

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO
PARA UN HORNO DE SECADO DE LAS PARTES ACTIVAS
DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y POTENCIA**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

FERNANDO VIDALÓN PÉREZ

**PROMOCIÓN
2009- I**

LIMA – PERÚ

2012

**SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO
PARA UN HORNO DE SECADO DE LAS PARTES ACTIVAS
DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y POTENCIA**

A mis padres, a mi hermano y a Mercy por todo el tiempo que les robé y por el apoyo que siempre me brindan para mi desarrollo personal y profesional. A mis compañeros y amigos de la UNI por lo que mucho que me pudieron enseñar. A mis amigos que siempre me acompañan en el transcurrir de la vida.

En memoria de mis amigos David y José, que siendo ambos muy jóvenes me tocó verlos partir.

SUMARIO

El presente trabajo consiste en proponer e implementar un sistema de control de temperatura automático para un horno eléctrico industrial de secado para partes activas de transformadores de distribución y potencia.

El objetivo del presente informe es proponer e implementar un circuito de control amigable con el usuario operador, más eficiente y que pueda, a un bajo costo, obtener mejores resultados.

El trabajo inicia con el análisis del sistema original de control del horno, que es un sistema controlado por histéresis, también llamado ON/OFF; éste análisis incluye las limitaciones y las oportunidades de mejora del sistema original.

En base a las mejoras propuestas y los requerimientos del usuario operador, se ha propuesto un circuito de control PID por PWM en donde se detalla el funcionamiento en el presente informe.

Una vez implementado el nuevo sistema de control, se han comparado los resultados con los del sistema de control original, analizando los resultados estableciendo las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

ANTECEDENTES	2
1.1 Objetivo del Trabajo	2
1.1.1 Objetivos Específicos	2
1.2 Alcances	2
1.3 Formulación del Problema de Ingeniería	3
1.3.1 Importancia del Horno de Secado.....	5
1.3.2 Sistema de Control Original del Horno	6
1.3.3 Oportunidades de Mejora para el Horno de Secado	9

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	11
2.1 Introducción a los Sistemas de Control	11
2.2 Componentes Básicos de un Sistema de Control	11
2.3 Sistemas en Lazo Abierto	11
2.4 Sistemas en Lazo Cerrado o Realimentado	12
2.5 Comparación entre Sistemas en Lazo Abierto y Lazo Cerrado	12
2.6 Análisis de Respuesta Transitoria.....	13
2.6.1 Sistemas de Segundo Orden	13
2.7 Controles PID	15
2.8 Reglas de Ziegler-Nichols para Sintonización de Controladores PID.....	23
2.9 Modulación por Ancho de Pulsos (PWM)	24

CAPITULO III

METODOLOGIA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	26
3.1 Precisión del Problema	26
3.2 Análisis del Horno.....	27
3.3 Alternativas de Solución	27
3.4 Comparación de las Alternativas de Solución	27
3.5 Solución del Problema.....	28

3.6	Circuito Propuesto	28
3.7	Parámetros PID	31
3.7.1	Sintonización por el Método de Ziegler-Nichols	34
CAPITULO IV		
ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS		37
4.1	Sistema Original con SV=60°C.....	37
4.2	Sistema PID con SV=60°C	38
4.3	Sistema Original con SV=80°C.....	39
4.4	Sistema PID con SV=80°C	39
4.5	Ahorro Total Mensual del Horno	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		42
ANEXO A		
DATOS RECOPIADOS		
Respuesta del Sistema en Lazo Abierto.....		44
SV=60°C (Sistema Original)		45
SV=80°C (Sistema Original)		46
SV=60°C (PID).....		47
SV=80°C (PID).....		48
ANEXO B		
COSTOS Y MODIFICACIONES		
ANEXO 6 – Costo de los Dispositivos Utilizados (primera modificación).....		50
ANEXO 7 – Datos Técnicos Zelio Controller REG-48.....		51
ANEXO 8 – Sistema Trifásico Propuesto (segunda modificación)		52
BIBLIOGRAFÍA.....		53

INTRODUCCIÓN

El presente informe relata la importancia de un proceso industrial crítico en la fabricación de transformadores, el cual es el secado en horno de las partes activas de los transformadores, este proceso tiene ciertas limitaciones y oportunidades de mejora que se desarrollan a lo largo del informe.

El informe se ha dividido en cuatro capítulos:

El capítulo uno se enfoca en la importancia del proceso de secado en horno, en que parte del proceso de fabricación se encuentra y las oportunidades de mejora que se tienen.

En el capítulo dos se desarrolla el marco teórico necesario para la comprensión de aspectos que corresponden a la propuesta del informe.

En el capítulo tres se abordan las limitaciones que se tienen en el sistema original definiendo el problema de ingeniería, además, se muestran las propuestas y se desarrolla propiamente la solución.

Finalmente en el capítulo cuatro se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron después de haber completado el informe.

CAPITULO I ANTECEDENTES

El horno de secado es un equipo de vital importancia en el proceso de la fabricación de los transformadores. Esto debido a que todas las partes activas de los transformadores fabricados deben secarse horas en el horno para eliminar la humedad, y así garantizar el correcto funcionamiento del transformador.

Por tanto, es necesario que el horno de secado que va a operar de manera prolongada en un proceso crítico de fabricación, tenga un sistema de control eficiente, además de ser fácilmente operado y monitoreado en todo momento.

En este capítulo se plantearán los objetivos y el alcance del informe, luego se expondrá el problema de ingeniería explicando más al detalle la importancia del horno de secado, las oportunidades de mejora y los requerimientos del usuario.

1.1 Objetivo del Trabajo

El objetivo del presente informe es proponer e implementar un circuito de control amigable con el usuario operador, más eficiente y que pueda, a un bajo costo, obtener mejores resultados.

1.1.1 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente informe se describen a continuación:

1. Analizar el sistema inicial identificando las oportunidades de mejora en las diferentes partes del sistema: control, componentes, estructura, etc.
2. Realizar un análisis de las necesidades del usuario operador del horno, para así poder elaborar un circuito de acuerdo a sus requerimientos y necesidades.
3. Realizar una evaluación de los diferentes productos en el mercado para proponer así una solución que cubra los requerimientos, sea factible y de bajo costo.
4. Proponer un circuito de control e implementar la solución.

1.2 Alcances

Los alcances del presente informe se describen a continuación:

1. Muchas de las definiciones son básicas, el objetivo de estas es poder facilitar el entendimiento del problema.
2. El circuito de control propuesto puede ser utilizado en sistemas similares de temperatura, pero se debe considerar que ha sido elaborado para el caso específico del

horno eléctrico en el cual se ha trabajado.

3. Los dispositivos utilizados en el circuito han sido escogidos en base al precio, diversas referencias, además de decisiones propias.

4. El circuito propuesto se implementó junto a la redacción de este informe.

1.3 Formulación del Problema de Ingeniería

Eléctrica Optimización S.A. es una empresa peruana que fabrica transformadores eléctricos de distribución y potencia. Los transformadores eléctricos, como el mostrado en la Figura 1.1, son dispositivos que cambian el nivel de tensión a una misma potencia mediante el flujo magnético, entre uno de sus usos más frecuentes se encuentra transmitir de manera económica la energía.



Figura 1.1 – Transformador Trifásico 2 MVA 10-22.9/0.46KV

Fuente: Eléctrica Optimización S.A.

La fabricación de los transformadores eléctricos, como se ve en el diagrama de procesos (Figura 1.2), comprende una variedad de sub-procesos que son imprescindibles para garantizar la calidad del transformador.

Para el presente informe el enfoque es en sub-proceso de secado en horno de la parte activa del transformador. Para esto debemos definir previamente la parte activa de un transformador.

La parte activa de un transformador consta del núcleo magnético, que es de fierro silicoso

de grano orientado; las bobinas, que son arrollamientos de cobre (pueden ser platina de cobre forrada, alambre esmaltado, entre otros); los perfiles (elementos de sujeción) y el aislamiento. (Ver Figura 1.3)

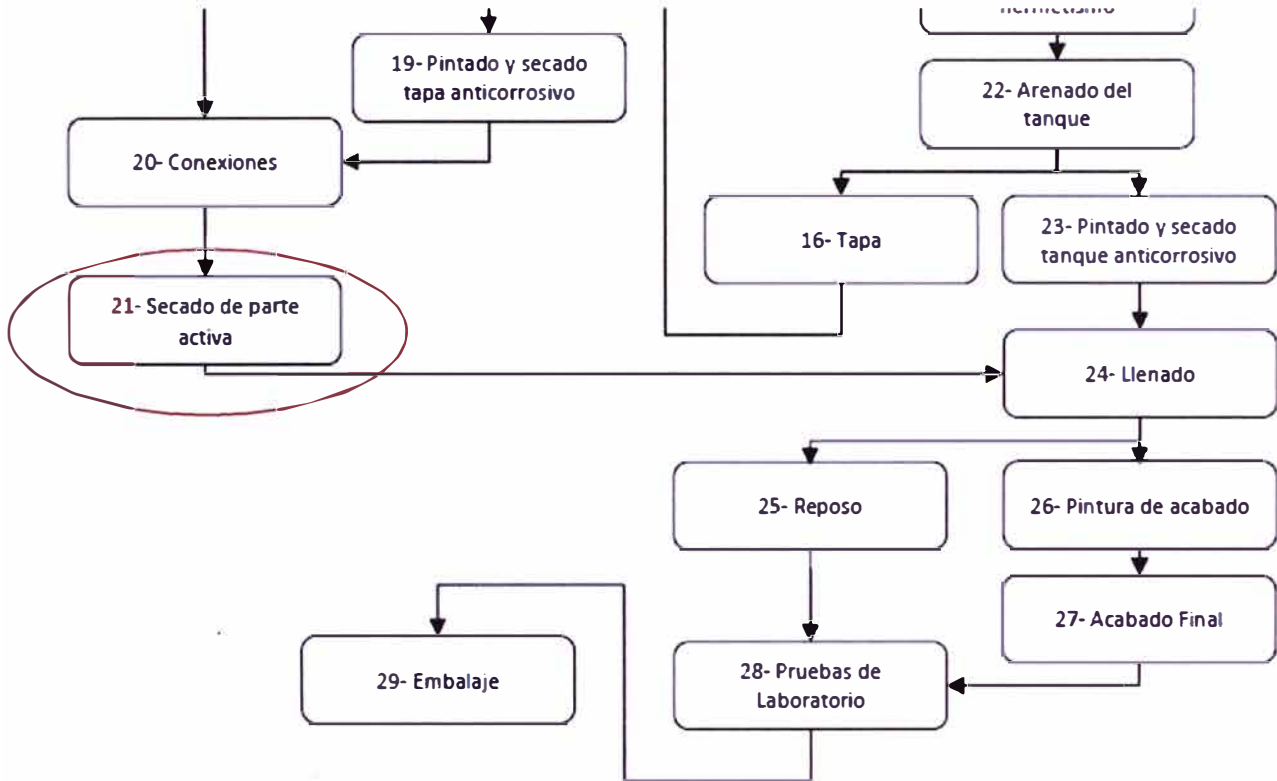


Figura 1.2 – Extraído del Diagrama de Procesos

Fuente: Eléctrica Optimización S.A.

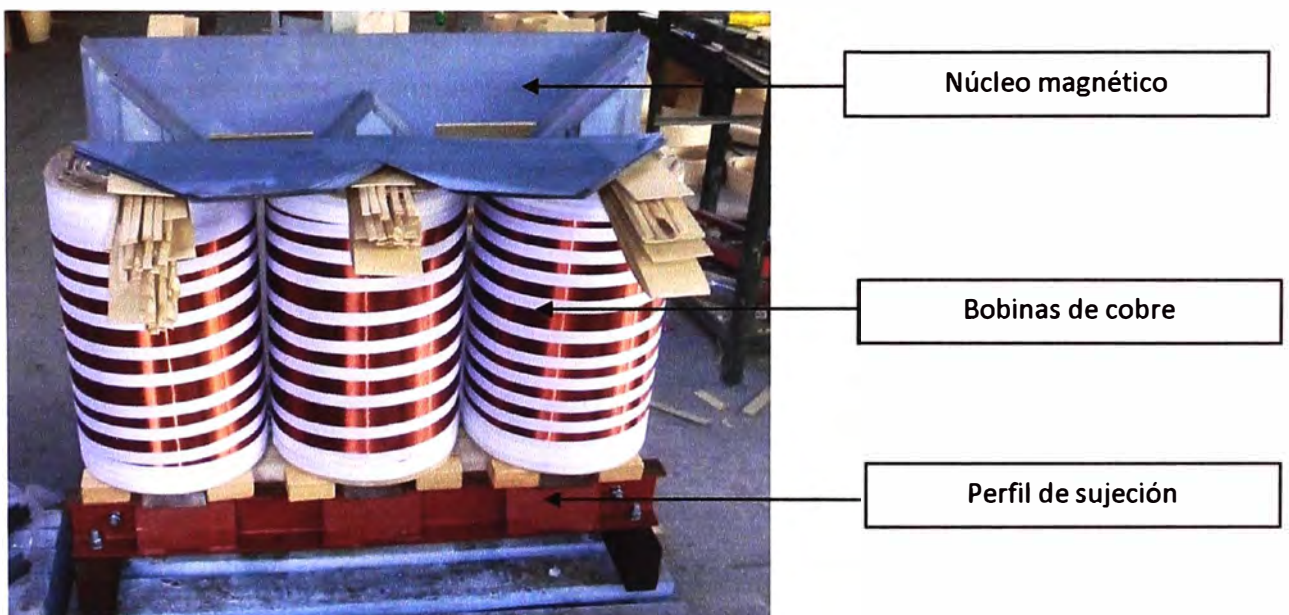


Figura 1.3 – Parte activa transformador trifásico

Fuente: Eléctrica Optimización S.A.

En los transformadores el aislamiento se presenta entre diferentes partes que pudieran presentar diferencia de potencial, como por ejemplo:

- Entre las bobinas y el núcleo magnético (Figura 1.4).
- En las bobinas entre espiras y capas.
- En las bobinas entre alta y baja tensión (que son concéntricas en el bobinado)
- Entre salidas.
- Etc.

Este aislamiento puede ser de papel Kraft, crepado, prespan, u otros materiales como el nomex o maylar.

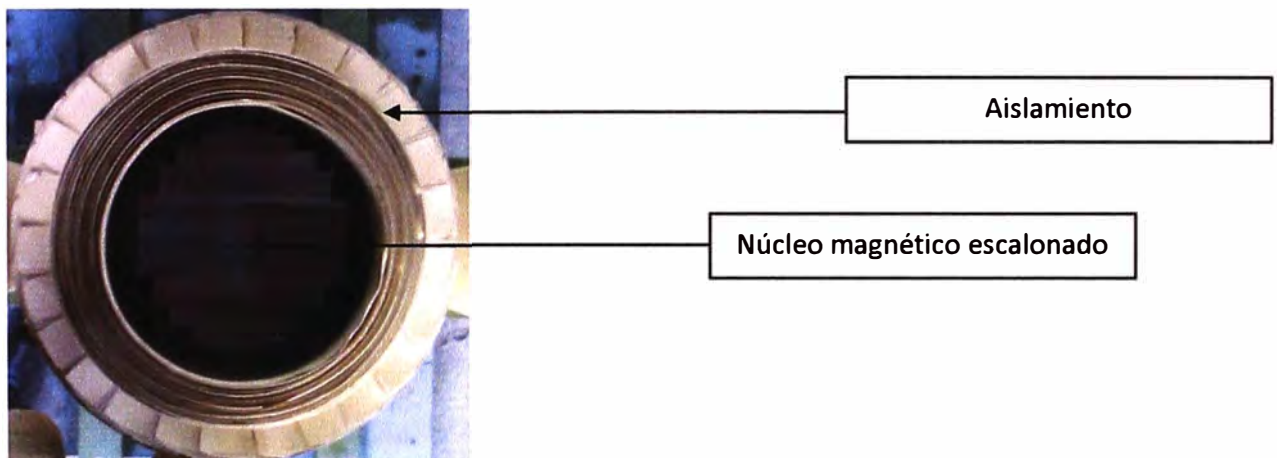


Figura 1.4 – Vista superior de una columna del núcleo

Fuente: Eléctrica Optimización S.A.

1.3.1 Importancia del Horno de Secado

El aislamiento presenta mayor resistencia a las descargas (mayor rigidez dieléctrica) cuando se encuentra libre de humedad. Es por ello que es muy importante que la parte activa del transformador se encuentre completamente seca y libre de humedad antes de que se fije en su tanque.

Además, la presencia de humedad en la parte activa podría contaminar el aceite dieléctrico que es un elemento que cumple dos funciones importantes en el transformador:

- Refrigerante: Transfiere el calor, originado por el núcleo y las bobinas, a las aletas de refrigeración.
- Aislante: El aceite reduce las distancias eléctricas de manera que puedan tenerse transformadores de alta tensión de tamaños reducidos. El aceite es un excelente aislante y el papel Prespan impregnado en aceite, permite fabricar transformadores de altísimas tensiones.

La presencia de agua y las temperaturas elevadas provocan el deterioro del aceite produciendo oxidación que finalmente se traduce en la formación de sedimentos que

dificultan la refrigeración, deterioran los aislamientos internos y reducen su rigidez dieléctrica. Sólo unos veinte miligramos de agua por kilogramo de aceite, 20 ppm, pueden provocar la caída del cincuenta por ciento de la rigidez dieléctrica (Ver Figura 1.5).

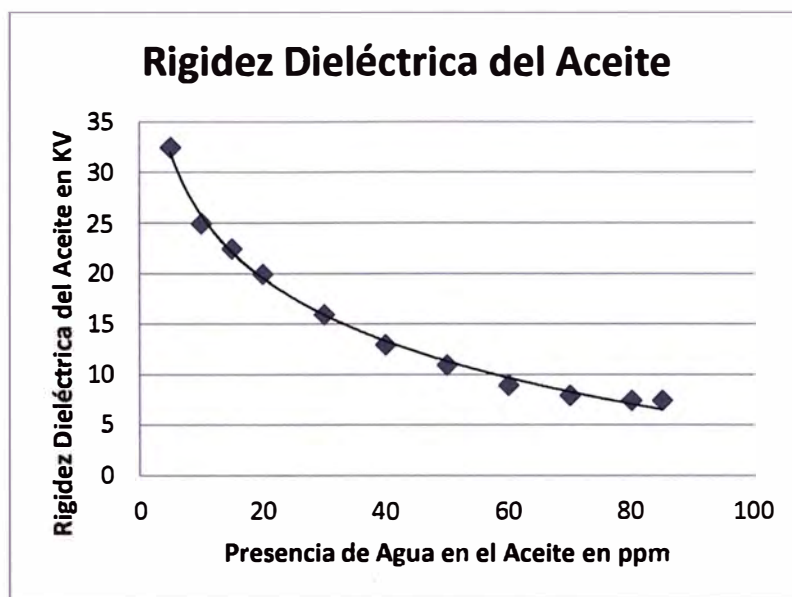


Figura 1.5 - Variación de la rigidez dieléctrica del aceite debido a la presencia del agua

Fuente: adaptación de meecr.blogspot.com

Como podemos ver es indispensable el garantizar que la parte activa se encuentre libre de humedad, que pueda a su vez, contaminar el aceite. La humedad en el aceite o aislamiento representa un evidente peligro para el transformador, la instalación y a toda la red que dependa del funcionamiento de éste.

1.3.2 Sistema de Control Original del Horno de Secado

El horno de secado, al igual que su sistema de control, se fabricó a inicios de los años noventa, y desde aquel entonces ha sufrido pocas modificaciones (Figura 1.6). A mediados del año 2011 y debido al crecimiento en el volumen de fabricaciones, el horno de secado no podía darse abasto para las fabricaciones y se había convertido en un factor de retraso, es por ello que el horno fue ampliado estructuralmente para poder secar simultáneamente más partes activas y así poder aliviar el problema.

El horno posee interiormente siete resistencias cerámicas de 1KW cada una, que son las que liberan el calor en él. De estas siete resistencias, cuatro permanecen encendidas siempre que el horno se encuentre en funcionamiento, y las otras tres, son controladas por histéresis (también llamado sistema on/off), que consiste en un termostato, y un contactor (Circuito mostrado en la Figura 1.7).

Al iniciar el horno de secado, el ciclo empieza con las 7 resistencia activas, el contacto del termostato se encuentra cerrado, debido a que al censar la temperatura del proceso (PV: *Process Value*), es inferior a la temperatura que se la ha asignado. La

temperatura va en aumento y al llegar a la temperatura deseada (SV: *Set Value*), el contacto se abre, cortando la señal de control del contactor que al abrirse corta la energía a las resistencia de control. Una vez abierto contactor, la temperatura sube ligeramente y se mantiene debido a la inercia térmica (sombreada en Figura 1.8). Luego empieza su descenso. Cuando el termostato censa que la temperatura es menor a la referencia vuelve a iniciar el ciclo.



Figura 1.6 – Horno con sistema de control original

Fuente: Eléctrica Optimización S.A.

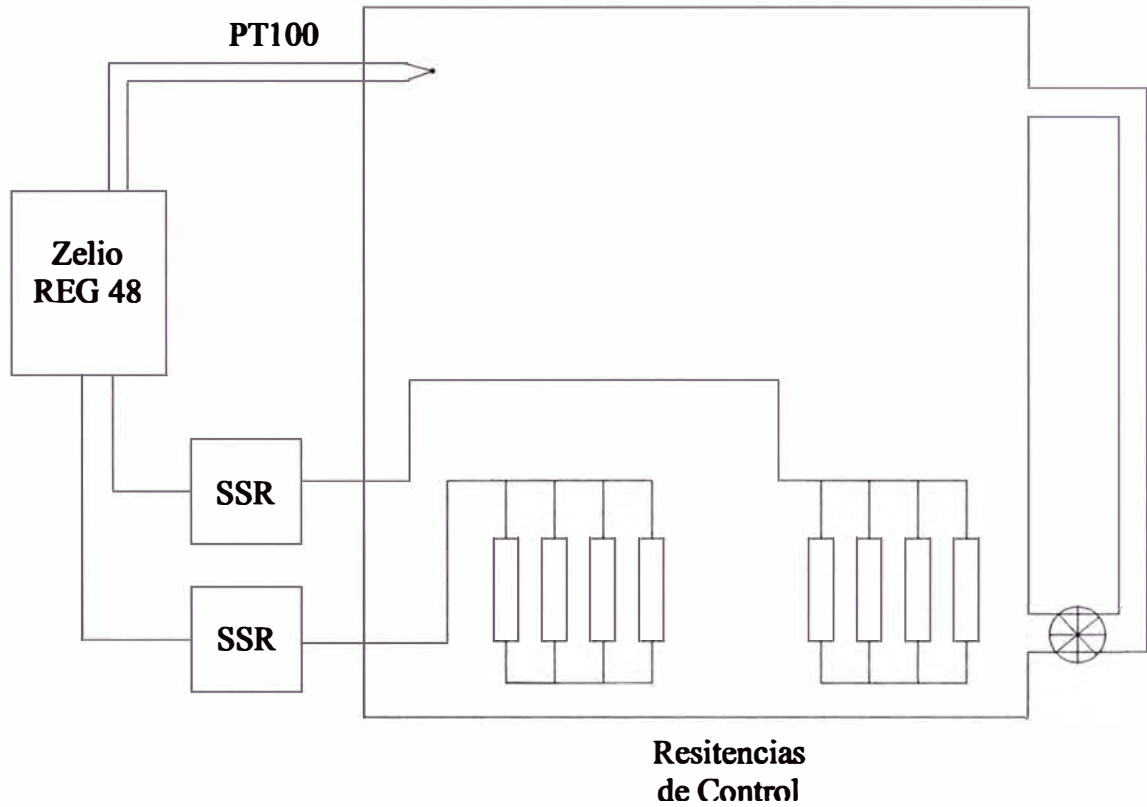


Figura 1.7 – Sistema original

Fuente: Elaboración Propia

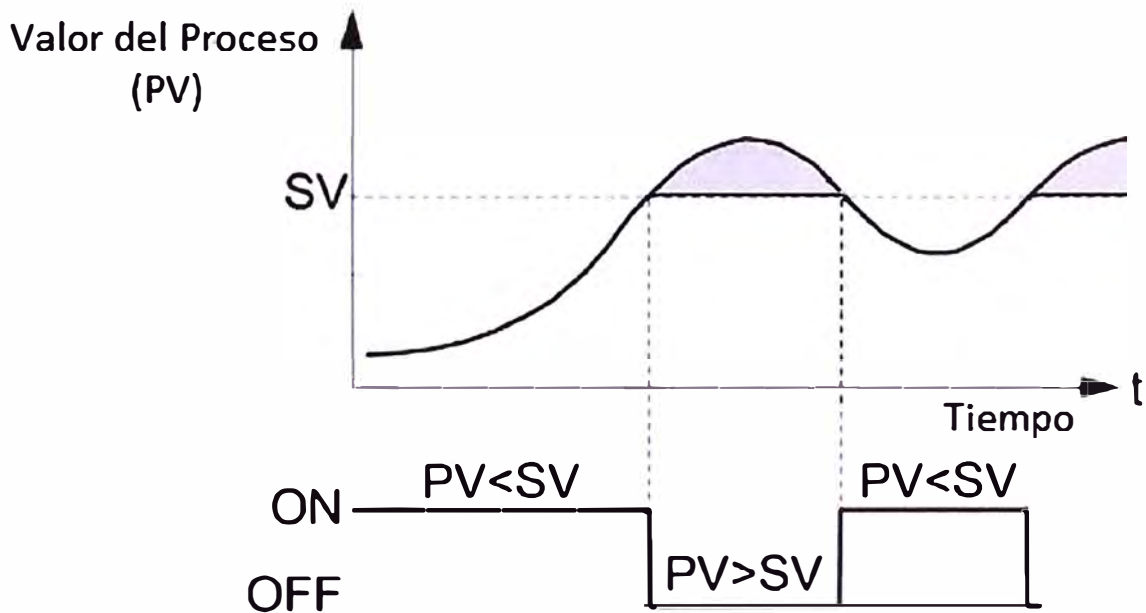


Figura 1.8 – Ciclo de funcionamiento on/off

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 1.9, podemos apreciar el tablero de control, que consiste en el termostato, el contactor y las llaves magnéticas.

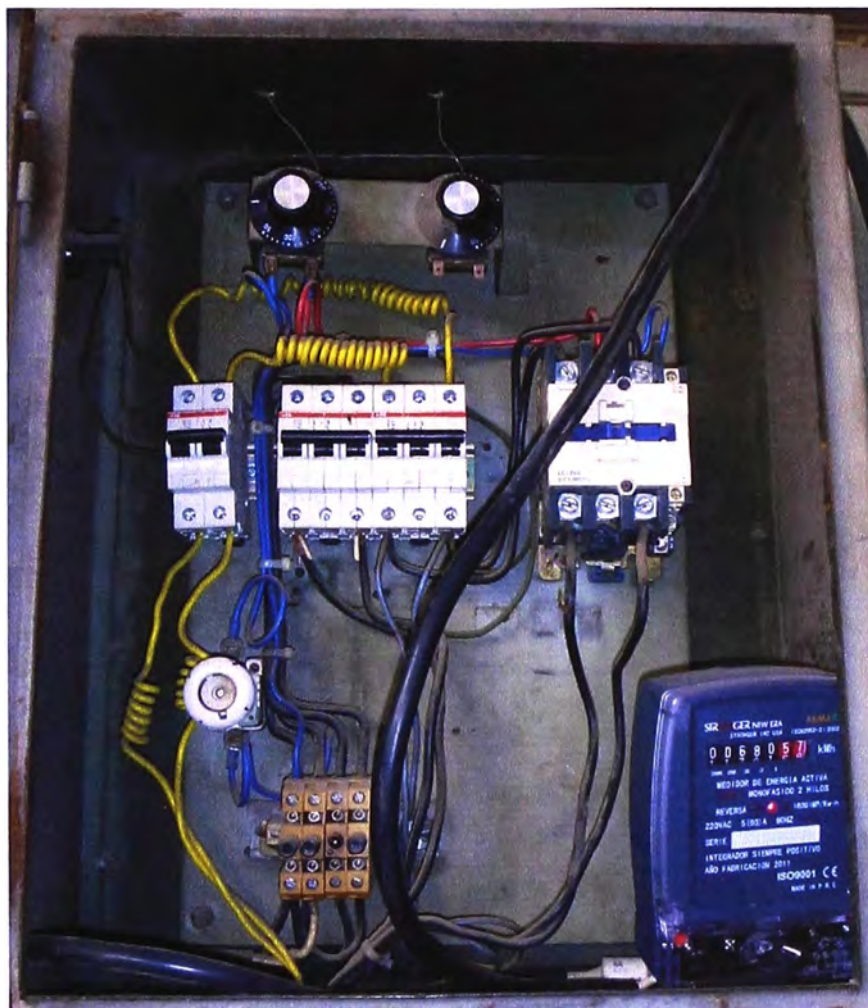


Figura 1.9 – Tablero de control del horno

Fuente: Eléctrica Optimización S.A.

1.3.3 Oportunidades de Mejora Para el Horno de Secado.

Como hemos podido apreciar, en un proceso altamente importante en la fabricación de transformadores el horno de secado posee varias limitaciones:

1. No se tiene una interfaz amigable

No existe una interfaz que pueda usar el operador para cambiar con seguridad y precisión la temperatura. El usuario operador, intuitivamente, fijaba la perilla del termostato a la posición de la temperatura deseada.

2. Dificil monitoreo

Al ser el secado en horno un proceso crítico en la fabricación de transformadores, el garantizar su operación mediante una comprobación visual es de alta importancia.

En este caso, no se tenía la temperatura deseada ni la temperatura del proceso (SV/PV), lo que el operador podía realizar para poder tener una idea de la temperatura, era mover el termostato hasta que el contactor actúe.

Además de ello, el circuito no tiene señalización de que esta operando, no existe un registro del tiempo en el cual el horno fue encendido u apagado, ni existe alarma alguna de mal funcionamiento

3. Reemplazo frecuente de componentes

Debido a las frecuentes conmutaciones, el contactor que tiene vida limitada es constantemente reemplazado. Por otro lado, el costo del contactor, al ser de alto amperaje, es elevado.

4. Aislamiento térmico defectuoso

El horno presenta temperaturas diferentes en diferentes partes por donde podría estar radiando calor: En las puertas, en las uniones de la estructura, en el conducto de recirculación, etc. (ver Figura 1.10)

5. Consumo de energía

Debido al deficiente aislamiento térmico, la pérdida de calor, además del sistema de control, el consumo de energía del horno es elevado y por tanto costoso.



Figura 1.10 – Evaluación del aislamiento térmico (Horno a 80°C)
Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 Introducción a los Sistemas de Control

El Sistema de Control es el conjunto de dispositivos que colaboran en la realización de una tarea, donde el principio básico del control es la regulación automática o guía de sistemas dinámicos o dispositivos bajo condiciones de estados estacionarios y transitorios. El uso efectivo de estos resultados depende de varios factores como lo son: La realimentación; lo cual hace posible el establecimiento y mantenimiento de estabilidad en la operación del sistema La disminución de la sensibilidad de funcionamiento; para limitaciones de diseño, para variaciones de los parámetros de la planta y no linealidades de la planta.

Sus aplicaciones son muy diversas pero es esencial en el control numérico de maquinas, herramientas, industrias de manufactura, industria aeroespacial, diseño en la industria automotriz además en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en la industria de proceso.

2.2 Componentes Básicos de un Sistema de Control

Un sistema de control (Figura 2.1), básicamente esta compuesto por:

1. Objetivos de control
2. Componentes del sistema de control
3. Resultados o Salidas

Según como se muestra en la figura:



Figura 2.1. Esquema Básico de un Sistema de Control

Fuente: Elaboración Propia

2.3 Sistemas en Lazo Abierto

Son sistemas en los cuales la salida no tiene efecto para la señal de control, es decir, no se mide la salida ni existe realimentación alguna para comparar con la entrada.

En estos sistemas, la precisión depende de la calibración y la presencia de perturbaciones. Este sistema se presenta en la Figura 2.2.

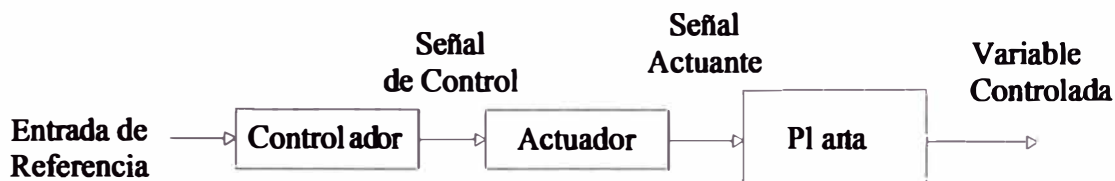


Figura 2.2 Sistema de Control en Lazo Abierto

Fuente: Elaboración Propia

2.4 Sistemas en Lazo Cerrado o Realimentado

Es un sistema que mantiene una relación entre las señales de salida y entrada. En estos sistemas se alimenta al controlador con la señal de error, la cual se obtiene de la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (de salida) a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado. Se representa como en la figura a continuación en la Figura 2.3

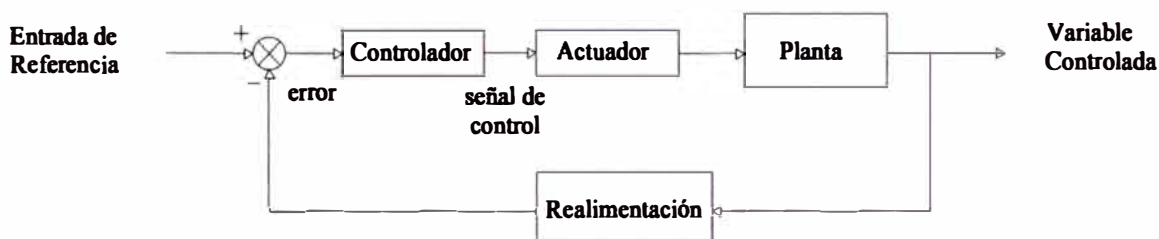


Figura 2.3. Sistema de Control en Lazo Cerrado

Fuente: Elaboración Propia

2.5 Comparación entre Sistemas en Lazo Abierto y Lazo Cerrado

La comparación entre ambos sistemas se evidencia en la Tabla 2.1 a continuación:

Tabla 2.1 Comparación Sistemas Lazo Abierto/Cerrado

Fuente: Elaboración Propia

	Lazo Abierto	Lazo Cerrado
Estabilidad	La estabilidad del sistema no es un problema importante en este tipo de sistemas, cuando es aplicable, la estabilidad es más fácil de lograr	La estabilidad es una función principal en este tipo de sistema ya que puede conducir a corregir exceso de errores que producen oscilaciones de amplitud constante y cambiante
Aplicaciones	Se puede utilizar cuando se conoce con anticipación las entradas y el comportamiento de las salidas	Son aplicables cuando se presentan perturbaciones y/o impredecibles en los componentes del sistema

Componentes	Se usan componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado	Emplea mayor cantidad de componentes siendo estos más precisos y por ende más costosos.
Perturbaciones	No es posible usarlo cuando existen perturbaciones	La realimentación vuelve la respuesta insensible a las perturbaciones externas y variaciones internas en los parámetros del sistema

2.6 Análisis de Respuesta Transitoria

En los sistemas físicos reales que comprenden los sistemas de control, existen elementos que impiden seguir a la señal de referencia de manera instantánea. El periodo de tiempo que transcurre hasta que el sistema llega a estado estacionario se le denomina transitorio.

2.6.1 Sistemas de Segundo Orden

La función de transferencia de lazo cerrado de un sistema de segundo orden se puede expresar como en la Ecuación 2.1

$$\frac{C}{R} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Siendo

ω_n = frecuencia natural no amortiguada

ζ = relación de amortiguamiento (efectivo/crítico)

A continuación se ve la incidencia del parámetro ζ en respuesta (ver Figura 2.4)

$0 < \zeta < 1$ Sistema subamortiguado

$\zeta = 1$ Sistema críticamente amortiguado

$\zeta > 1$ Sistema sobreamortiguado

F cuando $\zeta = [0.1 - 0.9]$ (Líneas punteadas negras)

G cuando $\zeta = 0$ (Línea verde)

H cuando $\zeta = 1$ (Línea roja)

I cuando $\zeta = 2$ (Línea azul)

Se estudia la respuesta del sistema a una entrada tipo escalón unitario debido a que esta entrada es suficiente para probar el comportamiento del sistema en régimen transitorio.

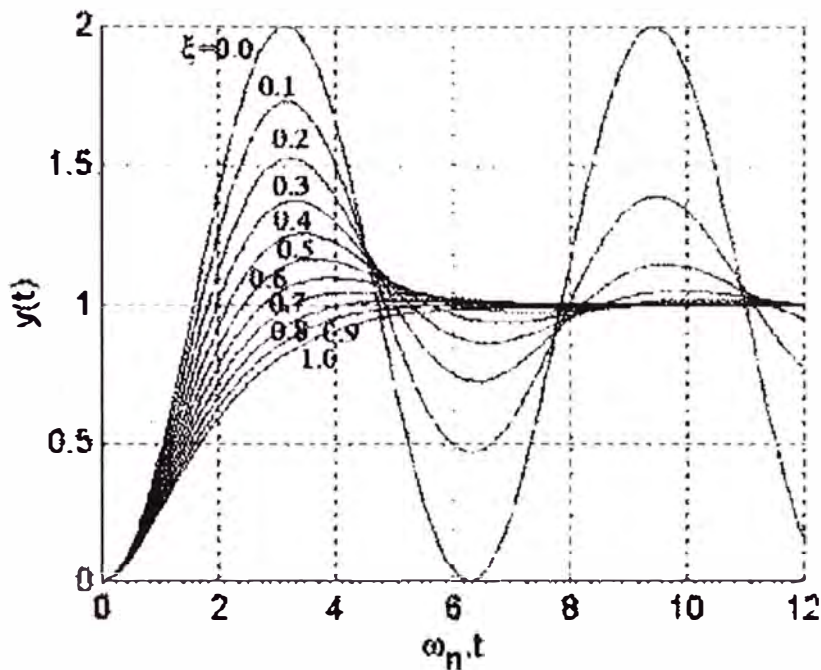


Figura 2.4 – Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden

Fuente: Ingeniería de Control Moderna- K. Ogata

Se suelen especificar los parámetros que se muestran en la Figura 2.5

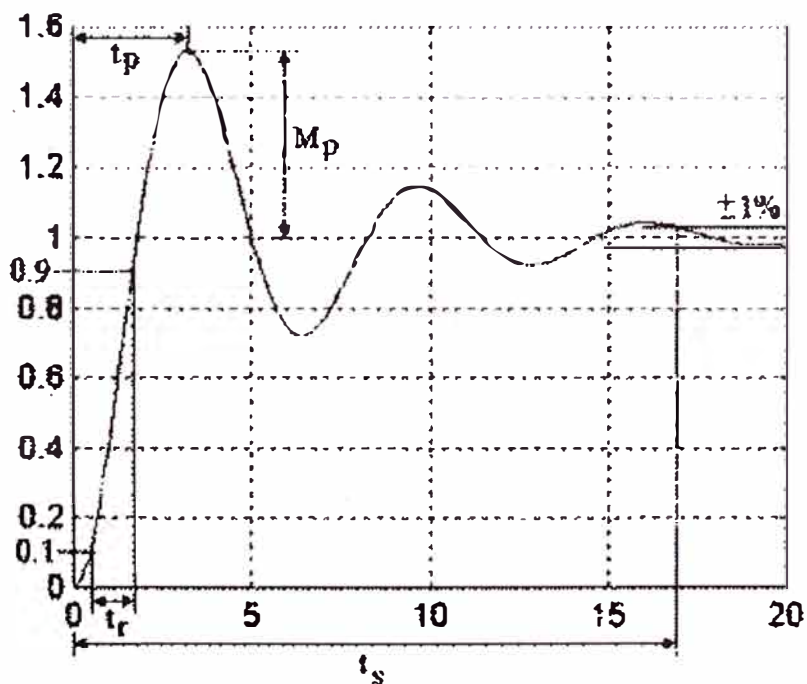


Figura 2.5 – Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden

Fuente: Adaptación - Ingeniería de Control Moderna- K. Ogata

t_d = tiempo de retardo

t_r = tiempo de crecimiento

t_p = tiempo de pico, tomado sobre su primer pico de sobre impulso

M_p = sobre impulso máximo, medido desde la unidad

t_s = tiempo de establecimiento, rango de 2~5% (en valor absoluto).

2.7 Controles PID

El control automático asienta sus bases esencialmente en el concepto de realimentación. Este concepto se concreta en una estructura de control en la cual el controlador se puede entender como un operador, que en función de la salida deseada de la planta, y la salida real medida, proporciona la acción de control a aplicar sobre el sistema.

Si bien existen muchos tipos de control basados en este principio, el control proporcional, derivativo e integral (PID), es el que mayor implantación tiene en la industria de procesos. Dicho control consiste esencialmente en obtener la acción de control como la suma de tres términos: término proporcional, término derivativo y término integral.

Ventajas del control PID

Según una estimación dada por Amström [2]: El 95% de los bucles de control en la industria son del tipo PID, y fundamentalmente PI. La amplia implantación del control PID en la industria, se debe fundamentalmente a los siguientes factores:

- La actuación en función de la señal de error proporciona una estructura de realimentación negativa, que como es conocido, permite obtener en muchas ocasiones un comportamiento satisfactorio del sistema a pesar de la existencia de perturbaciones e incertidumbres sobre el modelo del sistema.
- El término derivativo proporciona cierta anticipación sobre la respuesta al sistema.
- El término integral permite eliminar el error en régimen permanente.
- El control PID obtiene resultados satisfactorios para una amplia gama de procesos.
- Existen sencillas reglas heurísticas que permiten obtener los parámetros del controlador PID. Dichas reglas hacen posible el ajuste del controlador, sin presuponer un gran conocimiento en teoría de control automático por parte del operador.
- El controlador PID se puede adquirir como un módulo compacto, donde los distintos parámetros del controlador se pueden ajustar manualmente. Actualmente muchos de los PIDs industriales proporcionan ciertas opciones de autosintonía.

Usos inadecuados de los PID

El controlador PID, si bien tiene una amplia implantación en la industria, no es utilizado convenientemente en muchas ocasiones. Esto implica que lazos de control, que en principio podrían proporcionar excelentes resultados, funcionen de una forma insatisfactoria. La mayoría de las causas de mal funcionamiento, son:

- Ajuste inadecuado de los parámetros del controlador. Un número elevado de los PIDs en la industria han sido sintonizados manualmente, sin la realización de un estudio previo de las características del proceso a controlar. Este tipo de sintonización manual, puede proporcionar buenos resultados en función de la experiencia del operado. En caso de requerir el ajuste de tres o más parámetros del controlador, la obtención de un ajuste

manual satisfactorio puede resultar una tarea extremadamente difícil que requiere de una gran experiencia por parte del operador. En algunas ocasiones, la falta de conocimientos y experiencia sobre el control PID, se traduce en que el controlador PID se implante con los parámetros originales de fábrica.

- Otro motivo importante de mal funcionamiento es la inadecuada elección de los actuadores. Por ejemplo, un mal dimensionamiento, presencia de histéresis, saturaciones, fricciones, etc., pueden estar al origen del pobre comportamiento del sistema.
- Los sensores son otro elemento que afectan al comportamiento del sistema. En muchas ocasiones no se filtra convenientemente el ruido asociado a los mismos. En implementaciones del controlador PID a través de un computador, es importante una buena elección del tiempo de muestreo y consideración de la incorporación o no de filtros "anti-aliasing".
- Es relativamente frecuente el diseño de un controlador PID teniendo en cuenta exclusivamente el seguimiento de la referencia. En el diseño se debe considerar no sólo el seguimiento de referencia sino también el rechazo de perturbaciones y ruidos en la medida.

Estructura del PID

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad, se representa como en la Figura 2.6

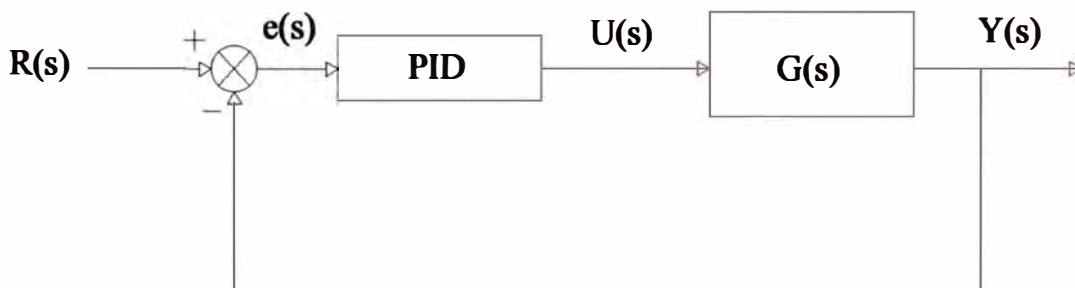


Figura 2.6 Diagrama en bloques PID

Elaboración Propia

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID.

Acción del control proporcional (P)

La acción proporcional da una salida del controlador que es proporcional al error (ver Figura 2.7), es decir: $U(t) = K_p \cdot e(t)$, que descrita desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \text{ (Función de transferencia)}$$

donde K_p es una ganancia proporcional ajustable

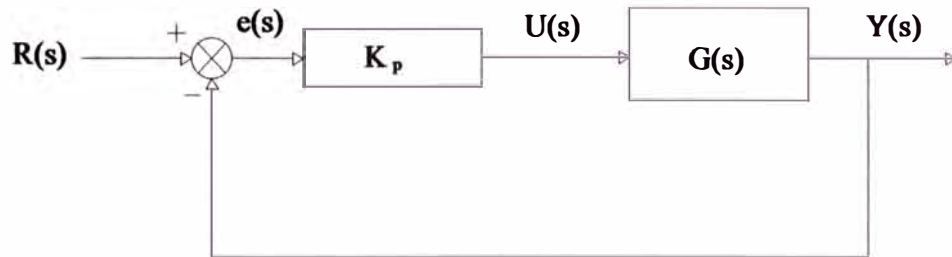


Figura 2.7 Diagrama de control (P)

Elaboración Propia

Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set). A continuación en la Figura 2.8, la acción del K_p

%% Definiendo la planta de segundo orden

clc;

s=tf('s');

a=0.0013

b=1.8

sys=a^2/(s^2+a*b*s+a^2)

%% Para P=10

c=pid(10)

figure(1);

step(1,1); axis([0 6000 0 1.4]); hold on;

step(feedback(c*ss(sys),1),'r');

legend('step','p=10');

grid on;

%% Para P=15

c=pid(15)

figure(1);

step(feedback(c*ss(sys),1),'y');

legend('step','p=10','p=15');

grid on;

%% Solo P=5

c=pid(5)

figure(1);

step(feedback(c*ss(sys),1),'c');

legend('step','p=10','p=15','p=5');

grid on;

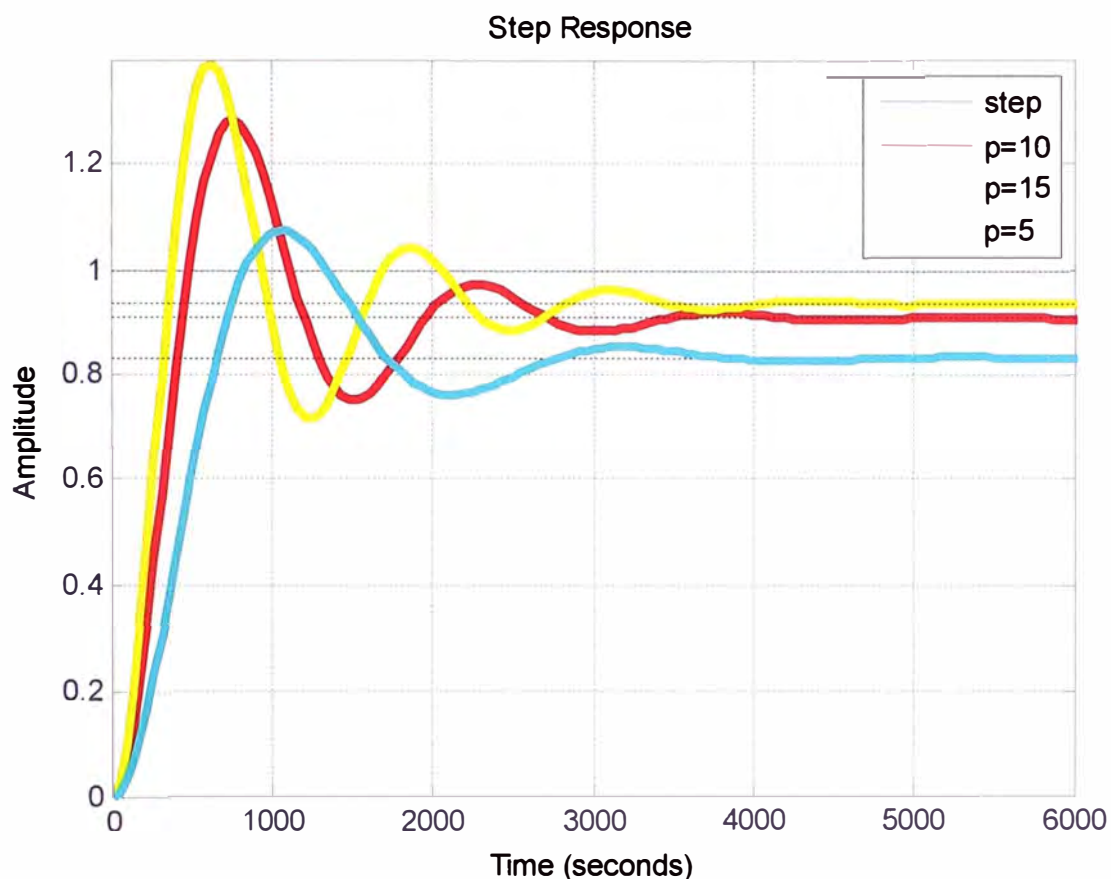


Figura 2.8 Grafica de control (P)

Fuente: Elaboración Propia con Matlab

Acción del control integral (I)

El control Integral da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado (ver Figura 2.9), lo que implica que es un modo de controlar lento.

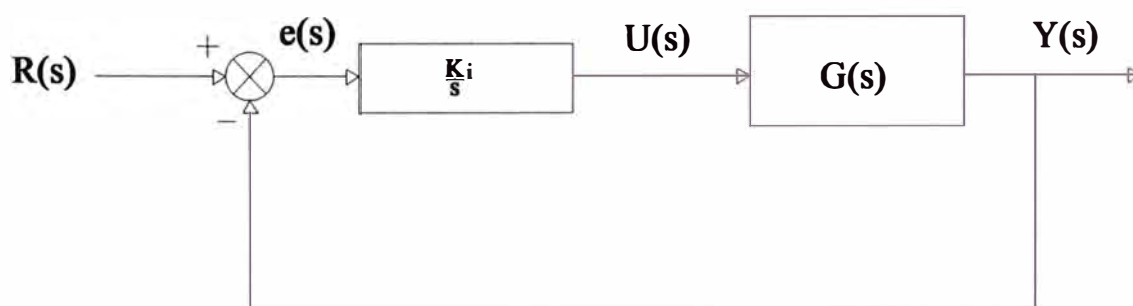


Figura 2.9 Diagrama de control (I)

Elaboración Propia

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{De la definición})$$

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (\text{Función de transferencia del bloque } K_i)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero. A continuación en la Figura 2.10, la acción del K_i

```
%% Para P=10, I=0.01
c=pid(10,0.01)
figure(1);
step(1,1); axis([0 6000 0 1.8]); hold on;
step(feedback(c*ss(sys),1),'r');
legend('step','I=0.01');
grid on;
%% Para P=10, I=0.015
c=pid(10,0.015)
figure(1);
step(feedback(c*ss(sys),1),'y');
legend('step','I=0.01','I=0.015');
grid on;
%% Para P=10, I=0.005
c=pid(10,0.005)
```

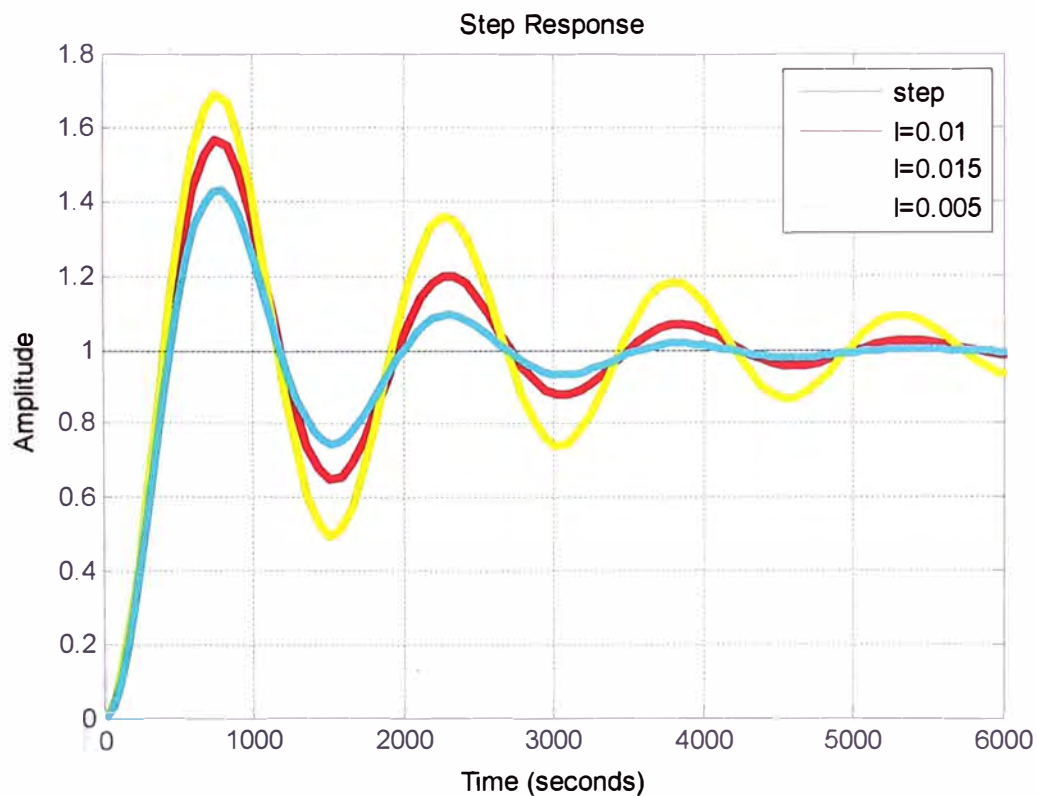


Figura 2.10 Grafica de control (PI) P=10

Fuente: Elaboración Propia con Matlab

```
figure(1);
step(feedback(c*ss(sys),1),'c');
legend('step','l=0.01','l=0.015','l=0.005');
grid on;
```

Acción del control derivativo (D)

La Figura 2.11 muestra el diagrama de un sistema derivativo.

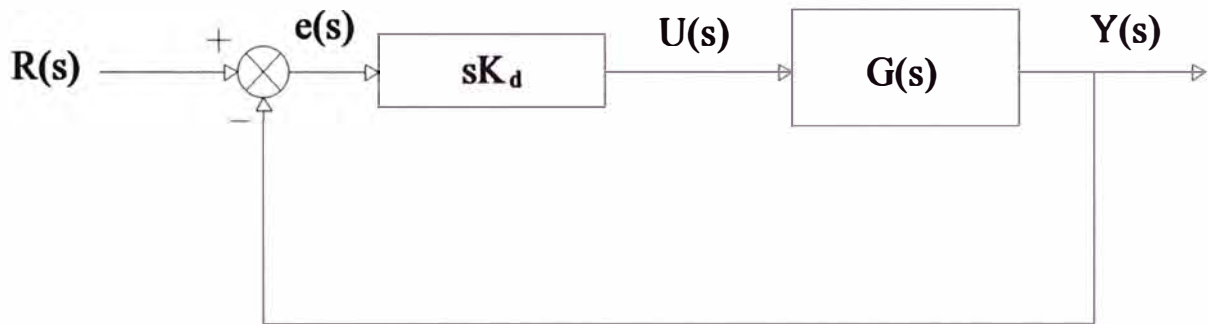


Figura 2.11 Diagrama de control (D)

Elaboración Propia

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{de la definición})$$

$$C_i(s) = sK_i \quad (\text{Función de transferencia del bloque } K_i)$$

K_i es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa usualmente no se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante periodos transitorios, por ello se utiliza con el Proporcional (Figura 2.12)

```
%% Para P=10, D=500
c=pid(10,0,500)
figure(1);
step(1,1); axis([0 4000 0 1.4]); hold on;
step(feedback(c*ss(sys),1),'r');
legend('step','D=500');
%% Para P=10, D=5000
c=pid(10,0,5000)
figure(1);
step(feedback(c*ss(sys),1),'y');
legend('step','D=500','D=5000');
%% Para P=10, D=50
```

```

c=pid(10,0,50)
figure(1);
step(feedback(c*ss(sys),1),'c');
legend('step','D=500','D=5000','D=50');
grid on;

```

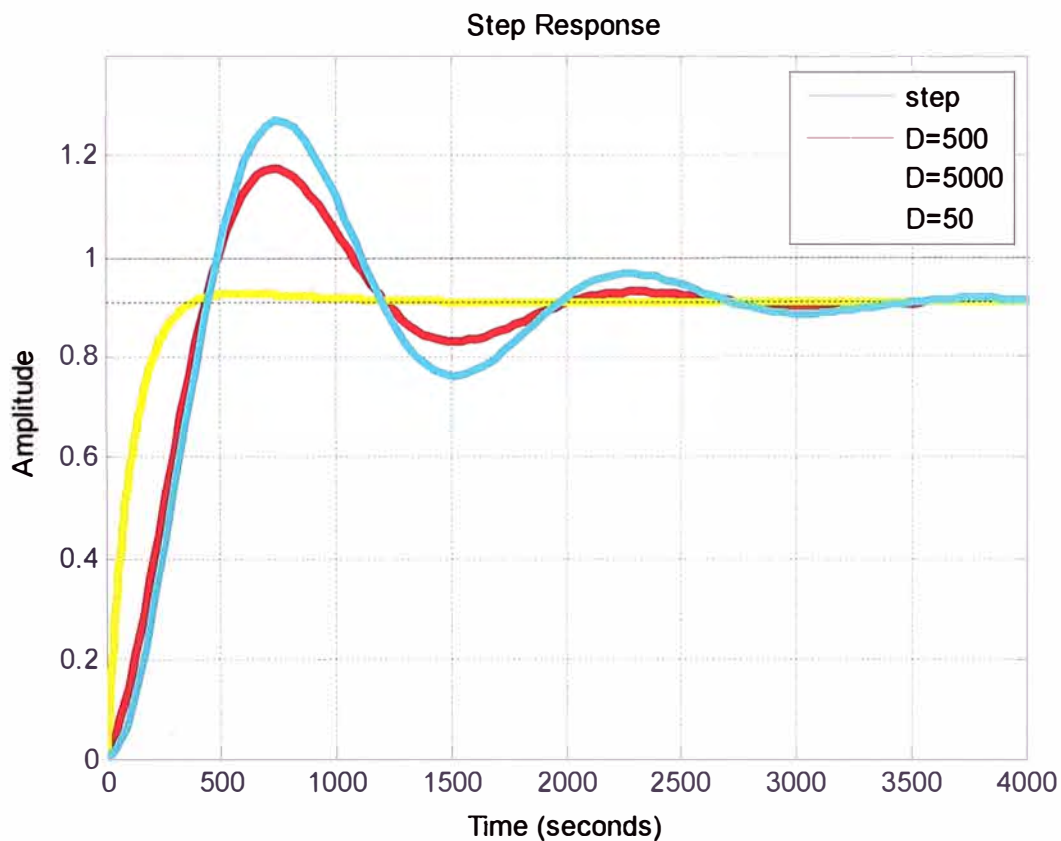


Figura 2.12 Grafica de control (PD) P=10

Fuente: Elaboración Propia con Matlab

Las diferentes acciones de los bloques K_p , K_i y K_d se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 - Comparativo de los efectos de K_p , K_i y K_d .

Fuente: Diapositivas de Msc. Eleazar Sal y Rosas

Respuesta a Lazo Cerrado	Tiempo de Subida	Sobrepico	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estacionario
K_p	Baja	Sube	Poco Cambio	Baja
K_i	Baja	Sube	Sube	Elimina
K_d	Poco Cambio	Baja	Baja	Poco Cambio

Acción del control proporcional-integral-derivativo (PID)

Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales (ver Figura 2.13). La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d$$

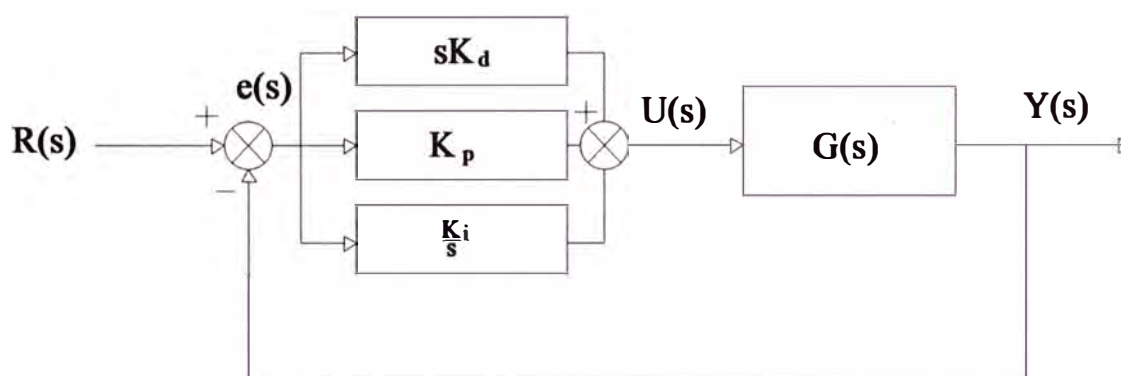


Figura 2.13 Diagrama de control (PID)

Elaboración Propia

La acción de los tres bloques se muestra a continuación en la Figura 2.14.

%% Solo Proporcional

```
c=pid(10)
```

```
figure(1);
```

```
step(1,1); axis([0 6000 0 1.6]); hold on;
```

```
step(feedback(c*ss(sys),1),'c');
```

```
legend('step','p');
```

```
grid on;
```

%% Proporcional Integral

```
c=pid(10,0.01)
```

```
figure(1);
```

```
step(feedback(c*ss(sys),1),'y');
```

```
legend('step','p','pi');
```

%% Proporcional Integral Derivativo

```
c=pid(10,0.01,2500)
```

```
figure(1);
```

```
step(feedback(c*ss(sys),1),'r');
```

```
legend('step','p','pi','pid');
```

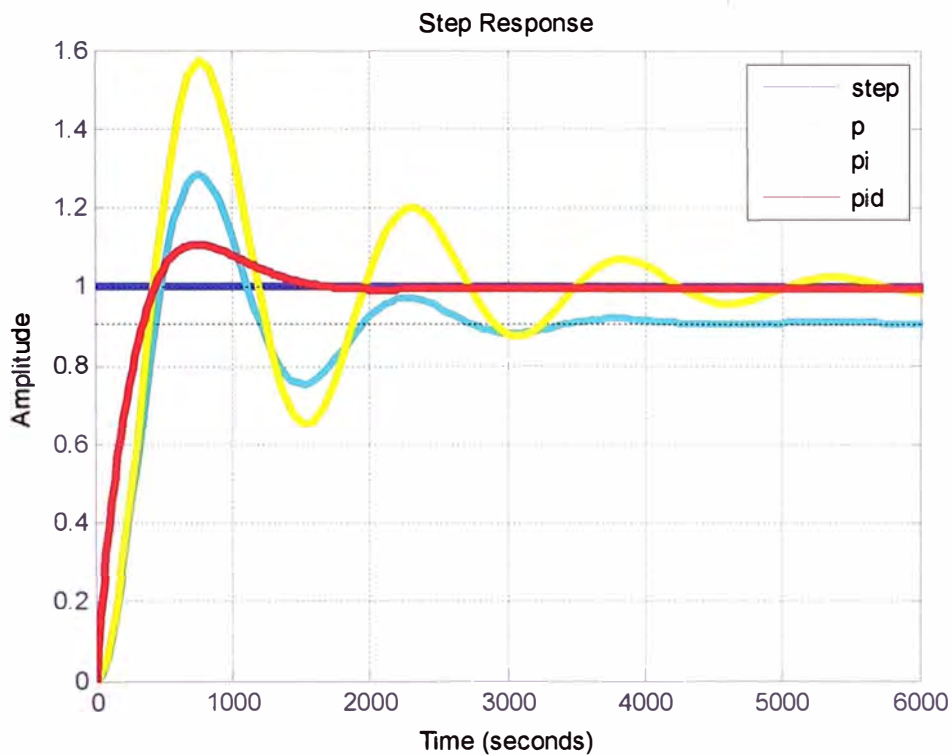


Figura 2.14 Grafica de control (PID)

Fuente: Elaboración Propia con Matlab

2.8 Reglas de Ziegler-Nichols para Sintonización de Controladores PID

Ziegler y Nichols propusieron reglas para sintonizar controladores PID con base a una respuesta experimental.

Los parámetros se obtienen experimentalmente de la respuesta de la planta a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una "ese", puede obtenerse los parámetros del controlador PID (ver Figura 2.15)

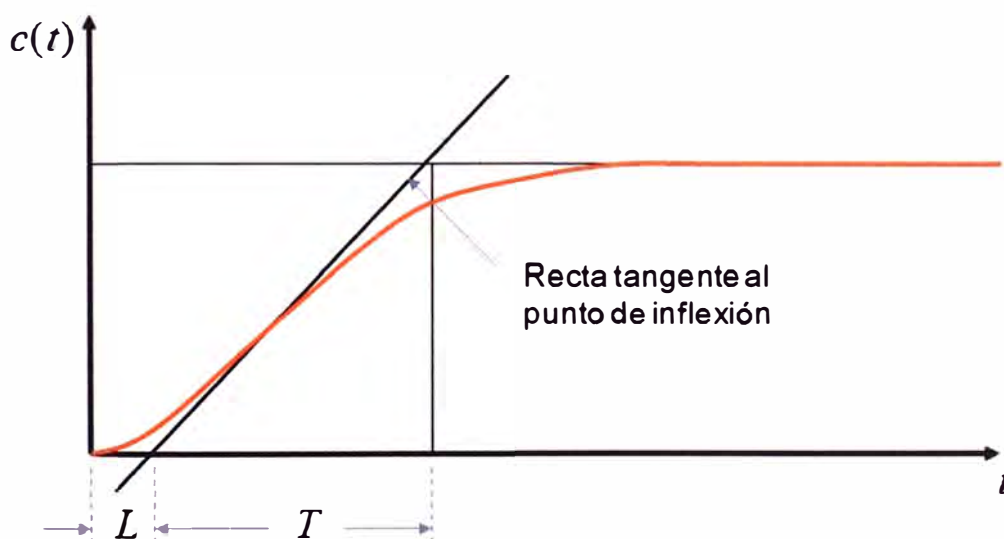


Figura 2.15 Curva experimental en forma de "ese"

Fuente: Reglas de sintonía de controladores PID – UNAM México

En la figura 2.15 se observa la respuesta en forma de “ese”. para obtener L y T, se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta, la intersección con el eje del tiempo y con el valor final de la amplitud forman las distancias L y T.

Con L y T, se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 - Parámetros PID por el método de Ziegler y Nichols

Fuente: Reglas de sintonía de controladores PID – UNAM México

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2.9 Modulación por Ancho de Pulsos (PWM)

La modulación por ancho de pulsos PWM (pulse width modulation) de una señal es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (Figura 2.16), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

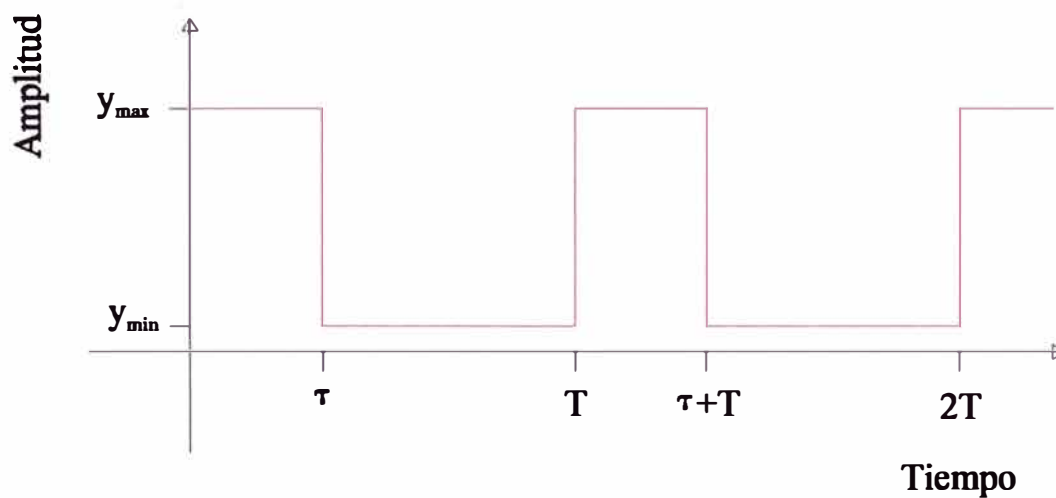


Figura 2.16 Grafica de señal PWM

Fuente: Elaboración Propia

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

D es el ciclo de trabajo

τ es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

T es el período de la función

PWM en el control digital

Controlando los circuitos analógicos digitalmente, el consumo de energía del sistema puede reducirse drásticamente. Además, muchos microcontroladores y DSPs llevan incluidos un chip controlador de PWM, haciendo fácil su implementación.

La señal de PWM sigue siendo en realidad digital debido a que en un instante de tiempo se utiliza la cantidad total de voltaje o corriente.

Modificando el ancho de banda del ciclo de trabajo se puede obtener diferentes valores del parámetro que se quiere controlar (corriente, tensión, etc) y así poder manejar la señal como si fuera analógica (ver Figura 2.17).

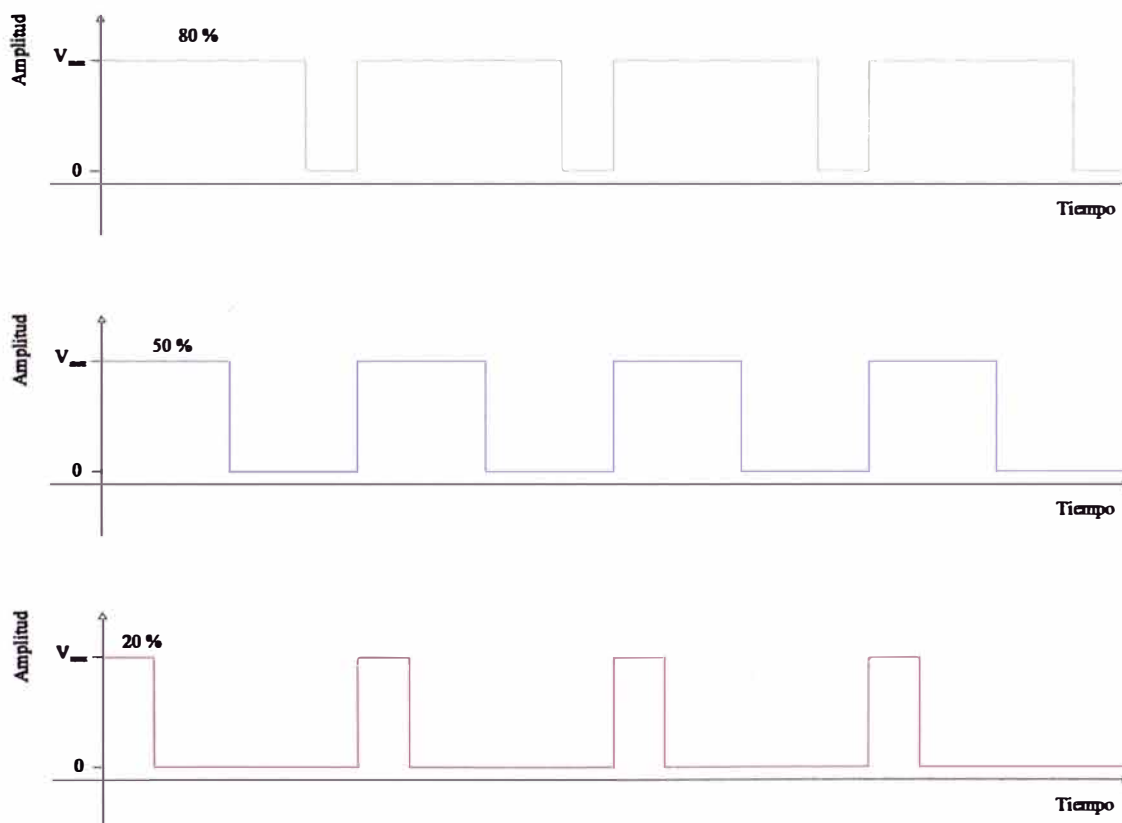


Figura 2.17 Grafica de señal PWM 80-50-20%

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 2.17 se muestran tres señales de PWM. En el primer caso se muestra una salida con un ciclo de trabajo del 80%. La segunda y tercera señal muestran unos ciclos de trabajo de 50% y 20% respectivamente. Si estas señales fueran alimentadas por una carga de 220 V, para el primer caso la señal analógica resultaría 176 V, para el segundo 110 V y para el último caso 44V.

CAPITULO III

METODOLOGIA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 Precisión del Problema

El secado en horno es un proceso crítico en la fabricación de transformadores tanto para la producción como para la calidad del producto. El problema principal es la precariedad del sistema de control, que es un sistema de elevado costo de operación, que no posee una interfaz que sea sencillo de operar y monitorear. Por tanto, es necesario en todo momento, saber la temperatura del horno de secado así como su correcto funcionamiento. Un mal funcionamiento del horno de secado produce demoras en los plazos de fabricación, que muchas veces están sujetos a penalidades, además de costos adicionales en los reprocesos cuando no pasan las pruebas de aislamiento en laboratorio.

Es por tanto que se necesita un nuevo sistema de control que tenga una interfaz amigable con el usuario operador, que sea más eficiente en el uso de la energía.

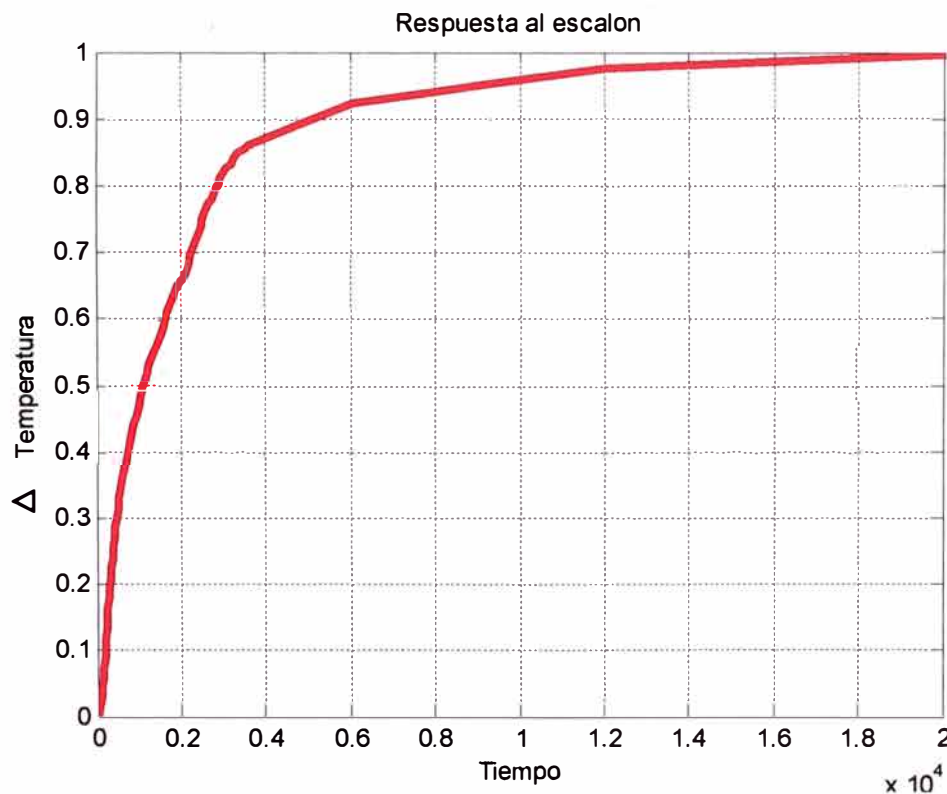


Figura 3.1 Respuesta al escalón unitario

Elaboración Propia

3.2 Análisis del Horno

Para poder tener un mejor panorama, y poder tener más elementos para tomar una decisión, se ha realizado un análisis del comportamiento del horno como sistema.

Para esto, se tomaron los datos del comportamiento del horno al ser excitado con un escalón de 220 Vac, y los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.1. En la Figura 3.1 se graficó el incremento de temperatura vs tiempo, considerando la temperatura de ambiente igual a la temperatura inicial en $t=0$ seg (26.5 °C).

De la Figura 3.1 se pudo observar que el sistema se comporta como un sistema de segundo orden. Además, de la Figura 2.4, se puede ver que es un sistema sobreamortiguado cuyo factor de amortiguamiento relativo ζ es apreciablemente mayor a la unidad.

3.3 Alternativas de Solución

1. La primera alternativa de solución sería realizar modificaciones en el horno de secado original, manteniendo el sistema eléctrico y cambiando el sistema de control, por uno más moderno y eficiente, que pueda ser fácilmente operado y monitoreado por el personal en planta.

2. Otra alternativa de solución sería el cambio total del sistema del horno. Podría ser un sistema con un costo más bajo de operación, como uno a gas con quemadores, con una válvula que regule el caudal de gas en los quemadores. El revestimiento del horno también deberá ser modificado

3. La compra de un nuevo horno de secado con las características requeridas.

Para cada una de las alternativas de solución, se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

a) Costo de Operación

El costo de operación se define como los gastos durante su vida útil que conllevará el funcionamiento del horno, ya sea electricidad, suministro de gas, repuestos, etc.

b) Tiempo de Implementación

El tiempo de implementación en este caso debe ser el más corto posible, debido a que al ser un proceso crítico de fabricación no se puede parar por mucho tiempo.

c) Costo de Implementación

El costo de implementación incluye tanto los recursos de personal como los monetarios

3.4 Comparación de las Alternativas de Solución.

A continuación el cuadro que se ha elaboró tomando en cuenta los campos a,b y c comprendidos en la sección 3.3:

Tabla 3.1 – Elaboración Propia

Opción \ Campos	Costo de Operación	Tiempo de implementación	Costo de Implementación
1- Cambio del sistema de control del Horno Original	Medio	Corto	Bajo
2- Cambio del Sistema del Horno	Bajo	Largo	Medio – Alto
3- Compra de un nuevo Horno	Bajo (elegible)	Muy Corto	Muy Alto

3.5 Solución del Problema

A partir del cuadro podemos ver que en los costos de operación para las opciones 2 y 3 son los más bajos. Pero debido a la necesidad de implementarlo en un tiempo corto, y con un bajo costo la elección a escoger sería la número 1: Cambio del sistema de control del Horno Original

Debido a que se eligió la modificación del horno original, el sistema de control propuesto fue un PID, y las razones que se utiliza este sistema de control son:

- Las características de la planta (lazo realimentado)
- El bajo costo del equipo debido y la variedad de equipos en el mercado
- Los elementos del horno original pueden ser usados en este sistema propuesto
- La naturaleza variable de la planta

La elección de los componentes utilizados en el circuito fueron escogidos en base al precio, diversas referencias, además de decisiones propias.

3.6 Circuito Propuesto

El diagrama de bloques del circuito propuesto se muestra en la Figura 3.2.

El control PID por PWM lo realiza el Controlador Zelio Control REG48. El error se obtiene comparando la señal medida por el transductor (PV) con la deseada (SV). De éste error el controlador genera una señal de control en PWM. Esta señal de control en PWM es la que puede ser regulada por el controlador mediante la variación del ciclo de trabajo (ver Capítulo II – PWM).

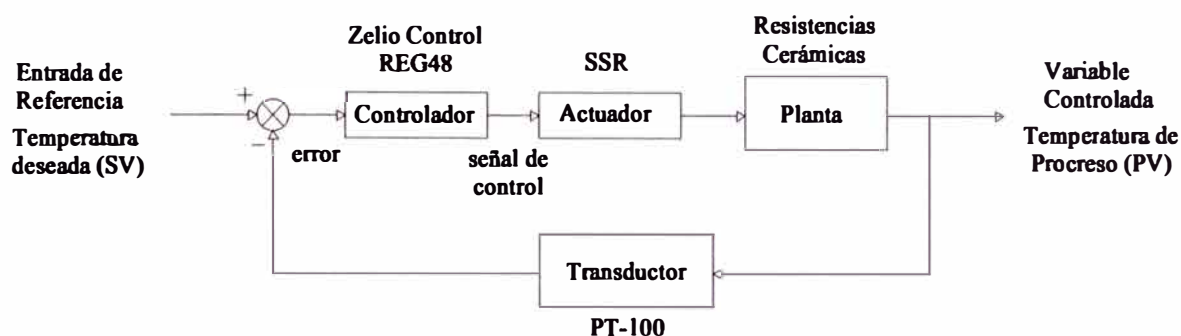


Figura 3.2: Diagrama de bloques del PID.

Fuente: Elaboración Propia

La señal de control en PWM es oscilante, y al ser estas oscilaciones muy seguidas, hace que el contactor del circuito original sea inadecuado para este nuevo circuito, es por ello que se ha cambiado el contactor por Relés de Estado Sólido (SSR) que admiten conmutaciones a alta frecuencia sin tener daño alguno. El circuito de control se presenta a continuación en la Figura 3.3, y el esquema de conexiones se muestra en la Figura 3.6.

Circuito de Control

El circuito de control, consta de:

- Un (01) Controlador de temperatura Zelio Logic REG-48, marca Schneider Electric.
- Un PT-100, marca EGO
- Dos (02) Relés de estado sólido SSR-80 AMP marca Schneider Electric
- 7 Resistencia Cerámicas de 1KW

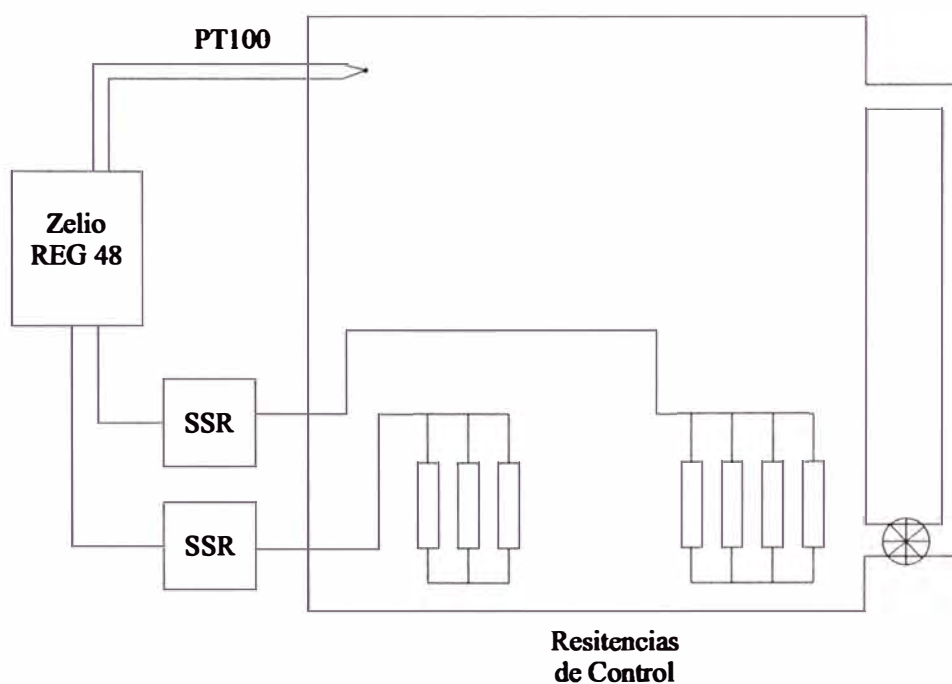


Figura 3.3: Circuito de Control.

Fuente: Elaboración Propia

Circuito de Protección

El circuito de protección (ver Figura 3.4) se ha diseñado para poder minimizar el riesgo en el caso que el control falle. El circuito de control limita la temperatura a la que pudiera estar el horno, y una vez supere el rango, lo saque de funcionamiento, consta de:

- Un Termostato 10 AMP marca EGO de 50°C a 300°C
- Contactor marca ABB

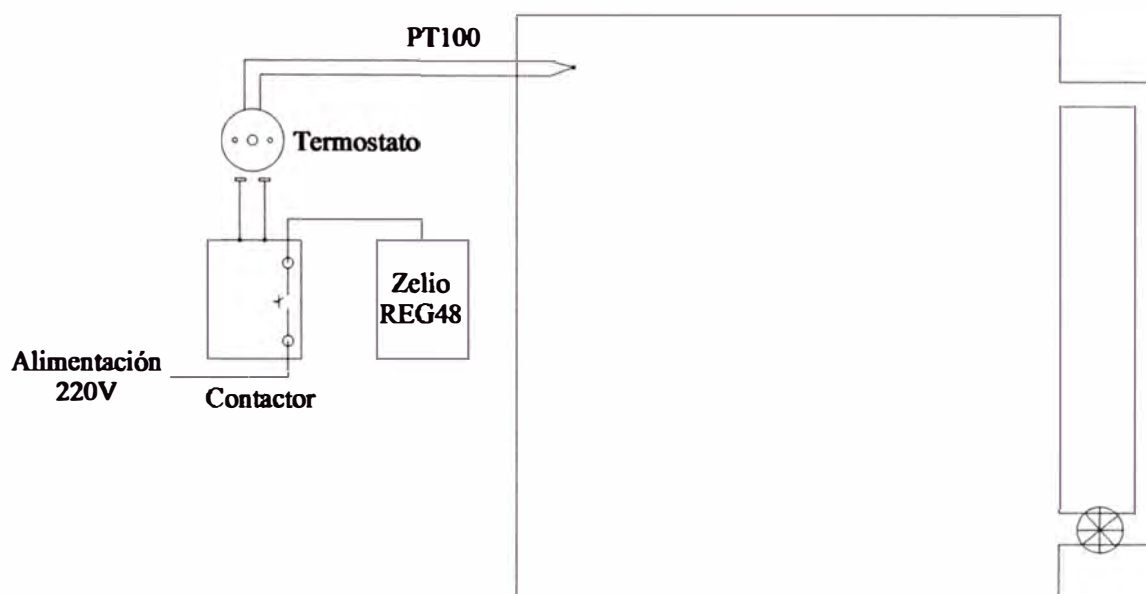


Figura 3.4: Circuito de Protección.

Fuente: Elaboración Propia

Detalles para usuario operador

Panel de Operación

Debido a las necesidades de operación y monitoreo, el panel de control debe tener las señalizaciones que faciliten ambos procesos. Es por ello que se ha considerado pertinente que el panel tenga las siguientes señalizaciones (ver Figura 3.5).

Display de Control

Muestra el valor del proceso (PV), en éste caso la temperatura medida del horno y el valor requerido del proceso (SV), que es la temperatura deseada.

General

Es una lámpara que indica que el sistema de resistencias se encuentra energizado

Control

Es una lámpara que indica que se encuentra activa la alimentación del controlador

Alarma 1

Esta lámpara es la salida discreta del controlador D1, puede ser programada para un error

Alarma 2

Esta lámpara es la salida discreta del controlador D2, puede ser programada para un error

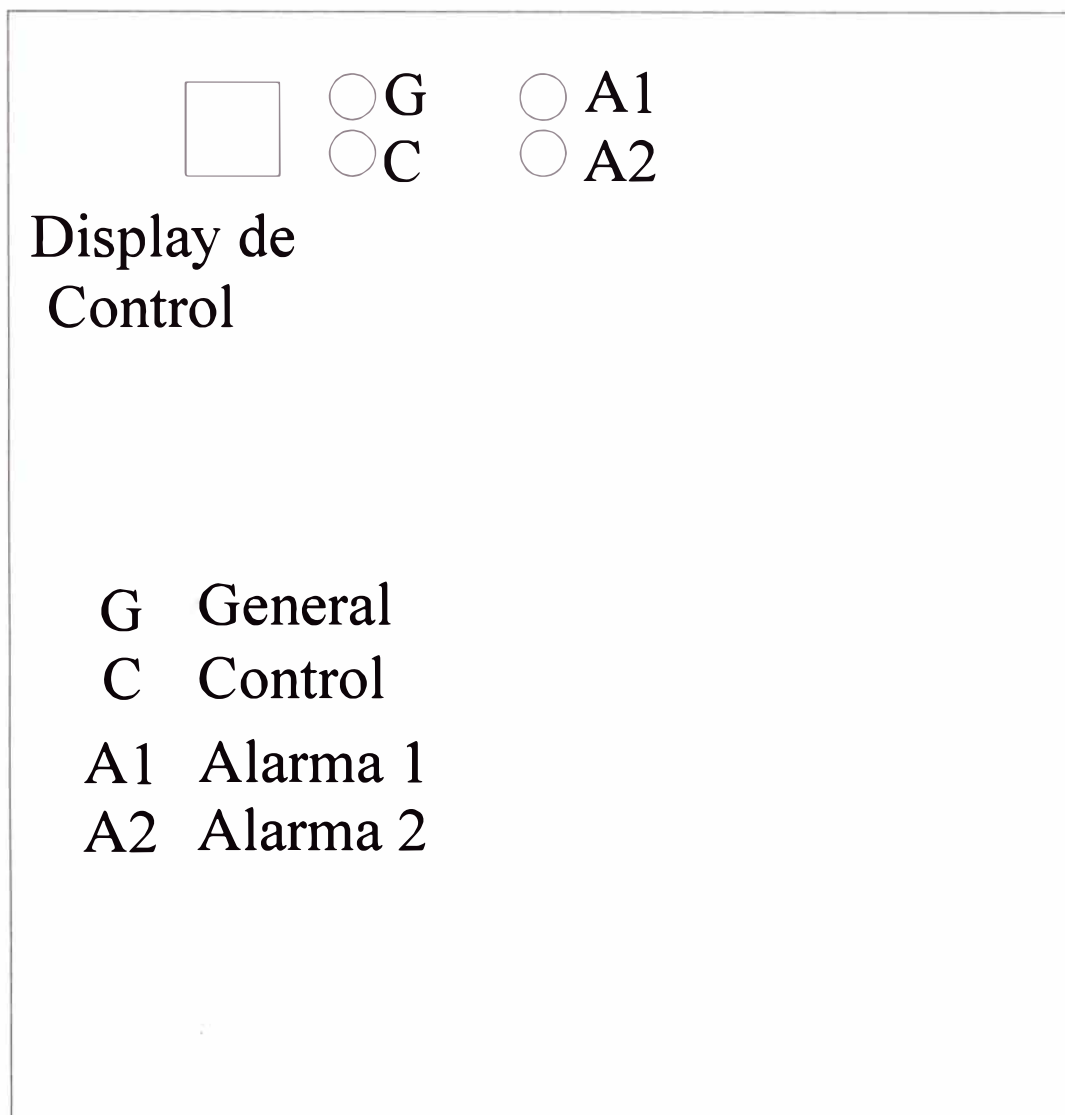


Figura 3.5: Panel Frontal de Control.

Fuente: Elaboración Propia

3.7 Parámetros PID

Luego de realizar diferentes pruebas en diferentes días y con diferentes elementos de secado, se ha determinado que es una planta que tiene diferentes comportamientos

dependiendo de los ciertos parámetros como temperatura de ambiente, volumen de secado, etc. Es por ello que se ha considerado que lo más adecuado será un control PID. Para poder utilizar los métodos de sintonización y obtener los parámetros proporcional,



ELÉCTRICA
Optimización S.A.

Esquema de Conexiones
Control del Horno de Secado

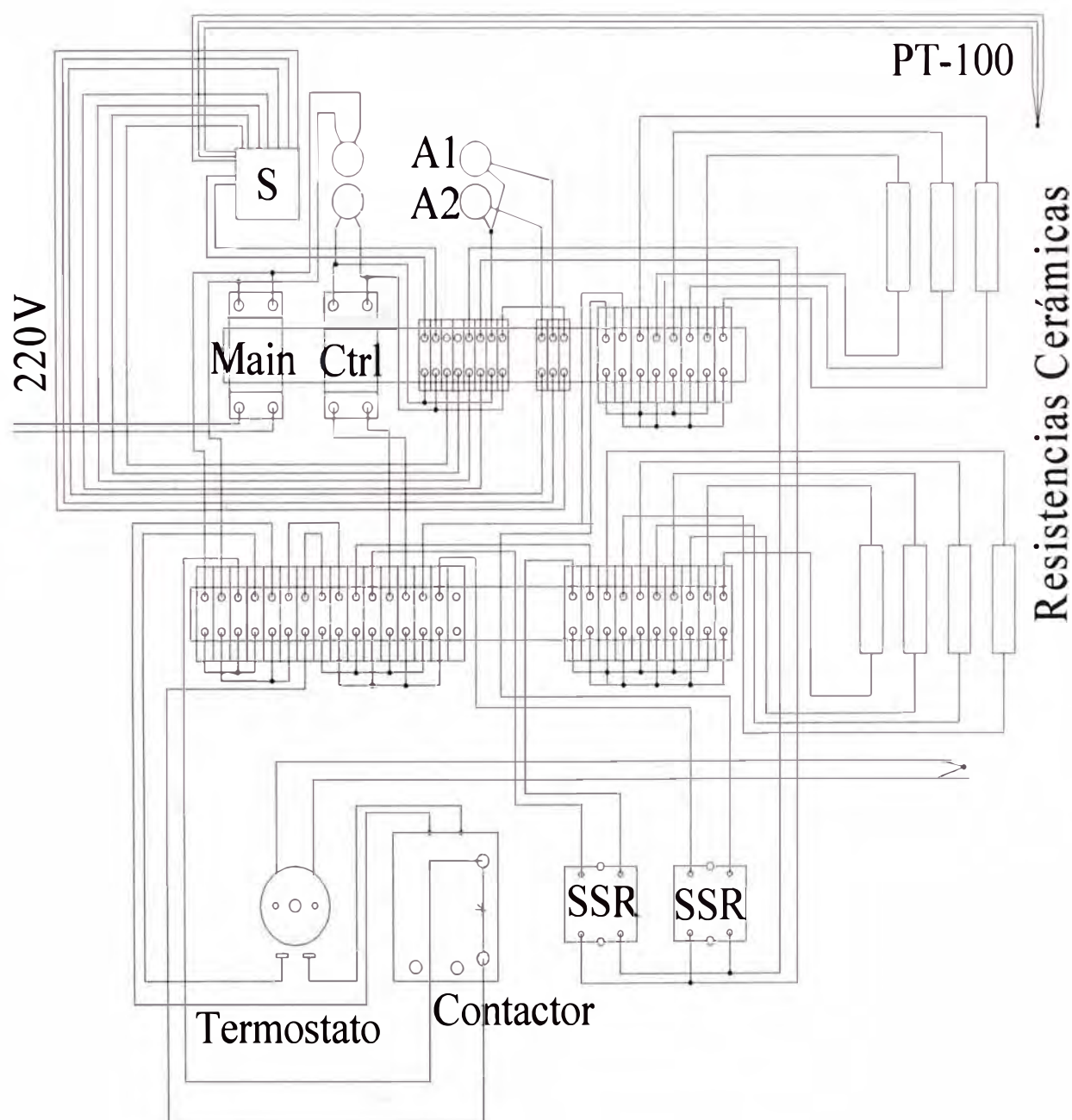


Figura 3.6: Esquema de Conexiones.

Fuente: Elaboración Propia

integral y derivativo (PID) necesitamos obtener un modelo aproximado de la planta. La respuesta original se muestra en la Figura 3.8. Se ha definido una ecuación de segundo grado (Ecuación 3.1), a la cual se le aplicará el escalón unitario (ver Figura 3.7).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\varepsilon w_n s + w_n^2} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Luego, en MATLAB y por tanteo, se ha aproximado una ecuación que al aplicarle el escalón unitario, se comporte similar a la curva obtenida experimentalmente.

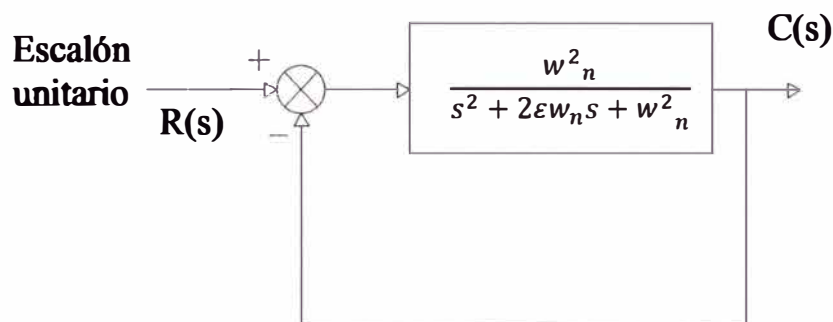


Figura 3.7 Diagrama de bloques planta

Fuente: Elaboración Propia

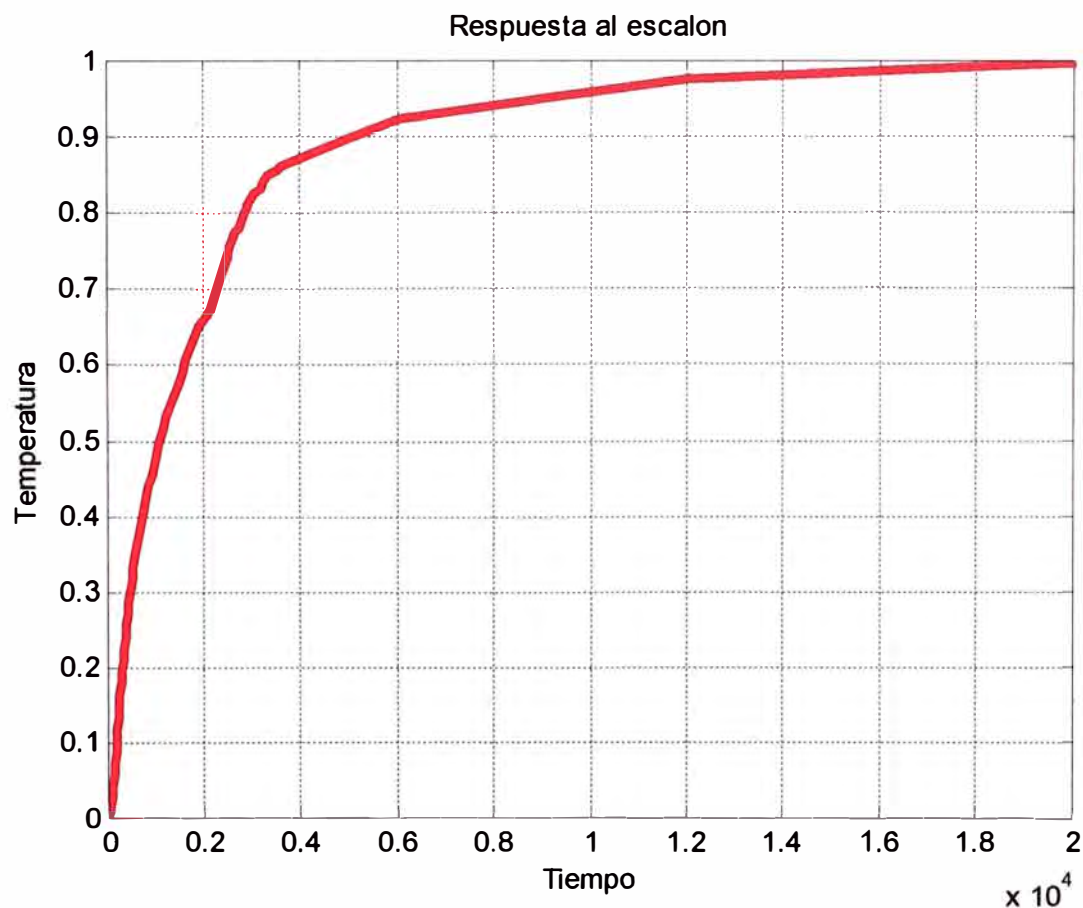


Figura 3.8 Respuesta al escalón unitario – lectura original

Fuente: Elaboración Propia

```

%% Definiendo la planta
clc;
s=tf('s');
a=0.0030
b=5
sys=(a^2)/(s^2+a*b*s+a^2)
figure(1);
step(sys,'c');

```

A continuación en la Figura 3.9, se muestra la respuesta de la planta aproximada al escalón unitario

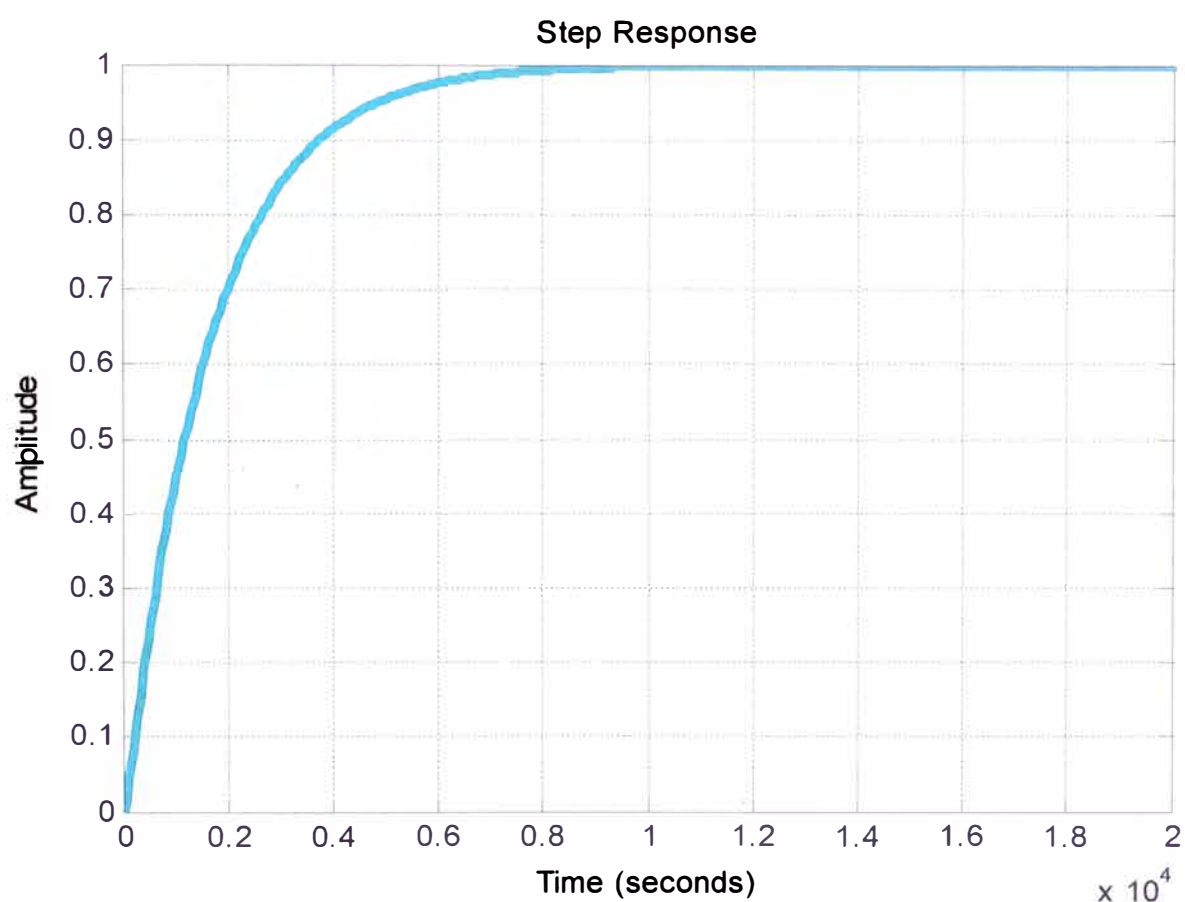


Figura 3.9 Respuesta al escalón unitario – aproximación por tanteo

Fuente: Elaboración Propia

3.7.1 Sintonización por el Método de Ziegler-Nichols

Para poder usar el método de Ziegler-Nichols (método para sintonizar controladores PID) se debió usar la gráfica de la respuesta del sistema al escalón unitario y trazar la recta de pendiente máxima como se puede apreciar en la Figura 3.10, a continuación se identificaron los valores de L y T (ver Capítulo II), luego reemplazamos los valores en el cuadro para hallar los valores PID.

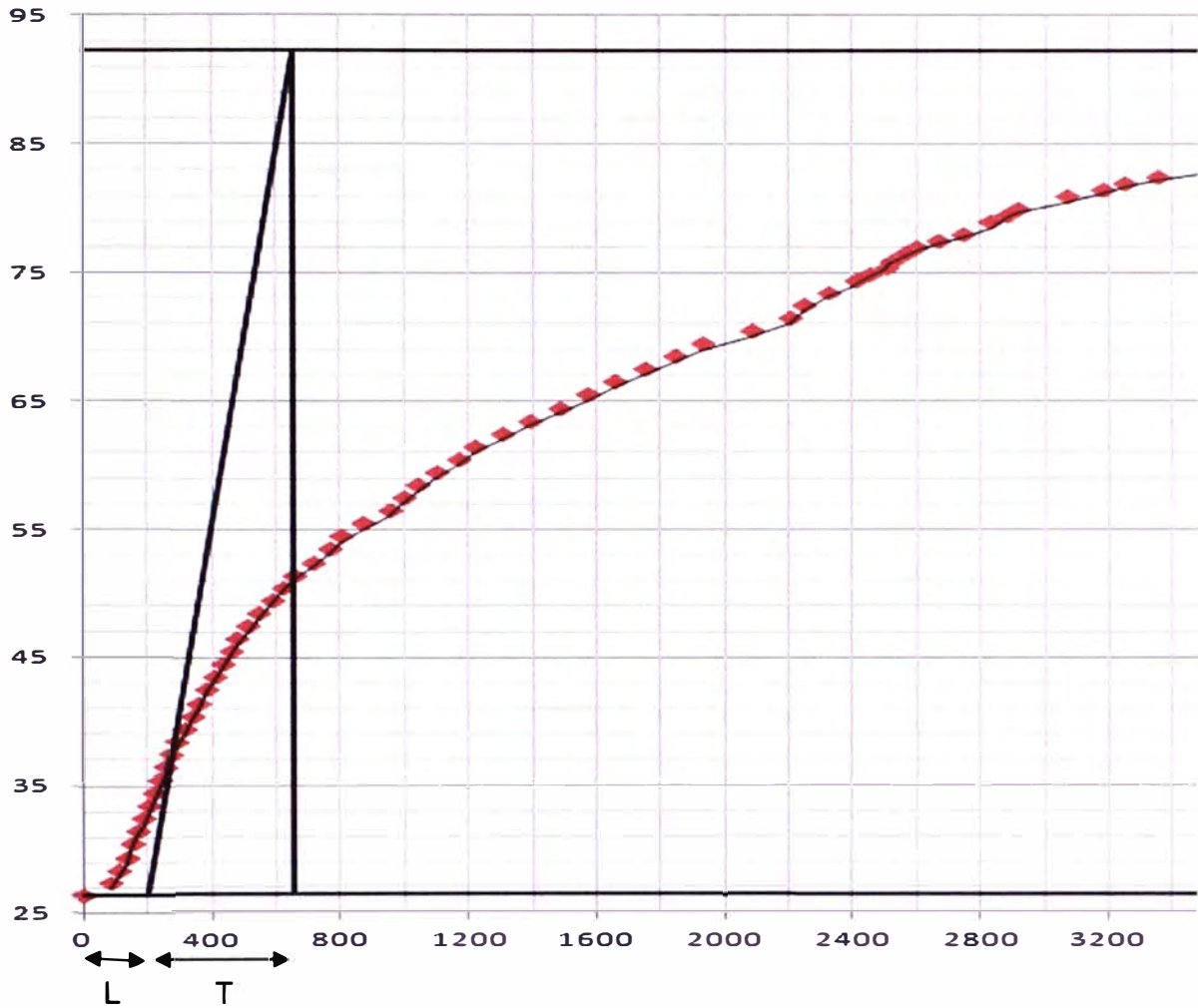


Figura 3.10 Respuesta al escalón unitario – tangente en el punto de inflexión

Fuente: Elaboración Propia

De la gráfica $L=200$

$T=650-200=450$

Tabla 3.2 - Parámetros PID por el método de Ziegler y Nichols

Fuente: Reglas de sintonía de controladores PID – UNAM México

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

De la Tabla 3.2 reemplazamos los valores de L y T, y se obtiene

$$K = 1.2(450/200) = 2.7,$$

$$T_i = 2(200) = 400 \text{ segs (} K_i = 0.0025),$$

$$T_d = 0.5(200) = 100 \text{ segs (} K_d = 100)$$

Una vez obtenidos los los parámetros PID, simulamos la respuesta (Figura 3.5).

```
c=pid(2.7,0.0025,100)
```

```
figure(2);
```

```
step(feedback(ss(c*sys),1),'c');
```

```
legend('pid');
```

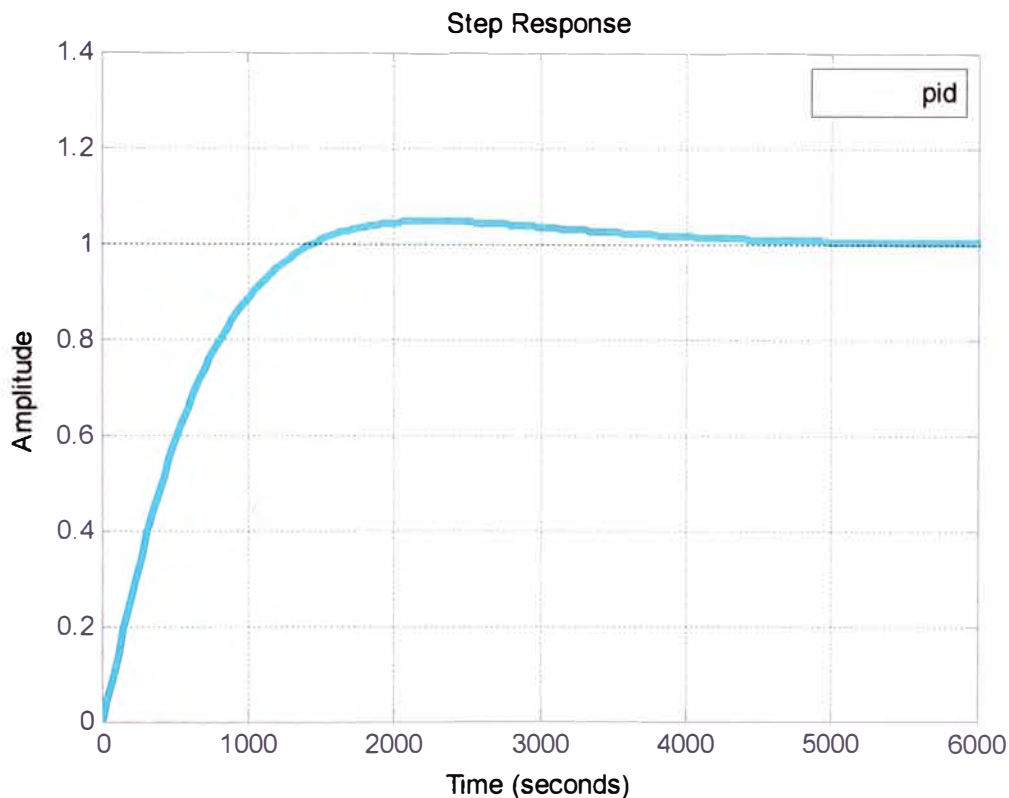


Figura 3.5 Respuesta del sistema PID

Elaboración Propia

Podemos observar que la respuesta del sistema alcanza el valor deseado. Por tanto estos valores teóricos PID son los se establecerán en el controlador (Figura 3.6).



Figura 3.6 Display del Controlador – Parámetros PID

Elaboración Propia

CAPITULO IV ANALISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS

Al implementar el circuito y establecer los parámetros PID en el controlador, se tomaron los datos que se presentan. Además, se instaló un medidor de energía para poder comparar el consumo de energía entre el sistema original con el modificado.

4.1 Sistema Original con SV=60°C (Setpoint = 60°C)

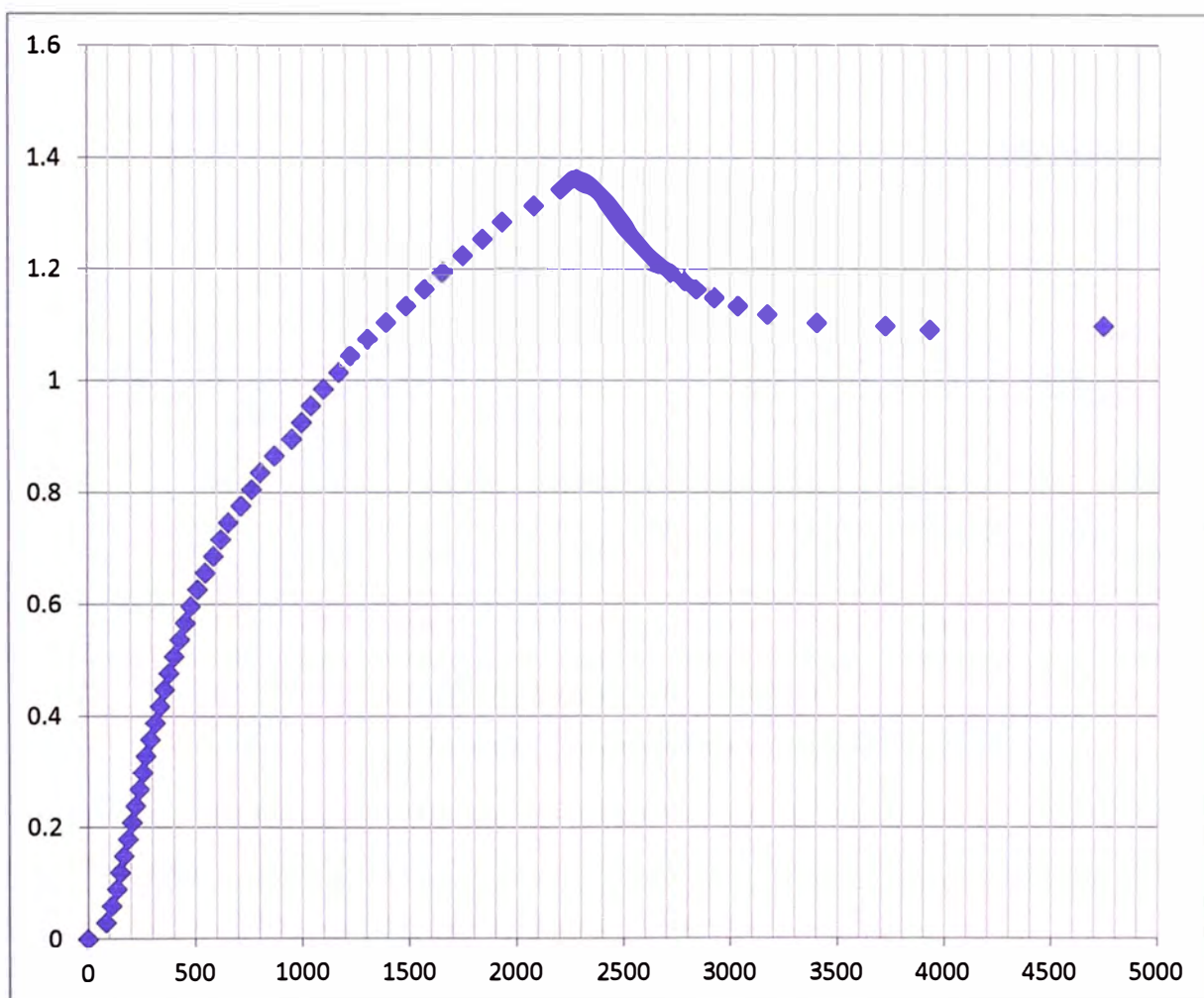


Figura 4.1 Sistema original SV=60°C

Fuente: Elaboración Propia

Como se pudo apreciar en la Figura 4.1, el sistema se aproxima, pero no llega al SV, el Mp (sobre pico máximo) es de 20%,

El consumo en 4740 segundos (79 min) es de 6.75KWh

El consumo en estado estacionario es de 4.048 KWh / hora

4.2 Sistema PID con SV=60°C

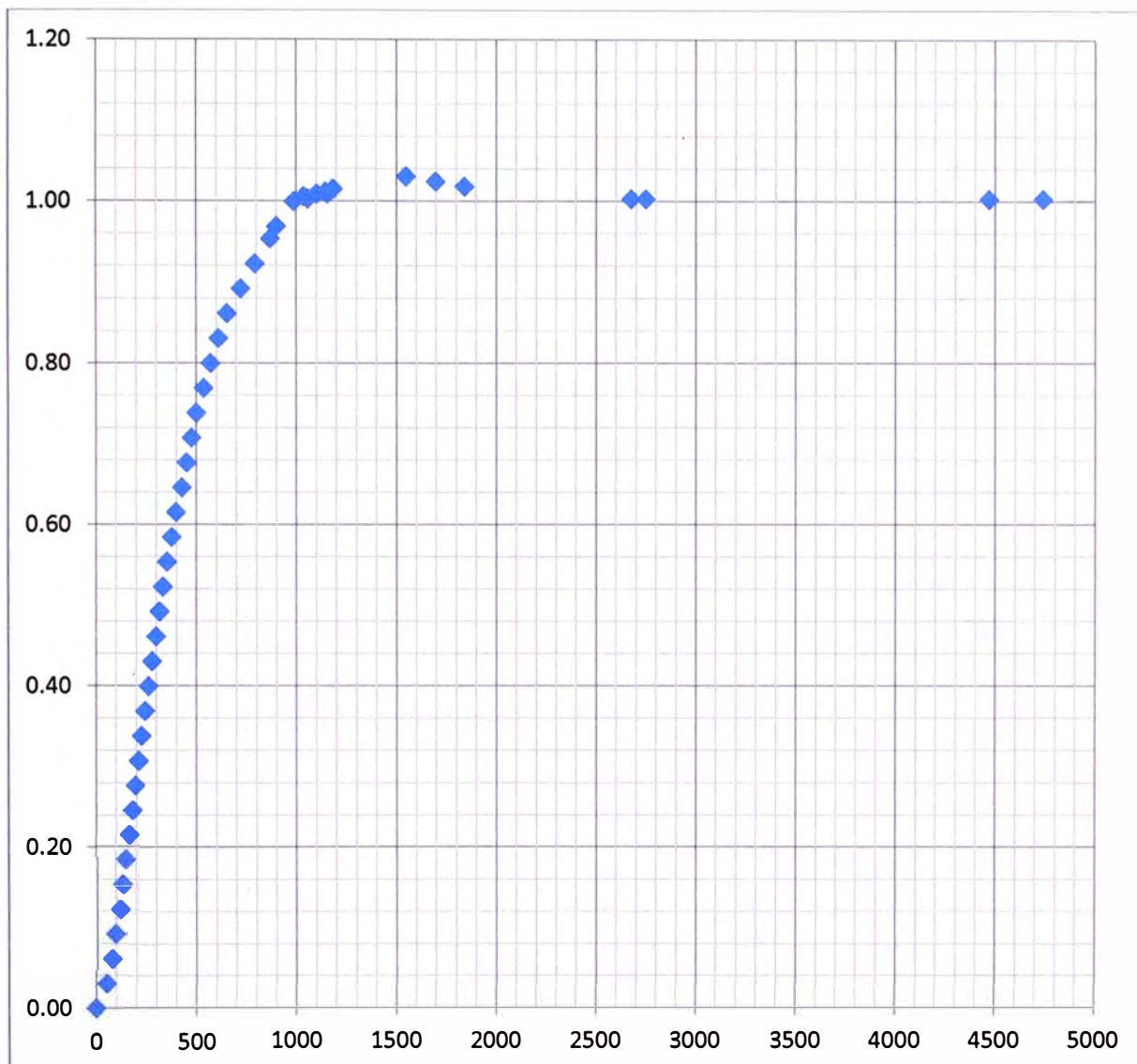


Figura 4.2 Sistema PID SV=60°C

Fuente: Elaboración Propia

En este caso el sistema se aproxima hasta llegar al SV, el overshoot se ha reducido a 3% (ver Figura 4.2),

El consumo en 4740 segundos (79 min) es de 4.89 KWh

El consumo en estado estacionario es de 2.807 KWh / hora

Comparación Entre los Sistemas Original vs PID (SV=60°C)

Los consumos en estado estacionario los sistemas fueron

Original = 4.048 KWh / hora

PID = 2.807 KWh / hora

El consumo del sistema PID representa el 69.34% del sistema original, lo cual representa un ahorro de energía de 30.66%.

4.3 Sistema Original con SV=80°C (Setpoint = 80°C)

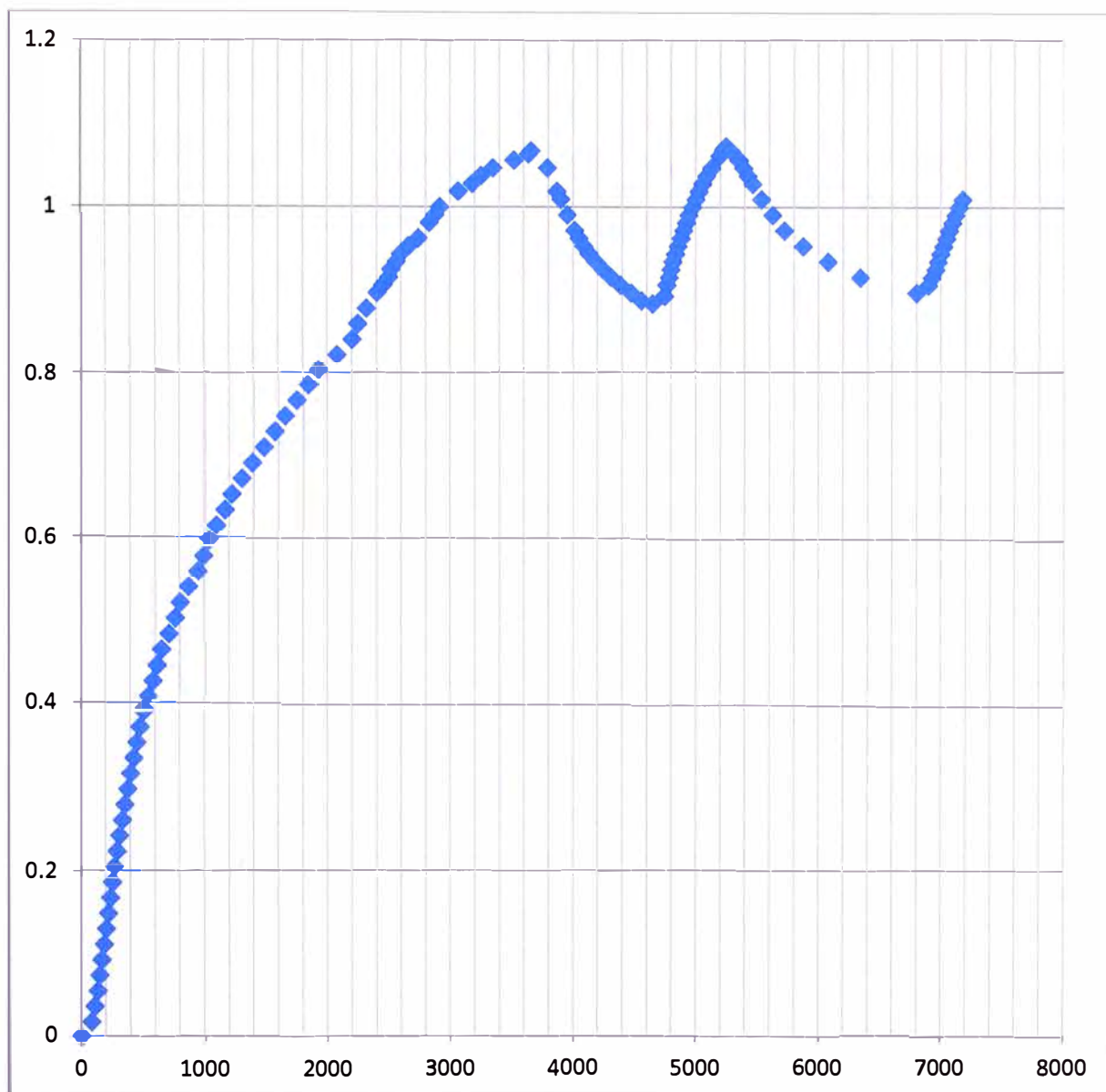


Figura 4.3 Sistema original SV=80°C

Fuente: Elaboración Propia

Como se pudo apreciar en la Figura 4.3, el sistema oscila alrededor del SV, el Mp (sobre pico máximo) es bastante pronunciado.

El consumo en 7176 segundos (119.6 min) es de 12.91 KWh

El consumo en estado estacionario es de 10.83 KWh / hora

4.4 Sistema PID con SV=80°C

En este caso el sistema llega al SV en aproximadamente 4000 segundos como se muestra en la Figura 4.4.

El consumo en 5170 segundos (86.16 min) es de 8.03 KWh

El consumo en estado estacionario es de 4.9745 KWh / hora

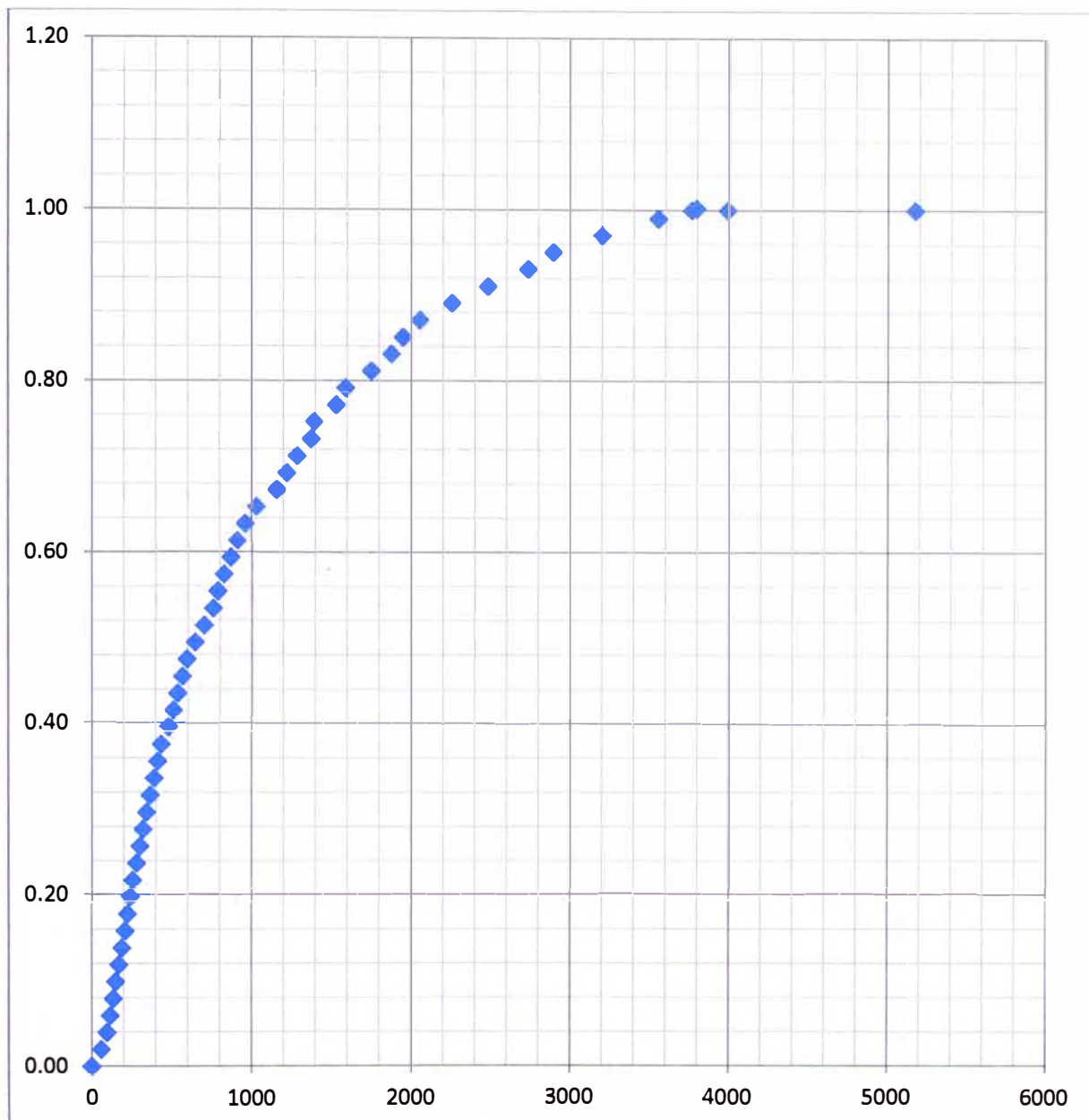


Figura 4.4 Sistema PID SV=80°C

Fuente: Elaboración Propia

Comparación Entre los Sistemas Original vs PID (SV=80°C)

Los consumos en estado estacionario los sistemas fueron

Original = 10.83 KWh / hora

PID = 4.9745 KWh / hora

El consumo del sistema PID representa el 45.93% del sistema original, lo cual representa un ahorro de energía de 55.07%.

4.5 Ahorro Total Mensual del Horno

Para el SV=60°C

El horno funciona aproximadamente en promedio 30 días al mes, las 24 horas del día.

Esto representaría en el horno original $24 \text{ h} \times 30 \text{ días} \times 4.048 \text{ KWh /h} = 2914.56 \text{ KWh}$

Y con el nuevo sistema PID = $24 \text{ h} \times 30 \text{ días} \times 2.807 \text{ KWh /h} = 2021.04 \text{ KWh}$

La diferencia será 893.52 KWh

La tarifa contratada es de S/. 0.3442 / KWh

Entonces el ahorro mensual se traduciría en S/. 307.55

Para el SV=80°C

El horno funciona aproximadamente en promedio 30 días al mes, las 24 horas del día.

Esto representaría en el horno original $24 \text{ h} \times 30 \text{ días} \times 10.83 \text{ KWh /h} = 7803 \text{ KWh}$

Y con el nuevo sistema PID = $24 \text{ h} \times 30 \text{ días} \times 4.974 \text{ KWh /h} = 3582 \text{ KWh}$

La diferencia será 4593 KWh

La tarifa contratada es de S/. 0.3442 / KWh

En este caso el ahorro mensual es de S/. 1453, ahorro cual fue suficiente para comprar los componentes del horno PID en 1 mes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Durante el funcionamiento prolongado del horno se ha corroborado que a diferentes condiciones de temperatura del ambiente, diferente material a secar, entre otros; el sistema de control PID funciona de manera adecuada.
- Los resultados muestran que el sistema de control PID tiene una precisión muy alta, y una respuesta más rápida para alcanzar el SV, además de que produce un ahorro de energía que se traduce en una reducción en el costo de operación.
- El usuario operador en todo momento visualizará la temperatura del horno. Además, podrá cambiar la temperatura del horno directamente desde el panel de control con solo presionar dos botones que son para subir y bajar la temperatura.
- Las alarmas podrán ser programadas para poder evidenciar un funcionamiento inadecuado del horno.
- Se recomienda separar las alimentaciones de potencia con la de control, debido a que los equipos de control son sensibles a cualquier sobrecarga.
- Se recomienda mejorar el aislamiento térmico del horno, pues se pierde calor por las paredes del horno. Esto bajaría el consumo de energía.
- Se ha recomendado cambiar a un sistema trifásico, lo cual la empresa ha aceptado como parte de la segunda modificación que será programada posteriormente (ver ANEXO B)
- Se ha demostrado que, a un bajo costo, se pueden obtener resultados importantes por un sistema nuevo y es por ello es recomendable analizar la situación a profundidad antes de tomar una decisión.

ANEXO A
DATOS RECOPIRADOS

Tabla A.1 Respuesta del Sistema en Lazo Abierto)

Fuente Elaboración Propia

Time (s)	Temp	E (KWh)	A (Amplitude)
0	26.5	1268515	0.00
85	27.5		0.02
110	28.5		0.03
135	29.5		0.05
150	30.5		0.06
168	31.5		0.08
187	32.5		0.09
205	33.5		0.11
222	34.5		0.12
240	35.5		0.14
256	36.5		0.15
270	37.5		0.17
292	38.5		0.18
315	39.5		0.20
337	40.5		0.21
358	41.5		0.23
380	42.5		0.24
404	43.5		0.26
430	44.5		0.27
456	45.5		0.29
480	46.5		0.30
512	47.5		0.32
548	48.5		0.33
586	49.5		0.35
620	50.5		0.36
655	51.5		0.38
714	52.5		0.39
764	53.5		0.41
804	54.5		0.42
870	55.5		0.44
951	56.5		0.45
997	57.5		0.47
1041	58.5		0.48
1099	59.5		0.50
1169	60.5		0.52
1224	61.5		0.53
1306	62.5		0.55
1390	63.5		0.56
1484	64.5		0.58
1572	65.5		0.59
1655	66.5		0.61
1748	67.5		0.62
1842	68.5		0.64
1931	69.5		0.65
2082	70.5		0.67
2204	71.5		0.68
2250	72.5		0.70
2320	73.5		0.71
2407	74.5		0.73
2455	75		0.73
2503	75.5		0.74
2519	76		0.75
2563	76.5		0.76
2598	77		0.77
2663	77.5		0.77
2740	78		0.78
2830	79		0.80
2877	79.5		0.80
2917	80		0.81
3066	81		0.83
3180	81.5		0.83
3251	82		0.84
3347	82.5		0.85
3519	83		0.86
3637	83.4		0.86
4853.5	85.4		0.89
6070	87.4		0.92
7685	88.4		0.94
9300	89.4		0.95
10650	90.1		0.96
12000	90.9		0.98
14250	91.3		0.98
16500	91.6		0.99
18750	92.1		0.99
20150	92.2		1.00
24650	92.5	1273692	1.00

Tabla A.2 Sistema Original SV=60°C

Fuente: Elaboración Propia

time (s)	Temp	Status	E
0	26.5	ON	68515
85	27.5	ON	
110	28.5	ON	
135	29.5	ON	
150	30.5	ON	
168	31.5	ON	
187	32.5	ON	
205	33.5	ON	
222	34.5	ON	
240	35.5	ON	
256	36.5	ON	
270	37.5	ON	
292	38.5	ON	
315	39.5	ON	
337	40.5	ON	
358	41.5	ON	
380	42.5	ON	
404	43.5	ON	
430	44.5	ON	
456	45.5	ON	
480	46.5	ON	
512	47.5	ON	
548	48.5	ON	
586	49.5	ON	
620	50.5	ON	
655	51.5	ON	
714	52.5	ON	
764	53.5	ON	
804	54.5	ON	
870	55.5	ON	
951	56.5	ON	
997	57.5	ON	
1041	58.5	ON	
1099	59.5	ON	
1169	60.5	ON	

1224	61.5	ON	
1306	62.5	ON	
1390	63.5	ON	
1484	64.5	ON	
1572	65.5	ON	
1655	66.5	ON	
1748	67.5	ON	
1842	68.5	ON	
1931	69.5	ON	
2082	70.5	ON	
2204	71.5	ON	
2250	72	OFF	68910
2280	72.1	OFF	
2292	72	OFF	
2300	71.9	OFF	
2331	71.8	OFF	
2365	71.5	OFF	
2404	71	OFF	
2432	70.5	OFF	
2460	70	OFF	
2493	69.5	OFF	
2517	69	OFF	
2551	68.5	OFF	
2583	68	OFF	
2620	67.5	OFF	
2661	67	OFF	
2718	66.5	OFF	
2782	66	OFF	
2840	65.5	OFF	
2924	65	OFF	
3034	64.5	OFF	
3173	64	OFF	
3404	63.5	OFF	
3724	63.3	OFF	
3931	63.1	OFF	
4740	63.3	OFF	69190

Tabla A.3 Sistema original SV=80°C

Fuente: Elaboración Propia

time (s)	Temp	Status
0	26.5	ON
85	27.5	ON
110	28.5	ON
135	29.5	ON
150	30.5	ON
168	31.5	ON
187	32.5	ON
205	33.5	ON
222	34.5	ON
240	35.5	ON
256	36.5	ON
270	37.5	ON
292	38.5	ON
315	39.5	ON
337	40.5	ON
358	41.5	ON
380	42.5	ON
404	43.5	ON
430	44.5	ON
456	45.5	ON
480	46.5	ON
512	47.5	ON
548	48.5	ON
586	49.5	ON
620	50.5	ON
655	51.5	ON
714	52.5	ON
764	53.5	ON
804	54.5	ON
870	55.5	ON
951	56.5	ON
997	57.5	ON
1041	58.5	ON
1099	59.5	ON
1169	60.5	ON
1224	61.5	ON
1306	62.5	ON
1390	63.5	ON
1484	64.5	ON
1572	65.5	ON
1655	66.5	ON
1748	67.5	ON
1842	68.5	ON
1931	69.5	ON

2082	70.5	ON
2204	71.5	ON
2250	72.5	ON
2320	73.5	ON
2407	74.5	ON
2455	75	ON
2503	75.5	ON
2519	76	ON
2563	76.5	ON
2598	77	ON
2663	77.5	ON
2740	78	ON
2830	79	ON
2877	79.5	ON
2917	80	ON
3066	81	ON
3180	81.5	ON
3251	82	ON
3347	82.5	ON
3519	83	ON
3637	83.4	OFF
3659	83.6	OFF
3791	82.5	OFF
3870	81	OFF
3902	80.5	OFF
3953	79.5	OFF
4015	78.5	OFF
4050	78	OFF
4087	77.5	OFF
4131	77	OFF
4185	76.5	OFF
4245	76	OFF
4310	75.5	OFF
4386	75	OFF
4475	74.5	ON
4559	74	ON
4650	73.8	ON
4746	74.3	ON
4766	75	ON
4786	75.5	ON
4799	76	ON
4815	76.5	ON
4836	77	ON
4858	77.5	ON

4881	78	ON
4902	78.5	ON
4926	79	ON
4946	79.5	ON
4974	80	ON
5002	80.5	ON
5027	81	ON
5056	81.5	ON
5087	82	ON
5130	82.5	ON
5197	83.3	ON
5207	83.4	OFF
5224	83.6	OFF
5228	83.7	OFF
5236	83.8	OFF
5246	83.9	OFF
5291	83.6	OFF
5354	83	OFF
5391	82.5	OFF
5426	82	OFF
5466	81.5	OFF
5537	80.5	OFF
5626	79.5	OFF
5724	78.5	OFF
5876	77.5	OFF
6078	76.5	OFF
6341	75.5	OFF
6800	74.5	ON
6896	75	ON
6926	75.5	ON
6956	76	ON
6976	76.5	ON
6996	77	ON
7021	77.5	ON
7046	78	ON
7066	78.5	ON
7093	79	ON
7119	79.5	ON
7146	80	ON
7176	80.5	ON

Tabla A.4 Sistema PID SV=60°C

Fuente: Elaboración Propia

time (s)	Temp	E	A
0	27.5	1354696	0.00
53	28.5		0.03
80	29.5		0.06
98	30.5		0.09
120	31.5		0.12
135	32.5		0.15
150	33.5		0.18
165	34.5		0.22
181	35.5		0.25
196	36.5		0.28
212	37.5		0.31
227	38.5		0.34
244	39.5		0.37
261	40.5		0.40
279	41.5		0.43
299	42.5		0.46
316	43.5		0.49
333	44.5		0.52
354	45.5		0.55
377	46.5		0.58
399	47.5		0.62
429	48.5		0.65
452	49.5		0.68

477	50.5		0.71
500	51.5		0.74
537	52.5		0.77
572	53.5		0.80
611	54.5		0.83
654	55.5		0.86
723	56.5		0.89
793	57.5		0.92
870	58.5		0.95
900	59		0.97
988	60		1.00
1037	60.2		1.01
1057	60.1		1.00
1102	60.3		1.01
1147	60.4		1.01
1156	60.3		1.01
1184	60.5		1.02
1548	61		1.03
1697	60.8		1.02
1842	60.6	1354959	1.02
2676	60.1		1.00
2750	60.1		1.00
4470	60.1		1.00
4740	60.1	1355185	1.00

Tabla A.5 Sistema PID SV=80°C

Fuente: Elaboración Propia

m	s	time (s)	Temp	A	Watts
0	0	0	29.5	0.00	1730999
0	60	60	30.5	0.02	
1	35	95	31.5	0.04	
1	55	115	32.5	0.06	
2	15	135	33.5	0.08	
2	30	150	34.5	0.10	
2	50	170	35.5	0.12	
3	10	190	36.5	0.14	
3	30	210	37.5	0.16	
3	45	225	38.5	0.18	
4	0	240	39.5	0.20	
4	15	255	40.5	0.22	
4	40	280	41.5	0.24	
5	0	300	42.5	0.26	
5	20	320	43.5	0.28	
5	43	343	44.5	0.30	
6	5	365	45.5	0.32	
6	30	390	46.5	0.34	
6	52	412	47.5	0.36	
7	15	435	48.5	0.38	
8	0	480	49.5	0.40	
8	30	510	50.5	0.42	
8	57	537	51.5	0.44	
9	27	567	52.5	0.46	
9	55	595	53.5	0.48	
10	45	645	54.5	0.50	
11	42	702	55.5	0.51	

12	38	758	56.5	0.53	
13	7	787	57.5	0.55	
13	45	825	58.5	0.57	
14	28	868	59.5	0.59	
15	10	910	60.5	0.61	
16	0	960	61.5	0.63	
17	10	1030	62.5	0.65	
19	17	1157	63.5	0.67	
20	20	1220	64.5	0.69	
21	23	1283	65.5	0.71	
22	53	1373	66.5	0.73	
23	10	1390	67.5	0.75	
25	30	1530	68.5	0.77	
26	30	1590	69.5	0.79	
29	10	1750	70.5	0.81	
31	17	1877	71.5	0.83	
32	30	1950	72.5	0.85	
34	15	2055	73.5	0.87	
37	35	2255	74.5	0.89	
41	25	2485	75.5	0.91	
45	35	2735	76.5	0.93	
48	15	2895	77.5	0.95	
53	20	3200	78.5	0.97	
59	15	3555	79.5	0.99	
62	45	3765	80	1.00	
63	15	3795	80.1	1.00	1731612
66	30	3990	80	1.00	
86	10	5170	80	1.00	1731802

ANEXO B
(COSTOS Y MODIFICACIONES)

Tabla B.1 Tabla de Costos / Primera Modificación

Fuente: Elaboración Propia

Pos.	Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1.	01	Pza.	CONTROLADOR DE TEMPERATURA ZELIO 48X48,100-240VAC,ENT.UNIVERSAL/ SCHNEIDER SAL.1PNP,CON MODBUS IP66 Entrega 2 días puesta la OC.		S/. 457.92 + IGV
2.	02	Pza.	SSR.3-32VDC.48-660VAC.90A SCHNEIDER Entrega: 4 semanas.	S/. 183.60 + IGV	S/. 367.20 + IGV
3.	01	Pza.	PT-100 MARCA EGO		S/. 100.00 + IGV
4.	01	Pza.	Termostato Marca EGO		S/. 80.00 + IGV
5.	02	Pza.	Disipador Heatsink	S/. 40.00 + IGV	S/. 80.00 + IGV
					S/. 1085.12 +IGV

*Únicamente se ha considerado los comprados, no el costo de los existentes que se utilizarán.

Figura B.1 Zelio Control REG48 / Fuente: Schneider Electric

48 x 48 – 1/16 DIN

Schneider
Electric

Zelio Control
Temperature Controller



Inputs		Universal														
Sampling time		200 ms														
Communication on Modbus bus		Yes, except for REG 48PUNL1●HU														
Dust and watertight front panel	IP66 (conforming to NEMA-4X)	Yes														
Functions	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Hysteresis</td></tr> <tr><td>PID</td></tr> <tr><td>Auto-tuning</td></tr> <tr><td>Fuzzy logic</td></tr> <tr><td>Ramps</td></tr> <tr><td>Controlled start-up</td></tr> <tr><td>Operating mode</td></tr> </tbody> </table>	Hysteresis	PID	Auto-tuning	Fuzzy logic	Ramps	Controlled start-up	Operating mode	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Yes</td></tr> <tr><td>Yes</td></tr> <tr><td>Yes</td></tr> <tr><td>Yes</td></tr> <tr><td>16 steps</td></tr> <tr><td>Yes</td></tr> <tr><td>Automatic and manual</td></tr> </tbody> </table>	Yes	Yes	Yes	Yes	16 steps	Yes	Automatic and manual
Hysteresis																
PID																
Auto-tuning																
Fuzzy logic																
Ramps																
Controlled start-up																
Operating mode																
Yes																
Yes																
Yes																
Yes																
16 steps																
Yes																
Automatic and manual																
Alarm outputs		2														
Display	<table border="1"> <tbody> <tr><td>7 segment LED, 4 digits</td></tr> <tr><td>Operating indicators</td></tr> </tbody> </table>	7 segment LED, 4 digits	Operating indicators	<table border="1"> <tbody> <tr><td>2, red and green, configurable</td></tr> <tr><td>5</td></tr> </tbody> </table>	2, red and green, configurable	5										
7 segment LED, 4 digits																
Operating indicators																
2, red and green, configurable																
5																
Process Outputs (number - type)	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1 relay</td></tr> <tr><td>2 relays</td></tr> <tr><td>1 solid state relay</td></tr> <tr><td>1 relay + 1 solid state relay</td></tr> <tr><td>1 current (4-20 mA)</td></tr> <tr><td>1 solid state relay + 1 current (4-20 mA)</td></tr> </tbody> </table>	1 relay	2 relays	1 solid state relay	1 relay + 1 solid state relay	1 current (4-20 mA)	1 solid state relay + 1 current (4-20 mA)	<table border="1"> <tbody> <tr><td>■</td></tr> <tr><td>■</td></tr> <tr><td>■</td></tr> <tr><td>■</td></tr> <tr><td>■</td></tr> <tr><td>■</td></tr> </tbody> </table>	■	■	■	■	■	■		
1 relay																
2 relays																
1 solid state relay																
1 relay + 1 solid state relay																
1 current (4-20 mA)																
1 solid state relay + 1 current (4-20 mA)																
■																
■																
■																
■																
■																
■																
Supply voltage	<table border="1"> <tbody> <tr><td>~ 100 .. 240 V</td></tr> <tr><td>~ 24 V</td></tr> </tbody> </table>	~ 100 .. 240 V	~ 24 V	<table border="1"> <tbody> <tr><td>REG 48PUN●●HU</td></tr> <tr><td>REG 48PUN●●LU</td></tr> </tbody> </table>	REG 48PUN●●HU	REG 48PUN●●LU										
~ 100 .. 240 V																
~ 24 V																
REG 48PUN●●HU																
REG 48PUN●●LU																
Temperature control relay type		REG 48														

Figura B.2 Sistema Trifásico – Esquema Simplificado (Segunda Modificación)

Fuente: Elaboración Propia

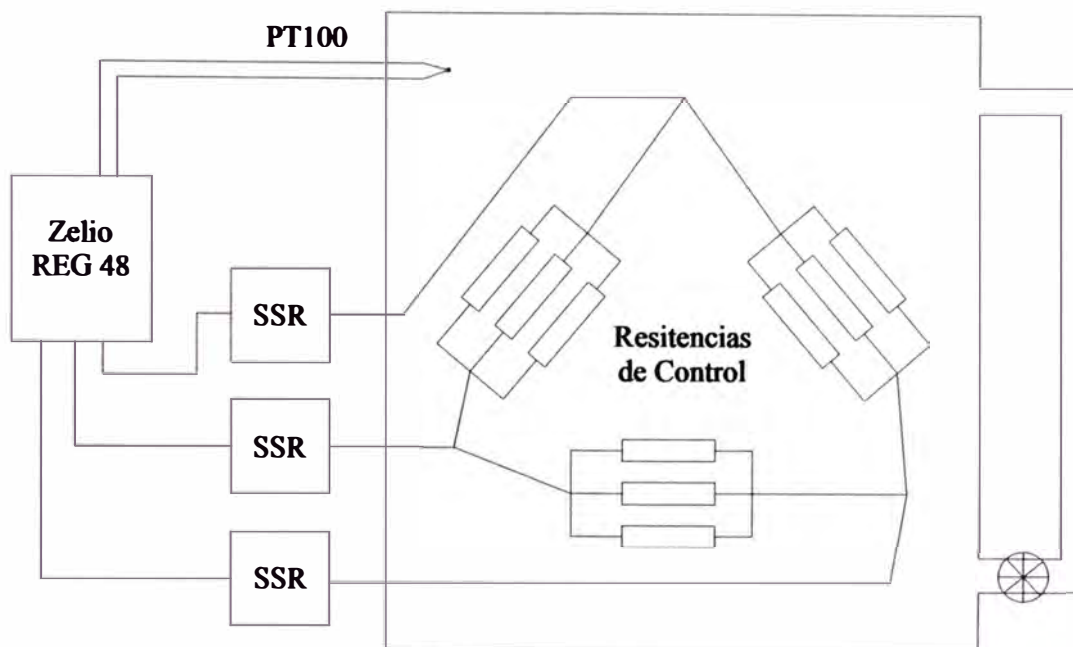


Tabla B.2 Tabla de Costos / Segunda Modificación

Fuente: Elaboración Propia

Pos.	Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1.	01	Pza.	SSR.3-32VDC.48-660VAC.90A SCHNEIDER Entrega: 4 semanas.		S/. 183.60 + IGV
2.	02	Pza.	Resistencia cerámica 1 KW – 220VAC	S/. 200.00 + IGV	S/. 400.00 + IGV
5.	01	Pza.	Disipador Heatsink		S/. 40.00 + IGV
					S/. 623.60 +IGV

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ingeniería de Control Moderna - Tercera edición – Katsuhiko Ogata
- [2] Control Automático de Procesos – Teoría y Práctica – Carlos A. Smith & Armando B. Corripio
- [3] K.J. Aström and T. Hägglund. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, 1995.
- [4] Reglas de sintonía de controladores PID – Departamento de Control, División de Ingeniería Eléctrica UNAM – México D.F.
- [5] <http://www.mathworks.com/discovery/pid-control.html>
- [6] http://teach.no/publications/books/dynamics_and_control/tuning_pid_controller.pdf
- [7] <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [8] www.eo.com.pe
- [9] Manual del Usuario Ver 2.15.10-2010 – Eléctrica Optimización S.A.
- [10] Zelio Control Temperature Controller – User guide 04/2009 Schneider Electric
- [11] Zelio Relay: Solid-State Relay – Training for Technical Support L2 – Schneider Electric
- [12] BKM – Heatsink Zelio Relay – R008 V1.0 Schneider Electric