señal de validación
u_val = u_validacion(101:401,:);
y_val = y_validacion(101:401,:);
t_val = t(101:401,:);

Ts = 1

%quitar valor medio de señales
u_ident = u_ident-ones(size(u_ident,1),1)*mean(u_ident(1:50,:));
y_ident = y_ident-mean(y_ident(1:50,:));
u_val = u_val-ones(size(u_val,1),1)*mean(u_val(1:50,:));
y_val = y_val- mean(y_val(1:50,:));
%armar objetos tipo iddata
data_ident = iddata(y_ident,u_ident,Ts);
```

```

data_val = iddata(y_val,u_val,Ts);

%visualmente: delay = 22
Td = 22;

%identificando con codigo PROCESS MODELS
modelo_processmodels = idproc('P2D'); %armando el modelo que se
utiliza
% midproc0 = idproc({'P2ZUD','P1D'}, 'TimeUnit', 'minutes');

% 'P1D' represents a transfer function with one pole (P1) and a
delay (D).
modelo_processmodels.Structure(1,1).Td.Value=22; %se debe poner como
unidades y no numero de muestras
modelo_processmodels.Structure(1,1).Td.Maximum=22; %para setear el
valor fijo
modelo_processmodels.Structure(1,1).Td.Minimum=22;

modelo_processmodels = procest(data_ident, modelo_processmodels);
present(modelo_processmodels)
compare(data_val,modelo_processmodels)

% compare(data_val,modelo_tf,modelo_processmodels)

```

La función de transferencia del modelo del proceso es:

$$G(s) = \frac{1}{(1+T_{p1}s)(1+T_{p2}s)} e^{-T_d s} \quad (2.39)$$

donde :

$$K_p = 23.747 \pm 0.15942 \quad (2.40)$$

$$T_{p1} = 10.017 \pm 3.0214 \quad (2.41)$$

$$T_{p2} = 6.8822 \pm 3.2884 \quad (2.42)$$

$$T_d = 22 \pm 0.68516 \quad (2.43)$$

En la figura 2.22. se muestran los resultados comparativos de validación del modelo obtenido del proceso objeto de estudio.

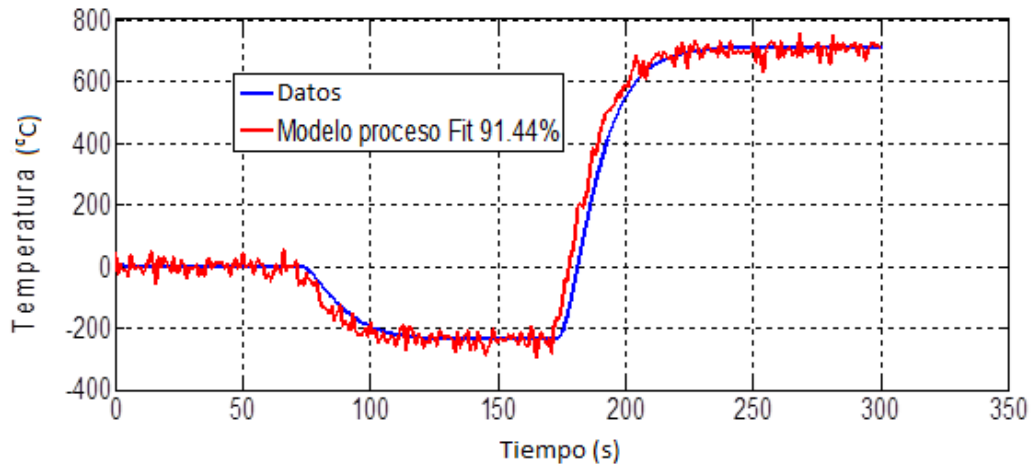


Figura 2.22. Resultado de validación del modelo obtenido.

En correspondencia con los resultados obtenidos de validación, el índice de ajuste (FIT) del modelo obtenido es de 91.44%, lo cual es bastante aceptable por lo que el modelo obtenido del proceso objeto de estudio es válido.

#### 2.4 Conclusiones.

Se abordó la caracterización de las plantas con retardos de tiempo, mostrando el efecto del retardo de tiempo en las respuestas de plantas frente a entradas tipo escalón.

La representación en el dominio de la frecuencia del retardo de tiempo hace notar la incidencia que tiene éste en el margen de fase: disminuye la robustez del sistema.

Las aproximaciones de Padé pueden ser útiles como representación matemática del retardo de tiempo  $e^{-Ls}$  y usadas en el diseño de los controladores PID, para bajos órdenes de retardos de tiempo.

Se abordó el problema de control de plantas con retardos de tiempo dominantes, mostrando las dificultades que surgen en la sintonización de controladores clásicos, en particular PI, en el cual, por ejemplo, si se disminuye el sobreimpulso se aumenta el tiempo de respuesta.

Para el análisis de planta con retardo de tiempo, se seleccionó una de segundo orden con retardo de tiempo dominante, desarrollándose su identificación, validación y posterior comparación, obteniéndose finalmente la función de transferencia que describe el comportamiento dinámico de la planta seleccionada.

## CAPITULO 3.

### **Diseño de un predictor de Smith modificado para el control de plantas industriales con retardo de tiempo y perturbaciones**

#### **3.1. Introducción.**

El Predictor de Smith (SP) constituye la primera estructura de control predictivo, y fue presentado a finales de la década del 50, y usado para mejorar el rendimiento de los controladores clásicos (PI o PID) de plantas con retardo de tiempo.

La estructura clásica del predictor de Smith se derivó de la idea de resolver el problema de control de plantas con retardo de tiempo realimentando la salida de la planta antes del retardo, para que de esta forma la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado no contenga el término de retardo, como se muestra en la figura 3.1.

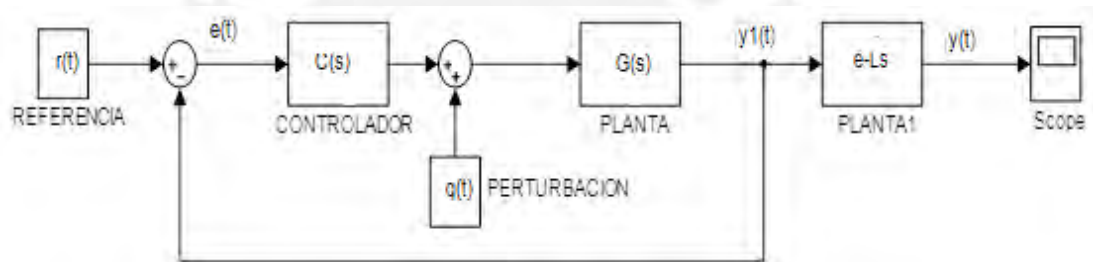


Figura 3.1 Control ideal.

En este caso, la función de transferencia de lazo cerrado del sistema de control es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-Ls}}{1+C(s)G(s)} \quad (3.1)$$

La implementación efectiva de esta solución, en general, no es posible en la práctica, principalmente, porque el sensor no puede ser instalado en la posición deseada y/o el retardo de tiempo no puede ser físicamente separado del comportamiento dinámico de la planta real.

Una solución a este problema puede ser obtenida usando la idea de predicción, para procesos estables. Si se modela la planta sin retardo de tiempo, siendo  $G_n(s)$  el modelo de la planta  $P(s) = G(s)e^{-Ls}$ , es posible alimentar la salida de este modelo al controlador, tal como se muestra en la figura 3.2

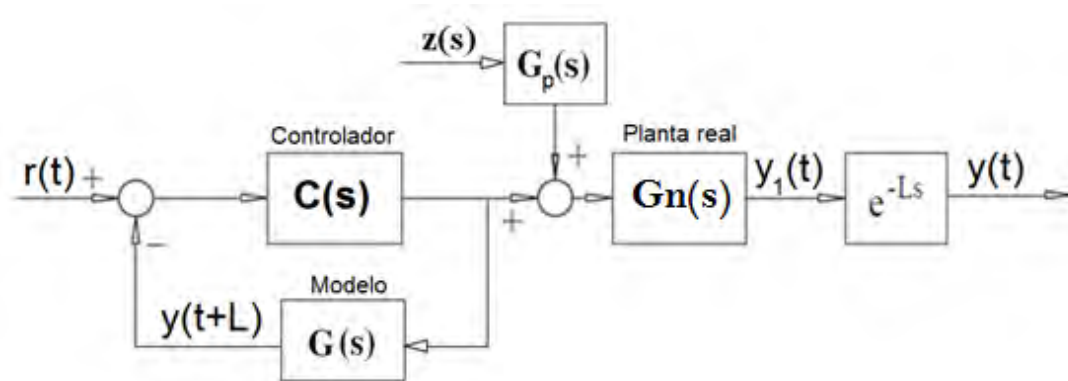


Figura 3.2 Predictor de lazo abierto.

En esta estructura si  $G_n(s) = G(s)$ , el controlador primario puede ser sintonizado considerando sólo  $G(s)$  y el comportamiento de lazo abierto obtenido es el mismo como en el caso ideal,

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-Ls}}{1+C(s)G(s)} \quad (3.2)$$

El controlador equivalente para este sistema es:

$$C_{eq}(s) = \frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)} \quad (3.3)$$

que opera en lazo abierto.

Esta estrategia es conocida como un predictor de lazo abierto[13], y no puede ser usado en la práctica, porque de esta manera el controlador no percibiría el efecto de la perturbación y además modelos no equivalentes no son tomados en cuenta y por tanto no se aprovecharían las bondades del feedback.

Una solución a este problema fue propuesta por Smith en 1957, basada en una estructura de predictor de lazo cerrado, del proceso estable de lazo abierto.

### 3.2 El predictor de Smith como estrategia de control de plantas con retardo de tiempo.

La estructura clásica del predictor de Smith se muestra en la figura 3.3.

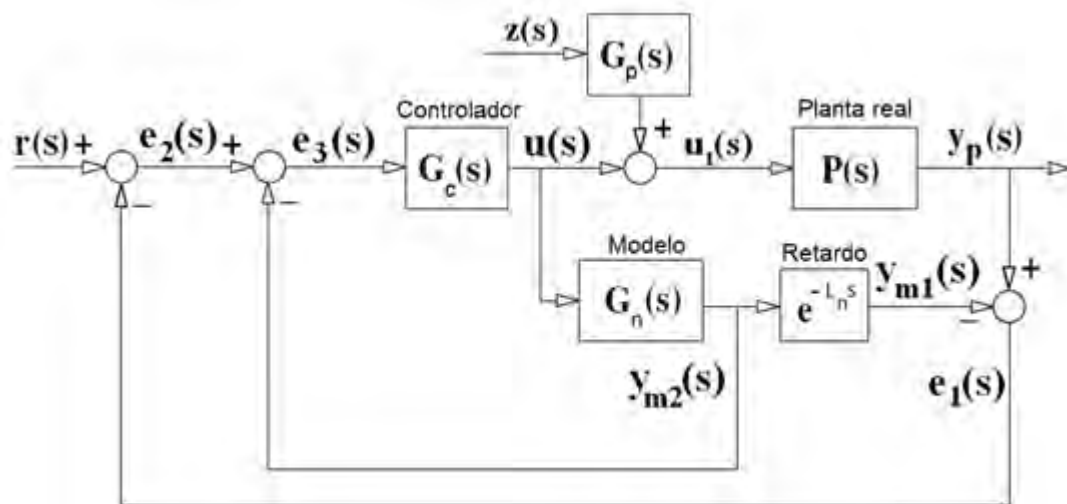


Figura 3.3. Estructura clásica del predictor de Smith.

En esta estrategia la predicción en el tiempo  $t$  se realiza mediante un modelo de la planta sin retardo de tiempo ( $G_n(s)$ ). La diferencia entre las salidas de la planta real y del modelo  $e_1(s)$  se realimenta. Con esta estructura, si no hay errores de modelado o perturbaciones el error entre la salida del proceso y la salida del modelo ( $e_1(s)$ ) es nulo y el controlador puede ser sintonizado como si la planta no tuviera retardo de tiempo. Por consiguiente, para el comportamiento dinámico nominal de la planta esta estructura ofrece un comportamiento similar a la solución ideal.

Sin embargo, tiene como inconveniente que está restringido a plantas estables. En los últimos años, numerosas modificaciones del PS se han propuesto con el fin de: (a) mejorar la estabilidad de los sistemas de control; (b) permitir su uso en el control de plantas inestables o con integradores; (c) mejorar la robustez.

La mayoría de las estructuras propuestas recientemente en la literatura son más complejas que la estructura clásica del predictor de Smith y están especialmente propuestas para determinados tipos de comportamiento dinámicos de plantas industriales [13]. En algunos casos, las soluciones son válidas sólo para modelos simples con retardos relativamente pequeños, como por ejemplo sistemas de primer orden más retardo de tiempo o segundo orden más retardo de tiempo.

La principal ventaja del predictor de Smith consiste en que si calculamos la función de transferencia del sistema, el elemento exponencial desaparece de la ecuación característica del sistema de lazo cerrado, esto es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1+G_c(s)G(s)} e^{-Ls} \quad (3.4)$$



*Sin embargo el predictor de Smith tiene algunas limitaciones:*

*La principal limitación consiste en que sólo es posible aplicarlo en plantas que son estables (las raíces del sistema deben estar en el semiplano izquierdo del plano complejo  $s$ ).*

*Para procesos integradores y procesos inestables, es poco robusto cuando entra una perturbación.*

*Es muy sensible al error de modelado, se puede perder la estabilidad rápidamente.*

*Otra de las limitaciones del predictor de Smith es que no es capaz de acelerar la dinámica de rechazo a perturbaciones.*

*Ejemplo.*

*Para un proceso estable, sintonizaremos un controlador primario del tipo PI, y luego comparamos este controlador (sólo PI) con el mismo controlador PI colocado en la estructura del Predictor de Smith.*

*Sea el proceso del sistema real  $P(s)$  y supongamos que tenemos un modelo perfecto, esto es,  $P(s) = P_n(s)$ . Supongamos entonces que nuestro proceso tiene la siguiente representación de un sistema de primer orden con retardo.*

$$P(s) = P_n(s) = \frac{e^{-3s}}{s+1}, \quad (3.5)$$

*y se diseña el siguiente controlador PI:*

$$C(s) = \frac{1.2s+1}{1.2s} = \left(1 + \frac{1}{1.2s}\right), \quad (3.6)$$

*donde  $K_c = 1$  y  $T_i = 1.2$ .*

*De esa forma, en la figura 3.4 se muestra el diagrama de bloques en simulink, utilizando la estructura convencional de un controlador PI y utilizando la estructura del Predictor de Smith con el mismo controlador PI.*

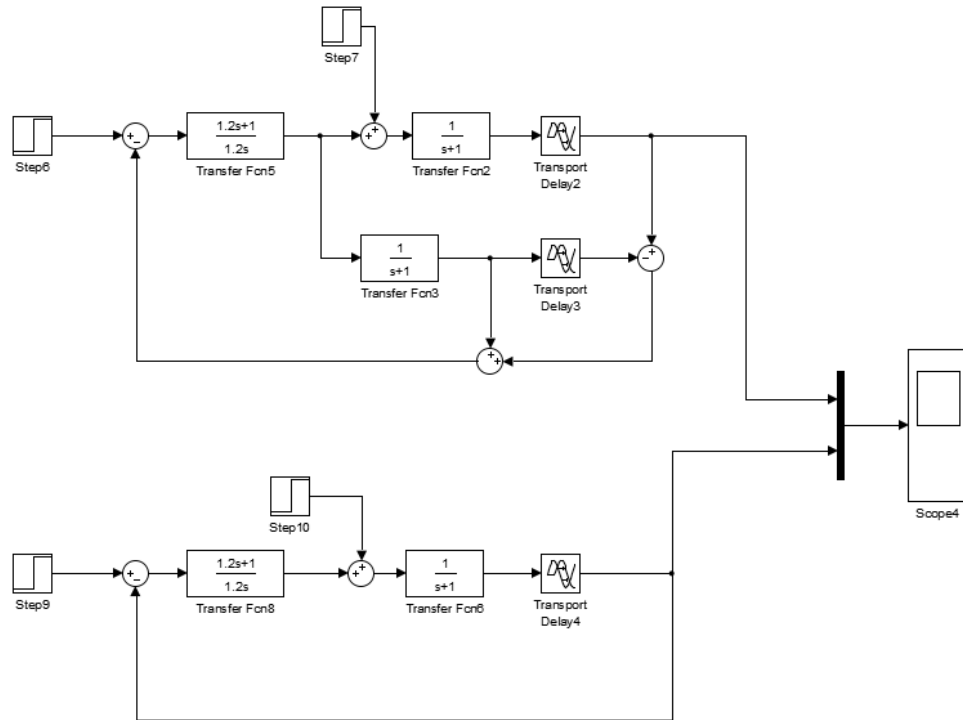


Figura 3.4 Diagrama de bloques controlador PI y el mismo controlador PI en base a PS

En la figura 3.5 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control con controlador PI y con PS. En la figura 3.6 se muestra el efecto de una perturbación de poca intensidad sobre el sistema de control con ambos controladores y en la figura 3.7 se presenta el efecto de una perturbación de fuerte intensidad sobre dicho sistema. Observar que en todos los casos el desempeño del sistema de control con PS es mejor.

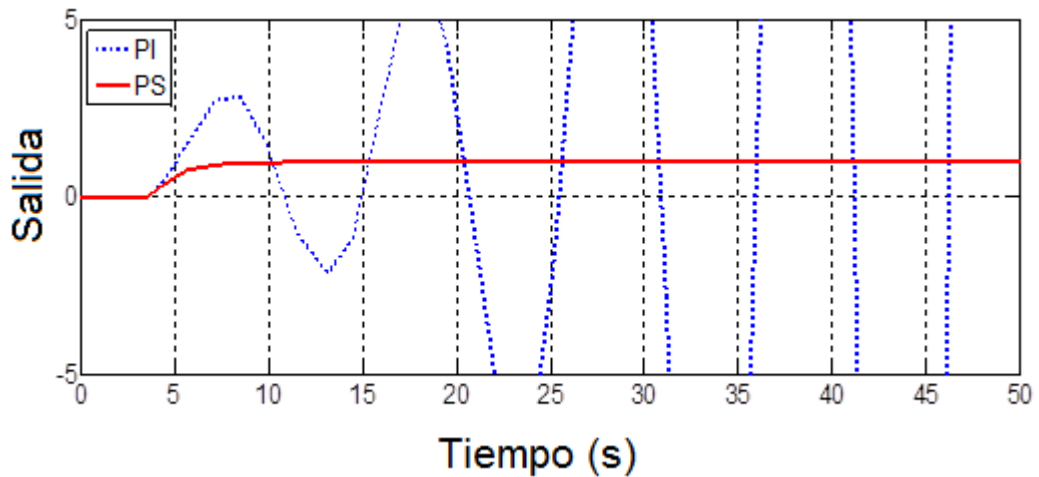


Figura 3.5. Comparación de las respuestas temporales del sistema de control con controlador PI y PS.

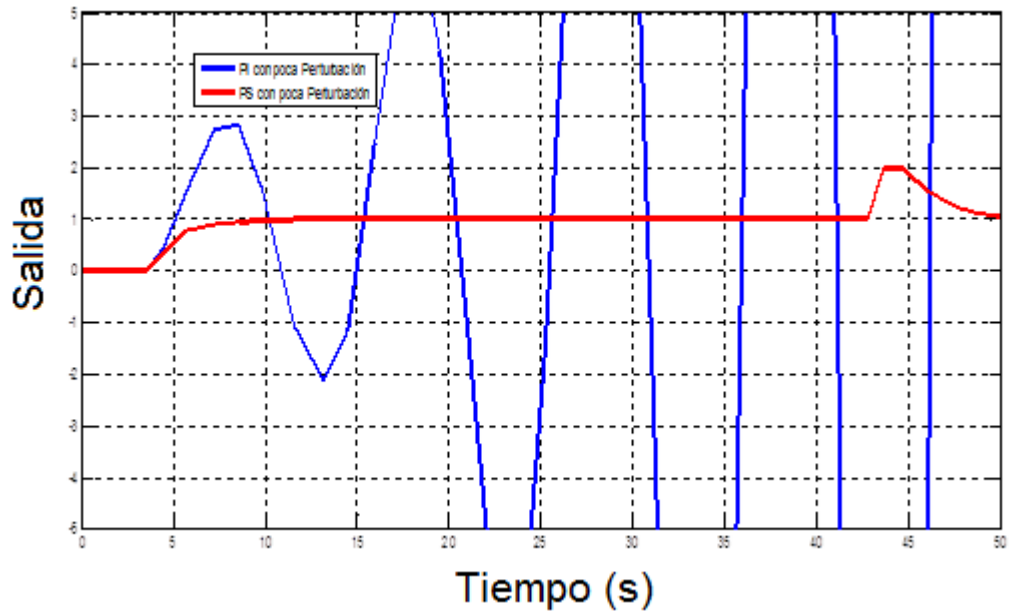


Figura 3.6. Comparación de las respuestas temporales del sistema de control con controlador PI y PS con perturbación a los 40 s.

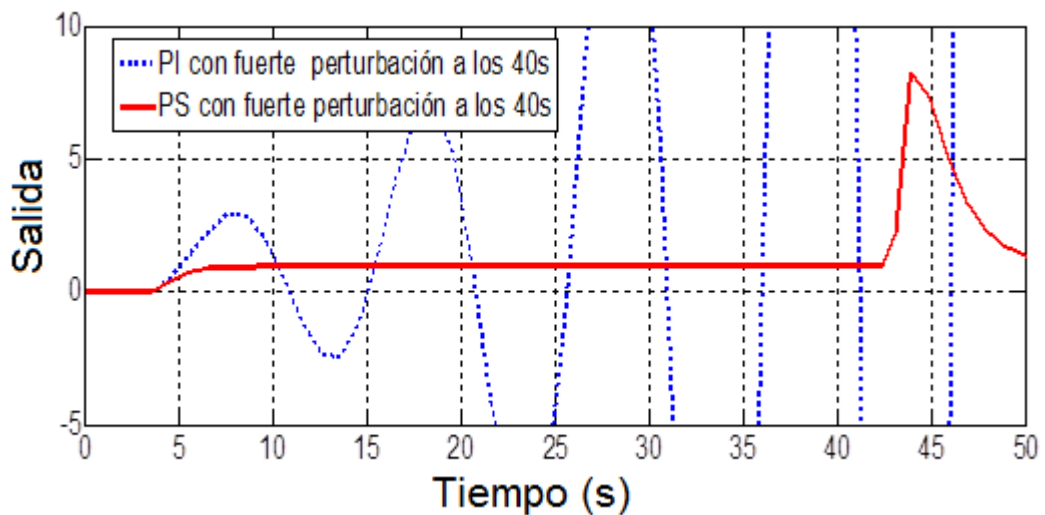


Figura 3.7. Comparación de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con controlador PI (con perturbación a los 40 s. de alta intensidad)

### 3.2.1 Predictor de Smith para plantas integradoras

En la figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control basado en PS de una planta con integrador y con perturbación en la salida de la planta, la cual se aplica a los 47 s.

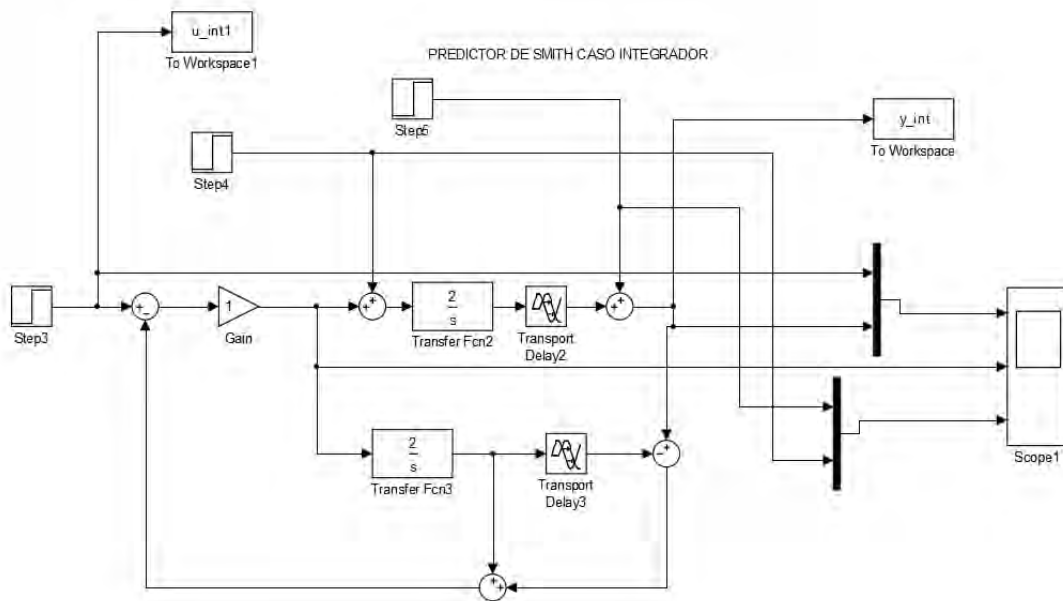


Figura 3.8. Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS de una planta con integrador y perturbación en la salida de la planta.

De la figura 3.9 es posible observar que el Predicador de Smith no consigue rechazar el efecto de la perturbación en procesos con integradores, debido a que la respuesta temporal del sistema de control no regresa a su valor de estado estacionario y se estabiliza en otro valor (aproximadamente en 1.4).

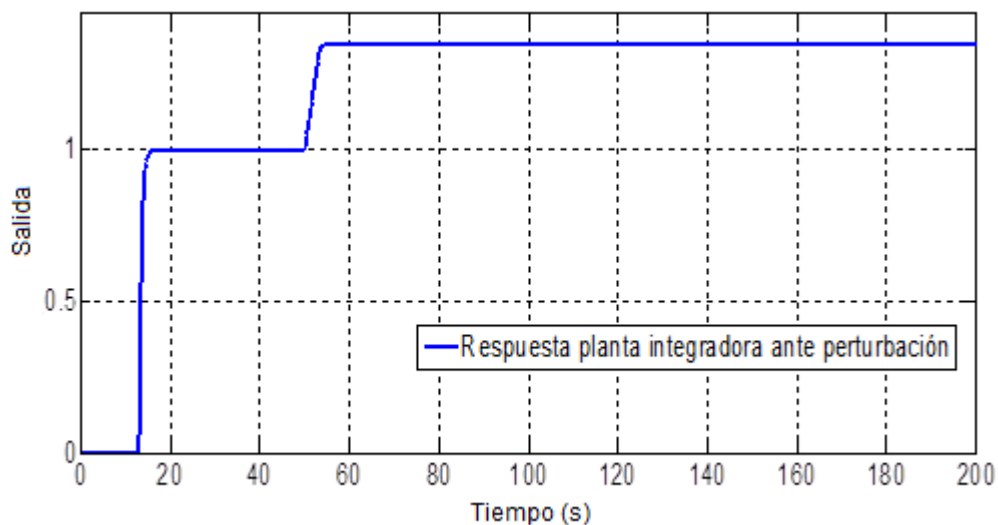


Figura 3.9. Respuesta temporal del sistema de control con PS y planta integradora con retardo y perturbación (antes de la planta) a los 47 s.

Por consiguiente, en el caso de una planta con integrador, el PS posibilita su control, pero cuando se origina una perturbación, se produce un error de estado estacionario, por lo que no consigue eliminar el efecto de la perturbación.

### 3.2.2. Control basado en el Predictor de Smith de plantas inestables

En el caso de plantas inestables, sucede lo mismo que en el caso de plantas con integradores, con la única diferencia de que cuando se origina una perturbación, la respuesta temporal del sistema de control se convierte en inestable, es decir se va al infinito (ver figura 3.10 y figura 3.11).

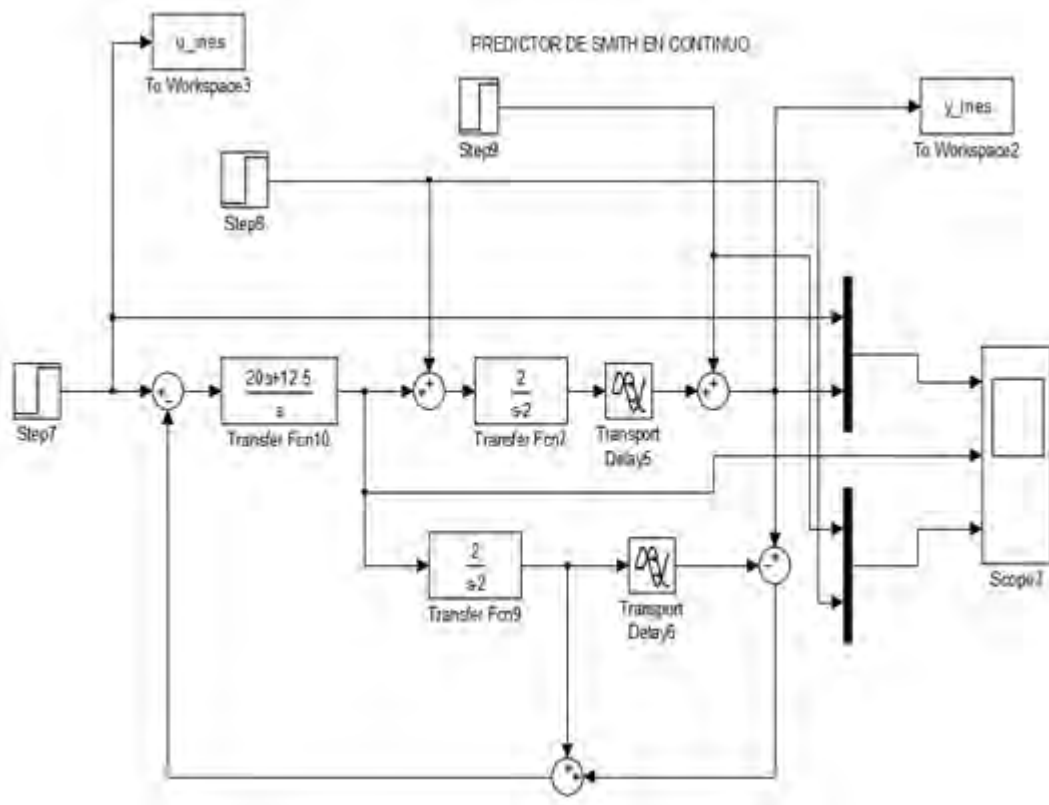


Figura 3.10. Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS de una planta inestable con retardo de tiempo y perturbación en la salida de la planta.

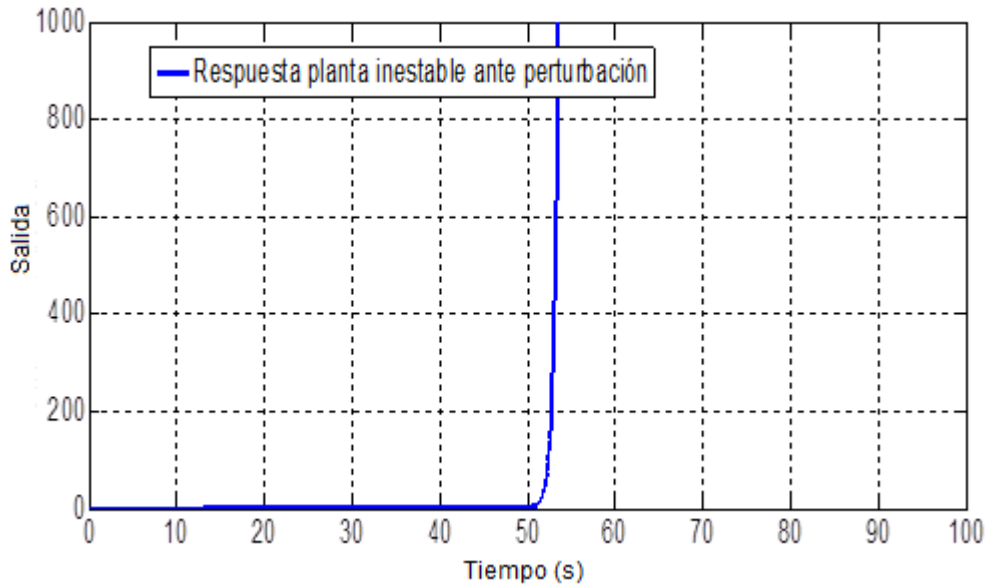


Figura 3.11. Respuesta temporal del sistema de control basado en PS de una planta inestable con retardo de tiempo y perturbación (en la salida de la planta a los 50 s.).

Para la planta seleccionada (2.39), se realiza la simulación del sistema de control con el controlador PI, con diferentes retardos de tiempo. En la figura 3.12 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

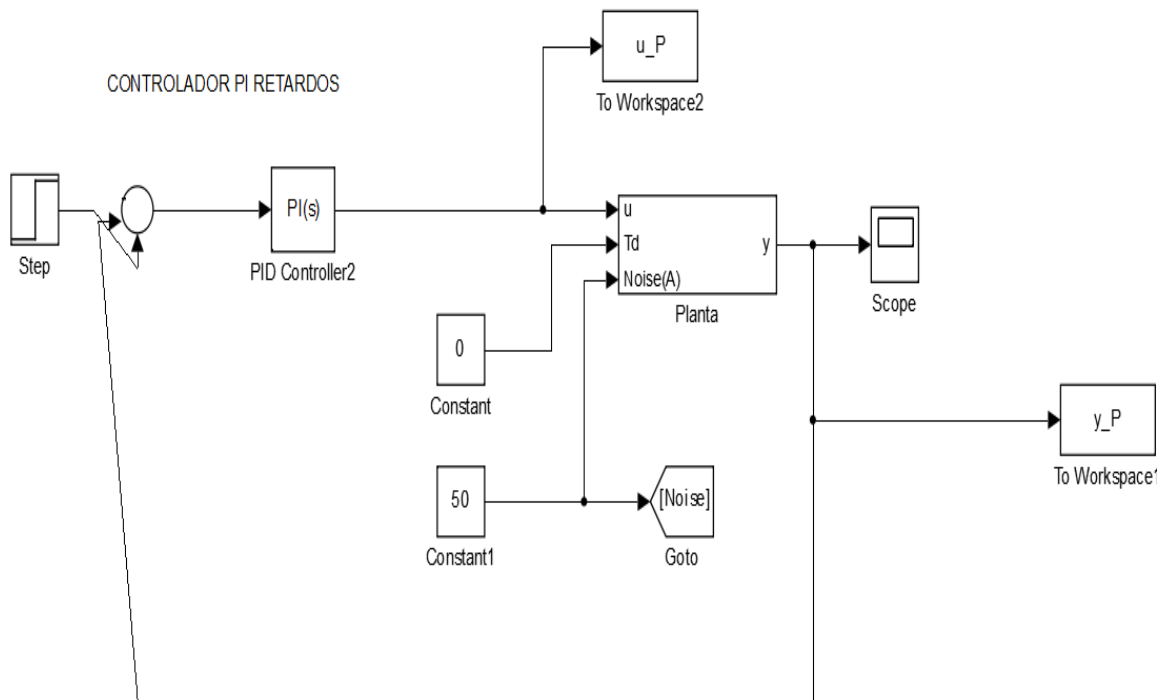


Figura 3.12. Diagrama del sistema de control con controlador PI de la planta seleccionada con diferentes retardos.



## Código de Matlab para el diseño del controlador PI.

```
clc; clear all; close all;

% modelo_processmodels =
% Process model with transfer function:
%
%          Kp
%  G(s) = ----- * exp(-Td*s)
%          (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)
%
%          Kp = 23.747 +/- 0.15941
%          Tp1 = 10.02 +/- 3.0168
%          Tp2 = 6.8798 +/- 3.284
%          Td = 22 +/- 0.68523

K = 23.747;
p1 = -1/10.02;
t1 = 10.02;
p2 = -1/6.8798;
t2 = 6.8798;
Td = 22;
ceros = [];
polos = [p1 p2];
planta = zpk(ceros,polos,K);

%intonizacion
Tes = 80;
eta = 0.7;
wn = 4/(eta*Tes);
pdes1 = -eta*wn + i*wn*sqrt(1-eta^2);
pdes2 = -eta*wn - i*wn*sqrt(1-eta^2);

poldes = poly([pdes1 pdes2 -eta*wn*5])

(t1+t2)/t1/t2

Kp = (poldes(3)*t1*t2-1)/K
Ki = poldes(4)*t1*t2/K

% %%%
% Tes = 1;
% eta = 0.8;
% wn = 4/(eta*Tes);
% pdes1 = -eta*wn + i*wn*sqrt(1-eta^2);
% pdes2 = -eta*wn - i*wn*sqrt(1-eta^2);
%
% poldes = poly([pdes1 pdes2])
%
% Kp = (poldes(2)+2)/2,
% Ki = poldes(3)/2
```

```
%
% mp = 100*exp(-eta*pi/sqrt(1-eta*eta))
```

```
poldes = 1.0000 0.3500 0.0301 0.0013.
```

```
ans = 0.2452. Kp = 0.0453. Ki = 0.0037
```

En la figura 3.13 se presentan las respuestas temporales del sistema de control de la planta objeto de estudio con el controlador PI diseñado, considerando diferentes retardos de tiempo.

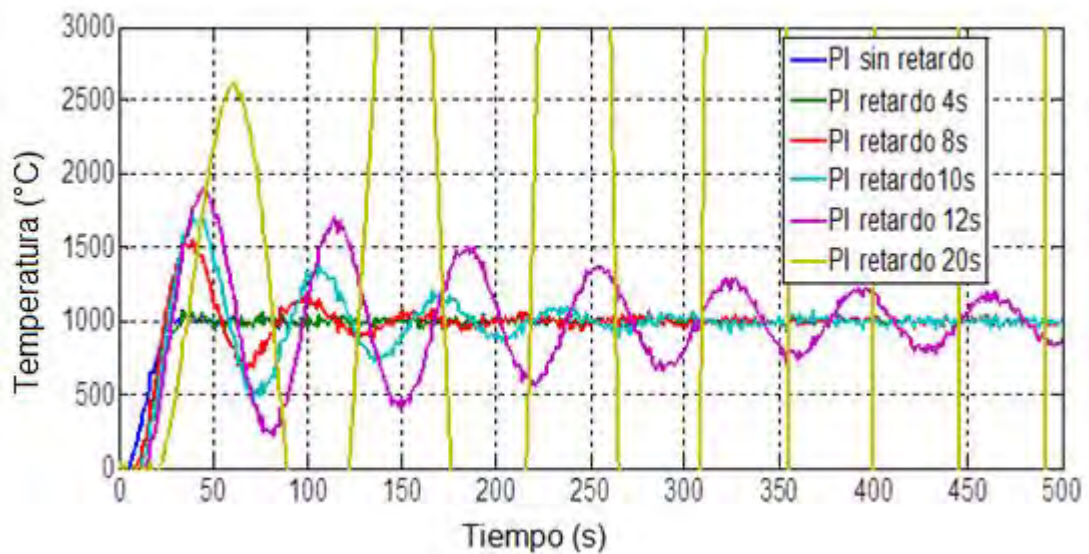


Figura 3.13. Respuestas temporales del sistema de control de la planta seleccionada con controlador PI y diferentes retardos de tiempo.

Como se observa de la figura 3.13, para grandes retardos (20 s), el controlador PI no posibilita estabilizar la planta:

Similarmente se realizaron simulaciones para la misma planta con controlador PI y estructura de control basada en el predictor de Smith, para diferentes retardos de tiempo (incluye ruido). En la figura 3.14 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

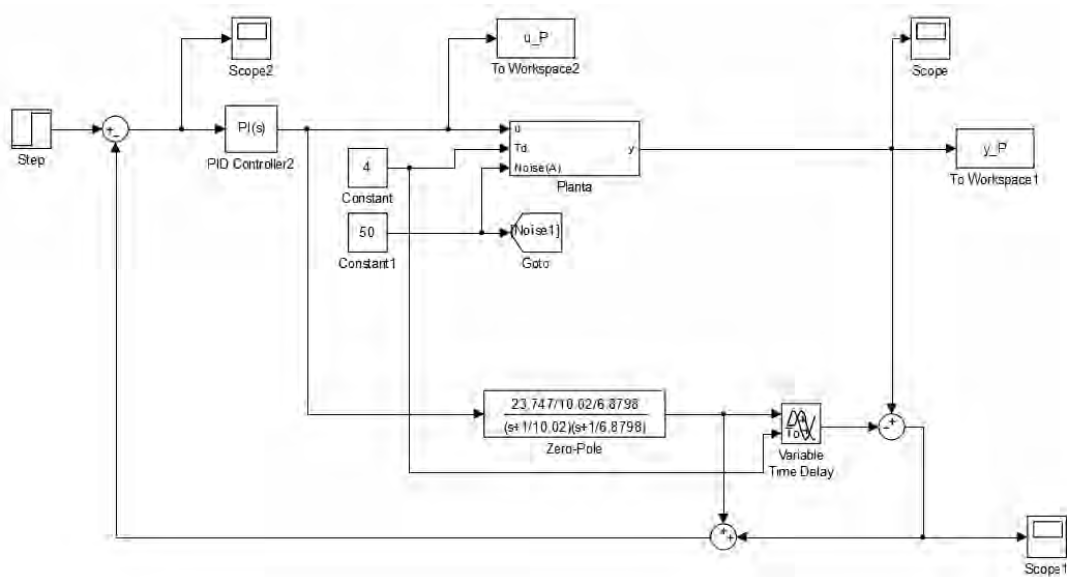


Figura 3.14. Diagrama del sistema de control basado en PS, para diferentes retardos.

En la figura 3.15 se muestran las respuestas temporales del sistema de control representado en la figura 3.14.

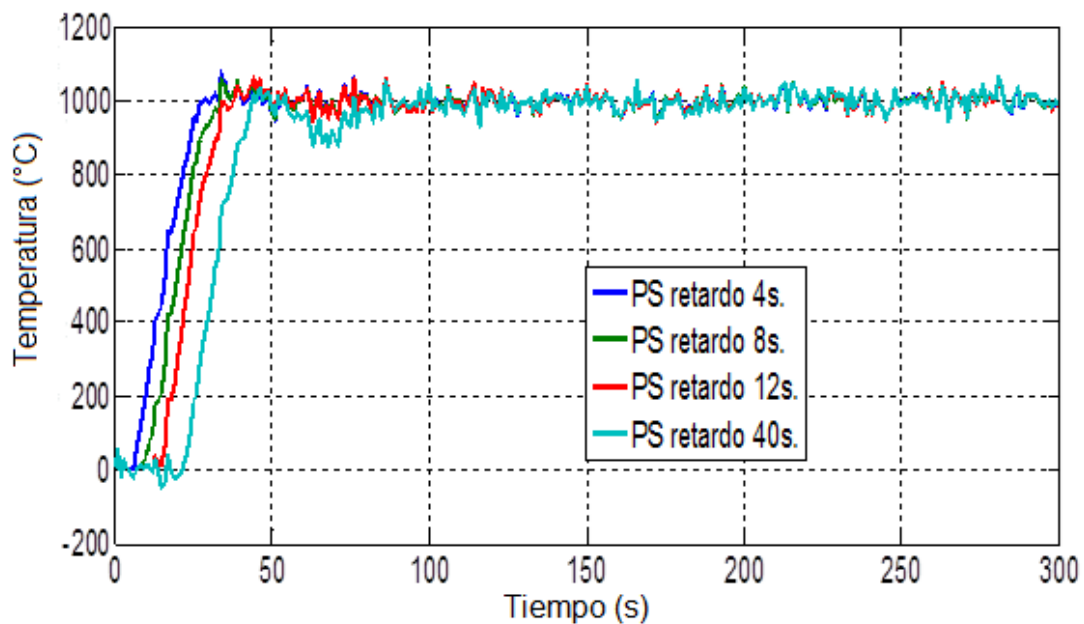


Figura 3.15. Respuestas temporales del sistema de control basado en PS de la planta objeto de estudio con controlador PI, considerando diferentes retardos.

Como se observa de la figura 3.15, el desempeño del sistema de control basado en PS es superior al del sistema previo sin PS y en todos los casos las respuestas temporales del sistema de control son estables.

### 3.3 Propuesta de modificación del predictor de Smith para el control de plantas con retardos de tiempo y perturbaciones externas.

Como se mostró en los epígrafes previos el desempeño de los sistemas de control basados en PS se deteriora cuando las plantas se encuentran sometidas al efecto de perturbaciones. En esta tesis, para compensar el efecto de las perturbaciones en los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo, se propone el diseño de una estructura modificada del predictor de Smith basada en un bloque de control anticipatorio.

#### 3.3.1 Predictor de Smith con perturbación externa después de la planta

En la figura 3.15 a se muestra el diagrama de bloques de la estructura clásica del sistema de control basado en PS con perturbación externa en la salida de la planta.

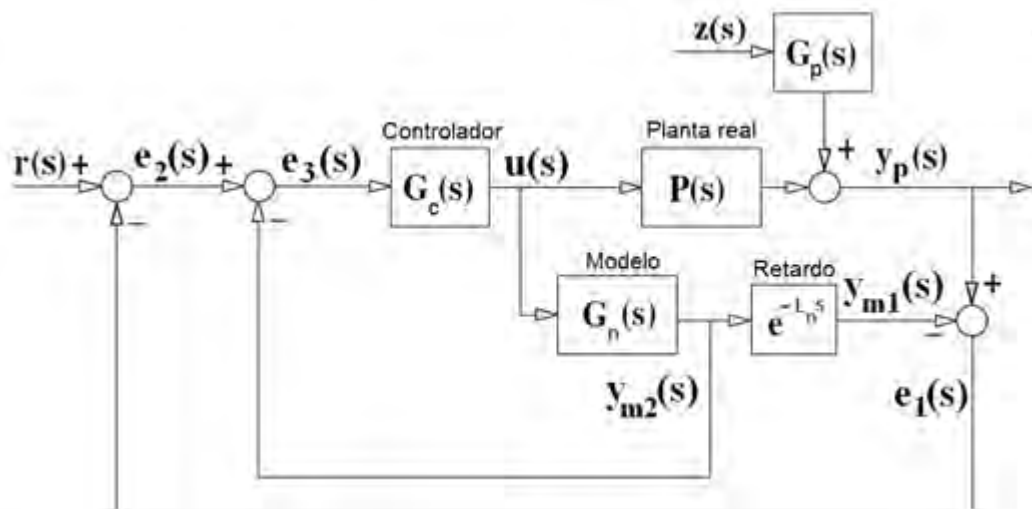


Figura 3.16a Estructura clásica del predictor de Smith con perturbación externa después de la planta.

La perturbación se origina a los 200 s, después que la planta se ha estabilizado.

Elegimos una perturbación con comportamiento dinámico  $1/(10s+1)$ . En la figura 3.16b se muestra el comportamiento dinámico de esta perturbación.

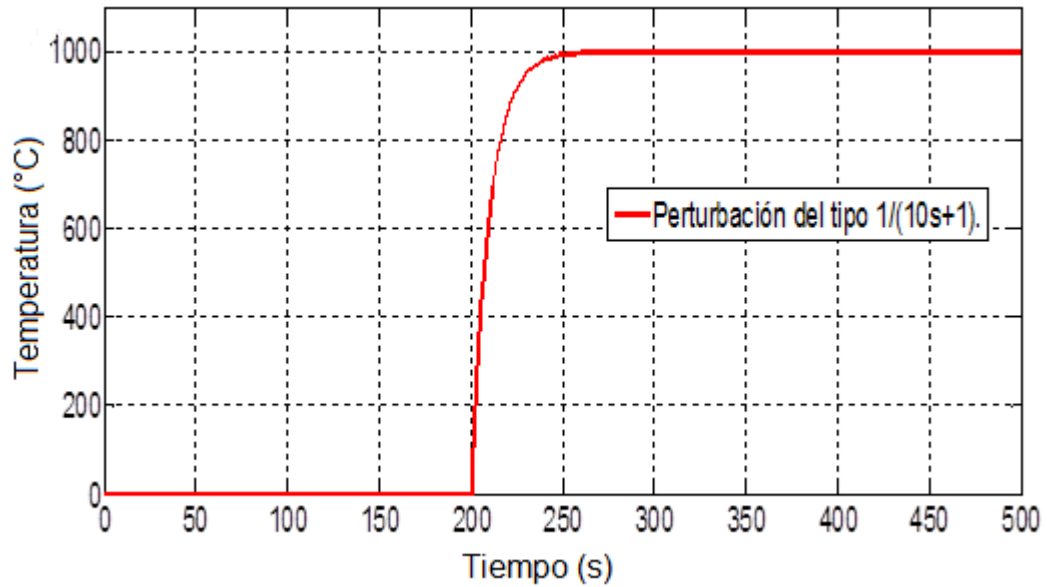


Figura 3.16b. Perturbación de primer orden  $1/(10s+1)$ .

### 3.3.1.1. Sistema de control basado en predictor de Smith con perturbación en la salida de la planta, sin compensador anticipatorio.

En la figura 3.17 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control basado en PS, con perturbación en la salida de la planta, y en la figura 3.18, se exhibe la respuesta temporal del sistema de control frente a la perturbación, la cual tiene lugar a los 200s.

Como se observa de la figura 3.18, el PS rechaza al efecto de la perturbación después del retardo de tiempo de la planta, es decir después de 20 s.

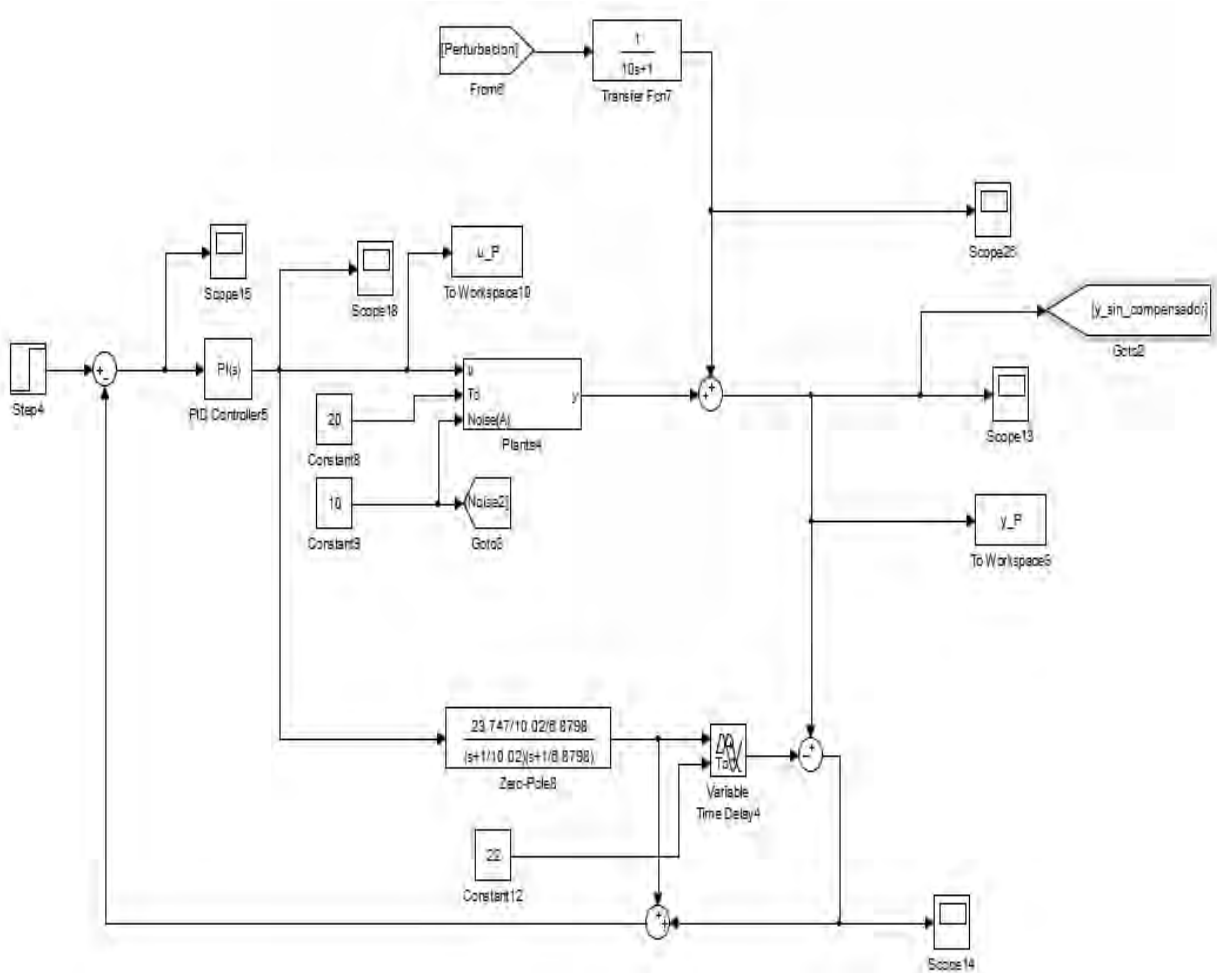


Figura 3.17. Diagrama del sistema de control con PS y perturbación.

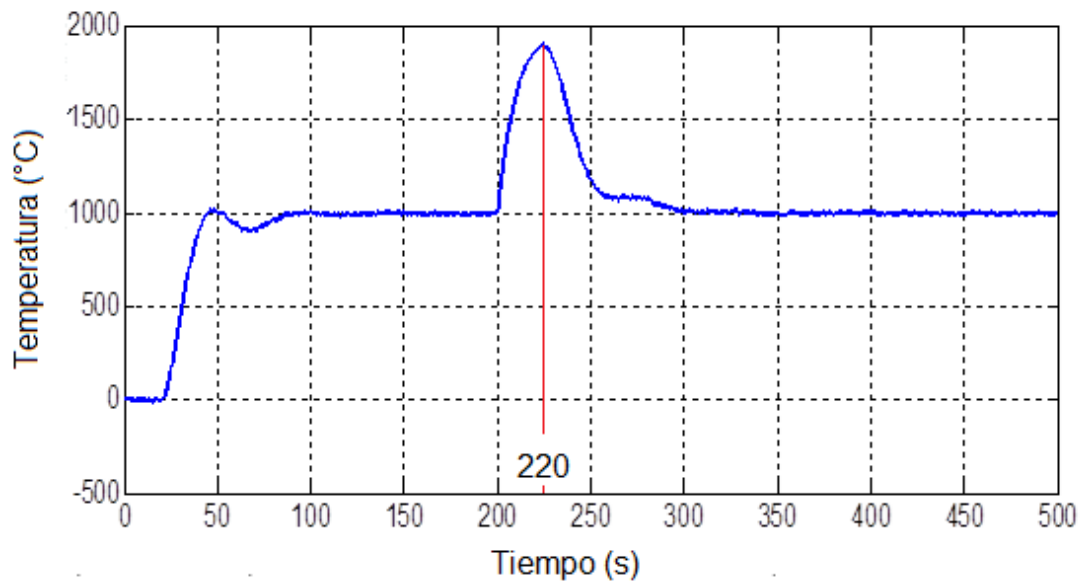


Figura 3.18 Respuesta temporal del sistema de control con PS y perturbación a los 200 s.



### 3.3.1.2. Predictor de Smith con perturbación a la salida de la planta con compensador, sin atenuador.

En la figura 3.19a se muestra la estructura modificada del sistema de control basado en PS mediante un bloque ( $FF(s)$ ) de control anticipatorio (feedforward) para compensar el efecto de las perturbaciones externas medibles que se propone en esta tesis.

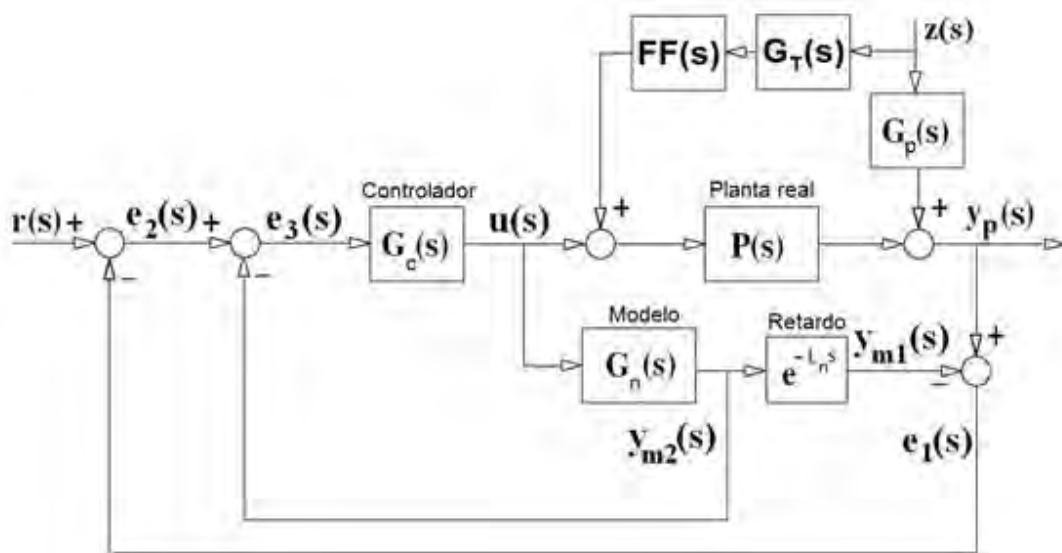


Figura 3.19a Estructura modificada del predictor de Smith con un bloque de control anticipatorio.

En la figura 3.19b se muestra el diagrama de bloques en Simulink del sistema de control representado en la figura 3.19a.

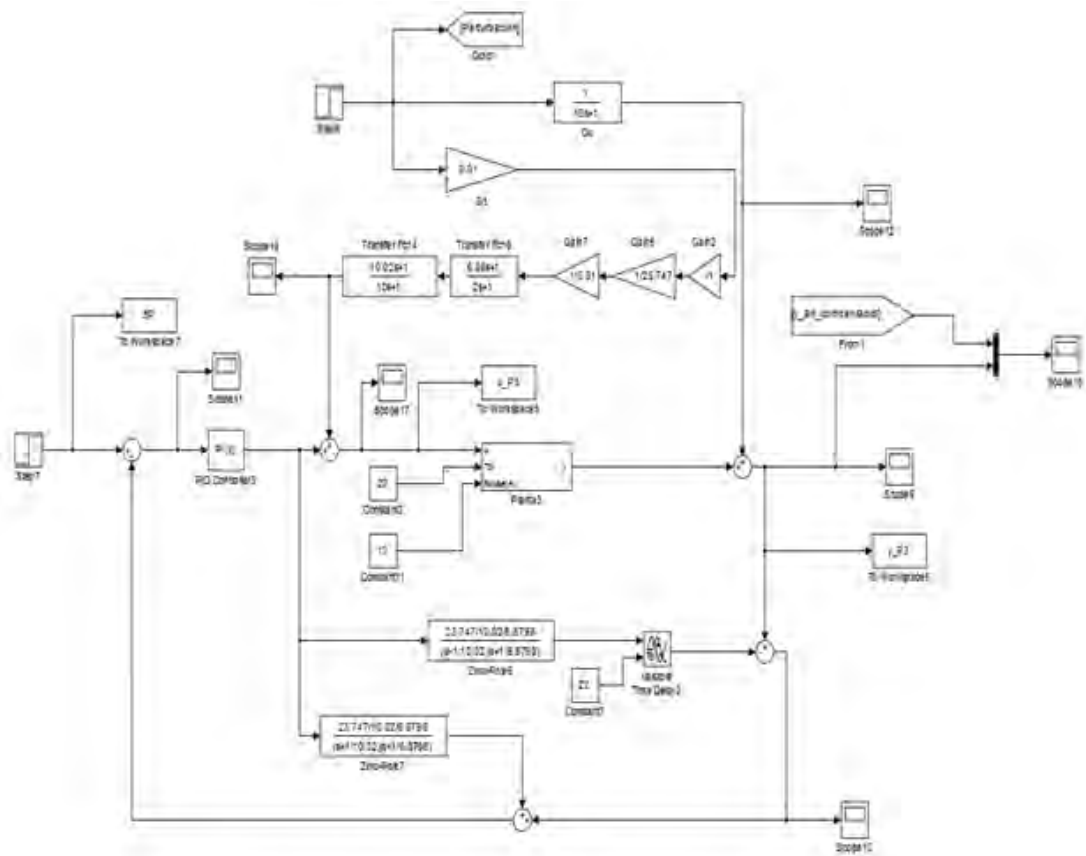


Figura 3.19b Diagrama en Simulink del sistema de control basado en PS, con compensador anticipatorio y perturbación en la salida de la planta (sin atenuador).

### Diseño del compensador anticipatorio:

La salida del control anticipatorio ( $FF(s)$ ) tiene que modificar la acción de control del controlador PI para lograr compensar el efecto de las perturbaciones. El efecto de la perturbación, en este caso, en la salida de la planta, tiene que ser compensado por el bloque de control anticipatorio, es decir:

$$z(s).G_p(s) + z(s).G_t(s).FF(s).P(s) = 0 \quad (3.7)$$

donde:

$z(s)$ : perturbación,

$G_p(s)$ : función de transferencia de la perturbación,

$G_t(s)$ : sensor del efecto de la perturbación medible,

$FF(s)$ : bloque anticipatorio.

$P(s)$ : planta con retardo de tiempo,

Por lo que:

$$FF(s) = \frac{-G_p(s)}{G_t(s).P(s)} \quad (3.8)$$

$$FF(s) = \frac{1}{(10s+1)} \cdot \frac{1}{0.01} \cdot \frac{(10.02s+1).(6.8798s+1)}{23.747.e^{-22s}} \quad (3.9)$$

Como se observa de (3.9), el retardo de tiempo está en el denominador de la función  $FF(s)$ , por lo que representa a una función irracional, no posibilitando la compensación.

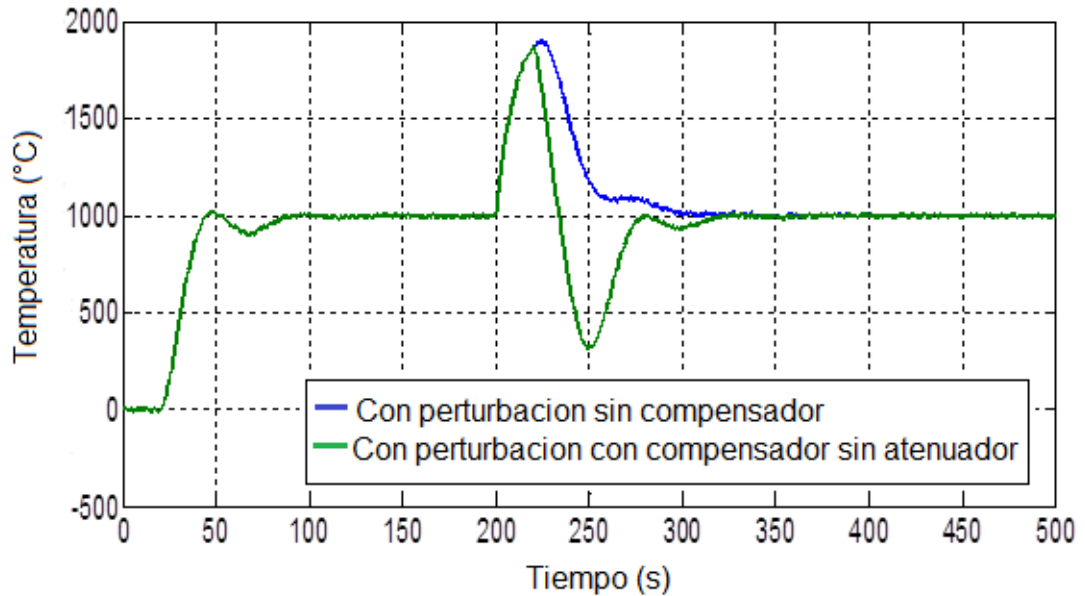
Para posibilitar la compensación del efecto de las perturbaciones medibles, en esta tesis se propone agregar un filtro con una estructura tal que posibilite: a) eliminar el término del retardo de tiempo del denominador de la expresión (3.9); y b) hacer la función (3.9) racional, es decir el orden de los polos mayor o igual que el orden de los ceros. Para ello se propone adicionarle al controlador  $FF(s)$  un filtro con función de transferencia  $H(s)$ , la cual se define como:

$$H(s) = \frac{1}{(0.05s+1)} e^{-22s} \quad (3.10)$$

El polo de este filtro es  $s = \frac{1}{0.05} = 20$ , que es un polo aproximadamente 20 veces más alejado que los polos de la planta, y por ende es un polo que no modifica la dinámica de la planta.

Este compensador con el filtro descrito se muestra en la figura 3.18b.

En la figura 3.20, se exhiben las respuestas temporales comparativas del sistema de control basado en PS con compensador  $FF(s)$  (sin atenuador) y sin compensador. Se observa que el sistema con compensador rechaza el efecto de la perturbación más rápido, pero, pero a expensas de sobrecompensar la perturbación en el período de rechazo propiamente.



*Figura 3.20 Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS, con compensador FF(s) y perturbación en la salida de la planta (sin atenuador).*

### **3.3.1.3. Sistema de control basado en predictor de Smith con compensador y perturbación después de la planta (con atenuador).**

*En la figura 3.21 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control basado en PS, con el bloque anticipatorio diseñado, perturbación en la salida de la planta y atenuador.*

*En la figura 3.22 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con compensador FF(s) (con atenuador) y sin compensador. De la figura se observa que en este caso, el desempeño del sistema de control con compensador y atenuador es superior al obtenido en el caso anterior.*

*Además, en la figura 3.23 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS, con perturbación, sin bloque anticipatorio, con bloque anticipatorio, con atenuador y sin él. De esta figura se observa que al disminuir la sobrecompensación en el período de rechazo, usando el atenuador, el inicio del rechazo empieza en un tiempo algo mayor que sin usar el atenuador, por lo que constituye un compromiso la selección del valor de atenuación, entre el inicio del rechazo a la perturbación y la sobrecompensación en el período de rechazo.*

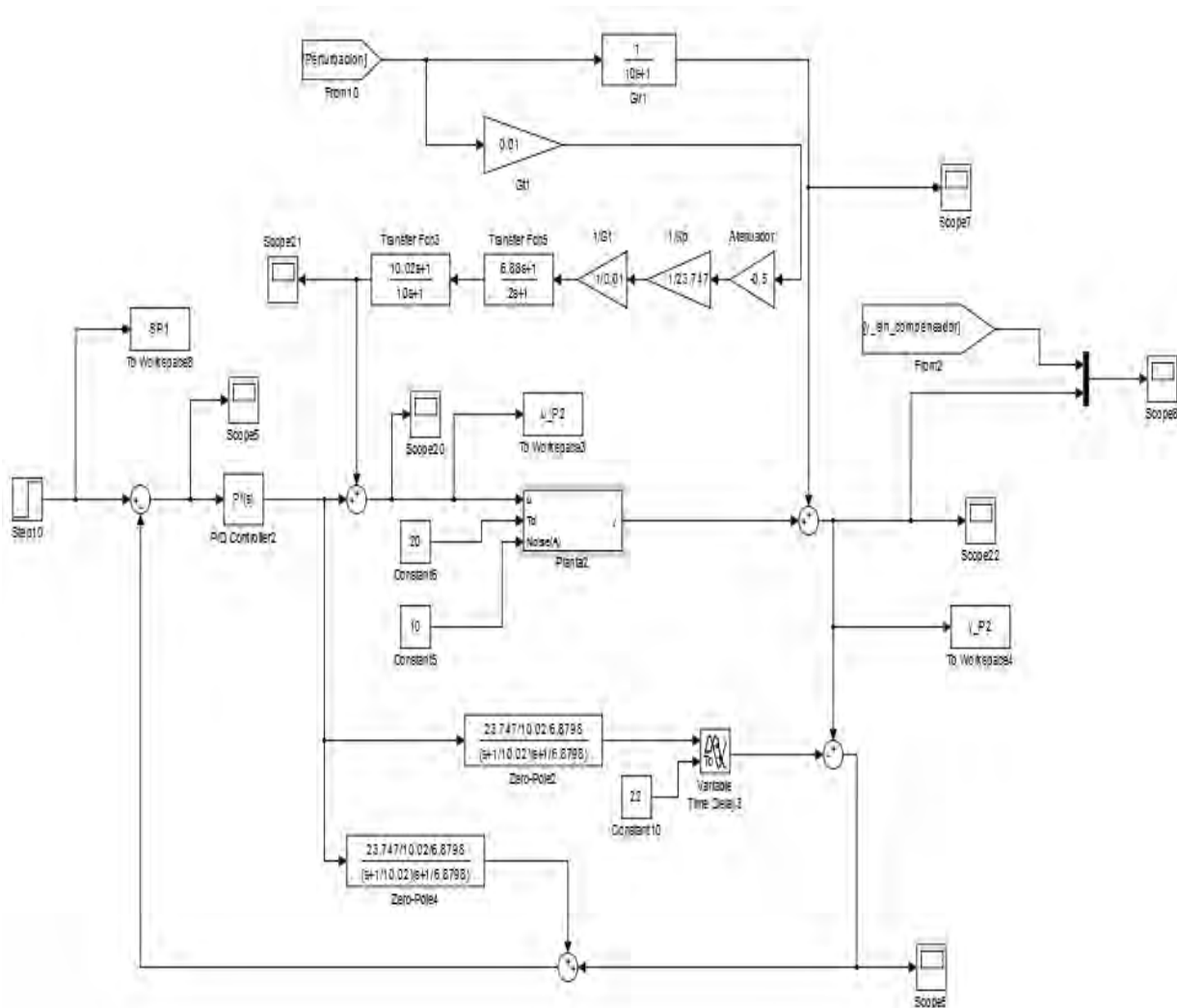


Figura 3.21 Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS con compensador anticipatorio y perturbación en la salida de la planta (con atenuador).

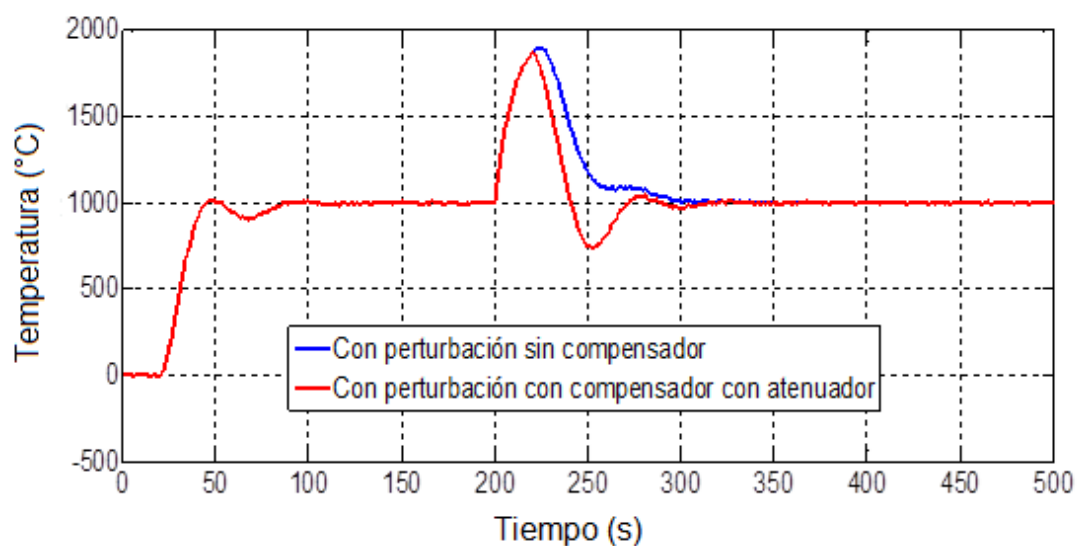


Figura 3.22 Resultados comparativos de las respuestas temporales del

sistema de control basado en PS con compensador FF(s) y perturbación en la salida de la planta (con atenuador)..

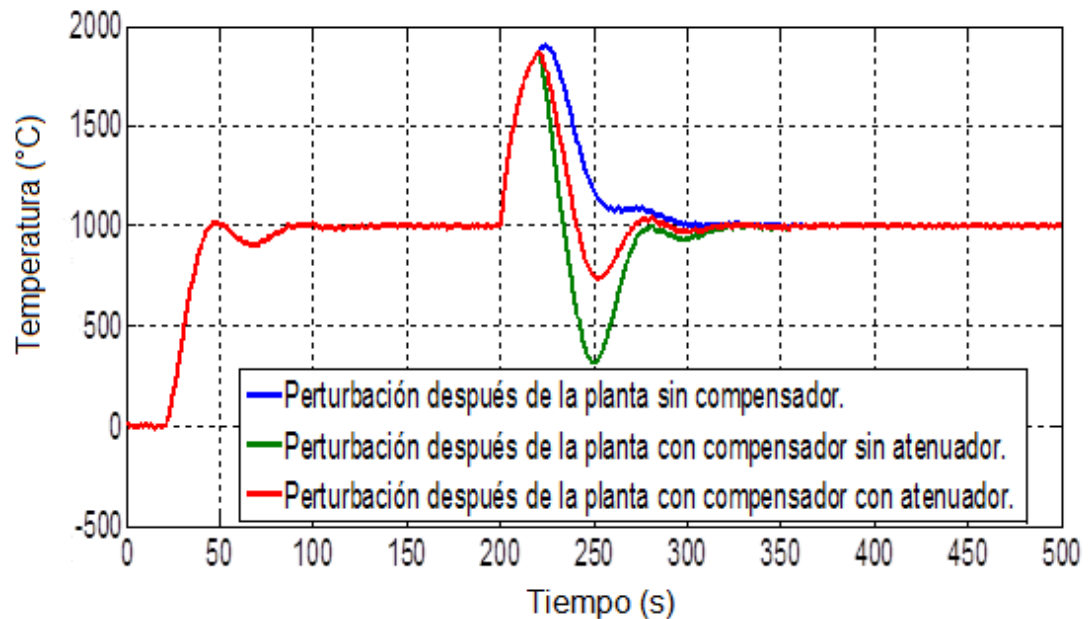


Figura 3.23 Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con diferentes variantes del compensador.

### 3.3.2 Sistema de control basado en predictor de Smith con perturbación sobre la planta.

#### 3.3.2.1 Perturbación sobre la planta, después del retardo.

Para poder simular este escenario, el modelo de la planta, lo separamos en dos bloques:

$$\frac{23.66}{(8.1s+1)} \cdot \frac{1}{8.21s+1} \cdot e^{-20s} = \frac{23.66}{(8.1s+1)} \cdot e^{-20s} \cdot \frac{1}{(8.21s+1)}, \quad \text{donde:} \quad (3.11)$$

Hacemos:

$$P_1 = \frac{23.66}{(8.1s+1)} \cdot e^{-20s} = \text{bloque antes de la perturbación}, \quad (3.12)$$

$$P_2 = \frac{1}{(8.21s+1)} = \text{bloque después de la perturbación}, \quad (3.13)$$



En la figura 3.24 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control con este escenario.

El compensador anticipatorio se determina mediante la expresión:

$$FF(s) = \frac{-G_p(s)}{G_t(s).P_1(s)} \quad (3.14)$$

$$FF(s) = \frac{1}{(10s+1)} \cdot \frac{1}{0.01} \cdot \frac{(8.1s+1)}{23.747.e^{-22s}} \quad (3.15)$$

El filtro es:

$$H(s) = \frac{1}{(2s+1)} e^{-22s} \quad (3.16)$$

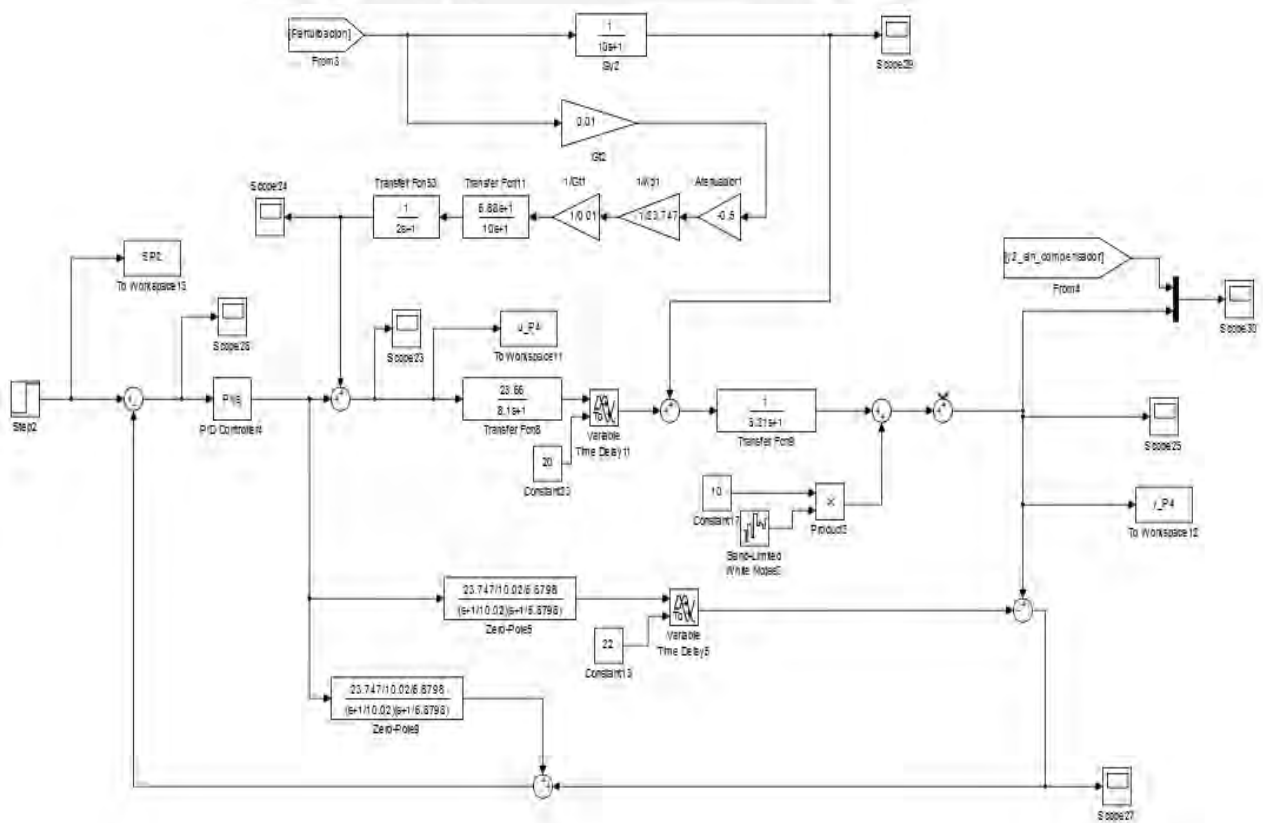


Figura 3.24 Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS con compensador anticipatorio y entrada de la perturbación sobre la planta, (después del retardo).

En la figura 3.25 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS, con y sin bloque

compensatorio, con perturbación sobre la planta después del retardo.

Se observa en este caso, que el compensador elegido empieza a rechazar la perturbación antes que en el caso sin compensador, asimismo existe una sobrecompensación en el período de rechazo que es aproximadamente del 10%. Se puede concluir que es aceptable esta compensación.

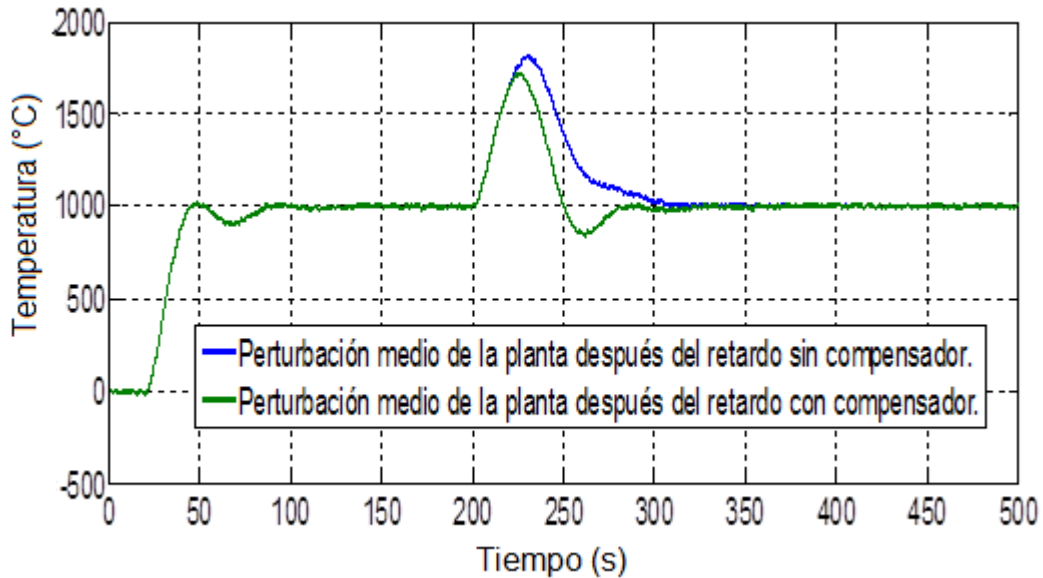


Figura 3.25 Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con bloque anticipatorio y sin él, con entrada de la perturbación sobre la planta (después del retardo).

### 3.3.2.2 Perturbación sobre la planta, antes del retardo.

De forma similar, para poder simular el sistema de control, el modelo de la planta la separamos en dos bloques:

$$\frac{23.66}{(8.1s+1)} \cdot \frac{1}{8.21s+1} \cdot e^{-20s} = \frac{23.66}{(8.1s+1)} \cdot e^{-20s} \cdot \frac{1}{(8.21s+1)}, \quad (3.17)$$

Hacemos:

$$P_1 = \frac{23.66}{(8.1s+1)} \quad - \text{bloque antes de la perturbación}, \quad (3.18)$$

$$P_2 = \frac{1}{(8.21s+1)} \cdot e^{-20s} \quad - \text{bloque después de la perturbación}. \quad (3.19)$$

En la figura 3.26 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

El bloque anticipatorio se diseña mediante la expresión:

$$FF(s) = \frac{-G_p(s)}{G_t(s) \cdot P_1(s)} \quad (3.20)$$

$$FF(s) = \frac{1}{(10s+1)} \frac{1}{0.01} \frac{(8.1s+1)}{23.747} \quad (3.21)$$

El filtro se determina como:

$$H(s) = \frac{1}{(2s+1)} \quad (3.22)$$

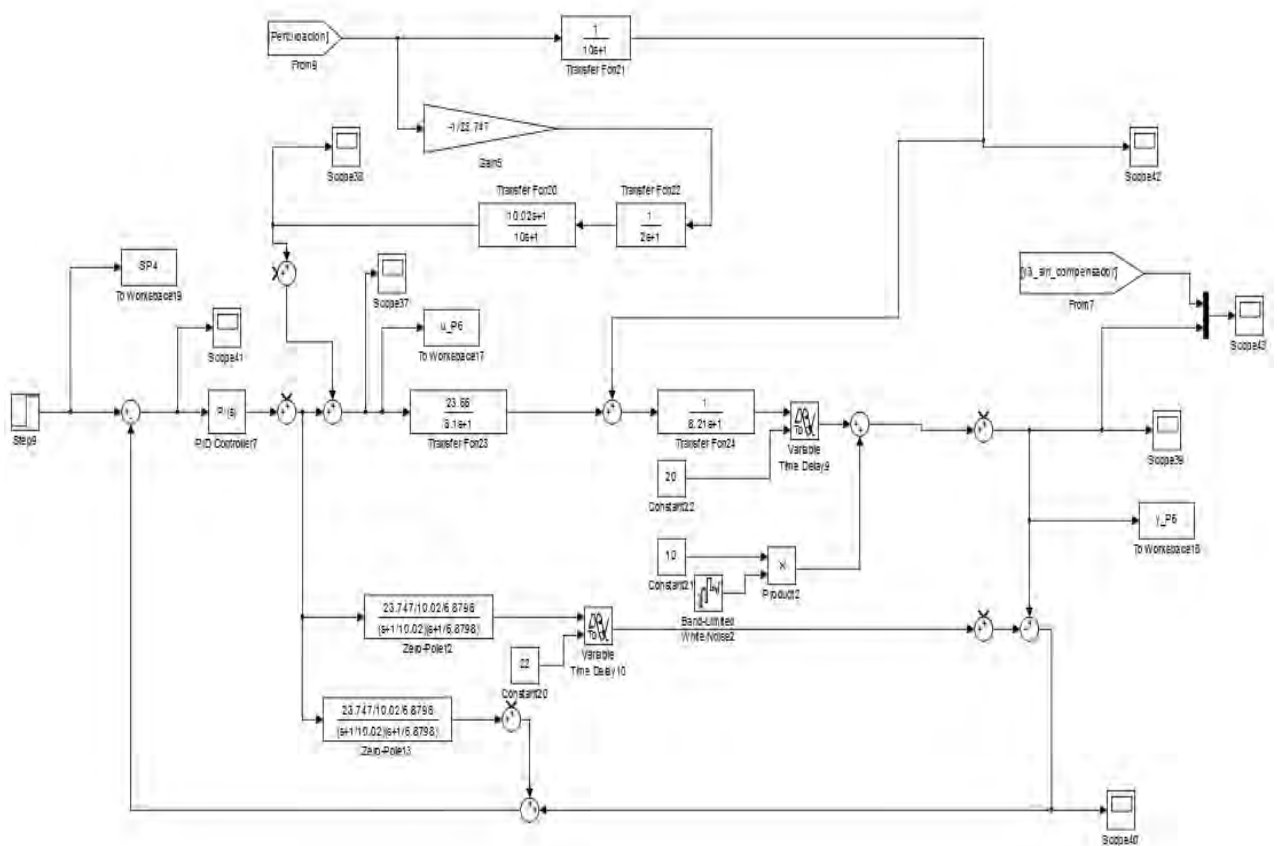


Figura 3.26 Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS, con bloque compensador, entrada de la perturbación sobre la planta (antes del retardo).

En la figura 3.27 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con compensador y sin él, y con entrada de la perturbación sobre la planta. De esta figura se observa que el compensador diseñado compensa bastante bien el efecto de la perturbación, neutralizándola prácticamente desde el comienzo de la misma.

Esto se explica por el hecho de que el compensador elimina el efecto de la perturbación antes del retardo de tiempo.

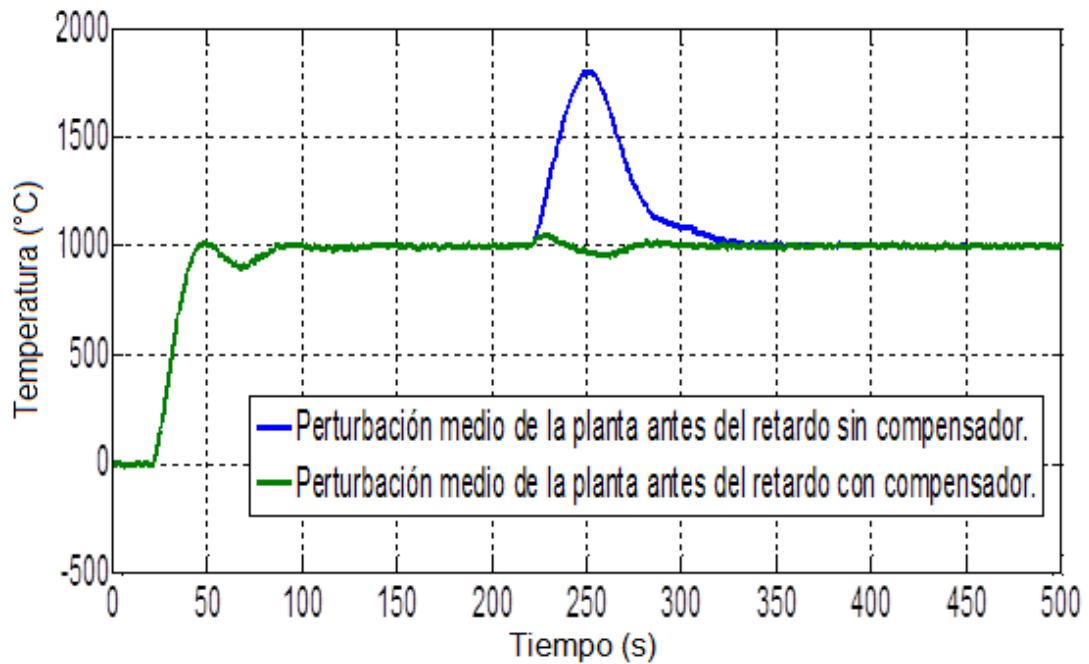


Figura 3.27 Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control con PS con compensador y sin él, con perturbación en medio de la planta antes del retardo.

### 3.3.3 Predictor de Smith con perturbación antes de la planta.

En la figura 3.28 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control basado en PS con bloque compensatorio y entrada de la perturbación antes de la planta.

El bloque compensatorio se diseña mediante la expresión:

$$FF(s) = \frac{-G_p(s)}{G_t(s)} \quad (3.23)$$

$$FF(s) = \frac{1}{(10s+1)} \frac{1}{0.01} 0.01 \quad (3.24)$$

En este caso no es necesario utilizar un filtro

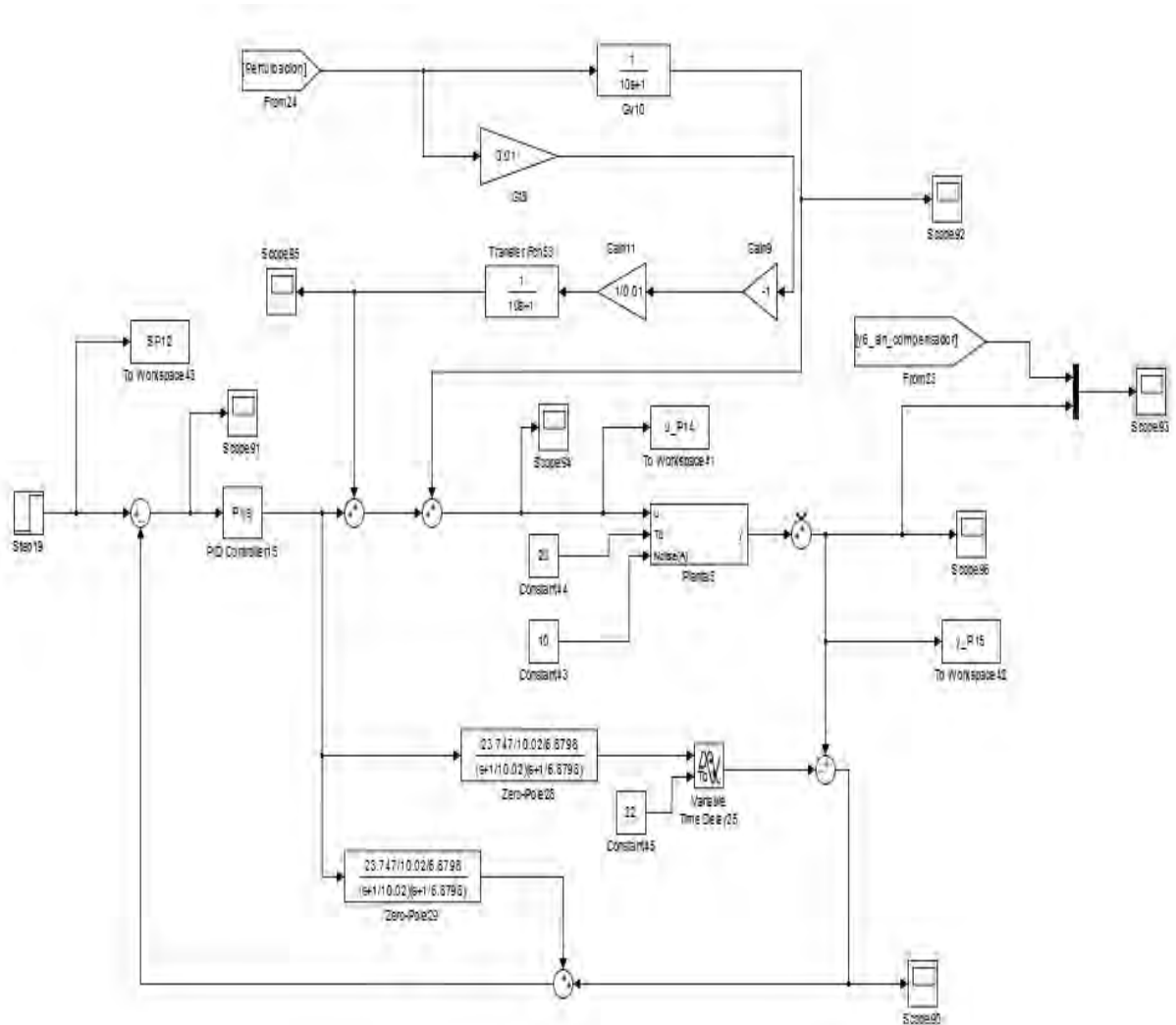


Figura 3.28 Diagrama del sistema de control basado en PS, con bloque compensatorio y entrada de la perturbación antes de la planta.

En la figura 3.29 se muestran las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con compensador y sin él, y entrada de la perturbación antes de la planta.

En este caso, la compensación, neutraliza prácticamente el 100% del efecto de la perturbación. Esto se explica, porque ambos, el compensador anticipatorio y la perturbación están antes de la planta; por lo que la perturbación es mitigada antes de actuar sobre la planta.

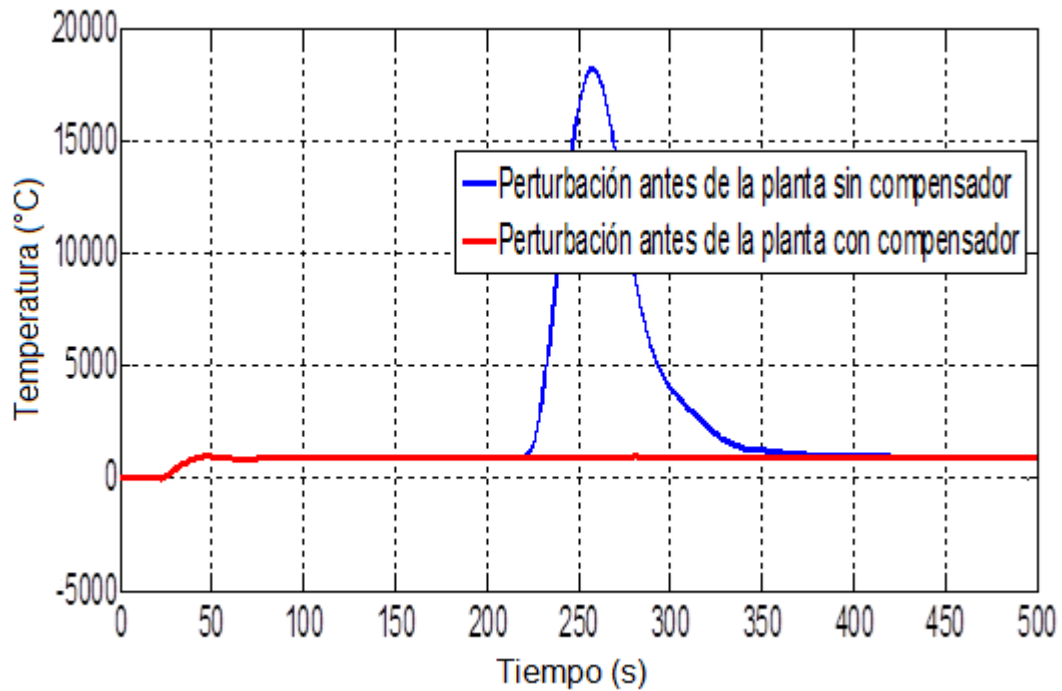


Figura 3.29. Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con compensador y sin él, y con entrada de la perturbación antes de la planta.

### 3.3.4 Predictor de Smith con perturbación doble.

En las figuras 3.30, 3.31 y 3.32 se muestran los esquemas del sistema de control basado en PS, con perturbación doble, sin compensador, con un solo compensador y con dos compensadores, respectivamente.

Las perturbaciones ocurren a los 200 s (la primera), y a los 300 s (la segunda).

La primera perturbación se origina sobre la planta después del retardo

El bloque anticipatorio se diseña mediante la expresión:

$$FF(s) = \frac{1}{(10s+1)} \cdot \frac{1}{0.01} \cdot \frac{(8.1s+1)}{23.747 \cdot e^{-22s}} \quad (3.25)$$

El filtro presenta la forma:

$$H(s) = \frac{1}{(2s+1)} e^{-22s} \quad (3.26)$$



tal como se muestra en el figura 3.31.

Para el bloque anticipatorio con entrada de la perturbación después de la planta, se utiliza el bloque diseñado en 3.3.1.2, teniendo en cuenta que la perturbación se modela como  $1/(20s+1)$ .

$$FF(s) = \frac{1}{(20s+1)} \frac{1}{0.01} \frac{(10.02s+1)(6.8798s+1)}{23.747.e^{-22s}} \quad (3.27)$$

El filtro presenta la forma

$$H(s) = e^{-22s} \frac{1}{(2s+1)} \quad (3.28),$$

el cual se muestra en la figura 3.32

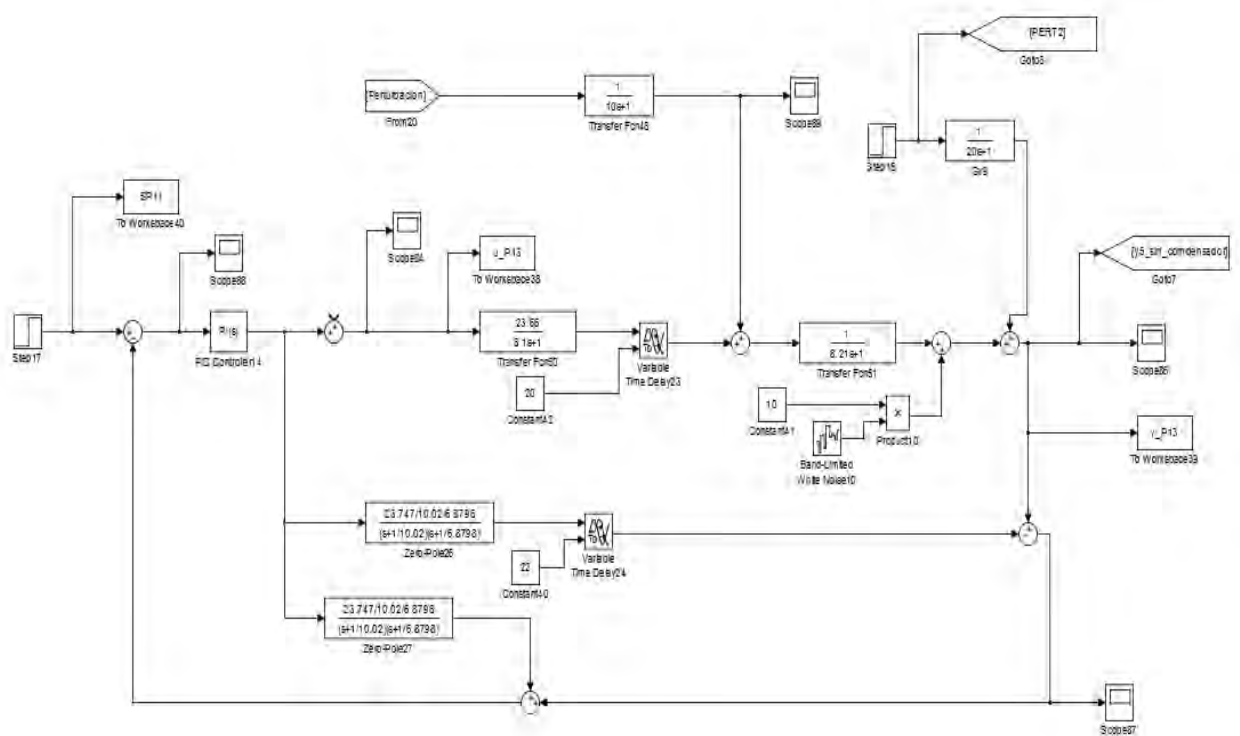


Figura 3.30 Diagrama del sistema de control basado en PS y perturbación con perturbación doble, sin compensador.

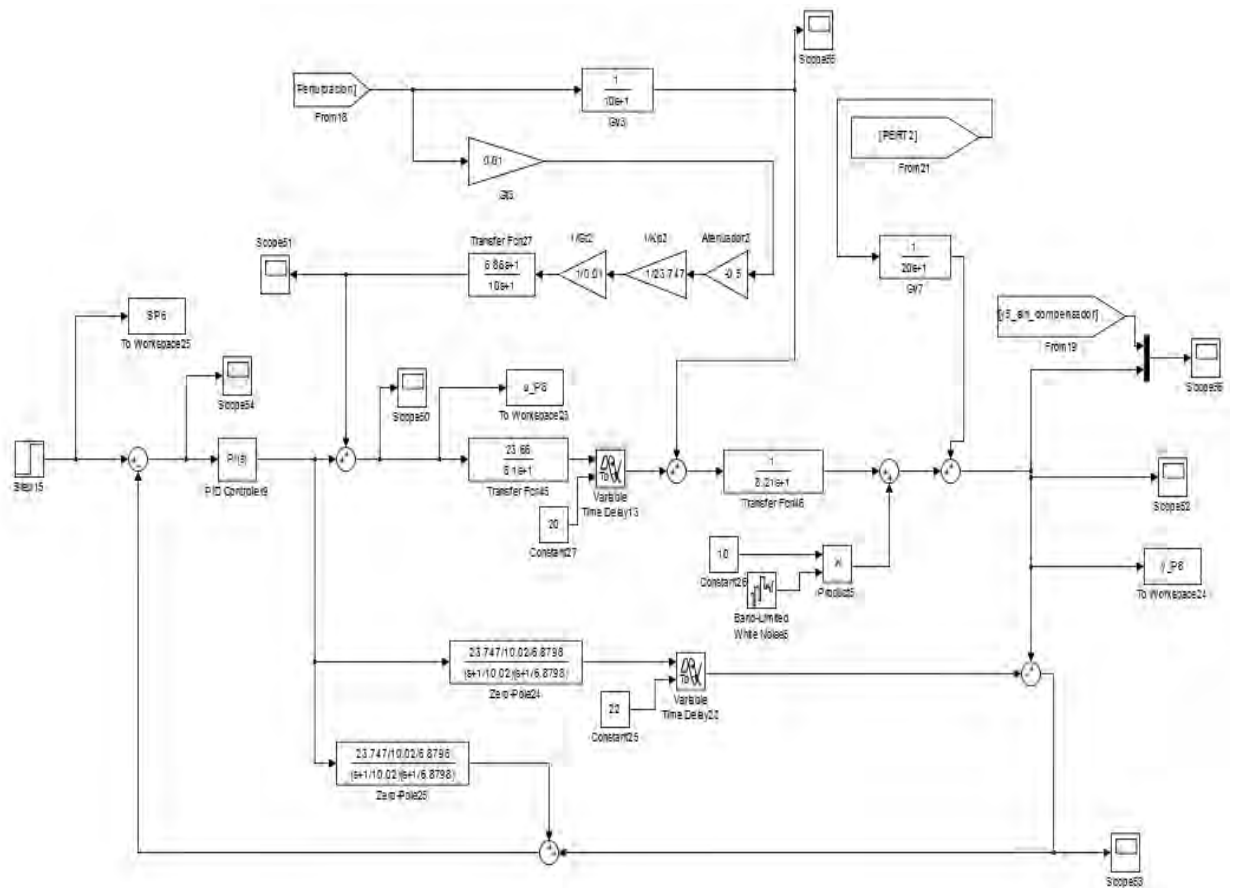


Figura 3.31. Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS, con un solo compensador y perturbación doble.

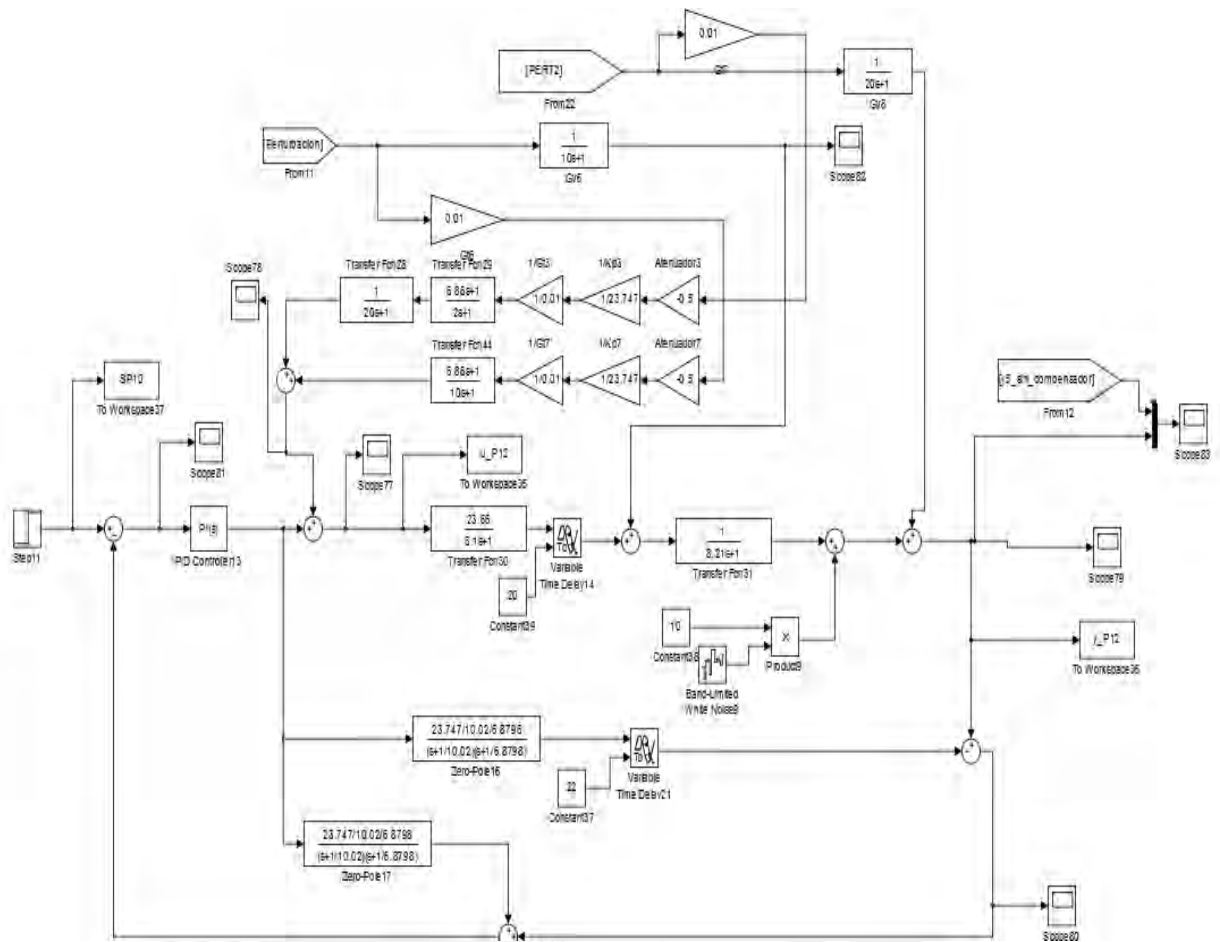


Figura 3.32. Diagrama de bloques del sistema de control basado en PS con dos compensadores y perturbación doble.

En la figura 3.33, se muestran las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con uno, con dos y sin compensadores anticipatorios y con perturbación doble (sobre y después de la planta). De la figura, se observa que los compensadores mitigan aceptablemente el efecto de las perturbaciones, ya que si bien hay una sobrecompensación en los dos casos, ésta es relativamente baja.

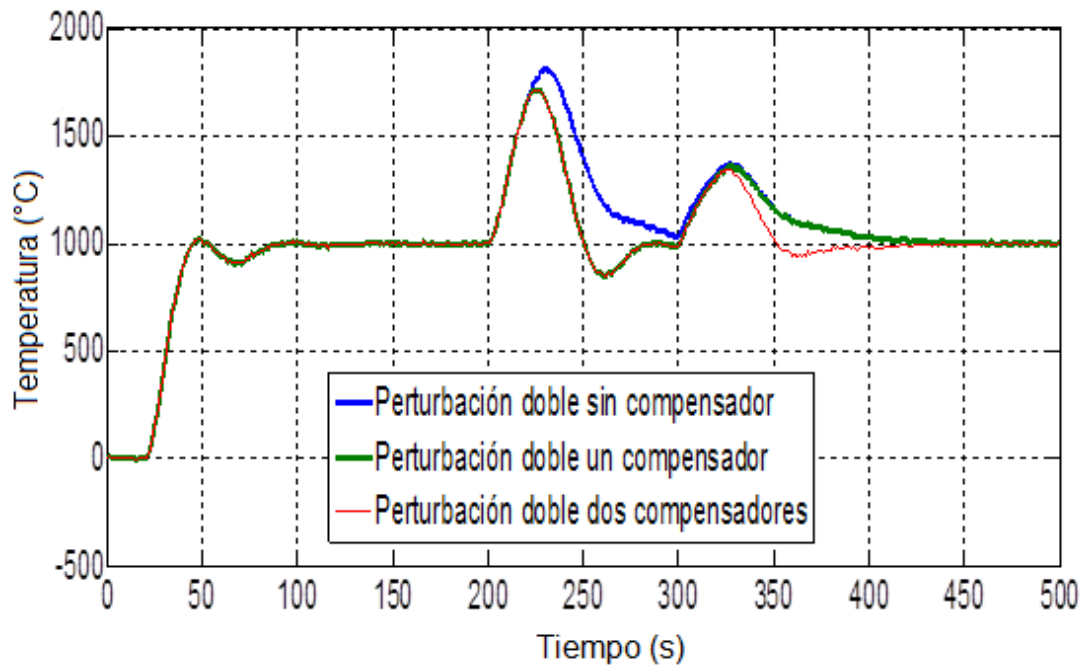


Figura 3.33. Respuestas temporales del sistema de control basado en PS, sin y con uno y dos compensadores anticipatorios y con perturbación doble (sobre la planta y después de la planta).

### 3.4 Resultados de simulación

En las figuras 3.22, 3.24, 3.26, 3.28 y 3.32, se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS modificado, para compensar el efecto de perturbaciones en diferentes puntos, en la entrada, sobre la planta y en la salida. Además se considera el escenario de dos perturbaciones, una sobre la planta (después del retardo) y la otra en la salida de la planta. Las modificaciones del sistema de control basado en PS, consistieron en añadir compensadores del tipo anticipatorio.

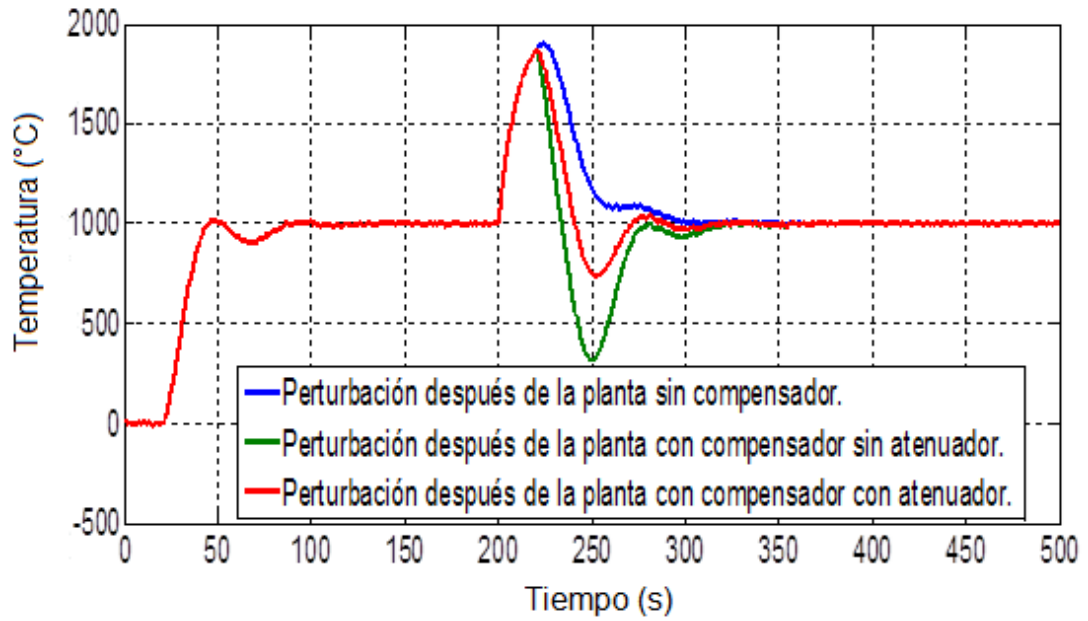


Figura 3.23. Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS, y PS modificado: con compensador, sin y con atenuador.

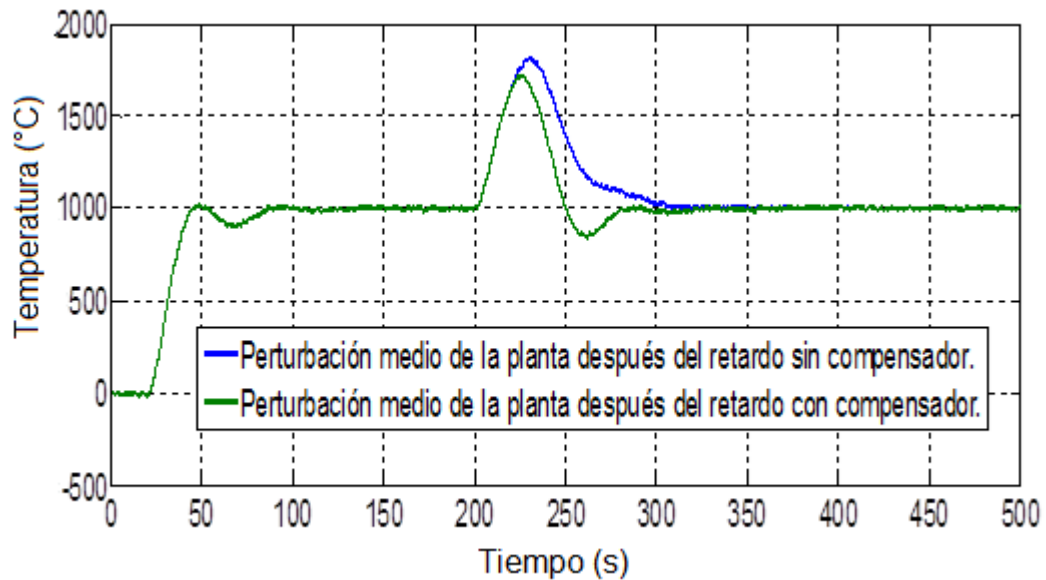


Figura 3.25. Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS sin y con bloque anticipatorio, con perturbación sobre la planta (después del retardo).

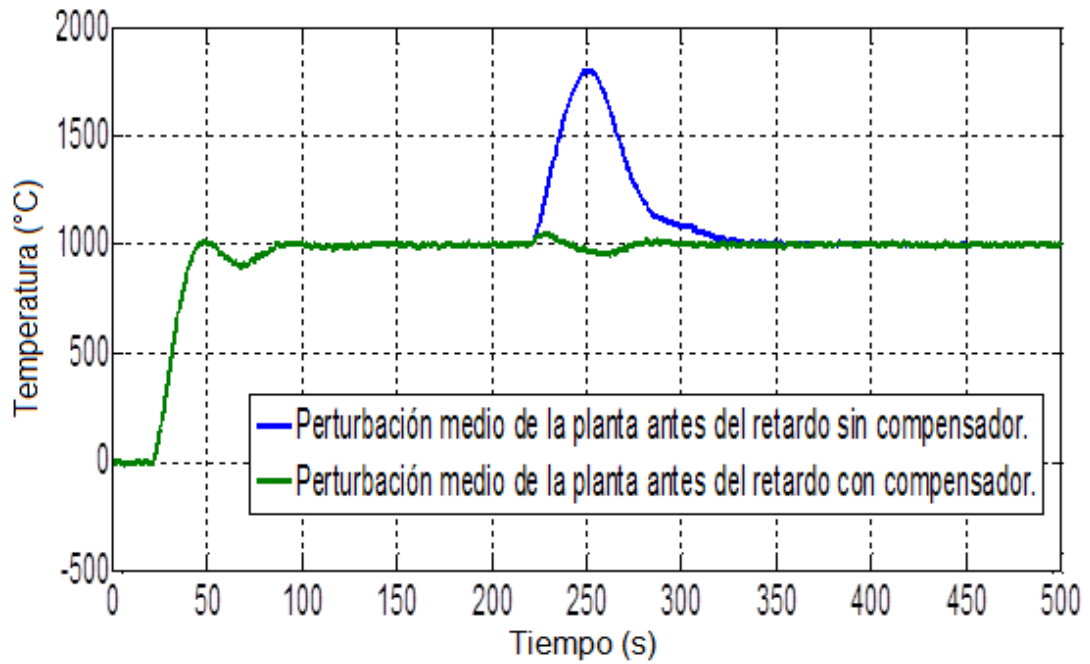


Figura 3.27. Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con y sin compensador, con perturbación sobre la planta (antes del retardo).

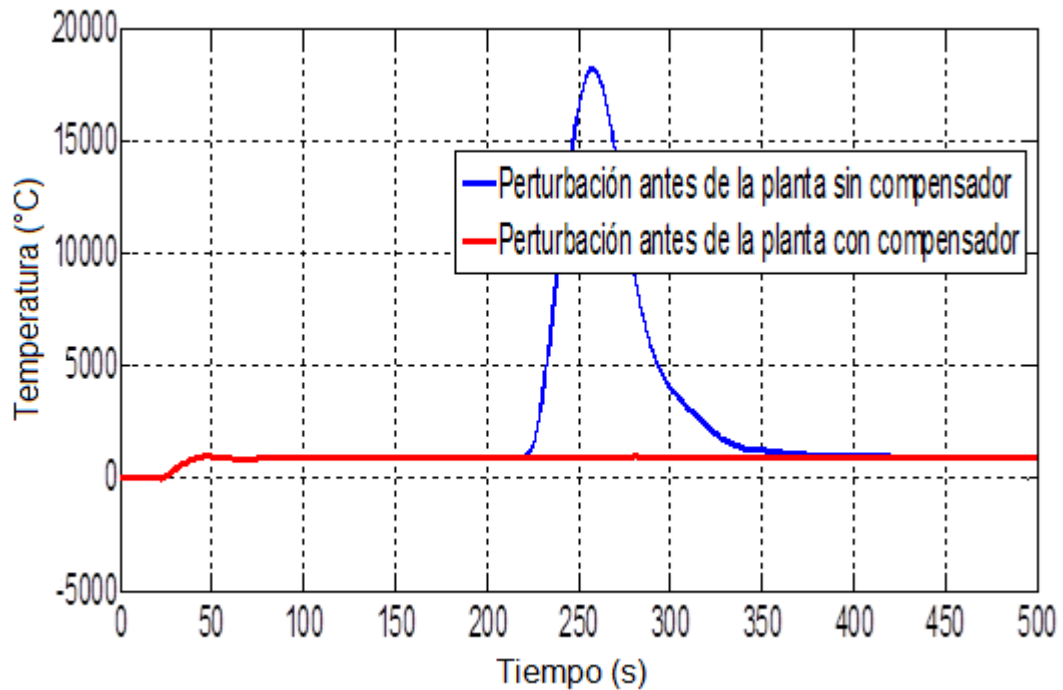


Figura 3.29. Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con perturbación antes de la planta, sin y con compensador.



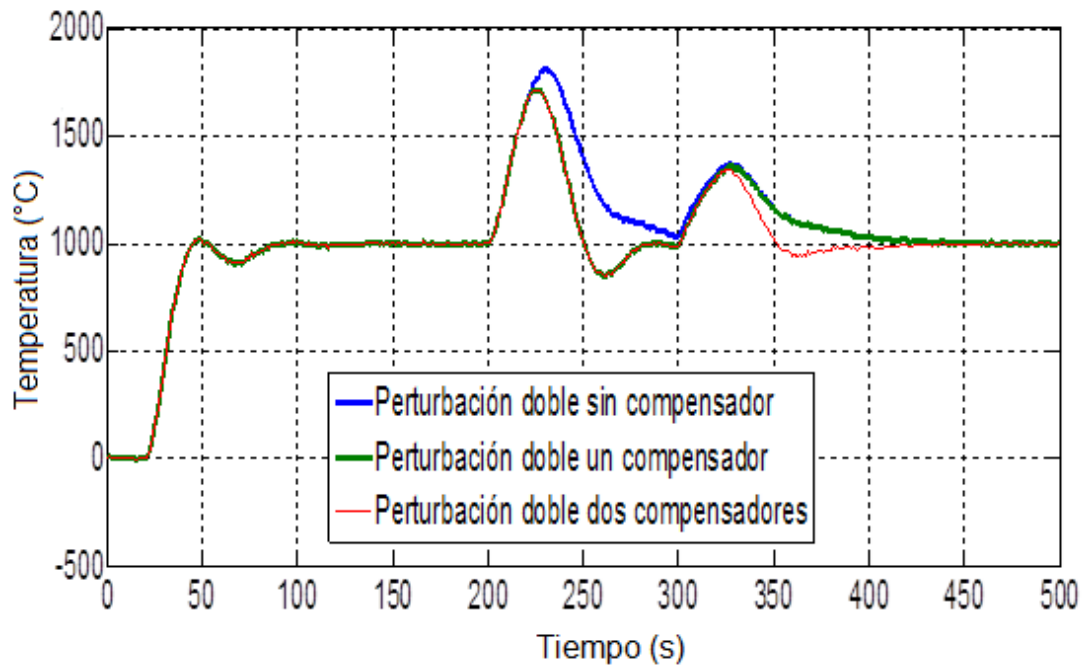


Figura 3.33. Resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control basado en PS con perturbación doble, sobre la planta y en la salida de la planta, sin y con uno y dos compensadores anticipatorios.

### 3.5 Conclusiones.

- Se presentaron los fundamentos teóricos del predictor de Smith como estrategia de control efectiva frente a plantas con retardos de tiempo dominantes.
- Se diseñaron controladores basados en PS modificados, para compensar el efecto de las perturbaciones externas, consistentes en compensadores del tipo anticipatorios.
- Se realizaron diferentes simulaciones del sistema de control basado en PS considerando perturbaciones externas localizadas en la entrada de la planta, sobre la planta y después de la planta, usando los compensadores anticipatorio diseñados. Se demostró que mediante estas modificaciones es posible compensar en gran medida el efecto de dichas perturbaciones.

## CAPITULO 4.

### **Análisis de robustez del controlador diseñado y propuesta de implementación**

#### **4.1. Introducción.**

Para cuantificar el error producido en el sistema de control elegido frente a perturbaciones, utilizamos los siguientes índices de desempeño:

- 1) Integral del valor absoluto del error:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt. \quad (4.1)$$

que es calculado desde el momento en que ocurre la perturbación hasta un tiempo posterior muy largo.

- 2) Integral del cuadrado del error :

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt. \quad (4.2)$$

Con el criterio ISE se tiene más ponderación para errores grandes.

#### **4.2 Índices de robustez**

El siguiente es el código de Matlab para el cálculo de los índices IAE, ISE. También se ha incluido el cálculo de la energía, definida por la sumatoria del cuadrado de la acción de control.

#### **Código de Matlab para cálculo de índices IAE e ISE**

```
clc;
% analisis eficiencia
%IAE = error absoluto
%ISE = error cuadratico

disp('-----')
disp('perturbacion despues de toda la planta')
disp('sin compensador')
IAE = sum(abs(SP-y_P))
ISE = sum( (SP-y_P).*(SP-y_P) )
Energia_P = sum( u_P.*u_P )
%isaS = sum(abs(SP(200:350)-y_P(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con compensador sin atenuador')
```

```

IAE = sum(abs(SP-y_P3))
ISE = sum( (SP-y_P3).*(SP-y_P3) )
Energia_P = sum( u_P3.*u_P3 )
%isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P3(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P3(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con compensador con atenuador')
IAE = sum(abs(SP-y_P2))
ISE = sum( (SP-y_P2).*(SP-y_P2) )
Energia_P = sum( u_P2.*u_P2 )
% isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P2(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P2(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100

disp('-----')
disp('perturbacion en medio de la planta, despues del retardo')
disp('sin compensador')
IAE = sum(abs(SP-y_P5))
ISE = sum( (SP-y_P5).*(SP-y_P5) )
Energia_P = sum( u_P5.*u_P5 )
% isaS = sum(abs(SP(200:350)-y_P5(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P5(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con compensador con atenuador')
IAE = sum(abs(SP-y_P4))
ISE = sum( (SP-y_P4).*(SP-y_P4) )
Energia_P = sum( u_P4.*u_P4 )
% isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P4(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P4(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100

disp('-----')
disp('perturbacion en medio de la planta, antes del retardo')
disp('sin compensador')
IAE = sum(abs(SP-y_P7))
ISE = sum( (SP-y_P7).*(SP-y_P7) )
Energia_P = sum( u_P7.*u_P7 )
% isaS = sum(abs(SP(200:350)-y_P7(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P7(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con compensador con atenuador')
IAE = sum(abs(SP-y_P6))
ISE = sum( (SP-y_P6).*(SP-y_P6) )
Energia_P = sum( u_P6.*u_P6 )
% isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P6(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P6(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('-----')
disp('perturbacion antes de la planta')
disp('sin compensador')
IAE = sum(abs(SP-y_P14))
ISE = sum( (SP-y_P14).*(SP-y_P14) )
Energia_P = sum( u_P14.*u_P14 )
% isaS = sum(abs(SP(200:350)-y_P7(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P7(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con compensador con atenuador')
IAE = sum(abs(SP-y_P15))
ISE = sum( (SP-y_P15).*(SP-y_P15) )
Energia_P = sum( u_P15.*u_P15 )

```

```

% isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P6(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P6(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100

disp('-----')
disp('perturbacion doble')
disp('sin compensador')
IAE = sum(abs(SP-y_P13))
ISE = sum( (SP-y_P13).*(SP-y_P13) )
Energía_P = sum( u_P13.*u_P13 )
% isaS = sum(abs(SP(200:350)-y_P7(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P7(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con compensador')
IAE = sum(abs(SP-y_P8))
ISE = sum( (SP-y_P8).*(SP-y_P8) )
Energía_P = sum( u_P8.*u_P8 )
% isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P6(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P6(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100
disp('con dos compensadores')
IAE = sum(abs(SP-y_P12))
ISE = sum( (SP-y_P12).*(SP-y_P12) )
Energía_P = sum( u_P12.*u_P12 )
% isaC = sum(abs(SP(200:350)-y_P6(200:350)).*abs(SP(200:350)-
y_P6(200:350)))/sum(SP(200:350).*SP(200:350))*100

```

### 4.3. Análisis de índices de robustez y resultados comparativos.

#### 1. Perturbación en la salida de la planta.

Tabla 4.1 Resultados comparativos de los índices de robustez.

	IAE	ISE	Energía
Sin compensador	6.8529 e04	4.9813 e07	3.7887 e05
Con compensador (sin atenuador)	7.0781 e04	4.8908 e07	4.2522 e05
Con compensador (con atenuador)	6.2473 e04	4.4111 e07	3.8091 e05

Los índices IAE e ISE, son menores para los casos en los que se usa el compensador anticipatorio con atenuador; sin embargo la energía es mayor que sin compensador. En este caso se priorizaría la calidad del producto frente a un mayor consumo de energía.

#### 2. Perturbación sobre la planta, después del retardo.

Tabla 4.2 Resultados comparativos de los índices de robustez.

	IAE	ISE	Energía
<i>Sin compensador</i>	6.8482 e04	4.7040 e07	3.8855 e05
<i>Con compensador (con atenuador)</i>	5.9960 e04	4.4111 e07	3.8901 e05

*Igualmente, para este caso se priorizaría la calidad del producto usando el compensador anticipatorio, a pesar que el consumo de energía es mayor.*

### *3. Perturbación sobre la planta, antes del retardo.*

*Tabla 4.3 Resultados comparativos de los índices de robustez*

	IAE	ISE	Energía
<i>Sin compensador</i>	6.8442 e04	4.6963 e07	4.2418 e05
<i>Con compensador (Con atenuador)</i>	3.6857 e04	2.8817 e07	3.7410 e05

*En este caso los índices son menores con el compensador anticipatorio, así como también el consumo de energía.*

### *4. Perturbación en la entrada de la planta.*

*Tabla 4.4 Resultados comparativos de los índices de robustez*

	IAE	ISE	Energía
<i>Sin compensador</i>	8.2724 e04	9.1755 e07	9.0916 e05
<i>Con compensador</i>	3.5510 e04	2.8771 e07	2.4682 e05

*Los índices son muchos menores cuando se utiliza el compensador anticipatorio diseñado, así como también el consumo de energía involucrada.*

### *5. Perturbación doble.*

*Tabla 4.5 Resultados comparativos de los índices de robustez*

	IAE	ISE	Energía
<i>Sin compensador</i>	8.4870 e04	5.1081 e07	4.6590 e05
<i>Con compensador (con atenuador)</i>	7.3921 e04	4.3693 e07	4.5651 e05
<i>Con 2 compensadores (con atenuador)</i>	1.6172 e05	2.4257 e08	9.9138 e05

Los índices son menores con compensador, y más aún con 2 compensadores. En el caso de un solo compensador el consumo de energía es menor; sin embargo con 2 compensadores el consumo de energía es mayor. Se prioriza la calidad del producto usando compensador anticipatorio: en este caso 2 compensadores.

Los resultados obtenidos en el análisis de robustez efectuado muestran que los errores que se obtienen cuando se utilizan los compensadores desarrollados son menores pero aumentan el consumo de energía.

#### **4.4 Propuesta de implementación de los sistemas de control diseñados basados en PS.**

La implementación del sistema de control basado en PS modificado, en un PLC, debe realizarse en forma de una función bloque, con su bloque de data asociado y colocada a su vez en un bloque de interrupción cíclica.

Los cálculos deben ser ejecutados en un período de tiempo básico. Esto significa que un bloque que contiene el código del programa debe ser llamado cíclicamente en un período de tiempo exacto. Es necesario discretizar las funciones del proceso.

Se propone utilizar un PLC Siemens, serie S7300/400 para esta implementación. Para este caso se puede usar un ciclo de interrupción, dependiendo del período de muestreo, de 1000 ms.

Los bloques de interrupción son llamados cíclicamente en exactamente intervalos de tiempo iguales.

Estos bloques interrumpen el proceso normal de trabajo del PLC en intervalos de tiempo exactos, y retornan al punto de interrupción después que el período de interrupción se haya cumplido.

Para la implementación del predictor de Smith en el PLC, se utiliza un lenguaje de programación de alto nivel, SCL, lenguaje de control estructurado, similar al lenguaje de Pascal. Un programa S7 SCL se escribe en un código fuente y entonces es compilado.

Después del código de compilación, bloques de función y de datos son creados, entonces el predictor de Smith modificado es implementado en forma de una función bloque, con su bloque de data asociado. Los resultados de todos los cálculos son preservados entre las llamadas de los programas. La función bloque es colocada en un bloque de interrupción cíclica, tal como muestra en la figura 4.1.



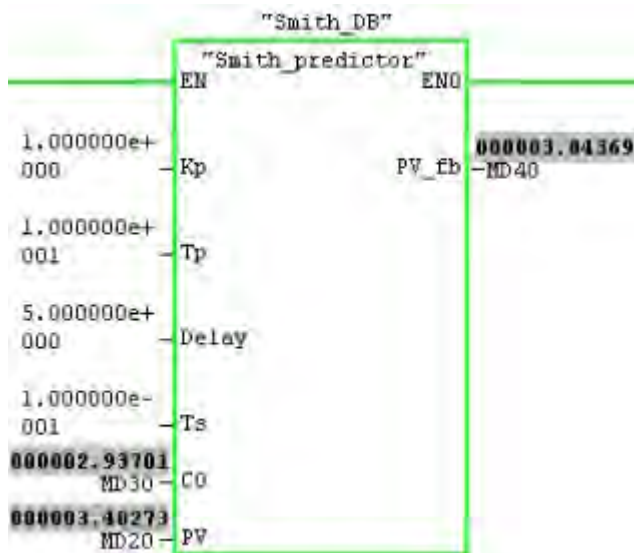


Figura 4.1. Bloque de función del predictor de Smith.

Este bloque tiene seis entradas y una salida.

En la figura 4.2 se muestra el esquema de implementación en un PLC del sistema de control basado en un predictor de Smith modificado, con compensación del tipo anticipatorio desarrollado.

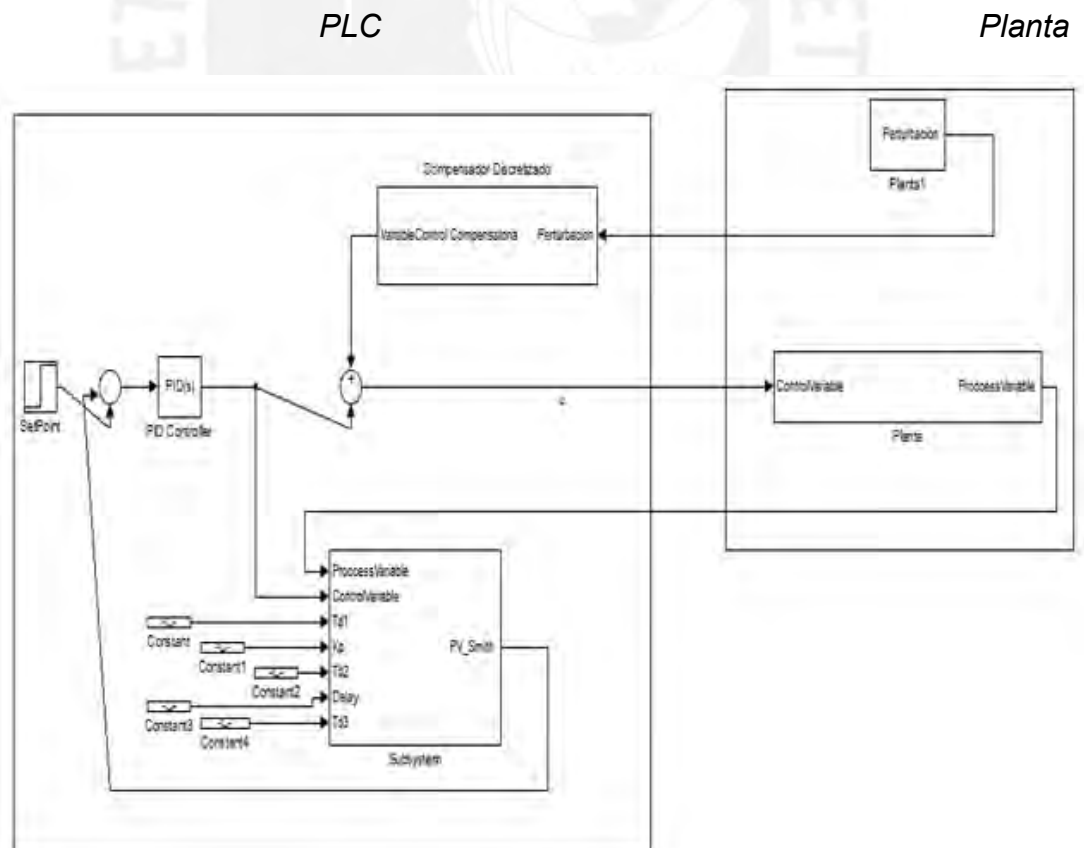


Figura 4.2 Esquema de bloques de la implementación del PS modificado, en un PLC S7300.

## **4.5 Conclusiones**

*En este capítulo se abordó el análisis de la robustez de los diferentes escenarios considerados del sistema de control ben PS modificado, con perturbaciones localizadas en la entrada, sobre la planta y en la salida de la planta.*

*Los resultados obtenidos evidenciaron que la compensación anticipatoria de las perturbaciones mejora en todos los casos el desempeño del sistema de control; sin embargo para los escenarios: perturbación en la salida de la planta y perturbación sobre la planta (después del retardo) , la energía involucrada es algo mayor. En estos casos, como se mostró se prioriza la calidad del producto, minimizando el error involucrado.*

*Se desarrolló una propuesta de implementación práctica del sistema de control diseñado de la planta objeto de estudio, basada en la aplicación de un PLC Siemens S7 300/400, donde la función de bloque para el predictor de Smith se coloca en un bloque de interrupción cíclica*

*Los resultados mostrados evidencian que la implementación práctica de los sistemas de control desarrollados con compensación anticipatoria de las perturbaciones es posible desarrollarla utilizando un PLC Siemens S7 300/400.*

## **Conclusiones generales**

- 1) *Se realizó un estudio sobre el estado del arte de los sistemas de control de plantas con retardo de tiempo y se investigaron las dificultades actuales de los sistemas de control basados en PS de plantas con retardos de tiempos dominantes.*
- 2) *Se evaluó la efectividad de los sistemas de control basados en predictor de Smith para el control de plantas con retardos de tiempo dominantes.*
- 3) *Se precisaron las limitaciones del predictor de Smith, cuando se aplica en el control de plantas integradoras e inestables sometidas al efecto de perturbaciones.*
- 4) *Se desarrolló el procedimiento de identificación de una planta con retardo de tiempo dominante y se obtuvo un modelo que describe de forma adecuada su comportamiento dinámico.*
- 5) *Se propuso una modificación de la estructura clásica del PS basada en la introducción de un bloque anticipatorio para rechazar el efecto de las perturbaciones medibles que se originan en diferentes localizaciones de la planta.*
- 6) *Se realizó un análisis de robustez del sistema de control diseñado basado en el cálculo de los índices IAE e ISE, comprobándose la efectividad de la compensación anticipatoria propuesta frente a perturbaciones en diferentes localizaciones.*
- 7) *Se realizó una propuesta de implementación práctica del controlador diseñado basada en el uso de un PLC Siemens, serie S7 300/400.*

## **Recomendaciones**

*Para el control de plantas con retardos de tiempos dominantes y sometidas al efecto de fuertes perturbaciones medibles se recomienda utilizar el controlador basado en PS modificado mediante un compensador anticipatorio diseñado en esta tesis.*



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. Astrom K.J., Hagglund T. (1995). *PID Controllers: Theory, design and tuning*, 2nd ed. Instrument, Society of America, Research Triangle Park, N.C.
2. Andronow A.A., Vitt, Astrom K.J., Murray R.M., (2009). *An introduction scientists and engineers feedback systems*, version V2. 10b.
3. Baculima Sinchi P.F. (2015). *Implementación de un algoritmo híbrido basado en control predictivo y PID para el control de sistemas con retardo dominante*. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Tesis de Maestría.
4. Doyle J.C. (1978). *Guaranteed margins for LQG regulators*. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 23(4), 256-757.
5. Gonzales Najera O.A. (2009). *Estabilización de sistema de segundo orden con retardo: Aplicación a sistemas de alto orden*. Instituto Politécnico Nacional, Tesis de Maestría.
6. Gonzalez Sorribes A. (2010). *Sistemas dinámicos con retardos temporales*. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral.
7. Haugwitz P., Hagander, and Norén T. (2007). *Modeling and control of a novel heat exchange reactor, the open plate reactor*. *Control Engineering Practice*, 15, 779–792.
8. Kleines H., Sarkadi J., Suxdorf F., Zvoll K. (2004). *Measurement of real-time aspects of Simatic PLC operation in the context of physics experiments*. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(3).
9. Ljung L. (1999). *System identification – Theory for the users*, second edition, Englewoods Cliffs, NJ: Prentice Hall.
10. Marlin, T.E. (1995). *Process control*. McGraw- Hill, New York.
11. Normey Rico J.E. *Predicción para control*. Universidad de Sevilla. Tesis Doctoral.
12. Normey Rico J. E., Camacho E.F. (2006). *Predicción para control: Una panorámica del control de proceso con retardo*. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 3(4), 5-25.
13. Normey Rico J.E. Camacho E.F. (2007). *Control of dead time processes*, 2da edicion. Springer.
14. Moscinski J. (1996). *Advanced control with Matlab and Simulink*. Prentice Hall, N. Y.
15. Panda R., Yu C., Huang H. (2003). *PID tuning rules for SOPDT systems: Review and some new results*. *ISA Transactions* 43, 283–295.
16. Pedraza Beltran Y.A. (2012). *Estabilización de sistemas inestables con retardo con un polo inestable y n-1 estable*. Instituto Politécnico Nacional, México, Tesis de Maestría.
17. Peñarrocha Alós I. (2006). *Sensores virtuales para procesos con medidas escasas y retardos temporales*. Univ. Politécnica de Valencia.

18. Pérez Zuñiga C.G., Sotomayor Moriano J., Guillén Caldera A. (2008). *Modelamiento del proceso de variación de temperatura en un horno siderúrgico*. PUCP, Lima, Perú.
19. Rodríguez Verdizco J.L. (2010). *Análisis de los efectos de los tiempos de retardo en el funcionamiento de un control realimentado*. Instituto Politécnico Nacional, México. Tesis Maestría.
20. Smith C.A., Corripeno A.B. (1991). *Control automático de procesos, teoría y práctica*. Editorial Limusa.
21. Visioli A., Zhong Q.C. (2011). *Control of integral processes with dead time*. Springer.
22. Vilanova R. and Alfaro V.M. (2011). *Control PID robusto: Una visión panorámica*. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 8, 141-158.
23. Vodencarevic A. (2010). *Design of PLC based on Smith predictor for controlling processes with long dead time*. *Newswood and International Association of Engineers*, Vol. 02, Hong Kong.
24. Wittenmark B., Astrom K.J., Arzén K.E. (1997). *Computer Control: An Overview*. *IFAC Professional Brief*.
25. Benítez González I.O., Rivas-Perez R., Feliu Batlle V., and Castillo García F. (2009). *Predictor de Smith modificado mediante un modelo interno robusto a perturbaciones externas no medibles*. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 30(3), 48-54.
26. Benitez I.O., Rivas R., Feliu V., and Castillo F.J. (2015). *Temperature control based on a modified Smith predictor for injectable drug formulations*. *IEEE Latin America Transactions*, 13(4), 1041-1047.
27. Calderon Valdez S.N., Rivas-Perez R., Ruiz Torija M.A., Feliu-Batlle V. (2009). *Fractional PI controller design with optimized robustness to time delay changes in main irrigation canals*. *14th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'2009*, 1411-1417.
28. Calderon-Valdez S.N., Feliu-Batlle V., and Rivas-Perez R. (2015). *Fractional-order mathematical model of an irrigation main canal pool*. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(3), e0212.
29. Camacho E.F., Bordons C. (2002). *Model Predictive Control*, Springer-Verlag, New York.
30. Castillo Garcia F., Rivas-Perez R., Feliu Batlle V. (2008). *Fractional I $\alpha$  controller combined with a Smith predictor for effective water distribution in a main irrigation canal pool*. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(Part 1), 14558-14563.
31. Castillo-Garcia F.J, Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez-Rodriguez L. (2011). *Time domain tuning of a fractional order PI $\alpha$  controller combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools*. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 18(Part 1), 15049-15054.



32. Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R. (2013). Frequency specification regions of fractional order PI controller for first order plus time delay processes. *Journal of Process Control*, 23(4), 598-612.
33. Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R. (2013). Time domain tuning of fractional order controllers combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools. *Asian Journal of Control*, 15(3), 819-833.
34. Cuenca-Tinitana J., Rivas-Perez R. (2012). Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego. *Revista Estudios Universitarios Universidad Nacional de Loja*, 119-130.
35. Cueto Medina W., Rivas-Perez R. (2003). Control system based on programmable logic controllers of Troncoso water distribution network. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 24(2), 6-14.
36. De Prada Moraga C., Baeyens Lazaro E., Rivas-Perez R. (2009). Introduction to the special section of the modelling, control and optimization of the sugar industry. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 6(3), 5-9.
37. Feliu Batlle V., Rivas P.R., Castillo F. (2005). Fractional robust control to delay changes in main irrigation canals. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 16(Part 1), 28-33.
38. Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Gorostiaga Canepa L., Sanchez Rodriguez L. (2003). Fractional control for open irrigation canal. *Proceedings of VI Inter-Regional Conference on Environment-Water. Land and Water Use Planning and Management - Envirowater 2003. Albacete, Spain*.
39. Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez Rodriguez L., Castillo Garcia F., Linares Saez A. (2008). Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(Part 1), 15535-15540.
40. Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J. (2013). Simple fractional order controller combined with a Smith predictor for temperature control in a steel slab reheating furnace. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 11(3), 533-544.
41. Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J. (2014). Robust fractional-order temperature control of a steel slab reheating furnace with large time delay uncertainty. *IEEE Proceedings of International Conference on "Fractional Differentiation and its Applications, ICFDA '14. Catania, Italy*.
42. Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Rodríguez Martínez C.A. (2014). A robust fractional order controller for an EAF electrode position system. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19(Part 1), 10670-10675.
43. Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sanchez-Rodriguez L., Linares Saez A. (2011). Robust fractional order controller for irrigation

- main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 205-217.
44. Hernandez-Lopez Y., Rivas-Perez R., Lorenzo Galván G. (2015). Robust proportional integral control of water level in an irrigation main canal. *Revista Cubana de Ingeniería*, 6(2), 25-34.
  45. Kao T.G., Nguen M., Rivas-Perez R. (1989). Adaptive control of a time-delay plant using a searchless model-reference self-tuning system. *Automation and Remote Control*, 49(12, part. 2), 1620-1627.
  46. Kovalenko P.I., Rivas-Perez R. (1985). Improvements of rice irrigation systems in Cuba. *Hydraulic Engineering and Land Reclamation*, 12, 57-58.
  47. Kovalenko P.I., Matzeliuk E.M., Rivas-Perez R. (1990). Adaptive control of water distribution in main irrigation canals with variable time delay. *Scientific Researches in Hydrotechnique and Land Reclamation*, 32-40.
  48. Kovalenko P.I., Pichuguin E.D., Rivas-Perez R. (1989). Compensation of nonlinear characteristics with dead-zone in water distribution control systems. *Construction and Exploitation of Land Reclamation Systems*, 37-49.
  49. Kovalenko P.I., Rivas-Perez R., Pichuguin E.D., Cao T.G. (1984). Modeling the dynamic characteristics of an irrigation main canal for control. *Control, Cibernética y Automatización*, 18(3), 46-50.
  50. Moncada-Valerio J. (2012). Desarrollo de un sistema de control predictivo de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar. Tesis de Maestría. PUCP, Lima, Perú.
  51. Moncada-Valerio J., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J. (2012). Control predictivo multivariable de un bastidor de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar. Memorias del XV Congreso Latinoamericano de Control Automático "CLCA12". Lima, Perú.
  52. Pedregal D.J., Rivas-Perez R., Feliu V., Sanchez L., Linares A. (2009). A non-linear forecasting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain. *Environmental Modelling & Software*, 24(4), 502-509.
  53. Perez Zuñiga C.G., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J. (2009). Control predictivo generalizado de la temperatura de laminación de un horno siderúrgico. *Electro-Electrónica*, 32(1), 46-54.
  54. Perez Zuñiga C.G., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J. (2010). Generalized predictive control of lamination temperature in a steel slab furnace. *Proceedings of Second International Congress on Automation in the Mining Industry*. Santiago, Chile.
  55. Rivas Perez R. (1988). Automated system of water distribution in irrigation main canals. *Land Reclamation and Hydraulic Resources Management*, 8, 40-42.
  56. Rivas-Perez R., Pichuguin E.D. (1989). Synthesis of adaptive control systems of water distribution in main irrigation canals. *Land Reclamation and Water Management*, 70, 66-70.
  57. Rivas-Perez R. (1984). Technological process control in main canals of irrigation systems, with application to irrigation systems of Cuba. Ph.D

- thesis, Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation of Ukrainian Academy of Agrarian Sciences (UkrNIIGIM), Kiev, Ukraine.
58. Rivas-Perez R. (1987). Water problems in the Republic of Cuba. *Hydraulic Engineering and Land Reclamation*, 7, 69-71.
  59. Rivas-Perez R. (1988). Digital control of water levels in main irrigation canals. *Land Reclamation and Water Management*, 68, 85-88.
  60. Rivas-Perez R. (1990). Automatic control of water distribution in irrigation systems. D.Sc thesis, All Russia Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation A.N. Kostyakov (NIIG&M), Moscow, Russia.
  61. Rivas-Perez R. (1991). Cascade control of water distribution in rice plane terraces of Krasnodar class and Kuban variant. *Land Reclamation and Water Management*, 75, 72-76.
  62. Rivas-Perez R. (2011). Generadores de vapor de bagazo y su control. Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar. Programa CYTED Red de Automatización y Control de la Industria de Transformación de la Caña de Azúcar, 195-230, España.
  63. Rivas-Perez R., Aref Ghraizi R., Peran Gonzalez J.R., Cesar Sanchez E. (2000). Industrial boilers. Integral automatic control system. *Automática e Instrumentación* 308, 79-84.
  64. Rivas-Perez R., Beauchamb G., Saliceti Piazza L., Cesar Sanchez E. (1998). Automatic control system of steam generator. *Proceedings of XVIII Interamerican Congress of Chemical Engineering, IACChE'98 (Mayaguez, December 6-10), Puerto Rico.*
  65. Rivas-Perez R., Cao T.G., Franco Parellada C., Prokofiev V.E. (1987). Sistema de control automático de objetivos con retardo de tiempo. *Control, Cibernética y Automatización*, 20(1), 24-26.
  66. Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sotomayor Moriano J., Feliu-Batlle V. (2014). Design of a fractional order PI controller for steam pressure in the steam drum of a bagasse fired boiler. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19(PART 1), 1337-1342.
  67. Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sotomayor-Moriano J., Feliu-Batlle V. (2014). Control robusto de orden fraccionario de la presión del vapor en el domo superior de una caldera bagacera. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(1), 20-31.
  68. Rivas-Perez R., Feliu Batlle V., Castillo Garcia F., Linares Saez A. (2008). System identification for control of a main irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(Part 1), 9649-9654.
  69. Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Castillo-Garcia F.J., Linares-Saez A. (2014). Mathematical model for robust control of an irrigation main canal pool. *Environmental Modelling & Software*, 51(1), 207-220.
  70. Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Castillo-Garcia F.J., Sanchez-Rodriguez L., Linares Saez A. (2014). Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 23-42.



71. Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Castillo-Garcia F.J., Sanchez-Rodriguez L., Linares-Saez A. (2011). Control oriented model of a complex irrigation main canal pool. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 18(Part 1), 2919-2924.
72. Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Sanchez Rodriguez L., Pedregal Tercero D.J., Linares Saez A., Aguilar Mariñosa J.V., Langarita Garcia P. (2008). Identification of the first pool of the Imperial de Aragon main irrigation canal. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 23(1), 71-87.
73. Rivas-Perez R., Herranz J., Llanes O., Cartaya L. (1994). Modelo matemático dinámico de generadores de vapor. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 15(3), 45-54.
74. Rivas-Perez R., Peran Gonzalez J.R., Pineda Reyes B., Perez Pereira S. (2003). Distributed control under centralized intelligent supervision in the Güira de Melena irrigation system. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 18(2), 53-68.
75. Rivas-Perez R., Prada Moraga C., Peran Gonzalez J.R., Kovalenko P.I. (2002). Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(Part 1), 97-102.
76. Rivas-Perez R., Sotomayor-Moriano, J. (2014). Control predictivo generalizado de las variables críticas de una unidad de ósmosis inversa. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014*, 642-647, Cancún, México.
77. Rodríguez Vásquez J.R., Rivas-Perez R. (2011). Desarrollo de un sistema de control avanzado de la presión del vapor en una caldera de tubos de fuego. Editorial PUCP.
78. Rodríguez Vásquez J.R., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J. (2008). Advanced control of a fire-tube boiler. *Electro-Electrónica*, 29(1), 5-10.
79. Rodriguez Vazquez R., Rivas P.R., Sotomayor Moriano J. (2007). System identification of the steam pressure variation process inside a fire-tube boiler. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 8(Part 1), 232-237.
80. Rodríguez Vazquez R., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J., Peran Gonzalez J. (2008). Advanced control system of the steam pressure in a fire-tube boiler. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(Part 1), 11028-11033.
81. Salcedo Hernández J., Rivas-Perez R. (2010). Model based predictive control of temperature in a cement rotatory kiln. *Electro-Electrónica*, 34(2), 52-60.
82. Sanchez Rodriguez L., Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Ruiz Torija M.A. (2007). Robust control of a laboratory hydraulic canal by using a fractional PI controller. *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference "IDETC07"*. Las Vegas, Vol. 5, 1307-1315.

83. Smith, C.A., Corripio, A.B. (2006). *Principles and practice of automatic process control*. Hoboken, N.J., Wiley.
84. Mataušek M.R., Micić A.D. (1999). On the modified Smith predictor for controlling a process with a integrator and long dead-time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(8), 1603-1606.
85. Zhang W.D., Sun Y.X. (1996). Modified Smith predictor for controlling integrator/time delay processes. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 35, 2769-2772.
86. Palmor Z.J. (1996). *Time delay compensation: Smith predictor and its modifications*. Boca Raton, F.L., CRC Press.
87. Astrom K., Hagglund T. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid, España, Pearson Educación.
88. Kao T.G., Nguen M., Rivas-Perez R. (1988). Adaptive control of a delay plant by using a nonsearching self-adjusting systems with a model. *Avtomatika i Telemekhanika*, 12, 106-116.
89. Agama Moreno J., Rivas-Perez R. (2011). Smith predictor based on fuzzy logic controller for control of complex industrial plants. *Electro-Electrónica*, 35(1), 3-16.
90. Pichuguin E.D., Kao T.G., Rivas-Perez R. (1981). Stability analysis of pulse width modulation controller for processes with time delay. *Control, Cibernética y Automatización*, 15(4), 34-36.
91. Rodríguez C., Normey-Rico J.E., Guzmán J.L., Berenguel M. (2016). On the filtered Smith predictor with feedforward compensation. *Journal of Process Control*, 41, 35-46.
92. Rivas-Perez R., Kao T.G., Franco Parellada C. (1986). Asymptotic stability analysis of nonlinear systems with time delay in the control. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 7(4), 294-297.
93. Rivas-Perez R., Kao T.G., Pichuguin E.D., Nguen V.D. (1989). State space reconstruction in multivariable plants with time-delay. *Control, Cibernética y Automatización*, 22(2), 30-35.
94. Smith O.J.M. (1959). A controller to overcome dead time. *ISA J.*, 6(2), 28-33.
95. Normey-Rico J.E., Camacho E.F. (2008). Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice*, 16, 407-428.
96. Watanabe K., Ito M. (1981). A process-model control for linear systems with delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 26(6), 1261-1269.
97. Astrom K.J., Hang C.C., Lim B.C. (1994). A new Smith predictor for controlling a process with a integrator and long dead time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(2), 343-345.
98. Mataušek M.R., Micić A.D. (1996). A modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(8), 1199-1203.
99. Mataušek M.R., Ribić A.I. (2012). Control of stable, integrating and unstable processes by the modified Smith predictor. *Journal of Process Control*, 22(1), 338-343.

100. Benítez-Gonzalez I.O., Rivas-Pérez R. (2017). *Predictor de Smith: revisión y desafíos*. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 38(1), 33-47.
101. Bolea Y, Puig V, Blesa J. (2008). *Gain-scheduled Smith PID controllers for LPV systems with time varying delay: application to an open-flow canal*. En: *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*. Seoul, Korea, 14564-14569.
102. Benitez-Gonzalez I.O., Rivas-Perez R. (2014). *Control de la temperatura de un intercambiador de calor en la empresa de Laboratorios Farmacéuticos AICA*. En: *I Congreso de Automatización y Mantenimiento Industrial*. La Habana, Cuba.
103. Kuang Y. (1993). *Delay differential equations with applications in population dynamics*. New York, Academic Press; 1993.
104. Li Z., Chena Z., Jun Fub J., Sun C. (2016). *Direct adaptive controller for uncertain MIMO dynamic systems with time-varying delay and dead-zone inputs*. *Automatica*, 63, 287-291.
105. Rivas-Perez R., Kao T.G., Franco Parellada C. (1986). *Asymptotic stability analysis of nonlinear systems with time delay in the control*. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 7(4), 294-297.
106. Rivas-Perez R., Kao T.G., Pichuguin E.D., Nguen V.D. (1989). *State space reconstruction in multivariable plants with time-delay*. *Control, Cibernética y Automatización*, 22(2), 30-35.
107. Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Castillo-Garcia F.J., Benitez-Gonzalez I.O. (2014). *Temperature control of a crude oil preheating furnace using a modified Smith predictor improved with a disturbance rejection term*. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 5760-5765.
108. Bashier E.B.M., Patidar K.C. (2017). *Optimal control of an epidemiological model with multiple time delays*. *Applied Mathematics and Computation*, 292, 47-56.
109. Rivas-Perez R, Sotomayor-Moriano J, Perez-Zuñiga C.G., Calderon Mendoza E.M. (2016). *Diseño de un GPC multivariable basado en una PC industrial para el control de una unidad de ósmosis inversa de una industria farmacéutica*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(1), 259-273.
110. Calderon Mendoza E.M., Rivas-Perez R., Sotomayor-Moriano J.J. (2016). *Design of neuro-fuzzy controller for control of water distribution in an irrigation main canal*. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 471-476.
111. Jin Q.B., Hao F., Wang Q. (2013). *A multivariable IMC-PID method for non-square large time delay systems using NPSO algorithm*. *Journal of Process Control*, 23(5), 649-663.
112. Rivas-Pérez R., Cao T.G., Franco Parellada C., and Prokofiev V.E. (1987). *Sistema de control automático de objetivos con retardo de tiempo*. *Control, Cibernética y Automatización*, 20(1), 24-26.



