

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica

**Sistema Regulador de Temperatura, sintonización de parámetros PID para
disminución de consumo de combustible en un horno de recocido de
alambre**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Daniel Hernán Bautista Mantilla

Cartago 28 Noviembre , 2007




INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

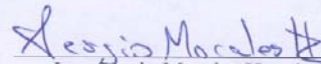
PROYECTO DE GRADUACIÓN

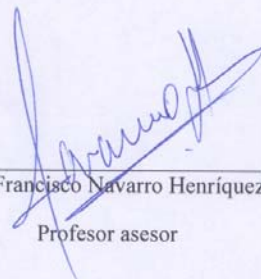
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


Ing. Arnoldo Rojas Coto
Profesor lector


Ing. Sergio Morales Hernández
Profesor lector


Ing. Francisco Navarro Henríquez
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

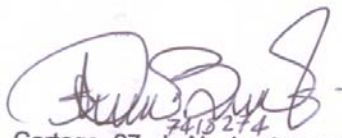
Cartago, Noviembre 28 del 2007

Declaración de Autenticidad

Declaro que el presente proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. J. J.', with a large flourish above the final letter.

7418274
Cartago, 27 de Noviembre del 2007

Resumen

El estudio, aplicación y el desarrollo de nuevas tecnologías en los diferentes procesos industriales, es el factor preponderante que ha llevado a la industria a buscar soluciones que permitan resolver los problemas de la forma más eficientemente posible, sin dejar a un lado el cumplimiento de normas de calidad y de seguridad donde el ambiente y el ser humano deben ser el principal beneficiado.

El proyecto desarrollado se basa en el estudio del control actual de temperatura de un horno de tratamiento térmico de alambre. Este horno se utiliza para configurar el temple del alambre. El principal problema es alto consumo de combustible y la falta de una estandarización para el ajuste adecuado que permita obtener la mejor combustión con las condiciones actuales de control.

La solución consiste en realizar un estudio del sistema actual y por medio de las herramientas actuales proponer una mejora al sistema que permita disminuir el consumo de diesel.

Palabras claves: tratamiento térmico de alambre

Abstract

Development, study and application of new technologies in every industrial process is the most important bottom which has gone at industry to look for solutions that help to resolve troubles in the most possible efficient form. However, is very important denote that compliment of quality and safety regulations are as essential as an efficient process where natural environment and human being must be the most benefited.

The development of this project stands in a study of actual temperature control of a furnace to iron wire thermal treatment. The main problem is the high cost of gas-oil that it consumes

The solution consist to make a study of the actual control process and propose with actual tools an improvement at the system which will allow reduction in the consume of gas-oil.

Key words: iron wire thermal treatment

Dedicatoria:

A mi Creador y Dios porque sin El no se donde estaría hoy

A mi papá por todo el apoyo incondicional brindado

A mi mama por su aliento y cada una de sus oraciones

A mi hermanas Angélica y Gina

Por sus alegrías y paciencias

Y a cada una de mis amigos que me han regalado un pedacito de su corazón y todos los que pusieron un granito de arena para la realización de este proyecto

Agradecimiento:

Un agradecimiento especial al Único capaz de darme la fuerza para seguir el camino que escogí, Jesús.

A mi familia que siempre están ahí haga lo que haga y pase lo que pase.

A la empresa Arcelor-Mital y todos los del departamento de mantenimiento y producción y en especial a Mauricio Morales por hacer todo lo posible para que se llevara a cabo este proyecto al igual que cada uno de los compañeros que me enseñaron y siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en todo lo que necesitara.

Al profesor Francisco Navarro por toda la asesoría brindada y a los profesores de la escuela de electrónica por todo el conocimiento impartido durante estos largos años.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	1
1.2 Solución seleccionada	4
Capítulo 2: Meta y Objetivos	5
2.1 Meta.....	5
2.2 Objetivo General.....	5
2.3 Objetivos específicos	5
2.3.1 Objetivos de Hardware.....	5
2.3.2 Objetivos de software.....	5
2.3.3 Objetivos de implementación	6
2.3.4 Objetivos de Documentación	6
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.....	7
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar	7
3.2 Antecedentes Bibliográficos	10
Capítulo 4: Procedimiento metodológico.....	26
4.1 Reconocimiento y Definición del Problema.....	26
4.2 Obtención y Análisis de Información.....	26
4.3 Evaluación de las Alternativas y Síntesis de una Solución	27
4.4 Implementación de la Solución	28
4.5 Reevaluación y Rediseño	28
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	30
5.1 Análisis de soluciones y selección final.....	30
5.1.1 Sistema de Control de Temperatura con acople mecánico para control de aire	30
5.1.2 Sistema de Control de Temperatura con controlador separado para control de aire	31
5.1.3 Sistema de Control de Temperatura con ajuste de parámetros PID para mejorar control de temperatura.	32
5.2 Descripción del hardware.....	32

5.2.1 Actuadores	32
5.2.2 Controlador de Temperatura	33
Capítulo 6: Analisis y Resultados	35
6.1 Resultados.....	34
Obtención de las curvas características.....	34
6.2 Análisis	48
Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones	52
7.1 Conclusiones	52
7.2 Recomendaciones	53
8. Bibliografía.	55
CAPÍTULO 9: APÉNDICES.....	56
9.1 Abreviaturas.....	56
9.2 Glosario	56
9.3 Información sobre la empresa	58
9.4 Manual de Usuario.....	60
9.4.1.Manual para la programación de los parámetros en el controlador	60
9.4.2 Manual para el ajuste de los parámetros PID.....	60
CAPÍTULO 10: ANEXOS	63
10.1 Calibre de Alambres utilizados en el Proceso de Tratamiento Térmico de Galvanizado.....	63
10.2 Tabla de Medición de la salida del controlador para la cámara 1 ON-OFF y PID.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1. Diagrama de Bloques del Proceso Galvanizado	1
Figura 3.1.1. Diagrama del Proceso de Calentamiento del Alambre	7
Figura 3.1.2. Vista Posterior del Quemador	8
Figura 3.1.3. Diagrama de Bloques Detallado	9
Figura 3.2.1. Curva de reacción del proceso o respuesta escalón de circuito abierto	11
Figura 3.2.2. Diagrama de bloques para la prueba escalón con circuito abierto.....	11
Figura 3.2.3. Respuesta escalón de un proceso de primer orden más tiempo muerto ..	13
Figura 3.2.4. Parámetros del modelo de primer orden con tiempo muerto que se obtiene mediante el método 1.	14
Figura 3.2.5. Parámetros del modelo de la planta de primer orden que se obtienen con el método 2.....	15
Figura 3.2.6. Parámetros del modelo de la planta de primer orden que se obtienen por medio del método 3.	16
Figura 3.2.7. Criterio IAE con sintonización lenta.....	27
Figura 3.2.8 . Criterio IAE con sintonización óptima.....	27
Figura 3.2.9. Criterio IAE con sintonización agresiva	27
Figura 5.1.1.1 Diagrama de bloques de solución planteada.....	31
Figura 5.1.1.2. Vista posterior del control de mezcla del quemador	32
Figura 5.1.2.1. Propuesta a solución para mejorar la relación aire-combustible	32
Figura 5.2.1. Modutrol IV Serie 6184F1014.....	33
Figura 5.2.1.1. Conexión del control.....	34
Figura 5.2.2.1 Controlador de temperatura E5CN.....	34
Figura 6.1.1. Respuesta escalón de la cámara 1. cambio de 50% a 60%. Datos tomados de la tabla 6.1.1	37
Figura 6.1.2. Respuesta escalón de la cámara 2. Cambio de 50% a 60%. Datos tomados de la tabla 6.1.1	37
Figura 6.1.3. Respuesta escalón de la camara 3. cambio de 50% a 60%. Datos tomados de la tabla 6.1.1	38
Figura 6.1.4. Medición de Temperatura, Cámara 1, 2 y 3, con SP =710, SP =720,.....	43
Figura 6.1.5. Resultados obtenidos después de programar en PID la cámara 2	45

Figura 6.1.6. Salida del Controlador E5CN en modo PID y ON-OFF para la cámara 1. para mantener 700°C.	46
Figura 6.1.7. Salida del Controlador E5CN en modo PID y ON-OFF para la cámara 1. para mantener 700°C.	46
Figura 6.1.8. Salida del Controlador E5CN en modo PID y ON-OFF para la cámara 1, para mantener 700°C.	47
Figura 9.4.2.1. Interfaz gráfica del software de simulación y ajuste de parámetros PID	62
Figura 9.4.2.2. Interfaz gráfica del software de simulación y ajuste de parámetros PID	63
Figura 9.4.2.3. Interfaz gráfica del software de ajuste de parámetros PID, métodos de sintonización.	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.2.1. Fórmulas para ajuste para respuesta de razón de asentamiento de un cuarto	18
Tabla 3.2.1. Parámetros de ajuste método de ajuste Cohen Coon	19
Tabla 3.2.2. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para cambios en el punto de control para PI	23
Tabla 3.2.3. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para entrada de perturbaciones, PI	23
Tabla 3.2.4. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para cambios en el punto de control para PID.....	24
Tabla 3.2.5. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para entrada de perturbaciones, para PID.....	24
Tabla 6.1.1 Mediciones de temperatura Para cada cámara	35
Tabla 6.1.2. Condiciones Presión y apertura de válvula de la prueba de respuesta al escalón	38
Tabla 6.1.3. Mediciones de Temperatura sin mejora Cámara 1, 2 y 3	41
Tabla 6.1.4. Condiciones Presión y apertura de válvula de mediciones de la Figura 6.1.4	43
Tabla 6.1.5. Mediciones de Temperatura con Cámara 1 (PID) y Cámara 3 (ON-OFF)..	44
Tabla 6.1.6. Controlador PI obtenido por el método IAE.....	45
Tabla 6.1.7. Controlador PI obtenido por el método IAET	45
Tabla 10.1 Calibre de Alambres utilizados en el Proceso de Tratamiento Térmico de Galvanizado.....	64
10.2 Tabla de Medición de la salida del controlador para la cámara 1 ON-OFF y PID	65

Capítulo 1: Introducción

En las diferentes áreas de la industria existe la necesidad de controlar procesos de forma eficiente, cada una de las variables a controlar no solo deben cumplir con los puntos de consigna sino con requerimientos adicionales. Para ello es necesario realizar un estudio del sistema a controlar y es aquí donde se pueden llegar a determinar los principales requerimientos que permitirán obtener así los mejores resultados.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La industria del acero requiere que muchos de sus procesos sean controlados de forma automática, mejorar el control del proceso con el fin de reducir costos es una de las motivaciones de este proyecto. En este caso reducir el consumo de combustible no solo implica reducir costos, sino que también contribuiría a reducir el impacto ambiental y a mejorar la calidad del producto.

En la figura 1.1.1 se puede observar el marco general del proceso. El cuadro oscuro representa el subproceso de recocido de alambre en el cual se desarrolla este proyecto.

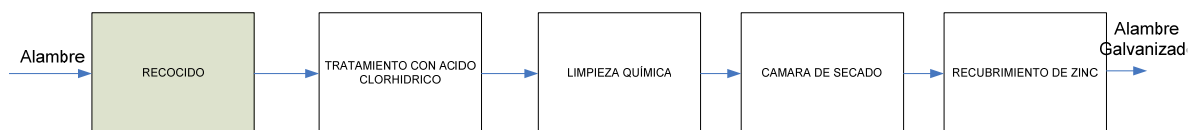


Figura 1.1.1. Diagrama de Bloques del Proceso Galvanizado

Para entender el contexto del proyecto se realizara una breve explicación de todo el proceso de galvanizado.

El proceso de trefilado consiste en reducir el diámetro de una varilla o alambre haciéndolo pasar a través de una plancha metálica que contiene en una serie de aberturas en forma de cono o de campana, con diámetros cada vez menores, llamados troqueles de trefilado. La pieza de metal se hace pasar por el troquel más grande para fabricar un alambre grosero. A continuación, este alambre se hace pasar por la abertura inmediatamente menor, y así hasta obtener un alambre de la medida deseada. Una vez se obtiene el alambre con el diámetro deseado se somete a diferentes procesos. A partir de aquí el alambre entra al proceso de galvanizado como se puede ver en la figura 1.1.1.

La etapa de Recocido consiste en someter el alambre a un tratamiento térmico el cual fija las propiedades de temple del alambre. Seguidamente el alambre se hace pasar por una etapa de tratamiento con ácido clorhídrico el cual tiene la función de preparar la superficie del alambre eliminando las impurezas que este pueda tener. A continuación, el alambre se somete a Cloruro de Zinc. Este tiene la función de crear porosidades necesarias para que el Zinc pueda adherirse al alambre. Seguidamente, el alambre se seca por medio de aire caliente para finalmente hacer pasar el alambre por una pila de Zinc fundido y así obtener el alambre galvanizado.

La etapa de recocido es donde se centra este proyecto. Consiste en un horno con 3 cámaras contiguas de calentamiento. El horno tiene 2 ventanas una para la entrada y salida de alambre, el cual entra a una velocidad, y que junto con la temperatura determinan el temple del alambre.

La empresa Laminadora y Trefilería Costarricense ha incrementado el consumo de combustible en los últimos meses siendo el diesel el principal consumo de energía, especialmente en el área de Galvanizado el cual consume el 80 % del diesel adquirido por la empresa.

Sumado a esto las alzas en los precios de diesel provocan especial preocupación, ya que si continúa esta situación, las pérdidas se irán incrementando al punto en que no se puedan solventar. Por ello la importancia de este proyecto ya que es necesario empezar con un estudio detallado del sistema.

El alto consumo de combustible en este proceso, es una consecuencia de un control ineficiente. Primero que todo, las variables manipuladas involucradas en el proceso; el combustible y el aire deben ser adicionadas al horno en las proporciones óptimas para generar la mejor combustión. Por otro lado, los mecanismos de control ON-OFF, que son los implementados actualmente son demasiado ineficientes para este tipo de proceso.

Lograr desarrollar este proyecto ayudará a la empresa a conocer y a entender las principales ventajas y desventajas que tiene el proceso actual y los cambios requeridos para la mejora de su control. Una vez se comprenda esta situación permitirá ser base para futuros proyectos que optimicen aun más no solo dicho proceso sino otros como La pila de Zinc el cual utiliza un horno con 3 quemadores para mantener fundido el zinc y el horno de recocido para tratamiento térmico de alambre de construcción, los cuales tendrían los mismos principios de control.

1.2 Solución seleccionada

Debido a que solo se contó con 3 meses para la realización de este proyecto se llega al acuerdo en realizar un estudio e implementar una solución que permita con base a las herramientas actuales obtener la mejora del control.

Como requerimientos se encuentran:

1. Disminuir el consumo de combustible en un 10%.
2. Proveer un estudio que permita reconocer las principales fallas del sistema de control.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Impulsar nueva tecnología de control de temperatura en la empresa que permita conocer la cantidad de energía adecuada que permita disminuir el consumo de combustible en un 10%.

2.2 Objetivo General

Desarrollar un estudio matemático que relacione las variables de combustible y temperatura de un horno de recocido de alambre, que muestre la necesidad del uso de nuevas tecnologías para el control de dichas variables a un punto óptimo.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1 Objetivos de Hardware

1. Realizar un estudio que permita definir que controlador es necesario para implementar un PID.
2. Realizar un estudio que permita definir si los actuadores actuales permiten implementar un PID.

2.3.2 Objetivos de software

1. Definir un algoritmo para realizar la sintonización del PID de la planta.
2. Desarrollar un programa de alto nivel que permita calcular los parámetros PID.

2.3.3 Objetivos de implementación

1. Implementar un PID con un controlador digital para el control del horno
2. Realizar una simulación de la planta por medio de matlab.

2.3.4 Objetivos de Documentación

1. Realizar un informe final del proyecto
2. Realizar un manual de usuario para que puedan seguir ajustando los parámetros PID.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

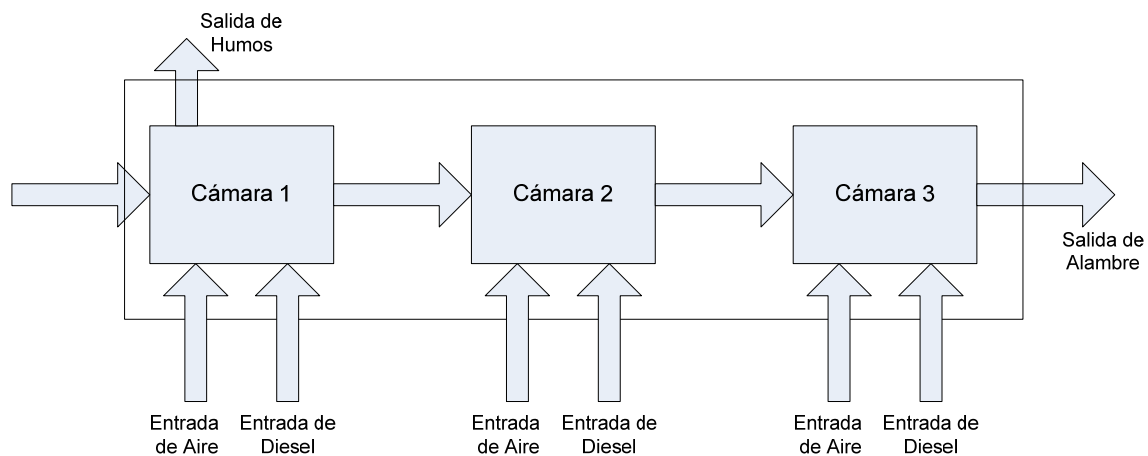


Figura 3.1.1. Diagrama del Proceso de Calentamiento del Alambre

En la figura 3.1.1 se puede ver el diagrama de bloques del proceso el cual consta de 1 horno de 15 m de largo por 2.2 m. de alto y 1.95 m de ancho y una potencia calorífica instalada de 1200000 Kcal/h. El horno se divide en 3 cámaras de calentamiento, a través de las cuales se hace pasar 28 hilos de alambre con diámetros que van desde los 1.37mm a 4.15 mm con velocidades que varían de 15 m/min a 23 m/min.

La temperatura del horno y la velocidad de cada uno de los hilos son los factores que determinan las propiedades de temple del alambre el cual es muy variado ya que depende de la solicitud de cada cliente.

El horno consta de un total de 10 quemadores donde cada cámara posee 3 quemadores, excepto, la cámara 1 que consta de 4 quemadores.

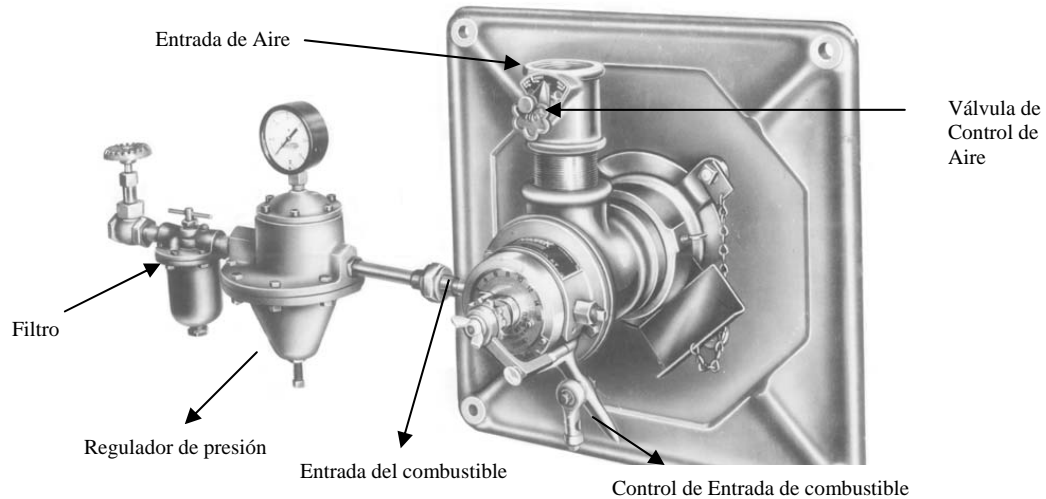


Figura 3.1.2. Vista Posterior del Quemador

Cada quemador tiene una entrada de aire, la cual se controla de forma manual por un operario llamado hornero, esto quiere decir que el color de la llama es controlado de forma manual. En la figura 3.1.2 se puede ver la vista posterior del quemador y los dispositivos como reguladores de presión entre otros.

La entrada de combustible al quemador se controla por medio de un modutrol serie 61 (Ver figura 3.1.3) que es manipulado por un controlador de temperatura E5CN de Omron en modo ON-OFF. Una electroválvula es controlada por un PLC, la cual por medio de un detector de llama ultravioleta controla la activación de dicha electroválvula para permitir o no el paso de combustible hacia el quemador. Existe un regulador de presión el cual permite controlar de forma manual de 0 – 14 psi la presión de entrada del combustible.

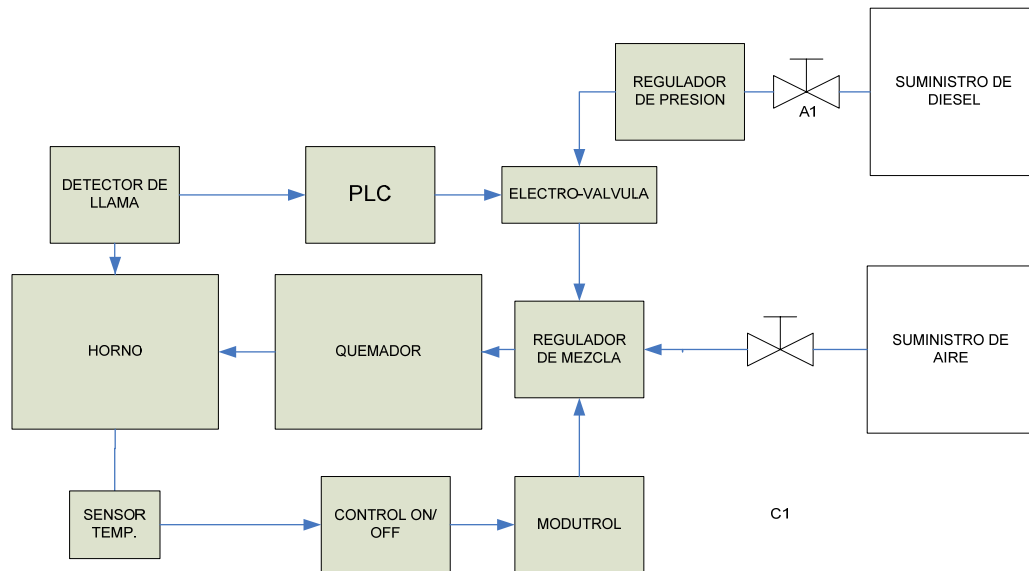


Figura 3.1.3. Diagrama de Bloques Detallado

La temperatura oscila entre +/- 2 grados debido ya que el control es ON-OFF y ante perturbaciones un aumento o disminución de temperatura en una cámara afecta sustancialmente las demás cámaras.

En cuanto consumo de energía, el proceso consume aproximadamente 15.2 gal/hora que equivale a unos 1380 Litros diarios de diesel para los 6 o 7 quemadores que trabajan en el proceso normal de trabajo.

Actualmente, los horneros manipulan los reguladores de presión y válvulas de aire de forma manual y no existe una estandarización.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

Prueba del proceso de escalón

El procedimiento de la prueba de escalón se lleva a cabo como sigue:

1. Con el controlador en la posición “manual” (es decir el circuito abierto, sin retroalimentación), se aplica al proceso un cambio escalón en la señal de salida del controlador $m(t)$. La magnitud del cambio debe ser lo suficientemente grande como para que se pueda medir el cambio consecuente en la señal de salida del transmisor, pero no tanto como para que las no linealidades del proceso ocasionen la distorsión de la respuesta.
2. La respuesta de la señal de salida del transmisor $c(t)$ se registra con un gráficator de papel continuo o algún dispositivo equivalente; se debe tener la seguridad de que la resolución es la adecuada, tanto en la escala de amplitud como en la de tiempo. La gráficación de $c(t)$ contra el tiempo debe cubrir el periodo completo de la prueba, desde la introducción de la prueba de escalón hasta que el sistema alcanza un nuevo estado estacionario. La prueba generalmente dura entre unos cuantos minutos y varias horas, según la velocidad de respuesta del proceso.

Naturalmente, es imperativo que no entren perturbaciones al sistema mientras se realiza la prueba de escalón. En la figura 3.2.1 se muestra una gráfica típica de la prueba, la cual se conoce como curva de reacción de proceso; la respuesta en forma de S es característica de los procesos de primer orden, con o sin tiempo muerto. El siguiente paso es hacer coincidir la curva de reacción del proceso con el modelo de un proceso simple para determinar los parámetros del modelo.

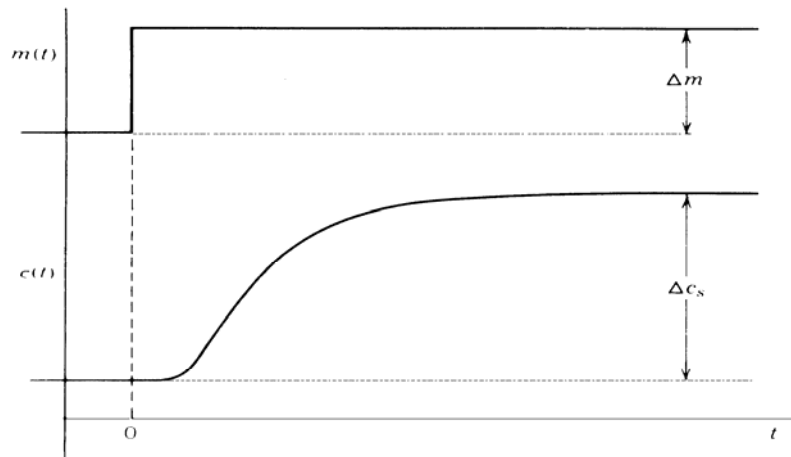


Figura 3.2.1. Curva de reacción del proceso o respuesta escalón de circuito abierto.

[4]

En ausencia de perturbaciones y para las condiciones de la prueba, el diagrama de bloques se puede representar en la figura 3.2.2.

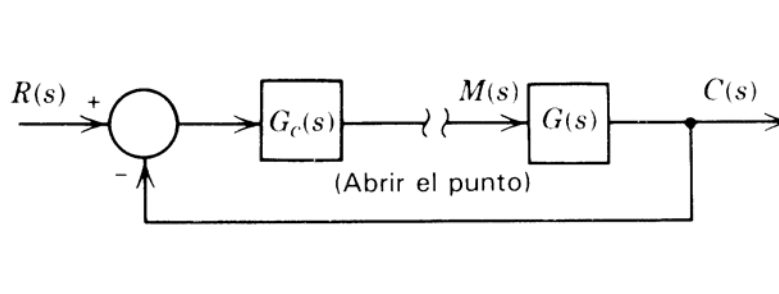


Figura 3.2.2. Diagrama de bloques para la prueba escalón con circuito abierto. [4]

La respuesta de la señal de salida del transmisor se expresa mediante

$$C(s) = G(s) \cdot M(s) \quad (3.2.1)$$

Para un cambio de escalón de magnitud Δm y un modelo de primer orden más tiempo muerto.

$$C(s) = \frac{K \cdot e^{-t_0 \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \cdot \frac{\Delta m}{s} \quad (3.2.2)$$

Al expandir esta expresión en fracciones parciales, se obtiene

$$C(s) = K \Delta m e^{-t_0 s} \left[\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right] \quad (3.2.3)$$

Se invierte, con ayuda de la tabla de transformada de Laplace., y se aplica el teorema de la translación real para obtener

$$\Delta c(t) = K \Delta m \cdot u(t - t_0) \left[1 - e^{-t(t-t_0)/\tau} \right] \quad (3.2.4)$$

Se incluye la función escalón unitario $u(t - t_0)$ para indicar explícitamente que

$$\Delta c(t) = 0 \quad \text{para } t \leq t_0$$

El término Δc es el cambio de salida del transmisor respecto a su valor inicial:

$$\Delta c(t) = c(t) - c(0) \quad (3.2.5)$$

En la figura 3.2.3 se muestra una gráfica de la ecuación 3.2.4, en ésta el término Δc_s , es el cambio, en estado estacionario, de $c(t)$ de la ecuación 3.2.4 se tiene que:

$$\Delta c_s = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta c(t) = K \Delta m \quad (3.2.6)$$

A partir de esta ecuación, y si se tiene en cuenta que la respuesta del modelo debe coincidir con la curva de reacción del proceso en estado estable, se

puede calcular la ganancia de estado estacionario del proceso, la cual es uno de los parámetros del modelo:

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta m} \quad (3.2.7)$$

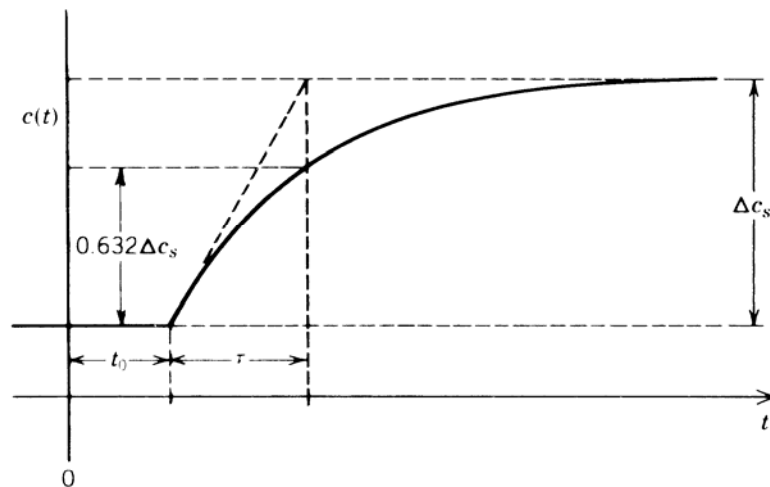


Figura 3.2.3. Respuesta escalón de un proceso de primer orden más tiempo muerto en la que se ilustra la definición gráfica de tiempo muerto t_0 , y la constante de tiempo τ . [4]

El tiempo muerto t_0 y la constante de tiempo τ se pueden determinar mediante 4 métodos, cada uno de los cuales da diferentes valores.

Método 1

En este método se utiliza la línea tangente a la curva de reacción del proceso, en el punto de razón máxima de cambio; para el modelo de primer orden con tiempo muerto esto ocurre en $t=t_0$, como resulta evidente al observar la respuesta del modelo en la figura 3.2.3. De la ecuación se ecuación 3.24 se encuentra que esta razón inicial máxima de cambio es:

$$\left. \frac{d(\Delta c)}{dt} \right|_{t_0} = K \Delta m \left[\frac{1}{\tau} \right] = \frac{\Delta c_s}{\tau} \quad (3.2.8)$$

En la figura 3.2.3 se aprecia que tal resultado indica que la línea de razón máxima de cambio interseca la línea de valor inicial en $t = t_0$, y a la línea de valor final en $t = t_0 + \tau$. De este descubrimiento se deduce el trazo para determinar t_0 y τ que se ilustra en la figura 3.2.4; la línea se traza tangente a la curva de reacción del proceso real, en el punto de reacción máxima de cambio. La respuesta del modelo en el que se emplean los valores t_0 y τ se ilustra en la línea punteada de la figura. Evidentemente, la respuesta del modelo que se obtiene con este método no coincide muy bien con la respuesta real.

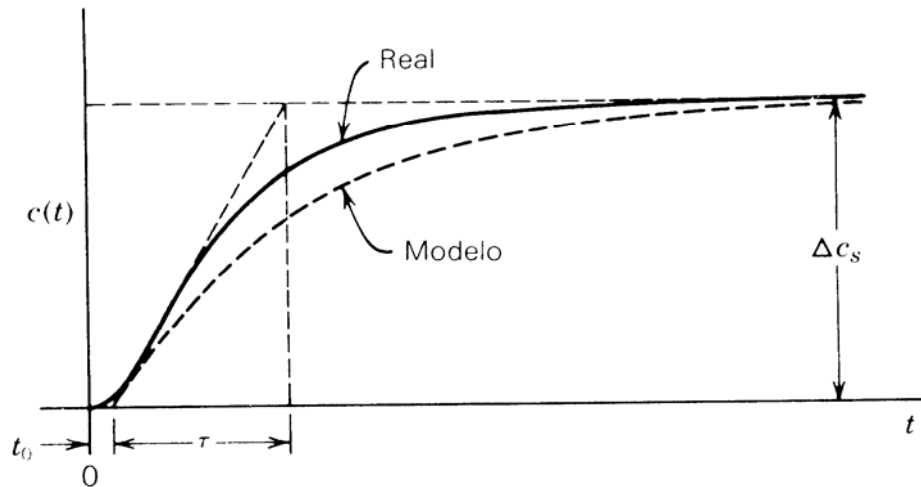


Figura 3.2.4. Parámetros del modelo de primer orden con tiempo muerto que se obtiene mediante el método 1. [4]

Método 2

En este método t_0 se determina de la misma manera que en el método 1, pero con el valor τ se fuerza a que la respuesta del modelo coincida con la respuesta real en $t = t_0 + \tau$. De acuerdo a la ecuación 3.2.4 este punto es:

$$\Delta c(t_0 + \tau) = K \Delta m [1 - e^{-1}] = 0.632 \Delta c_s \quad (3.2.9)$$

Se observa que la comparación entre la respuesta del modelo y la real es mucho mas cercana que con el método 1, Figura 3.2.5. El valor de la constante de tiempo que se obtiene con el método 2 es generalmente menor al que se obtiene con el método 1.

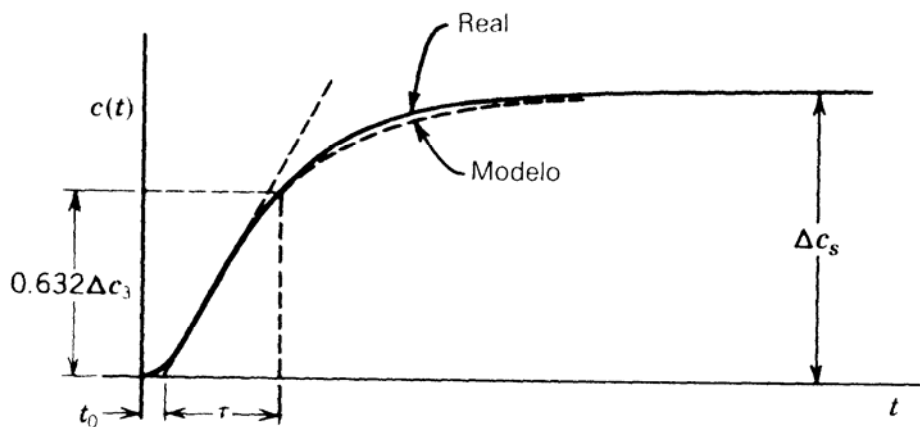


Figura 3.2.5. Parámetros del modelo de la planta de primer orden que se obtienen con el método 2. [4]

Método 3

Al determinar t_0 y τ con los dos métodos anteriores, el paso de menor precisión es el trazo de la tangente en el punto de razón máxima de cambio de la curva de reacción del proceso. Aun en el método 2, donde el valor $(t_0 + \tau)$ es

independiente de la tangente, los valores que se estiman para t_0 y τ dependen de la línea. Para eliminar esta dependencia, el doctor Cecil L. Smith [4] propone que los valores de t_0 y τ de tal manera que la respuesta del modelo y la real coincidan en la región de alta tasa de cambio. Los dos puntos que se recomiendan son $(t_0 + \frac{1}{3} \tau)$ y $(t_0 + \tau)$, y para localizar dichos puntos se utiliza la ecuación 3.2.4:

$$\Delta c(t_0 + \tau) = K \Delta m [1 - e^{-1}] = 0.632 \Delta c_s \quad (3.2.10)$$

$$\Delta c\left(t_0 + \frac{1}{3} \tau\right) = K \Delta m [1 - e^{-\frac{1}{3}}] = 0.283 \Delta c_s$$

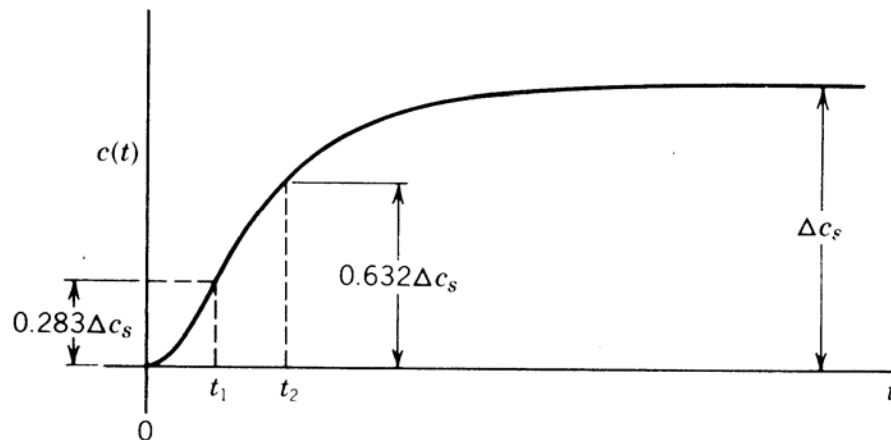


Figura 3.2.6. Parámetros del modelo de la planta de primer orden que se obtienen por medio del método 3. [4]

Estos dos puntos en la figura 3.2.6, se denominan t_2 y t_1 , respectivamente. Los valores de t_0 y τ se pueden obtener fácilmente mediante la simple resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$t_0 + \tau = t_2 \quad (3.2.11)$$

$$t_0 + \frac{1}{3} \tau = t_1$$

Lo cual se reduce a:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (3.2.12)$$

$$t_0 = t_2 - \tau$$

donde:

t_1 = Tiempo en el cual $\Delta c = 0.283\Delta c_s$

t_2 = Tiempo en el cual $\Delta c = 0.632\Delta c_s$

Método 4

Es necesario para usar este método conocer el tiempo en que se aplica el escalón. Se realiza un gráfica y se obtiene el tiempo $t_{63\%}$ que es cuando la salida alcanza un 63% de su valor final, el tiempo $t_{39\%}$ y se aplica las siguientes ecuaciones:

$$\tau = 2(t_{63\%} - t_{39\%}) \quad (3.2.13)$$

$$t_0 = t_{63\%} - (t_i + \tau) \quad (3.2.14)$$

t_i es el tiempo en el cual se aplica el escalón

Parámetros de Ajuste Ziegler-Nichols

Ziegler y Nichols utilizaron el método 1 para determinar los parámetros del modelo. A pesar de que los parámetros que utilizaron no son precisamente la ganancia, la constante de tiempo y el tiempo muerto, sus fórmulas se pueden modificar para expresarlas en términos de esos parámetros.

Tipo de controlador		Ganancia proporcional K_c	Tiempo de integración τ_I	Tiempo de derivación τ_D
Proporcional	P	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	—	—
Proporcional-integral	PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_0$	—
Proporcional-integral-derivativo	PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

Tabla 3.2.1. Fórmulas para ajuste para respuesta de razón de asentamiento de un cuarto. [4]

Para utilizar estas fórmulas se debe tener en cuenta que son empíricas y que solo se aplican en un rango limitado de razones de tiempo muerto contra constante de tiempo, lo cual significa que no se debe extrapolar fuera del rango de t_0/τ entre 0.10 y 1.0. Estriba que existe un número infinito de conjuntos de valores de los parámetros del controlador que pueden producir ese desempeño. Las fórmulas que se dan son justamente uno de tales conjuntos.

Parámetros de Ajuste Cohen Coon

Primero se halla el modelo de la planta por medio de cualquiera de los 3 métodos citados para planta de primer orden en una prueba escalón

Parámetros/Control	P	PI	PID
K_c	$\frac{\tau}{K \cdot t_0} \left(1 + \frac{t_0}{3\tau} \right)$	$\frac{\tau}{K \cdot t_0} \left(0.9 + \frac{t_0}{12\tau} \right)$	$\frac{\tau}{K \cdot t_0} \left(\frac{4}{3} + \frac{t_0}{4\tau} \right)$
τ_i	----	$t_0 \left(\frac{30 + 3t_0/\tau}{9 + 20t_0/\tau} \right)$	$t_0 \left(\frac{32 - 6t_0/\tau}{13 + 8t_0/\tau} \right)$
τ_D	----	----	$t_0 \left(\frac{4}{11 + 2t_0/\tau} \right)$

Tabla 3.2.1. Parámetros de ajuste método de ajuste Cohen Coon

Ajuste mediante los criterios de Error de integración mínimo

El criterio de error ayuda a cuantificar la calidad de control de un PID. El error el cual es calculado como la variable del proceso (PV) menos el setpoint (SP) calculado sobre un periodo de tiempo específico, dando una indicación de la calidad de las constantes de sintonización del PID.

Si el setpoint es cambiado y el tiempo tomado para alcanzar el nuevo setpoint es muy grande, los parámetros de PID son lentos. En este caso la desviación entre PV y el SP será grande, y subsecuentemente el error será también grande.

Debido a que el error está en función del tiempo que dura la respuesta, la suma del error en cada instante se debe minimizar; dicha suma es, por definición, la integral del error en el tiempo. Puesto que la integral del error se trata de minimizar mediante la utilización de las relaciones de ajuste, éstas se conocen como ajuste del error de integración mínimo; sin embargo, la integral del error no se puede minimizar de manera directa, ya que un error negativo muy grande se volvería mínimo.

El Error Absoluto Integral (IAE)

Es el error absoluto (PV-SP) sumado (integrado) sobre el periodo de simulación. Ver figuras Figura 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3. El error absoluto integrado es la porción sombreada delimitada por las señales SP y PV como se muestra en las figuras.

Con sintonización lenta (Figura 3.3.1), el valor IAE será mayor que la sintonización óptima (Figura 3.3.2). Con la sintonización agresiva el PV llega ser oscilatoria y el error es mas grande (Figura 3.3.3). La ecuación es la siguiente:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.2.15)$$

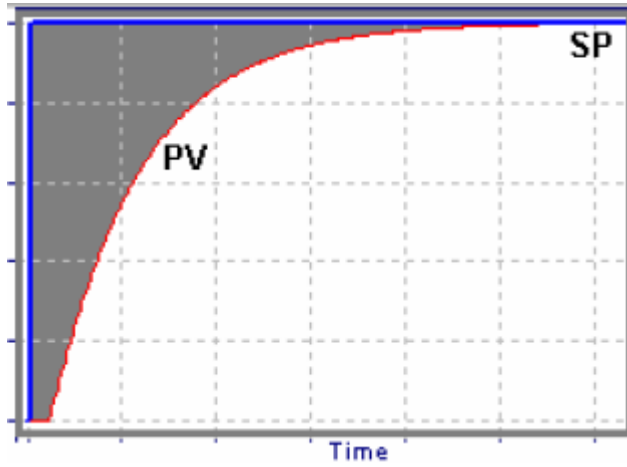


Figura 3.2.7. Criterio IAE con sintonización lenta

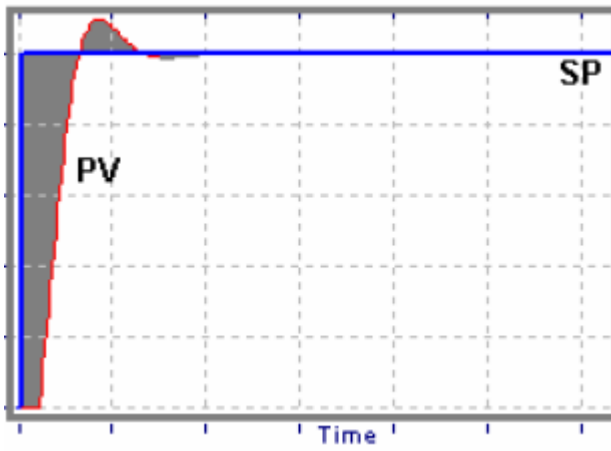


Figura 3.2.8. Criterio IAE con sintonización óptima

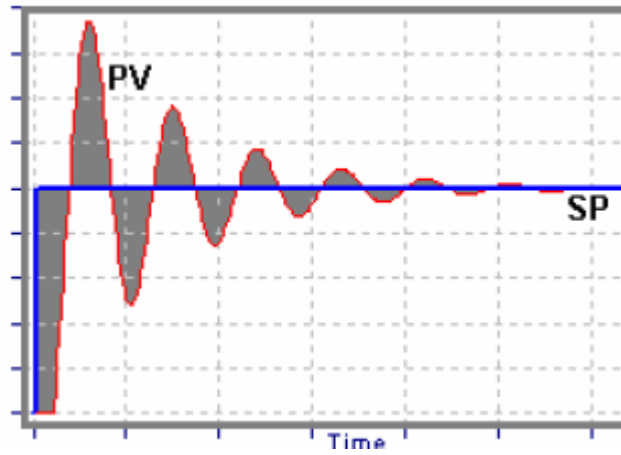


Figura 3.2.9. Criterio IAE con sintonización agresiva

Integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (IAET)

Debido a que los criterios como Integral del cuadrado del error (ICE) dan por resultado una alta ganancia del controlador y respuestas muy oscilatorias (es decir una razón de asentamiento alta), en las cuales el error oscila alrededor del cero por un tiempo relativamente alto. De este fenómeno se deduce que en tal criterio de desempeño debe existir una compensación para el tiempo que transcurre desde el inicio de la respuesta. Se introduce dicha compensación mediante la ponderación del tiempo transcurrido.

$$IAET = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.2.16)$$

Fórmulas de ajuste de integral mínima de error

Modelo del proceso

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-t_0 s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (3.2.17)$$

Controlador Proporcional Integral (PI)

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (3.2.18)$$

Integral del error

$$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1} \quad (3.2.19)$$

$$\tau_i = \frac{\tau}{a_2 + b_2 (t_0/\tau)} \quad (3.2.20)$$

	IAE	IAET
a_1	0.758	0.586
b_1	-0.861	-0.916
a_2	1.02	1.03
b_2	-0.323	-0.165

Tabla 3.2.2. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para cambios en el punto de control para PI

	IAE	IAET
a_1	0.984	0.859
b_1	-0.986	-0.977
a_2	0.608	0.674
b_2	0.707	0.680

Tabla 3.2.3. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para entrada de perturbaciones, PI

Controlador Proporcional Integral (PID)

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D \right) \quad (3.2.21)$$

Integral del error

$$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1} \quad (3.2.22)$$

$$\tau_i = \frac{\tau}{a_2 + b_2 \left(\frac{t_0}{\tau} \right)} \quad (3.2.23)$$

$$\tau_D = a_3 \tau \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_3} \quad (3.2.24)$$

	IAE	IAET
a_1	1.086	0.965
b_1	-0.869	-0.855
a_2	0.740	0.796
b_2	-0.130	-0.147
a_3	0.348	0.308
b_3	0.914	0.9292

Tabla 3.2.4. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para cambios en el punto de control para PID

	IAE	IAET
a_1	1.495	1.357
b_1	-0.945	-0.947
a_2	1.101	0.842
b_2	0.771	0.738
a_3	0.560	0.381
b_3	1.006	0.995

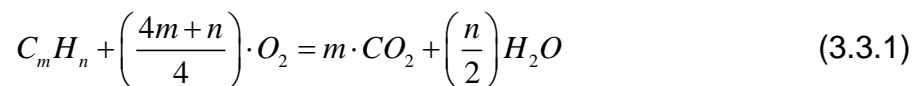
Tabla 3.2.5. Fórmulas para ajuste de integral mínima de error para entrada de perturbaciones, para PID

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

Combustible y la Combustión

Oxígeno teórico y aire para la combustión

La cantidad justa de oxígeno o aire que se necesita para quemar carbón, hidrógeno y azufre en un combustible, para obtener dióxido de carbono, vapor de agua y dióxido de azufre, es el oxígeno teórico o aire. La expresión general para la combustión de un combustible es:



m y n son el número de átomos de carbono e hidrogeno neto, respectivamente, en el combustible. Por ejemplo, esta relación demuestra que un mol de metano (CH₄) requiere dos moles de oxígeno para la combustión completa que produce un mol de dióxido de carbono y dos moles de agua. Si se utiliza aire, cada mol de oxígeno va acompañado por 3.76 moles de nitrógeno.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y Definición del Problema

Se realizó entrevistas al Ingeniero Mecánico encargado del área de mantenimiento, para la identificación del problema.

Se realizó entrevistas al Jefe de Procesos y se reconocen las principales necesidades.

En otros estudios hechos anteriormente sobre el análisis químico de gases en la chimenea del horno.

4.2 Obtención y Análisis de Información

Se realizaron entrevistas a los diferentes operarios del horno, al igual que al jefe del área de galvanizado. Con ello se logra reconocer las principales fallas en el procedimiento de control actual.

Se adquiere información de estudios realizados por la empresa DPI, “Calibración de los parámetros de combustión Horno tratamiento térmico”.

Se adquiere información básica de los Hornos en base a los manuales AICO, fabricantes del horno. Sin embargo, la información no es suficiente para obtener un modelo matemático teórico y se busca contacto telefónico y quedan de enviar la información via e-mail, la cual llega casi al finalizar el proyecto. El problema radicó principalmente en que empresa AICO está quebrada y la empresa ARROLA adquirió toda la documentación técnica de estos hornos y demoran mucho en responder las inquietudes que es necesario evacuar.

Obtención de los manuales de los controladores E5CN y contacto con los proveedores AVEASA para asistencia técnica.

4.3 Evaluación de las Alternativas y Síntesis de una Solución

Se determina medir combustible en las diferentes pruebas para el cálculo de un modelo matemático empírico. Se presenta el problema con los medidores de diesel, los cuales no funcionan ya que están hechos para la medición de caudales mayores a los reales. Se realiza una investigación de flujómetros más precisos. Sin embargo, este llega al mes y medio de iniciar la práctica y su puesta en marcha se dificulta ya que sufre una avería. Regresa reparado la semana del 5 al 9 de Noviembre pero para evitar de nuevo una avería se requiere de un filtro de malla 100. Por tanto no se logran hacer mediciones de combustible hasta que no llegue el filtro. De la semana 19 al 23 de noviembre no llega. Lo cual implica una gran restricción en cuanto a la obtención de consumo real de combustible. No se toman datos reales del consumo de combustible.

Esta situación produjo grandes atrasos para la realización del proyecto. Ya que una medición real de combustible permitiría realizar las pruebas de ajuste empíricas de una presión y aire a un punto óptimo, ya que el principal problema radica en una mala combustión. Para ello se iba a contar con la asesoría del Jefe de Procesos que por medio de herramientas de software permitiría realizar experimentos que permitieran encontrar dicho punto óptimo.

Debido a esto, se decide tratar de mejorar el sistema con las herramientas a disposición. Esto implicaría concentrarse en obtener los parámetros PID que permitan controlar la inyección de la mezcla aire-combustible sin desperdicio de energía como ocurre actualmente con el control ON-OFF.

4.4 Implementación de la Solución

Primero que todo se busca en demostrar que la implementación del PID en el sistema va a proveer un mejor control de la temperatura que en el modo ON-OFF para ello se realizan simulaciones en matlab.

Seguidamente se busca encontrar un modelo matemático teórico o empírico, debido a la poca información del material de fabricación de los hornos se realizan mediciones de la variable de temperatura para obtener un modelo empírico y con base a este y diferentes métodos de diseño de controladores realizar los ajustes del PID.

A continuación se realizan los ajustes necesarios para implementar el PID y programar el controlador con los parámetros con que mejor se comporte el sistema.

Se realizan mediciones de temperatura y de la salida el controlador. Con el sistema PID funcionando.

4.5 Reevaluación y Rediseño

Para un control proporcional se vio la necesidad de cambiar los Modutroles (ver análisis de resultados para una mayor explicación), pero esto implicaba una inversión aproximada de 500 dólares por cada Modutrol, en total son 6 por cada línea(2 líneas). Debido al poco tiempo que se contaba para la realización de este proyecto (3 meses) se empezó a indagar en otro tipo de solución más económica y rápida

Esto llevo a indagar sobre como utilizando los recursos existentes en la empresa y la posibilidad de utilizar el controlador E5CN. Ya que este tiene el modo de operación PID pero no estaba implementado. Por lo tanto surgió la interrogante para que gastar recursos si la empresa cuenta con una herramienta que puede implementar el PID?. Se opta por utilizar o más bien investigar los requerimientos necesarios para poner en marcha el controlador en el modo PID.

Se diseñó un software en plataforma matlab que permita a cualquier persona seguir realizando ajustes a los parámetros PID. Sin que requiera de amplios conocimientos en teoría de control.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y selección final

5.1.1 Sistema de Control de Temperatura con acople mecánico para control de aire

Se planteó la posibilidad de controlar el aire que entra al quemador por medio de un ajuste mecánico al mismo modutrol que controla la entrada de combustible al quemador. Esto de acuerdo a la ecuación 3.3.1, en la cual se puede ver que la relación es lineal a presión de diesel y aire constante. La ventaja es que mejoraría la relación aire-combustible y evitaría que los horneros ajusten a conveniencia la relación de aire. Sin embargo, sería necesario fijar una presión de diesel y que los horneros no la desajusten.

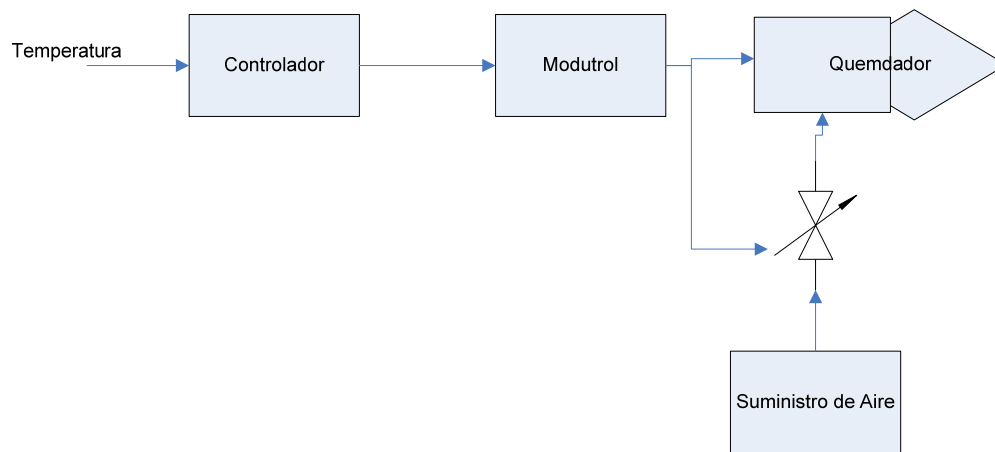


Figura 5.1.1.1 Diagrama de bloques de solución planteada

No se escogió esta solución debido a que era necesario conocer la cantidad o rango de caudal que permite controlar la válvula mariposa. Al igual que la escala que controla la cantidad de combustible al quemador. Como se puede ver en la figura 5.1.1.2 Se trato de conseguir esta información con los fabricantes del horno pero esta empresa (AICO de España) quebró y la información nunca fue recibida.

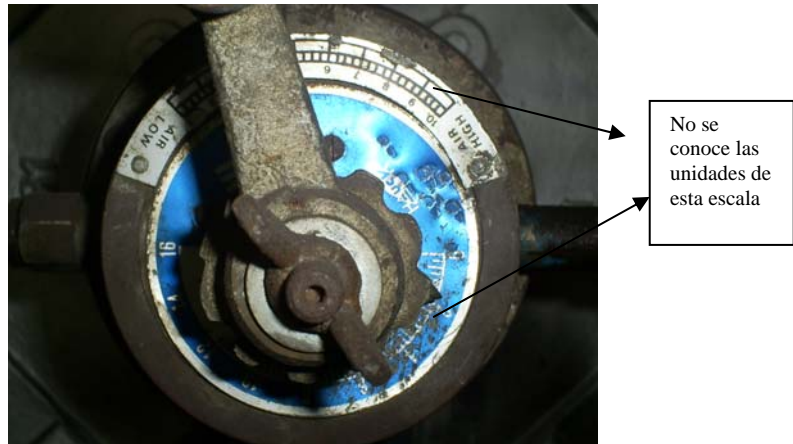


Figura 5.1.1.2. Vista posterior del control de mezcla del quemador

5.1.2 Sistema de Control de Temperatura con controlador separado para control de aire

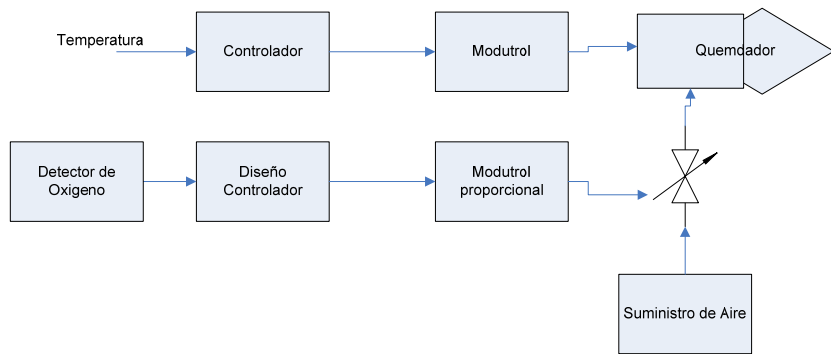


Figura 5.1.2.1. Propuesta a solución para mejorar la relación aire-combustible

Esta solución planteaba utilizar un controlador separado para control del aire que entra al quemador. La ventaja es que por medio de un detector de oxigeno se conocería de una forma más segura la proporción de oxigeno necesaria para la combustión. Sin embargo, se estuvo averiguando los diferentes sensores de oxigeno y no se encontró uno que soportara las condiciones de

temperatura tan altas (700°C) del horno. Además, debido al poco tiempo con que se contaba para la realización de este proyecto se descartó. La ventaja de esta solución es que se obtendría una relación aire combustible más óptima.

5.1.3 Sistema de Control de Temperatura con ajuste de parámetros PID para mejorar control de temperatura.

Esta es la solución consiste en realizar un estudio de la planta encontrando el modelo matemático y ajustando los parámetros PID del controlador actual. Sin embargo se requiere realizar una investigación para conocer si se puede programar en modo PID.

Esta solución es una forma de mejorar el control y de acuerdo al tiempo de desarrollo del proyecto se escoge en acuerdo con la empresa y la posibilidad de expandir el periodo del proyecto si la empresa lo desea.

5.2. Descripción del hardware

5.2.1 Actuadores



Figura 5.2.1. Modutrol IV Serie 6184F1014

El modutrol usa switche spdt para su control (ver figura 5.2.2). No tiene resistencia interna de retroalimentación, por lo que no permite control proporcional. Se utiliza para control ON-OFF de las válvulas de ajuste de la mezcla aire-

combsutible. Posee dos switches uno para final de carrera y otro para cuando el eje regresa a su posición inicial. Tiene un rango de rotación ajustable de 90° a 160°.

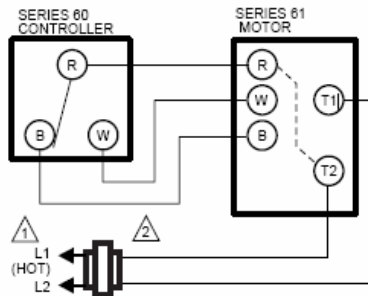


Figura 5.2.1.1. Conexión del control

5.2.2 Controlador de Temperatura



Figura 5.2.2.1 Controlador de temperatura E5CN

El controlador de temperatura con salida Relay permite control modo ON-OFF y PID. Este modelo a diferencia de su versión anterior permite realizar pruebas en modo manual. La señal de entrada es muestreada a una razón de 250ms.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Resultados

Obtención de las curvas características

**Tabla 6.1.1 Mediciones de temperatura
Para cada cámara**

Nº Muestra	TC1	TC2	TC3
1	668	688	706
2	668	688	706
3	668	688	706
4	669	688	706
5	669	689	706
6	669	689	706
7	669	689	706
8	669	689	706
9	669	689	706
10	669	689	706
11	669	689	706
12	669	689	706
13	669	690	706
14	669	690	706
15	668	690	706
16	668	690	706
17	668	690	706
18	668	690	706
19	668	690	706
20	668	690	706
21	668	690	706
22	668	690	706
23	668	690	706
24	668	690	706
25	668	691	706
26	668	693	706
27	669	697	707
28	670	699	709
29	671	703	710
30	672	706	712
31	673	710	713
32	675	714	715
33	676	720	717
34	678	723	720
35	679	723	722
36	679	729	722
37	681	732	725
38	683	737	726
39	684	741	729

40	686	741	731
41	686	746	731
42	688	747	734
43	688	751	735
44	690	753	737
45	690	756	739
46	692	758	741
47	692	761	742
48	692	763	744
49	692	766	745
50	692	769	747
51	692	769	749
52	692	772	749
53	692	775	752
54	692	777	753
55	692	779	755
56	692	781	757
57	692	783	758
58	692	785	759
59	692	787	761
60	692	791	762
61	692	792	765
62	692	793	766
63	692	794	766
64	692	797	768
65	692	798	769
66	692	798	771
67	692	801	771
68	693	801	773
69	693	804	773
70	693	806	776
71	693	807	777
72	693	809	778
73	693	810	779
74	694	813	780
75	694	813	782
76	694	814	783
77	694	816	783
78	695	818	785
79	695	818	786
80	695	820	787
81	696	821	788
82	696	822	790

83	696	823	790
84	696	824	791
85	696	825	792
86	697	826	793
87	697	828	794
88	697	828	795
89	697	829	795
90	698	830	797
91	698	830	798
92	698	831	798
93	698	831	798
94	698	831	799
95	698	832	800
96	699	832	800
97	699	832	800
98	699	833	800
99	699	833	800
100	699	834	800
101	699	835	800
102	699	835	800
103	696	835	805
104	695	836	806
105	695	836	806
106	695	836	807
107	696	836	807
108	697	836	808
109	697	837	808
110	698	837	808
111	698	837	808
112	699	837	809
113	699	838	810
114	700	838	810
115	700	838	810
116	701	838	811
117	701	839	812
118	702	839	812
119	702	839	812
120	702	839	812
121	703	838	813
122	703	838	814
123	703	838	814
124	704	838	815
125	704	838	815
126	704	838	815
127	704	839	815
128	705	839	816
129	705	839	817
130	705	839	817
131	705	839	818

132	706	839	818
133	706	839	818
134	706	840	818
135	706	840	819
136	707	840	819
137	707	840	820
138	707	840	820
139	707	840	820
140	707	840	820
141	708	840	821
142	708	840	821
143	708	840	822
144	709	840	822
145	709	840	822
146	709	840	822
147	709	840	823
148	710	840	823
149	710	840	823
150	710	840	824
151	711	840	824
152	711	840	825
153	711	840	825
154	711	840	825
155	712	840	825
156	712	840	826
157	712	840	826
158	712	840	827
159	713	840	827
160	713	840	827
161	713	840	827
162	713	840	827
163	713	840	828
164	714	840	828
165	714	840	829
166	714	840	829
167	714	840	829
168	715	840	829
169	715	840	830
170	715	840	830
171	716	840	830
172	716	840	830

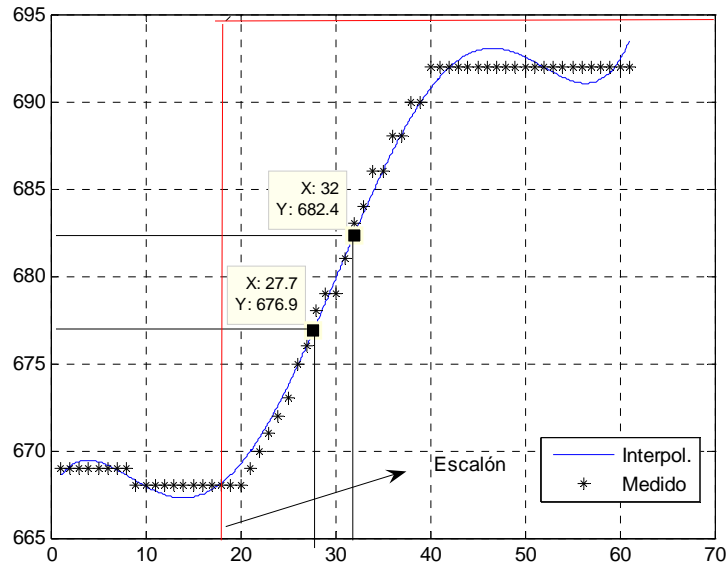


Figura 6.1.1. Respuesta escalón de la cámara 1. cambio de 50% a 60%. Datos tomados de la tabla 6.1.1

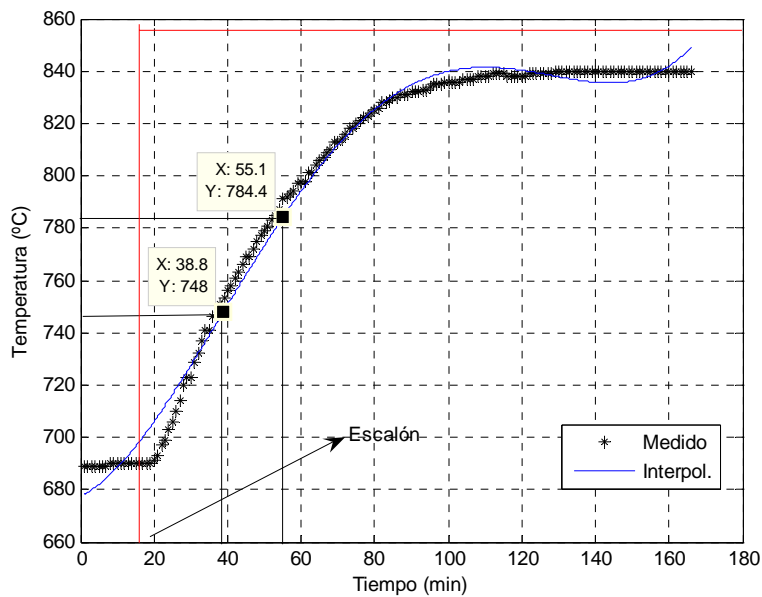


Figura 6.1.2. Respuesta escalón de la cámara 2. Cambio de 50% a 60%. Datos tomados de la tabla 6.1.1

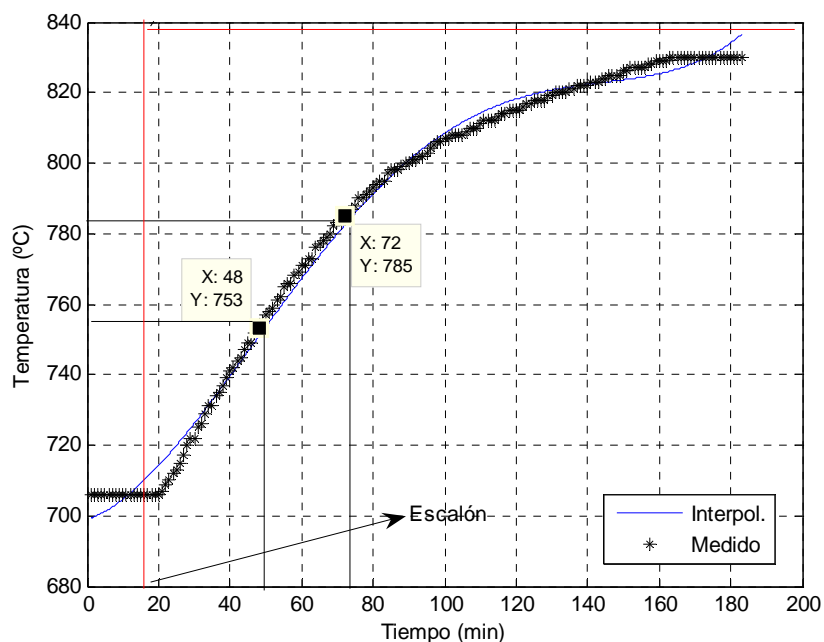


Figura 6.1.3. Respuesta escalón de la camara 3. cambio de 50% a 60%. Datos tomados de la tabla 6.1.1

Tabla 6.1.2. Condiciones Presión y apertura de válvula de la prueba de respuesta al escalón

Quemador	Presion (psi)	Valvula de Aire
1	OFF	3,5
2	8,5	2
3	OFF	3,5
4	13	2,5
5	5	3
6	5,2	3,5
7	OFF	1
8	7,9	3
9	OFF	2
10	8	2,5

Modelos obtenidos:

Cámara 1

De la ecuación 3.2.7 y la gráfica 6.1.1 se obtiene:

$$K = \frac{692 - 668}{60 - 50} = 2.4$$

Aplicando el método 4 y la ecuación 3.2.13 para encontrar el tiempo muerto t_0 y τ obtenemos:

$$\tau = 2(32 - 27.7) = 8.6$$

El escalón se aplica a los 17 minutos que se empiezan a hacer las mediciones por tanto utilizando la formula 3.2.14 tenemos:

$$t_0 = 32 - (17 + 8.6) = 6.4 \text{ min.} = 384 \text{ seg.}$$

El modelo obtenido para la cámara 1 en minutos el siguiente:

$$G_{C1}(s) = \frac{2.4}{8.6 \cdot s + 1} e^{-6.4s} \quad (6.1.1)$$

Cámara 2

De la ecuación 3.2.7 y la gráfica 6.1.2 se obtiene:

$$K = \frac{840 - 690}{60 - 50} = 15$$

Aplicando el método 4 y la ecuación 3.2.13 para encontrar el tiempo muerto t_0 y τ obtenemos:

$$\tau = 2(55.2 - 39) = 32.4 \text{ min}$$

El escalón se aplica a los 17 minutos que se empiezan a hacer las mediciones por tanto utilizando la formula 3.2.14 tenemos:

$$t_0 = 55.2 - (17 + 32.4) = 5.8 \text{ min.} = 348 \text{ seg.}$$

El modelo obtenido para la cámara 2 en minutos es el siguiente:

$$G_{C2}(s) = \frac{15}{32.4 \cdot s + 1} e^{-5.8s} \quad (6.1.2)$$

Cámara 3

De la ecuación 3.2.7 y la gráfica 6.1.3 se obtiene:

$$K = \frac{830 - 706}{60 - 50} = 12.4$$

Aplicando el método 4 y la ecuación 3.2.13 para encontrar el tiempo muerto t_0 y τ obtenemos:

$$\tau = 2(70 - 50.5) = 39 \text{ min} = 2340 \text{ seg}$$

El escalón se aplica a los 17 minutos que se empiezan a hacer las mediciones por tanto utilizando la formula 3.2.14 tenemos:

$$t_0 = 70 - (17 + 39) = 14 \text{ min.} = 840 \text{ seg.}$$

El modelo obtenido para la cámara 2 en minutos es el siguiente:

$$G_{C3}(s) = \frac{12.4}{39 \cdot s + 1} e^{-14s} \quad (6.1.2)$$

Obtención de Resultados

Tabla 6.1.3. Mediciones de Temperatura sin mejora Cámara 1, 2 y 3

Tiempo (min)	TC1(°C)	TC1(°C)	TC1(°C)
1	710,1	722	728,5
2	711,1	721	729,5
3	712,1	720	730,5
4	711,1	719	731,5
5	710,1	719	730,5
6	709,1	720	729,5
7	709,1	721	728,5
8	710,1	722	728,5
9	711,1	722	729,5
10	712,1	721	730,5
11	712,1	720	731,5
12	711,1	719	731,5
13	710,1	719	730,5
14	709,1	720	729,5
15	709,1	721	728,5
16	710,1	722	728,5
17	711,1	722	729,5
18	712,1	721	730,5
19	712,1	720	731,5
20	711,1	719	731,5
21	710,1	719	730,5
22	709,1	720	729,5
23	709,1	721	728,5
24	710,1	722	728,5
25	711,1	722	729,5
26	712,1	721	730,5
27	712,1	720	731,5
28	711,1	719	731,5
29	710,1	719	730,5
30	709,1	720	729,5
31	709,1	721	728,5
32	710,1	722	728,5
33	711,1	722	729,5
34	712,1	721	730,5
35	712,1	720	731,5
36	711,1	719	731,5
37	710,1	719	730,5
38	709,1	720	729,5
39	709,1	721	728,5
40	710,1	722	728,5
41	711,1	722	729,5

42	712,1	721	730,5
43	712,1	720	731,5
44	711,1	719	731,5
45	710,1	719	730,5
46	709,1	720	729,5
47	709,1	721	728,5
48	710,1	722	728,5
49	711,1	722	729,5
50	712,1	721	730,5
51	712,1	720	731,5
52	711,1	719	731,5
53	710,1	719	730,5
54	709,1	720	729,5
55	709,1	721	728,5
56	710,1	722	728,5
57	711,1	722	729,5
58	712,1	721	730,5
59	712,1	720	731,5
60	711,1	719	731,5
61	710,1	719	730,5
62	709,1	720	729,5
63	709,1	721	728,5
64	710,1	722	728,5
65	711,1	722	729,5
66	712,1	721	730,5
67	712,1	720	731,5
68	711,1	719	731,5
69	710,1	719	730,5
70	709,1	720	729,5
71	709,1	721	728,5
72	710,1	722	728,5
73	711,1	722	729,5
74	712,1	721	730,5
75	712,1	720	731,5
76	711,1	719	731,5
77	710,1	719	730,5
78	709,1	720	729,5
79	709,1	721	728,5
80	710,1	722	728,5
81	711,1	722	729,5
82	712,1	721	730,5
83	712,1	720	731,5

84	711,1	719	731,5
85	710,1	719	730,5
86	709,1	720	729,5
87	709,1	721	728,5
88	710,1	722	728,5
89	711,1	722	729,5
90	712,1	721	730,5
91	712,1	720	731,5
92	711,1	719	731,5
93	710,1	719	730,5
94	709,1	720	729,5
95	709,1	721	728,5
96	710,1	722	728,5
97	711,1	722	729,5
98	712,1	721	730,5
99	712,1	720	731,5
100	711,1	719	731,5

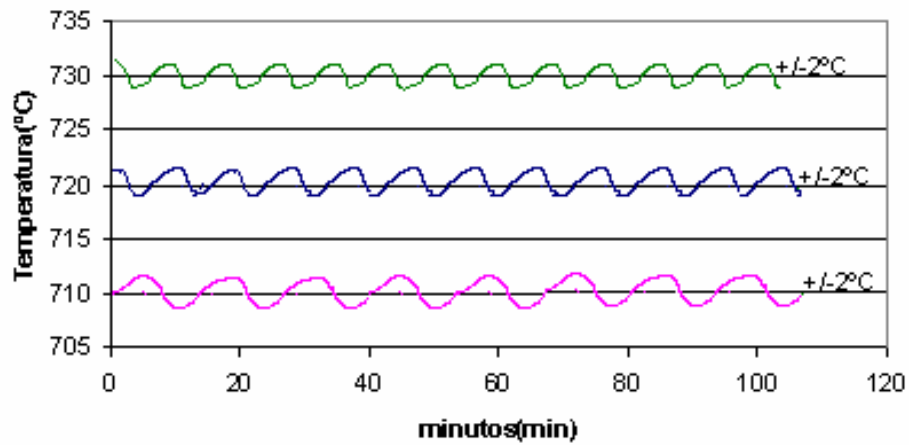


Figura 6.1.4. Medición de Temperatura, Cámara 1, 2 y 3, con SP =710, SP =720, SP =730 Respectivamente

Tabla 6.1.4. Condiciones Presión y apertura de válvula de mediciones de la Figura 6.1.4

Quemador	Presion (psi)	Valvula de Aire
1	OFF	3,5
2	4,5	2
3	OFF	3,5
4	12	2,5
5	10	3
6	5	4
7	OFF	1
8	7,6	5.5
9	OFF	2
10	5.6	3

Tabla 6.1.5. Mediciones de Temperatura con Cámara 1 (PID) y Cámara 3 (ON-OFF)

Tiempo(horas)	TC1 (°C)	TC3 (°C)
0	536	641,0
0,2	540	640,9
0,4	538	640,2
0,6	536	640,8
0,8	540	640,5
1	538	640,8
1,2	536	640,0
1,4	540	640,7
1,6	538	640,5
1,8	536	641,0
2	540	640,4
2,2	538	640,0
2,4	536	640,0
2,6	540	640,5
2,8	538	641,0
3	536	640,5
3,2	540	640,7
3,4	538	640,3
3,6	536	640,3
3,8	540	640,0
4	538	641,0
4,2	536	640,3
4,4	540	640,4
4,6	538	640,3
4,8	536	640,9
5	540	640,9
5,2	538	640,2
5,4	536	640,5
5,6	540	640,8
5,8	538	640,2
6	536	640,3
6,2	540	640,7
6,4	538	640,6
6,6	536	640,5
6,8	540	640,6
7	538	640,9
7,2	536	640,2
7,4	540	640,5
7,6	538	640,3
7,8	536	640,4
8	540	640,1
8,2	538	640,5
8,4	536	640,8
8,6	540	640,8
8,8	538	640,3
9	536	640,9

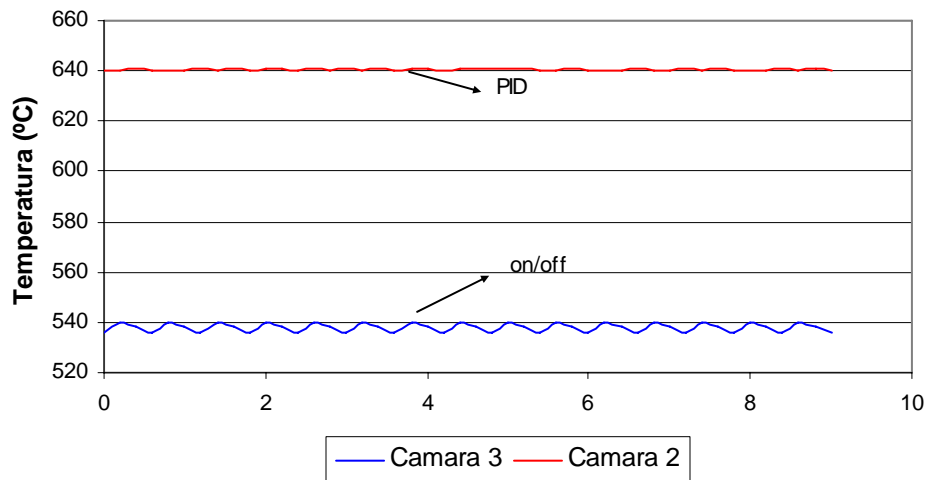


Figura 6.1.5. Resultados obtenidos después de programar en PID la cámara 2 SP: 640 y Cámara 3 en ON-OFF y SP: 540

Los controladores calculados

Tabla 6.1.6. Controlador PI obtenido por el método IAE

Parámetros/Control	C1	C2	C3
K_c	0.4046	0.22225	0.1476
τ_i	663.452	2020.4	2588.3

Tabla 6.1.7. Controlador PI obtenido por el método IAET

Parámetros/Control	C1	C2	C3
K_c	0.31778	0.1891	0.120792
τ_i	569.379	1946	2588.3

Nota: Recuerde que en el momento de programación en el 5ECN la ganancia Proporcional debe aplicar la siguiente fórmula, según el fabricante:

$$P = \frac{100}{K_c} * 0.1$$

el τ_i se introduce en unidades de segundo como esta en la tabla

Medición de la salida del controlador

Muestra 1

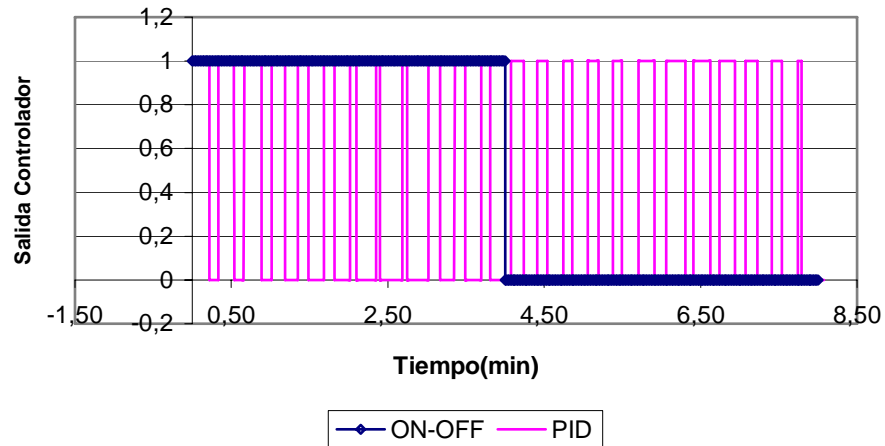


Figura 6.1.6. Salida del Controlador E5CN en modo PID y ON-OFF para la cámara 1. para mantener 700°C.

Promedio de la señal ON-OFF, Muestra 1 =0.5

Promedio de la señal PID, Muestra 1 =0.463

(Ver tabla en anexos 10.1)

Muestra 2

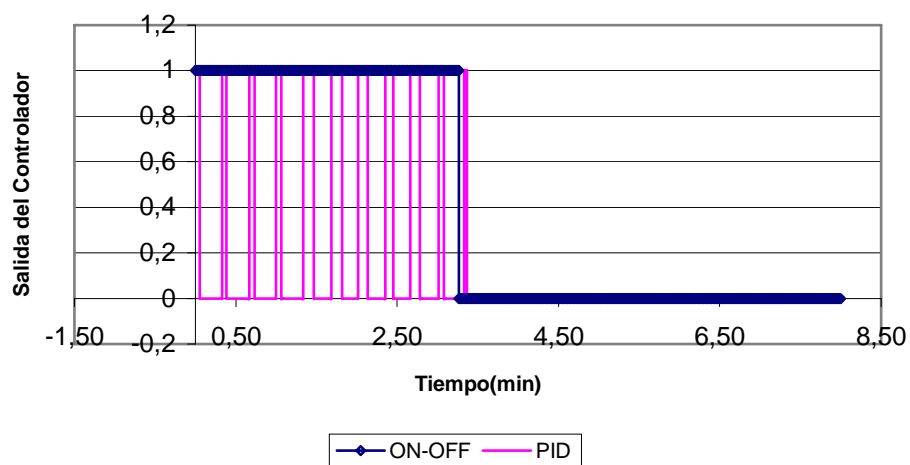


Figura 6.1.7. Salida del Controlador E5CN en modo PID y ON-OFF para la cámara 1. para mantener 700°C.

Promedio de la señal ON-OFF, $M2 = 0.408$

Promedio de la señal PID, $M2 = 0.139$

(Ver tabla en anexos 10.1)

Muestra 3

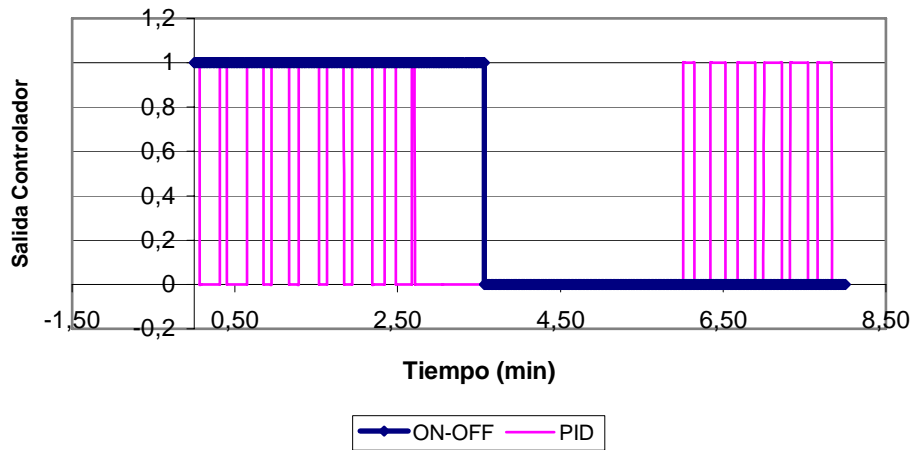


Figura 6.1.8. Salida del Controlador E5CN en modo PID y ON-OFF para la cámara 1, para mantener 700°C.

Promedio de la señal ON-OFF, $M3 = 0.44$

Promedio de la señal PID, $M3 = 0.328$

(Ver tabla en anexos 10.1)

6.2 Análisis

Con respecto al análisis de la información adquirida durante el lapso de la realización del proyecto, se pudo evidenciar fallas en los aspectos físicos y electrónicos del sistema. Desde el punto de vista electrónico, al inicio del proyecto se pensó que los Modutroles que controlan la mezcla de aire y combustible al quemador (ver figura 3.1.3), tenían la capacidad de ser controlados por corriente o voltaje proporcional. Estos Modutroles son de la serie 61 y no permiten control proporcional por medio de corriente 0-20mA. Esto quiere decir que el eje del modutrol no se puede posicionar en un ángulo deseado de acuerdo una señal de control proporcional, esto parecía ser un problema. Cambiar los modutroles implicaba una inversión aproximada de 500 dólares por cada Modutrol, en total son 6 por cada línea(2 líneas). Debido al poco tiempo que se contaba para la realización de este proyecto (3 meses) se empezó a indagar en otro tipo de solución más económica y rápida.

Inicialmente se había propuesto el diseño de un controlador pero debido a razones explicadas en el capítulo 4.4. Se opta por utilizar el controlador digital E5CN con el que cuenta la empresa. Aunque, la salida del controlador es un relay y debido a que los procesos térmicos son lentos. Utilizar el controlador es una opción viable. La salida del controlador proporciona una señal PWM, que abre y cierra el Modutrol no necesariamente a su máxima apertura proporcionado al horno una energía promedio que puede ser comparada con la señal de salida de un controlador con salida proporcional.

Los resultados se pueden ver comparando las figuras 6.14 y 6.15, El control ON-OFF presenta oscilaciones de +/-4 grados para todas las cámaras. Por otro lado en la figura 6.15 el sistema PID permanece prácticamente constante excepto por algunas variaciones pequeñas, cortas y poco frecuentes.

No se lograron obtener por cuestiones de tiempo y procesos de la empresa, datos de tiempos de estabilización ante nuevos set points. Por cuestiones de procesos; debido a que la temperatura no se puede variar demasiado ya que esto implica deterioro en el temple del alambre. Además, la temperatura de operación del horno requiere que sea lo más constante posible.

Los controladores se programaron con los valores de la tabla 6.1.5 utilizando el método IAE obteniéndose los resultados muy similares a los de la figura 6.1.5 en todas las cámaras. Se realizaron pruebas entre IAE e IAET, según simulaciones por computadora; IAE responde más rápido que IAET ante las perturbaciones. Esto en la práctica es muy difícil comprobarlo ya que las perturbaciones que entran al sistema son aleatorias ya que representan aumentos de temperatura cuando el alambre se rompe o disminución de temperatura cuando aumenta la carga o el alambre. Es muy difícil hacer estas pruebas donde las perturbaciones siempre sean iguales. Primero que todo, implicaría paros en ciertos hilos de alambre lo cual disminuye la producción por hora y este horno trabaja las 24 horas del día. En todo caso, ante perturbaciones donde la temperatura aumenta, la acción de control no es suficiente como para eliminar la perturbación lo más pronto posible para ello es necesario que se ajusten los quemadores para que operen en un rango más amplio de selección de mezcla. (el quemador trabaja en un rango de 2 a 6 y la escala de estos es de 0 a 16). Lograr que el quemador disminuya en mayor cantidad la entrada de energía en el momento en que se presentan dichas perturbaciones ayudaría a que el sistema se comporte mejor ante las perturbaciones. De acuerdo a observaciones, en el caso de las perturbaciones que corresponden a disminución de temperatura (cuando entra alambre, o llueve) El sistema de control ante estas perturbaciones negativas actúan un poco mejor ya que las disminuciones de temperatura no son tan frecuentes como los aumentos.

Con respecto a la disminución de consumo de combustible, no se pudieron realizar mediciones reales ya que se había comprado un instrumento de medición

pero no se había montado debido a la demora en la llegada de un filtro muy selectivo que evitara averías como ocurrió la primera vez que se trato de instalar.

Se realizó una estimación que aunque no corresponda a la real puede ser útil para comprobar que la mejora con PID ayudó en el objetivo de disminución en el consumo de combustible.

La salida del controlador es la que manipula los Modutroles y estos a su vez la inyección de energía a la cámara. La salida del controlador es una señal de voltaje la cual representa 2 posibilidades; 1: apertura máxima del quemador por consiguiente una máxima energía se inyecta al horno y por consiguiente mayor consumo de combustible. 0: Apertura mínima del quemador por tanto se inyecta la menor cantidad de energía al horno y en este punto es donde se consume la menor cantidad de combustible.

Se tomaron 3 muestras durante 8 minutos para la cámara 1. Si no representan una disminución de consumo real, se puede ver algo interesante. En las gráficas 6.1.7. y 6.1.8. Se ve a simple vista que la cantidad de tiempo en que los quemadores abren es menor en el modo PID que en el modo ON-OFF. Ahora bien si dijimos que un 1 en la salida del controlador representa una máxima energía aplicada al horno podemos llamarla A. Si en modo PID la muestra 1 (ver gráfica 6.1.6) tiene un promedio total de 0.463A y en modo ON-OFF tiene un promedio total de 0.5A quiere decir que con ON-OFF durante 8 minutos requiere 0.5A de su máxima energía mientras que en PID durante 8 min. necesita 0.463A de su máxima energía para mantener la temperatura constante a 700°C

De acuerdo a la tabla de mediciones ubicada en los Anexos 10.2. Se pueden obtener el promedio total de las muestras, para ON-OFF el promedio total es de 0.449A mientras que para PID el promedio total es 0.31A

Esto quiere decir que:

$$\frac{0.449A}{8 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \cdot \frac{24 \text{ hora}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ Mes}} = \frac{2424.6A}{1 \text{ mes}}$$

$$\frac{0.31A}{8 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \cdot \frac{24 \text{ hora}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ Mes}} = \frac{1674.6A}{1 \text{ mes}}$$

$$2424A - 1674.6A = 750.6A$$

$$2424A \Rightarrow 100\%$$

$$750A \Rightarrow 30\%$$

Claro que a este 30% habrá que restarle todas las pérdidas que se presentan por la mala combustión. Sin embargo, se demuestra de una forma cualitativa el la disminución del consumo de combustible.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Un aumento en el rango de operación de los quemadores permitirá mejorar la acción de control del controlador.
3. El modo de operación PID permite mantener una temperatura constante de la cámara prácticamente libre de oscilaciones cuando las perturbaciones son mínimas.
4. Un PI permite obtener resultados satisfactorios en cuanto a control de temperatura. La constante de tiempo diferencial no es significativa al tratarse de procesos tan lentos como este.
5. Los valores de PI de banda proporcional y tiempo diferencial de la tabla 6.1.6. permiten un control óptimo de temperatura del sistema
6. El modo PID permite disminución en el consumo de combustible, (sin tomar en cuenta las perdidas por mala combustión) de hasta un 30% con respecto al control ON-OFF.
7. El método IAE para el ajuste del PID de la plante permite obtener un mejor desempeño del sistema.
8. Los Modutroles series 61 si pueden ser usados para control PID. con salida PWM pero no con salida de corriente proporcional 0-20mA.

7.2 Recomendaciones

1. Es indispensable que para futuros proyectos de ahorro de combustible de este sistema, se cuente con los instrumentos de medición adecuados que permitan obtener la información necesaria en cuanto a consumo de combustible. Esto es en la salida del suministro del tanque de diesel. Para hacer mediciones de combustible por cada prueba de control que se realice.
2. Se recomienda el uso de Modutrol serie 90 puede ser el modelo M9484F1007 (el cual existe uno en bodega, para futuras referencias) para control proporcional de aire o combustible.
9. Se recomienda para control proporcional de temperatura, que se adquiera la unidad opcional E53-CNQ03N para salida de voltaje proporcional o adquirir el controlador E5CN con salida de corriente modelo E5CN-CMT-500-AC100-240.
10. Para implementar un control de aire y combustible es necesario un controlador adicional para el control de aire.
11. Es recomendable seguir ajustando los parámetros ya que después de cierto periodo el control puede llegar a degenerarse por diferentes motivos externos al control como quemadores viejos entre otros.
12. Ajustar los quemadores a rangos de operación más amplios, para que se pueda variar el combustible en un mayor margen.
13. Se recomienda que la presión del diesel y la apertura de la válvula estén dentro o cercano a los valores de la tabla 6.1.2 . Esto para que el

PID no se degenere demasiado. Si se cambian las presiones talvez sea necesario realizar nuevas mediciones de respuesta al escalón para obtener modelos empíricos más adecuados a las condiciones de presión y aire.

14. Para adquisición de datos y un registro de temperaturas a una base de datos se recomienda la unidad opcional E53-CNQ03N para que el controlador E5CN pueda ser conectado a una red RS-485 y sea mas fácil llevar un historial del comportamiento de las cámaras lo cual es importante llevar un registro para verificar constantemente el buen desempeño del sistema de control

8. Bibliografía.

1. Jhonson Michael, Katebi Reza, Wilkie Jacqueline. (2002). Control Engineering An introductory Course. U.S.A.: PALGRAVE.
2. Zemansky Mark, Dittman Richard. (1981). Calor y Termodinámica, Sexta Edición. México: McGraw-Hill
3. Barrientos Antonio, Sanz Ricardo, Matía Fernando, Gambao Ernesto. (1996). Control de Sistemas Continuos. Problemas Resueltos. España: McGrawHill.
4. Smith Carlos, Corripio Armando. (1991). Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica. México. Editorial Limusa.
5. Welty James, Wicks Charles, Wilson Robert. (2000). Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa. México: Editorial Limusa.
6. Gil Benito. (1969). Fuel Oil. Almacenamiento, combustión y contaminación atmosférica. España: Editorial Blume.
7. Porgues John, Fred. (1992). Prontuario de Calefacción. España. Boixareu Editores.
8. Perry Robert, Chilton Cecil. (1973). Manual del Ingeniero Químico. México. McGraw-Hill.
9. Interiano E. (2006) Antologia Curso Control Automatico
10. Francisco Navarro. (2007) Apuntes de clases

CAPÍTULO 9: APÉNDICES

9.1 Abreviaturas

PLC: Circuito Lógico Programable

PWM: Modulación por ancho de Pulso.

9.2 Glosario

PSI: Unidad de presión, Libras por pulgada cuadrada.

B.t.u: (British Termal Unit) Es la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1°F la temperatura de 1Lb. de agua a la presión atmosférica.

Poder Calorífico o el calor de combustión: de un combustible es el calor producido por la combustión completa de la unidad de masa del combustible. Se expresa en B.t.u por lb., o en J por Kg. El poder calorífico puede obtenerse experimentalmente (Calorímetro) o por cálculo a partir del análisis químico (Fórmula de Durlong).

Perturbación: Es cualquier variable que ocasiona que la variable de control se desvíe de su punto de control (SP). En el caso del sistema en estudio es el almabre que entra al horno o se rompe, la humedad relativa, la temperatura ambiente, fallo en algún quemador etc.

La constante de tiempo del proceso (τ): Es el tiempo en que la salida alcanza el 63.2% de su salida, la constante de tiempo guarda relación con la velocidad de respuesta del proceso.

Tiempo muerto (t_0): Es el tiempo que transcurre desde la aplicación de la entrada al sistema hasta que la salida del sistema empieza a cambiar

9.3 Información sobre la empresa

Inició su producción en 1974 en Colima de Tibás, al norte de San José de Costa Rica. Esta fábrica surgió con el fin de facilitar el suministro en el mercado nacional de una variedad importante de productos auxiliares derivados del acero para la industria y la construcción. Actualmente es una de las más importantes del área de Centro América, con 22.000 m² de construcción en el complejo Joseph Pujol Martí en la Costa del Pacífico de Costa Rica con una capacidad instalada de 45.000 toneladas métricas, genera 200 empleos directos y alrededor de 100 indirectos. Exporta el 50% de su producción y posee una moderna tecnología europea, la cual no emite gases ni genera residuos dañinos al medio ambiente.

La empresa en la cual se desarrollará el proyecto pertenece a la empresa Laminadora y Trefilería Costarricense, la cual se encuentra constituida por dos empresas: Laminadora Costarricense y Trefilería Colima. Las cuales cuentan con el respaldo de 2 grupos de alto nivel profesional: Arcelor Mital, primer productor mundial de aceros y Pujol Martí, principal grupo industrial de Costa Rica.

Con el respaldo de ambos grupos la empresa evoluciona hacia un nuevo concepto que asocia: Altos estándares en sus procesos de fabricación, mejores servicios y tecnologías de última generación, con una clara filosofía empresarial que se funda en el desarrollo sostenible y la responsabilidad social de la empresa.

Para alcanzar la excelencia la empresa cuenta con personal altamente calificado y 3 unidades productivas de avanzada tecnología ubicadas en Guápiles, Tibás y Caldera. Con una capacidad de producción cercana a las 750000 toneladas métricas por año.

La planta donde se realizará el proyecto es la planta Caldera en la provincia de Puntarenas, la cual tiene una extensión de 22000 m². Con una

capacidad instalada de 100000 toneladas métricas al año. Entre su producción se encuentran alambres brillantes, recocidos, galvanizados, grafilados y de púas, mallas electrosoldadas, mallas ciclónicas y clavos.

Alguna descripción de productos:

- Alambre negro recocido: Estos alambres son utilizados para realizar ataduras en la construcción. Disponible en diámetros de 1.20 a 4.15 mm.
- Alambre galvanizado recocido de alta resistencia: Este materia es ideal para la confección de riendas, ataduras, tejidos, guías de cultivo y alambrados. Su materia prima de alta calidad le permite realizar nudos y dobleces con facilidad, otorgando al trabajo terminaciones firmes y seguras. Su capa de galvanizado le otorga una óptima durabilidad y resistencia a la oxidación. Disponible en diámetros de 1.20 a 5 mm.
- Alambre brillante: Fabricado a partir de aceros de bajo carbono, este material se presenta en diámetros que van de 1.20 a 6.20 mm.
- Mallas ciclónicas rollo normal: Esta malla es ideal para todo tipo de cercas ya que las mismas están fabricadas con alambres de alta resistencia.
- Alambre de púas: Permiten alambrar, cercar, contener animales, brindar seguridad a propiedades etc. Poseen una excelente capa de galvanizado, destacándose su economía y duración. Sus puas son fuertes, firmes y punzantes.
- Clavos: Los calvos Caimán son ideales para trabajar en construcción, carpintería e industria. Se presentan en una gran variedad de longitudes, diámetros y características de acuerdo a su uso. Entre estos se encuentran; los clavos galvanizados para techo, clavos entorchados, tachuelones galvanizados, clavos corrientes con cabeza entre otros.

9.4 Manual de Usuario

9.4.1. Manual para la programación de los parámetros en el controlador

Para ello se puede referir a los manuales del fabricante del E5CN de Omron.

9.4.2 Manual para el ajuste de los parámetros PID

Este programa ilustra el diseño de controladores PI con retroalimentación para controlar la temperatura de un horno de calentamiento de alambre con cámaras.

El alambre que entra o el alambre que se rompe se puede modelar como un disturbio que disminuye o aumenta respectivamente la temperatura de cada una de las cámaras

El objetivo es mantener la temperatura de los hornos constante. Para mantener el Set Point se adicionara la energía necesaria controlando la valvula de los quemadores que controlan la relación aire-gas oil.

El software tiene una interfaz gráfica agradable lo cual permite que cualquier persona sin amplios conocimientos en control automático lo use.

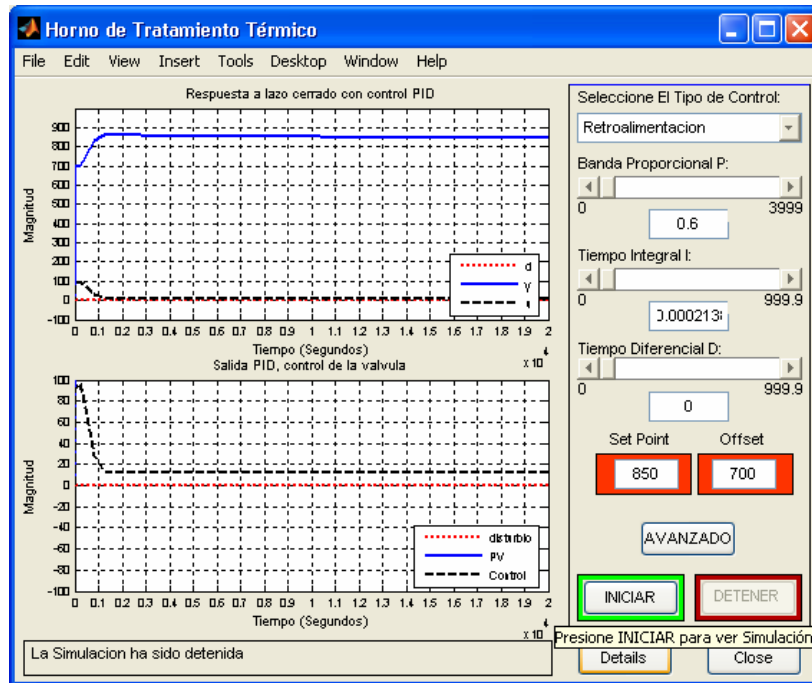


Figura 9.4.2.1. Interfaz gráfica del software de simulación y ajuste de parámetros PID

El programa consta de 2 áreas de simulación, en donde se pueden ver las respuestas en el tiempo de la variable controlada (temperatura del horno) y la salida del controlador o acción de control.

Los parámetros P , I y D (proporcional, integral y derivativo) se pueden programar simplemente escribiendo en las respectivas cajas de texto el valor deseado(que se puede averiguar con el botón AVANZADO). Una vez entrado los valores con el botón INICIAR se simula el control.

El botón AVANZADO permite encontrar valores de PI o PID sin que el usuario requiera amplios conocimientos ya que el programa fue hecho con base a las plantas encontradas con las mediciones de temperatura en pruebas de respuesta al escalón. A continuación se abre una ventana “sintonía”:

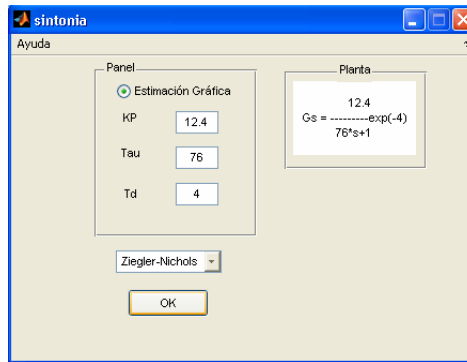


Figura 9.4.2.2. Interfaz gráfica del software de simulación y ajuste de parámetros PID

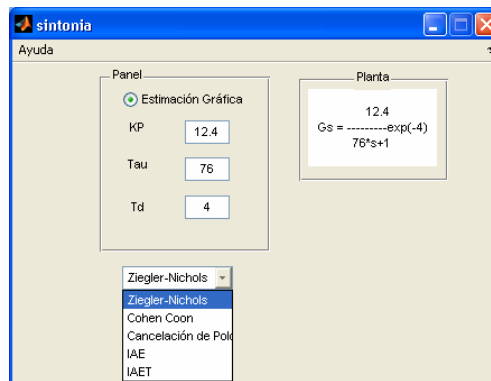


Figura 9.4.2.3. Interfaz gráfica del software de ajuste de parámetros PID, métodos de sintonización.

La figura 9.4.2.2 se pueden ver 3 cajas de texto en las cuales se introducen los valores de KP, Tau y Td(tiempo muerto) que fueron calculadas y se encuentran el capítulo de 6 Resultados y análisis.

La figura 9.4.2.3 Se pueden ver los métodos utilizados para el ajuste del PI o PID. Se recomienda el uso de los métodos IAE, IAET y cancelación de polos.

Al final se oprime el botón OK para obtener los resultados y regresar a la pantalla principal para simular.

CAPÍTULO 10: ANEXOS

10.1 Calibre de Alambres utilizados en el Proceso de Tratamiento Térmico de Galvanizado

Nº	Calibres Usados en Recocido Galvanizado (mm)	Área	Perímetro
1	1,37	1,47	4,30
2	1,4	1,54	4,40
3	1,5	1,77	4,71
4	1,57	1,94	4,93
5	1,6	2,01	5,03
6	1,68	2,22	5,28
7	1,83	2,63	5,75
8	1,9	2,84	5,97
9	2	3,14	6,28
10	2,2	3,80	6,91
11	2,3	4,15	7,23
12	2,4	4,52	7,54
13	2,5	4,91	7,85
14	2,7	5,73	8,48
15	2,75	5,94	8,64
16	3,1	7,55	9,74
17	3,15	7,79	9,90
18	3,4	9,08	10,68
19	3,75	11,04	11,78
20	3,8	11,34	11,94
21	4,1	13,20	12,88
22	4,15	13,53	13,04
Promedio Total	2,51	5,55	7,88

10.2 Tabla de Medición de la salida del controlador para la cámara 1 ON-OFF y PID

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
0,00	1,00	1	1	1	1	1
0,02	1,00	1	1	1	1	1
0,03	1,00	1	1	1	1	1
0,05	1,00	1	1	1	1	1
0,07	1,00	1	1	0	1	1
0,08	1,00	1	1	0	1	0
0,10	1,00	1	1	0	1	0
0,12	1,00	1	1	0	1	0
0,13	1,00	1	1	0	1	0
0,15	1,00	1	1	0	1	0
0,17	1,00	1	1	0	1	0
0,18	1,00	1	1	0	1	0
0,20	1,00	1	1	0	1	0
0,22	1,00	1	1	0	1	0
0,23	1,00	0	1	0	1	0
0,25	1,00	0	1	0	1	0
0,27	1,00	0	1	0	1	0
0,28	1,00	0	1	0	1	0
0,30	1,00	0	1	0	1	0
0,32	1,00	0	1	0	1	0
0,33	1,00	0	1	0	1	0
0,35	1,00	0	1	0	1	1
0,37	1,00	1	1	1	1	1
0,38	1,00	1	1	1	1	1
0,40	1,00	1	1	1	1	1
0,42	1,00	1	1	1	1	1
0,43	1,00	1	1	0	1	1
0,45	1,00	1	1	0	1	0
0,47	1,00	1	1	0	1	0
0,48	1,00	1	1	0	1	0
0,50	1,00	1	1	0	1	0
0,52	1,00	1	1	0	1	0
0,53	1,00	1	1	0	1	0
0,55	1,00	1	1	0	1	0
0,57	1,00	1	1	0	1	0
0,58	1,00	0	1	0	1	0
0,60	1,00	0	1	0	1	0
0,62	1,00	0	1	0	1	0
0,63	1,00	0	1	0	1	0
0,65	1,00	0	1	0	1	0
0,67	1,00	0	1	0	1	0
0,68	1,00	0	1	0	1	0
0,70	1,00	0	1	0	1	0
0,72	1,00	1	1	0	1	1
0,73	1,00	1	1	1	1	1
0,75	1,00	1	1	1	1	1
0,77	1,00	1	1	1	1	1
0,78	1,00	1	1	1	1	1
0,80	1,00	1	1	1	1	1
0,82	1,00	1	1	0	1	1
0,83	1,00	1	1	0	1	1
0,85	1,00	1	1	0	1	1
0,87	1,00	1	1	0	1	1
0,88	1,00	1	1	0	1	1
0,90	1,00	1	1	0	1	1
0,92	1,00	1	1	0	1	1
0,93	1,00	1	1	0	1	0

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
0,95	1,00	0	1	0	1	0
0,97	1,00	0	1	0	1	0
0,98	1,00	0	1	0	1	0
1,00	1,00	0	1	0	1	0
1,02	1,00	0	1	0	1	0
1,03	1,00	0	1	0	1	0
1,05	1,00	0	1	0	1	1
1,07	1,00	0	1	0	1	1
1,08	1,00	0	1	0	1	1
1,10	1,00	1	1	1	1	1
1,12	1,00	1	1	1	1	1
1,13	1,00	1	1	1	1	1
1,15	1,00	1	1	1	1	1
1,17	1,00	1	1	1	1	1
1,18	1,00	1	1	0	1	1
1,20	1,00	1	1	0	1	1
1,22	1,00	1	1	0	1	1
1,23	1,00	1	1	0	1	1
1,25	1,00	1	1	0	1	1
1,27	1,00	1	1	0	1	1
1,28	1,00	0	1	0	1	0
1,30	1,00	0	1	0	1	0
1,32	1,00	0	1	0	1	0
1,33	1,00	0	1	0	1	0
1,35	1,00	0	1	0	1	0
1,37	1,00	0	1	0	1	0
1,38	1,00	0	1	0	1	0
1,40	1,00	0	1	0	1	0
1,42	1,00	0	1	0	1	1
1,43	1,00	0	1	0	1	1
1,45	1,00	0	1	0	1	1
1,47	1,00	1	1	1	1	1
1,48	1,00	1	1	1	1	1
1,50	1,00	1	1	1	1	1
1,52	1,00	1	1	1	1	1
1,53	1,00	1	1	1	1	1
1,55	1,00	1	1	1	1	1
1,57	1,00	1	1	1	1	1
1,58	1,00	1	1	1	1	1
1,60	1,00	1	1	1	1	1
1,62	1,00	0	1	0	1	1
1,63	1,00	0	1	0	1	1
1,65	1,00	0	1	0	1	1
1,67	1,00	0	1	0	1	1
1,68	1,00	0	1	0	1	0
1,70	1,00	0	1	0	1	0
1,72	1,00	0	1	0	1	0
1,73	1,00	0	1	0	1	0
1,75	1,00	0	1	0	1	0
1,77	1,00	0	1	0	1	0
1,78	1,00	0	1	0	1	0
1,80	1,00	0	1	0	1	1
1,82	1,00	0	1	0	1	1
1,83	1,00	1	1	0	1	1
1,85	1,00	1	1	1	1	1
1,87	1,00	1	1	1	1	1
1,88	1,00	1	1	1	1	1
1,90	1,00	1	1	1	1	1
1,92	1,00	1	1	1	1	1
1,93	1,00	1	1	1	1	1
1,95	1,00	1	1	1	1	1
1,97	1,00	1	1	1	1	1
1,98	1,00	0	1	1	1	1
2,00	1,00	0	1	0	1	1
2,02	1,00	0	1	0	1	0

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
2,03	1,00	0	1	0	1	0
2,05	1,00	0	1	0	1	0
2,07	1,00	0	1	0	1	0
2,08	1,00	0	1	0	1	0
2,10	1,00	0	1	0	1	0
2,12	1,00	0	1	0	1	0
2,13	1,00	0	1	0	1	1
2,15	1,00	0	1	0	1	1
2,17	1,00	0	1	0	1	1
2,18	1,00	0	1	0	1	1
2,20	1,00	1	1	0	1	1
2,22	1,00	1	1	1	1	1
2,23	1,00	1	1	1	1	1
2,25	1,00	1	1	1	1	1
2,27	1,00	1	1	1	1	1
2,28	1,00	1	1	1	1	1
2,30	1,00	0	1	1	1	1
2,32	1,00	0	1	1	1	1
2,33	1,00	0	1	1	1	1
2,35	1,00	0	1	0	1	1
2,37	1,00	0	1	0	1	1
2,38	1,00	0	1	0	1	1
2,40	1,00	0	1	0	1	0
2,42	1,00	0	1	0	1	0
2,43	1,00	0	1	0	1	0
2,45	1,00	0	1	0	1	0
2,47	1,00	0	1	0	1	0
2,48	1,00	0	1	0	1	0
2,50	1,00	0	1	0	1	0
2,52	1,00	0	1	0	1	0
2,53	1,00	0	1	0	1	0
2,55	1,00	0	1	0	1	0
2,57	1,00	1	1	0	1	1
2,58	1,00	1	1	1	1	1
2,60	1,00	1	1	1	1	1
2,62	1,00	1	1	1	1	1
2,63	1,00	0	1	1	1	1
2,65	1,00	0	1	1	1	1
2,67	1,00	0	1	1	1	1
2,68	1,00	0	1	1	1	1
2,70	1,00	0	1	0	1	1
2,72	1,00	0	1	0	1	0
2,73	1,00	0	1	0	1	0
2,75	1,00	0	1	0	1	0
2,77	1,00	0	1	0	1	0
2,78	1,00	0	1	0	1	0
2,80	1,00	0	1	0	1	0
2,82	1,00	0	1	0	1	0
2,83	1,00	0	1	0	1	0
2,85	1,00	0	1	0	1	0
2,87	1,00	0	1	0	1	0
2,88	1,00	0	1	0	1	0
2,90	1,00	0	1	0	1	0
2,92	1,00	0	1	0	1	0
2,93	1,00	1	1	1	1	1
2,95	1,00	1	1	1	1	1
2,97	1,00	1	1	1	1	1
2,98	1,00	1	1	1	1	0
3,00	1,00	1	1	1	1	0
3,02	1,00	0	1	1	1	0
3,03	1,00	0	1	1	1	0
3,05	1,00	0	1	1	1	0
3,07	1,00	0	1	0	1	0
3,08	1,00	0	1	0	1	0
3,10	1,00	0	1	0	1	0

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
3,12	1,00	0	1	0	1	0
3,13	1,00	0	1	0	1	0
3,15	1,00	0	1	0	1	0
3,17	1,00	0	1	0	1	0
3,18	1,00	0	1	0	1	0
3,20	1,00	0	1	0	1	0
3,22	1,00	0	1	0	1	0
3,23	1,00	0	1	0	1	0
3,25	1,00	0	1	0	1	0
3,27	1,00	0	1	0	1	0
3,28	1,00	0	0	0	1	0
3,30	1,00	1	0	0	1	0
3,32	1,00	1	0	1	1	0
3,33	1,00	1	0	1	1	0
3,35	1,00	1	0	1	1	0
3,37	1,00	1	0	1	1	0
3,38	1,00	1	0	1	1	0
3,40	1,00	1	0	0	1	0
3,42	1,00	1	0	0	1	0
3,43	1,00	1	0	0	1	0
3,45	1,00	1	0	0	1	0
3,47	1,00	0	0	0	1	0
3,48	1,00	0	0	0	1	0
3,50	1,00	0	0	0	1	0
3,52	1,00	0	0	0	1	0
3,53	1,00	0	0	0	1	0
3,55	1,00	0	0	0	1	0
3,57	1,00	0	0	0	1	0
3,58	1,00	0	0	0	0	0
3,60	1,00	0	0	0	0	0
3,62	1,00	0	0	0	0	0
3,63	1,00	0	0	0	0	0
3,65	1,00	0	0	0	0	0
3,67	1,00	1	0	1	0	0
3,68	1,00	1	0	1	0	0
3,70	1,00	1	0	1	0	0
3,72	1,00	1	0	0	0	0
3,73	1,00	1	0	0	0	0
3,75	1,00	1	0	0	0	0
3,77	1,00	1	0	0	0	0
3,78	1,00	1	0	0	0	0
3,80	1,00	1	0	0	0	0
3,82	1,00	0	0	0	0	0
3,83	1,00	0	0	0	0	0
3,85	1,00	0	0	0	0	0
3,87	1,00	0	0	0	0	0
3,88	1,00	0	0	0	0	0
3,90	1,00	0	0	0	0	0
3,92	1,00	0	0	0	0	0
3,93	1,00	0	0	0	0	0
3,95	1,00	0	0	0	0	0
3,97	1,00	0	0	0	0	0
3,98	1,00	0	0	0	0	0
4,00	1,00	0	0	0	0	0
4,00	0,00	0	0	0	0	0
4,02	0,00	1	0	0	0	0
4,03	0,00	1	0	0	0	0
4,05	0,00	1	0	0	0	0
4,07	0,00	1	0	0	0	0
4,08	0,00	1	0	0	0	0
4,10	0,00	1	0	0	0	0
4,12	0,00	1	0	0	0	0
4,13	0,00	1	0	0	0	0
4,15	0,00	0	0	0	0	0
4,17	0,00	0	0	0	0	0

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
4,18	0,00	0	0	0	0	0
4,20	0,00	0	0	0	0	0
4,22	0,00	0	0	0	0	0
4,23	0,00	0	0	0	0	0
4,25	0,00	0	0	0	0	0
4,27	0,00	0	0	0	0	0
4,28	0,00	0	0	0	0	0
4,30	0,00	0	0	0	0	0
4,32	0,00	0	0	0	0	0
4,33	0,00	0	0	0	0	0
4,35	0,00	0	0	0	0	0
4,37	0,00	0	0	0	0	0
4,38	0,00	0	0	0	0	0
4,40	0,00	0	0	0	0	0
4,42	0,00	0	0	0	0	0
4,43	0,00	1	0	0	0	0
4,45	0,00	1	0	0	0	0
4,47	0,00	1	0	0	0	0
4,48	0,00	1	0	0	0	0
4,50	0,00	1	0	0	0	0
4,52	0,00	1	0	0	0	0
4,53	0,00	1	0	0	0	0
4,55	0,00	1	0	0	0	0
4,57	0,00	1	0	0	0	0
4,58	0,00	1	0	0	0	0
4,60	0,00	1	0	0	0	0
4,62	0,00	0	0	0	0	0
4,63	0,00	0	0	0	0	0
4,65	0,00	0	0	0	0	0
4,67	0,00	0	0	0	0	0
4,68	0,00	0	0	0	0	0
4,70	0,00	0	0	0	0	0
4,72	0,00	0	0	0	0	0
4,73	0,00	0	0	0	0	0
4,75	0,00	0	0	0	0	0
4,77	0,00	0	0	0	0	0
4,78	0,00	0	0	0	0	0
4,80	0,00	1	0	0	0	0
4,82	0,00	1	0	0	0	0
4,83	0,00	1	0	0	0	0
4,85	0,00	1	0	0	0	0
4,87	0,00	1	0	0	0	0
4,88	0,00	1	0	0	0	0
4,90	0,00	1	0	0	0	0
4,92	0,00	1	0	0	0	0
4,93	0,00	1	0	0	0	0
4,95	0,00	0	0	0	0	0
4,97	0,00	0	0	0	0	0
4,98	0,00	0	0	0	0	0
5,00	0,00	0	0	0	0	0
5,02	0,00	0	0	0	0	0
5,03	0,00	0	0	0	0	0
5,05	0,00	0	0	0	0	0
5,07	0,00	0	0	0	0	0
5,08	0,00	0	0	0	0	0
5,10	0,00	0	0	0	0	0
5,12	0,00	0	0	0	0	0
5,13	0,00	0	0	0	0	0
5,15	0,00	0	0	0	0	0
5,17	0,00	1	0	0	0	0
5,18	0,00	1	0	0	0	0
5,20	0,00	1	0	0	0	0
5,22	0,00	1	0	0	0	0
5,23	0,00	1	0	0	0	0
5,25	0,00	1	0	0	0	0

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
5,27	0,00	1	0	0	0	0
5,28	0,00	1	0	0	0	0
5,30	0,00	0	0	0	0	0
5,32	0,00	0	0	0	0	0
5,33	0,00	0	0	0	0	0
5,35	0,00	0	0	0	0	0
5,37	0,00	0	0	0	0	0
5,38	0,00	0	0	0	0	0
5,40	0,00	0	0	0	0	0
5,42	0,00	0	0	0	0	0
5,43	0,00	0	0	0	0	0
5,45	0,00	0	0	0	0	0
5,47	0,00	0	0	0	0	0
5,48	0,00	0	0	0	0	0
5,50	0,00	0	0	0	0	0
5,52	0,00	1	0	0	0	0
5,53	0,00	1	0	0	0	0
5,55	0,00	1	0	0	0	0
5,57	0,00	1	0	0	0	0
5,58	0,00	1	0	0	0	0
5,60	0,00	1	0	0	0	0
5,62	0,00	1	0	0	0	0
5,63	0,00	1	0	0	0	0
5,65	0,00	1	0	0	0	0
5,67	0,00	0	0	0	0	0
5,68	0,00	0	0	0	0	0
5,70	0,00	0	0	0	0	0
5,72	0,00	0	0	0	0	0
5,73	0,00	0	0	0	0	0
5,75	0,00	0	0	0	0	0
5,77	0,00	0	0	0	0	0
5,78	0,00	0	0	0	0	0
5,80	0,00	0	0	0	0	0
5,82	0,00	0	0	0	0	0
5,83	0,00	0	0	0	0	0
5,85	0,00	0	0	0	0	0
5,87	0,00	1	0	0	0	0
5,88	0,00	1	0	0	0	0
5,90	0,00	1	0	0	0	0
5,92	0,00	1	0	0	0	0
5,93	0,00	1	0	0	0	0
5,95	0,00	1	0	0	0	0
5,97	0,00	1	0	0	0	0
5,98	0,00	1	0	0	0	0
6,00	0,00	0	0	0	0	0
6,02	0,00	0	0	0	0	0
6,03	0,00	0	0	0	0	0
6,05	0,00	0	0	0	0	0
6,07	0,00	0	0	0	0	0
6,08	0,00	0	0	0	0	0
6,10	0,00	0	0	0	0	0
6,12	0,00	0	0	0	0	0
6,13	0,00	0	0	0	0	0
6,15	0,00	0	0	0	0	0
6,17	0,00	0	0	0	0	0
6,18	0,00	0	0	0	0	0
6,20	0,00	0	0	0	0	0
6,22	0,00	0	0	0	0	0
6,23	0,00	1	0	0	0	0
6,25	0,00	1	0	0	0	0
6,27	0,00	1	0	0	0	0
6,28	0,00	1	0	0	0	1
6,30	0,00	1	0	0	0	1
6,32	0,00	1	0	0	0	1
6,33	0,00	1	0	0	0	1

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	
6,35	0,00	1	0	0	0	0	1
6,37	0,00	1	0	0	0	0	1
6,38	0,00	1	0	0	0	0	1
6,40	0,00	1	0	0	0	0	1
6,42	0,00	1	0	0	0	0	1
6,43	0,00	1	0	0	0	0	0
6,45	0,00	0	0	0	0	0	0
6,47	0,00	0	0	0	0	0	0
6,48	0,00	0	0	0	0	0	0
6,50	0,00	0	0	0	0	0	0
6,52	0,00	0	0	0	0	0	0
6,53	0,00	0	0	0	0	0	0
6,55	0,00	0	0	0	0	0	0
6,57	0,00	0	0	0	0	0	0
6,58	0,00	0	0	0	0	0	0
6,60	0,00	0	0	0	0	0	0
6,62	0,00	1	0	0	0	0	0
6,63	0,00	1	0	0	0	0	0
6,65	0,00	1	0	0	0	0	1
6,67	0,00	1	0	0	0	0	1
6,68	0,00	1	0	0	0	0	1
6,70	0,00	1	0	0	0	0	1
6,72	0,00	1	0	0	0	0	1
6,73	0,00	1	0	0	0	0	1
6,75	0,00	1	0	0	0	0	1
6,77	0,00	1	0	0	0	0	1
6,78	0,00	1	0	0	0	0	1
6,80	0,00	1	0	0	0	0	1
6,82	0,00	1	0	0	0	0	1
6,83	0,00	1	0	0	0	0	1
6,85	0,00	1	0	0	0	0	0
6,87	0,00	1	0	0	0	0	0
6,88	0,00	0	0	0	0	0	0
6,90	0,00	0	0	0	0	0	0
6,92	0,00	0	0	0	0	0	0
6,93	0,00	0	0	0	0	0	0
6,95	0,00	0	0	0	0	0	0
6,97	0,00	0	0	0	0	0	0
6,98	0,00	0	0	0	0	0	0
7,00	0,00	1	0	0	0	0	0
7,02	0,00	1	0	0	0	0	1
7,03	0,00	1	0	0	0	0	1
7,05	0,00	1	0	0	0	0	1
7,07	0,00	1	0	0	0	0	1
7,08	0,00	1	0	0	0	0	1
7,10	0,00	1	0	0	0	0	1
7,12	0,00	1	0	0	0	0	1
7,13	0,00	1	0	0	0	0	1
7,15	0,00	1	0	0	0	0	1
7,17	0,00	1	0	0	0	0	1
7,18	0,00	1	0	0	0	0	1
7,20	0,00	1	0	0	0	0	1
7,22	0,00	1	0	0	0	0	1
7,23	0,00	0	0	0	0	0	1
7,25	0,00	0	0	0	0	0	0
7,27	0,00	0	0	0	0	0	0
7,28	0,00	0	0	0	0	0	0
7,30	0,00	0	0	0	0	0	0
7,32	0,00	0	0	0	0	0	0
7,33	0,00	0	0	0	0	0	0
7,35	0,00	0	0	0	0	0	0
7,37	0,00	1	0	0	0	0	1
7,38	0,00	1	0	0	0	0	1
7,40	0,00	1	0	0	0	0	1
7,42	0,00	1	0	0	0	0	1

Tiempo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID	ON-OFF	PID
7,43	0,00	1	0	0	0	1
7,45	0,00	1	0	0	0	1
7,47	0,00	1	0	0	0	1
7,48	0,00	1	0	0	0	1
7,50	0,00	1	0	0	0	1
7,52	0,00	1	0	0	0	1
7,53	0,00	1	0	0	0	1
7,55	0,00	1	0	0	0	1
7,57	0,00	1	0	0	0	1
7,58	0,00	0	0	0	0	1
7,60	0,00	0	0	0	0	0
7,62	0,00	0	0	0	0	0
7,63	0,00	0	0	0	0	0
7,65	0,00	0	0	0	0	0
7,67	0,00	0	0	0	0	0
7,68	0,00	0	0	0	0	0
7,70	0,00	0	0	0	0	0
7,72	0,00	0	0	0	0	1
7,73	0,00	1	0	0	0	1
7,75	0,00	1	0	0	0	1
7,77	0,00	1	0	0	0	1
7,78	0,00	1	0	0	0	1
7,80	0,00	1	0	0	0	1
7,82	0,00	1	0	0	0	1
7,83	0,00	1	0	0	0	1
7,85	0,00	1	0	0	0	1
7,87	0,00	1	0	0	0	1
7,88	0,00	1	0	0	0	1
7,90	0,00	0	0	0	0	1
7,92	0,00	0	0	0	0	1
7,93	0,00	0	0	0	0	1
7,95	0,00	0	0	0	0	0
7,97	0,00	0	0	0	0	0
7,98	0,00	0	0	0	0	0
8,00	0,00	0	0	0	0	0
Promedio	0,50	0,463	0,40871	0,139	0,44606	0,328
Promedio Total	ON-OFF	0,449			PID	0,31

Nota: Estos datos se tomaron en condiciones similares de presión y carga, esto quiere decir que durante las mediciones la temperatura, ésta permaneció constante y no se presentaron perturbaciones que pudieran afectar estas mediciones.