



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO DE CONTROLADORES EN CONFIGURACIÓN  
CASCADA Y ANTICIPATIVO APLICADOS AL PROCESO DE  
OBTENCIÓN DE JARABE DE AZÚCAR EN INDUSTRIA  
CONFITERA”

## **TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

## **MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL**

Presentado por:

Ing. Erwin José Wolf Blaschke

Guayaquil – Ecuador

2019

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiarme por un camino para hacer de mi un hombre humilde y diligente, también por darme fuerza y sabiduría para cumplir esta meta.

A mis padres Jorge y Margarita, por siempre alentarme en mi formación profesional y a enfrentar nuevos retos.

A mi esposa Laura, por su paciencia, por ser para mi fuente de motivación y apoyo incondicional en todo momento.

A mi director de tesis Douglas, por la orientación y motivación en la elaboración de este trabajo.

## DEDICATORIA

Para Jorge, Margarita y Laura.

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACION**

---

**Ph.D. GERMAN VARGAS**  
**SUBDECANO SUBROGANTE FIEC**

---

**Ph.D. DOUGLAS PLAZA G.**  
**DIRECTOR**

---

**MSc. DAVID VACA**  
**VOCAL PRINCIPAL**

## **DECLARACION EXPRESA**

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

Ing. Erwin Wolf Blaschke

## RESUMEN

Este trabajo de titulación se enfoca en el diseño del control para un proceso industrial analizando y comparando el desempeño de técnicas avanzadas de control en contraste con un control de lazo cerrado retroalimentado sencillo utilizado en el control de un cocinador de jarabe de azúcar de la industria confitera.

Para el diseño del control, partiremos de los datos adquiridos y se empleará herramientas software para identificar varios modelos de la planta, con los que simularemos la respuesta de la planta y se diseñará el controlador del proceso.

Entre las estructuras de control a evaluar están control en cascada y control anticipativo, haremos un análisis comparativo del desempeño de cada uno de estos controles diseñados.

El desempeño de estos controladores será determinado con los cálculos de error integral para el error absoluto, el error absoluto por el tiempo y el cuadrado del error.

**Palabras claves:** Identificación de sistemas, identificación en lazo cerrado, control PID, control en cascada, control anticipativo, feedforward, IAE, ISE, ITAE

## INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACION.....	IV
DECLARACION EXPRESA.....	V
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS .....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS .....	XVI
INTRODUCCION .....	XVII
CAPITULO 1 .....	1
1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA .....	1
1.1. Identificación del problema .....	1
1.2. Justificación .....	2
1.3. Solución Propuesta .....	3
1.4. Objetivos del trabajo de titulación .....	3
1.4.1. Objetivo general .....	3
1.4.2. Objetivos específicos .....	3
1.5. Metodología .....	3
1.6. Alcance .....	4
CAPITULO 2 .....	5
2. ESTADO DEL ARTE .....	5

2.1.	Modelamiento e identificación de sistemas .....	5
2.2.	Simulación de sistemas.....	11
2.3.	Sistemas de control.....	13
2.3.1.	Sistema de control mediante PID .....	14
2.3.2.	Sistema de control en cascada.....	19
2.3.3.	Sistema de control anticipativo .....	21
•	Ponderación de la consigna.....	22
•	Control anticipativo neutro .....	22
•	Atenuación de perturbación .....	23
CAPITULO 3 .....		25
3.	DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTROL.....	25
3.1.	Modelamiento del proceso (FOPDT) .....	25
3.2.	Diseño de controlador en cascada .....	37
3.3.	Diseño de controlador anticipativo.....	50
CAPITULO 4 .....		54
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS CONTROLADORES	54
4.1.	Presentación de resultados.....	54
4.2.	Análisis de resultados de desempeño de controlador de un solo lazo .....	56
4.3.	Análisis de resultados de desempeño de controlador de lazo en cascada	57
4.4.	Análisis de resultados de desempeño de controlador anticipativo .....	59
4.5.	Análisis comparativo de resultados .....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		64
ANEXOS .....		66



## ABREVIATURAS

HV:	Válvula manual (ISA 5.1)
PV:	Válvula
TCV:	Válvula
TIC:	Controlador e indicador de temperatura (ISA 5.1)
PI:	Indicador de presión (ISA 5.1)
PT:	Transmisor de presión (ISA 5.1)
SZ:	Variador de velocidad (ISA 5.1)
TT:	Transmisor de temperatura (ISA 5.1)
TT101:	Transmisor de temperatura en lazo 101 (ISA 5.1)
RTD:	Detector de temperatura resistivo
Pt100:	Sonda de temperatura tipo RTD con resistencia de Platino, 0°C en 100 Ohmios
mA:	miliamperios, submúltiplo $10^{-3}$ de unidad de corriente amperios
bar:	Unidad de presión bar
PID:	Proporcional-Integral-Diferencial
PI:	Proporcional-Integral
$K_p$ :	Constante proporcional
$K_i$ :	Constante integral
$K_d$ :	Constante diferencial
$T_i$ :	Constante de tiempo integral
$T_d$ :	Constante de tiempo diferencial

$T_f$ :	Constante de tiempo de filtro derivativo
$T_z$ :	Constante de tiempo de cero
$T_{p1}$ :	Constante de tiempo de primer polo
$T_{p2}$ :	Constante de tiempo de segundo polo
$T_{p3}$ :	Constante de tiempo de tercer polo
$N$ :	Constante de filtro derivativo
$f(t)$ :	Función en el dominio del tiempo
$f(s)$ :	Función en el dominio de la frecuencia
CSV:	Valores separados por coma
$C(s)$ :	Función de transferencia de Controlador en el dominio de la frecuencia
$C_i(s)$ :	Función de transferencia de Controlador en el dominio de la frecuencia, forma ideal
$C_s(s)$ :	Función de transferencia de Controlador en el dominio de la frecuencia, forma serie
$C_p(s)$ :	Función de transferencia de Controlador en el dominio de la frecuencia, forma paralelo
$\frac{de(t)}{dt}$ :	Derivada del error en función del tiempo
$r$ :	Referencia
$r_1$ :	Referencia lazo primario
$r_2$ :	Referencia lazo primario
$r_m$ :	Referencia de controlador anticipativo
$e$ :	Error
$e_1$ :	Error lazo primario

$e_2$ :	Error lazo secundario
$u$ :	Acción de control
$u_1$ :	Acción de control de lazo primario
$u_2$ :	Acción de control de lazo secundario
$u_{fb}$ :	Acción de control de controlador realimentado
$u_{ff}$ :	Acción de control de controlador anticipativo
$y$ :	Variable de salida
$y_1$ :	Variable de salida de lazo primario
$y_2$ :	Variable de salida de lazo secundario
$d$ :	Perturbación de carga
$dist.$ :	Perturbación
$d_1$ :	Perturbación de carga en lazo primario
$d_2$ :	Perturbación de carga en lazo secundario
FOPDT:	Primer orden más tiempo muerto
$G_P$ :	Función de transferencia de la planta o proceso
$G_{P1}$ :	Función de transferencia de la planta o proceso primario
$G_{P2}$ :	Función de transferencia de la planta o proceso secundario
$G_C$ :	Función de transferencia de controlador
$G_{C1}$ :	Función de transferencia de controlador primario
$G_{C2}$ :	Función de transferencia de controlador secundario
$G_D$ :	Función de transferencia de perturbación de carga
$G_{D1}$ :	Función de transferencia de perturbación de carga en lazo primario
$G_{D2}$ :	Función de transferencia de perturbación de carga en lazo secundario

$G_{ff}$ :	Función de transferencia controlador anticipativo
$G_{yd}$ :	Función de transferencia de salida del sistema contra la perturbación de carga
$G_{yu}$ :	Función de transferencia de salida del sistema contra la acción de control
$H$ :	Función de transferencia sensor en lazo realimentado
$H_1$ :	Función de transferencia del sensor en lazo primario
$H_2$ :	Función de transferencia del sensor en lazo secundario
IAE:	Integral del valor absoluto del error
ITAE:	Integral del tiempo por el valor absoluto del error
ISE:	Integral del cuadrado del error
$M_u$ :	Función de transferencia de ganancia de controlador anticipativo
$M_y$ :	Función de transferencia de ganancia de controlador anticipativo en la referencia
SP:	Set-point, consigna o referencia
$T_{out}$ :	Temperatura en línea de caramelo en salida de cocinador
$P_{in}$ :	Presión en línea de vapor en entrada del cocinador
dB:	Decibelio, unidad de relación de dos valores

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de proceso e instrumentación de planta de estudio. ....	1
Figura 2.1 Enfoque básico para el modelamiento teórico.....	7
Figura 2.2 Diferentes tipos de modelos matemáticos. ....	8
Figura 2.3 Secuencia básica de identificación. [5, 6].....	11
Figura 2.4 Software de simulación MATLAB/SIMULINK .....	12
Figura 2.5 Descripción simplificada de un proceso a ser controlado. ....	13
Figura 2.6 a) Sistema de control en lazo abierto. b) Sistema de control en lazo cerrado o realimentado. ....	13
Figura 2.7 Sistema de control en realimentación lazo cerrado con perturbaciones externas y ruido de medición.....	14
Figura 2.8 Estructura de control en cascada.....	20
Figura 2.9 Diagrama de bloques de un sistema con dos grados de libertad. ....	22
Figura 2.10 Diagrama de bloques de un sistema con control anticipativo para atenuar las perturbaciones.....	23
Figura 3.1 Diagrama de bloques del proceso con lazo de control de temperatura...	25
Figura 3.2 Controlador BTC-9300 BRAINCHILD utilizado en lazo de control de temperatura.....	26
Figura 3.3 Programa del fabricante del controlador para monitoreo valores. ....	27
Figura 3.4 Gráfica de tendencia de los datos tomados para identificación del modelo de $G_P$ . ....	28
Figura 3.5 Datos de muestra cargados en herramienta de identificación y datos seleccionados para $G_P$ .....	29
Figura 3.6 Selección de datos para identificación y datos para validación de modelo de planta $G_P$ . ....	29
Figura 3.7 Herramienta para identificar modelos de procesos .....	30
Figura 3.8 Validación de modelo FOPDT estimado con datos de la planta $G_P$ . ....	31
Figura 3.9 Ventana de herramienta de identificación con distintos resultados obtenidos de los modelos de planta $G_P$ .....	32
Figura 3.10 Validación de modelos identificados para $G_P$ . ....	32

Figura 3.11 Resultados de ajustes de varias identificaciones. ....	33
Figura 3.12 Estimación del modelo de la planta $G_P$ . ....	33
Figura 3.13 Diagrama de bloques del sistema con control por realimentación de temperatura, representado en SIMULINK para simulación de modelo de planta $G_P$ . ....	35
Figura 3.14 Simulación del sistema con control por realimentación de temperatura, con modelo de planta $G_P$ . ....	36
Figura 3.15 Diagrama de bloques para control en cascada. ....	38
Figura 3.16 Muestra de datos para obtención de modelo de función de transferencia $G_{P2}$ . ....	40
Figura 3.17 Selección de datos para identificación y datos para validación de modelo de planta $G_{P2}$ . ....	40
Figura 3.18 Validación de modelos identificados para $G_{P2}$ . ....	41
Figura 3.19 Diagrama de bloques del sistema con control por realimentación de temperatura utilizando los modelos $G_{P1}$ y $G_{P2}$ . ....	43
Figura 3.20 Simulación del sistema con control por realimentación de temperatura, con modelos de planta $G_{P1}$ y $G_{P2}$ . ....	43
Figura 3.21 Diagrama de bloques del diseño de los lazos de control en cascada. ..	44
Figura 3.22 Diagrama de bloques para obtención de parámetros del controlador del lazo interno. ....	45
Figura 3.23 Sintonización de $G_{C2}$ con Herramienta PID Tuner de MATLAB. ....	46
Figura 3.24 Simulación de lazo interno con modelo de planta $G_{P2}$ . ....	47
Figura 3.25 Diagrama de bloques completo del sistema de control en cascada .....	47
Figura 3.26 Sintonización de $G_{C1}$ con Herramienta PID Tuner de MATLAB. ....	48
Figura 3.27 Simulación de sistema de control en cascada con lazos de control interno y externo sintonizados. ....	49
Figura 3.28 Diagrama de bloques de planta con perturbación de carga en presión de entrada de vapor a cocinador. ....	50
Figura 3.29 Simulación de planta con perturbación de carga en presión de entrada de vapor a cocinador. ....	51
Figura 3.30 Diagrama de bloques de control anticipativo para reducir perturbación de carga por variación de presión en entrada de vapor. ....	52

Figura 3.31 Simulación de controlador anticipativo. ....	53
Figura 4.1 Señales de error de los escenarios del sistema de control con un solo lazo realimentado.....	56
Figura 4.2 Señales de error de los escenarios del sistema de control con control en cascada. ....	58
Figura 4.3 Señales de error de los escenarios del sistema de control con control anticipativo. ....	59
Figura 4.4 Comparación de desempeño de sistemas de control ante el cambio de referencia. ....	61
Figura 4.5 Comparación de desempeño de sistemas de control ante una perturbación de carga. ....	62

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades del modelamiento teórico e identificación.....	10
Tabla 3.1 Desempeño del controlador $G_{C2}$ .....	46
Tabla 3.2 Desempeño del controlador $G_{C1}$ .....	49
Tabla 4.1 Indicadores de desempeño de sistema de control con un lazo realimentado .....	57
Tabla 4.2 Indicadores de desempeño de sistema de control con control en cascada .....	58
Tabla 4.3 Indicadores de desempeño de sistema de control con control anticipativo. .....	60
Tabla 4.4 Indicadores de desempeño ante el cambio de referencia.....	60
Tabla 4.5 Indicadores de desempeño ante una perturbación de carga. ....	61



## INTRODUCCION

Los sistemas de control realimentados son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industria, su utilización varía entre cada proceso y de acuerdo a las variables que se desea controlar.

La industria confitera no es la excepción y una línea de producción hay varias etapas donde se aplican los controles automáticos, siendo el presente caso de estudio, el diseño de un controlador para un cocinador de jarabe de azúcar para caramelos.

Debido a que el proceso en mención tiene varios comportamientos dinámicos y perturbaciones asociadas inherentes del sistema, se diseñara controladores que permitan rechazar dichas perturbaciones, así como adaptar su respuesta de acuerdo a estos cambios, para esto analizaremos el diseño de un controlador en cascada y un control anticipativo.

# CAPITULO 1

## 1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

### 1.1. Identificación del problema

En una línea de producción de caramelos de una fábrica de confites, en la etapa de preparación de la masa del caramelo, se mezcla azúcar, glucosa y se disuelven en agua en el precocinador K-10 (Figura 1.1), para preparar lo conocido como jarabe de azúcar. Una vez que los solutos son disueltos con ayuda del calor y del agitador M-10 del precocinador, este jarabe es transferido por medio de la bomba de pistón P-11 al cocinador K-20, donde es calentado hasta el punto de ebullición.

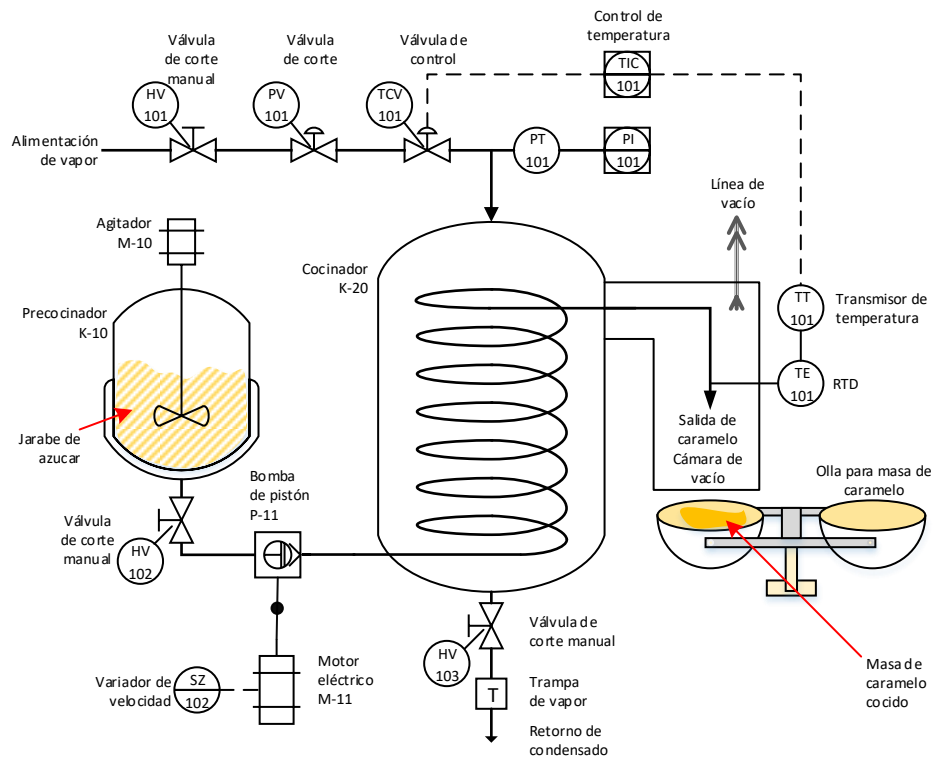


Figura 1.1 Diagrama de proceso e instrumentación de planta de estudio.

A medida que el jarabe ebulle y es descargado del cocinador, la humedad es extraída en la cámara de vacío, el producto de esta etapa del proceso es conocido como masa de caramelo. El control de temperatura es fundamental en este proceso, pues regula directamente la cantidad de humedad del producto.

El cocinador K-20 es un intercambiador de calor vertical de tubos en espiral en coraza de acero, en este proceso se controla la temperatura en la salida del cocinador donde se obtiene el producto, esto se hace mediante un sensor tipo Pt100 alojado en un termo pozo TE101, la señal de la temperatura es transmitida mediante un transmisor de 4 a 20 mA TT101, esta a su vez realimenta un controlador de temperatura PID TIC101, este controlador acciona una válvula proporcional TCV101 para ingreso de vapor a la sección de vapor del cocinador, esta válvula modula de acuerdo a la temperatura requerida por el controlador.

Actualmente la temperatura del producto varía considerablemente en la salida del cocinador, se observan cambios abruptos en la acción de control ejercida sobre la válvula de ingreso de vapor, esto no permite establecer un nivel estable de presión en la sección de vapor del cocinador, que a su vez no mantiene, incrementa o disminuye la temperatura en la salida del cocinador conforme al valor de consigna del controlador de temperatura, causando problemas en el producto obtenido del proceso.

## **1.2. Justificación**

Dado que la planta de estudio requiere controlar la temperatura con un alto desempeño, existen varias estrategias de control que pueden permitir llegar a una mejor respuesta en regular esta variable en la salida del cocinador como funciona actualmente. Por lo tanto, se propone analizar

el rendimiento del sistema de control existente para diseñar otras estrategias de control que permitan mejorar el desempeño del proceso.

### **1.3. Solución Propuesta**

Diseñar un controlador en cascada y un control anticipativo y evaluar el desempeño de ambos contra el control realimentado de lazo simple.

### **1.4. Objetivos del trabajo de titulación**

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

Diseñar el control del proceso industrial, para reducir las desviaciones de la variable controlada mediante la adopción de técnicas de control avanzada.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Analizar la reducción de la variación de temperatura mediante la utilización de estrategias de control enfocadas al rechazo de las perturbaciones.
- Evaluar las causas que llevan a la variación de temperatura.
- Evaluar alternativas de métodos de control para el problema propuesto considerando las perturbaciones especialmente en lo que respecta a caudal.
- Realizar análisis comparativo de al menos dos estrategias de control.

### **1.5. Metodología**

Mediante herramientas de software se identificará, modelará, simulará la respuesta de la planta y se diseñará el controlador del proceso. Las estructuras de control a evaluar serán control en cascada y control anticipativo. Se analizará el desempeño de los controladores diseñados mediante un análisis comparativo.

## **1.6. Alcance**

Mediante análisis cuantitativo de los indicadores de error obtenidos por simulación de la planta de estudio identificada con los valores medidos del proceso real, se determinará de forma generalizada la estrategia de control con mejor desempeño para el tipo de proceso.

## CAPITULO 2

### 2. ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Modelamiento e identificación de sistemas

El comportamiento en el tiempo de los sistemas, tales como los subsistemas técnicos descritos en las ingenierías eléctrica, mecánica y de procesos, así como los subsistemas no técnicos de otras áreas como la biología, medicina, química, física, economía y demás, pueden ser descritos por modelos matemáticos, esto es estudiado por la teoría de los sistemas, la aplicación de la teoría de los sistemas requiere que se conozcan los modelos del comportamiento estático y dinámico de los sistemas, este proceso de establecer un modelo se conoce como modelamiento [1].

En la ingeniería de control se requiere de modelos para diseñar los sistemas de control, por tanto es necesario modelar el sistema, el modelo de un sistema no es más que una representación matemática del mismo por medio de ecuaciones del mismo [2, 3, 4], el contenido de este modelo dependerá de lo que se desee analizar mediante la simulación del sistema.

El modelamiento puede alcanzarse de dos maneras, estas son modelamiento teórico o de modelamiento experimental.

Un sistema está definido como un grupo de entidades que se afectan mutuamente, se comprende estas entidades como procesos; el comportamiento del sistema está definido por el comportamiento de sus procesos.

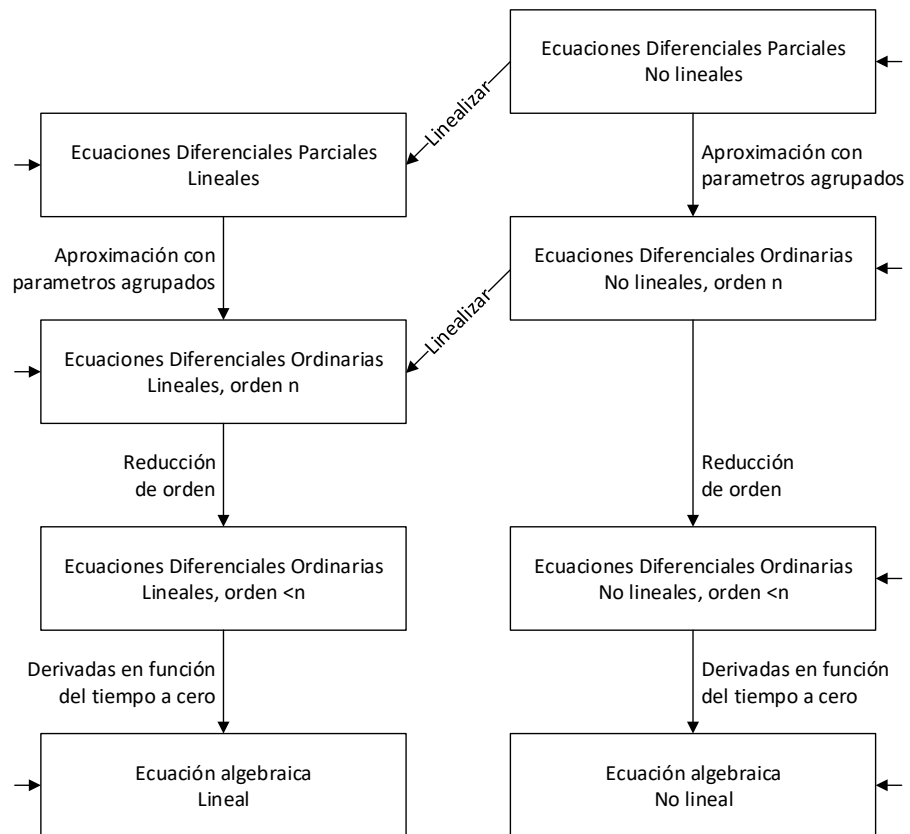
Los modelos matemáticos de los sistemas y procesos, así como la representación de su comportamiento temporal basado en la medición de sus señales, es catalogado como análisis de sistemas o análisis de procesos.

En ese orden definimos identificación de sistema o identificación de procesos al empleo de técnicas de análisis para sistemas o procesos experimentales.

Para el análisis teórico o modelamiento teórico, el modelo es obtenido aplicando métodos de cálculo a las ecuaciones, típicamente se aplican asunciones y simplificaciones de acuerdo al sistema o proceso, se pueden utilizar y combinar ecuaciones de las siguientes formas:

- Balance de ecuaciones: balance de masa, energía, momento.
- Ecuaciones de estado físico o químico: Son ecuaciones que describen eventos que pueden revertirse.
- Ecuaciones fenomenológicas: En caso de describir eventos irreversibles como la fricción o la transferencia de calor, se puede hacer un balance de entropía cuando están presentes múltiples procesos irreversibles.
- Ecuaciones de interconexión: como ecuaciones de nodo y malla de Kirchhoff, balance de torque, etc.

Utilizando estas ecuaciones, se puede obtener un arreglo de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, que finalmente lleva a un modelo matemático con cierta estructura y parámetros definidos. La mayoría de las veces el modelo obtenido es complejo y debe ser simplificado para poder aplicarlo. En algunos casos este método puede ser complicado, en la Figura 2.1 se muestra un cuadro con las simplificaciones a realizar para obtener un modelo matemático.



**Figura 2.1 Enfoque básico para el modelamiento teórico.**

Para el análisis experimental, también llamado identificación, se obtiene un modelo matemático a partir de las mediciones. En esta etapa debemos confiarnos en suposiciones a priori, que puede darse de experimentos preliminares o conocimiento del comportamiento del sistema.

Las mediciones se llevan a cabo y tanto la entrada como las señales de salida del sistema a identificar, previamente debemos escoger un método para identificar el modelo de acuerdo a la relación que se requiere.

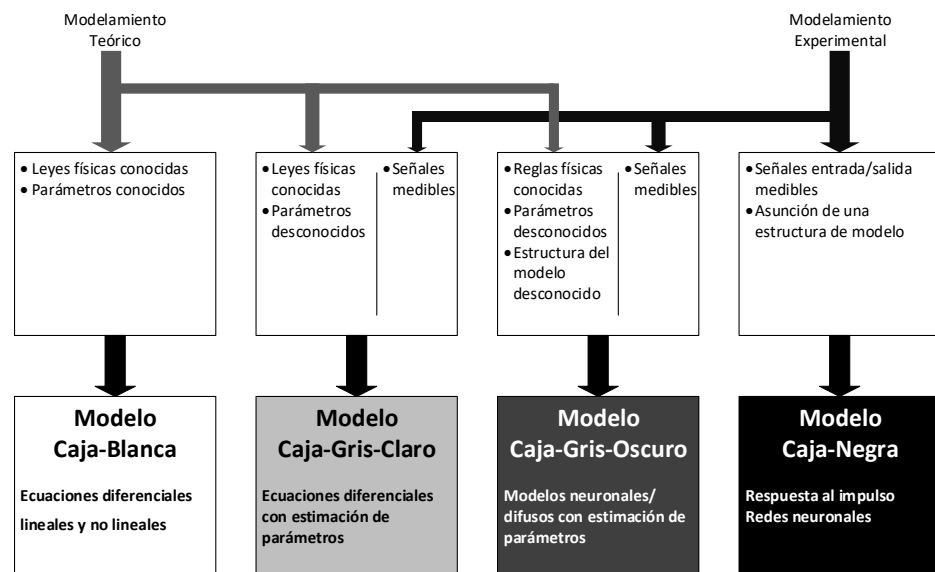
Las señales de entrada pueden ser señales que normalmente recibe el sistema como puede ser una señal preparada con ciertas especificaciones de acuerdo al método escogido para identificar y al resultado que se quiere forzar.



Dependiendo la aplicación y de la información a priori, sobre la estructura y los parámetros del sistema, se puede utilizar un método de modelo paramétrico o de modelo no paramétrico, el modelo resultante se denomina modelo experimental.

A diferencia del modelo teórico que contiene una función con dependencia sobre las propiedades físicas y los parámetros del sistema, el modelo experimental solo contiene números como parámetros sin relación alguna con las propiedades físicas del sistema, sin embargo, a pesar de esto el modelo experimental puede describir el comportamiento dinámico del sistema mejor que el modelo teórico.

Entre estos dos métodos de modelamiento teórico y experimental, existe la forma de combinar la información de un método con el otro, para mejorar el desempeño del resultado final. De esta forma podemos definir varios tipos modelos de acuerdo la cantidad de información que se completa de los métodos de modelamiento teórico, en modelamiento experimental al aumentar la cantidad de información a priori del sistema (Figura 2.2).



**Figura 2.2** Diferentes tipos de modelos matemáticos.

Modelo tipo Caja-Blanca, como el modelo netamente teórico definido únicamente a partir de leyes físicas y con ecuaciones modelamos su estructura y parámetros, en este caso podemos basarnos en el modelamiento experimental para validar el modelo teórico.

Modelo tipo Caja-Gris-Claro, llamamos así al modelo experimental que medimos las señales de entrada/salida del sistema y conocemos las leyes físicas que gobiernan el sistema, pero desconocemos los parámetros del mismo, de esta forma podemos dar cierta estructura inicial al modelo para completar los parámetros, esto es un método experimental donde aprovechamos el conocimiento previo del sistema para mejorar la fidelidad del modelo.

Modelo tipo Caja-Gris-Oscuro, es un modelo experimental, que también medimos las señales de entrada/salida del sistema, pero solo conocemos ciertas reglas físicas, que no nos permiten definir una estructura inicial de parámetros, ni parámetros del sistema, esto es un método experimental solo podríamos definir un método de identificación o el orden del sistema.

Modelo tipo Caja-Negra, es el modelo obtenido por métodos netamente experimentales.

A pesar que un análisis teórico pueda entregar más información de un sistema, ya que inherentemente se modela su comportamiento interno, hay muchas razones para ampliamente recomendar los análisis experimentales (Tabla 2.1).

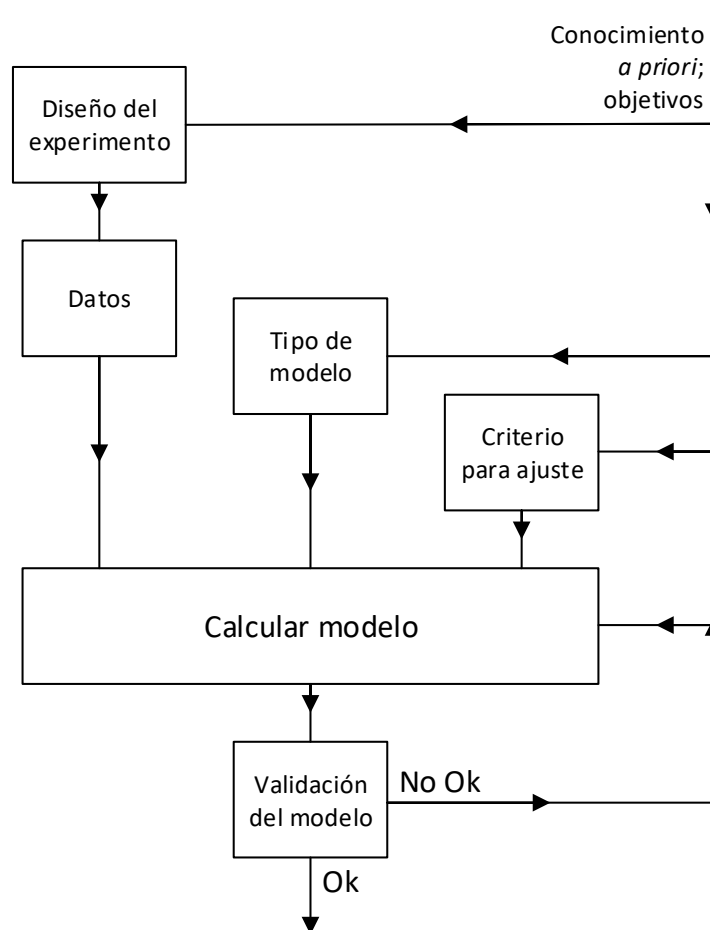
Modelamiento teórico	Identificación
La estructura del modelo sigue las leyes de naturaleza.	La estructura del modelo debe ser asumida.
Modelado del comportamiento de entrada/salida así como el comportamiento interno.	Solo se identifica el comportamiento de entrada/salida.
Los parámetros del modelo se dan en función de las propiedades del sistema.	Los parámetros del modelo son solo "números", en general no se conoce la dependencia funcional de las propiedades del sistema.
El modelo es válido para toda la clase de procesos de un cierto tipo y para diferentes condiciones de operación.	El modelo solo es válido para el sistema investigado y dentro de los límites operativos.
Los coeficientes del modelo no se conocen exactamente.	Los coeficientes del modelo son más precisos para el sistema dado dentro de los límites operativos.
Se pueden construir modelos para sistemas no existentes.	El modelo solo puede ser identificado para un sistema existente.
El comportamiento interno del sistema debe ser conocido y debe poder describirse matemáticamente.	Los métodos de identificación son independientes del sistema investigado y, por lo tanto, pueden aplicarse a muchos sistemas diferentes.
Proceso típicamente lleva mucho tiempo.	Proceso rápido si ya existen métodos de identificación.
Los modelos pueden ser bastante complejos y detallados.	El tamaño del modelo se puede ajustar según el área de aplicación del modelo.

**Tabla 2.1 Propiedades del modelamiento teórico e identificación.**

El procedimiento básico para identificar modelos de sistemas [5, 6] (Figura 2.3), consiste primeramente en diseñar el experimento donde se obtenga las señales de entrada/salida del sistema, en otro paso se pre-procesan los datos, tanto para identificar como para validar.

Se define el tipo de modelo, esto es si el modelo es paramétrico o no-paramétrico, en el caso de ser un modelo paramétrico se cuenta con una estructura y numero de parámetros finitos, en el caso de modelos no-paramétricos es un modelo sin una estructura o cantidad de parámetros

específica. Así mismo definimos los criterios relacionados con el método y el tipo de modelo escogido, paso siguiente calculamos el modelo, el resultado debe validarse donde el o los criterios pueden ser más de uno.



**Figura 2.3 Secuencia básica de identificación. [5, 6]**

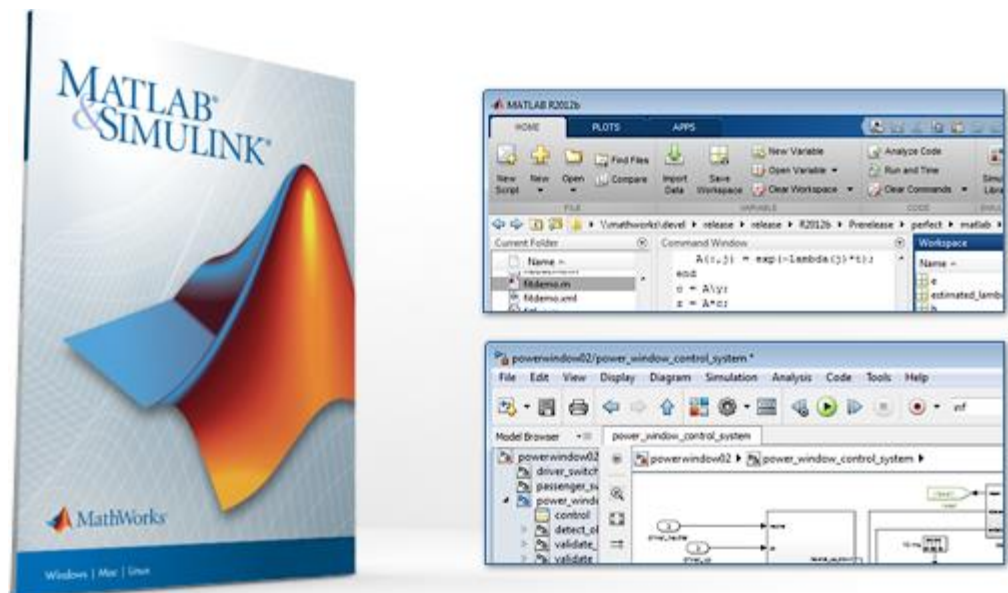
## 2.2. Simulación de sistemas

La simulación de los sistemas nos permite analizar y evaluar distintos aspectos y características para comprender y tomar decisiones tanto sobre las estructuras de control como los valores de las ganancias.

Las plataformas software de simulación, actualmente en su mayoría están equipadas con:

- Interfaz gráfica para programación orientada a bloques.
- Bloques para generar señales de entrada con funciones escalón, rampa y ondas sinusoidales.
- Gráficos en el tiempo de las variables simuladas.
- Bloques para simular los dispositivos de control más comunes, como: retardo de transporte, funciones de transferencia, limitadores de señales, muestra-y-retención, etcétera.

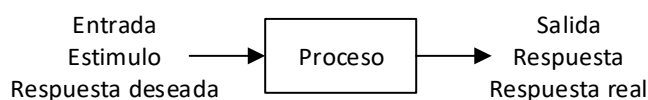
Esto ha facilitado el estudio de diversas estrategias y desempeños de los sistemas de control, entre algunas de estas plataformas de simulación están MapleSim de Maple, Xcos de SciLab, LabView de National Instruments, HySys de AspenTech, SystemModeler de Wolfram, Simulink/MATLAB de MathWorks entre otros [4], este último será el software empleado para el diseño y la simulación del sistema del presente trabajo.



**Figura 2.4 Software de simulación MATLAB®/SIMULINK®**

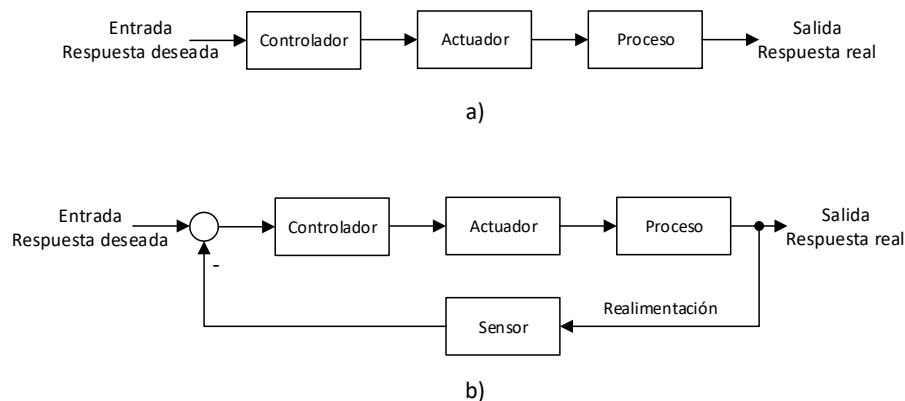
### 2.3. Sistemas de control

Un sistema de control está formado por subsistemas y procesos o plantas interconectados con el fin de controlar las salidas de los procesos; un sistema de control produce una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado [7].



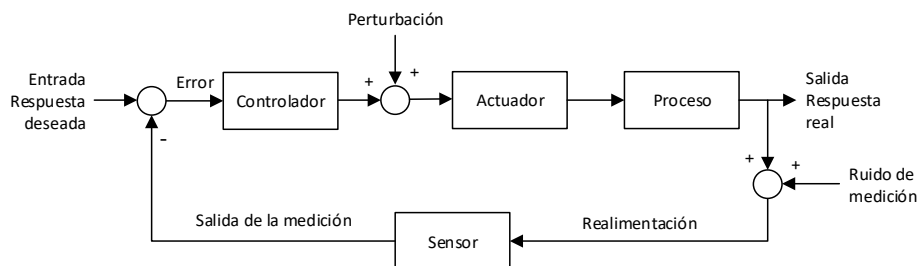
**Figura 2.5 Descripción simplificada de un proceso a ser controlado.**

Los procesos pueden ser controlados en lazo abierto sin realimentación (Figura 2.6a) o en lazo cerrado con realimentación (Figura 2.6b) donde el controlador compara la referencia o respuesta deseada con la salida o respuesta real.



**Figura 2.6 a) Sistema de control en lazo abierto. b) Sistema de control en lazo cerrado o realimentado.**

Los sistemas de control de lazo cerrado tienen muchas ventajas sobre los sistemas de control de lazo abierto, pues tienen la capacidad para rechazar las perturbaciones de carga y mejorar la atenuación del ruido de las mediciones.



**Figura 2.7 Sistema de control en realimentación lazo cerrado con perturbaciones externas y ruido de medición.**

### 2.3.1. Sistema de control mediante PID

El controlador PID es por mucho el algoritmo de control más común, la mayoría de los lazos realimentados de control se controlan mediante este algoritmo u alguna variante de este [8], más del 95% de controladores de la industria son de este tipo [9].

Tiene la facilidad de ajustarse con pocos parámetros y reglas básicas, pero también puede estudiarse analíticamente. Estos controladores han sido estudiados y analizados de diferentes formas y en la actualidad hay muchas estructuras establecidas en los controladores del mercado [10].

Básicamente el algoritmo del controlador PID consiste en la proporcionada suma de tres tipos de acciones de control, estas son la acción proporcional (P), acción integral (I) y acción diferencial (D) [11].

El control de la acción proporcional, es proporcional al error de control actual de acuerdo a la expresión:

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (2.1)$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional. La función de transferencia de un controlador proporcional es:

$$C(s) = K_p \quad (2.2)$$

La acción integral es proporcional a la integral del error de control, es:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

Donde  $K_i$  es la ganancia integral. La acción integral está relacionada a los valores pasados del error de control. Su función de transferencia es:

$$C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2.4)$$

La presencia del polo en el origen del plano complejo permite la reducción a cero del error en estado estacionario cuando hay un cambio de referencia o una perturbación de carga.

El uso combinado de la acción proporcional con la acción integral se conoce como controlador PI, este resuelve muchos problemas que un simple controlador on-off o un controlador proporcional no eliminar como lo es el error de estado estacionario. Por otro lado, la presencia de la acción integral también puede llevar al embale o windup, que puede ocurrir ante la saturación de alguna de las variables de control.

Mientras la acción proporcional se basa en el valor actual del error de control y la acción integral en los valores pasados del error de



control, la acción derivativa se basa en los valores futuros del error de control. Idealmente se expresa:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Donde  $K_d$  es la ganancia derivativa. Su respectiva función de transferencia es:

$$C(s) = K_d s \quad (2.6)$$

Para entender mejor el significado de la acción derivativa, se presenta los primeros dos términos de la expansión de la serie de Taylor del error de control al tiempo  $T_d$  hacia adelante:

$$e(t + T_d) \cong e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Si se considera a una función de control con esta expresión quedaría de esta forma un controlador PD:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.8)$$

La combinación de las acciones proporcional, integral y derivativa se pueden hacer de varias formas. La definición de la llamada forma ideal o forma no-interactiva es la siguiente:

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

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  la constante de tiempo integral y  $T_d$  la constante de tiempo derivativa. Una representación alternativa es la forma en serie o forma interactiva:

$$C_s(s) = K_p' \left( 1 + \frac{1}{T_i' s} \right) (T_d' s + 1) = K_p' \left( \frac{T_i' s + 1}{T_i' s} \right) (T_d' s + 1) \quad (2.10)$$

Esta representación siempre se puede convertir a la forma ideal aplicando las siguiente formulas:

$$\begin{aligned} K_p &= K_p' \frac{T_i' + T_d'}{T_i'} \\ T_i &= T_i' + T_d' \\ T_d &= \frac{T_i' T_d'}{T_i' + T_d'} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Inversamente, no siempre se puede convertir las constantes de un PID en forma ideal a un PID en forma serie, solo cuando:

$$T_i \geq 4T_d \quad (2.12)$$

Con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} K_p' &= \frac{K_p}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_d}{T_i}} \right) \\ T_i' &= \frac{T_i}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_d}{T_i}} \right) \\ T_d' &= \frac{T_i}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - 4 \frac{T_d}{T_i}} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

La razón para preferir la forma en serie sobre la forma ideal, es porque la forma en serie fue la primera en ser implementada in el siglo pasado con la tecnología neumática, por esto muchos fabricantes optan por mantener el know-how y para evitar cambiar la forma del controlador PID [11].

Otra forma de implementar el controlador PID, esta vez con las acciones no interactuando entre sí, es en forma paralelo:

$$C_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.14)$$

En caso de cambiarlo a la forma ideal, simplemente usa la equivalencia de los factores de la siguiente forma:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_d = K_p T_d \quad (2.15)$$

Dado que el uso de la acción derivativa conlleva a la amplificación del ruido en las señales realimentadas, la regla se modifica y se utiliza un filtro en la acción derivativa, de esta forma las ecuaciones (2.9), (2.10) y (2.14) usualmente se escribe la forma ideal con filtro derivativo:

$$C_i(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right) \quad (2.16)$$

La forma serie con filtro derivativo:

$$C_s(s) = K_p' \left( 1 + \frac{1}{T_i' s} \right) \left( \frac{T_d' s + 1}{\frac{T_d'}{N'} s + 1} \right) = K_p' \left( \frac{T_i' s + 1}{T_i' s} \right) \left( \frac{T_d' s + 1}{\frac{T_d'}{N'} s + 1} \right) \quad (2.17)$$

La forma paralela con filtro derivativo:

$$C_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\frac{K_d}{N} s + 1} \quad (2.18)$$

### 2.3.2. Sistema de control en cascada

El control en cascada se puede utilizar cuando existen varias señales de medida y una variable de control. Es útil cuando hay varias dinámicas significativas entre las variables del proceso, como retardos de tiempo o varias constantes de tiempo entre las variables de control y la variable de proceso [8].

Una de las principales preocupaciones de los sistemas de control es el rechazo a las perturbaciones de carga, la implementación de los sistemas de control en cascada tienen un buen desempeño en esta tarea [11].

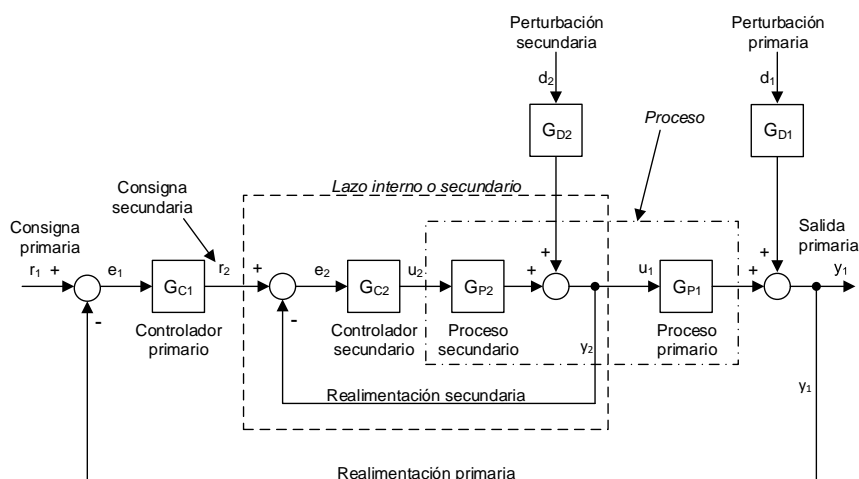
El control en cascada se obtiene anidando los lazos de control como se muestra en la Figura 2.8. En el ejemplo el sistema tiene dos lazos, el lazo interno se denomina secundario y el lazo externo se denomina primario, esto porque el lazo externo recibe la señal de medición primaria, también es posible tener un sistema cascada con más lazos anidados.

El criterio básico para diseñar los lazos, es que el lazo de control interno controla la variable de proceso de dinámica más veloz y el lazo de control externo controla la variable de proceso de dinámica más lenta.

De forma que un siendo un sistema o proceso con una planta  $G_P$ , de esta planta se desea controlar la variable  $y_1$ , al mismo tiempo se cuenta con la variable de proceso  $y_2$ , y que su respuesta corresponde a una etapa más temprana proceso y que tiene una respuesta dinámica más veloz que la salida primaria  $y_1$ , se puede implementar un lazo de control interno o secundario con un controlador secundario  $G_{C2}$ , que realimentación en lazo cerrado controla la variable  $y_2$  sintonizado con la dinámica de la planta  $G_{P2}$ . A la vez el lazo de control externo o primario con un controlador primario  $G_{C1}$  en realimentación con la variable  $y_1$ , sintonizado con la dinámica de la planta  $G_{P1}$ .

Los modelos de la planta,  $G_{P2}$  y  $G_{P1}$ , por definición equivalen a:

$$G_P = G_{P2}G_{P1} \quad (2.19)$$



**Figura 2.8 Estructura de control en cascada.**

### 2.3.3. Sistema de control anticipativo

Varios autores han llamado de diversas formas al conocido *Feedforward*, según Ogata, control anticipado<sup>1</sup>, según Smith-Corripio control por acción pre-calculada<sup>2</sup> otros autores también lo llaman acción anticipada<sup>3</sup>, para el estudio en adelante lo referiremos como control anticipativo o acción anticipada.

Según Åström [8] es una técnica sencilla y potente que complementa a la realimentación. La acción anticipada se puede emplear tanto para mejorar las respuestas a cambios en la consigna como para reducir el efecto de las perturbaciones de carga.

Entre las técnicas de utilización de este tipo de control se menciona:

- Respuesta mejorada de la consigna
  - Ponderación de la consigna
  - Control anticipativo neutro
  - Respuesta rápida de la consigna
    - Control en tiempo óptimo
    - Control con pulsos en escalón
    - Control con limitación de velocidad
  - Atenuación de perturbación
- 
- **Respuesta mejorada de la consigna**

Este tipo de control puede ser utilizado con mucha efectividad para mejorar la respuesta del punto de consigna del sistema, también es posible separar el problema de diseño en dos partes, pues se diseña primero el control por realimentación para lograr robustez y buen

---

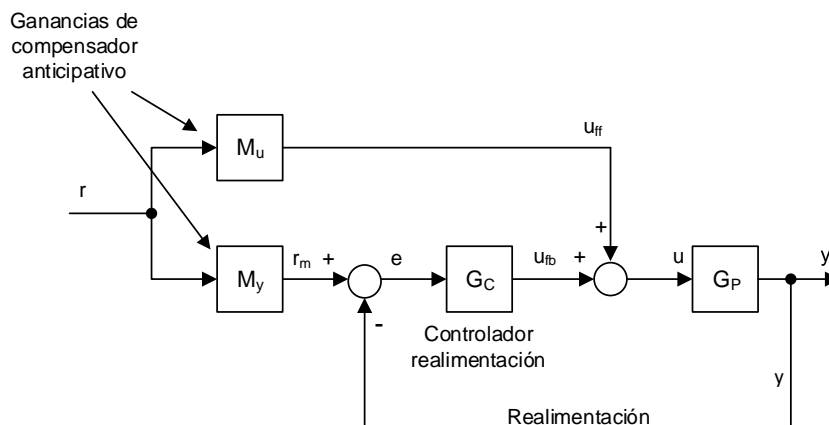
<sup>1</sup> Control anticipado (Feedforward) [13] pág. 642.

<sup>2</sup> Control por acción pre-calculada [14] pág. 447.

<sup>3</sup> Estrategias de control en cascada y por acción anticipada [15].

rechazo de perturbaciones y el anticipativo para dar una buena respuesta a los cambios de consigna.

El uso efectivo de este controlador requiere una estructura del sistema que tiene dos grados de libertad.



**Figura 2.9 Diagrama de bloques de un sistema con dos grados de libertad.**

La regla de diseño de estos controladores está dada por:

$$M_y = G_P M_u \quad (2.20)$$

- **Ponderación de la consigna**

Para los controladores PID de lazo realimentado sencillo, puede no ser necesario un sistema completo de dos grados de libertad. La respuesta deseada de la consigna se puede obtener simplemente ajustando los pesos de la consigna.

- **Control anticipativo neutro**

Es una alternativa sencilla del para sistemas con respuesta sin variaciones al estímulo de un escalón en la consigna, que satisfacen la ecuación (2.20) donde:

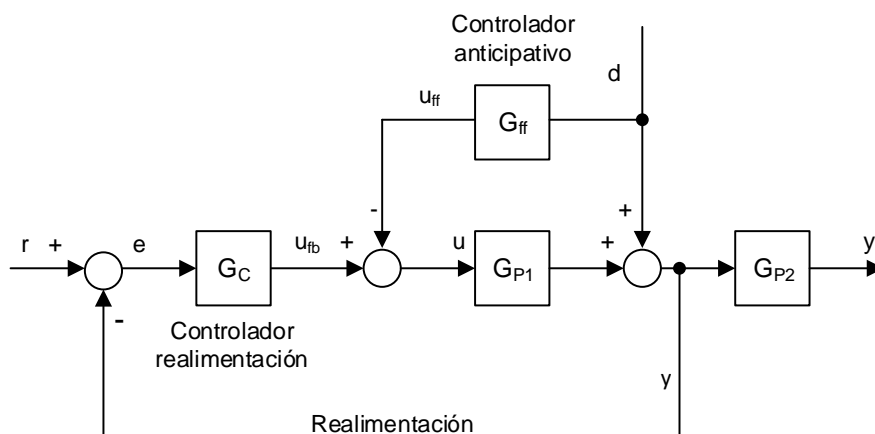
$$M_y = \frac{G_P}{G_P(0)} = \frac{G_P}{K_P}$$

$$M_u = \frac{1}{K_P}$$

(2.21)

- **Atenuación de perturbación**

Las perturbaciones pueden ser eliminadas por control con realimentación, sin embargo, para que el controlador haga la compensación, primero debe ocurrir el error, luego viene la compensación del controlador y con esto se elimina la perturbación. En algunas situaciones es posible medir las perturbaciones antes que influyan en el proceso, con esto con el control anticipativo se puede minimizar el impacto de las perturbaciones de carga antes que afecten la salida del sistema y evolucionen el error del control.



**Figura 2.10 Diagrama de bloques de un sistema con control anticipativo para atenuar las perturbaciones.**

En el sistema mostrado en la Figura 2.10 se observa el control anticipativo para un sistema con la planta  $G_P$  que está definida por  $G_P = G_{P1}G_{P2}$  y una perturbación  $d$ , un compensador anticipativo ideal está dado por:



$$G_{ff} = G_{P1}^{-1} = \frac{G_{yd}}{G_{yu}} \quad (2.22)$$

Donde  $G_{yd}$  es la función de transferencia de “d” a “y” y  $G_{yu} = G_P$  es la función de transferencia de “u” a “y”. El compensador ideal se forma a la inversa de la dinámica del proceso  $G_{P1}$ .

El control anticipativo es más efectivo cuando la perturbación “d” entra pronto en el proceso. Esto ocurre cuando la mayoría de la dinámica está en la sección del proceso  $G_{P2}$ . Cuando  $G_{P1} = 1$ , y por tanto  $G_{P2} = G_P$ , el compensador es realizable y los efectos de la perturbación se pueden eliminar de la salida del proceso.

En cambio cuando la perturbación entra tarde en el proceso, de forma que  $G_{P1} \approx G_P$ , los efectos de la perturbación se ven en la salida al mismo tiempo que están en la señal del compensador anticipativo, en este caso no hay ventaja en utilizar en control anticipativo en comparación con la realimentación [8].

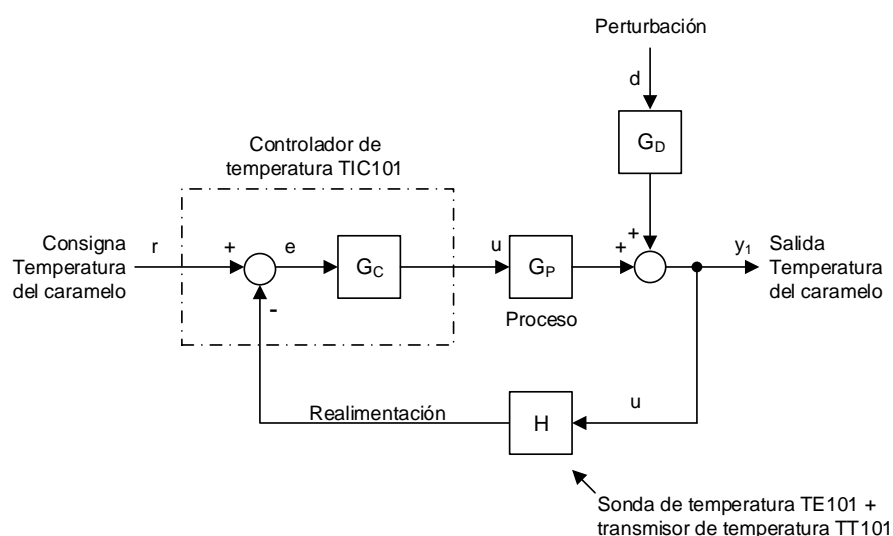
## CAPITULO 3

### 3. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTROL

#### 3.1. Modelamiento del proceso (FOPDT)

Para modelar el proceso del cocinador de jarabe de jarabe, tomamos el diagrama de proceso e instrumentación de del sistema cocinador, mostrado en la Figura 1.1 y realizamos el diagrama de bloques del proceso, en la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques idealizado con el sistema de control existente.

Del diagrama de bloques podemos observar los elementos asociados al lazo de control 101, así como el bloque  $G_C$  que junto con la operación de sumatoria representa al controlador de temperatura TIC101 y el bloque con la ganancia  $H$  que representa la sonda de temperatura TE101 y el transmisor de temperatura TT101. La planta es representada por  $G_P$  y podemos definir que la perturbación “d” con una ganancia  $G_D$ , que depende la parte en que ingrese la perturbación al proceso.



**Figura 3.1 Diagrama de bloques del proceso con lazo de control de temperatura.**

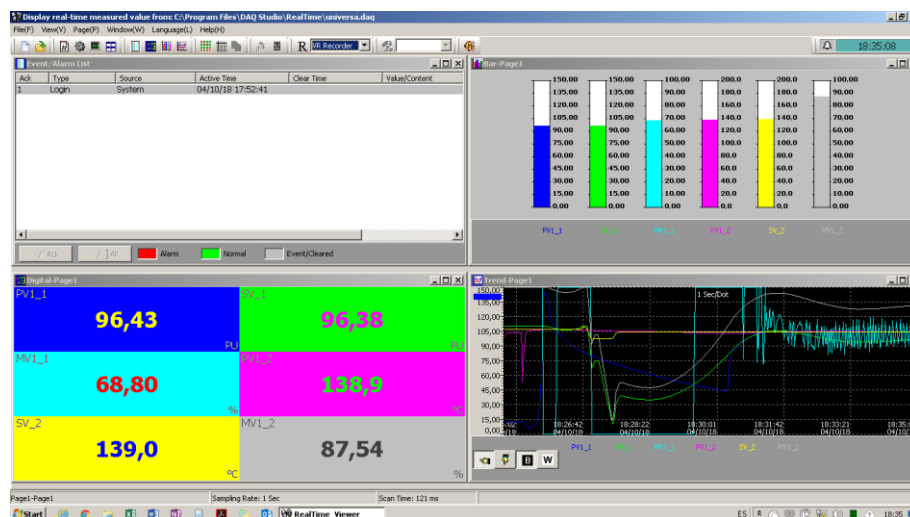
Dado que el sistema continuamente ingresa jarabe de caramelo líquido del precalentador, y el vapor está en un continuo cambio de estado de vapor a condensado en el interior de la recámara primaria del intercambiador, el sistema es inestable pues la temperatura puede caer velozmente si se abre el lazo de control y no se manipula la válvula de ingreso de vapor, por otro lado, la exigencia de la jefatura de planta sobre la línea de producción en que opera este proceso no permite que la salida del proceso se desvíe por lo más mínimo de su consigna, pues altera la calidad del producto para las demás etapas subsecuentes del proceso.

De esta forma para obtener el modelo del proceso, se recurre a un procedimiento de identificación de sistemas en lazo cerrado, que consiste en tomar muestras de las variables de entrada y salida de la planta  $G_P$ .



**Figura 3.2 Controlador BTC-9300 BRAINCHILD utilizado en lazo de control de temperatura.**

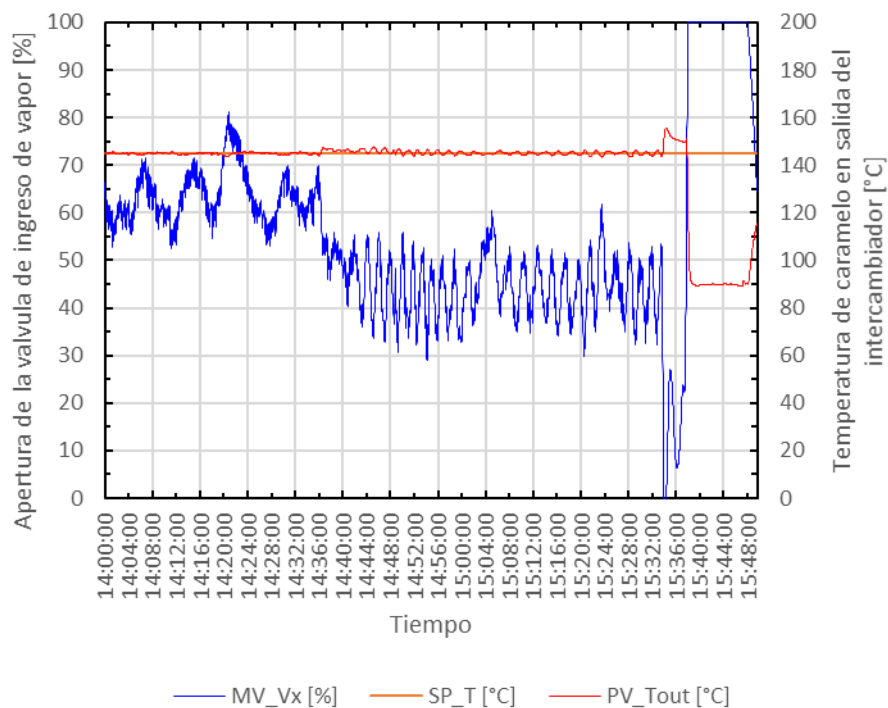
Dado que el controlador utilizado en el lazo de control (Figura 3.2) tiene un puerto de comunicación RS485, medio con el cual se puede configurar sus parámetros y a la vez se puede monitorear con el software del fabricante los valores de las señales asociadas al lazo de control (Figura 3.3), de esta manera podemos utilizar el software del fabricante del equipo con el aplicativo de registrador para tomar los datos del controlador del proceso.



**Figura 3.3 Programa del fabricante del controlador para monitoreo valores.**

En este caso, referimos las señales que necesitamos de la planta  $G_P$  al controlador de temperatura  $G_C$ , la entrada de la planta corresponde a la acción de control del controlador y la salida de la planta o valor actual de temperatura, que corresponde a la entrada realimentada al controlador de temperatura.

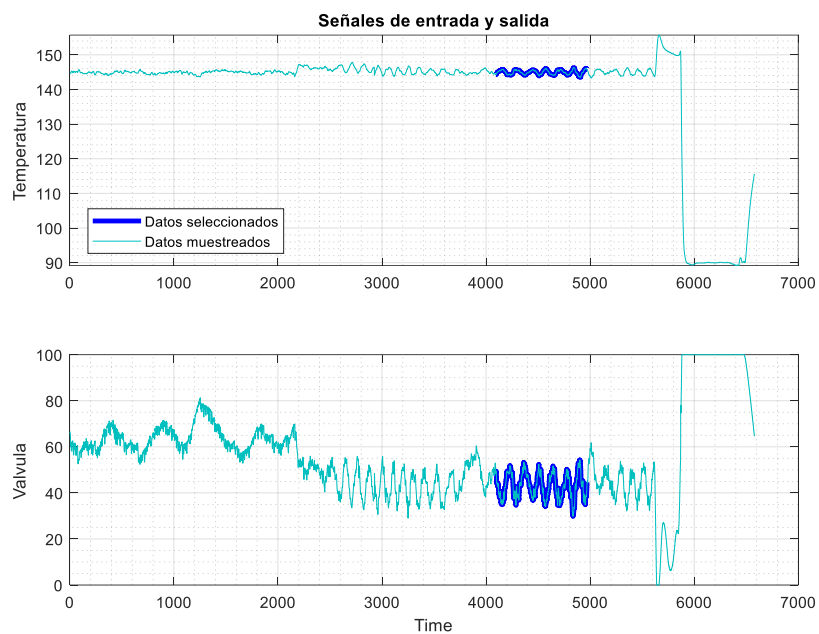
Mediante consulta a la base de datos almacenada en el ordenador por el software registrador, se obtiene una tabla de datos CSV con las variables consultadas en el periodo deseado, en la Figura 3.4 se observa las gráficas de tendencia generadas con los datos tomados del controlador seleccionados para modelar la planta.



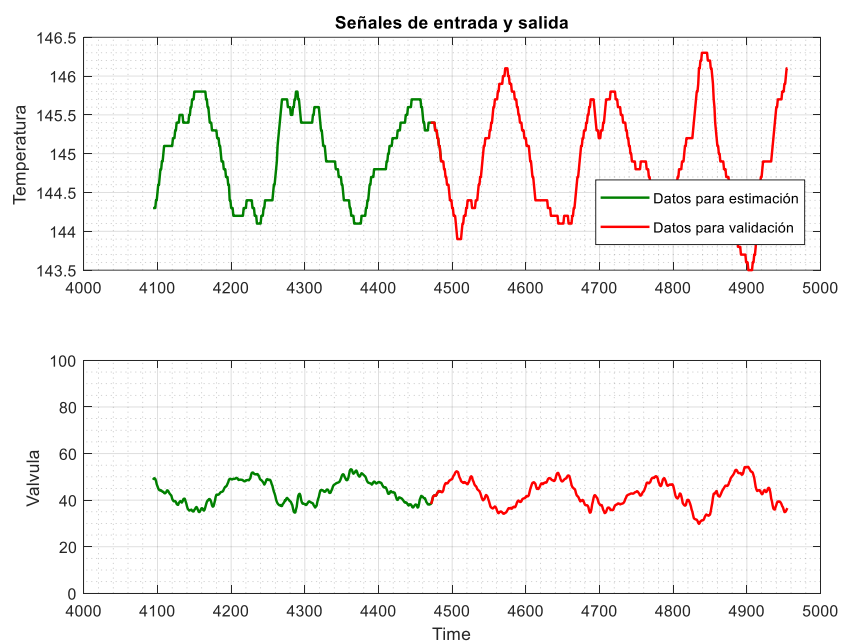
**Figura 3.4 Gráfica de tendencia de los datos tomados para identificación del modelo de G<sub>p</sub>.**

Con los datos muestreados, los exportamos a MATLAB donde cargamos los datos en la herramienta de identificación “System Identification Toolbox”. En la Figura 3.5 podemos observar en color celeste los datos cargados en la herramienta de identificación.

Dado que durante la muestreo realizado, no todos se tuvo siempre las mismas condiciones, utilizamos las operaciones de pre-procesamiento con estos datos para seleccionar una nueva muestra de datos en un periodo que no se variaron las condiciones de operación, tal como es la velocidad de la bomba de jarabe de caramelo, la cual se mantuvo a la misma velocidad entre las 15:04 y 15:21 del día que se tomó las mediciones, podemos observar en la misma Figura 3.5 los datos seleccionados.



**Figura 3.5 Datos de muestra cargados en herramienta de identificación y datos seleccionados para  $G_P$ .**



**Figura 3.6 Selección de datos para identificación y datos para validación de modelo de planta  $G_P$ .**

Una vez seleccionado los datos de la muestra para el estudio, se vuelve a seleccionar dos juegos de datos, un juego de datos para identificar la función de transferencia de la planta y otro juego para validar la función de transferencia identificada (ver Figura 3.6).

Una vez definido los datos de identificación y de validación, se procede con las operaciones de estimación.

Dado que el proceso del sistema estudiado corresponde en esencia a un intercambiador de calor [12], se asume que le corresponde un modelo de primer orden con retardo en el tiempo o por sus siglas en ingles FOPDT, de esta forma podemos contar con una estructura preliminar para la identificación del modelo de la planta que sería:

$$G(s) = K_p \frac{1}{1 + T_p s} e^{-T_d s} \quad (3.1)$$

Con el argumento anterior utilizamos una operación de la herramienta de identificación específicamente para identificar modelos de proceso (Figura 3.7). Esta utilidad permite configurar la estructura de un modelo con polos reales, cero e integrador, así como los valores iniciales para las variables del proceso para el algoritmo de estimación.

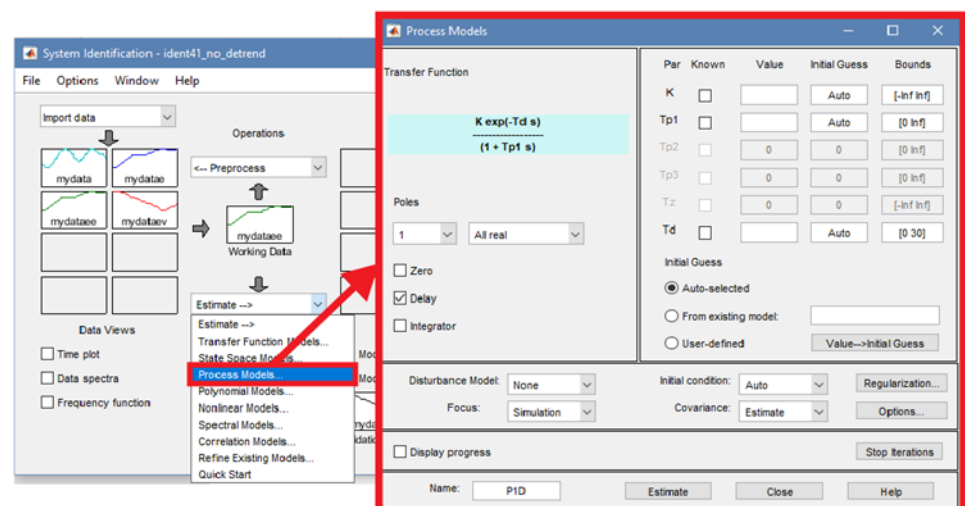
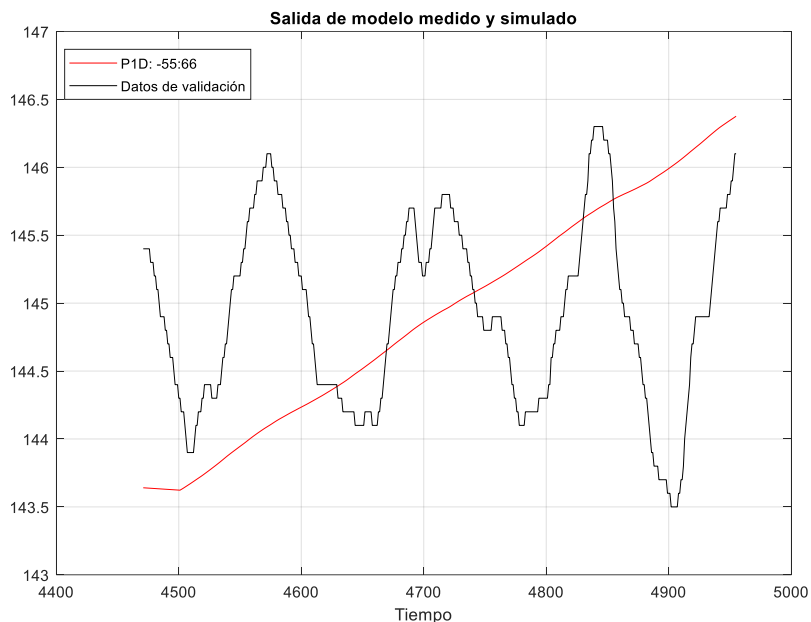


Figura 3.7 Herramienta para identificar modelos de procesos

Luego de ejecutar la estimación de acuerdo a la estructura mostrada, podemos observar que el valor de ajuste que obtenemos (Figura 3.8) es de -55.66%, el cual es significativamente bajo.

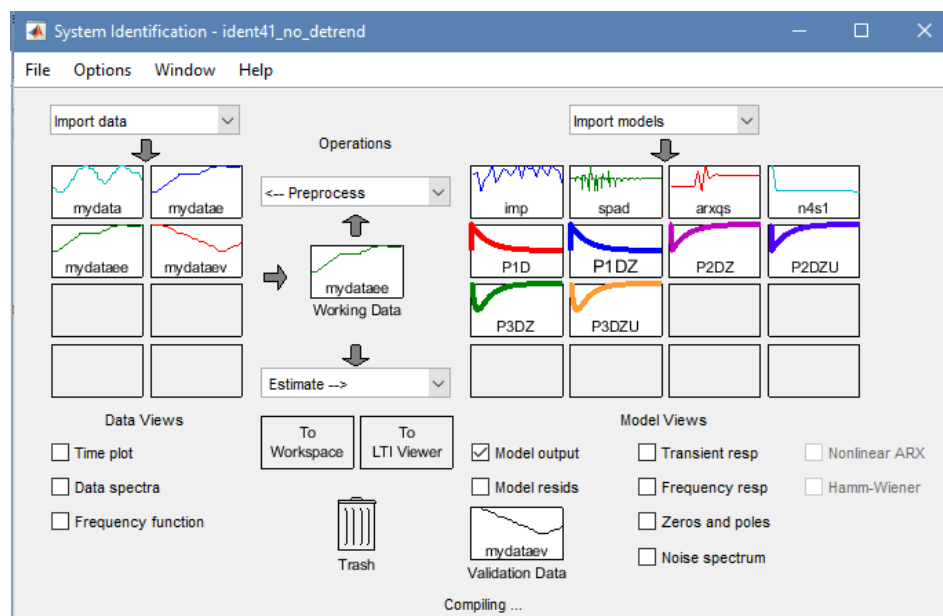


**Figura 3.8 Validación de modelo FOPDT estimado con datos de la planta  $G_p$ .**

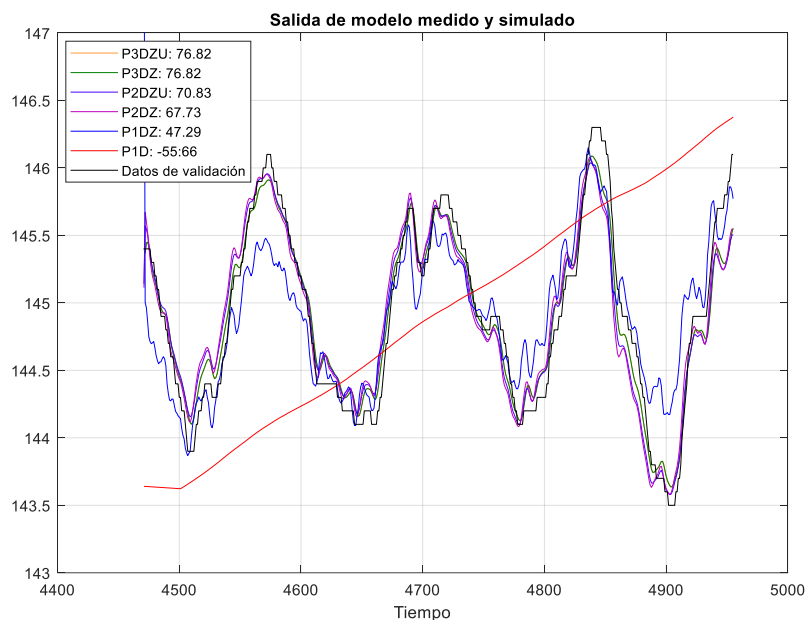
Para poder obtener un resultado viable del modelo debemos cambiar la estructura de modelo inicialmente planteada y alternar cambiando el orden del modelo, en este caso se prueba con modelos de segundo y tercer orden, ambos con retardo en el tiempo (Figura 3.9).

Podemos observar en la Figura 3.10, la salida de la simulación de los modelos estimados con estructura de mayor orden, tienen mejor ajuste a los datos de validación de la planta.





**Figura 3.9** Ventana de herramienta de identificación con distintos resultados obtenidos de los modelos de planta  $G_P$ .



**Figura 3.10** Validación de modelos identificados para  $G_P$ .

Best Fits	
P3DZU:	76.82
P3DZ:	76.82
P2DZU:	70.83
P2DZ:	67.73
P1DZ:	47.29
P1D:	-55.66

**Figura 3.11 Resultados de ajustes de varias identificaciones.**

En la Figura 3.11 se muestra los resultados de ajuste obtenidos con la herramienta de identificación. El modelo obtenido con mayor ajuste sin tener polos subamortiguados, corresponde al modelo con la nomenclatura P3DZ, con un ajuste de 76.82% a los datos de validación y 85.02% con los mismos datos de estimación.

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	3.3391	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	4638.7651	Auto	[0 2893373.4]
Tp2	<input type="checkbox"/>	3.5507	Auto	[0 10000]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0.81439	Auto	[0 10000]
Tz	<input type="checkbox"/>	-150.7879	Auto	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0.561	Auto	[0 30]

Initial Guess

Auto-selected

From existing model:

User-defined

Disturbance Model:  Initial condition:

Focus:  Covariance:

Display progress

Name:

**Figura 3.12 Estimación del modelo de la planta  $G_P$ .**

En la Figura 3.12 podemos observar la ventana de la herramienta de identificación con los datos de la última iteración en que se obtiene los

valores de las variables del modelo, el modelo obtenido es de tercer orden con retardo en tiempo y un cero.

A continuación, la salida en MATLAB del modelo de la planta obtenida:

```
P3DZ =
Process model with transfer function:
          1+Tz*s
G(s) = Kp * ----- * exp(-Td*s)
          (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)(1+Tp3*s)

          Kp = 3.3391
          Tp1 = 4638.8
          Tp2 = 3.5507
          Tp3 = 0.81439
          Td = 0.561
          Tz = -150.79

Name: P3DZ
Parameterization:
'P3DZ'
Number of free coefficients: 6
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "mydataee".
Fit to estimation data: 85.02%
FPE: 0.006675, MSE: 0.006375
```

De esta forma el modelo del proceso  $G_P$  obtenido es:

$$G_P(s) = K_P \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)(1 + T_{p3} s)} e^{-T_d s} \quad (3.2)$$

Reemplazando los valores obtenidos:

$$G_P(s) = 3.3391 \frac{1 - 150.79s}{(1 + 4638.8s)(1 + 3.5507s)(1 + 0.81439s)} e^{-0.561s} \quad (3.3)$$

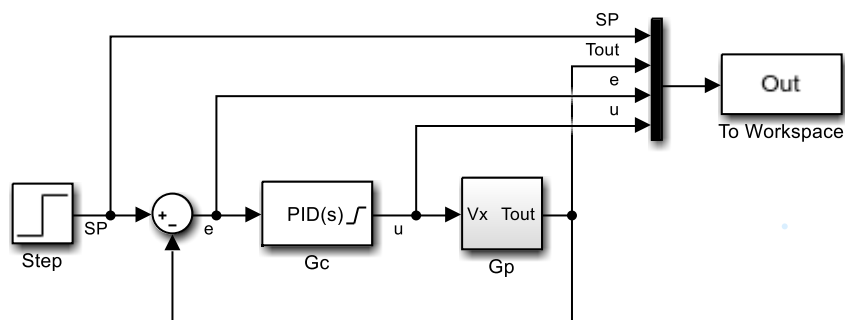
Rescribiendo la expresión para mostrar sus polos y ceros:

$$G_P(s) = -0.037536 \frac{s - 0.006632}{(s + 1.228)(s + 0.2816)(s + 0.0002156)} e^{-0.561s} \quad (3.4)$$

Como último paso de validación se procede a simular el modelo de la planta y su controlador, con el valor de referencia inicial y con un cambio de acuerdo a la operación normal del mismo, para esto se representa en SIMULINK (Figura 3.13) el sistema de control con un lazo de realimentación sencilla tal como opera actualmente, para ejecutar la simulación y obtener las señales del sistema.

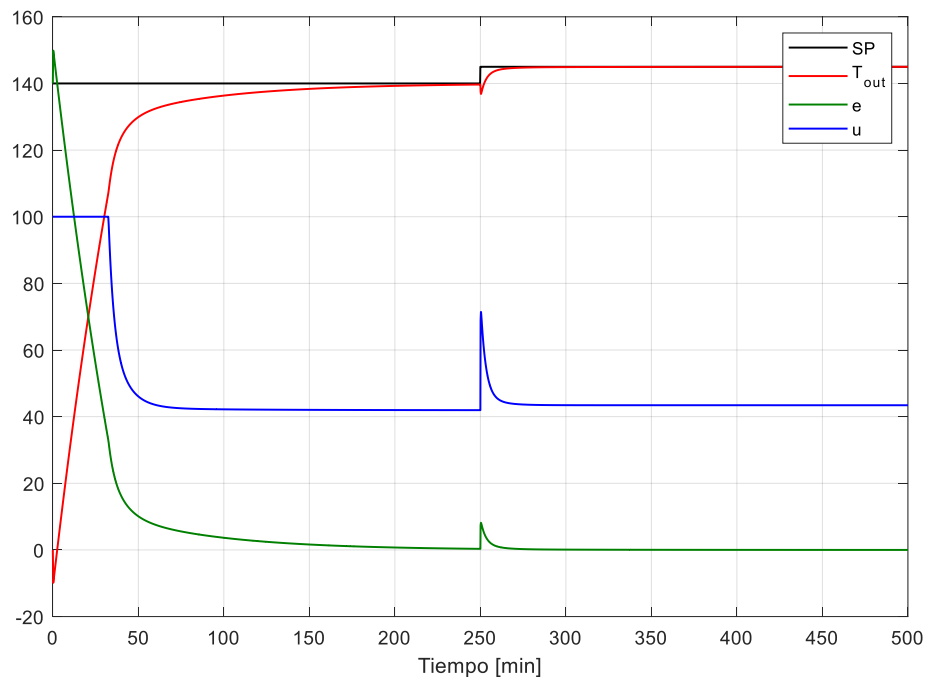
Se debe tener en cuenta los componentes que pueden aportar alguna no linealidad al sistema, como en este caso la válvula de ingreso de vapor, solo puede abrir entre 0 y 100 %, la salida del controlador también debe contemplar esta saturación, para mejorar la respuesta durante el arranque del escalón en la simulación, se utiliza un método de anti-embalamiento o anti-windup para evitar el sobre nivel.

Por simplicidad del modelo, se asume como unitaria la ganancia de la realimentación de temperatura.



**Figura 3.13 Diagrama de bloques del sistema con control por realimentación de temperatura, representado en SIMULINK para simulación de modelo de planta  $G_P$ .**

Las señales obtenidas mediante la simulación (Figura 3.14) muestran la respuesta del sistema hasta establecer la temperatura de salida en el punto de operación nominal de la planta. También se puede apreciar la respuesta frente a un cambio de referencia.



**Figura 3.14 Simulación del sistema con control por realimentación de temperatura, con modelo de planta  $G_P$ .**

El controlador sintonizado para obtener la respuesta de la Figura 3.14 es de la forma paralelo con filtro derivativo y está representado de la siguiente manera:

$$G_C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{T_f s + 1}$$

(3.5)

Donde:

$$K_p = 3.3$$

$$K_i = 0.0008252$$

$$K_d = 172$$

$$T_f = 364$$

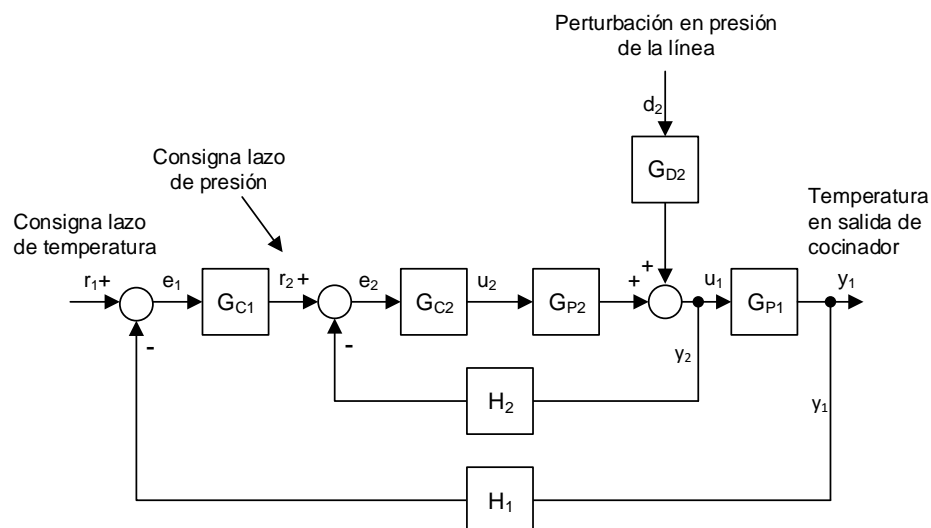
Con lo observado anteriormente, se puede dar por válido el modelo identificado para la planta  $G_p$  mostrado en la ecuación (3.4).

### **3.2. Diseño de controlador en cascada**

Para diseñar el controlador en cascada del sistema de control existente (Figura 3.1); como se mencionó en el capítulo anterior, en primer lugar se debe contar con alguna variable del proceso, que a la vez este asociada a un subproceso con una dinámica de mayor velocidad en el sistema, en este caso la línea de ingreso de vapor cuenta con un transmisor de presión del cual se puede aprovechar para implementar un lazo de control.

El transmisor presión TP101 (Figura 1.1) está conectado con otro equipo de iguales características al control utilizado en el lazo de control de temperatura, por lo que ambos equipos son monitoreados y registrados simultáneamente vía red de comunicación serial RS485 con el software del fabricante de estos controladores. De esta forma se cuenta con un perfil de presión en el mismo tiempo que la apertura de la válvula del controlador y la temperatura de salida, con lo que es posible crear un lazo de control interno, a la vez que también se puede identificar otras relaciones de transferencia del mismo sistema.

De esta forma se plantea el sistema de control en cascada de acuerdo al diagrama de bloques presentado en la siguiente figura:



**Figura 3.15 Diagrama de bloques para control en cascada.**

Donde:

$G_{C1}$ : Función de transferencia del control de lazo externo de temperatura del caramelo en la salida del intercambiador.

$G_{C2}$ : Función de transferencia del control de lazo interno de presión de vapor en la entrada al intercambiador.

$G_{P2}$ : Función de transferencia del modelo de proceso entre la apertura de la válvula de entrada de vapor y presión de vapor de entrada al intercambiador.

$G_{P1}$ : Función de transferencia del modelo de proceso entre la presión de vapor de entrada al intercambiador y la temperatura del caramelo en la salida del intercambiador.

$H_1$ : Función de transferencia del transmisor de presión.

$H_2$ : Función de transferencia del sensor y transmisor de temperatura.

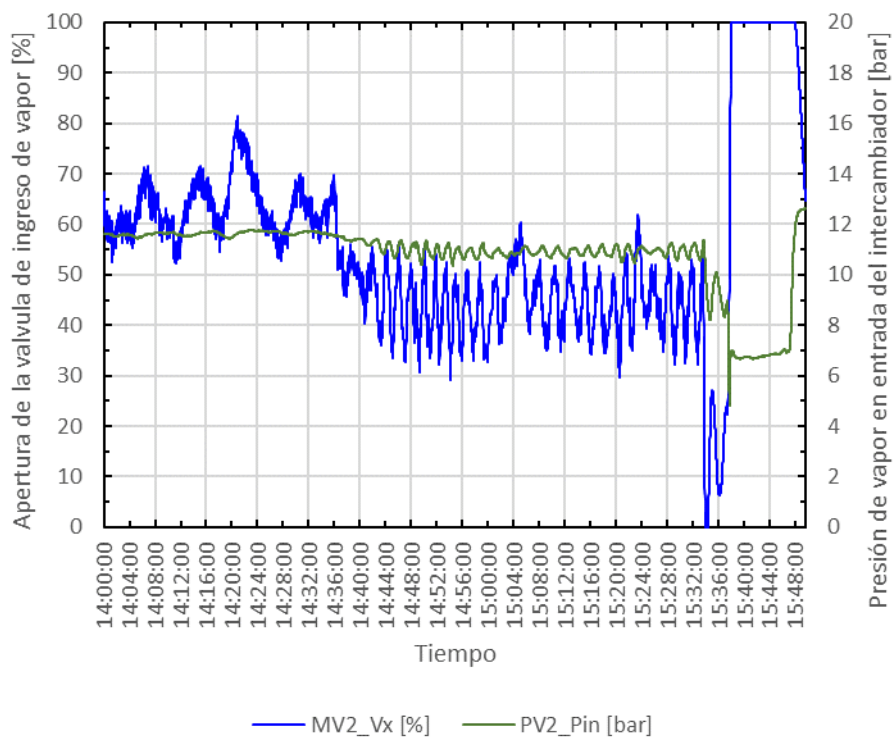
$G_{D2}$ : Función de transferencia de la perturbación de presión sobre la entrada de vapor al intercambiador.

- $r_1$ : Consigna o referencia de temperatura para la salida del proceso.
- $r_2$ : Consigna o referencia de presión para la entrada de vapor al intercambiador.
- $u_2$ : Acción de control del controlador de presión sobre la apertura de la válvula de entrada de vapor al intercambiador.
- $d_2$ : Señal de la perturbación de presión sobre en la línea de entrada de vapor.

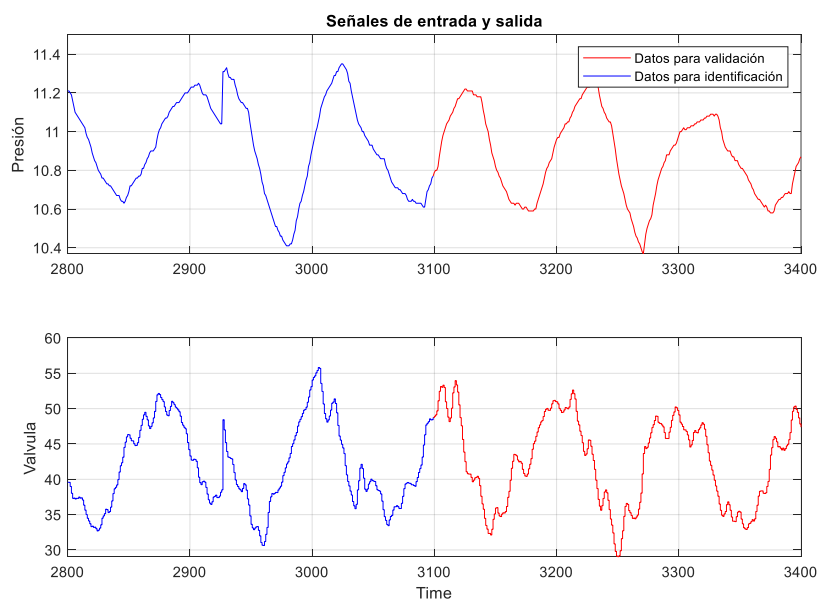
Para diseñar un controlador en cascada, se debe poder diseñar los controladores  $G_{C1}$  y  $G_{C2}$ , que corresponden a los controladores de los lazos externo e interno respectivamente.

De esta forma y con los datos extraídos de la planta, se procede con la obtención del modelo  $G_{P2}$ , siguiendo los mismos pasos con que se obtuvo el modelo de la planta  $G_P$ .

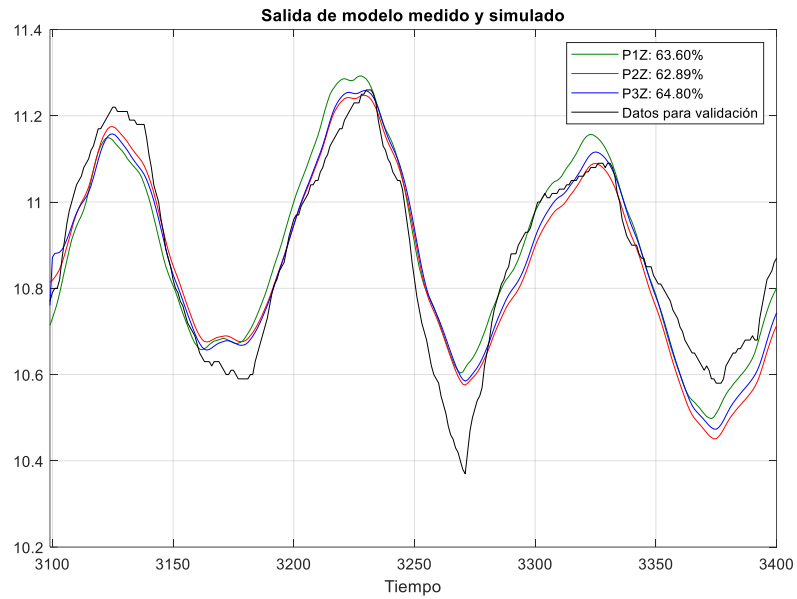




**Figura 3.16** Muestra de datos para obtención de modelo de función de transferencia  $G_{P2}$ .



**Figura 3.17** Selección de datos para identificación y datos para validación de modelo de planta  $G_{P2}$ .



**Figura 3.18 Validación de modelos identificados para  $G_{P2}$ .**

A continuación, la salida en MATLAB del modelo de la planta  $G_{P2}$  obtenida:

```
P3Z =
Process model with transfer function:
          1+Tz*s
G(s) = Kp * -----
          (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)(1+Tp3*s)

      Kp = 0.25554
      Tp1 = 0.44454
      Tp2 = 8.2446
      Tp3 = 116.07
      Tz = 8.5992

Name: P3Z
Parameterization:
  'P3Z'
  Number of free coefficients: 5
  Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "data_Vx_Pee".
Fit to estimation data: 66.68%
FPE: 0.007217, MSE: 0.006842
```

De esta forma el modelo del proceso  $G_{P2}$  obtenido es:

$$G_{P2}(s) = K_P \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)(1 + T_{p3}s)} \quad (3.6)$$

Reemplazando los valores obtenidos:

$$G_{P2}(s) = 0.25554 \frac{1 - 8.5992s}{(1 + 0.44454s)(1 + 8.2446s)(1 + 116.07s)} \quad (3.7)$$

Rescribiendo la expresión para mostrar sus polos y ceros:

$$G_{P2}(s) = 0.0051653 \frac{s + 0.1163}{(s + 2.25)(s + 0.1213)(s + 0.008615)} \quad (3.8)$$

El modelo de  $G_{P1}$  se puede obtener con los modelos de  $G_P$  y  $G_{P2}$  recurriendo a la ecuación (2.19) de la cual se despeja  $G_{P1}$  dando la siguiente ecuación:

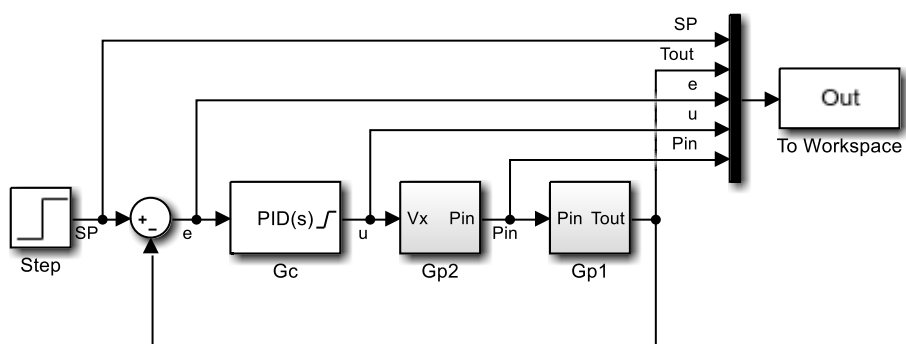
$$G_{P1} = \frac{G_P}{G_{P2}} \quad (3.9)$$

De esta manera se obtiene:

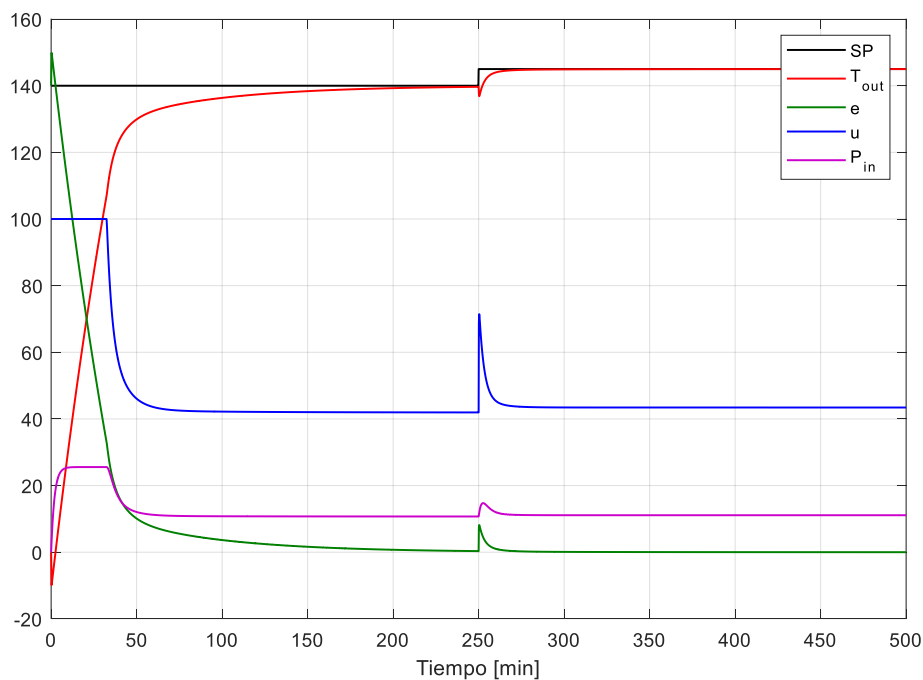
$$\begin{aligned} G_{P1} &= \frac{-0.037536 \frac{s - 0.006632}{(s + 1.228)(s + 0.2816)(s + 0.0002156)} e^{-0.561s}}{0.0051653 \frac{s + 0.1163}{(s + 2.25)(s + 0.1213)(s + 0.008615)}} \\ G_{P1} &= -7.2668 \frac{(s + 2.25)(s + 0.1213)(s + 0.008615)(s - 0.006632)}{(s + 1.228)(s + 0.2816)(s + 0.1163)(s + 0.0002156)} e^{-0.561s} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Nuevamente para validar el resultado de los modelos obtenidos, se estimula el sistema mediante la aplicación de un escalón al igual que en diagrama del modelo mostrado en la Figura 3.13, de esta forma se tiene

el sistema mostrado en la Figura 3.19, cuyas señales obtenidas mediante simulación se muestra en la Figura 3.20, de la cual se puede observar que la forma de las variables del proceso son iguales a las mostradas en la simulación del modelo de la planta  $G_P$  (Figura 3.14). Con esta estructura de diagrama de bloques, se tiene la variable de presión de entrada de vapor en el intercambiador.

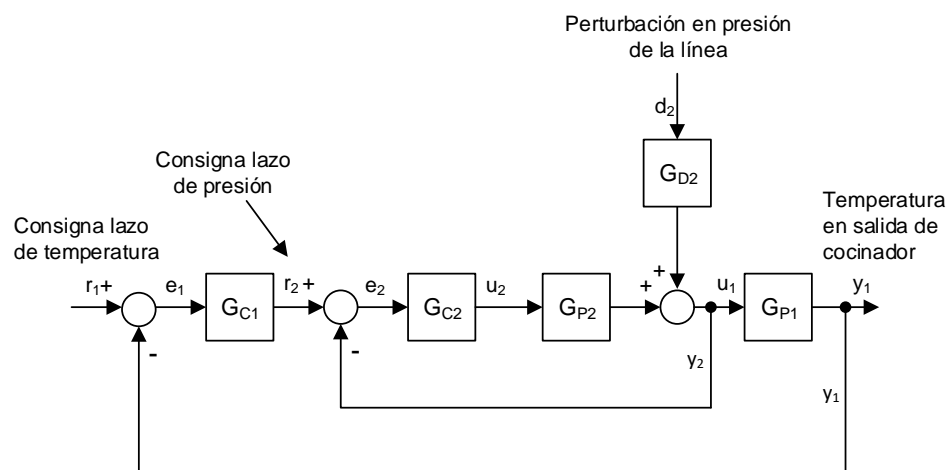


**Figura 3.19** Diagrama de bloques del sistema con control por realimentación de temperatura utilizando los modelos  $G_{P1}$  y  $G_{P2}$ .



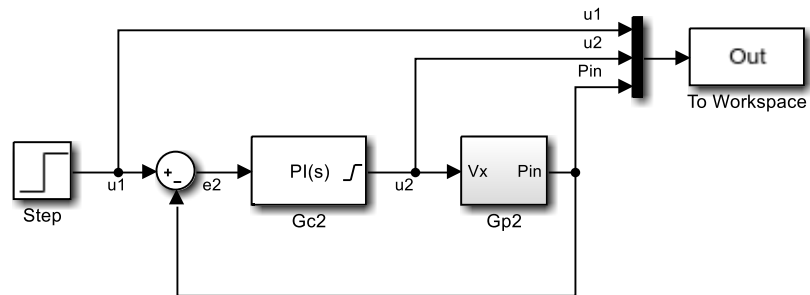
**Figura 3.20** Simulación del sistema con control por realimentación de temperatura, con modelos de planta  $G_{P1}$  y  $G_{P2}$ .

Definidos los modelos  $G_{P1}$  y  $G_{P2}$  de la planta, se procede con el diseño de los controladores de cada lazo, de acuerdo al diagrama mostrado en la Figura 3.15. Para simplificar el diseño, se asume realimentación unitaria para los lazos de control externo e interno, de esta forma el modelo se reduce a:



**Figura 3.21 Diagrama de bloques del diseño de los lazos de control en cascada.**

Para obtener el controlador de cada lazo, se utiliza un método que consiste en sintonizar el bloque de control del lazo interno hasta obtener la respuesta dinámica deseada, para luego sintonizar el bloque de control del lazo externo. Para obtener esto se simula el lazo de control interno (Figura 3.22).



**Figura 3.22 Diagrama de bloques para obtención de parámetros del controlador del lazo interno.**

Dado que el modelo de la planta  $G_{P2}$  mostrado en la ecuación (3.8) no contiene retardos, se decide utilizar un controlador tipo PI. Para sintonizar el controlador  $G_{C2}$  se ha recurrido a la herramienta de sintonización PID Tuner (Figura 3.23), la cual facilita la manipulación de los parámetros del controlador para obtener el comportamiento del sistema de acuerdo a lo que se desea.

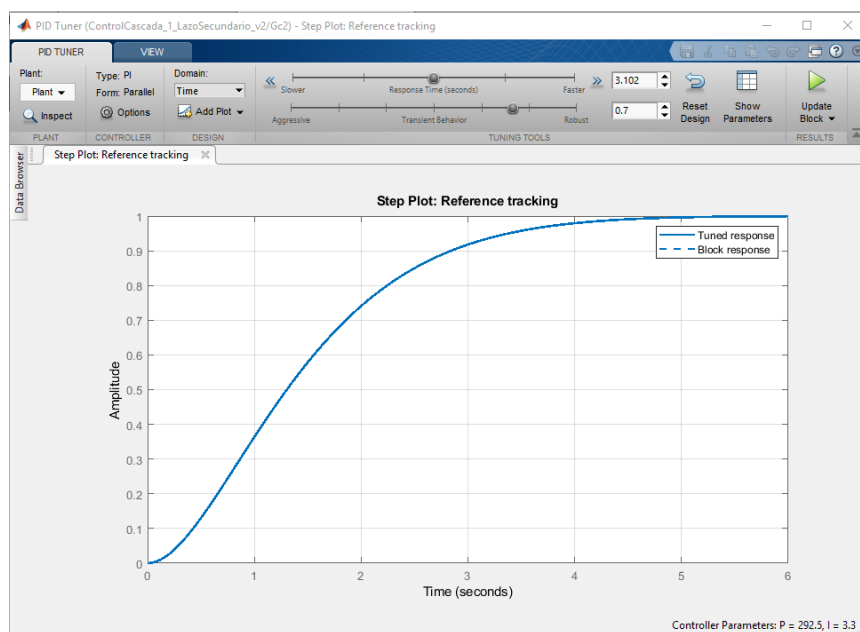
Una vez obtenido el comportamiento deseado, en este caso para el controlador del lazo interno, diseñado bajo las especificaciones de no tener ningún sobre nivel y el menor tiempo de subida, se obtiene el controlador de la siguiente forma:

$$G_{C2}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (3.11)$$

Donde:

$$K_p = 292$$

$$K_i = 3.3$$



**Figura 3.23 Sintonización de  $G_{C2}$  con Herramienta PID Tuner de MATLAB.**

Las características del lazo de control con el controlador obtenido (3.11), se muestran a continuación:

Característica	Valor
Tiempo de subida	2.42 s
Tiempo de establecimiento	4.02 s
Sobre disparo	0 %
Pico	1
Margen de ganancia	Inf dB @ Inf rad/s
Margen de fase	74.2 deg @ 0.645 rad/s

**Tabla 3.1 Desempeño del controlador  $G_{C2}$ .**

A continuación, se presenta la simulación del lazo de control interno del controlador cascada:

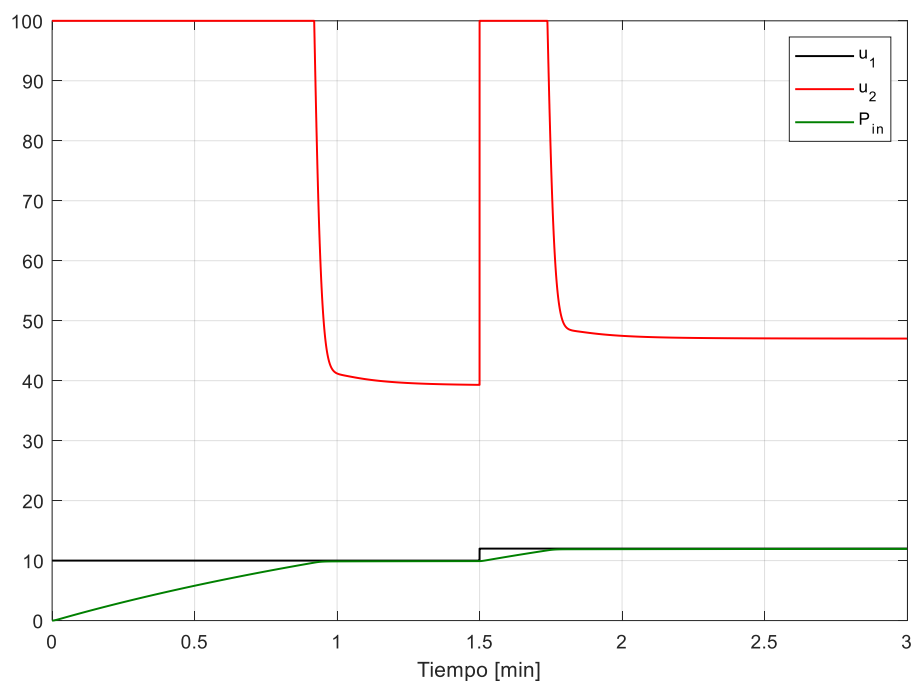


Figura 3.24 Simulación de lazo interno con modelo de planta  $G_{P2}$ .

Una vez sintonizado el lazo de control interno, se procede a sintonizar de igual manera el lazo externo con el sistema completo como se muestra en la Figura 3.25.

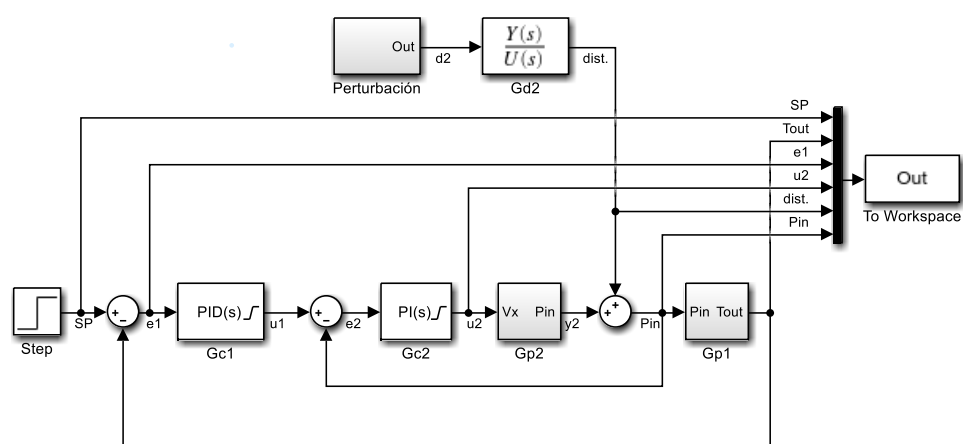
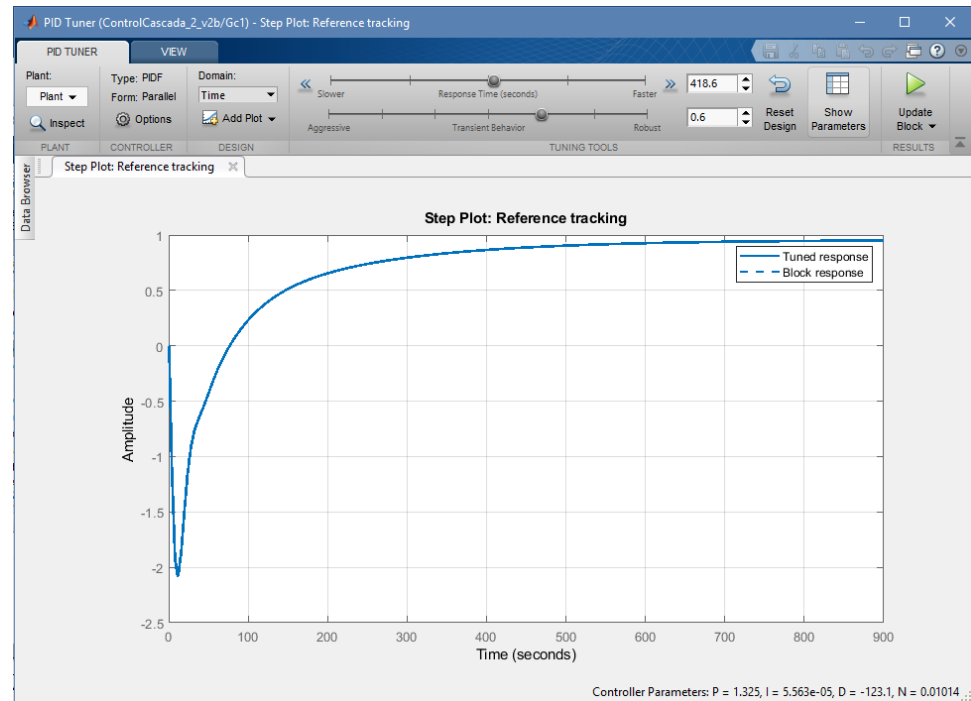


Figura 3.25 Diagrama de bloques completo del sistema de control en cascada



En la Figura 3.26 se muestra el resultado obtenido con la herramienta PID Tuner para el controlador  $G_{C1}$  del lazo de control externo que controla la temperatura.



**Figura 3.26 Sintonización de  $G_{C1}$  con Herramienta PID Tuner de MATLAB.**

Como resultado de la sintonización se obtiene el controlador  $G_{C1}$  de la siguiente forma:

$$G_{C1}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{T_f s + 1} \quad (3.12)$$

Donde:

$$K_p = 1.32543$$

$$K_i = 6.15e-5$$

$$K_d = -123.08$$

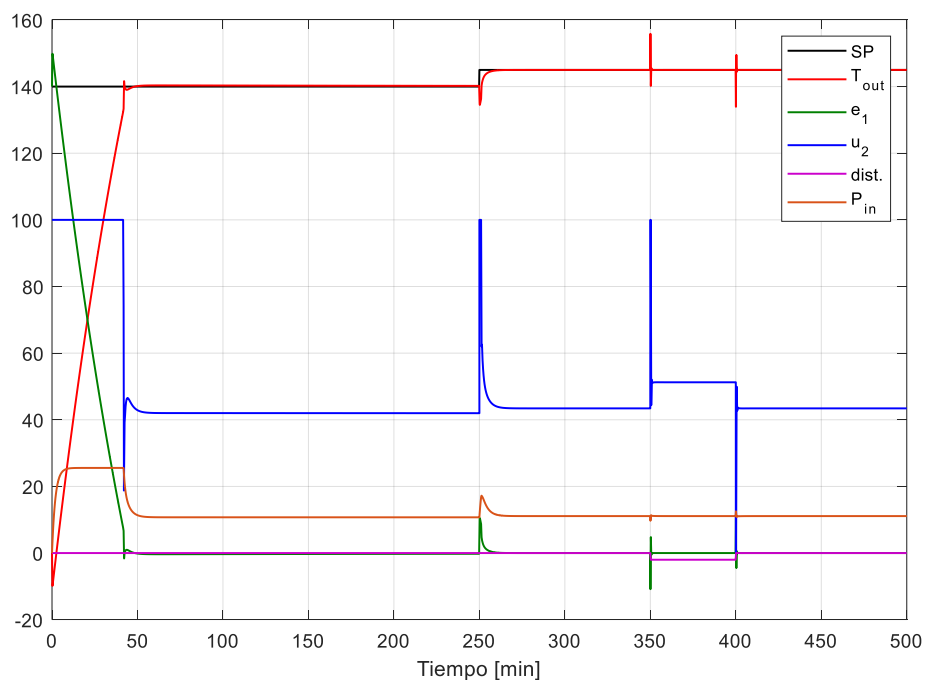
$$T_f = 98.6$$

Las características del lazo de control con el controlador obtenido (3.12), se muestran a continuación:

Característica	Valor
Tiempo de subida	397 s
Tiempo de establecimiento	679 s
Sobre disparo	0 %
Pico	2.09
Margen de ganancia	3.05 dB @ 0.0974 rad/s
Margen de fase	59.9 deg @ 0.00478 rad/s

**Tabla 3.2 Desempeño del controlador  $G_{c1}$ .**

De esta forma a continuación se presenta el resultado de la simulación del sistema completo:

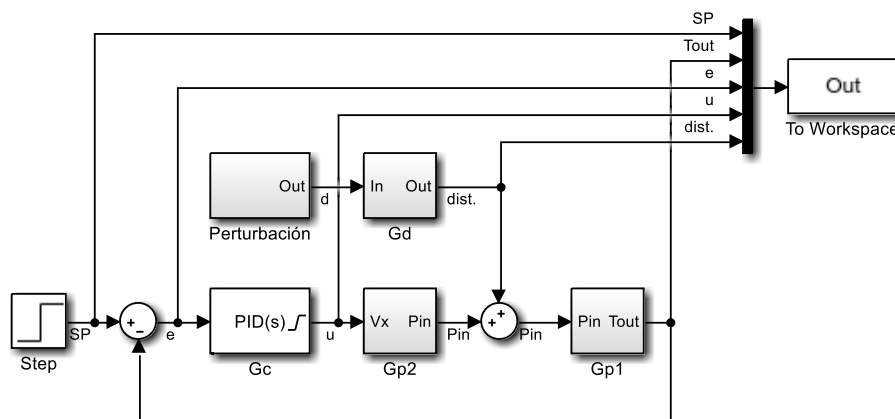


**Figura 3.27 Simulación de sistema de control en cascada con lazos de control interno y externo sintonizados.**

### 3.3. Diseño de controlador anticipativo

Para diseñar un controlador anticipativo para el sistema de estudio (Figura 3.1), se debe establecer la variable correspondiente a la perturbación que se puede medir para en una fase temprana del proceso, de modo que mientras más distante este de la fase final del proceso mejor resultado se puede obtener. En este caso se tiene como perturbación de carga al sistema las variaciones de presión en la línea de entrada de vapor al cocinador K-20, esta presión es medida por sensor/transmisor de presión PT101 (Figura 1.1).

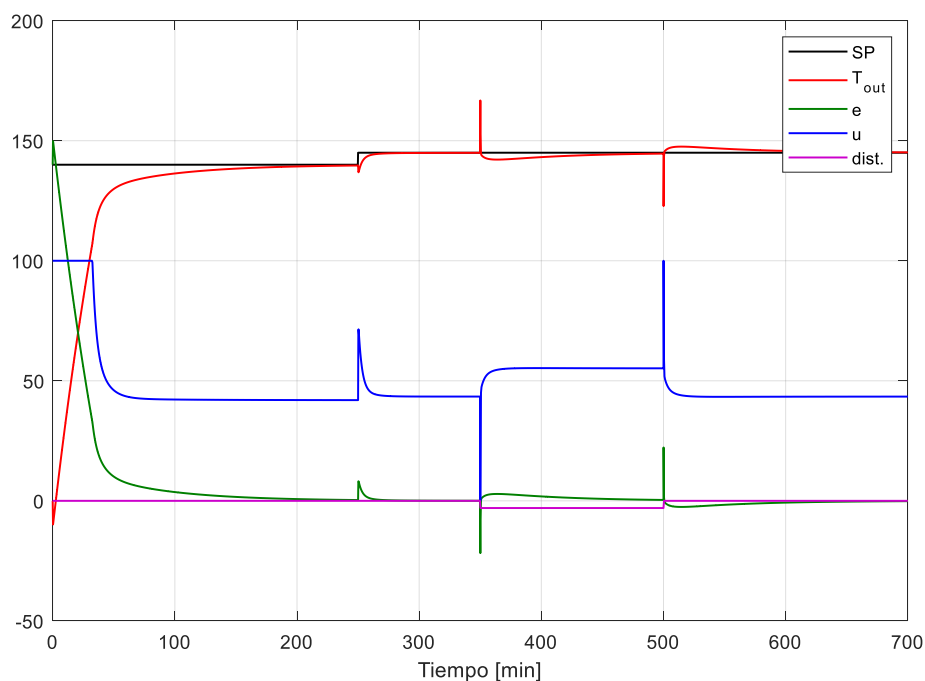
Teniendo en cuenta esta variable, se recurre al diagrama de bloques de la Figura 3.19 donde se agrega la perturbación de carga con su respectiva función de transferencia, el diagrama de bloques del sistema con la perturbación de carga queda de la siguiente forma:



**Figura 3.28 Diagrama de bloques de planta con perturbación de carga en presión de entrada de vapor a cocinador.**

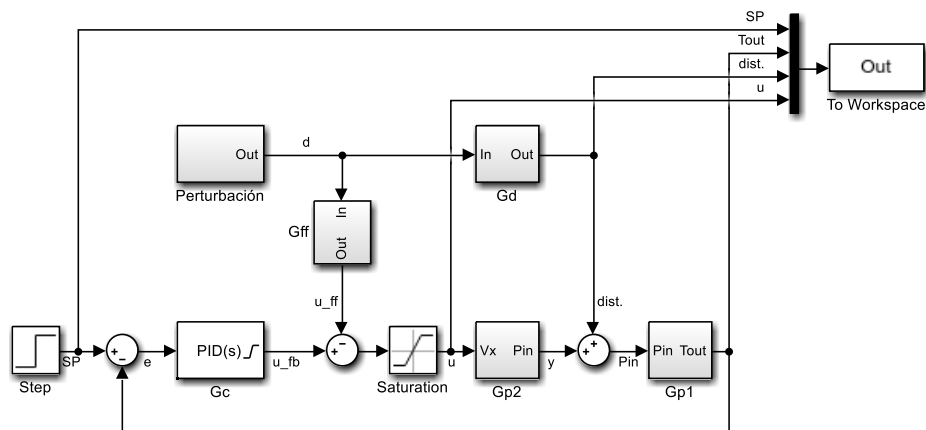
En los resultados de la simulación (Figura 3.29) del diagrama de bloques mostrado en la figura anterior, se puede observar la respuesta de un lazo cerrado de control con perturbación de carga aplicada en la señal correspondiente a la presión de la entrada de vapor del cocinador. Dicha perturbación es evidenciada en la temperatura de salida del proceso pues

el control por realimentación primero debe detectar el cambio de temperatura para efectuar una corrección en la apertura de la válvula y poder compensar el error, permitiendo corregir únicamente con la misma respuesta dinámica que responde el controlador  $G_C$  ante un cambio de referencia.



**Figura 3.29 Simulación de planta con perturbación de carga en presión de entrada de vapor a cocinador.**

Dado que la variación de temperatura es visiblemente significativa, se establece un control anticipativo con la presión de la entrada de vapor, siguiendo los lineamientos del capítulo anterior (Figura 2.10), se diagrama el control anticipativo como se muestra en la Figura 3.30.



**Figura 3.30 Diagrama de bloques de control anticipativo para reducir perturbación de carga por variación de presión en entrada de vapor.**

Para diseñar el controlador anticipativo  $G_{FF}$ , se recurre a la ecuación (2.22), donde se teniendo el modelo de la planta  $G_{P2}$  y la función de transferencia de la perturbación  $G_D$ , se obtiene la función de transferencia del controlador anticipativo:

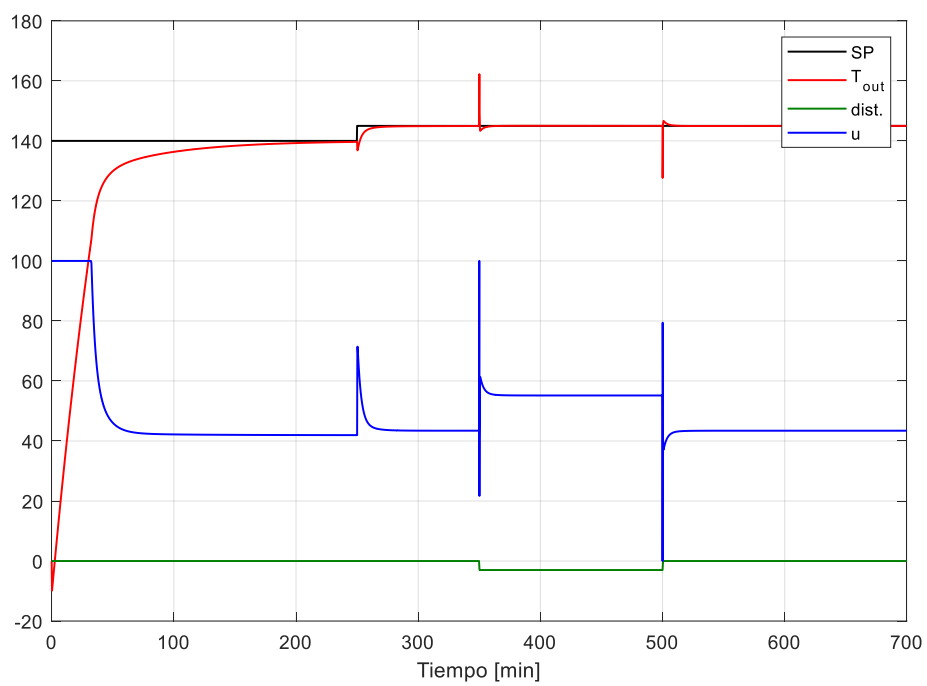
$$G_{ff}(s) = \frac{G_d(s)}{G_{p2}(s)}$$

$$G_{ff}(s) = \frac{\frac{1}{s^2 + 2s + 1}}{0.0051653 \frac{s + 0.1163}{(s + 2.25)(s + 0.1213)(s + 0.008615)}}$$

$$G_{ff}(s) = \frac{425.4s^3 + 1012s^2 + 124.8s + 1}{2.197s^3 + 4.65s^2 + 2.709s + 0.2555}$$

(3.13)

De esta forma el resultado de la simulación del control anticipativo se muestra en la Figura 3.31.



**Figura 3.31 Simulación de controlador anticipativo.**

## CAPITULO 4

### 4. ANALISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS CONTROLADORES

#### 4.1. Presentación de resultados

Para analizar el desempeño de los controladores, es necesario establecer las especificaciones bajo las cuales estos serán comparados.

Para el presente análisis se utilizarán métodos de cálculo integral del error como indicadores de desempeño, su resultado es un valor numérico que refleja la magnitud del error obtenido en de la respectiva simulación del sistema de control.

Entre los indicadores de desempeño por calculo integral del error, están las siguientes operaciones:

IAE: Integral del valor absoluto del error

ITAE: Integral del tiempo por valor absoluto del error

ISE: Integral del cuadrado del error

También es importante destacar que se recomienda medir no solo el desempeño del cambio de la referencia, también el desempeño del controlador ante las perturbaciones de carga.

En los siguientes casos a evaluarse, se consideran dos escenarios con cada sistema de control diseñado en el capítulo anterior.

El primer escenario a considerar es la respuesta del sistema de control de temperatura ante un cambio de referencia, en este caso, la consigna de temperatura del producto que sale del cocinador se cambiará de 140°C a 145°C (variación de 3.57 %) que representa la máxima variación que el

operador del cocinador puede hacer, el resto de ajustes son de menor magnitud alrededor de ese rango de temperaturas.

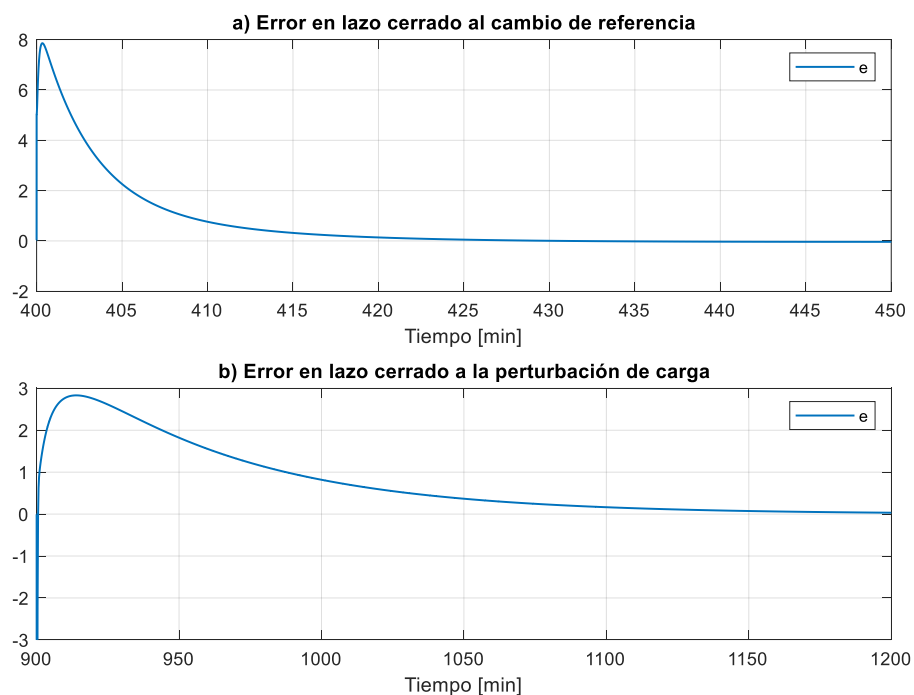
El segundo escenario es la respuesta del mismo sistema de control de temperatura, bajo las mismas condiciones de operación, ante una perturbación de carga, la perturbación aplicada corresponde a una caída de presión en la línea de alimentación de vapor, la presión nominal de la línea de vapor es de 15 bar, se simula una caída de presión de 3 bar (variación de 20 %).

En ambos escenarios se evaluará los indicadores IAE, ITAE e ISE para determinar la estrategia de control que mejor rechaza los cambios de referencia y las perturbaciones de carga.



#### 4.2. Análisis de resultados de desempeño de controlador de un solo lazo

A continuación, se evalúan los indicadores de desempeño para los dos escenarios planteados anteriormente para el sistema de control de un solo lazo de realimentación.



**Figura 4.1 Señales de error de los escenarios del sistema de control con un solo lazo realimentado.**

En la figura anterior se observa la señal de error para el escenario en que se cambia la referencia (a) y con la perturbación de carga (b).

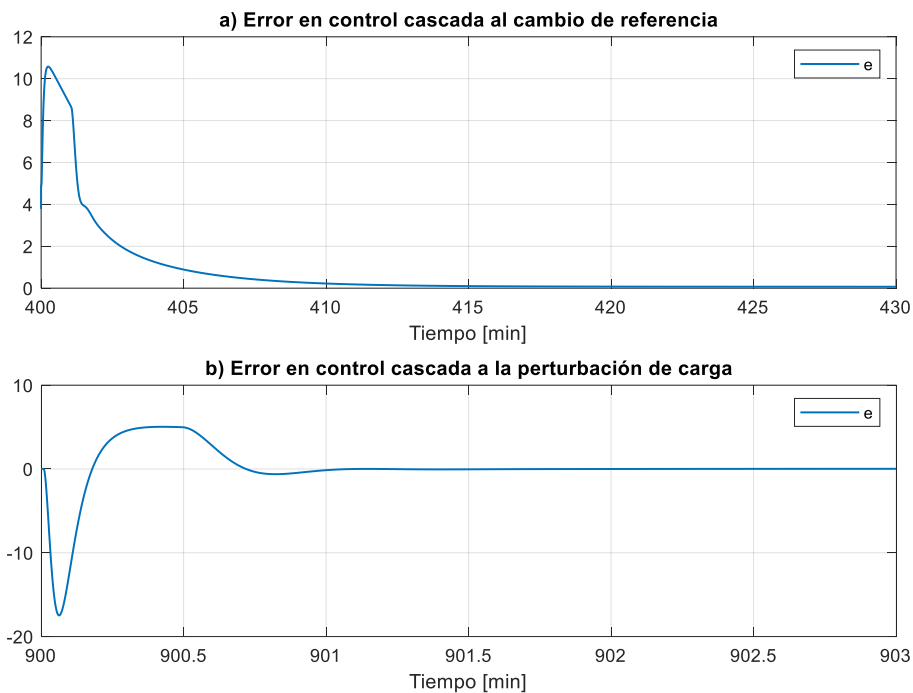
Los resultados obtenidos después de seleccionar el origen y final de los datos para calcular son:

Indicador	Cambio de referencia	Perturbación de carga
IAE	2211.76	13948.08
ISE	8145.00	26230.43
ITAE	1302242.90	53653448.63

**Tabla 4.1 Indicadores de desempeño de sistema de control con un lazo realimentado**

#### **4.3. Análisis de resultados de desempeño de controlador de lazo en cascada**

A continuación, se evalúan los indicadores de desempeño para los dos escenarios planteados anteriormente para el sistema de control de un solo lazo de realimentación.



**Figura 4.2 Señales de error de los escenarios del sistema de control con control en cascada.**

En la figura anterior se observa la señal de error para el escenario en que se cambia la referencia (a) y con la perturbación de carga (b).

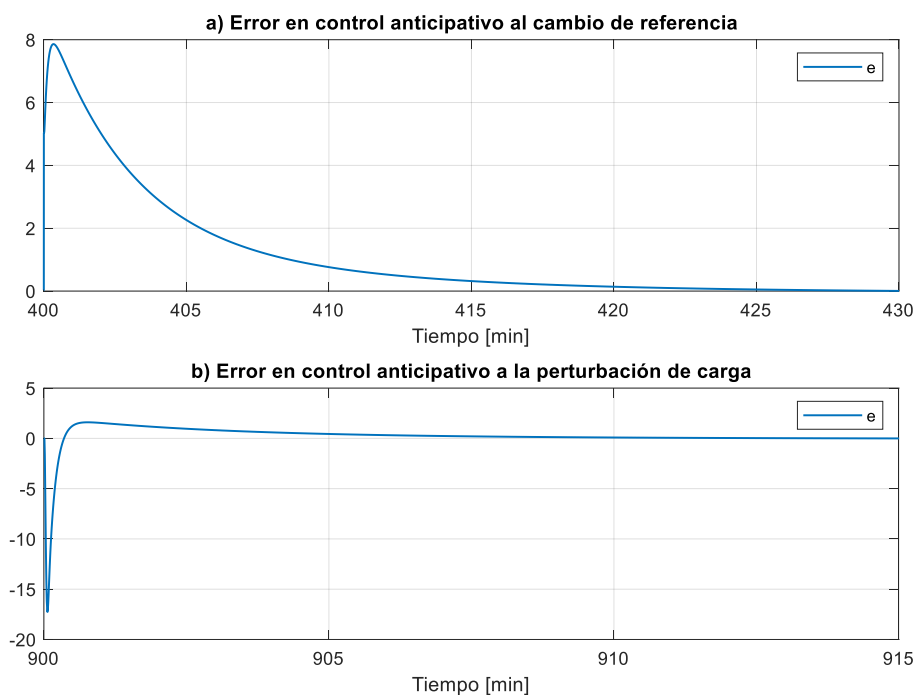
Los resultados obtenidos después de seleccionar el origen y final de los datos para calcular son:

Indicador	Cambio de referencia	Perturbación de carga
IAE	1400.29	216.22
ISE	7694.75	1680.93
ITAE	276863.38	3948.31

**Tabla 4.2 Indicadores de desempeño de sistema de control con control en cascada**

#### 4.4. Análisis de resultados de desempeño de controlador anticipativo

A continuación, se evalúan los indicadores de desempeño para los dos escenarios planteados anteriormente para el sistema de control de un solo lazo de realimentación.



**Figura 4.3 Señales de error de los escenarios del sistema de control con control anticipativo.**

En la figura anterior se observa la señal de error para el escenario en que se cambia la referencia (a) y con la perturbación de carga (b).

Los resultados obtenidos después de seleccionar el origen y final de los datos para calcular son:

Indicador	Cambio de referencia	Perturbación de carga
IAE	2211.85	477.89
ISE	8145.42	1763.09
ITAE	1302279.41	77255.60

**Tabla 4.3 Indicadores de desempeño de sistema de control con control anticipativo.**

#### 4.5. Análisis comparativo de resultados

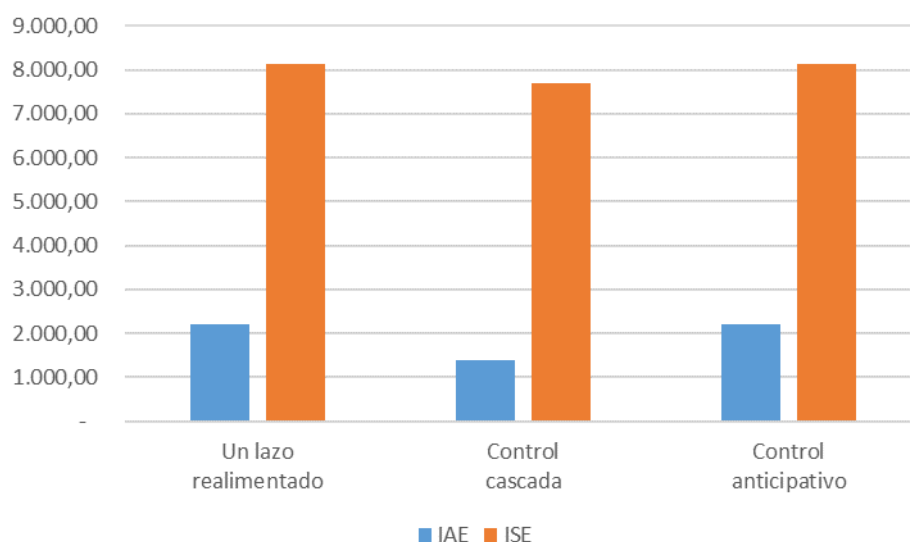
A continuación, se comparará los resultados obtenidos de los indicadores de desempeño.

En la Tabla 4.4 se muestran los indicadores de desempeño evaluados en el escenario del cambio de referencia con los distintas estrategias de control.

Indicador	Un lazo realimentado	Control cascada	Control anticipativo
IAE	2.211,76	1.400,29	2.211,85
ISE	8.145,00	7.694,75	8.145,42
ITAE	1.302.242,90	276.863,38	1.302.279,41

**Tabla 4.4 Indicadores de desempeño ante el cambio de referencia.**

En la Figura 4.4 se observa que los indicadores del control en cascada son los que tienen menor valor integral de error en los tres tipos de índices, que los del control por lazo realimentado. También se observa que los indicadores de desempeño del control anticipativo son de similar magnitud a los del lazo realimentado.



**Figura 4.4 Comparación de desempeño de sistemas de control ante el cambio de referencia.**

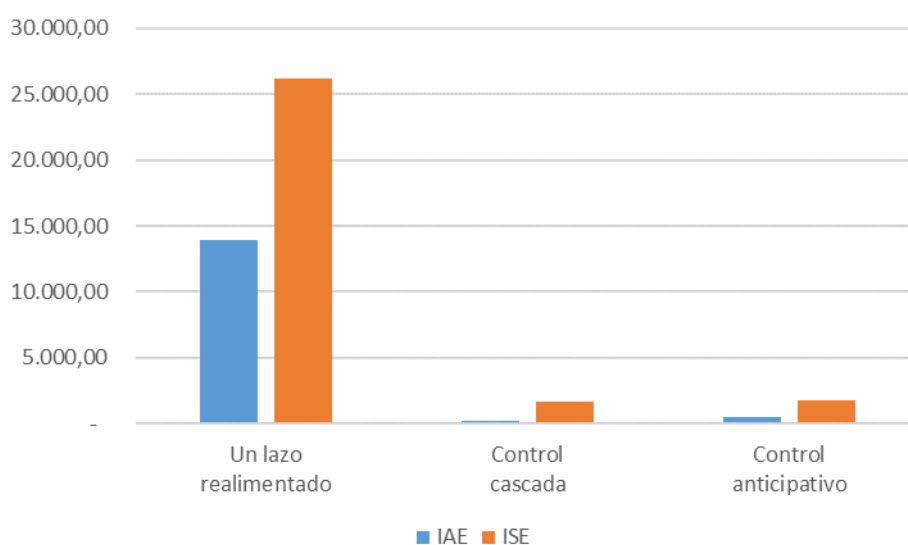
En la Tabla 4.5 se muestran los indicadores de desempeño evaluados en el escenario de la aplicación de una perturbación de carga con los distintas estrategias de control.

Indicador	Un lazo realimentado	Control cascada	Control anticipativo
IAE	13.948,08	216,22	477,89
ISE	26.230,43	1.680,93	1.763,09
ITAE	53.653.448,63	3.948,31	77.255,60

**Tabla 4.5 Indicadores de desempeño ante una perturbación de carga.**

En la Figura 4.5 se observa que tanto los indicadores del control en cascada como los de control anticipativo son de menor valor integral de error en los tres tipos de índices, que los del control por lazo realimentado. También se observa que los indicadores de desempeño del control en

cascada son de menor magnitud que los indicadores del control anticipativo.



**Figura 4.5 Comparación de desempeño de sistemas de control ante una perturbación de carga.**

Con la comparación de los sistemas de control se puede evidenciar que los sistemas de control por cascada y anticipativo tienen mejor rendimiento al mantener un menor error ante las eventualidades de un cambio de referencia y una perturbación de carga.

Sin embargo, cabe destacar que el control en cascada mantuvo mejor desempeño en los dos escenarios evaluados, mientras que el control anticipativo solo mitiga de forma efectiva el error ante la perturbación de carga.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El control en cascada es por mucho el controlador que para el proceso de estudio tiene mejor desempeño en mantener una respuesta con bajo error en la salida de temperatura.

El controlador anticipativo es efectivo para reducir el impacto de las variaciones de las demás variables de proceso que puedan ser fuente de perturbación.

Se recomienda la implementación de sistemas de control en cascada para controlar la temperatura en cocinadores de tipo continuo, donde la acción de calentamiento o enfriamiento está asociada a subprocesos de alta dinámica, como en este caso lo es por calentamiento con vapor.

Con la medición de flujo de vapor en la entrada se puede tener una mejor respuesta en el lazo de control interno pues está vinculada directamente con la velocidad de la acción de calentamiento. Realizar el lazo de control interno con medición de presión en la entrada de vapor en algunos casos no es la mejor variable que se puede disponer para controlar la temperatura de un intercambiador, es una alternativa económicamente menos costosa para invertir y mecánicamente más fácil de implementar.

Otra alternativa de control anticipativo se puede efectuar con la medición del flujo de jarabe de caramelo en primera instancia con un caudalímetro másico para compensar de forma precisa el flujo de vapor a ingresar al cocinador, dado el costo de estos equipos también se puede estimar con un caudalímetro volumétrico, una última alternativa aunque menos precisa pero también válida y muy fácil de implementar, es utilizar la velocidad actual de la bomba que impulsa el jarabe de caramelo desde el variador de velocidad que acciona dicha bomba.



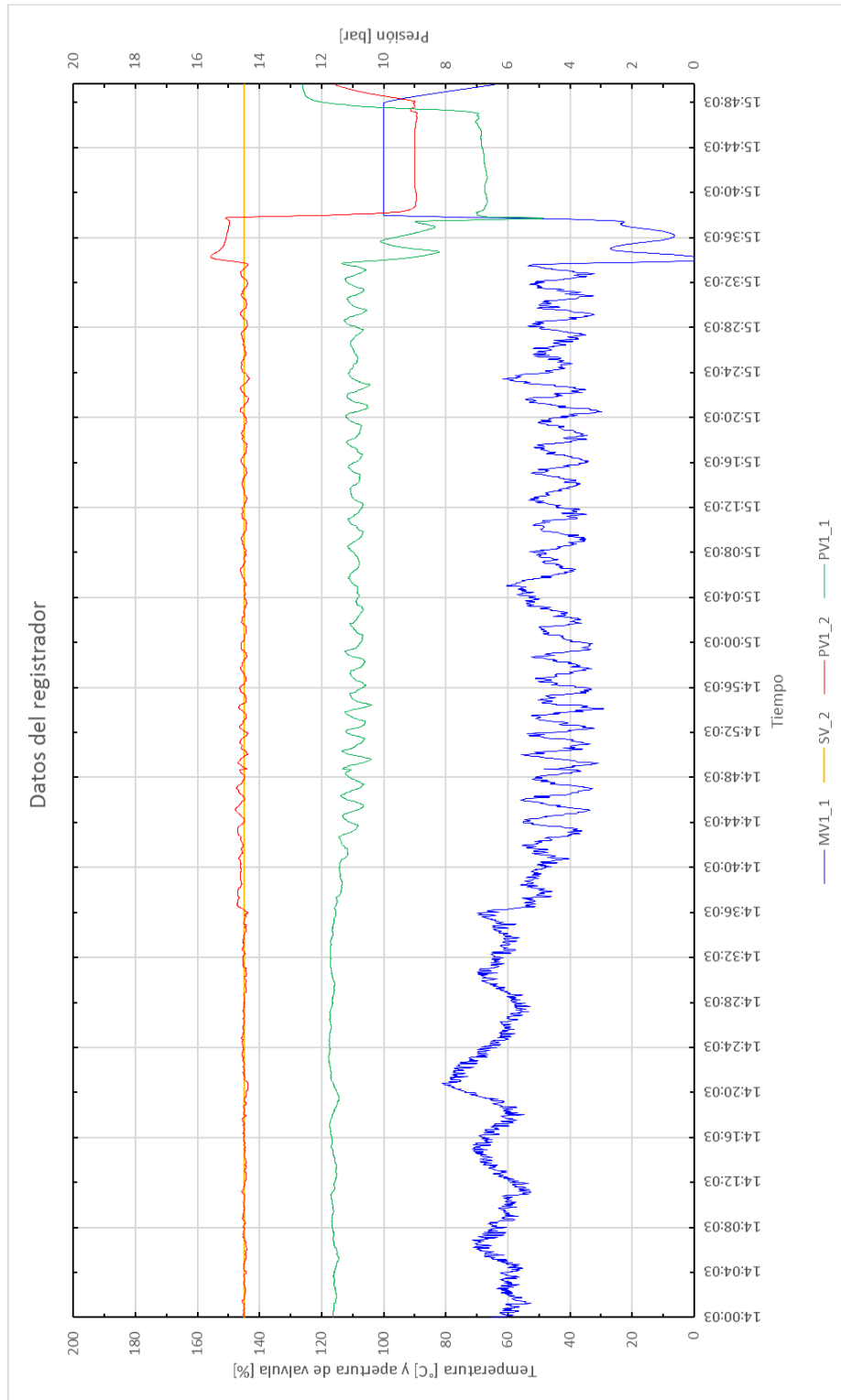
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Isermann y M. Munchhof, Identification of dynamical systems: an introduction with applications, Berlin: Springer, 2011.
- [2] K. J. Åström y R. M. Murray, Feedback systems: an introduction for scientists and engineers, Princeton: Princeton University Press, 2008.
- [3] C. A. Smith y W. C. Scott, A first course in differential equations, modeling, and simulation, Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- [4] C. A. Smith y A. B. Corripio, Principles and practice of automatic process control, Hoboken, NJ: Wiley, 2006.
- [5] L. Ljung, System identification: theory for the user, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999.
- [6] K. J. Keesman, System identification: an introduction, London New York: Springer, 2011.
- [7] R. C. Dorf y R. H. Bishop, Modern Control Systems, Harlow: Pearson Education, 2017.
- [8] K. J. Åström y T. Hägglund, Control PID avanzado, Madrid: Pearson, 2009.
- [9] K. J. Åström y T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, North Carolina: ISA, Instrumentation Society of America, 1995.
- [10] A. Dwyer, Handbook of PI and PID controller tuning rules, London: Imperial College Press Distributed by World Scientific Pub. Co, 2009.

- [11] A. Visioli, Practical PID control, London: Springer, 2006.
- [12] R. W. Hartel, J. H. Elbe y R. Hofberger, Confectionery science and technology, Cham: Springer, 2018.
- [13] J. Graf, PID Control Fundamentals, Columbia: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.
- [14] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [15] C. A. Smith, A. B. Corripio y S. D. Basurto, Control automático de procesos: teoría y práctica, México: Limusa Grupo Noriega, 1999.
- [16] I. Azuaje, M. Miranda, E. Iglesias, O. Camacho y Y. García, «Sistema de Información Científica Redalyc,» Sistema de Información Científica Redalyc, 2018. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5075/507555109004/html/index.html>. [Último acceso: 3 Marzo 2019].

## **ANEXOS**

- Gráfico de los datos del software registrador del que se tomaron las muestras



- Hoja de datos de controlador PID BRAINCHILD BRC9600 (TIC101 y PIC101)

# Fuzzy + PID Process / Temperature Controller



## FEATURES

- High accuracy 18-bit input A-D
- High accuracy 15-bit output D-A
- Fast input sample rate ( 5 times / second)
- Basic & full function
- User menu configurable
- Pump control
- Fuzzy+PID microprocessor-based control
- Automatic programming
- Differential control
- Auto-tune function
- Self-tune function
- Sleep mode function
- "Soft-start" ramp and dwell timer
- Programmable inputs ( thermocouple, RTD, mA, VDC )
- Analog input for remote set point and CT
- Event input for changing function & set point
- Programmable digital filter
- Hardware lockout + remote lockout protection
- Loop break alarm
- Heater break alarm
- Sensor break alarm + Bumpless transfer
- RS-485, RS-232 communication
- Analog retransmission
- Signal conditioner DC power supply
- A wide variety of output modules available
- Safety UL / CSA / IEC1010-1
- EMC / CE EN 61326



BTC-4300



BTC-8300



BTC-9300



BTC-2500

**BrainChild**



The Fuzzy Logic plus PID microprocessor-based controller series, incorporates a bright, easy to read 4-digit LED display, indicating process value and set point value. The Fuzzy Logic technology enables a process to reach a predetermined set point in the shortest time, with the minimum of overshoot during power-up or external load disturbance.

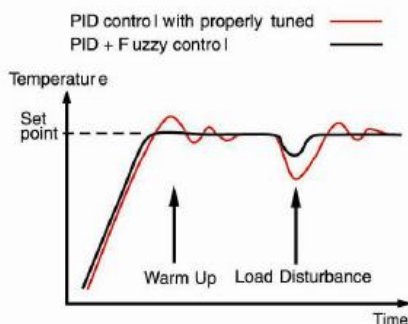
BTC-9300 is a 1/16 DIN size panel mount controller,  
 BTC-2500 is a 1/32 DIN size panel mount controller,  
 BTC-8300 is a 1/8 DIN size panel mount controller  
 and BTC-4300 is a 1/4 DIN size panel mount controller.

These units are powered by 11-26 VDC or 90-264 VAC supply, incorporating a 2 amp. control relay output as standard. Alternative output options include triac, 5V logic output, linear current and linear voltage. The units are fully programmable for PT100 and thermocouple types J, K, T, E, B, R, S, N, L with no need to modify the unit. The input signal is digitized by using a 18-bit A to D converter. Its fast sampling rate allows the unit to control fast processes.

Digital communications RS-485 or RS-232 are available as an additional option. These options allow the units to be integrated with supervisory control system and software.

A programming port is available for loading the configuration data with no need to use the keypads on front panel.

By using proprietary Fuzzy modified PID technology, the control loop will minimize the overshoot and undershoot in the shortest time. The following diagram is a comparison of results with and without Fuzzy technology.



#### High Accuracy

The series are manufactured with custom designed ASIC (Application Specific Integrated Circuit) technology which contains a 18-bit A to D converter for high resolution measurement ( true 0.1°F resolution for thermocouple and PT100 ) and a 15-bit D to A converter for linear current or voltage control output. The ASIC technology provides improved operating performance, low cost, enhanced reliability and higher density.

#### Fast Sampling Rate

The sampling rate of the input A to D converter reaches 5 times/second. The fast sampling rate allow sthis series to control fast processes.

## Overview

### Fuzzy Control

The function of Fuzzy control is to adjust PID parameters from time to time in order to making manipulation output value more flexible and adaptive to various processes. The results is to enable a process to reach a predetermined set point in the shortest time, with the minimum of overshoot and undershoot during power-up or external load disturbance.

### Digital Communication

The units are equipped with RS-485 or RS-232 interface card to provide digital communication. By using the twisted pair wires there are at most 247 units can be connected together via RS-485 interface to a host computer.

### Programming Port

A programming port is used to connect the unit to a PC for quick configuration, also can be connected to an ATE system for automatic testing & calibration.

### Auto-tune

The auto-tune function allows the user to simplify initial setup for a new system. A clever algorithm is provided to obtain an optimal set of control parameters for the process, and it can be applied either as the process is warming up ( cold start ) or as the process has been in steady state ( warm start ).

### Lockout Protection

The parameters can be locked to prevent from being changed by using either Hardware lockout or Remote lockout or both.

### Bumpless Transfer

Bumpless transfer allows the controller to continue to control by using its previous value as the sensor breaks. Hence, the process can be well controlled temporarily as if the sensor is normal.

### Soft-start Ramp

The ramping function is performed during power up as well as any time the set point is changed. It can be ramping up or ramping down. The process value will reach the set point with a predetermined constant rate.

### Digital Filter

A first order low pass filter with a programmable time constant is used to improve the stability of process value. This is particularly useful in certain application where the process value is too unstable to read.

### SEL Function

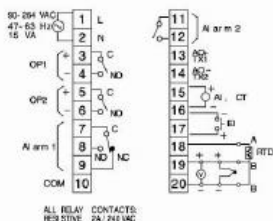
The units have the flexibility for user to select those parameters which is most significant to him and put these parameters in the front of display sequence. There are at most 5 parameters can be selected to allow the user to build his own display sequence.

### Pump Control

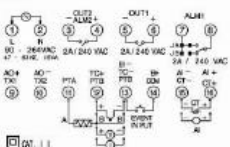
Only the superior noise rejection capability in addition to the fast sampling rate owned by this series of controllers can control the water pressure in a pump system which is driven by a variable speed motor.

**Connection Diagrams**

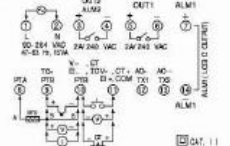
**BTC-4300, BTC-8300**



**BTC-9300**



**BTC-2500**



**Specifications**

**Power**

90 - 264 VAC, 47 63 Hz, 15VA, 7W maximum  
 11 - 26 VAC / VDC, 15VA, 7W maximum

**Input 1**

**Characteristics :**

Type	Range	Accuracy @25°C	Input Impedance
J	-120°C -1000°C (-184°F -1832°F)	±2°C	2.2M
K	-200°C -1370°C (-328°F -2498°F)	±2°C	2.2M
T	-250°C -400°C (-418°F -752°F)	±2°C	2.2M
E	-100°C -900°C (-148°F -1652°F)	±2°C	2.2M
B	0°C -1820°C (32°F -3308°F)	±2°C (200°C - 1820°C)	2.2M
R	0°C -1767.8°C (32°F -3214°F)	±2°C	2.2M
S	0°C -1767.8°C (32°F -3214°F)	±2°C	2.2M
N	-250°C -1300°C (-418°F -2372°F)	±2°C	2.2M
L	-200°C -900°C (-328°F -1652°F)	±2°C	2.2M
PT100 (DIN)	-210°C -700°C (-348°F -1292°F)	±0.4°C	1.3K
PT100 (JIS)	-200°C -600°C (-328°F -1112°F)	±0.4°C	1.3K
mV	-8mV -70mV	±0.05%	2.2M
mA	-3mA -27mA	±0.05%	70.5
V	-1.3V -11.5V	±0.05%	302K

**Resolution : 18 bits**

**Sampling Rate : 5 times / second**

**Maximum Rating : -2 VDC minimum, 12 VDC maximum**  
 ( 1 minute for mA input )

**Temperature Effect : ±1.5 uV/ °C for all inputs except mA**  
 input ±3.0 uV/ °C for mA input

**Sensor Lead Resistance Effect :**

T/C: 0.2uV/ohm

3-wire RTD: 2.6 °C/ohm of resistance difference of two leads

2-wire RTD: 2.6 °C/ohm of resistance sum of two leads 200nA

**Common Mode Rejection Ratio ( CMRR ) : 120dB**

**Normal Mode Rejection Ratio ( NMRR ) : 55dB**

**Sensor Break Detection :**

Sensor open for TC, RTD and mV inputs,

below 1 mA for 4-20 mA input,

below 0.25V for 1 - 5 V input, unavailable for other inputs.

**Sensor Break Responding Time :**

Within 4 seconds for TC, RTD and mV inputs,

0.1 second for 4-20 mA and 1 - 5 V inputs.

**Input 2**

**Resolution : 18 bits**

**Sampling Rate : 1.66 times / second**

**Maximum Rating : -2 VDC minimum, 12 VDC maximum**

**Temperature Effect : ±1.5uV/ °C for all inputs except mA**

input ±3.0uV/ °C for mA input

**Common Mode Rejection Ratio ( CMRR ) : 120dB**

**Normal Mode Rejection Ratio ( NMRR ) : 55dB**

**Sensor Break Detection :** Below 1 mA for 4-20 mA input,

below 0.25V for 1 - 5V input,

unavailable for other inputs.

**Sensor Break Responding Time : 0.5 second**

**Characteristics :**

Type	Range	Accuracy @25°C	Input Impedance
CT94-1	0-50.0 A	±2% of Reading ±0.2 A	302 K
mA	-3mA-27mA	±0.05%	70.5 + $\frac{0.8V}{\text{input current}}$
V	-1.3V-11.5V	±0.05%	302 K

**Input 3 (Event Input)**

**Logic Low : -10V minimum, 0.8V maximum.**

**Logic High : 2V minimum, 10V maximum**

**External pull-down Resistance : 400 K maximum**

**External pull-up Resistance : 1.5 M minimum**

**Functions :**

Select second set point and/or PID , reset alarm 1 and/or alarm 2 , disable output 1 and/or output 2 , remote lockout.

**Output 1 / Output 2**

**Relay Rating : 2A/240 VAC, life cycles 200,000 for resistive load**

**Pulsed Voltage : Source Voltage 5V, current limiting resistance 66 Ω**

**Linear Output Characteristics**

Type	Zero	Span	Load Capacity
	Tolerance	Tolerance	
4-20 mA	3.6-4 mA	20-21 mA	500 max.
0-20 mA	0 mA	20-21 mA	500 max.
0-5 V	0 V	5-5.25 V	10K min.
1-5 V	0.9-1 V	5-5.25 V	10K min.
0-10 V	0 V	10-10.5 V	10K min.

**Linear Output**

**Resolution : 15 bits**

**Output Regulation : 0.01 % for full load change**

**Output Settling Time : 0.1 sec. ( stable to 99.9 % )**

**Isolation Breakdown Voltage : 1000 VAC**

**Temperature Effect : ±0.0025 % of SPAN / °C**

**Triac ( SSR ) Output**

**Rating :** 1A / 240 VAC  
**Inrush Current :** 20A for 1 cycle  
**Min. Load Current :** 50 mA rms  
**Max. Off-state Leakage :** 3 mA rms  
**Max. On-state Voltage :** 1.5 V rms  
**Insulation Resistance :** 1000 Mohms min. at 500 VDC  
**Dielectric Strength :** 2500 VAC for 1 minute  
**DC Voltage Supply Characteristics (Installed at Output 2)**

Type	Tolerance	Max. Output		
		Current	Voltage	Isolation Barrier
20 V	±0.1 V	25 mA	0.2 Vp-p	500 VAC
12 V	±0.6 V	40 mA	0.1 Vp-p	500 VAC
5 V	±0.25 V	80 mA	0.05 Vp-p	500 VAC

**Alarm 1/ Alarm 2 ( Output 2 )****Alarm 1 Relay :**

Form A or Form B for BTC-9300, Form C for BTC4300, BTC-8300, 5V Logic output for BTC-2500 Max. Rating 2A/240VAC, life cycles 200,000 for resistive load. life cycles 200,000 for resistive load.

**Alarm 2 Relay :**

Form A, Max. rating 2A/240VAC, life cycles 200,000 for resistive load.

**Alarm Functions :**

Dwell timer, Deviation High / Low Alarm,  
 Deviation Band High / Low Alarm, PV1 High / Low Alarm,  
 PV2 High / Low Alarm, PV1 or PV2 High /Low Alarm,  
 PV1-PV2 High /Low Alarm, Loop Break Alarm,  
 Sensor Break Alarm.

**Alarm Mode :** Normal, Latching, Hold, Latching / Hold.

**Dwell Timer :** 0 - 6553.5 minutes

**Data Communication**

**Interface :** RS-232 ( 1 unit ), RS-485 ( up to 247 units )

**Protocol :** Modbus Protocol RTU mode

**Address :** 1 - 247

**Baud Rate :** 0.3 - 38.4 Kbits/sec

**Data Bits :** 7 or 8 bits

**Parity Bit :** None, Even or Odd

**Stop Bit :** 1 or 2 bits

**Communication Buffer :** 50 bytes

**Analog Retransmission**

**Functions :** PV1, PV2, PV1-PV2, PV2-PV1, Set Point, MV1, MV2, PV-SV deviation value

**Output Signal :** 4-20 mA, 0-20 mA, 0-1V, 0-5V, 1-5V, 0-10V

**Resolution :** 15 bits

**Accuracy :** ±0.05 % of span ±0.0025 %/ °C

**Load Resistance :** 0 - 500 ohms ( for current output ), 10 K ohms minimum ( for voltage output )

**Output Regulation :** 0.01 % for full load change

**Output Settling Time :** 0.1 sec. (stable to 99.9 % )

**Isolation Breakdown Voltage :** 1000 VAC min.

**Integral Linearity Error :** ±0.005 % of span

**Temperature Effect :** ±0.0025 % of span/ LC

**Saturation Low :** 0 mA ( or 0V )

**Saturation High :** 22.2 mA ( or 5.55V, 11.1V min. )

**Linear Output Range :** 0 - 22.2mA(0-20mA or 4-20mA),  
 0 - 5.55V ( 0 - 5V, 1 - 5V ),  
 0 - 11.1 V ( 0 - 10V )

**User Interface****Dual 4-digit LED Displays :**

BTC-4300	Upper 0.55" ( 14mm )
	Lower 0.4" ( 10 mm )
BTC-8300, BTC-9300	Upper 0.4" ( 10 mm )
	Lower 0.31" ( 8 mm )
BTC-2500	0.4"(10mm)

**Keypad :** 3 keys

**Programming Port :** For automatic setup, calibration and testing

**Communication Port :** Connection to PC for supervisory control

**Control Mode**

**Output 1 :** Reverse ( heating ) or direct ( cooling ) action

**Output 2 :** PID cooling control, cooling P band 1 - 255% of PB

**ON-OFF :** 0.1 - 55.6 ( °C ) hysteresis control ( P band = 0 )

**P or PD :** 0 - 100.0 % offset adjustment

**PID :** Fuzzy logic modified , Proportional band 0 - 500.0 °C ,

Integral time 0 - 1000 seconds , Derivative time 0 - 360.0 seconds

**Cycle Time :** 0.1 - 100.0 seconds

**Manual Control :** Heat (MV1) and Cool (MV2)

**Auto-tuning :** Cold start and warm start

**Failure Mode :** Auto-transfer to manual mode while sensor break or A-D converter damage

**Ramping Control :** 0 - 500.0 °C/minute or

0 - 500.0 °C/hour ramp rate

**Sleep Mode :** Enable or Disable

**Ramping Control :** 0 - 500.0 °C/minute or 0 - 500.0 °C/hour

ramp rate

**Power Limit :** 0 - 100 % output 1 and output 2

**Pump / Pressure Control :** Sophisticated functions provided

**Remote Set Point :** Programmable range for voltage or current input

**Differential Control :** Control PV1 - PV2 at set point

**Digital Filter**

**Function :** First order

**Time Constant :** 0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 60 seconds programmable

**Environmental & Physical**

**Operating Temperature :** -10 °C to 50 °C

**Storage Temperature :** -40 °C to 60 °C

**Humidity :** 0 to 90 % RH ( non-condensing )

**Insulation Resistance :** 20 Mohms min. ( at 500 VDC )

**Dielectric Strength :** 2000 VAC, 50/60 Hz for 1 minute

**Vibration Resistance :** 10 - 55 Hz, 10 m/s<sup>2</sup> for 2 hours

**Shock Resistance :** 200 m/s<sup>2</sup> ( 20 g )

**Moldings :** Flame retardant polycarbonate

**Dimensions :**

BTC-4300 ---96mm(W) X 96mm(H) X 66 mm(D),

53 mm depth behind panel

BTC-8300 ---48mm(W) X 96mm(H) X 80mm(D),

65 mm depth behind panel

BTC-9300 ---50.7mm(W) X 50.7mm(H) X 88.5mm(D),

75mm depth behind panel

BTC-2500 ---50mm(W) X 26.5mm(H) X 110.5 mm(D),

98.0 mm depth behind panel

**Mounting:**

BTC-4300 ---panel mount, cutout 92 X 92 ( mm )

BTC-8300 ---panel mount, cutout 45 X 92 ( mm )

BTC-9300 ---panel mount, cutout 45 X 45 ( mm )

BTC-2500 ---panel mount, cutout 45 X 22.2 ( mm )

**Weight :**

BTC-4300 --- 255 grams

BTC-8300 --- 220 grams

BTC-9300 --- 150 grams

BTC-2500 --- 120 grams

**Approval Standards**

**Safety :** UL 61010C-1 , CSA C22.2 No. 24-93 ,

EN61010-1 (IEC1010-1)

**Protective Class :**

BTC-8300, BTC-4300:

IP 20 housing and terminals with protective covers.

BTC-2500, BTC-9300:

NEMA 4X(IP65) front panel , IP 20 housing and terminals

**EMC :** EN61326



## Ordering Code

### BTC-2500-□□□□□□

#### Power Input

4: 90 - 264 VAC, 50 / 60 HZ  
5: 11 - 26 VAC or VDC  
9: Special Order

#### Signal Input

1: Standard Input

Input 1-Universal Input

Thermocouple: J, K, T, E, B,  
R, S, N, L

RTD: PT100 DIN, PT100 JIS

Current: 4 - 20mA, 0 - 20mA

Voltage: 0 - 1V, 0 - 5V, 1 - 5V,  
0-10V

Input 2-CT: 0 - 50 Amp. AC

Current Transformer

Analog Input: 0 - 1V, 0 - 5V,  
1 - 5V, 0 - 10V

Event Input (EI)

9: Special Order

#### Output 1

0: None

1: Relay rated 2A / 240VAC

2: Pulsed voltage to drive SSR, 5V / 30mA

3: Isolated 4 - 20mA / 0 - 20mA

4: Isolated 1 - 5V / 0 - 5V

5: Isolated 0 - 10V

6: Triac output 1A / 240VAC, SSR

C: Pulsed voltage to drive SSR, 14V / 40mA

9: Special order

#### Output 2 / Alarm 2

0: None

1: Form A relay 2A / 240VAC

2: Pulsed voltage to drive SSR, 5V / 30mA

3: Isolated 4 - 20mA / 0 - 20mA

4: Isolated 1 - 5V / 0 - 5V

5: Isolated 0 - 10V

6: Triac output, 1A / 240VAC, SSR

7: Isolated 20V / 25 mA DC Output Power Supply

8: Isolated 12V / 40 mA DC Output Power Supply

9: Isolated 5V / 80 mA DC Output Power Supply

C: Pulsed voltage to drive SSR, 14V / 40mA

A: Special order

#### Alarm 1

1: 5V Logic Output

9: Special order

#### Communications

0: None

1: RS-485 interface

2: RS-232 interface

3: Retransmit 4 - 20 mA / 0 - 20 mA

4: Retransmit 1 - 5V / 0 - 5V

5: Retransmit 0 - 10V

9: Special order

### BTC-9300-□□□□□□

#### Power Input

4: 90 - 264 VAC, 50 / 60 HZ  
5: 11 - 26 VAC or VDC  
9: Special Order

#### Signal Input

1: Standard Input

Input 1-Universal Input

Thermocouple: J, K, T, E, B,  
R, S, N, L

RTD: PT100 DIN, PT100 JIS

Current: 4 - 20 mA, 0 - 20 mA

Voltage: 0 - 1V, 0 - 5V, 1 - 5V,  
0 - 10V

Input 2-CT: 0 - 50 Amp. AC

Current Transformer

Analog Input: 4-20mA, 0-20mA,  
0 - 1V, 0 - 5V,  
1 - 5V, 0 - 10V

Input 3-Event Input (EI)

9: Special Order

#### Output 1

0: None

1: Relay rated 2A / 240VAC

2: Pulsed voltage to drive SSR, 5V / 30mA

3: Isolated 4 - 20mA / 0 - 20mA

4: Isolated 1 - 5V / 0 - 5V

5: Isolated 0 - 10V

6: Triac output 1A / 240VAC, SSR

C: Pulsed voltage to drive SSR, 14V / 40mA

9: Special order

#### Output 2 / Alarm 2

0: None

1: Form A relay 2A / 240VAC

2: Pulsed voltage to drive SSR, 5V / 30mA

3: Isolated 4-20mA / 0-20mA

4: Isolated 1-5V / 0-5V

5: Isolated 0-10V

6: Triac output, 1A / 240VAC, SSR

7: Isolated 20V-25mA DC Output Power Supply

8: Isolated 12V-40mA DC Output Power Supply

9: Isolated 5V-80mA DC Output Power Supply

C: Pulsed voltage to drive SSR, 14V / 40mA

A: Special order

#### Alarm 1

0: None

1: Form A relay 2A / 240VAC

2: Form B relay 2A / 240VAC

9: Special order

#### Communications

0: None

1: RS-485 interface

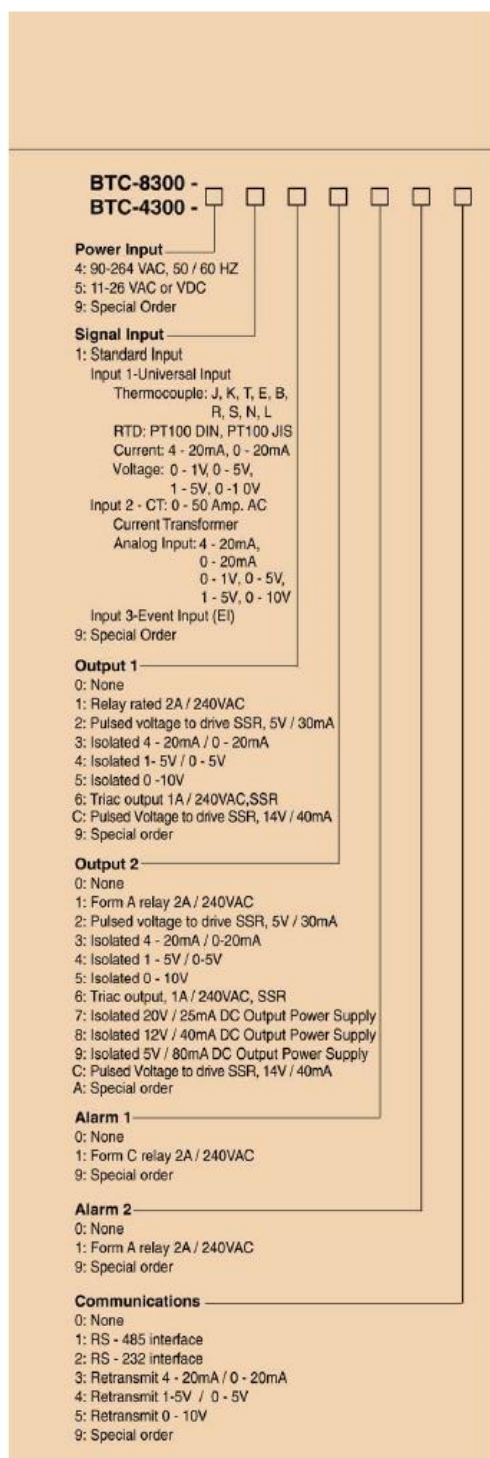
2: RS-232 interface

3: Retransmit 4-20 mA / 0-20mA

4: Retransmit 1-5V / 0-5V

5: Retransmit 0-10V

9: Special order



## Accessories

CT94-1 = 0-50 Amp, AC Current Transformer  
 OM95-3 = Isolated 4-20mA / 0-20mA Analog Output Module  
 OM95-4 = Isolated 1 - 5V / 0-5V Analog Output Module  
 OM95-5 = Isolated 0 - 10V Analog Output Module  
 OM94-6 = Isolated 1A / 240VAC Triac Output Module (SSR)  
 OM94-7 = 14V / 40mA SSR Drive Module  
 DC94-1 = Isolated 20V / 25 mA DC Output Power Supply  
 DC94-2 = Isolated 12V / 40 mA DC Output Power Supply  
 DC94-3 = Isolated 5V / 80 mA DC Output Power Supply  
 CM94-1 = Isolated RS - 485 Interface Module  
 CM94-2 = Isolated RS - 232 Interface Module  
 CM94-3 = Isolated 4 - 20 mA / 0-20 mA Retransmission Module  
 CM94-4 = Isolated 1 - 5V / 0 - 5V Retransmission Module  
 CM94-5 = Isolated 0 - 10V Retransmission Module  
 CC94-1 = RS-232 Interface Cable (2M)  
 CC91-3 = Programming Port Cable

## Related Products

SNA10A = Smart Network Adaptor for Third Party Software,  
 converts 255 channels of RS-485 or RS-422 to  
 RS-232 Network  
 SNA12A = Smart Network Adaptor for Programming Port  
 to RS-232 interface  
 BC-Set = Configuration software

## BrainChild Electronic Co., Ltd.

No. 209, Chung Yang Rd., Nan Kang Dist.,  
 Taipei, 115 Taiwan  
 Tel: 886-2-27861299 Fax: 886-2-27861395  
 E-mail: sales@brainchild.com.tw  
 website: <http://www.brainchild.com.tw>

- Hoja de datos de sensor de temperatura

## Ensamblajes sanitarios de RTD Cabezal de protección de alta resistencia



### Serie PRS-H-NB9W



- ✓ Diseño de sonda de alta resistencia con vástago de sonda gradual para resistencia adicional
- ✓ Adaptador estándar 16 AMP Tri-Grip™ de 1½" (compatible con Tri-Clamp®)
- ✓ Cabezal de polipropileno blanco con tapón de rosca estándar, disponible cabezal de conexión de acero inoxidable 316L opcional
- ✓ Superficies húmedas de acero inoxidable 316L con 32 µin o un mejor acabado
- ✓ Elemento estándar Clase A Pt100 de 4 hilos
- ✓ Rango de temperatura -50 a 200 °C (-58 a 392 °F)

#### Opciones

- ✓ Estilos de adaptadores
- ✓ Cabezales de protección
- ✓ Longitudes de las sondas
- ✓ Elementos RTD

Rango de tamaño de la brida del sensor de ¼" a 4" Tri-Grip™ Brida de proceso. Visite [es.omega.com](http://es.omega.com) para obtener más información

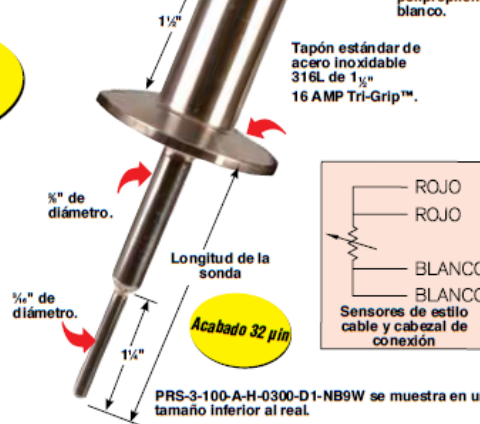
Conexión de conducto de NPT de ½"

Para uso en procesos sanitarios y CIP (Cleaning in Place)

Visite [es.omega.com](http://es.omega.com) para conocer las opciones del transmisor montado de cabezal

Cabezal de conexión con tapón de rosca de polipropileno blanco.

Tapón estándar de acero inoxidable 316L de 1½" 16 AMP Tri-Grip™.



Los conjuntos de sonda de RTD de la serie OMEGA® PRS-H-NB9W están disponibles en longitudes estándar de 3 a 6", con un elemento Clase A Pt100 de 4 hilos (100 ±0,06 Ω a 0 °C) compatible con instrumentación RTD de 3 hilos. El modelo estándar incluye un adaptador Tri-Grip™ 16 AMP de 1½", cabezal de protección tipo NB9W de polipropileno blanco con tapón de rosca. Consulte al Departamento de ventas para conocer las opciones disponibles, incluyendo los tipos de elementos y las curvas, las longitudes de sondas y estilos de adaptadores sanitarios.

Para hacer su pedido, visite [es.omega.com/prs-3-100](http://es.omega.com/prs-3-100) para consultar precios y detalles

N.º de modelo	Estilo de cable conductor	Ω a 0 °C	Diámetro de vaina metálica	Longitud de la sonda
PRS-3-100-A-H-0300-D1-NB9W	4-hilos	100	¾"	3"
PRS-3-100-A-H-0400-D1-NB9W	4-hilos	100	¾"	4"
PRS-3-100-A-H-0500-D1-NB9W	4-hilos	100	¾"	5"
PRS-3-100-A-H-0600-D1-NB9W	4-hilos	100	¾"	6"

**Cabezales de protección opcionales:** Para realizar un pedido con cabezal grande de acero inoxidable 316 NB15, cambie el sufijo del número de modelo de "NB9W" a "NB15" con un costo adicional.

**Nota:** Consulte al Departamento de ventas para conocer las opciones disponibles, incluyendo los tipos de elementos y las curvas, las longitudes de sondas y estilos de adaptadores sanitarios.

**Ejemplos de pedidos:** PRS-3-100-A-H-0400-D1-NB9W, sensor de RTD Pt100 de 4 hilos (100 Ω @ 0 °C, precisión Clase A), adaptador 16 AMP Tri-Grip™ de 1½", 4" de longitud, sonda de alta resistencia, cabezal de protección con tapón de rosca de polipropileno blanco NB9W.

PRS-3-100-A-H-0400-D1-NB15, sensor de RTD Pt100 de 4 hilos (100 Ω @ 0 °C, precisión Clase A), adaptador 16 AMP Tri-Grip™ de 1½", 6" de longitud, sonda de alta resistencia, cabezal de protección con tapón de rosca de acero inoxidable 316 NB15.

- Hoja de datos de sensor de presión PT101

© Siemens AG 2017

## Medida de presión

Transmisores monorrango para aplicaciones generales

### SITRANS P220 para presión relativa

1

#### Sinopsis



El transmisor de presión SITRANS P220 mide la presión relativa de líquidos, gases y vapores.

- Célula de medida de acero inoxidable, completamente soldada
- Rangos de medida de 2,5 a 1000 bar (36.3 a 14500 psi) relativos
- Para aplicaciones de alta presión y refrigeración

#### Beneficios

- Alta precisión de medida
- Caja de acero inoxidable robusta
- Alta resistencia a la sobrecarga
- Para fluidos corrosivos y no corrosivos
- Para medir la presión de gases, líquidos y vapores
- Diseño compacto
- Sin junta

#### Gama de aplicación

El transmisor de presión SITRANS P220 para presión relativa se utiliza en los siguientes sectores industriales:

- Fabricación de maquinaria
- Construcción naval
- Energía
- Química
- Abastecimiento de agua

#### Diseño

##### Estructura del aparato sin protección contra explosiones

El transmisor de presión está formado por una célula de medida piezorresistiva con membrana, montado en una caja de acero inoxidable. Puede conectarse eléctricamente con un conector conforme a EN 175301-803-A (IP65), un conector redondo M12 (IP67), un cable (IP67) o un pasacables rápido Quickon (IP67). La señal de salida puede ser 4 a 20 mA o 0 a 10 V.

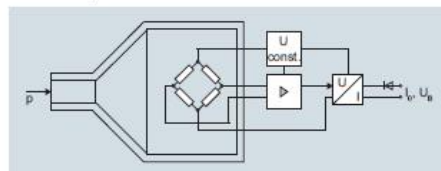
##### Estructura del aparato con protección contra explosiones

El transmisor de presión está formado por una célula de medida piezorresistiva con membrana, montado en una caja de acero inoxidable. Puede conectarse eléctricamente con un conector conforme a EN 175301-803-A (IP65) o un conector redondo M12 (IP67). La señal de salida es de 4 a 20 mA.

#### Funciones

El transmisor de presión mide la presión relativa y el nivel de líquidos y gases.

##### Modo de operación



Transmisores de presión SITRANS P220 (7MF1567-...), diagrama de función

La célula de medida de acero inoxidable dispone de un puente de resistencias de película gruesa, al cual se transmite la presión de servicio  $p$  a través de una membrana de acero inoxidable.

La tensión de salida de la célula de medida se conduce al amplificador y se transforma en una corriente de salida de 4 a 20 mA o en una tensión de salida de 0 a 10 V DC.

La corriente y la tensión de salida son linealmente proporcionales a la presión de entrada.

## Medida de presión

### Transmisores monorrango para aplicaciones generales

SITRANS P220 para presión relativa

1

**Datos técnicos**

<b>Campo de aplicaciones</b>	
Medición de la presión relativa	Líquidos, gases y vapores
<b>Modo de operación</b>	
Principio de medición	Célula de medida piezorresistiva (membrana de acero inoxidable)
Magnitud de medida	Presión relativa
<b>Entrada</b>	
Rango de medida	
• Presión relativa - métrico	2,5 ... 1000 bar (36 ... 14500 psi)
- Rango de medida para EE.UU.	30 ... 14500 psi
<b>Salida</b>	
Señal de corriente	4 ... 20 mA (U <sub>B</sub> - 10 V)0,02 A
• Carga	
• Alimentación auxiliar U <sub>B</sub>	7 ... 33 V DC (10 ... 30 V para Ex)
Señal de tensión	0 ... 10 V DC
• Carga	≥ 10 kΩ
• Alimentación auxiliar U <sub>B</sub>	12 ... 33 V DC
• Consumo de corriente	< 7 mA at 10 kΩ
Característica	lineal creciente
<b>Precisión de medida</b>	
Desviación de medida en caso de ajuste de punto límite, incl. histéresis y repetibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• típica: 0,25 % del fondo de escala</li> <li>• máxima: 0,5 % del fondo de escala</li> </ul>
Tiempo de respuesta transitoria T <sub>90</sub>	< 5 ms
Estabilidad a largo plazo	
• Inicio de medida y alcance de medida	0,25 % del fondo de escala/año
Influencia de la temperatura ambiente	
• Inicio de medida y alcance de medida	0,25 %/10 K del fondo de escala de medida
• Influencia alimentación auxiliar	0,005 %/V
<b>Condiciones de montaje</b>	
• Temperatura de proceso	-40 ... +120 °C (-40 ... +248 °F)
• Temperatura ambiente	-25 ... +85 °C (-13 ... +185 °F)
• Temperatura de almacenamiento	-50 ... +100 °C (-58 ... +212 °F)
• Grado de protección según IEC 60529	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IP 65 con conector según EN 175301-803-A</li> <li>• IP 67 con conector M12</li> <li>• IP 67 con cable</li> <li>• IP 67 con pasacables rápido</li> <li>• según IEC 61326-1/2-3</li> <li>• según NAMUR NE21, solo para aparatos ATEX y con una desviación de valor medido máx. ≤ 1 %</li> </ul>
Compatibilidad electromagnética	

**Construcción mecánica**

Peso	aprox. 0,090 kg (0,198 lb) ver planos dimensionales
Conexiones al proceso	
Electrical connections	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conector según EN 175301-803-A forma A con entrada de cable M16x1,5 ó ½-14 NPT o PG 11</li> <li>• Conector M12</li> <li>• Cable de 2 o 3 hilos (0,5 mm<sup>2</sup>) (± 5,4 mm)</li> <li>• Pasacables rápido Quickon</li> </ul>
Material de las piezas en contacto con el fluido	
• Célula de medida	Acero inoxidable, n° de mat. 1.4016
• Conexión al proceso	Acero inoxidable, n° de material 1.4404 (SST 316 L)
Material de las piezas sin contacto con el fluido	
• Carcasa	Acero inoxidable, n° de material 1.4404 (SST 316 L)
• Conector	Plástico
• Cable	PVC
<b>Certificados y homologaciones</b>	
Clasificación según la Directiva de aparatos de presión (2014/68/EU)	Para gases del Grupo de fluidos 1 y líquidos del Grupo de fluidos 1; cumple los requisitos según el artículo 4, apartado 3 (prácticas de la buena ingeniería)
Lloyd's Register of Shipping (LR) <sup>1)</sup>	12/20010
Germanischer Lloyd's Register of Shipping (GL) <sup>1)</sup>	GL19740 11 HH00
American Bureau of Shipping (ABS) <sup>1)</sup>	ABS_11_HG 789392_PDA
Bureau Veritas (BV) <sup>1)</sup>	BV 271007 A0 EV
Det Norske Veritas (DNV) <sup>1)</sup>	A 12553
Homologación para agua potable (ACS) <sup>1)</sup>	ACS 15 ACC NY 360
EAC <sup>1)</sup>	№ TC RU C-DE.ГБ05.В.00732 OC HAHHO «ЦСБЭ»
CRN <sup>2)</sup>	0F18659.5C
Underwriters Laboratories (UL) <sup>1)</sup>	
• para EE. UU. y Canadá	UL 20110217 - E34453
• en todo el mundo	IEC UL DK 21845
<b>Protección contra explosiones</b>	
Seguridad intrínseca 'i' (solo para salida de corriente)	Ex II 1/2 G Ex ia IIC T4 Ga/Gb Ex II 1/2 D Ex ia IIC T125 °C Da/Db
Certificado de homologación CE	SEV 10 ATEX 0146
Conexión a circuitos óhmicos con seguridad intrínseca certificados con los valores máximos:	U <sub>i</sub> ≤ 30 V DC; I <sub>i</sub> ≤ 100 mA; P <sub>i</sub> ≤ 0,75 W
Inductancia y capacidad internas efectivas para versiones con conectores según EN 175301-803-A y M12	L <sub>i</sub> = 0 nH; C <sub>i</sub> = 0 nF
CSA <sup>2)</sup>	70006348 Class I, Division 1, grupos A, B, C&D; Class II, Division 1, grupos E, F y G, Class III Class I, Division 2, grupos A, B, C und D; Class II, Division 2, grupos F y G; Class III A/Ex ia IIC T4 Ga/Gb A/Ex ia IIC T1 25°C Da/Db

<sup>1)</sup> En preparación para variante con señal de salida 0 ... 5 V y salida radiométrica.

<sup>2)</sup> Ver las variantes disponibles en "Datos de pedido".