



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

IMPLEMENTACION DE UNA PRACTICA PARA EL
LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS

TESIS PROFESIONAL.

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTA

MONICA ISABEL GUTIERREZ RIOS

ASESOR: M.C. JESUS NAVARRO CONTRERAS

COASESOR: I.Q. PATRICIA ESCALANTE MARES

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI, S. L. P.

1996



T

TS156

.8

G8

C.1



1080077122



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

**IMPLEMENTACION DE UNA PRACTICA PARA EL
LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTA

(SSIFF)

MONICA ISABEL GUTIERREZ RIOS

ASESOR: M.C. JESUS NAVARRO CONTRERAS
COASESOR: I.Q. PATRICIA ESCALANTE MARES



7
TS 156
. 8
98



AGRADECIMIENTOS

A MIS PAPAS

MA. ISABEL RÍOS DE GUTIÉRREZ

Y

RIGOBERTO GUTIÉRREZ CARBAJO

**GRACIAS A ELLOS YO HE PODIDO LOGRAR LO QUE ME HE PROPUESTO, POR
SU GRAN APOYO Y CARÍÑO.**

A MIS MAESTROS

AGRADEZCO A TODOS LOS MAESTROS QUE HAN INFLUIDO EN MI FORMACIÓN PROFESIONAL Y SOBRE TODO A MIS PROFESORES QUE ME AYUDARON A REALIZAR MI TESIS.

A MIS ASESORES:

M.C. JESUS NAVARRO CONTRERAS Y I.Q. PATRICIA ESCALANTE MARES

Y AL MAESTRO:

ING. GERARDO TORRES CHAVEZ

POR SU GRAN PACIENCIA Y AYUDA.

A GERARDO MIRANDA

QUIEN INICIO ESTA TESIS, DEDICANDO SU TIEMPO EN LA INSTALACIÓN DE GRAN PARTE DEL EQUIPO.

CONTENIDO

	página
RESUMEN	1
CAPITULO I : INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	3
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	6
CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL	18
CAPÍTULO V: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	29
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	29
SINTONIZACIÓN	35
CAPÍTULO VI: RESPUESTA DEL LAZO DE CONTROL	43
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
APÉNDICE A: PRÁCTICA 9	63
APÉNDICE B: PRÁCTICA 10	73
APÉNDICE C: BREVIARIO DE MANEJO DEL CONTROLADOR	82
APÉNDICE D: NOTAS Y GRÁFICAS IMPORTANTES	96
APÉNDICE E: GLOSARIO	105
APÉNDICE F: TABLAS UTILIZADAS	107

RESUMEN

Este trabajo de tesis consistió en el diseño, adquisición, instalación y prueba de un sistema de control automático de temperatura, que se localiza físicamente en el Laboratorio de Control de Procesos, ubicado en el interior del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Un resultado importante es el diseño de dos prácticas de laboratorio que tienen el propósito de enseñar a los estudiantes los fundamentos del diseño y la operación de los lazos retroalimentados de control automático PID (Proporcional + Integral + Derivativo).

El equipo que requirió de más dedicación para su puesta en marcha fue el Controlador Bailey, pues no había antecedentes de la forma de operarlo, ni de la forma de calibrarlo.

Se realizaron corridas experimentales, cambiando variables de proceso y valores de los parámetros del controlador, para sintonizarlo experimentalmente y obtener un mejor control de la temperatura del tanque.

Se tomó en cuenta la seguridad de los alumnos en el manejo de este equipo, instalando protección en las poleas del motor del agitador y aislando todas las tuberías de vapor.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Esta tesis se hizo con la finalidad de complementar las prácticas del laboratorio de Control de Procesos, pues su manual de prácticas abarcaba principalmente modelamiento, identificación de sistemas y control básico de Dos Posiciones (On-Off), pero no contaba con ninguna práctica que estudiara los sistemas de control automático más utilizados en la industria química: el Sistema de Control Retroalimentado (Lazo Cerrado).

Por ello, se implementaron dos practicas para este laboratorio. En estas prácticas el alumno de Noveno Semestre de la Carrera de Ingeniería Química conocerá físicamente y manejará un sistema de control automático que es idéntico a los sistemas utilizados en la Industria Química.

En la práctica industrial, la variable medida y controlada con más frecuencia es la temperatura; porque tiene un efecto muy importante en las propiedades y fenómenos que ocurren en los equipos de proceso. Por esa razón, el lazo de control seleccionado para su implementación es el control automático de la temperatura en un tanque calentador que opera en forma continua (Fig. 1.1). Por razones de economía, el fluido a calentar y regular su temperatura es simplemente agua.

El agua del tanque se calienta indirectamente con vapor de agua que circula a través de un serpentín de cobre colocado en el interior del tanque. Para realizar el control de la temperatura del agua del tanque se manipula el caudal de vapor que entra al serpentín, y para lograr esto se implementó un lazo de control retroalimentado que consta de un sensor de temperatura, un controlador, y el elemento final de control (válvula electroneumática con posicionador). Estos componentes trabajan en conjunto para controlar la temperatura.

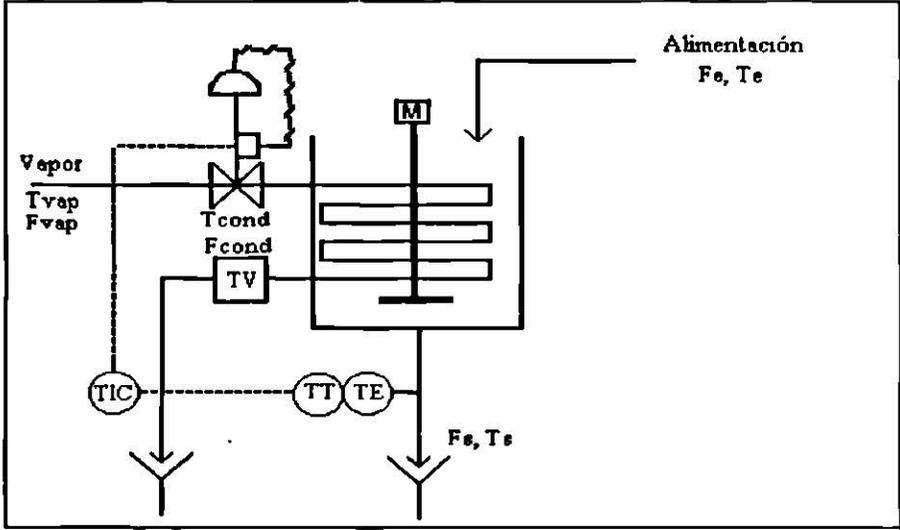


Figura 1.1 Diagrama Esquemático del Sistema Controlado.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La realización de esta tesis, comenzó con la selección del proceso a controlar, que como ya se indicó fue un sistema de control automático de temperatura para un calentador simple. El siguiente paso fue la determinación de los elementos básicos del lazo de control y consecuentemente el diagrama de bloques funcional del sistema de control.

Después se seleccionó la ubicación del equipo en el laboratorio de Ingeniería Química, tomando en cuenta que el espacio fuera suficiente para una buena distribución del equipo y que este se ubicara en el área destinada a Control de Procesos.

Se planeó la distribución del equipo, tomando en cuenta todos los servicios auxiliares para que las conexiones de las tomas de Agua, Vapor, Electricidad y Aire, fueran lo más simple posibles. El diseño de cada uno de los equipos se describe en el Capítulo III.

Instalación y Calibración de los Equipos

El siguiente paso, fue la adquisición y la instalación del equipo, siendo una de las tareas que requirieron mayor tiempo y paciencia, el equipo se fue comprando poco a poco e instalando conforme se iba adquiriendo. Casi todo el equipo fue comprado nuevo, como la bomba, el motor del agitador, rotámetro, manómetro, trampa de vapor etc., a excepción de algunas válvulas, accesorios y tramos de tuberías que estaban disponibles en el laboratorio. El tanque de calentamiento de agua y el agitador se mandaron fabricar exprofeso.

Uno de los puntos importantes para la realización de este trabajo, fue la puesta en marcha de los equipos; en particular, se tuvieron más problemas con los componentes del lazo de control.

El controlador fue el equipo que requirió de mayor dedicación para ponerlo a funcionar correctamente, pues era un equipo nuevo y en esta Facultad no se tenían antecedentes de como manejarlo y programarlo. Así que se consultó el Manual de Uso del Controlador (*Bailey*, 1993), cuando se intentó programarlo, contaba con niveles de seguridad que impedían introducir los programas. Por lo que se tomó la decisión de ir directamente con el distribuidor en la Ciudad de México, y así el especialista en este tipo de controladores resolvió todas las dudas acerca de este equipo y desbloqueó las claves de seguridad.

El controlador estaba configurado para trabajar con un termopar tipo "J", así que se modificó la tarjeta principal para trabajar con un Detector de Temperatura mediante Resistencia (RTD), y al cambiar al RTD, se modificó la señal de entrada análoga. Por lo que se tuvo que recalibrar el controlador para una entrada análoga dada en resistencia. Para realizar esta calibración se consi-

guió una resistencia de precisión de 200 Ohms para realizar una conexión especial según el procedimiento que se describe en el apéndice C.

Ya que el controlador estuvo calibrado, se programó para configurarlo a las características del sistema a trabajar.

También se verificó la calibración del RTD. Para ello, se consiguieron tablas de calibración para sensores de temperatura (Apéndice F), que incluyen algunos tipos comerciales de termopares y termómetros de resistencia (RTD). El sensor es un RTD de platino de 100 Ohms; la tabla muestra las temperaturas con décimas de grado y la resistencia correspondiente.

Para la calibración se consiguió un multímetro, una parrilla y un termopar sumergible, marca Omega del tipo J, conectado a un registrador Barnat 100 modelo 600-2820 con resolución de 0.1°C . Para mantener una temperatura constante, se puso a hervir agua en un vaso de precipitados, ya que estuvo hirviendo se sumergió el RTD en el agua y con el multímetro se midió la resistencia en el extremo del RTD, el valor de la resistencia se comparó en la tabla y correspondió a una temperatura 5°C abajo de la temperatura que marcó el termopar.

Se realizó el mismo procedimiento, utilizando agua con hielo, y la temperatura que correspondió a la resistencia medida fue de 5°C arriba de la temperatura que marcó el termopar.

El procedimiento se repitió para diferentes temperaturas, obteniéndose buenos resultados, coincidiendo la temperatura del termopar con la temperatura reportada en tablas para la resistencia medida, lo que nos indicó que el RTD instalado da lecturas confiables entre 90 y 5°C , quedando dentro de este rango las temperaturas reportadas en las corridas experimentales.

No se tuvo ningún problema para poner a funcionar la válvula neumática, pues esta ya venía calibrada de fábrica, se comprobó el buen funcionamiento de la válvula comparando la señal de salida del controlador, dada en porciento de apertura de la válvula y comprobándose con la escala de apertura que tiene el accionador de la válvula.

Análisis del Sistema de Control

Se determinó el modelo matemático de cada uno de los componentes del sistema, para posteriormente integrarlos en un modelo matemático global del mismo. La parte crucial de este análisis es la determinación de la dinámica de la planta (tanque Calentador). Todos los modelos individuales se escribieron en la forma de funciones de transferencia, para lo cual, las ecuaciones algebraicas o diferenciales correspondientes se sometieron previamente a la Transformación de Laplace. De la ecuación global se identificó la Función Característica del sistema de control. Este punto se describe ampliamente en el Capítulo IV.

Validación del Modelo Matemático

Ya que se probaron todos los equipos y que no se tuvo ningún problema para operar, se comenzaron a realizar pruebas con el equipo para determinar las condiciones normales de operación, como: el caudal de agua de entrada al tanque, la temperatura máxima que se puede alcanzar, como mantener el nivel constante en el tanque, tiempo en que se alcanza el estado estacionario a diferentes condiciones, etc.

Las pruebas mencionadas consistieron en realizar corridas experimentales de calentamiento y enfriamiento a diferentes caudales y presiones.

Para la caracterización del sistema se trabajó sin control automático, cerrando la válvula neumática, y abriendo al máximo la válvula manual que se encuentra en el bypass. Este procedimiento fue la base para el diseño de la Práctica No. 9 (Apéndice A).

Ya que se caracterizó el sistema se comenzó a trabajar con el control automático, realizando pruebas a diferentes *Set Points* (temperaturas deseadas), caudales y valores de los parámetros del controlador.

Se graficaron los resultados obtenidos de las corridas experimentales y se calcularon los parámetros como la constante de tiempo y la ganancia.

Sintonización del Controlador

La sintonización experimental aproximada del sistema de control se logró haciendo corridas cambiando la ganancia a diferentes valores y observando el comportamiento del sistema de control al introducir una perturbación en el sistema. Los valores de los parámetros sintonizados, son los valores con los cuales se observó una mejor respuesta del sistema de control, bajo los criterios de obtener un menor tiempo para alcanzar el punto de control y una respuesta más rápida en estabilizarse al introducirse una perturbación.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo utilizado en éste trabajo está instalado en el laboratorio de Ingeniería Química en el área de Control de Procesos. Este equipo fue diseñado, con el propósito de que se asemejara lo más posible a un equipo industrial y así hacer más atractivo para el estudiante trabajar con este equipo.

La figura 3.1 muestra los equipos utilizados en la práctica, donde se distinguen dos secciones: la planta y los componentes auxiliares del lazo de control.

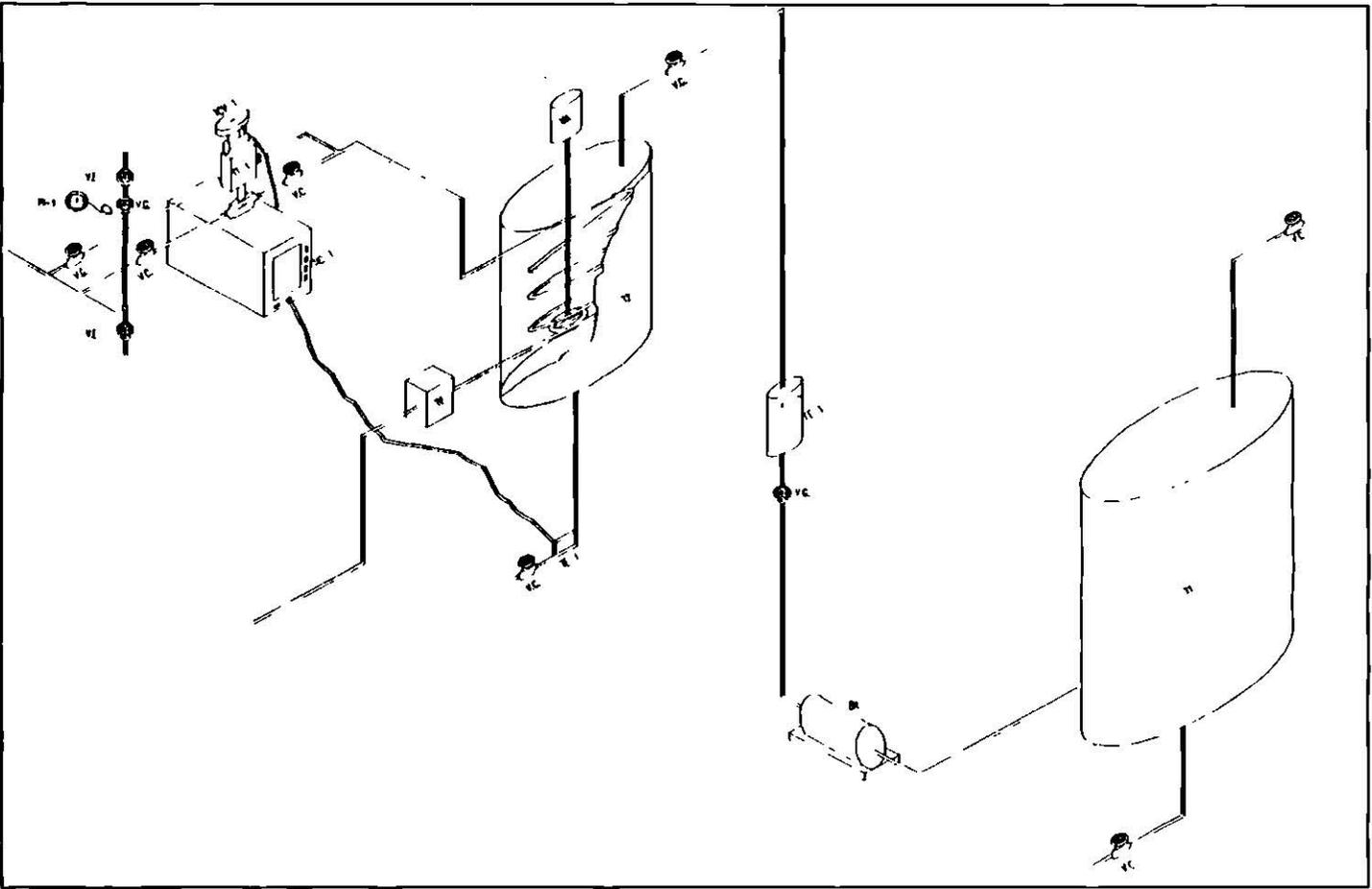


Figura 3.1 Isométrico del equipo instalado.

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El equipo instalado consta de un Tanque Alimentador (T1), que recibe el agua de la línea general de distribución del Laboratorio de Ingeniería Química. De ese tanque se bombea agua al Tanque Calentador (T2). El caudal de agua se controla por medio de un rotámetro (FE-1).

El agua del tanque T2 se calienta con vapor en forma indirecta, por medio de un serpentín de cobre. A la salida de la línea de vapor se colocó una trampa de vapor (TV) y el vapor condensado se manda a la línea del drenaje.

El equipo que integra la planta es el siguiente:

Tanque alimentador (T1)

Tanque de calentamiento de agua con serpentín de cobre (T2)

Agitador

Motor de 0.25 Hp para el agitador (MA)

Bomba de alimentación de 0.5 Hp (BA)

Trampa de vapor (TV)

Rotámetro (FE-1)

Manómetro (PI-1)

Válvulas de Globo (VG)

Válvulas Esfera (VE)

Válvulas de Compuerta (VC)

El material de la tubería que se instaló es de acero al carbón de $\frac{3}{4}$ in. cédula 80 en todo el sistema, excepto en el tramo donde se encuentra la válvula neumática, ahí se usó tubería de $\frac{1}{2}$ in. cédula 80. Las válvulas se instalaron según las necesidades de la instalación.

Tanque Alimentador T1

Este tanque recibe el agua de la línea general. Se eligió de lámina negra con una capacidad de 200 lt. para proporcionar un caudal constante al tanque T2, y así el sistema de bombeo no operará en vacío.

A este tanque se le instaló un flotador doméstico para evitar que el tanque se derrame y mantener aproximadamente constante su nivel.

Tanque de Calentamiento de Agua T2

Este tanque se seleccionó de acero inoxidable, para tener un material resistente al calor y a la corrosión, con un volumen de 115 litros. Este volumen se calculó estimativamente para dar una duración de 45 min. al proceso térmico transitorio.

El serpentín que pasa por el interior del tanque se eligió de cobre por ser un material de buena resistencia a la corrosión y conductividad térmica superior, instalándose 15 metros de tubo de cobre de 3/8 in, con un área de transferencia de calor 0.5985 m². El serpentín se distribuyó uniformemente sobre la altura del tanque en forma espiral y sostenido con una solera de aluminio.

Agitador

Para mantener una temperatura uniforme en todo el tanque de calentamiento, se tuvo la necesidad de instalar un agitador.

El agitador que se colocó es de tipo disco con 4 palas y con un diámetro de 1/3 del diámetro del tanque. Se calculó el consumo de potencia para una agitación vigorosa, usando la tabla 4-16 del libro Procesos de Ingeniería Química (*Ulrich, 1992*):

$$P(\text{kW}) = 0.6(V)^{0.8} \quad (3.1)$$

donde V = Volumen del recipiente (m³)

dando

$$P = 0.1063 \text{ kW} = 0.1426 \text{ Hp}$$

El motor comercial que más se acercaba a los resultados de los cálculos es un motor de 1/6 Hp. Se trató de conseguir un motor de esta potencia, pero el costo se elevaba mucho y era difícil de conseguir, por lo que se optó por comprar un motor monofásico de 0.25 Hp marca Siemens.

Inicialmente, se colocó el motor directamente con la flecha del agitador, como este motor esta sobrado provocó un vórtice muy grande que hacía que el agua se derramará del tanque. Entonces se realizaron los cálculos para instalar dos poleas para bajar las revoluciones del motor y se seleccionaron e instalaron dos poleas de 3 y 10 centímetros de diámetro, obteniéndose la agitación deseada.

Se observó que al trabajar con el agitador la banda de las poleas estaba descubierta y trabajar en estas condiciones resultaba muy peligroso para los estudiantes, por lo que se instaló una guarda para las poleas.

Bomba de Alimentación

Este equipo bombea el agua del tanque alimentador al tanque de calentamiento proporcionando un caudal abundante, el cual es regulado con una válvula y medido por medio de un rotámetro.

Para efectuar el cálculo de la bomba, nos basamos en la figura 3.2, en la cual se indican las distancias y alturas necesarias.

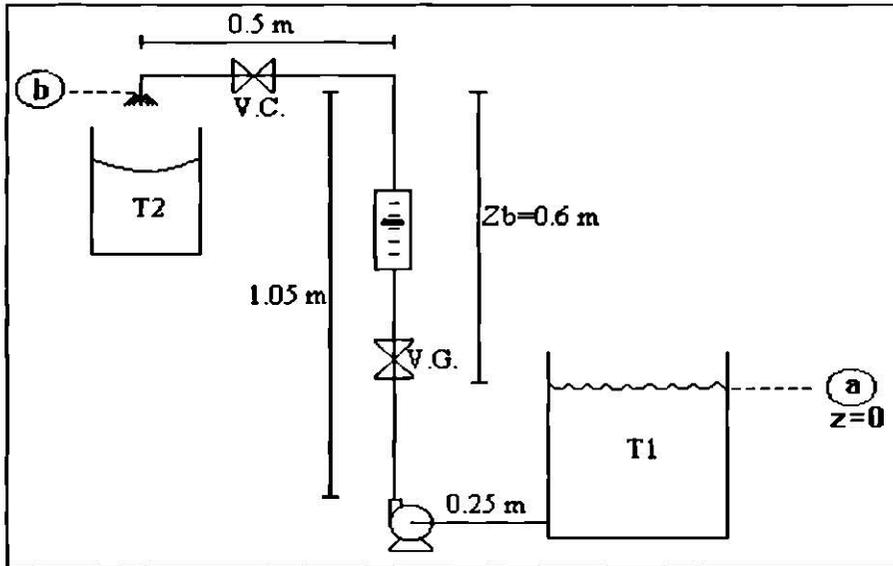


Figura 3.2 Distancias necesarias para el calculo de la bomba.

Para el cálculo de la bomba se empleo el caudal máximo que puede medir el rotámetro que es de 10 gal/min.(0.6309 lt/s).

Realizando un Balance de Energía entre el punto a y b.

$$(H_e + Ec_e + Ep_e)\delta M_e - (H_s + Ec_s + Ep_s)\delta M_s + \delta Q - \delta W = d(U + Ec + Ep)Msist \quad (3.2)$$

Para un sistema en régimen permanente, el termino de acumulación es cero.

$$(H_e + Ec_e + Ep_e)\delta M_e - (H_s + Ec_s + Ep_s)\delta M_s + \delta Q - \delta W = 0 \quad (3.3)$$

$$(H_e + Ec_e + Ep_e) - (H_s + Ec_s + Ep_s) + Q - W = 0 \quad (3.4)$$

$$-(\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep) + Q - W = 0 \quad (3.5)$$

donde:

- H = Entalpía.
- Ec = Energía Cinética.
- Ep = Energía Potencial.
- U = Energía Interna
- Q = Calor

La Entalpía se define como:

$$H = U + PV \quad (3.6)$$

Se deriva la ecuación de la Entalpía y se sustituye en la ecuación 3.5

$$-(\Delta U + V\Delta P + \Delta E_c + \Delta E_p) + Q - W = 0 \quad (3.7)$$

se saca del paréntesis ΔU y multiplicamos la ecuación por -1

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho} + \Delta E_c + \Delta E_p \right) + \Delta U - Q = W \quad (3.7)$$

Se definen las pérdidas por fricción, h_f , como

$$h_f = \Delta U - Q \quad (3.8)$$

Se sustituye h_f en la ecuación 3.7 y ΔP , ΔE_c y ΔE_p por su equivalente

$$\frac{P_b}{\rho} + E_{c_b} + E_{p_b} + h_f = \frac{P_a}{\rho} + E_{c_a} + E_{p_a} - W \quad (3.9)$$

El trabajo es intrínsecamente negativo, porque el trabajo es realizado sobre el sistema.

Se sustituyen las ecuaciones de la energía cinética y potencial y se obtiene la ecuación de Balance Mecánico.

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{gc} Z_a + \frac{\alpha_a \bar{V}_a^2}{2gc} + W = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{gc} Z_b + \frac{\alpha_b \bar{V}_b^2}{2gc} + h_f \quad (3.10)$$

donde:

P_a = Presión atmosférica de San Luis Potosí = 614 mmHg = 0.8345 Kgf/cm².

P_b = Presión a la descarga = 2.5 Kgf/cm².

Z_a = Altura del punto a = 0 m.

Z_b = Altura del punto b = 0.6 m.

\bar{V}_a = Velocidad media = 0 m.

$\rho @ 20^\circ\text{C}$ = 998.2 kg/m³.

α = Factor de corrección de energía cinética ($\alpha=1$ para flujo turbulento).

h_f = Pérdidas por fricción.

W = Trabajo que el realizado sobre el sistema.

g = Fuerza de gravedad (9.8 m / s²).

gc = Factor de proporcionalidad de la ley de Newton (Kg m / Kgf s²).

Se calcula \bar{V}_b

$$\bar{V}_b = \frac{q}{S_b} = \frac{6.309E - 04 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4}(0.01885m)^2} = 2.261 \frac{m}{s} \quad (3.11)$$

donde:

q = Flujo volumétrico (m^3/s)

S_b = Área del tubo (m^2).

Db = Diámetro de la tubería = 0.01885 m.

Cálculo de hf , por el método de Longitud Equivalente

$$hf_{total} = hf_{succión} + hf_{descarga} \quad (3.12)$$

La formula para calcular hf de succión y descarga es la misma. Y como el diámetro de la tubería es el mismo en todo el sistema, las velocidades de succión y descarga son iguales

$$hf(succión) = \frac{4fL_{eq(succ)} \bar{V}_{succ}^2}{D_{succ} 2gc} \quad (3.13)$$

donde:

D_{succ} (Diámetro succión) = D_{desc} (Diámetro descarga) = 0.01885 m.

V_{succ} (Velocidad de succión) = V_{desc} (Velocidad de descarga) = 2.261 m/s

$L_{eq(succ)}$ = Longitud equivalente.

f = Factor de fricción.

Cálculo de L_{eq} de succión, $L_{eq(succ)}$

$$L_{eq} = L \text{ (tramo recto)} + L \text{ (accesorios)} \quad (3.14)$$

En esta sección no hay accesorios, solo tramo recto de 0.25 m

$$L_{eq(succ)} = 0.25 \text{ m}$$

Para calcular el Factor de fricción de succión, necesitamos el Número de Reynolds y el valor de K/D_{succ} , la constante K , depende del tipo de material de la tubería (Apéndice D, gráfica No. 8).

K (acero) = 0.00045 m.

$NRe = 42163$

$$\frac{K}{D_{\text{succ}}} = \frac{0.00045}{0.01885\text{m}} = 0.002427 \approx 0.002$$

Con el Número de Reynolds y el valor de K/D_{succ} se busca en la gráfica de factor de fricción el valor de f (Apéndice D, gráfica 8).

$$f = 0.007$$

Se sustituyen los datos en la ecuación 3.13.

$$hf(\text{succión}) = \frac{4(0.007)(0.25\text{m})\left(2.261 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(0.01885\text{m})(2)\left(9.8 \frac{\text{Kg}}{\text{Kgfs}^2} \text{m}\right)}$$

$$hf(\text{succión}) = 0.09686 \frac{\text{Kgf}}{\text{Kg}} \text{m}$$

Para el cálculo de $hf(\text{descarga})$, solo falta calcular Longitud equivalente de descarga, pues todas las variables restantes son las mismas que en el cálculo de $hf(\text{succión})$.

Cálculo de Leq de descarga, $Leq_{(\text{desc})}$

$$L (\text{tramo recto}) = 1.55 \text{ m}$$

$$Leq (\text{accesorios}) = 2 \text{ Codos de } 90^\circ + 1 \text{ Válvula de Compuerta} + 1 \text{ Válvula Globo} + 1 \text{ Rotámetro}$$

El valor de Leq de cada accesorio se obtiene del Apéndice F, tabla No. 9,

$$Leq (2 \text{ Codos de } 90^\circ) = 2(0.427 \text{ m}) = 0.854 \text{ m}$$

$$Leq (\text{Válvula de Compuerta}) = 0.165 \text{ m}$$

$$Leq (\text{Válvula Globo}) = 4.938 \text{ m}$$

$$Leq (\text{Rotámetro}) = 1.128 \text{ m}$$

$$Leq (\text{accesorios}) = 7.085 \text{ m}$$

entonces $Leq_{(\text{desc})}$ es:

$$Leq_{(\text{desc})} = 7.085 + 1.55 \text{ m} = 8.635 \text{ m}$$

Se sustituyen los valores en la ecuación 3.13 para la descarga

$$hf(\text{descarga}) = \frac{4(0.007)(8.635\text{m})\left(2.261 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(0.01885\text{m})(2)\left(9.8 \frac{\text{Kg}}{\text{Kgfs}^2} \text{m}\right)}$$

$$hf(\text{descarga}) = 0.09686 \frac{\text{Kgf}}{\text{Kg}} \text{m} + 3.3454 \frac{\text{Kgf}}{\text{Kg}} \text{m}$$

$$hf \text{ total} = 3.4423 \text{ kgf m /kg}$$

Se sustituyen los valores en la ecuación de Bernoulli, dando

$$W = 20.9881 \text{ kgf m/kg}$$

El rendimiento de la bomba se define como:

$$\text{Rendimiento} = \frac{W_{\text{rev}}}{W_{\text{real}}} \times 100 \quad (3.15)$$

Siendo W_{rev} el trabajo producido o consumido si el proceso opera en forma reversible, y W_{real} es el trabajo real o efectivo (*Balzhiser, 1979*).

Si el rendimiento de la bomba es del 60 %, entonces el trabajo real suministrado debe ser

$$W = \frac{20.9881 \frac{\text{kgf}}{\text{kg}} \text{m}}{0.6} = 34.9801 \frac{\text{kgf}}{\text{kg}} \text{m}$$

Cálculo de la Potencia hidráulica

$$\text{Potencia hidráulica} = \frac{\dot{m}W}{76 \frac{\text{kgf}}{\text{sHp}} \text{m}} \quad (5.16)$$

donde \dot{m} es el gasto másico

$$\dot{m} = q\rho = 6.309\text{E} - 04 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left(998.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad (5.17)$$

$$\dot{m} = 0.6297 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Sustituyendo

$$\text{Potencia hidráulica} = \frac{\left(0.6297 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(34.9801 \frac{\text{kgf m}}{\text{kg}}\right)}{76 \frac{\text{kgf m}}{\text{sHp}}}$$

$$\text{Potencia hidráulica} = 0.2898 \text{ Hp} \approx 0.5 \text{ Hp}$$

Se instaló una bomba con un motor eléctrico de C.A. Monofásico de 1/2 Hp, la bomba proporciona un buen servicio, aunque esta sobrada para este sistema.

DESCRIPCIÓN DEL LAZO DE CONTROL

El sistema instalado para controlar la temperatura del tanque, se basa en la manipulación del caudal de vapor que entra al serpentín.

Este sistema consta de un sensor de temperatura RTD, colocado en la línea de descarga de agua del tanque T2, este sensor manda una señal eléctrica al controlador, el cual la compara con la correspondiente a la temperatura deseada, y posteriormente envía una señal de manipulación a la válvula electroneumática para que abra o cierre. El posicionador verifica que la apertura de la válvula sea la correspondiente a la manipulación, corrigiendo efectos de histéresis o no linealidades debidos al manejo de vapor.

Los componentes del lazo de control son:

Detector de Temperatura por Resistencia ó RTD (TT-1)

Controlador PID (TIC-1)

Posicionador (TY-1)

Válvula Electroneumática (TV-1)

RTD

El sensor de temperatura instalado es de platino con resistencia de 100 Ohms a 0°C, este transmisor de temperatura se basa en el principio de que la resistencia eléctrica de los metales puros se incrementa con la temperatura.

La resistencia eléctrica se puede medir con bastante precisión, por lo que la temperatura se mide con mucha exactitud. Es un sensor de respuesta rápida. La señal que manda al controlador está dada en Ohms.

Controlador

El controlador usado en el sistema, es un modelo industrial estándar marca Bailey, tipo CPC01, es un instrumento multifunciones, controla variables de proceso como flujo, nivel, temperatura ó presión.

El controlador es el "cerebro" del circuito de control, y es el dispositivo que toma las decisiones en el sistema de control. Para ello, el controlador compara la señal del proceso que llega del transmisor (la variable controlada), contra el punto de control y envía la señal apropiada al elemento final de control, para mantener la variable que se controla en el punto de consigna (Set Point). El controlador manda una señal eléctrica al posicionador de la válvula de 4-20 mA.

El controlador fue programado para trabajar como PID (Proporcional, Integral y Derivativo), se seleccionó esta opción, porque este tipo de control se utiliza en procesos donde las constantes de tiempo son grandes (capacitancia grande), como el control de temperatura y concentración.

Este tipo de control combina las acciones proporcional, integral y derivativa en una sola unidad, el elemento proporcional contribuye a que la ganancias sean mayores, por lo que generan respuestas transitorias más rápidas. El elemento integral, elimina la desviación de estado estacionario, por lo que es un elemento de reajuste y el elemento derivativo tiene como propósito anticipar hacia donde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio de error, proporcionando un efecto de anticipación.

Posicionador

El posicionador de la válvula neumática es de tipo electroneumático, marca Fisher, tipo 3583. Recibe una señal eléctrica de 4 a 20 mA y emite una señal neumática a la válvula de 3 a 15 psi.

El posicionador tiene el propósito de comparar la señal del controlador con la posición del vástago de la válvula. Si el vástago no está en la posición que indica el controlador, el posicionador añade o elimina aire de la válvula hasta que se logra la posición correcta, se usa un posicionador cuando es necesario posicionar el vástago de la válvula con precisión. El posicionador y la válvula neumática vienen acoplados de fábrica.

Válvula Neumática

La válvula instalada es una válvula de globo de ½ in. de acero al carbón y 150 lb. marca Fisher, con actuador tipo 667 de diafragma y resorte. Para la selección y adquisición de esta válvula, se le especificaron al vendedor la presión del vapor y el flujo máximo que debía pasar por la válvula.

El actuador de la válvula consiste en un diafragma flexible que se coloca entre dos compartimientos; una de las cámaras resultantes de este arreglo debe ser hermética. A la fuerza que se genera con el actuador se opone un resorte de "rango". La señal neumática que viene del posicionador entra a la cámara hermética y con el incremento o decremento de presión se produce una fuerza que se utiliza para vencer la fuerza del resorte de rango del actuador y las del interior del cuerpo de la válvula. La función del actuador de la válvula de control es convertir la señal neumática en movimiento mecánico para abrir o cerrar la válvula.

La acción de la válvula es FC, cerrada en falla o aire para abrir, esto nos indica que cuando no hay señal de aire la válvula permanece cerrada.

SERVICIOS AUXILIARES

La mayoría del equipo instalado fue nuevo, y no se tuvo problemas para hacer las conexiones de todos los servicios que la instalación requería.

Línea de Agua

Se seleccionó trabajar con agua, por lo económico, fácil obtención y por el sistema de recirculación del agua que existe en el laboratorio, pues al efectuar las prácticas se utiliza gran cantidad de agua.

Línea de Aire

El aire es necesario para accionar la válvula neumática, la línea de aire se conecta al posicionador. Tampoco hubo problemas para la instalación de esta línea de aire pues el laboratorio cuenta con un compresor que proporciona aire a todo el laboratorio con una presión aproximada de 3 Kg/cm².

Línea de Vapor

Se seleccionó vapor como medio de calentamiento, por la facilidad de obtenerse en el laboratorio, pues el laboratorio cuenta con una caldera que proporciona vapor con una presión máxima de 3 Kg/cm².

Electricidad

Al igual que los otros servicios, la conexión del sistema eléctrico no tuvo ningún problema. Requiriéndose para el motor de la bomba, el motor del agitador y el controlador. La instalación eléctrica del laboratorio es de 125 volts C.A.

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL

En el diagrama de bloques funcional (fig. 4.1), se observan los distintos componentes del lazo de control: Elementos de Entrada, Controlador-Comparador, Elemento Final de Control, Planta y Sensor-Transmisor.

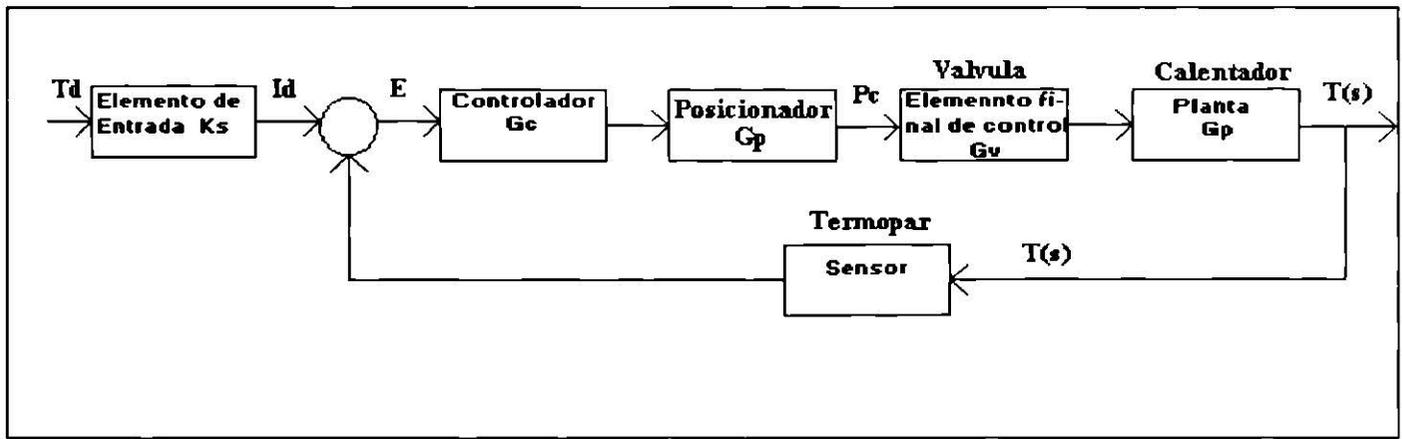


Figura 4.1 Diagrama de Bloques Funcional del Sistema de Control.

Para obtener el modelo del sistema de control se analiza cada componente individual y después se combinan en una ecuación global. El elemento más importante es la dinámica del proceso a controlar que se realiza en el Tanque Calentador, y posteriormente, se estudian los componentes auxiliares del lazo de control.

MODELO DEL TANQUE CALENTADOR

El modelo matemático requiere hacer un balance de masa global alrededor del tanque (Fig. 4.2), bajo las condiciones de operación continua y agitación vigorosa. La última condición determina un sistema de parámetros concentrados porque la temperatura y la densidad del fluido serán uniformes en todo el interior del tanque, es un sistema dinámico, pues las variables del sistema cambian con respecto al tiempo. La nomenclatura utilizada se encuentra en la página 71, del apéndice A.

Balance de Masa Global

Entrada - Salida + Generación = Acumulación

donde:

$$\text{Entrada} = F_e \rho_e$$

$$\text{Salida} = F_s \rho_s$$

Generación = 0 (No hay generación)

$$\text{Acumulación} = \frac{d}{d\theta} (V\rho)$$

Sustituyendo estos términos en el balance global:

$$F_e \rho_e - F_s \rho_s = \frac{d}{d\theta} (V\rho) \quad (4.1)$$

Suponiendo $\rho_e \approx \rho_s$, permite sacar la densidad de la diferencial, de modo que,

$$F_e \rho - F_s \rho_s = \rho \frac{dV}{d\theta} \quad (4.2)$$

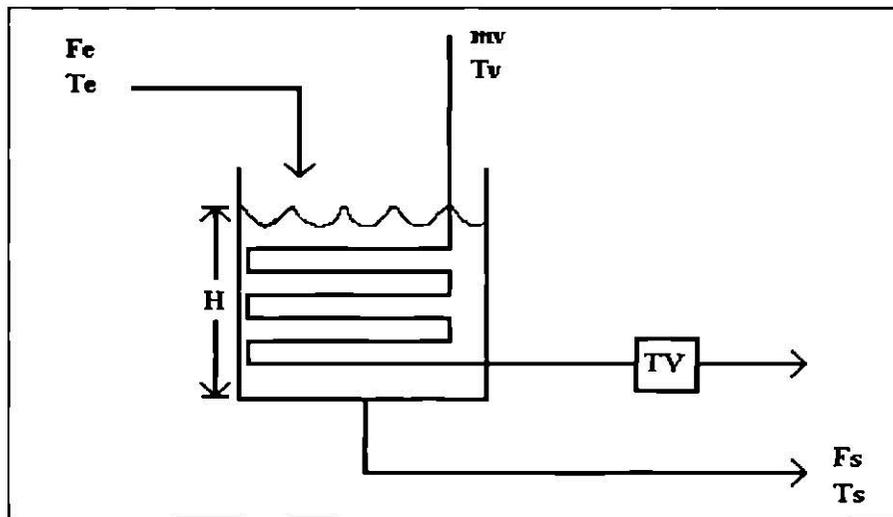


Figura 4.2 Diagrama de la Planta.

dividiendo y cancelando la densidad obtenemos

$$F_e - F_s = \frac{d\dot{V}}{d\theta} \quad (4.3)$$

como $V = HA$ para un tanque de área seccional constante, se tiene que

$$F_e - F_s = A \frac{dH}{d\theta} \quad (4.4)$$

Para las condiciones de Estado Estacionario, el término de acumulación es cero y la ecuación anterior queda

$$F_e^* - F_s^* = 0 \quad (4.5)$$

de donde se obtiene la igualdad de caudales en Estado Estacionario ó régimen permanente.

$$F_e^* = F_s^*$$

restando 4.5 de 4.4 término a término

$$(F_e - F_e^*) - (F_s - F_s^*) = A \frac{dH}{d\theta} \quad (4.6)$$

definiendo las variables de desviación correspondientes

$$f_e = F_e - F_e^* \quad (4.7a)$$

$$f_s = F_s - F_s^* \quad (4.7b)$$

$$dh = dH \quad (4.7c)$$

Sustituyendo en la ecuación 4.6

$$f_e - f_s = A \frac{dh}{d\theta} \quad (4.8)$$

Por otra parte, se sabe que el gasto a la descarga depende de la carga hidrostática en el fondo del tanque, y es función del nivel en el mismo. La ecuación 4.9, se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli y la ecuación de velocidad para flujo de fluidos.

$$F_s = k_1 \sqrt{H} \quad (4.9)$$

Linealizando esta ecuación

$$f_s = C_1 h \quad (4.10)$$

donde C_1 es la constante de linealización, definida como

$$C_1 = \left. \frac{\partial F_s}{\partial H} \right|_{c.o.} = \frac{K_1}{2\sqrt{H^*}}$$

las condiciones de operación son las del Estado Estacionario. La sustitución en 4.8 da

$$f_e - C_1 h = A \frac{dh}{d\theta} \quad (4.11)$$

dándole vuelta y despejando el área del tanque, A , se obtiene el modelo buscado

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{1}{A} f_e - \frac{C_1}{A} h \quad (4.12)$$

con

$$h(0) = 0$$

por la selección de las condiciones iniciales en Estado Estacionario, expresadas como variables de desviación.

Balance de Energía

Se efectuó el Balance de Energía para el líquido del tanque.

Balance Global de Energía

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} = \text{Acumulación}$$

$$\dot{m}_e (H_e + E_{c_e} + E_{p_e}) - \dot{m}_s (H_s + E_{c_s} + E_{p_s}) + Q - W = \frac{d}{d\theta} ((U + E_c + E_p)m)_{\text{sist}} \quad (4.13)$$

Suposiciones:

- Sistema dinámico.
- Sistema de parámetros concentrados.
- La energía cinética y potencial son despreciables.
- No hay trabajo de eje, pues se toma como sistema el agua del tanque, se desprecia el trabajo que proporciona el agitador al sistema.
- El calor que pudiera proporcionar el agitador al sistema es despreciable, comparado con el calor que proporciona el serpentín.

Se sustituye en el balance global los términos siguientes:

$$\text{Entrada} = F_c \rho_c C_{p_c} T_c$$

$$\text{Salida} = F_s \rho_s C_{p_s} T_s$$

$$\text{Generación} = Q$$

$$\text{Acumulación} = \frac{d}{d\theta} (V \rho C_p T)$$

$$F_c \rho_c C_{p_c} T_c - F_s \rho_s C_{p_s} T_s + Q = \frac{d}{d\theta} (V \rho C_p T) \quad (4.14)$$

El calor que proporciona el vapor por su condensación se puede expresar como

$$Q = M v \lambda \quad (4.15)$$

Sustituyendo el valor de Q en la ecuación 4.13, se obtiene

$$F_c \rho_c C_{p_c} T_c - F_s \rho_s C_{p_s} T_s + M v \lambda = \rho C_p \frac{d}{d\theta} (V T) \quad (4.16)$$

como $V = HA$ para un tanque de área seccional constante

$$F_c \rho_c C_{p_c} T_c - F_s \rho_s C_{p_s} T_s + M v \lambda = \rho C_p A \frac{d}{d\theta} (HT) \quad (4.17)$$

sustituyendo la derivada del producto HT se obtiene

$$F_c \rho_c C_{p_c} T_c - F_s \rho_s C_{p_s} T_s + M v \lambda = \rho C_p A T \frac{dH}{d\theta} + \rho C_p A H \frac{dT}{d\theta} \quad (4.18)$$

sustituyendo $\frac{dH}{d\theta}$ del balance de masa de la ecuación 4.4

$$F_c \rho_c C_{p_c} T_c - F_s \rho_s C_{p_s} T_s + M v \lambda = \rho C_p A T \left(\frac{F_c - F_s}{A} \right) + \rho C_p A H \frac{dT}{d\theta} \quad (4.19)$$

Despejando $\frac{dT}{d\theta}$

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{F_c \rho_c C_{p_c} T_c - F_s \rho_s C_{p_s} T_s + M v \lambda - F_c \rho C_p T + F_s \rho C_p T}{\rho C_p A H} \quad (4.20)$$

y arreglando

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{F_e \rho_e C_{p_e} T_e}{\rho C_p A H} - \frac{F_e \rho C_p T}{\rho C_p A H} + \frac{M v \lambda}{\rho C_p A H} \quad (4.21)$$

eliminando ρ y C_p , dado que $\rho_e \approx \rho_s$; $C_{p_e} \approx C_{p_s}$, por ser un liquido incompresible.

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{F_e T_e}{A H} - \frac{F_e T}{A H} + \frac{M v \lambda}{\rho C_p A H} = \Phi_2 (F_e, T_e, T, M v, H) \quad (4.22)$$

Si se linealiza y se sustituyen las variables de desviación definidas enseguida:

$$\frac{dT}{d\theta} = C_2 f_e + C_3 t_e + C_4 t + C_5 m v + C_6 h \quad (4.23)$$

donde:

$$m v = M v - M v^* \quad (4.24a)$$

$$f_e = F_e - F_e^* \quad (4.24b)$$

$$t_e = T_e - T_e^* \quad (4.24c)$$

$$t = T - T^* \quad (4.24d)$$

$$dt = dT$$

Y las constantes se definen como:

$$C_2 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial F_e} \right|_{c_o} \quad (4.25a)$$

$$C_3 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T_e} \right|_c \quad (4.25b)$$

$$C_4 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T} \right|_{c_o} \quad (4.25c)$$

$$C_5 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial M v} \right|_{c_o} \quad (4.25d)$$

$$C_6 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial H} \right|_{c_o} \quad (4.25e)$$

Linealizando la ecuación del balance de masa y resolviendo las dos ecuaciones linealizadas por sustitución.

$$\frac{dh}{d\theta} = a_{12}h + a_{13}f_c \quad (4.26)$$

$$\frac{dt}{d\theta} = a_{21}t + a_{22}h + a_{23}f_c + a_{24}t_c + a_{25}mv \quad (4.27)$$

Donde los coeficientes a_{ij} preparan una estructura matricial

$$a_{21} = C_4 \quad (4.28a)$$

$$a_{22} = C_6 \quad (4.28b)$$

$$a_{12} = -\frac{C_1}{A} \quad (4.28c)$$

$$a_{13} = \frac{1}{A} \quad (4.28d)$$

Transformando las ecuaciones 4.26 y 4.27

$$sH(s) = a_{12}H(s) + a_{13}F_c(s) \quad (4.29)$$

$$sT(s) = a_{21}T(s) + a_{22}H(s) + a_{23}F_c(s) + a_{24}T_c(s) + a_{25}Mv(s) \quad (4.30)$$

despejando $H(s)$ del balance de masa

$$H(s) = \frac{a_{13}F_c(s)}{s - a_{12}} \quad (4.31)$$

sustituyendo en la ecuación transformada del balance de energía

$$sT(s) = a_{21}T(s) + a_{22}\left(\frac{a_{13}F_c(s)}{s - a_{12}}\right) + a_{23}F_c(s) + a_{24}T_c(s) + a_{25}Mv(s) \quad (4.32)$$

y factorizando

$$T(s)(s - a_{21}) = a_{22}\left(\frac{a_{13}F_c(s)}{s - a_{12}}\right) + a_{23}F_c(s) + a_{24}T_c(s) + a_{25}Mv(s) \quad (4.33)$$

despejando T(s)

$$T(s) = \frac{a_{22}a_{13}F_e(s)}{(s-a_{21})(s-a_{12})} + \frac{a_{23}F_e(s)}{(s-a_{21})} + \frac{a_{24}T_e(s)}{(s-a_{21})} + \frac{a_{25}Mv(s)}{(s-a_{21})} \quad (4.34)$$

$$T(s) = \frac{a_{22}a_{13}F_e(s)}{(s-a_{21})(s-a_{12})} + \frac{a_{23}F_e(s)(s-a_{12})}{(s-a_{21})(s-a_{12})} + \frac{a_{24}T_e(s)}{(s-a_{21})} + \frac{a_{25}Mv(s)}{(s-a_{21})} \quad (4.35)$$

$$T(s) = \frac{[a_{22}a_{13} + a_{23}(s-a_{12})]F_e(s)}{(s-a_{21})(s-a_{12})} + \frac{a_{24}T_e(s)}{(s-a_{21})} + \frac{a_{25}Mv(s)}{(s-a_{21})} \quad (4.36)$$

Los valores de las constantes a_{ij} evaluadas a las condiciones normales de operación son los siguientes:

$$a_{12} = \left. \frac{\partial \Phi_1}{\partial H} \right|_{CN} = -\frac{C_1}{A} = -\frac{K_1}{2A\sqrt{H^*}} ; \text{ donde } C_1 = \frac{\partial F}{\partial H} = \frac{K_1}{2\sqrt{H}}$$

$$a_{13} = \left. \frac{\partial \Phi_1}{\partial F_e} \right|_{CN} = \frac{1}{A}$$

$$a_{21} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T} \right|_{CN} = -\left. \frac{F_e}{AH} \right|_{CN} = -\frac{F_e^*}{AH^*}$$

$$a_{22} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial H} \right|_{CN} = -\frac{F_e T_e}{AH^2} + \frac{F_e TA}{A^2 H^2} - \frac{\lambda m_v \rho C_p}{\rho^2 C_p^2 H^2}$$

Reduciendo

$$a_{22} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial H} \right|_{CN} = -\frac{F_e^* T_e^*}{AH^{*2}} + \frac{F_e^* T^*}{AH^{*2}} - \frac{\lambda m^* v}{\rho C_p H^{*2}}$$

$$a_{23} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial F_e} \right|_{CN} = \frac{T_e}{AH} - \left. \frac{T}{AH} \right|_{CN} = \frac{T_e^* - T^*}{AH^*}$$

$$a_{24} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T_e} \right|_{CN} = \frac{F_e}{AH} = \frac{F_e^*}{AH^*}$$

$$a_{25} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial Mv} \right|_{CN} = \frac{\lambda}{\rho C_p H} \Big|_{CN} = \frac{\lambda}{\rho C_p H^*}$$

Modelo del Sensor-Transmisor

Este componente tiene una gran rapidez de respuesta comparada con el proceso y se diseña para que se obtenga una respuesta lineal, de modo que puede modelarse como una ganancia simple

$$\frac{I_s(s)}{T(s)} = K_s \quad (4.37)$$

Modelo del Elemento de Entrada

Por Elemento de Entrada se entiende el circuito encargado de convertir la respuesta deseada a la señal electrónica que proviene del sensor-transmisor (i.e. corriente en mA), para garantizar la concordancia entre ambas

$$\frac{I_r(s)}{T_d(s)} = K_s \quad (4.38)$$

Modelo del Comparador

En el Controlador se reciben las señales anteriores y se comparan para determinar el error instantáneo, esa sección interconstruida puede representarse mediante

$$E(s) = I_r(s) - I_s(s) \quad (4.39)$$

Modelo del Controlador

La función de control propiamente dicha se implementa mediante una circuitería relativamente compleja, que para el caso PID, en último termino puede representarse como

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.40)$$

Modelo del Elemento Final de Control

En este caso están integrados el posicionador y la válvula de diafragma, la señal de manipulación generada en el controlador modifica el flujo de vapor que se alimenta al serpentín. Un modelo estándar para su dinámica es considerarlo un sistema de primer orden

$$\frac{Mv(s)}{M(s)} = \frac{Kv}{\tau_v s + 1} \quad (4.41)$$

Aun cuando τ_v usualmente es pequeño con respecto a la constante de tiempo de la planta

Diagrama de Bloques Total

La figura 4.3 muestra el Diagrama de Bloques General del Sistema de Control de Temperatura en el Calentador, obtenido mediante la unión de los bloques correspondientes a los componentes individuales que lo conforman.

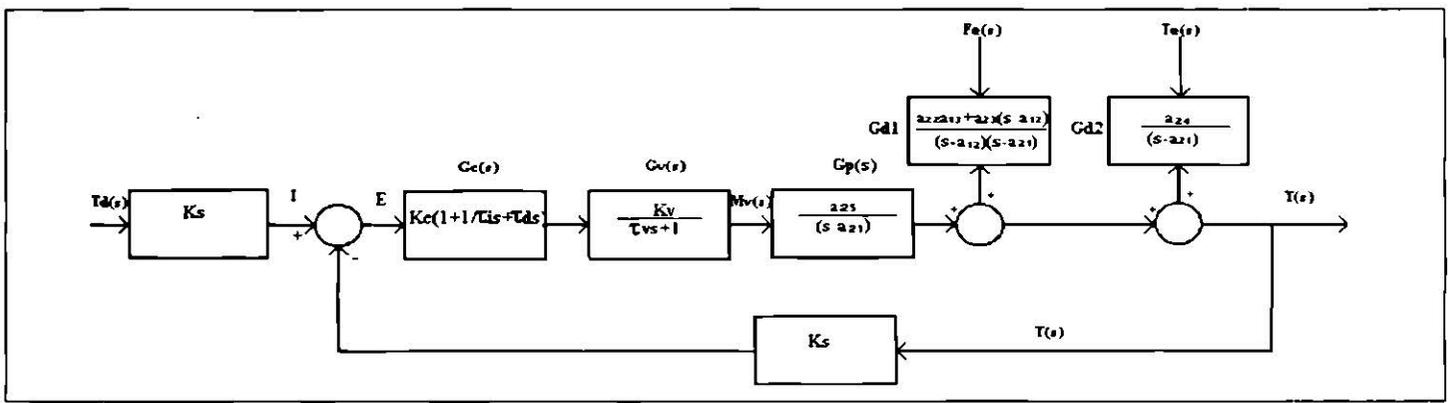


Figura 4.3 Diagrama de Bloques General del Sistema de Control de Temperatura

Sustituyendo en la ecuación general, los modelos de cada uno de los componentes individuales

$$\begin{aligned}
 Ts = & \frac{KsKc \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{Kv}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)}{1 + KvKsKc \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)} Td(s) + \\
 & + \frac{\frac{a_{22}a_{13} + a_{23}(s - a_{12})}{(s - a_{12})(s - a_{21})}}{1 + KvKsKc \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)} F_c(s) + \\
 & + \frac{\frac{a_{24}}{(s - a_{21})}}{1 + KvKsKc \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)} T_c
 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Se cambia el signo de a_{21} por ser intrínsecamente positivo y definiendo K_p y τ_p por las siguientes expresiones:

$$K_p = \frac{a_{24}}{a_{21}} = \frac{a_{25}}{a_{21}} \quad (4.43)$$

$$\tau_p = \frac{1}{a_{21}} \quad (4.44)$$

Se sustituye K_p y τ_p en la ecuación 4.42

$$\begin{aligned} T_s = & \frac{K_s K_c K_p K_v \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)}{1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)} T_d(s) + \\ & + \frac{\frac{a_{22} a_{13} + a_{23}(s - a_{12})}{(s - a_{12})(s + a_{21})}}{1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)} F_e(s) + \\ & + \frac{\frac{K_p}{(\tau_p s + 1)}}{1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)} T_c(s) \end{aligned} \quad (4.45)$$

Donde se distinguen tres términos, el primero corresponde a la respuesta servo y los restantes a la respuesta regulada; aunque ambas pueden presentarse simultáneamente.

Función Característica

El denominador de ambos términos es el mismo y se le llama Función Característica del Sistema de Control

$$1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right) = 0 \quad (4.46)$$

Esta ecuación es especialmente importante porque determina las características más importantes de la respuesta del sistema de control.

CAPÍTULO V: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez determinado el modelo global, se deben estudiar las características básicas del sistema de control: verificar la estabilidad absoluta, analizar la respuesta transitoria y sintonizar el controlador en escritorio. Todo ello requiere usar los valores reales de los parámetros de los componentes del sistema de control.

Determinación de Parámetros

Como se puede observar en la ecuación general 4.45, los parámetros a determinar son las constantes de tiempo y las ganancias de los componentes del sistema de control.

Los valores de los parámetros K_c , T_i , y T_d se ajustan directamente en el controlador, los valores de estos parámetros se determinaron experimentalmente buscando obtener la mejor respuesta del sistema controlado.

Como propuesta inicial se usaron los valores sugeridos por el fabricante, que fueron:

$$\begin{aligned}K_c \text{ (Ganancia del controlador)} &= 1 \\T_i \text{ (Tiempo integral)} &= 1 \\T_d \text{ (Tiempo derivativo)} &= 0\end{aligned}$$

estos valores deben ajustarse a la dinámica del proceso a controlar, para lo cual se realiza posteriormente la sintonización.

Los demás parámetros representan las características dinámicas de los otros componentes del lazo incluyendo a la planta y se deben determinar experimentalmente, en la lista quedan τ_p , τ_v , K_s , K_v , y K_p , se pueden conocer los valores individuales de estas constantes pero como aparecen siempre juntas, es mejor calcularlas agrupadas como K_o , obteniendo la curva de reacción del sistema al aplicarle un cambio escalón a la salida del controlador cuando este opera en forma "manual"

Para ello, se arrancó el controlador en automático con un Set-point de 50°C. Ya que alcanzó el punto de consigna, se realizó el cambio de control automático a control manual y se aumento en un 15 % la señal de salida del controlador.

En la figura 5.1, se observa el cambio de la temperatura del agua con respecto al tiempo, se estabilizó en el punto de consigna a los 55 minutos, y a los 65 minutos se aplicó el cambio escalón. En la respuesta del sistema se observó un aumento de temperatura hasta alcanzar un nuevo estado estacionario con la apertura de la válvula constante

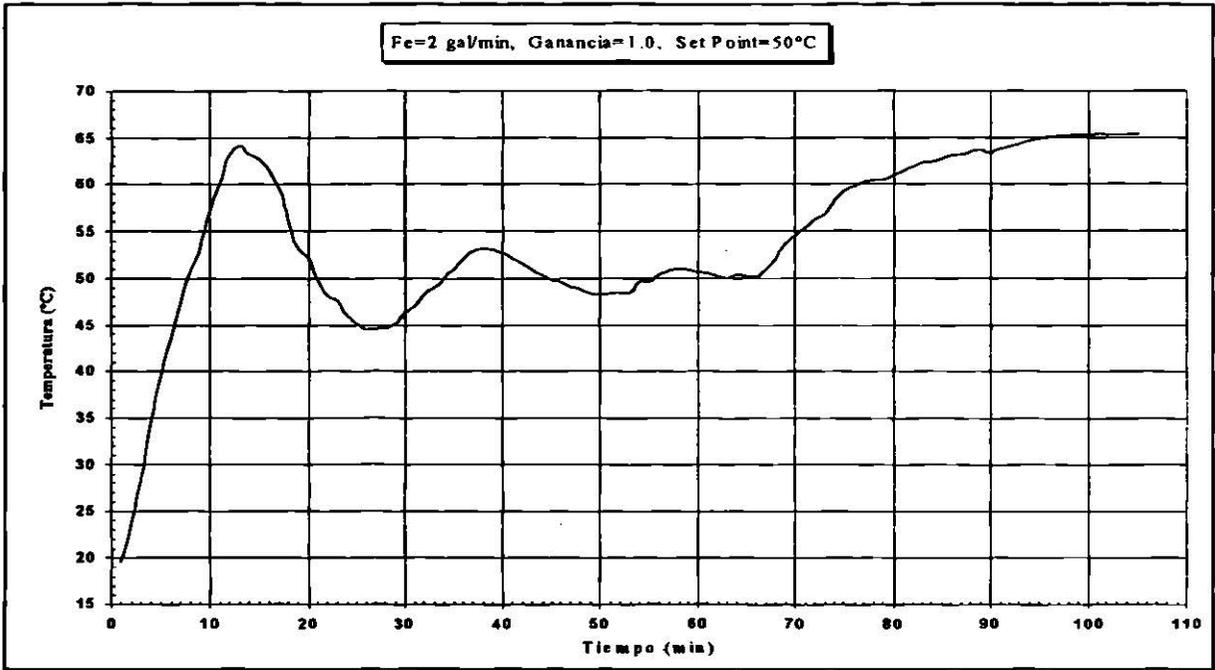
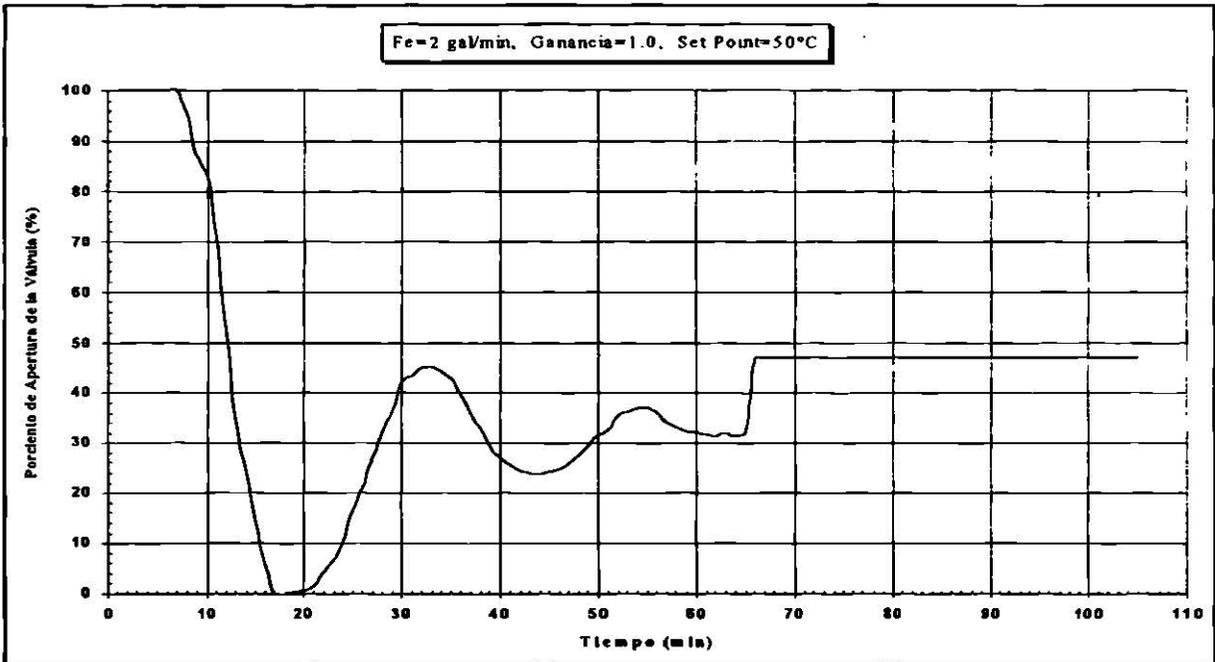


Figura 5.1 Gráfica de Control Automático con respuesta a un cambio escalón.

La figura 5.2, muestra la variación del porcentaje de apertura de la válvula con el tiempo, ahí se ve el cambio escalón que se aplicó cuando el sistema se estabilizó en el punto de consigna.



5.2 Gráfica de porcentaje de apertura de válvula Vs Tiempo con un cambio escalón.

La figura 5.3, muestra la curva de reacción, desde el momento en que se aplicó el cambio escalón en la señal de salida del controlador manteniendo el porcentaje de apertura de la válvula en 47 %.

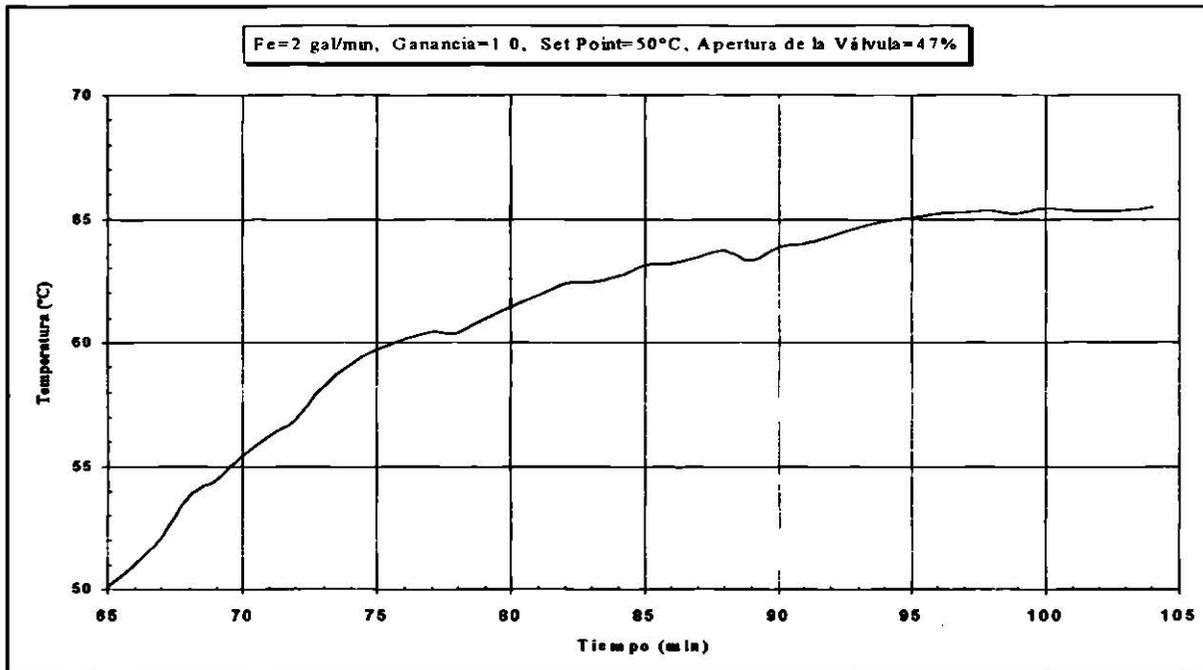


Figura 5.3 Curva de reacción.

La Curva de reacción muestra que el sistema es de primer orden sin tiempo muerto, y la ecuación general 4.45, es de segundo orden, incluyendo una constante de tiempo de la válvula y otra del proceso, de manera que una de ellas debe ser despreciable, como se dijo antes, la experiencia dice que la constante de la válvula es muy pequeña y que el volumen del tanque tiene que dar una constante de tiempo térmica grande, de manera que se concluye que $\tau_v = 0$ y que la constante observada experimentalmente debe ser τ_p .

En el del diagrama de bloques (fig. 4.3) se puede observar que el valor de la ganancia de la curva de reacción es el producto de las ganancias en la trayectoria que va desde la salida del controlador hasta la salida del sensor y estas ganancias se engloban en una ganancia global K_o .

$$K_o = K_v K_s K_p \quad (5.1)$$

Donde K_o se puede calcular con la siguiente expresión:

$$K_o = \Delta (\text{señal de salida del controlador}) / \Delta T \quad (5.2)$$

donde:

$$\Delta \text{ señal de salida del controlador} = 15\%$$

$$\Delta T = 15^\circ\text{C}$$

$$K_o = \frac{15\%}{15^\circ\text{C}} = 1 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$$

El único parámetro que falta determinar es τ_p , la constante de tiempo de la planta, y este parámetro también se calcula a partir de la curva de reacción del sistema. La constante de tiempo de la planta τ_p , se determinó por dos métodos, utilizados en libro de Ingeniería de Control Moderno (Ogata, 1980).

Método del 63.2%

De la curva de reacción (figura 5.3) se calcula por método gráfico la constante de tiempo τ de la siguiente manera.

1.- Se calcula el ΔT .

$$\Delta T = T_f - T_e$$

donde:

$$T_f = \text{Temperatura de estado estacionario} = 65.4^\circ\text{C}$$

$$T_e = \text{Temperatura inicial} = 50.1^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 65.4^\circ\text{C} - 50.1^\circ\text{C} = 15.3^\circ\text{C}$$

2.- Se calcula el 63.2 % del ΔT y se le suma T_e .

$$T(\tau) = 0.632(\Delta T) + T_e$$

donde:

$$T(\tau) = \text{Temperatura a localizar en la gráfica.}$$

$$T_e = \text{Temperatura inicial} = 50.1^\circ\text{C}$$

$$T(\tau) = 0.632(15.3^\circ\text{C}) + 50.1 = 59.77^\circ\text{C}$$

3.- En la curva de reacción, se localiza $T(\tau)$, y se traza una paralela al eje horizontal al eje X, hasta tocar la curva, al tocar esta se baja una línea recta perpendicular al eje X, en el punto que corta la línea, es el valor de la constante de tiempo para este proceso. (Apéndice D, gráfica 1)

$$\tau = 10.0 \text{ min.}$$

Método logarítmico

En este método se linealizan los datos experimentales con la siguiente fórmula:

$$\ln\left(\frac{T - T_{ss}}{T_0 - T_{ss}}\right) = -\frac{t}{\tau} \quad (5.3)$$

que corresponde a la respuesta escalón de un sistema de primer orden.

donde:

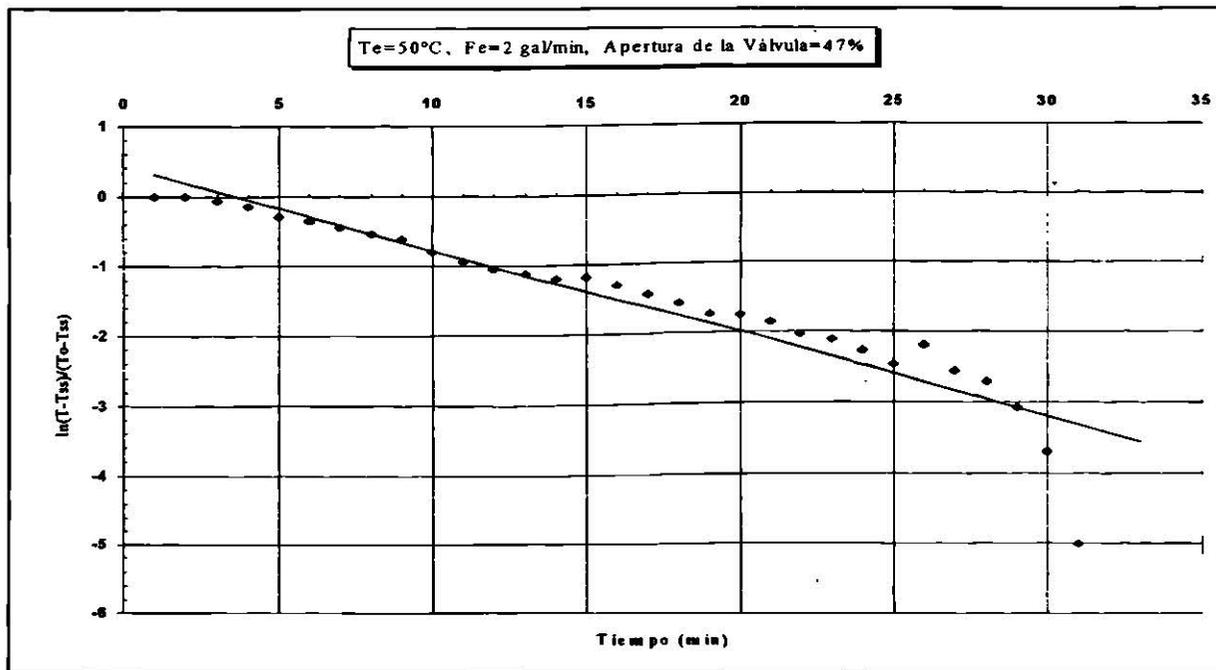
T = Temperatura del sistema.

T_{ss} = Temperatura en estado estacionario.

T_0 = Temperatura inicial.

Este método permite verificar experimentalmente si el sistema es o no de primer orden, al graficar el resultado de la ecuación anterior contra tiempo. Si la curva resulta ser una línea recta, el sistema es de primer orden. También se calcula τ , como el recíproco de la pendiente de los datos correlacionados.

La figura 5.4 muestra la curva de reacción en forma logarítmica. Como se puede observar, el sistema es de primer orden, puesto que al graficar se obtuvo una recta.



5.4 Gráfica logarítmica de la curva de reacción.

De la gráfica se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}
 m &= -0.1234 \\
 b &= 8.2622 \\
 r &= -0.9459 \\
 \tau &= -1/m = 8.101
 \end{aligned}$$

El método del 63.2% dio un valor 10.0 min y el método logarítmico 8.1 min, de estos dos métodos el más confiable es el segundo, porque utiliza todos los datos de la curva de reacción y suaviza el error individual.

Análisis de Estabilidad

El análisis de estabilidad se realiza estudiando las raíces de la Función Característica (ecuación 4.46).

$$1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1} \right) = 0$$

Como se vio τ_v es muy pequeña de modo que

$$1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1} \right) = 0 \quad (5.4)$$

Sustituyendo en la ecuación a K_o (ecuación 5.1)

$$1 + K_o K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1} \right) = 0 \quad (5.5)$$

multiplicando por $(T_i s)(\tau_p s + 1)$ y eliminando la acción derivativa T_d puesto que el proceso es muy rápido ($\tau_p = 8.1$ min)

$$(\tau_p s + 1)(T_i s) + K_c K_o (T_i s + 1) = 0 \quad (5.6)$$

quitando paréntesis

$$\tau_p T_i s^2 + T_i s + K_c K_o T_i s + K_c K_o = 0 \quad (5.7)$$

ordenando en la forma de un polinomio de segundo grado

$$\tau_p T_i s^2 + (T_i + K_c K_o T_i) s + K_c K_p = 0 \quad (5.8)$$

esto puede adaptarse a la forma cuadrática

$$a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0 \quad (5.9)$$

donde todos los coeficientes son positivos, si se aplica el criterio de Routh-Hurwitz para un sistema de 2o Orden (*Navarro, 1991*) las raíces siempre tienen la parte real negativa y caen en el semiplano izquierdo como se puede observar en la figura 5.5.

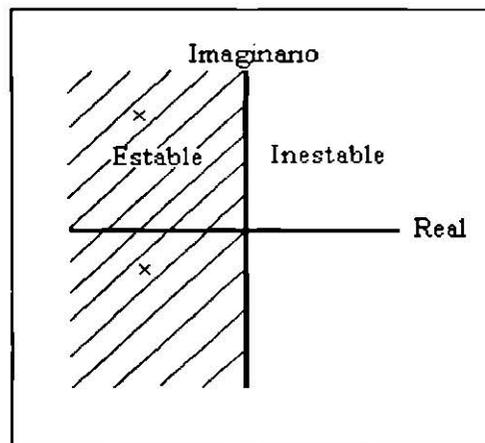


Figura 5.5 Regiones de estabilidad en el plano complejo.

por lo tanto el sistema es siempre estable. Deben recordarse, las aproximaciones utilizadas en la generación de los modelos.

Sintonización en Escritorio

Existen varias técnicas de sintonización, la más popular es la de Ziegler-Nichols (*Smith, 1994*) por su sencillez y porque se basa en el modelo obtenido experimentalmente a partir de la curva de reacción a una entrada escalón en lazo abierto. Esta curva de reacción incluye la dinámica del elemento final de control, la planta y el sensor-transmisor. Las fórmulas que se utilizan para caracterizar el proceso utilizan los valores experimentales de los parámetros del modelo POMTM. La ecuación 5.10 muestra el modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM).

$$G(s) = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (5.10)$$

donde:

- G(s) = Función de transferencia combinada.
- t_o = Tiempo muerto efectivo del proceso.
- τ = Constante de tiempo.
- K = Ganancia del proceso en estado estacionario.

Desafortunadamente, en este caso el modelo no contiene tiempo muerto de modo que no es posible aplicar la fórmula.

Minimización del error (ISE)

Una técnica más formal y al mismo tiempo mucho más laboriosa, se basa en optimizar un cierto índice de funcionamiento del lazo de control.

Existen varios índices de comportamiento basados en una medida del error total. uno de ellos consiste en la integral del cuadrado del error, ISE (Integral of the Squared Error) y la técnica determina los valores de los parámetros del controlador que minimizan el índice de funcionamiento

Como se vio anteriormente la acción derivativa, T_d es igual a cero, por lo que se simplifica la optimización a sólo dos dimensiones K_c y T_i .

Para el problema servo,

$$\frac{Tr(s)}{Td(s)} = \frac{K_o K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)}{1 + K_o K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)} \quad (5.11)$$

Despejamos $Tr(s)$

$$Tr(s) = \frac{K_o K_c (T_i s + 1)}{1 + \frac{T_i s (\tau_p s + 1)}{K_o K_c (T_i s + 1)}} Td(s) \quad (5.12)$$

Por definición

$$E(s) = Td(s) - Tr(s) \quad (5.13)$$

Y sustituimos $T_r(s)$

$$E(s) = T_d(s) - \frac{K_o K_c (T_i s + 1)}{1 + \frac{T_i s (\tau_p s + 1) K_o K_c (T_i s + 1)}{T_i s (\tau_p s + 1)}} T_d(s) \quad (5.14)$$

Se saca factor común y se multiplica por $(T_i s)(\tau_p s + 1)$

$$E(s) = \left[1 + \frac{K_o K_c (T_i s + 1)}{(T_i s)(\tau_p s + 1) + K_o K_c (T_i s + 1)} \right] T_d(s) \quad (5.15)$$

En la sección Determinación de parámetros se calcularon los siguientes valores de:

$$K_o = 1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$$

$$\tau_p = 8.1 \text{ min}$$

Se sustituyen los parámetros y la variable $T_d(s)$ por una función escalón $1/s$

$$E(s) = \left[1 + \frac{K_c (T_i s + 1)}{(T_i s)(8.1s + 1) + K_c (T_i s + 1)} \right] \frac{1}{s} \quad (5.16)$$

$$E(s) = \left[\frac{(T_i s)(8.1s + 1) + K_c (T_i s + 1) - K_c (T_i s + 1)}{(T_i s)(8.1s + 1) + K_c (T_i s + 1)} \right] \frac{1}{s} \quad (5.17)$$

Eliminando términos

$$E(s) = \left[\frac{(T_i s)(8.1s + 1)}{(T_i s)(8.1s + 1) + K_c (T_i s + 1)} \right] \frac{1}{s} \quad (5.18)$$

Se quitan los paréntesis y dividiendo arriba y abajo por $8.1 \tau_i$

$$E(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{8.1} s}{s \left(s^2 + \frac{1}{8.1} s + \frac{K_c}{8.1} s + \frac{K_c}{8.1 T_i} \right)} \quad (5.19)$$

Eliminando una s del numerador con la del denominador

$$E(s) = \frac{s + \frac{1}{8.1}}{s^2 + \frac{1 + Kc}{8.1}s + \frac{Kc}{8.1T_i}} \quad (5.20)$$

Se completa el cuadrado del denominador

$$E(s) = \frac{s + \frac{1}{8.1}}{\left(s^2 + \frac{1 + Kc}{8.1}s + \frac{(1 + Kc)^2}{16.2^2}\right) + \frac{Kc}{8.1T_i} - \frac{(1 + Kc)^2}{16.2^2}} \quad (5.21)$$

$$E(s) = \frac{s + \frac{1}{8.1}}{\left(s + \frac{1 + Kc}{16.2}\right)^2 + \frac{32.4Kc}{262.44T_i} - \frac{(1 + Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} \quad (5.22)$$

Sumando y restando en el numerador el término $\frac{1 + Kc}{16.2}$

$$E(s) = \frac{\left(s + \frac{1 + Kc}{16.2}\right) + \left(\frac{1}{8.1} - \frac{1 + Kc}{16.2}\right)}{\left(s + \frac{1 + Kc}{16.2}\right)^2 + \frac{32.4Kc - (1 + Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} \quad (5.23)$$

Se separan los términos para poder antitransformar

$$E(s) = \frac{s + \frac{1 + Kc}{16.2}}{\left(s + \frac{1 + Kc}{16.2}\right)^2 + \frac{32.4Kc - (1 + Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} + \frac{1 - Kc}{16.2} \frac{1}{\left(s + \frac{1 + Kc}{16.2}\right)^2 + \frac{32.4Kc - (1 + Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} \quad (5.24)$$

Se antitransforma

$$\begin{aligned}
 e(t) = & e^{-\frac{1-Kc}{16.2}t} \text{Cos} \sqrt{\frac{32.4Kc - (1+Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} t + \\
 & + \frac{\frac{1-Kc}{16.2}}{\sqrt{\frac{32.4Kc - (1+Kc)^2 T_i}{262.44T_i}}} e^{-\frac{1+Kc}{16.2}t} \sqrt{\frac{32.4Kc - (1+Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} t
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Para simplificar la ecuación se sustituye α, ω y K_3 definidos por

$$\alpha = \left(\frac{1+Kc}{16.2} \right) \tag{5.26}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{32.4Kc - (1+Kc)^2 T_i}{262.44T_i}} \tag{5.27}$$

$$K_3 = \left(\frac{1-Kc}{16.2} \right) \tag{5.28}$$

La ecuación antitransformada queda

$$e(t) = e^{-\alpha t} \text{Cos} \omega t + \frac{K_3}{\omega} e^{-\alpha t} \text{Sen} \omega t \tag{5.29}$$

Para calcular el ISE (La integral del error al cuadrado) se usa la metodología propuesta por Ogata (1980)

$$\text{ISE} = \int_0^{\infty} e^2 dt = \psi(Kc, T_i) \tag{5.30}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t e^2(t) dt = \lim_{s \rightarrow 0} F(s) \tag{5.31}$$

$$F(s) = \mathcal{L}[e^2(t)] \tag{5.32}$$

Se eleva al cuadrado el error $e(t)$

$$e^2(t) = (e^{-\alpha} \cos \omega t + \frac{K_3}{\omega} e^{-\alpha} \sin \omega t)^2 \quad (5.33)$$

$$e^2(t) = e^{-2\alpha} \cos^2 \omega t + 2 \frac{K_3}{\omega} e^{-2\alpha} \cos \omega t \sin \omega t + \frac{K_3^2}{\omega^2} e^{-2\alpha} \sin^2 \omega t \quad (5.34)$$

Las funciones trigonométricas de la ecuación anterior se igualan a las identidades correspondientes

$$\cos^2 \omega t = \left(\frac{1 + \cos 2\omega t}{2} \right) \quad (5.35)$$

$$\sin^2 \omega t = \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \quad (5.36)$$

$$\cos \omega t \sin \omega t = \frac{1}{2} \sin 2\omega t \quad (5.37)$$

Sustituyendo las identidades en la ecuación 5.33

$$e(t)^2 = e^{-2\alpha} \left(\frac{1 + \cos 2\omega t}{2} \right) + 2 \frac{K_3}{\omega} e^{-2\alpha} \left(\frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) + \frac{K_3^2}{\omega^2} e^{-2\alpha} \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \quad (5.38)$$

Se eliminan los paréntesis

$$e(t)^2 = \frac{1}{2} e^{-2\alpha} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha} \cos 2\omega t + \frac{K_3^2}{2\omega^2} e^{-2\alpha} - \frac{K_3^2}{2\omega^2} e^{-2\alpha} \cos 2\omega t + \frac{K_3}{\omega} e^{-2\alpha} \sin 2\omega t \quad (5.39)$$

La ecuación se multiplica por dos y se agrupan términos

$$e(t)^2 = \left(1 + \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) e^{-2\alpha} + \left(1 - \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) e^{-2\alpha} \cos 2\omega t + 2 \frac{K_3}{\omega} e^{-2\alpha} \sin 2\omega t \quad (5.40)$$

Se transforma la ecuación

$$F(s) = \mathcal{L}[e^2(t)]$$

$$F(s) = \left(1 + \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{1}{s + 2\alpha} \right) + \left(1 - \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{s + 2\alpha}{(s + 2\alpha)^2 + 4\omega^2} \right) + 2 \frac{K_3}{\omega} \left(\frac{2\omega}{(s + 2\alpha)^2 + 4\omega^2} \right) \quad (5.41)$$

Se aplica el limite cuando $s \rightarrow 0$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t e^2 dt = \lim_{s \rightarrow 0} F(s)$$

$$ISE = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \left(1 + \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{1}{s+2\alpha} \right) + \left(1 - \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{s+2\alpha}{(s+2\alpha)^2 + 4\omega^2} \right) + 2 \frac{K_3}{\omega} \left(\frac{2\omega}{(s+2\alpha)^2 + 4\omega^2} \right) \right\} \quad (5.42)$$

$$ISE = \left(1 + \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{1}{2\alpha} \right) + \left(1 - \frac{K_3^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{2\alpha}{4\alpha^2 + 4\omega^2} \right) + 2 \frac{K_3}{\omega} \left(\frac{2\omega}{4\alpha^2 + 4\omega^2} \right) \quad (5.43)$$

Simplificando la ecuación

$$ISE = \left(\frac{\omega^2 + K_3^2}{2\alpha\omega^2} \right) + \left(\frac{\omega^2 - K_3^2}{2\omega^2} \right) \left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} \right) + \left(\frac{K_3}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \quad (5.44)$$

La expresión anterior está en función de K_c y T_i . Para minimizar el error (ISE), se van a proponer valores para los parámetros y con los valores que den el error de más pequeño esos son los valores óptimos para el sistema de control.

El espacio de búsqueda se acota entre los siguientes límites prácticos:

$$\begin{aligned} K_{ci} (\text{valor inicial}) &= 0.01 \text{ (prácticamente sin control)} \\ K_{cf} (\text{valor final}) &= 10.0 \text{ (límite físico del controlador)} \\ T_{ii} (\text{valor inicial}) &= 0.01 \text{ min} \\ T_{if} (\text{valor final}) &= 3 \text{ min} \end{aligned}$$

Se realizó un pequeño programa para obtener el valor del Error a diferentes valores de K_c y T_i con incrementos de 0.25 para ambas variables.

El valor más pequeño del error es 0.7364 para los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} K_c &= 10 \\ T_i &= 0.01 \text{ min.} \end{aligned}$$

En la figura 5.6, se pueden observar las curvas de contorno, que representan valores constantes del error (ISE) a diferentes valores de K_c y T_i . En esta gráfica se observa que entre más grande es el valor de K_c y menor el tiempo integral el error disminuye.

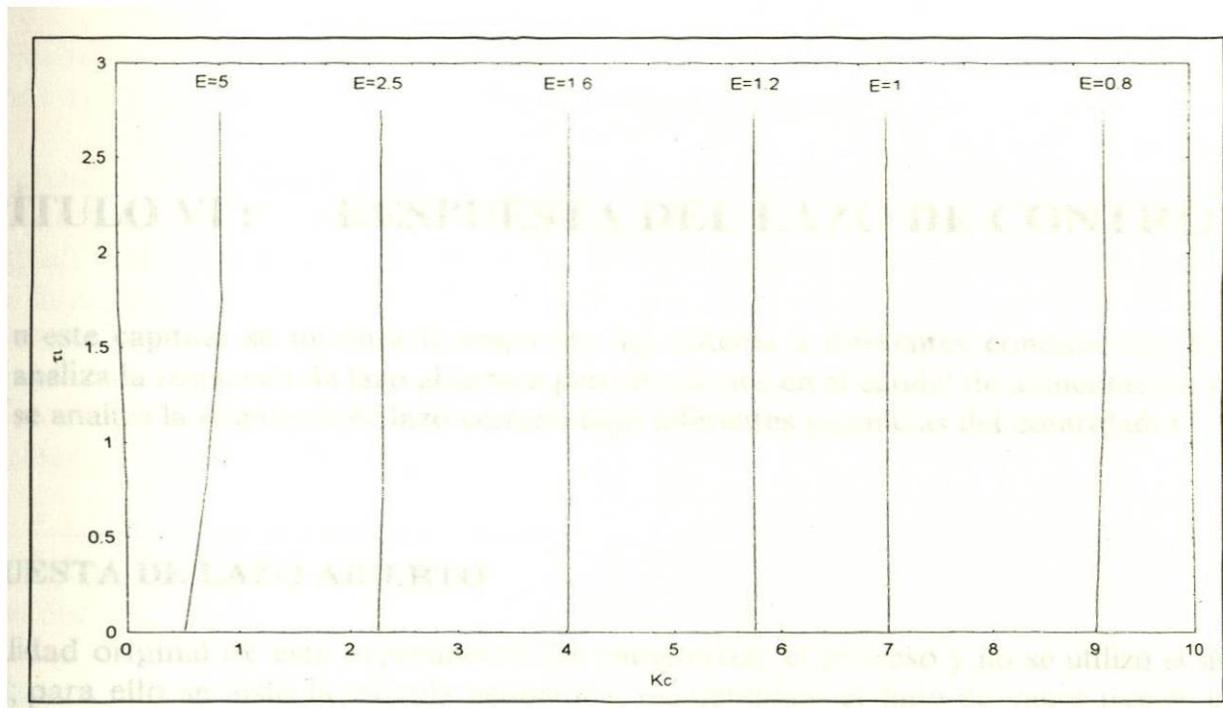


Figura 5.6. Curvas de contorno.

Se puede concluir que hay que usar la mayor ganancia posible y el menor tiempo integral disponible en el controlador comercial.

CAPÍTULO VI: RESPUESTA DEL LAZO DE CONTROL

En este capítulo se muestra la respuesta del sistema a diferentes condiciones. Primero se analiza la respuesta de lazo abierto a perturbaciones en el caudal de alimentación y después se analiza la respuesta de lazo cerrado bajo diferentes ganancias del controlador.

RESPUESTA DE LAZO ABIERTO

La finalidad original de este experimento fue caracterizar el proceso y no se utilizó el sistema de control; para ello se aisló la válvula neumática, manipulando el flujo de vapor usando la válvula manual que se encuentra en el bypass. En la primera parte del experimento se estudió el efecto del vapor, para ello se realizaron corridas de calentamiento y enfriamiento abriendo y cerrado totalmente la válvula del vapor; y en la segunda parte se estudio el efecto de cambios moderados en el caudal de alimentación.

En ambos casos, se partió del estado estacionario. La figura 6.1 muestra las curvas de calentamiento y enfriamiento a las condiciones especificadas en el recuadro de la gráfica.

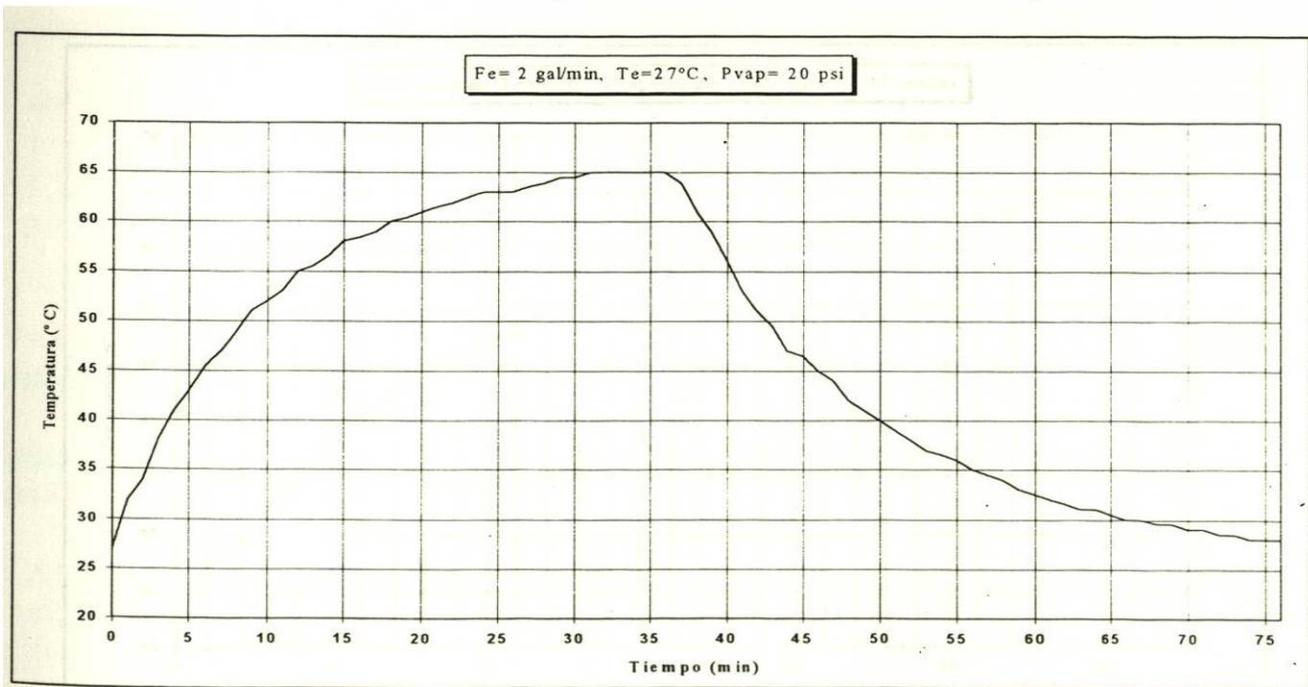


Figura 6.1 Gráfica de Calentamiento y Enfriamiento

Se analizaron por separado las curvas de calentamiento y enfriamiento, para calcular la constante de tiempo τ de cada caso, mediante los dos métodos vistos antes.

Es importante calcular la constante de tiempo τ , pues esta guarda relación con la velocidad de respuesta del proceso. Mientras más lenta es la respuesta de un proceso a la función de forzamiento o entrada, más grande es el valor de τ y tanto más rápida es la respuesta del proceso a la función de forzamiento, cuanto más pequeño es el valor de τ . τ debe tener unidades de tiempo. La constante de tiempo depende de diferentes propiedades físicas y parámetros de operación del proceso como del volumen del líquido del tanque, capacidades caloríficas y del flujo del proceso. Si alguna de estas características cambia, la constante de tiempo también cambia y esto se refleja en la velocidad de respuesta del proceso.

Curva de Calentamiento Método del 63.2 %

Este método se explica más detalladamente en el capítulo anterior al igual que el método logarítmico. La figura 6.2 muestra la curva de calentamiento de la cual se calcularon los siguientes parámetros. (Apéndice D, gráfica 2)

$$\Delta T = 65^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C} = 38^{\circ}\text{C}.$$

$$T(\tau) = 0.632(\Delta T) + T_e$$

$$T(\tau) = 0.632(38^{\circ}\text{C}) + 27 = 51.016^{\circ}\text{C}$$

$$\tau = 9 \text{ min.}$$

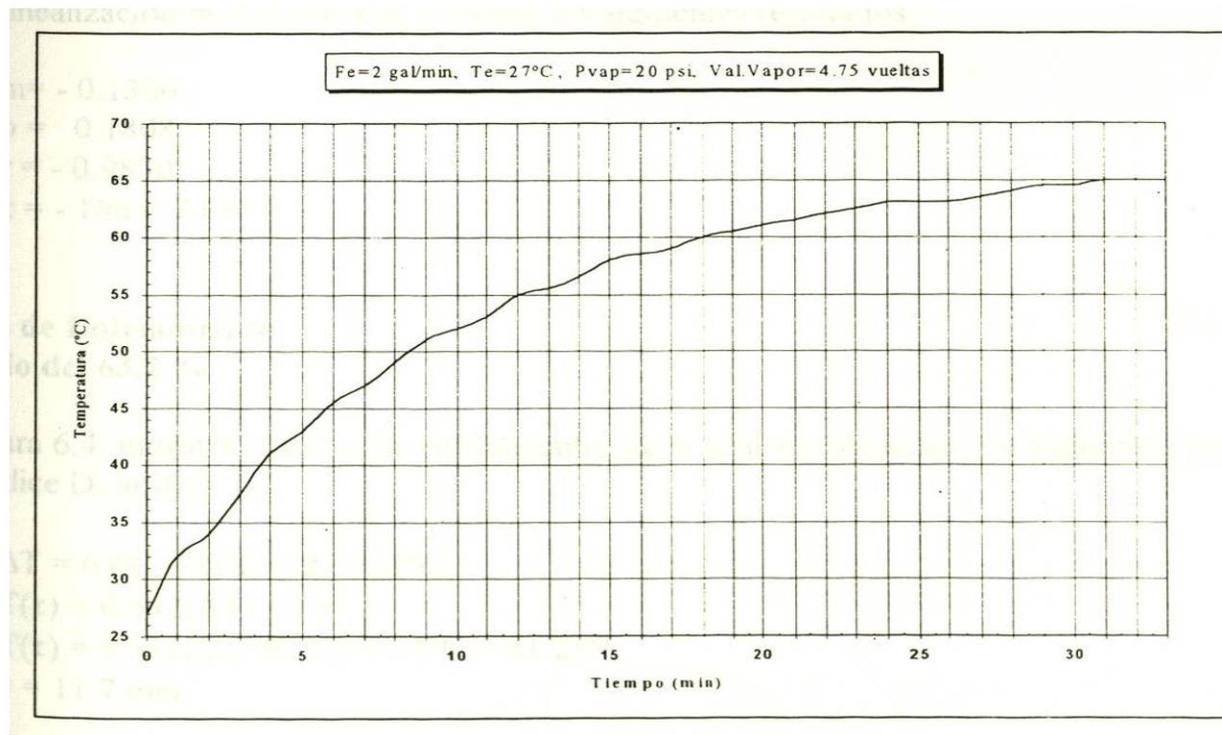


Figura 6.2 Curva de Calentamiento.

Método logarítmico

La figura 6.3 muestra la curva de calentamiento en forma logarítmica.

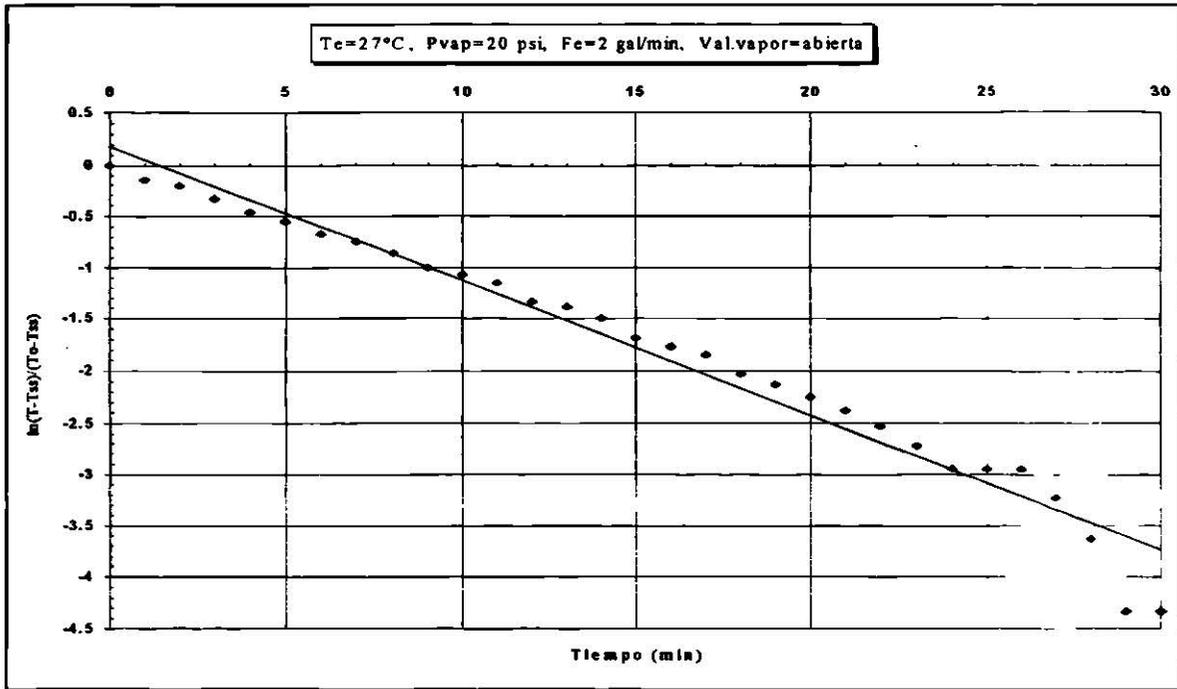


Figura 6.3 Curva logarítmica de Calentamiento

De la linealización de los datos se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}m &= -0.1306 \\b &= 0.1808 \\r &= -0.9830 \\\tau &= -1/m = 7.6571\end{aligned}$$

Curva de Enfriamiento

Método del 63.2 %

La figura 6.4, muestra la curva de enfriamiento, de la cual se calcularon los siguientes parámetros. (Apéndice D, gráfica 3)

$$\begin{aligned}\Delta T &= 64^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C} = 22.752^\circ\text{C} \\T(\tau) &= 0.632(\Delta T) - T_e \\T(\tau) &= 0.632(22.782^\circ\text{C}) + 64^\circ\text{C} = 41.25^\circ\text{C} \\\tau &= 11.7\text{ min.}\end{aligned}$$

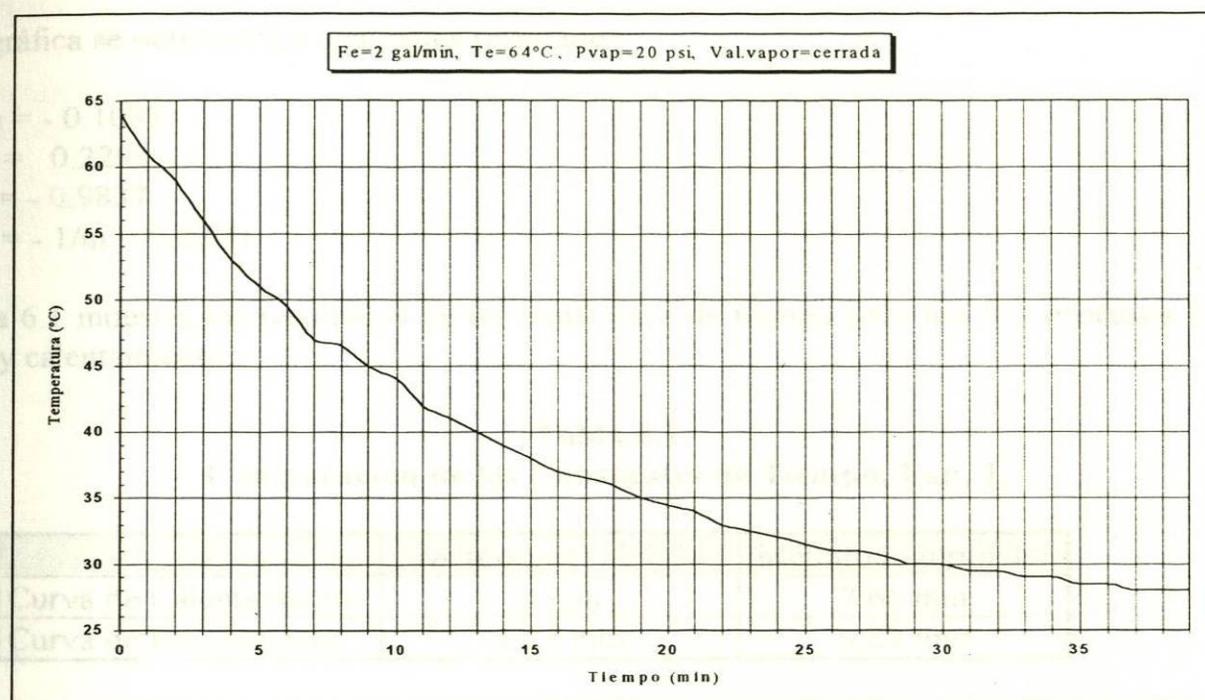


Figura 6.4. Curva de Enfriamiento

Método logarítmico

La figura 6.5 muestra la curva logarítmica de enfriamiento.

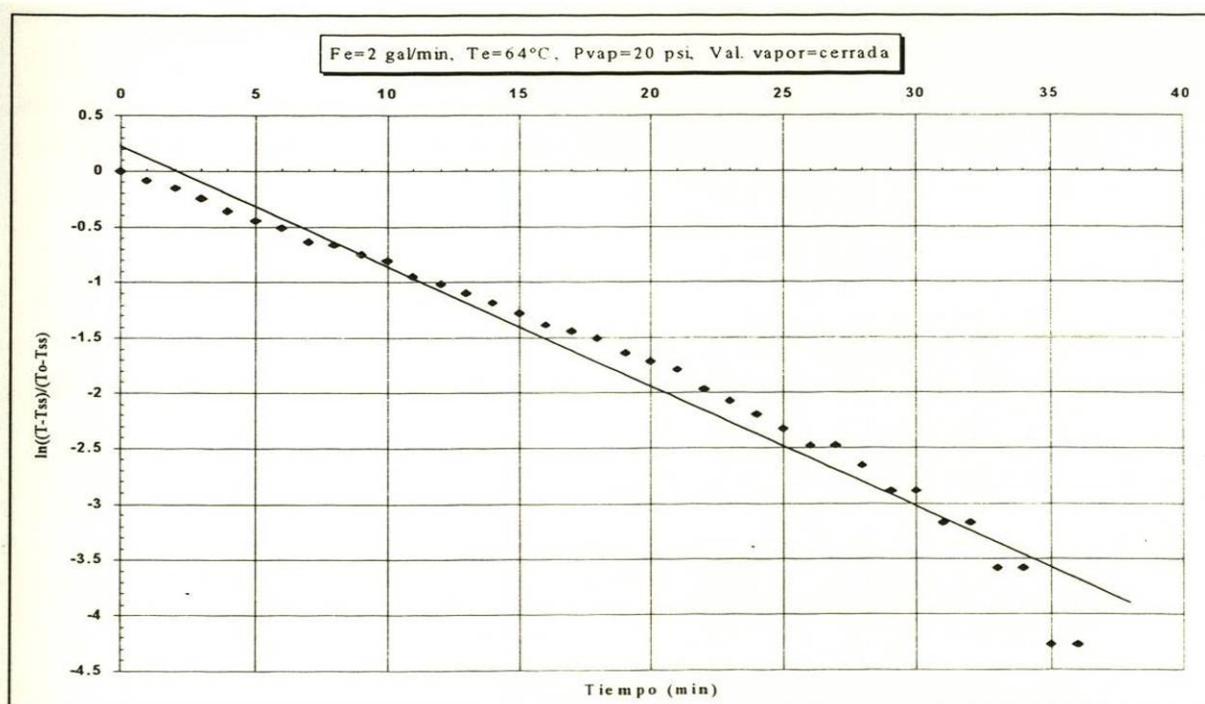


Figura 6.5 Curva logarítmica de Enfriamiento

De la gráfica se obtienen los siguientes resultados:

$$m = - 0.1085$$

$$b = 0.2291$$

$$r = - 0.9837$$

$$\tau = - 1/m = 9.2200$$

La tabla 6.1 muestra los resultados de las constantes de tiempo para los dos procesos de enfriamiento y calentamiento.

Tabla 6.1
Comparación de las Constantes de Tiempo, Exp. 1.

	Método del 63.2 %	Método logarítmico
Curva de Calentamiento	9 min	7.66 min
Curva de Enfriamiento	11.7 min	9.22 min

Teóricamente la constante de tiempo para los procesos de calentamiento y enfriamiento deben ser iguales, por lo que se saca un promedio de los valores obtenidos por el método logarítmico, pues como ya se vio anteriormente es un método más confiable.

$$\tau \text{ (promedio)} = 8.44 \text{ min.}$$

EFFECTO DEL CAUDAL DE ALIMENTACIÓN

En esta segunda parte, se efectuaron diferentes cambios escalón en el caudal de alimentación (Fig. 6.6), inicialmente se llegó al estado estacionario con un caudal de 2 gal/min(0.1261 lt/s), después se cambió a 4 gal/min(0.2523 lt/s) ya que se alcanzó nuevamente el estado estacionario, se repitieron los cambios de 2 y 4 gal/min.

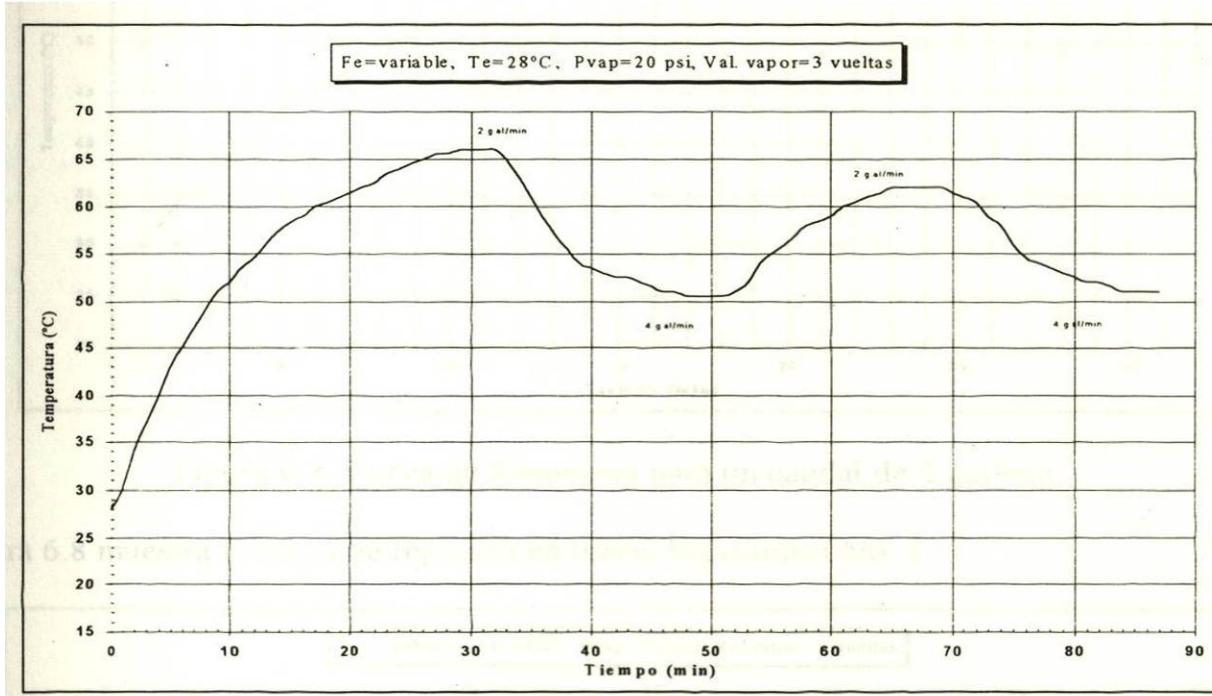


Figura 6.6 Gráfica con cambios escalón en la alimentación.

Se estudiaron por separado cada una de las secciones de la gráfica, que corresponden a diferentes caudales. Los cálculos que se efectuaron fueron los mismos.

Curva 1

La figura 6.7 muestra la curva 1, que corresponde a un caudal de 2 gal/min. Los cálculos realizados en la gráfica son los siguientes: (Apéndice D, gráfica 4)

$$\Delta T = 66^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C} = 38^{\circ}\text{C}$$

$$T(\tau) = 0.632(\Delta T) + T_e$$

$$T(\tau) = 0.632(38^{\circ}\text{C}) + 28.016^{\circ}\text{C} = 52.016^{\circ}\text{C}$$

$$\tau = 10.0 \text{ min.}$$

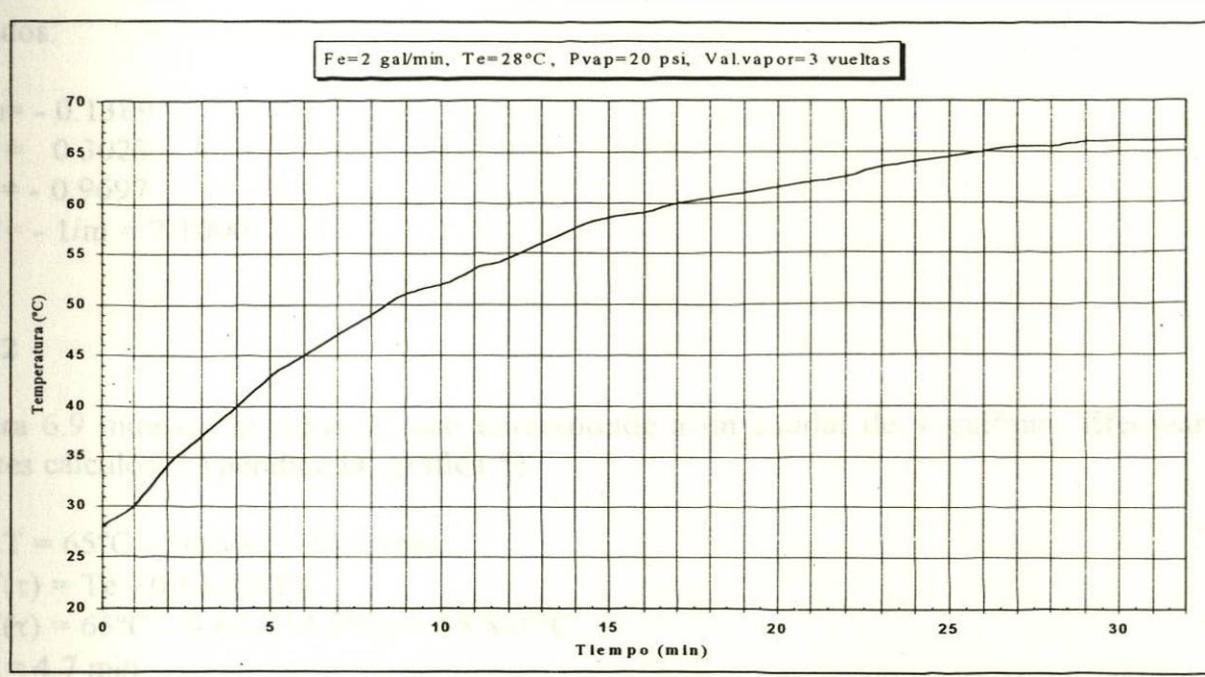


Figura 6.7. Curva de Respuesta para un caudal de 2 gal/min.

La figura 6.8 muestra la curva de reacción en forma logarítmica No. 1.

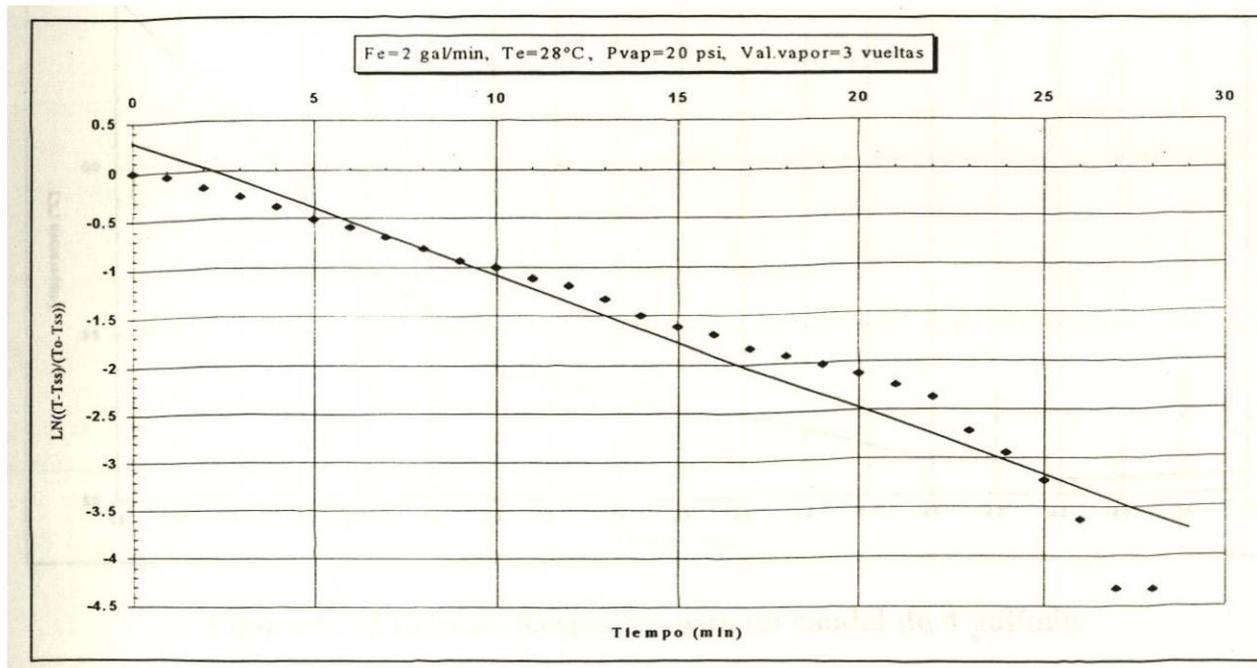


Figura 6.8 Gráfica logarítmica de la curva No. 1.

Resultados:

$$m = -0.1389$$

$$b = 0.3023$$

$$r = -0.9697$$

$$\tau = -1/m = 7.1000$$

Curva 2

La figura 6.9 muestra la curva 2, que corresponde a un caudal de 4 gal/min. Efectuándose los siguientes cálculos. (Apéndice D, gráfica 5)

$$\Delta T = 65^\circ\text{C} - 50.5^\circ\text{C} = 14.5 \text{ min.}$$

$$T(\tau) = T_e - 0.632(\Delta T)$$

$$T(\tau) = 65^\circ\text{C} - 0.632(14.5^\circ\text{C}) = 55.836^\circ\text{C}$$

$$\tau = 4.7 \text{ min.}$$

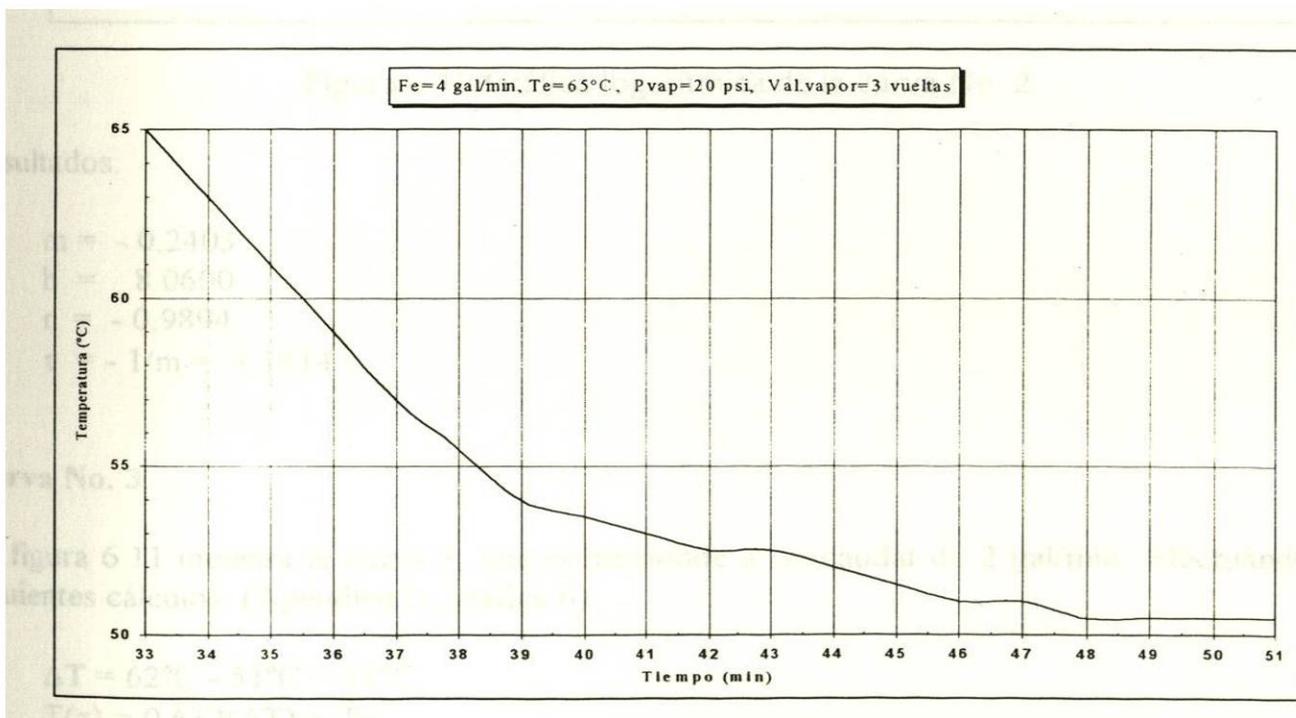


Figura 6.9 Curva de Respuesta para un caudal de 4 gal/min.

La figura 6.10 muestra la curva de reacción en forma logarítmica No. 2

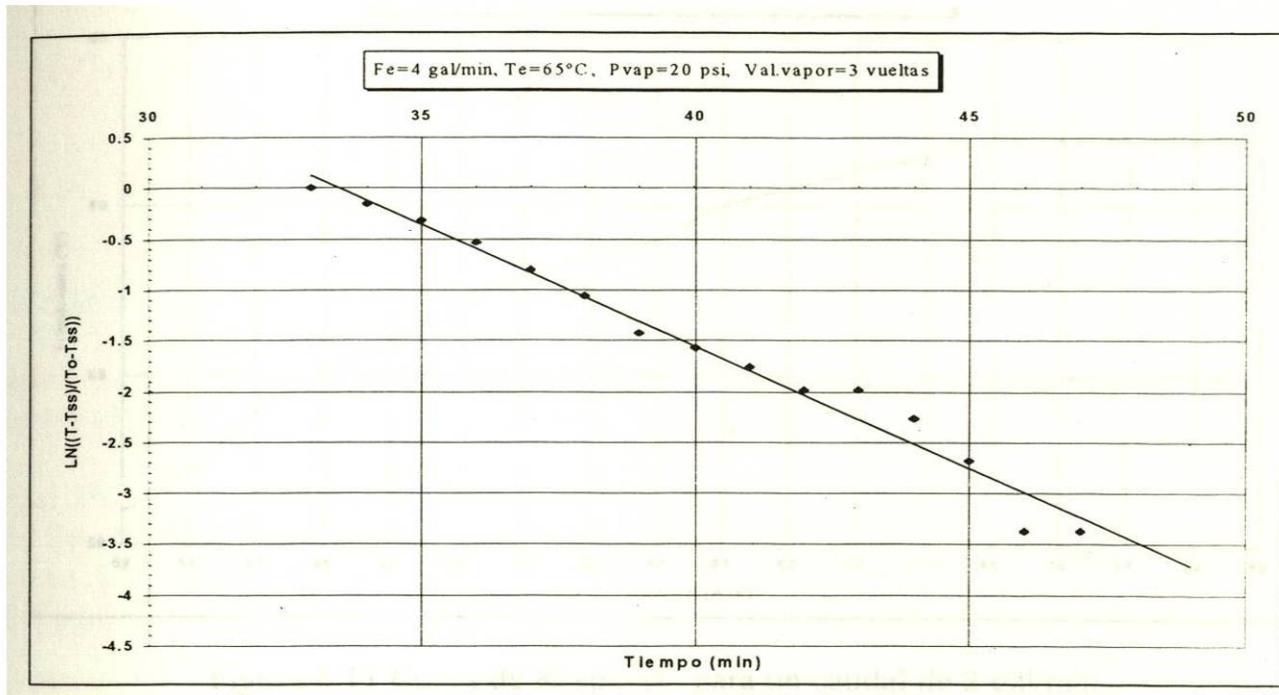


Figura 6.10 Gráfica logarítmica de la curva No. 2.

Resultados:

$$m = -0.2403$$

$$b = 8.0600$$

$$r = -0.9894$$

$$\tau = -1/m = 4.1614$$

Curva No. 3

La figura 6.11 muestra la curva 3, que corresponde a un caudal de 2 gal/min. Efectuándose los siguientes cálculos. (Apéndice D, gráfica 6)

$$\Delta T = 62^{\circ}\text{C} - 51^{\circ}\text{C} = 11^{\circ}\text{C}$$

$$T(\tau) = 0.632(\Delta T) + T_e$$

$$T(\tau) = 0.632(6.952^{\circ}\text{C}) + 51^{\circ}\text{C} = 57.952^{\circ}\text{C}$$

$$\tau = 4.9 \text{ min.}$$

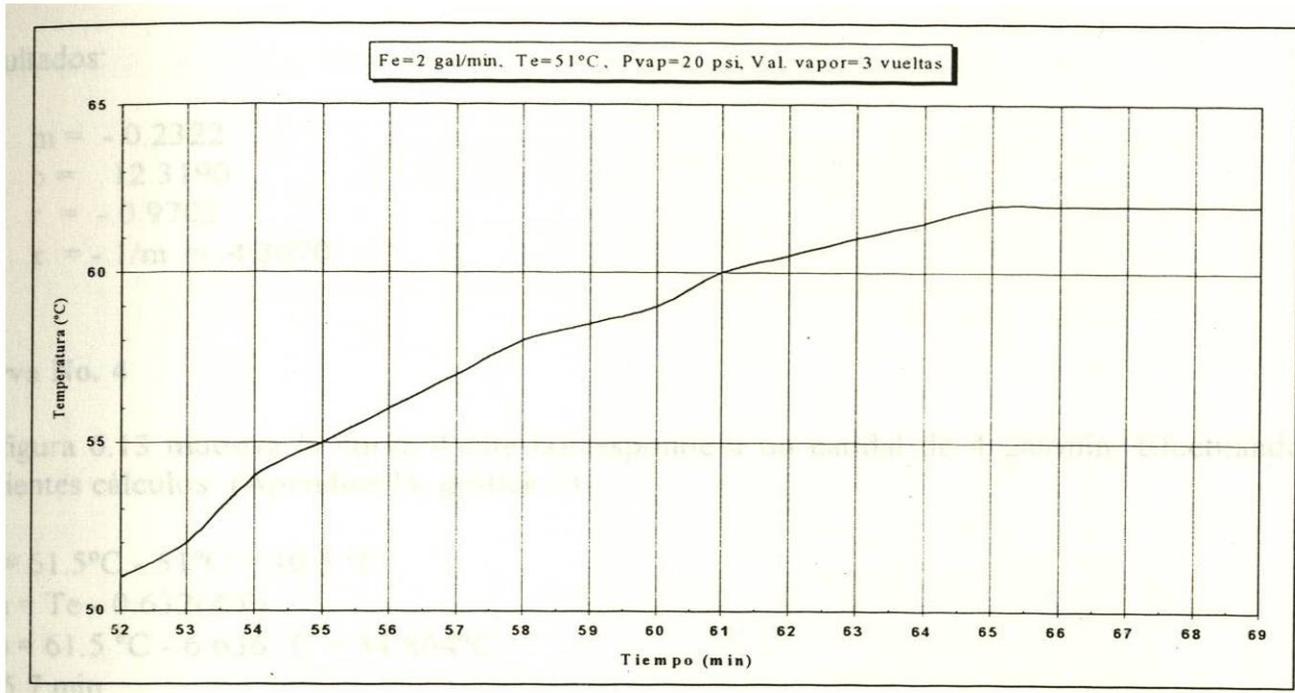


Figura 6.11 Curva de Respuesta para un caudal de 2 gal/min.

La figura 6.12, muestra la curva de reacción en forma logarítmica No. 3.

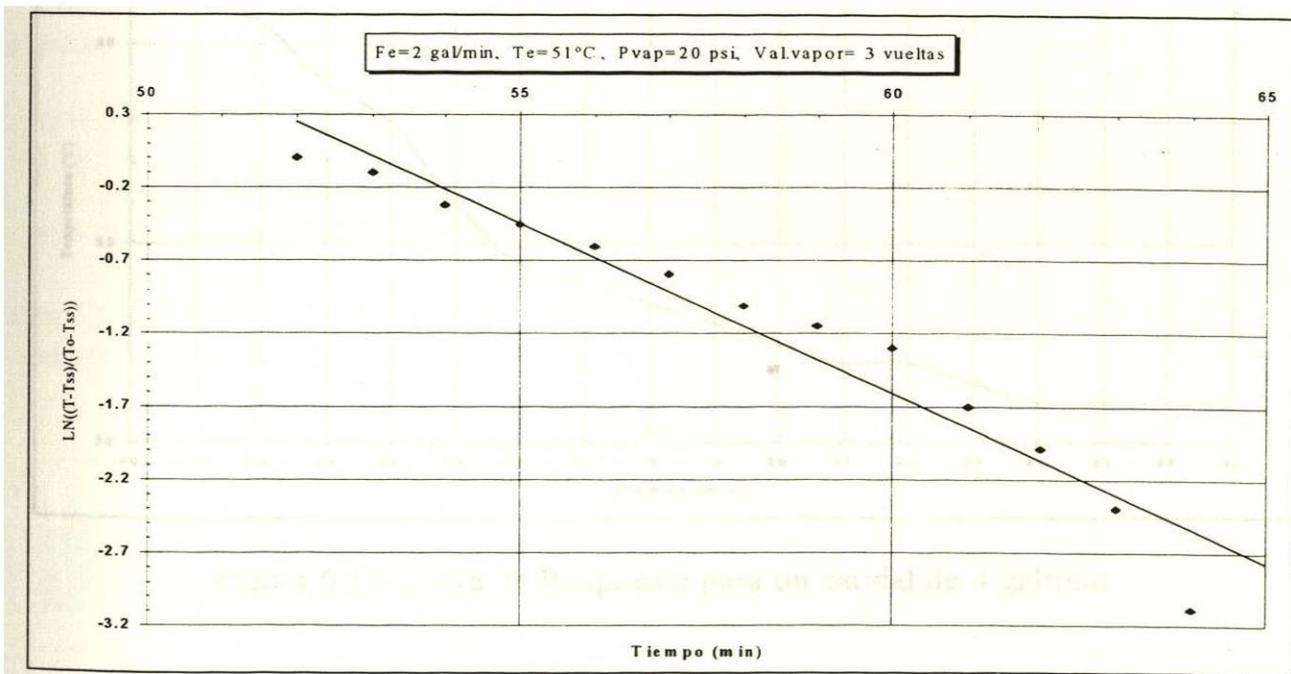


Figura 6.12 Gráfica logarítmica de la curva No. 3.

Resultados:

$$m = -0.2322$$

$$b = 12.3190$$

$$r = -0.9702$$

$$\tau = -1/m = 4.3070$$

Curva No. 4

La figura 6.13 muestra la curva 4 que corresponde a un caudal de 4 gal/min. Efectuándose los siguientes cálculos: (Apéndice D, gráfica 7)

$$\Delta T = 61.5^{\circ}\text{C} - 51^{\circ}\text{C} = 10.5^{\circ}\text{C}$$

$$T(\tau) = T_e - 0.632(\Delta T)$$

$$T(\tau) = 61.5^{\circ}\text{C} - 6.636^{\circ}\text{C} = 54.864^{\circ}\text{C}$$

$$\tau = 5.7 \text{ min.}$$

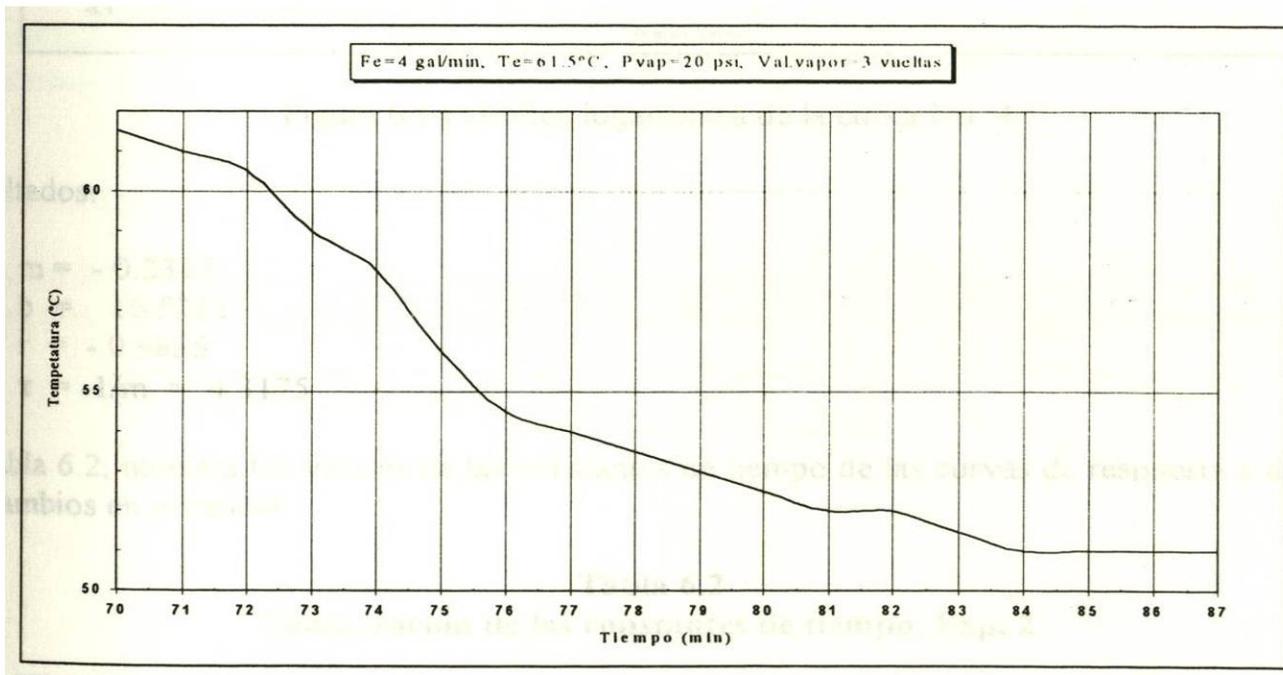


Figura 6.13 Curva de Respuesta para un caudal de 4 gal/min.

La figura 6.14 muestra la curva de reacción No. 4 en forma logarítmica.

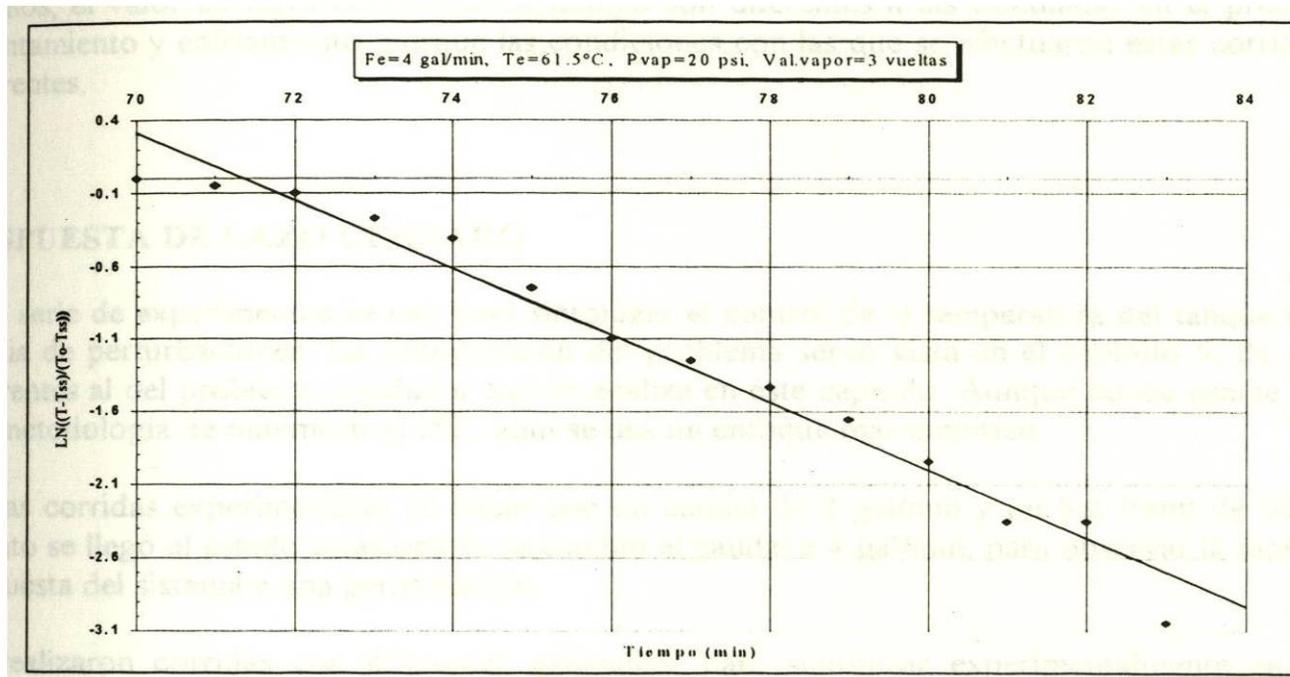


Figura 6.14 Gráfica logarítmica de la curva No. 4.

Resultados:

$$m = -0.2316$$

$$b = 16.5251$$

$$r = -0.9855$$

$$\tau = -1/m = 4.3175$$

La tabla 6.2, muestra los valores de las constantes de tiempo de las curvas de respuesta a diferentes cambios en el caudal.

Tabla 6.2
Comparación de las constantes de tiempo, Exp. 2.

Curva No.	Caudal (gal/min)	Método del 63.2 % (min)	Método logarítmico (min)
1	2 (se abre el vapor)	10	7.10
2	4	4.7	4.16
3	2	4.9	4.31
4	4	5.7	4.32

Como se puede observar en la tabla 6.2, la constante de tiempo de la curva No. 1 es de 7.10 min. siendo la más grande, esto se debe a que esta constante corresponde al arranque del sistema desde una temperatura ambiente y la constante de tiempo que corresponde a las curvas 2, 3 y 4 son muy

parecidas pues el sistema se encuentra a las mismas condiciones y los cambios en el caudal son los mismos, el valor de estas constantes de tiempo son diferentes a las calculadas en el proceso de calentamiento y enfriamiento, porque las condiciones con las que se efectuaron estas corridas son diferentes.

RESPUESTA DE LAZO CERRADO

Esta serie de experimentos se usó para sintonizar el control de la temperatura del tanque en presencia de perturbaciones. La sintonización del problema servo vista en el capítulo 5, da valores diferentes al del problema regulador que se analiza en éste capítulo. Aunque puede usarse la misma metodología de minimizar el ISE, aquí se usa un enfoque más empírico.

En las corridas experimentales se inició con un caudal de 2 gal/min y un Set Point de 50°C, en cuanto se llegó al estado estacionario se cambió el caudal a 4 gal/min, para observar la rapidez de respuesta del sistema a una perturbación.

Se realizaron corridas con diferentes ganancias, para sintonizar experimentalmente en forma aproximada el controlador.

Ganancia 0.5

La figura 6.15, muestra la gráfica que representa la respuesta de la temperatura con respecto a el tiempo con una ganancia de 0.5, llegando al estado estacionario con 4 gal/min a los 143 minutos.

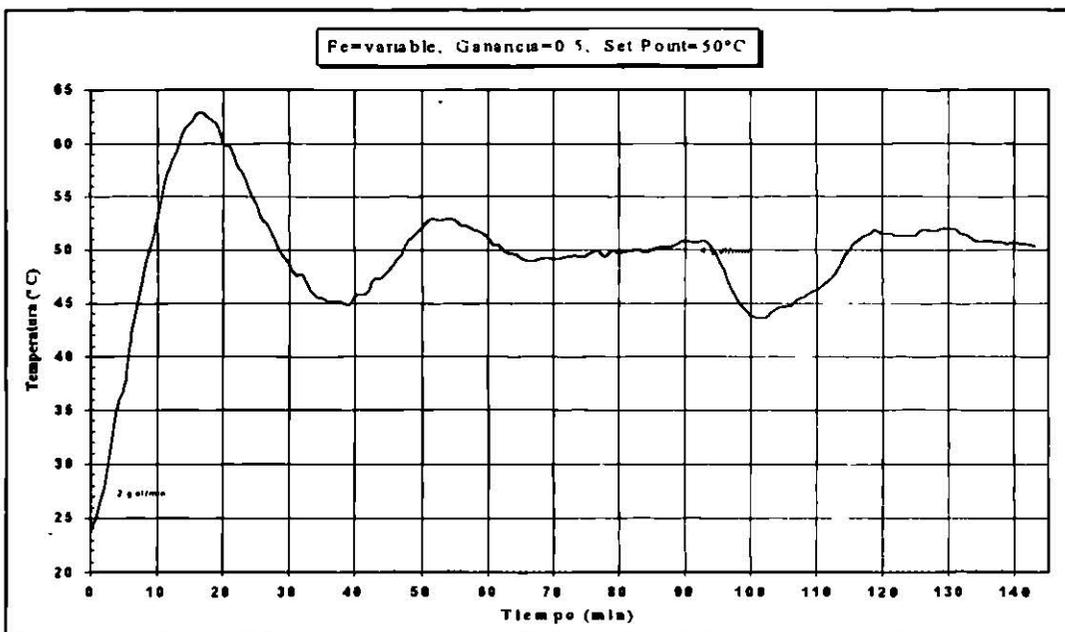


Figura 6.15 Control Automático. Ganancia = 0.5

La figura 6.16, muestra el comportamiento de la válvula neumática, donde se pueden apreciar las oscilaciones que tuvo la válvula neumática.

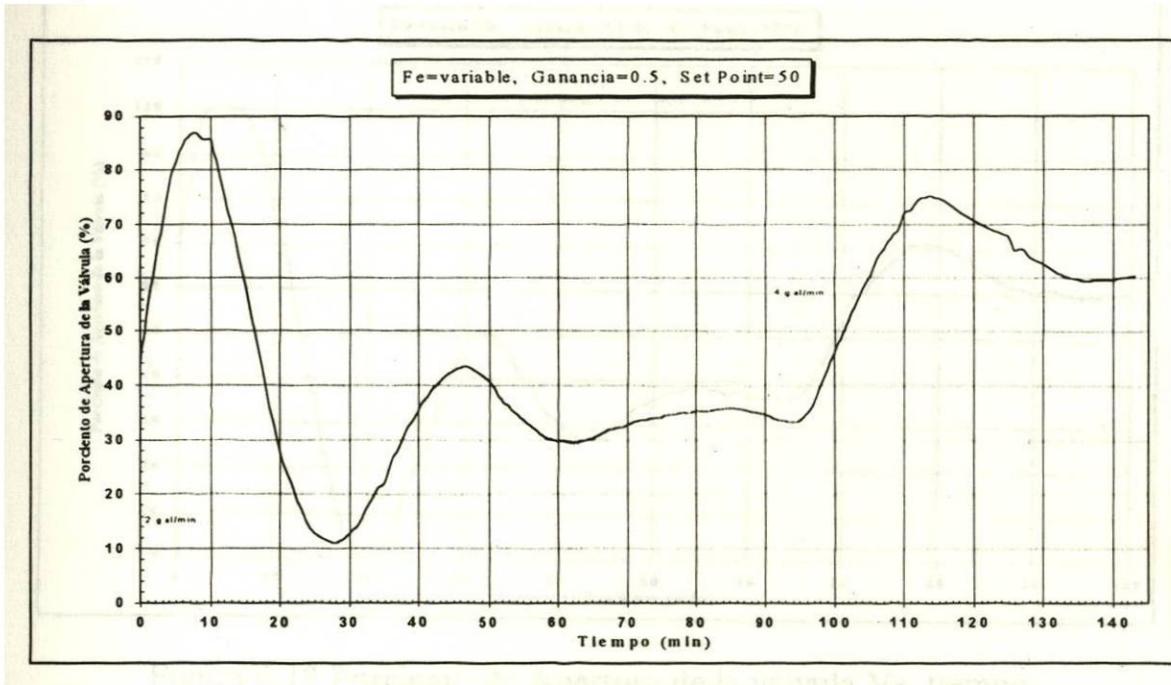


Figura 6.16 Porcentaje de Apertura de la válvula Vs. tiempo.

Ganancia 1.0

La figura 6.17, muestra el comportamiento del sistema con ganancia de 1.0, alcanzando el punto final a los 97 minutos.

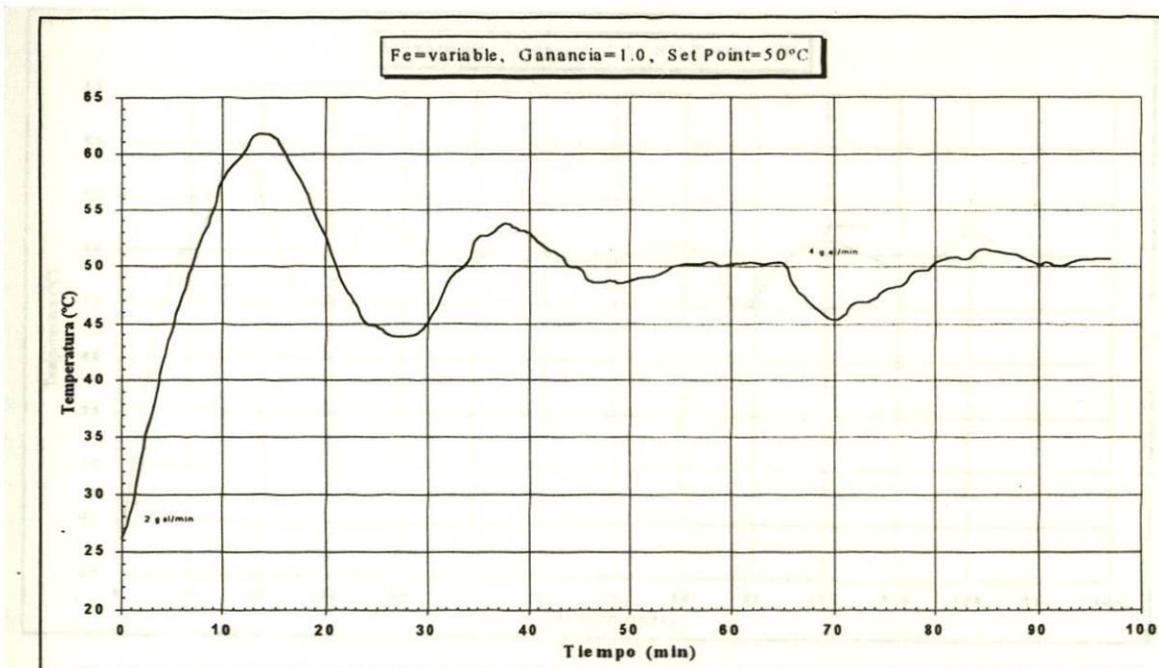


Figura 6.17 Control Automático. Ganancia = 1.0.

La figura 6.18, muestra las oscilaciones de la válvula neumática.

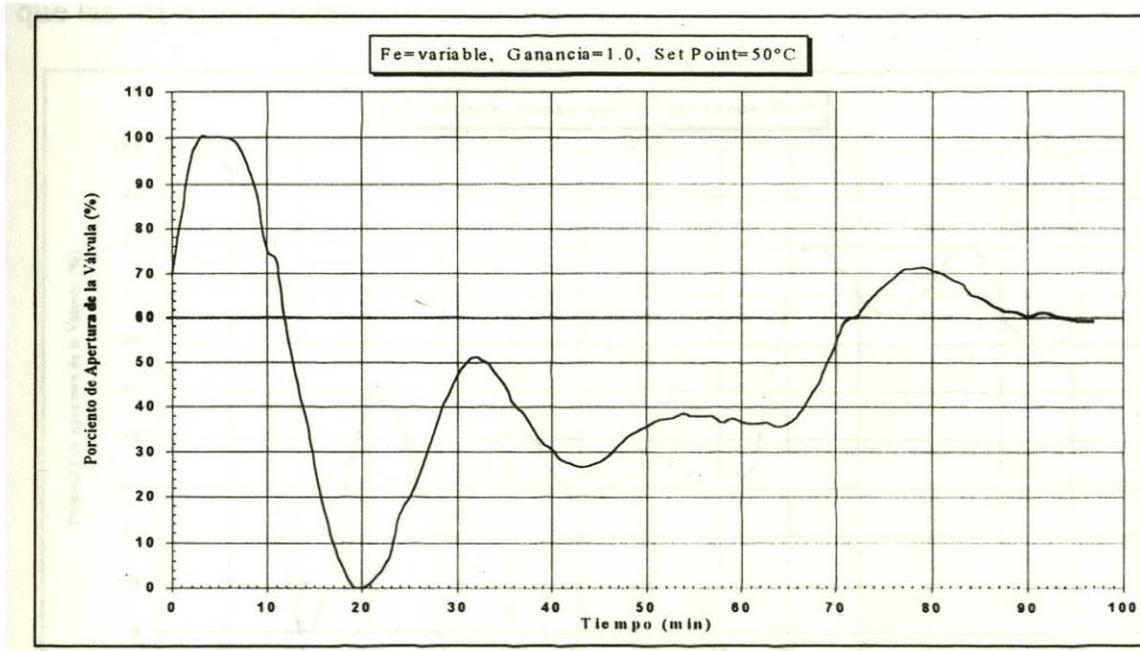


Figura 6.18 Porcentaje de Apertura de la válvula Vs. tiempo.

Ganancia 1.5

La figura 6.19, muestra la respuesta del sistema con ganancia 1.5, llegando al punto final con 133 minutos y la variación de la temperatura fue mayor que con las otras ganancias.

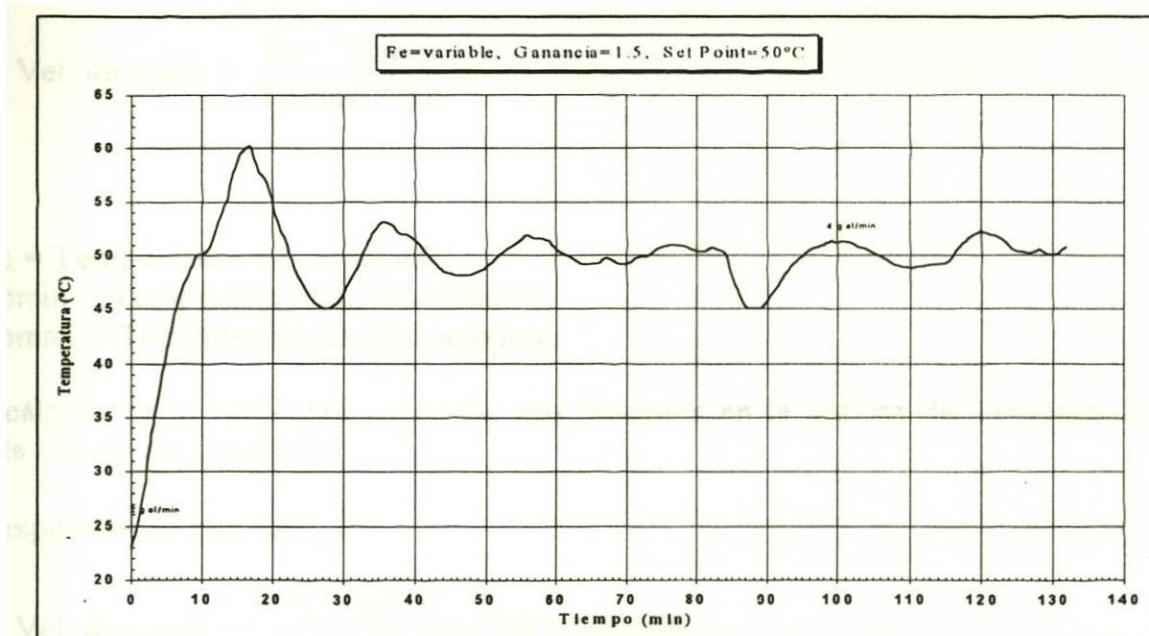


Figura 6.19 Control Automático. Ganancia = 1.5.

La figura 6.20, muestra la oscilación del porcentaje de apertura de la válvula neumática, siendo mayores que las otras ganancias.

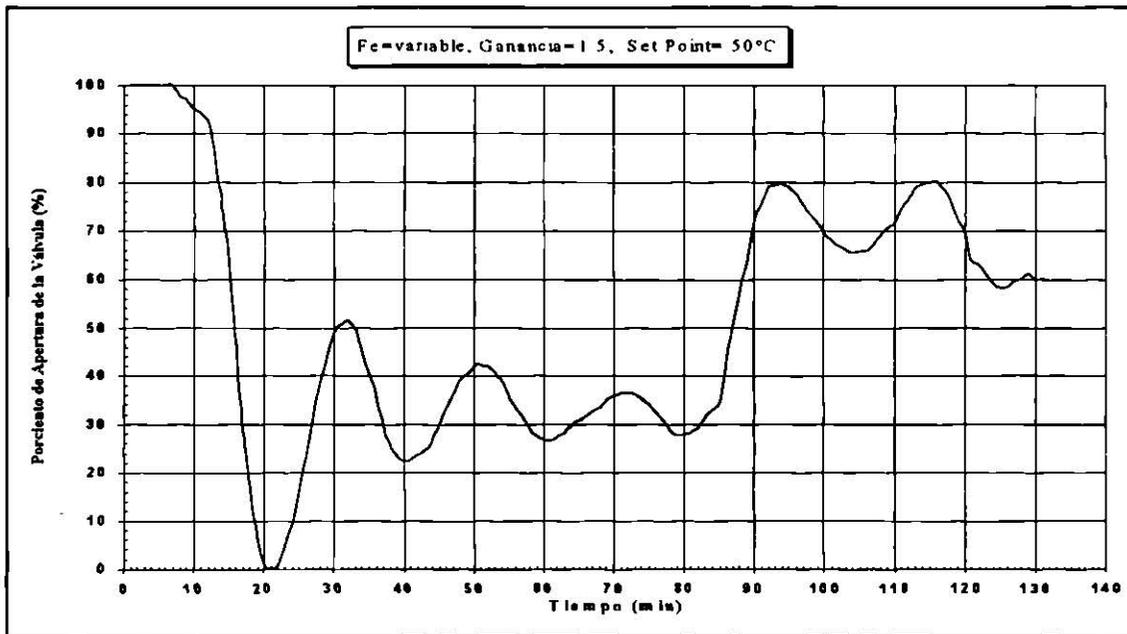


Figura 6.20 Porcentaje de Apertura de la válvula Vs. tiempo

Un procedimiento aproximado de sintonización experimental consiste en observar el porcentaje de velocidad de caída y el tiempo de respuesta t_s (Tiempo de Asentamiento).

La velocidad de caída se representa por la siguiente expresión:

$$\% \text{ Vel. de caída} = \frac{T_c - T_{pmin}}{T_{pmax} - T_c}$$

donde:

T_c = Temperatura de consigna.

T_{pmin} = Temperatura de pico mínimo.

T_{pmax} = Temperatura de pico máximo.

Para el cálculo de la velocidad de caída, nos basamos en la gráfica de Temperatura Vs Tiempo para cada una de las ganancias.

Para el experimento con $K=0.5$.

$$\% \text{ Vel. de caída} = \frac{50^\circ \text{ C} - 45^\circ \text{ C}}{63^\circ \text{ C} - 50^\circ \text{ C}} (100) = 38.46\%$$

Para $K=1$

$$\% \text{ Vel. de caída} = \frac{50^{\circ}\text{C} - 44^{\circ}\text{C}}{62^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}} (100) = 50 \%$$

Para $K=1.5$

$$\% \text{ Vel. de caída} = \frac{50^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}}{60^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}} (100) = 50 \%$$

El tiempo t_s es una variable más importante que la velocidad de caída, pues este tiempo indica la rapidez con la que el sistema alcanza establemente el punto de consigna.

La tabla 6.3, muestra los valores de la velocidad de caída y el tiempo t_s , para cada ganancia.

Tabla 6.3
Índices de funcionamiento del Lazo Cerrado
(Problema Regulador)

K	Vel. Caída (%)	t_s (min)
0.5	38.46	70
1.0	50	52
1.5	50	63

La figura 6.21, muestra gráficamente los valores reportados en la tabla.

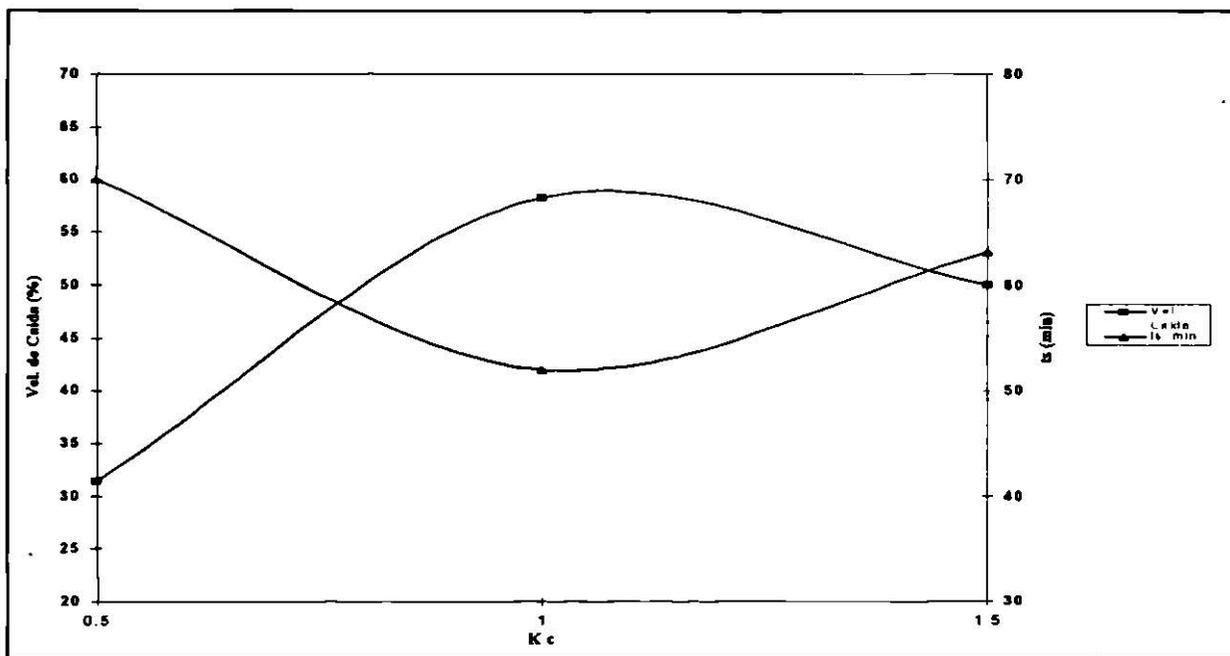


Figura 6.21 Efecto de la ganancia K_c .

De estos valores el mejor corresponde a la ganancia de 1.0, pues da el menor tiempo de respuesta, aunque la velocidad de caída no es tan buena (se considera adecuada un 25 %).

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

El equipo cumple perfectamente con los propósitos para los que fue diseñado y funciona sin ningún problema.

En el Semestre Agosto-Diciembre de 1995, se incluyeron las practicas 9 y 10 en el programa y el manual de practicas del Laboratorio de Control de Procesos, probándose con grupos de estudiantes; obteniéndose buenos resultados en la realización de estas practicas, coincidiendo las corridas y cálculos con los reportados en esta tesis.

Al realizar las corridas experimentales para conocer la respuesta del lazo abierto, se concluyó que la dinámica del proceso es de primer orden sin tiempo muerto, con dinámica despreciable para la válvula de diafragma.

La constante de tiempo calculada por diferentes métodos y para diferentes condiciones es pequeña y esto nos indica que la respuesta del proceso a la función de forzamiento es rápida.

Durante las corridas experimentales se presentan variaciones aleatorias (ruido) en el flujo de alimentación lo que dificulta mantener el nivel del tanque constante, por lo que se recomienda colocar en el tanque de calentamiento un lazo de control de flujo de calidad mediana.

Se realizó el diseño y la sintonización para los problemas *Servo* y *Regulador* por técnicas diferentes, para mostrar a los alumnos el uso de técnicas formales (ISE) y aproximadas (Tiempo de respuesta). Estas técnicas se incluirán en prácticas adicionales.

Los valores de los parámetros sintonizados, con los cuales se realizaron pruebas experimentales fueron los obtenidos mediante el problema Regulador, visto en la respuesta del lazo cerrado y la sintonización hecha en el capítulo 5, no se realizaron corridas experimentales con estos valores.

La continuación natural de este proyecto es la implementación de *Control Digital Directo* y *Técnicas Avanzadas* de Control.

BIBLIOGRAFÍA

- Bailey, "Manual de Uso del Controlador," (1991), , USA.
- Balzhiser Ricardo y Samuels Michael, R. (1979), "Termodinámica para Ingenieros," Prentice - Hall Internacional, México, pp. 147.
- Navarro Contreras, J., (1991), "Control de Procesos," UASLP, México.
- Navarro Contreras, J. y Escalante Mares, P. (1993), "Manual del Laboratorio de Control de Procesos," 3a. Edición, UASLP, México.
- Ogata, K. (1980), "Ingeniería de Control Moderno," Prentice - Hall Hispanoamérica, México, pp. 250-252, 240.
- Perry, R. (1993), "Manual del Ingeniero Químico," McGraw-Hill, México, pp.22-86 - 22-95.
- Smith, C. y Corripio, A. (1994). "Control Automático de Procesos," Limusa, México, pp. 91-100, 675-680.
- Ulrich, G. D. (1992), "Procesos de Ingeniería Química," McGraw-Hill, México, pp.188, 189.
- Zill, D. G. (1988), "Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones, " 2a. edición, Iberoamérica, México, pp. 469, 470.

APÉNDICE A: PRÁCTICA 9

CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA NO LINEAL (CALENTADOR DE VAPOR)

OBJETIVOS

Al finalizar esta práctica, el alumno será capaz de:

- 1) Obtener un modelo dinámico de *caja negra* a partir de la respuesta experimental.
- 2) Determinar los grados de libertad para el equipo.
- 3) Determinar las variables de entrada adecuadas.
- 4) Identificar la matriz de transferencia del sistema calentador (multivariable).
- 5) Identificar los elementos de la matriz de transferencia.
- 6) Proponer una estrategia de control apropiada.

MATERIAL Y EQUIPO REQUERIDOS

- a) Sistema de tanques de calentamiento integrado por:
 - Tanque de alimentación
 - Tanque de calentamiento con serpentín de vapor
 - Rotámetro
 - Bomba de alimentación
 - Alimentación de vapor (bypass)
- b) Cronómetro.
- c) Termómetro.

TEORÍA BÁSICA

Para el análisis y diseño de sistemas de control se requiere un modelo que represente el comportamiento cuantitativo del mismo.

El modelo de cualquier componente se puede obtener de dos formas básicas:

- a) Modelo Fenomenológico.
- b) Modelo de Caja Negra.

Investigue en que consisten cada uno de estos modelos.

En las prácticas anteriores se utilizó el primer método puesto que la respuesta obtenida es más general, y por lo tanto mas útil. El segundo método es el que se estudiará en ésta práctica, agregando un elemento más, el sistema multivariable.

Si se tiene el sistema de la Fig. A-1, se puede expresar matemáticamente de la forma siguiente:

$$\frac{dC_1}{dt} = f_1(E_1, E_2, E_3, \dots, C_1, C_2, \dots) \quad (\text{A-1a})$$

$$\frac{dC_2}{dt} = f_2(E_1, E_2, E_3, \dots, C_1, C_2, \dots) \quad (\text{A-1b})$$

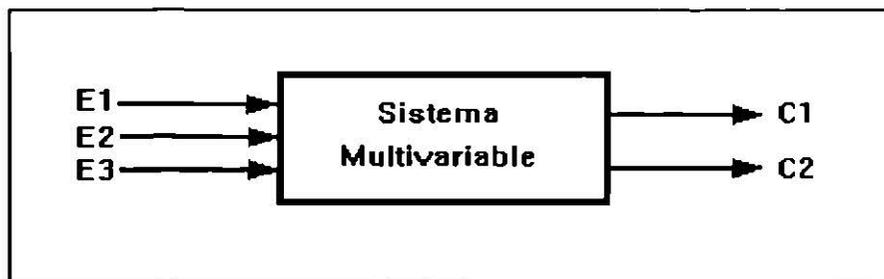


Figura A-1 Ejemplo de Sistema Multivariable.

donde las entradas E_1, E_2, E_3, \dots representan, variables de perturbación y/o manipulación, y C_1, C_2 son las variables de respuesta.

Si f_1 y f_2 son no-lineales, el primer paso es linealizarlas, expresándolas como variables de desviación alrededor de un cierto punto de operación, E_1^*, E_2^* , etc.

$$\frac{dc_1}{dt} = a_{11}e_1 + a_{12}e_2 + a_{13}e_3 + a_{14}c_1 + a_{15}c_2 \quad (\text{A-2a})$$

$$\frac{dc_2}{dt} = a_{21}e_1 + a_{22}e_2 + a_{23}e_3 + a_{24}c_1 + a_{25}c_2 \quad (\text{A-2b})$$

los términos a_{ij} son coeficientes constantes, que dependen del punto de operación seleccionado, que al transformar queda,

$$sC_1(s) = a_{11}E_1(s) + a_{12}E_2(s) + a_{13}E_3(s) + a_{14}C_1(s) + a_{15}C_2(s) \quad (\text{A-3a})$$

$$sC_2(s) = a_{21}E_1(s) + a_{22}E_2(s) + a_{23}E_3(s) + a_{24}C_1(s) + a_{25}C_2(s) \quad (\text{A-3b})$$

ésto representa un sistema de dos ecuaciones algebraicas, que se puede resolver simultáneamente, para $C_1(s)$ y $C_2(s)$,

$$C_1(s) = b_{11}E_1(s) + b_{12}E_2(s) + b_{13}E_3(s) \quad (\text{A-4a})$$

$$C_2(s) = b_{21}E_1(s) + b_{22}E_2(s) + b_{23}E_3(s) \quad (\text{A-4b})$$

donde los términos b_{ij} son funciones de s .

Estas ecuaciones pueden ser escritas en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} C_1(s) \\ C_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1(s) \\ E_2(s) \\ E_3(s) \end{bmatrix} \quad (\text{A-5})$$

o en forma condensada,

$$C = BE \quad (\text{A-6})$$

en éste caso, el orden máximo de los elementos b_{ij} es de 2, puesto que el sistema está formado por dos ecuaciones diferenciales de primer orden.

Grados de Libertad.

Para determinar la estrategia de control adecuada en equipos complicados; en especial, con múltiples entradas y salidas, es conveniente utilizar el criterio de grados de libertad. El número de grados de libertad de un equipo representado matemáticamente por un sistema de ecuaciones diferenciales, puede obtenerse así:

$$\begin{aligned} \text{Número de Grados de Libertad} &= \text{No. Total de Variables} - \text{No. de Ecuaciones} \\ &\quad - \text{No. de Relaciones Intrínsecas} \end{aligned}$$

Una vez determinado el número de grados de libertad, se especifican las variables que serán fijadas externamente, disminuyendo un grado de libertad por cada una. Finalmente, puesto que cada lazo de control representa una ecuación relacionando dos variables, cada lazo reduce una unidad el grado, el proceso termina cuando el equipo está completamente especificado (i.e. grados de libertad = 0).

MODELAMIENTO

La figura A-2 muestra el sistema a estudiar, el cual consiste en un tanque de acero inoxidable el cual contiene un serpentín de cobre por el cual fluye vapor de agua que sirve para calentar el agua del tanque y las corrientes de alimentación y descarga continuas.

Balace de Masa Global

El modelo matemático requiere hacer un balance de masa global alrededor del tanque, bajo las condiciones de operación continua y agitación vigorosa.

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} = \text{Acumulación} \quad (\text{A-7})$$

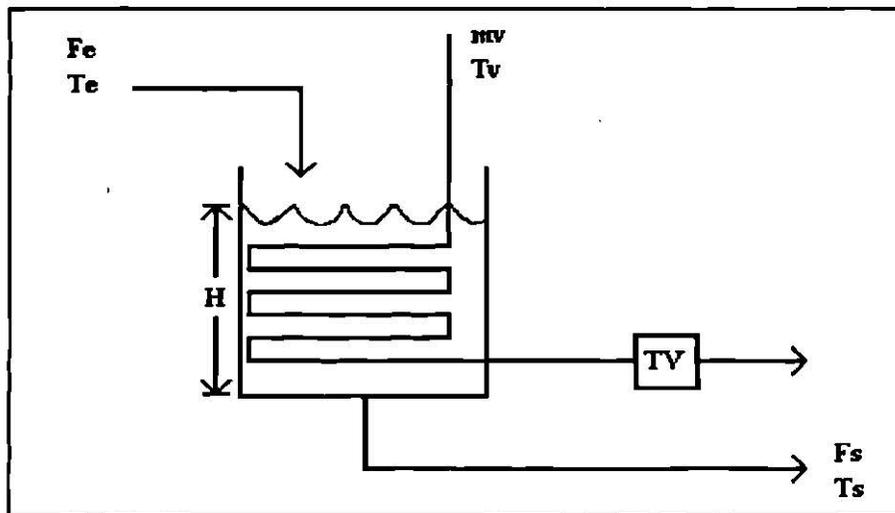


Figura A-2 Sistema a estudiar.

Realice el Balance de Masa del sistema, partiendo de la ecuación A-7, haciendo las suposiciones necesarias hasta llegar a la siguiente ecuación.

$$F_e - F_s = A \frac{dH}{d\theta} \quad (\text{A-8})$$

Para las condiciones de Estado Estacionario, el término de acumulación es cero y la ecuación anterior queda

$$F_e^* - F_s^* = 0 \quad (\text{A-9})$$

de donde se obtiene la igualdad de caudales en Estado Estacionario:

$$F_e^* = F_s^*$$

restando A-11 de A-10 término a término

$$(F_e - F_e^*) - (F_s - F_s^*) = A \frac{dh}{d\theta} \quad (\text{A-10})$$

definiendo las variables de desviación correspondientes

$$f_e = F_e - F_e^* \quad (\text{A-11a})$$

$$f_s = F_s - F_s^* \quad (\text{A-11b})$$

$$h = H - H^* \quad (\text{A-11c})$$

$$dh = dH \quad (\text{A-11d})$$

Sustituyendo en la ecuación A-12

$$f_e - f_s = A \frac{dh}{d\theta} \quad (\text{A-12})$$

Por otra parte, se sabe que el gasto a la descarga depende de la carga hidrostática en el fondo del tanque, y es función del nivel en el mismo. Esta relación se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli y la ecuación de velocidad para flujo de fluidos.

$$F_s = k_1 \sqrt{H} \quad (\text{A-13})$$

Linealizando la ecuación

$$f_s = C_1 h \quad (\text{A-14})$$

donde C_1 es la constante de linealización, definida como

$$C_1 = \left. \frac{\partial F_s}{\partial H} \right|_{c.o.} = \frac{K_1}{2\sqrt{H}}$$

las condiciones de operación son las del Estado Estacionario. La sustitución en A-14 da

$$f_e - C_1 h = A \frac{dh}{d\theta} \quad (\text{A-15})$$

dándole vuelta y despejando el área del tanque, A, se obtiene el modelo buscado

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{1}{A} f_e - \frac{C_1}{A} h \quad (\text{A-16})$$

con

$$h(0) = 0$$

por la selección de las condiciones iniciales en Estado Estacionario, expresadas como variables de desviación.

Balance Global de Energía

Se efectúa el Balance de Energía para el líquido del tanque.

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} = \text{Acumulación} \quad (\text{A-17})$$

Partiendo de la ecuación A-17, realice el Balance de Energía y haga las suposiciones necesarias hasta llegar a la siguiente ecuación.

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{F_e \rho_e C_{p_e} T_e}{\rho C_p A H} - \frac{F_e \rho C_p T}{\rho C_p A H} + \frac{M v \lambda}{\rho C_p A H} \quad (\text{A-18})$$

eliminando ρ y C_p , dado que $\rho_e \approx \rho_s$; $C_{p_e} \approx C_{p_s}$, por ser un líquido incompresible.

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{F_e T_e}{A H} - \frac{F_e T}{A H} + \frac{\lambda M v}{\rho C_p A H} = \Phi_2(F_e, T_e, T, M v, H) \quad (\text{A-19})$$

Si se linealiza y se sustituyen las variables de desviación definidas en seguida:

$$\frac{dT}{d\theta} = C_2 f_e + C_3 t_e + C_4 t + C_5 m v + C_6 h \quad (\text{A-20})$$

donde:

$$mv = Mv - Mv^* \quad (\text{A-21a})$$

$$f_e = F_e - F_e^* \quad (\text{A-21b})$$

$$t_e = T_e - T_e^* \quad (\text{A-21c})$$

$$t = T - T^* \quad (\text{A-21d})$$

$$dt = dT \quad (\text{A-21e})$$

Y las constantes se definen como:

$$C_2 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial F_e} \right|_{c.o} \quad (\text{A-22a})$$

$$C_3 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T_e} \right|_{c.o} \quad (\text{A-22b})$$

$$C_4 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T} \right|_{c.o} \quad (\text{A-22c})$$

$$C_5 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial Mv} \right|_{c.o} \quad (\text{A-22d})$$

$$C_6 = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial H} \right|_{c.o} \quad (\text{A-22e})$$

Linealizando la ecuación del balance de masa y resolviendo las dos ecuaciones linealizadas por sustitución.

$$\frac{dh}{d\theta} = a_{12}h + a_{13}f_e \quad (\text{A-23})$$

$$\frac{dt}{d\theta} = a_{21}t + a_{22}h + a_{23}f_e + a_{24}t_e + a_{25}mv \quad (\text{A-24})$$

Donde los coeficientes a_{ij} preparan una estructura matricial

$$a_{21} = C_4 \quad (\text{A-25a})$$

$$a_{22} = C_6 \quad (\text{A-25b})$$

$$a_{12} = -\frac{C_1}{A} \quad (\text{A-25c})$$

$$a_{13} = \frac{1}{A} \quad (\text{A-25d})$$

Transformando las ecuaciones A-32 y A-33

$$sH(s) = a_{12}H(s) + a_{13}F_e(s) \quad (\text{A-25})$$

$$sT(s) = a_{21}T(s) + a_{22}H(s) + a_{23}F_e(s) + a_{24}T_e(s) + a_{25}Mv(s) \quad (\text{A-27})$$

despejando H(s) de la transformada del balance de masa

$$H(s) = \frac{a_{13}F_e(s)}{s - a_{12}} \quad (\text{A-28})$$

sustituyendo en la ecuación transformada del balance de energía

$$sT(s) = a_{21}T(s) + a_{22}\left(\frac{a_{13}F_e(s)}{s - a_{12}}\right) + a_{23}F_e(s) + a_{24}T_e(s) + a_{25}Mv(s) \quad (\text{A-29})$$

y factorizando

$$T(s)(s - a_{21}) = a_{22}\left(\frac{a_{13}F_e(s)}{s - a_{12}}\right) + a_{23}F_e(s) + a_{24}T_e(s) + a_{25}Mv(s) \quad (\text{A-30})$$

despejando T(s)

$$T(s) = \frac{a_{22}a_{13}F_e(s)}{(s - a_{21})(s - a_{12})} + \frac{a_{23}F_e(s)}{(s - a_{21})} + \frac{a_{24}T_e(s)}{(s - a_{21})} + \frac{a_{25}Mv(s)}{(s - a_{21})} \quad (\text{A-31})$$

$$T_{(s)} = \frac{a_{22}a_{13}F_e(s)}{(s - a_{21})(s - a_{12})} + \frac{a_{23}F_e(s)(s - a_{12})}{(s - a_{21})(s - a_{12})} + \frac{a_{24}T_e(s)}{(s - a_{21})} + \frac{a_{25}Mv(s)}{(s - a_{21})} \quad (\text{A-32})$$

$$T_{(s)} = \frac{[a_{22}a_{13} + a_{23}(s - a_{12})]F_e(s)}{(s - a_{21})(s - a_{12})} + \frac{a_{24}T_e(s)}{(s - a_{21})} + \frac{a_{25}Mv(s)}{(s - a_{21})} \quad (\text{A-33})$$

METODOLOGÍA

Experimento 1 : Efecto de las variaciones del vapor

- 1.- Llenar el tanque hasta el nivel deseado.
- 2.- Prender el motor del agitador.
- 3.- Ajustar la válvula de apertura de la descarga a 1.5 vueltas aproximadamente, para un gasto de 2 gal/min(0.1261 lt/s), para mantener un nivel estable en el tanque.
- 4.- Bypasear la válvula neumática, cerrando la válvula anterior a esta.
- 5.- Abrir la válvula manual de vapor solo lo que el instructor señale, manteniendo en la línea de vapor una presión constante de 20 psi.
- 6.- Tomar lecturas de temperatura cada minuto del agua del tanque hasta llegar al estado estacionario.
- 7.- Una vez que se llegó al estado estacionario, cerrar la válvula de vapor por completo y repetir el paso 6.

Experimento 2 : Efecto de cambios en la carga (Caudal de alimentación)

- 1.- Repetir los pasos del 1 al 5, con un flujo de alimentación de 2 gal/min(0.1261 lt/s). La tabla A-1, muestra la apertura aproximada de la válvula de descarga del tanque.

Tabla A-1
Apertura de válvula de descarga a diferentes caudales de alimentación

Caudal	Apertura de válvula de descarga
2 gal/min.	1.5 vueltas (Aprox.)
4 gal/min	2.75 vueltas (Aprox.)

- 2.- Tomar lecturas de temperatura cada minuto hasta llegar al estado estacionario.
- 3.- Aumentar el flujo de alimentación a 4 gal/min(0.2523 lt/s) y repetir el paso 2.
- 4.- Disminuir el flujo de alimentación a 2 gal/min y repetir el procedimiento con 4 gal/min.

CÁLCULOS

Para ambos experimentos:

- 1.- Obtener la gráfica de temperatura contra tiempo.
- 2.- Obtener una gráfica por cada cambio escalón.
- 3.- Calcular la constante de tiempo τ por el método del 63.2% de la respuesta.

4.- Linealizar los resultados con la siguiente ecuación:

$$\text{LN}\left(\frac{T - T_{ss}}{T_0 - T_{ss}}\right)$$

donde:

T = Temperatura del sistema.

T_{ss} = Temperatura en estado estacionario.

T₀ = Temperatura inicial.

y calcular la constante de tiempo teórica por medio de la pendiente, determine el coeficiente de correlación.

5.- Calcule los grados de libertad.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

NOMENCLATURA

F_e = Caudal de entrada en m³/s

F_s = Caudal de salida en m³/s

ρ = Densidad del liquido a usar en kg/m³

V = Volumen del tanque en m³

θ = Tiempo (s)

H = Nivel del tanque en m

T_e = Temperatura de entrada en °C

T_s = Temperatura de salida en °C

Mv = Gasto másico de vapor de agua kg/s

APÉNDICE B: PRÁCTICA 10

CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA CALENTADOR DE AGUA MEDIANTE VAPOR

OBJETIVOS

Al finalizar esta práctica el alumno será capaz de:

- 1) Identificar y describir físicamente el funcionamiento de los componentes del lazo de control.
- 2) Analizar el efecto de un cambio impulso.
- 3) Comprender la diferencia entre Regulación Automática y Servomecanismo.
- 4) Sintonizar un controlador PID de manera aproximada.

MATERIAL REQUERIDO

- a) Sistema de tanques integrado por:
 - Tanque de alimentación
 - Tanque de calentamiento con serpentín de vapor
 - Rotámetro
 - Bomba de alimentación
- b) Lazo de control integrado por:
 - Controlador marca BAILEY.
 - Sensor de Temperatura RTD de Platino con Resistencia de 100 Ohm.
 - Válvula Neumática con posicionador marca FISHER.
- c) Medidores auxiliares:
 - Cronómetro.
 - Termómetro.

TEORÍA BÁSICA

La Figura B-1 muestra el diagrama de control a estudiar en esta práctica, en el cual podemos observar los elementos del Lazo de control.

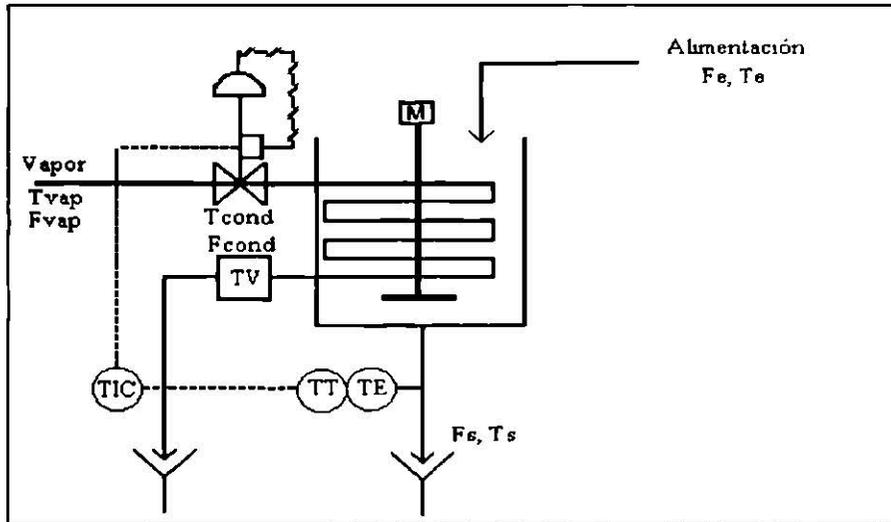


Figura B-1 Diagrama de Control.

Descripción del Equipo de Control

Investigue que tipo de instrumentos forman el Lazo de Control y su funcionamiento.

Estrategia de Control

La estrategia de control que se utiliza se puede observar en la figura B-2.

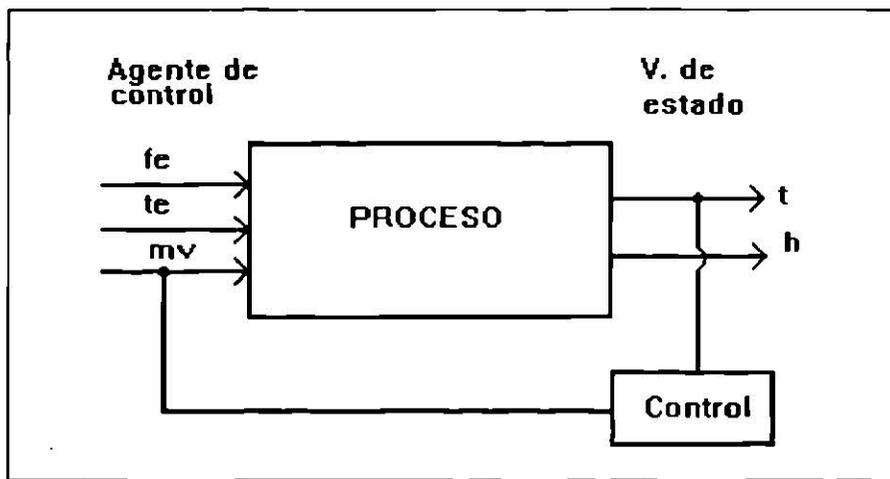


Figura B-2 Estrategia de Control

La temperatura de salida del tanque o variable controlada es la única que se emplea en el lazo de control, pues la altura o nivel del tanque, se puede mantener aproximadamente constante.

La temperatura se mide con un sensor-transmisor(RTD) el cual genera una señal de resistencia (Ohms), proporcional a la temperatura, la señal del transmisor o medición se envía al controlador, donde se compara contra el punto de control, entonces la función del controlador es generar una señal de salida o variable manipulada, con base en el error o diferencia entre la medición y el punto de control.

La señal de salida del controlador se conecta al posicionador de la válvula, el cual convierte la señal del controlador que es de corriente a presión (I/P), y esta señal de presión se conecta al actuador de diafragma del elemento final de control (válvula neumática) y así es como se regula el caudal de vapor que entra por el serpentín de cobre.

El control que se utiliza es retroalimentado, en este tipo de control se toma la temperatura de salida del tanque y se retroalimenta al controlador para que este pueda tomar una decisión.

Hay dos conceptos importantes de distinguir en un proceso de control automático son:

- a) Regulación Automática.
- b) Servomecanismo.

Investigue en que consisten estos dos conceptos.

MODELAMIENTO

De la practica 9, se obtuvo el siguiente modelo matemático del sistema.

$$T(s) = \frac{[a_{22}a_{13} + a_{23}(s - a_{12})]}{(s - a_{21})(s - a_{12})} F_c(s) + \frac{a_{24} T_c(s)}{(s - a_{21})} + \frac{a_{25} Mv(s)}{(s - a_{21})} \quad (\text{B-1})$$

Los valores de las constantes a_{ij} evaluadas a las condiciones normales de operación, son los siguientes:

$$a_{12} = \left. \frac{\partial \Phi_1}{\partial H} \right|_{\text{CN}} = -\frac{C_1}{A} = -\frac{K_1}{2A\sqrt{H^*}} \quad ; \text{ donde } C_1 = \frac{\partial F}{\partial H} = \frac{K_1}{2\sqrt{H}}$$

$$a_{13} = \left. \frac{\partial \Phi_1}{\partial F_c} \right|_{\text{CN}} = \frac{1}{A}$$

$$a_{21} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T} \right|_{CN} = - \left. \frac{F_e}{AH} \right|_{CN} = - \frac{F_e^*}{AH^*}$$

$$a_{22} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial H} \right|_{CN} = - \frac{F_e T_e}{AH^2} + \frac{F_e TA}{A^2 H^2} - \frac{\lambda m_v \rho C_p}{\rho^2 C_p^2 H^2}$$

Reduciendo

$$a_{22} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial H} \right|_{CN} = - \frac{F_e^* T_e^*}{AH^{*2}} + \frac{F_e^* T^*}{AH^{*2}} - \frac{\lambda m^*_v}{\rho C_p H^{*2}}$$

$$a_{23} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial F_e} \right|_{CN} = \left. \frac{T_e}{AH} - \frac{T}{AH} \right|_{CN} = \frac{T_e^* - T^*}{AH^*}$$

$$a_{24} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial T_e} \right|_{CN} = \left. \frac{F_e}{AH} \right|_{CN} = \frac{F_e^*}{AH^*}$$

$$a_{25} = \left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial Mv} \right|_{CN} = \left. \frac{\lambda}{\rho C_p H} \right|_{CN} = \frac{\lambda}{\rho C_p H^*}$$

Modelo del Sensor-Transmisor

Este componente tiene una gran rapidez de respuesta comparada con el proceso y se diseña para que se obtenga una respuesta lineal, de modo que puede modelarse como una ganancia simple:

$$\frac{I_s(s)}{T(s)} = K_s \quad (B-2)$$

Modelo del Elemento de Entrada

Por Elemento de Entrada se entiende el circuito encargado de convertir la respuesta deseada a la señal electrónica que proviene del sensor-transmisor (i.e. corriente en mA), para garantizar la concordancia entre ambas

$$\frac{I_r(s)}{Td(s)} = K_s \quad (B-3)$$

Modelo del Comparador

En el Controlador se reciben las señales anteriores y se comparan para determinar el error instantáneo, esa sección interconstruida puede representarse mediante

$$E(s) = I_r(s) - I_s(s) \quad (\text{B-4})$$

Modelo del Controlador

La función de control propiamente dicha se implementa mediante una circuitería relativamente compleja, que para el caso PID, en último término puede representarse como

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (\text{B-5})$$

Modelo del Elemento Final de Control

En este caso están integrados el posicionador y la válvula de diafragma, la señal de manipulación generada en el controlador modifica el flujo de vapor que se alimenta al serpentín. Un modelo estándar para su dinámica es considerarlo un sistema de primer orden.

$$\frac{M_v(s)}{M(s)} = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (\text{B-6})$$

Aun cuando τ_v usualmente es pequeño con respecto a la constante de tiempo de la planta.

Elabore el Diagrama de Bloques General del Sistema de Control de Temperatura en el Calentador, mediante la unión de los bloques de los componentes individuales que lo conforman.

Sustituyendo en la ecuación general, los modelos de cada uno de los componentes individuales.

$$\begin{aligned}
 T_s = & \frac{K_s K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{K_v}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)}{1 + K_v K_s K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)} T_d(s) + \\
 & + \frac{\frac{a_{22} a_{13} + a_{23} (s - a_{12})}{(s - a_{12})(s - a_{21})}}{1 + K_v K_s K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)} F_c(s) + \\
 & + \frac{\frac{a_{24}}{(s - a_{21})}}{1 + K_v K_s K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1} \right) \left(\frac{a_{25}}{s - a_{21}} \right)} T_c(s) \tag{B-7}
 \end{aligned}$$

Donde se distinguen tres términos, el primero corresponde a la respuesta servo y los restantes a la respuesta regulada; aunque ambas pueden presentarse simultáneamente.

Se cambia el signo de a_{21} por ser intrínsecamente positivo y definiendo K_p y τ_p por las siguientes expresiones:

$$K_p = \frac{a_{24}}{a_{21}} = \frac{a_{25}}{a_{21}} \tag{B-8}$$

$$\tau_p = \frac{1}{a_{21}} \tag{B-9}$$

Se sustituye K_p y τ_p en la ecuación B-7

$$\begin{aligned}
 T_s = & \frac{K_s K_c K_p K_v \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)}{1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)} T_d(s) + \\
 & + \frac{\frac{a_{22} a_{13} + a_{23}(s - a_{12})}{(s - a_{12})(s + a_{21})}}{1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right)} F_c(s) + \\
 & + \frac{K_p}{(\tau_p s + 1)} T_c(s) \tag{B-10}
 \end{aligned}$$

Donde se distinguen tres términos, el primero corresponde a la respuesta servo y los restantes a la respuesta regulada; aunque ambas pueden presentarse simultáneamente

Función Característica

El denominador de ambos términos es el mismo y se le llama **Función Característica del Sistema de Control**

$$1 + K_v K_s K_c K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{\tau_v s + 1}\right) \left(\frac{1}{\tau_p s + 1}\right) = 0 \tag{B-11}$$

Esta ecuación es especialmente importante porque determina las características más importantes de la respuesta del sistema de control.

METODOLOGÍA

- 1.- Verificar que haya vapor y aire.
- 2.- Prender la bomba de agua y llenar hasta el nivel marcado.
- 3.- Prender el motor del agitador.
- 4.- Ajustar la válvula de apertura de la descarga a 1.5 vueltas que corresponde a 2 gal/min(0.1261 lt/s) de caudal de agua de entrada para mantener el nivel de agua constante en el nivel indicado.
- 5.- Verificar las válvulas para que el caudal de vapor pase por la válvula neumática.
- 6.- Prender el controlador.
- 7.- Abrir la válvula del aire.

- 8.- Cambiar de control manual a control automático presionando el botón  , de la carátula del controlador. (figura B-4)

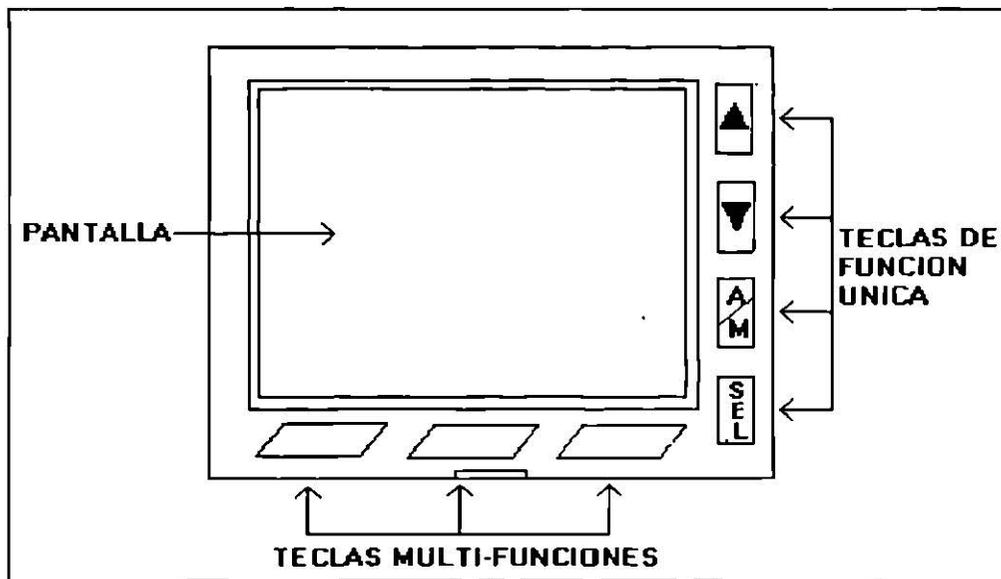


Figura B-4 Carátula del controlador.

- 9.- Con la tecla SEL posicionar el cursor en la segunda opción SP (Set Point) y con las flechas introducir el valor de 50, que se será el valor del Set Point. Presionando nuevamente la tecla SEL posicionar el cursor en tercera opción CO (Control a la salida) que nos indica el porcentaje de apertura de la válvula.
- 10.- Abrir la válvula de la línea de vapor y verificar que la presión sea mayor de 30 psias. La válvula de la línea del vapor no se controlará, solo se abrirá al máximo.
- 11.- En el momento de abrir la válvula de la línea de vapor, se comienza a tomar el tiempo con el cronómetro y se toma la temperatura en ese momento y cada minuto se tomará temperatura y porcentaje de apertura de la válvula.

12.- Cuando la temperatura del tanque permanezca constante en el Set Point por 10 minutos, se va a cambiar el caudal de agua a la entrada a 4 gal/min(0.2523 lt/s) y también se debe ajustar la válvula de descarga del tanque a 2.75 vueltas.

15.- Continuar tomando temperaturas y porcentaje de apertura de la válvula neumática hasta alcanzar nuevamente el Set Point.

CÁLCULOS.

- 1.- Graficar Temperatura contra Tiempo.
- 2.- Graficar porcentaje de apertura de la válvula contra tiempo.
- 3.- Calcular los parámetros de los componentes del lazo de control.
- 4.- Calcular la respuesta esperada.
- 5.- Calcular la constante de tiempo.
- 6.- Trazar un diagrama de bloques del sistema de control completo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

NOMENCLATURA

F_e = Caudal de entrada en m^3/s

F = Caudal de salida en m^3/s

ρ = Densidad del liquido a usar en kg/m^3

V = Volumen del tanque en m^3

θ = Tiempo (s)

H = Nivel del tanque en m

T_e = Temperatura de entrada en $^{\circ}C$

T = Temperatura de salida en $^{\circ}C$

M_v = Gasto másico de vapor de agua kg/s

APÉNDICE C: MANEJO DEL CONTROLADOR

El controlador usado en el laboratorio de control de procesos es un modelo industrial estándar tipo CPC01, marca BAILEY, es un instrumento multifunciones. Controla variables de proceso como flujo, nivel, temperatura y presión.

El controlador tiene opciones para poder trabajar con control manual o automático, y estar monitoreando el proceso.

La programación del controlador permite personalizarlo para determinadas condiciones, tiene tres opciones de control PID, PI y proporcional. Los tres tipos de salidas de control son: Voltaje, corriente y contacto.

DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR

El dibujo C-1, muestra los componentes del controlador .

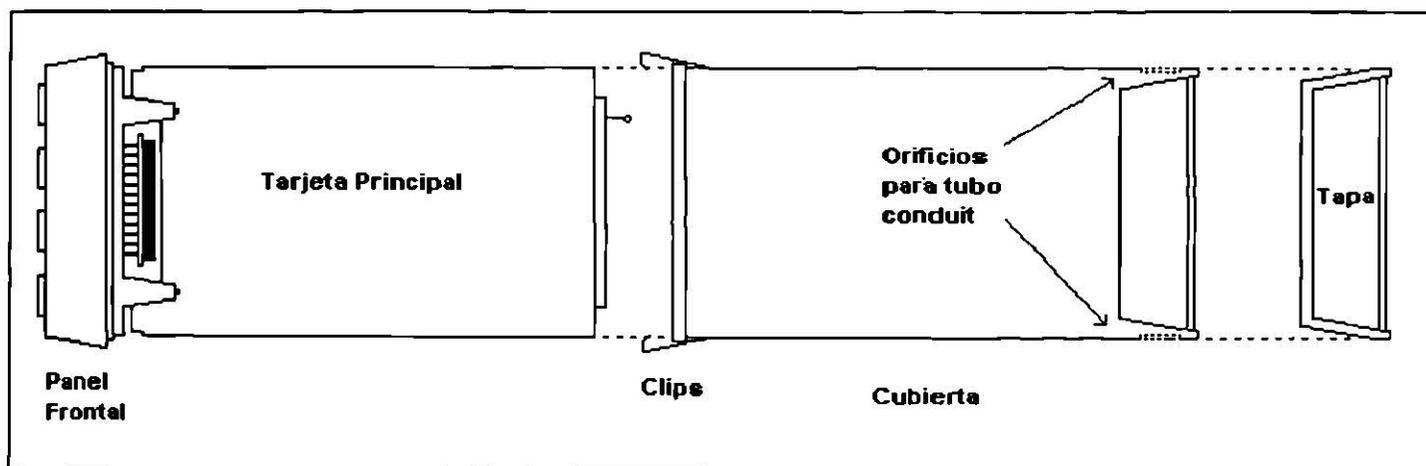


Figura C-1 Componentes del Controlador.

El ensamblaje básico del controlador se compone por la tarjeta principal y el panel frontal. La cubierta tiene dos clips que se aseguran del panel frontal. La cubierta tiene dos entradas para tubo conduit para las conexiones eléctricas.

La figura C-2 muestra el panel de control, el panel contiene cuatro teclas de función sencilla, las cuales se encuentran a la derecha de la pantalla. Estas teclas ayudan a cambiar un valor o cambiar de pantalla, elegir entre operación automática y manual.

▲ ▼ Estas teclas controlan el movimiento del cursor. También cambian la selección en las pantallas y seleccionan los valores de los parámetros.

A/M Esta tecla permite la elección entre operación automática y manual.

SEL Esta tecla permite seleccionar parámetros en los submenús y resalta lo seleccionado.

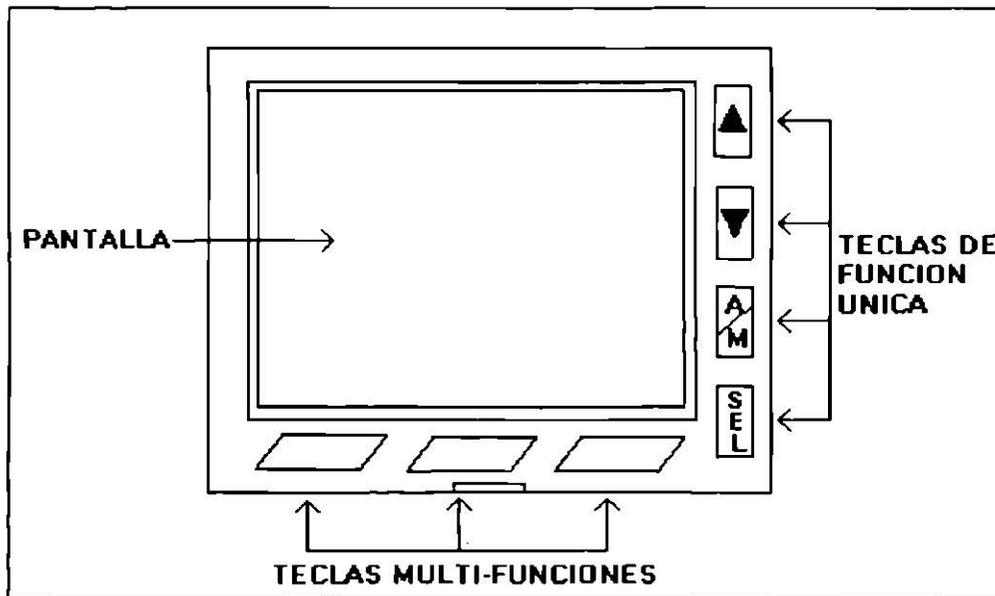


Figura C-2. Carátula.

Las tres teclas que están abajo de la pantalla son multifunciones. Su función específica es definida según la gráfica o la pantalla que se este utilizando. Presionando cualquiera de esas teclas muestra el menú multifunciones. Presionando la tecla que está debajo de la opción del menú, la opción es activada.

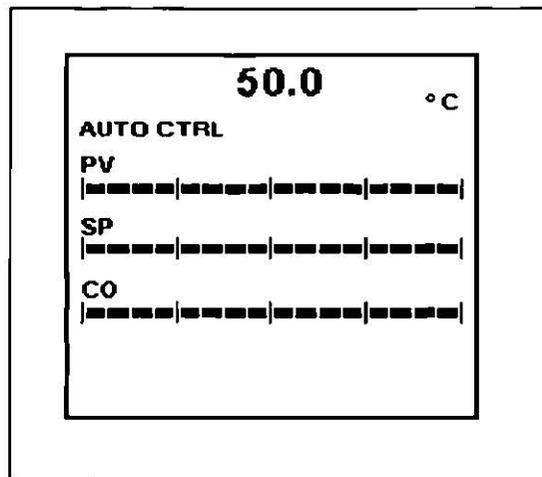
Las opciones que aparecen en el menú multifunciones son:

MAIN MENU	Muestra el menú principal.
ALARM SUM	Muestra un sumario de alarmas.
PREV SCRN	Regresa a la pantalla anterior.
NEXT SCRN	Muestra la próxima pantalla.
PROC DSPLY	Regresa a la pantalla process display (Monitoreo del Proceso).
ENTER	Permite confirmar una selección hecha cuando se ejecuta un procedimiento.
ESC	Permite abortar el presente procedimiento.

MONITOREO DEL PROCESO (PROCESS DISPLAY)

Cuando se enciende el controlador, la pantalla process display es la que se muestra por default, espere que se quite el mensaje PLEASE WAIT(Por favor espere). Esta pantalla muestra información sobre el proceso, tales como la variable del proceso (PV), Set Point (ST), control de salida (CO, el cual esta dado en porciento de apertura de la válvula) y el mensaje cuando la alarma se activa.

Para poder entrar a esta pantalla desde cualquier ambiente en el que se encuentre, se presiona una tecla multifunciones y se selecciona la tecla que tenga la opción PROC DSPLY. No hay niveles de seguridad asociados con esta pantalla.



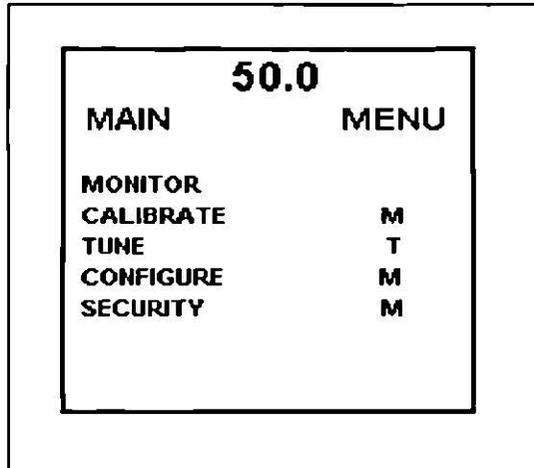
Pantalla Process Display

MENÚ PRINCIPAL (MAIN MENU)

Para entrar al menú principal se presiona una tecla multifunción y aparecen las opciones para cada tecla, se selecciona MAIN MENU. Este menú permite la entrada a todos los ambientes, excepto al process display. En este menú se muestran los diferentes niveles de seguridad para cada ambiente.

Los niveles de seguridad son password que se le asignan a cada ambiente. Hay dos niveles de seguridad que son: Maestro y Técnico. El password Maestro se asigno para los ambientes más delicados como Calibración, Configuración y Seguridad, en donde cualquier cambio por error de algún valor, puede conducirnos a fallas en el sistema de control. El password Técnico se le asigno al ambiente Sintonización(TUNE), en el cual se le pueden hacer cambios pero estos cambios no quedan grabados en el programa del controlador. El ambiente monitor no tiene nivel de seguridad.

El password con nivel Maestro puede entrar a cualquier ambiente independientemente que el nivel asignado a ese ambiente sea Técnico.

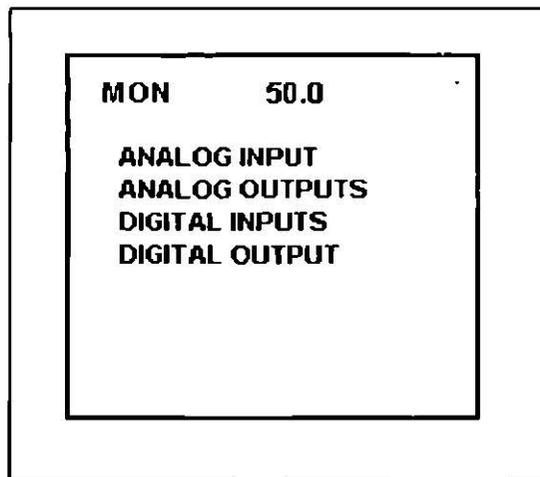


Menú Principal

MONITOR

Este ambiente permite observar las salidas análogas y digitales. Es solo para monitorear y solo se puede entrar de el menú principal. No hay niveles de seguridad asociados con este ambiente.

- 1.- Del menú principal, seleccionar MONITOR y presionar SEL.
- 2.- De la pantalla que aparece se selecciona la opción que se quiera observar.



Pantalla Menú Monitor

3.- Ya que se observo el grupo seleccionado, se presiona una tecla multifunción y en el menú multifunciones, presionar PREV SCREEN y el controlador regresa a la pantalla MONITOR.

4.- Repetir el paso 2 y 3, ya se haya completado el monitoreo, se puede regresar al menú principal o a la pantalla process display, presionando una tecla multifunción y del menú seleccionar PROC DSPLY o MAIN MENU.

CALIBRACIÓN (CALIBRATE)

El controlador se debe calibrar después de la instalación y cuando se le haya cambiado el tipo de entrada o salida.

El controlador tiene dos tipos de calibraciones, Proceso y Banco. La calibración de Proceso se realiza en un punto, realizada en la entrada análoga mientras el controlador ejecuta la configuración.

La calibración de Banco es una calibración de dos puntos, realizada en la entrada y salida análoga mientras el controlador está fuera de proceso.

La calibración que se hizo a el controlador es la calibración de Banco, pues es más confiable.

El controlador estaba configurado para una entrada análoga de un termopar, pues los Jumpers de la tarjeta principal estaban acomodados para esta entrada, se realizó el cambio de los Jumpers para usar el RTD, y también se revisaron las demás posiciones de los Jumpers para todas las opciones, pues deben concordar con la configuración.

Arreglo de los Jumpers

El controlador tiene Jumpers en la tarjeta principal, para cambiar la posición de los Jumpers y personalizar el controlador, se toman como referencia las tablas C-1 a la C-4 que indican la posición para cada opción.

Para trabajar con la tarjeta principal, se debe asegurar que el controlador esté desenergizado, se quitan los dos clips que se encuentran arriba y abajo del panel de control para quitar la cubierta.

Para revisar y cambiar los Jumpers se debe trabajar con equipo que elimine la estática que pudiese generar la persona que este trabajando con la tarjeta principal pues la tarjeta puede dañarse.

La tabla C-1, nos muestra la posición de los Jumpers para verificar la colocación apropiada para la entrada análoga. Se configuró para un RTD.

Tabla C-1
Arreglo de Jumpers para la Entrada Análoga

AI1	Jumper				
	J4	J7	J8	J9	J11
Corriente de entrada 4 a 20 mA	2-3	2-3	1-2	2-3	2-3
	4-5	4-5		4-5	
	6-7				
Voltaje de entrada 1 a 5, 0 a 5 y -5 a +5 VCD	2-3	2-3	1-4	2-3	2-3
	4-5	4-5		4-5	
	6-7				
Voltaje de entrada	2-3	2-3	1-3	2-3	2-3
	4-5	4-5		4-5	
Termopar y entradas de -50 a +100 mV	2-3	1-2	1-3	2-3	1-2
	4-5	3-4		4-5	
	6-7				
Entrada RTD	2-3	1-2	1-3	1-2	1-2
	4-5	3-4		3-4	
	6-7				

La tabla C-2, muestra la posición del Jumper J1 para verificar la colocación apropiada para la instalación eléctrica (120 o 240 VCA). Se seleccionó 120 VCA.

Tabla C-2
Arreglo de Jumpers para el Voltaje

Opciones	Jumpers	Ubicación
120 VCA	J1	2-3
240 VCA		1-2

La tabla C-3, indica la posición de los Jumpers para la salida análoga, la configuración que se eligió es la de corriente.

Tabla C-3
Arreglo de Jumpers para la Salida Análoga

Opción	Jumper	Ubicación	Descripción
AO1	J5	2-3	Voltaje
		1-2	Corriente
AO2	J6	2-3	Voltaje
		1-2	Corriente

Calibración de Banco(Bench)

El controlador estaba calibrado para una entrada análoga de un termopar tipo J y la salida análoga de corriente de 4 a 20 mA, como se hizo el cambio de termopar a RTD, solo fue necesario calibrar la entrada análoga, haciendo la conexión que se muestra en la figura C-3 y alimentando los valores que corresponden al tipo de entrada los cuales se muestran en la tabla C-4.

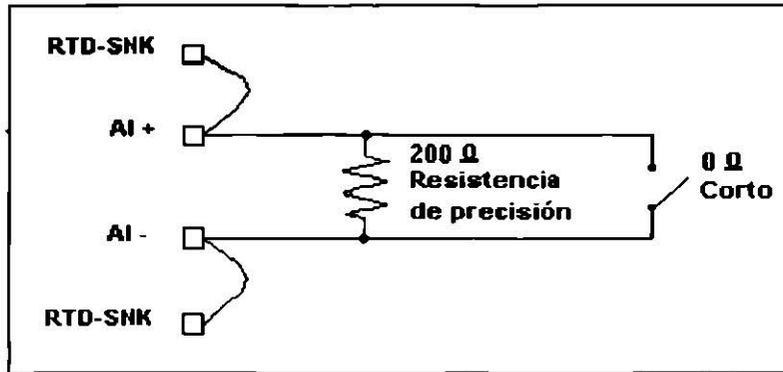


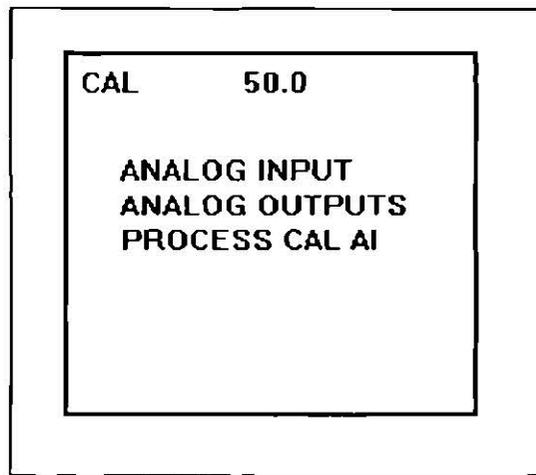
Figura C-3 Conexión para la calibración

Tabla C-4
Valores de Ajuste empleados en la Calibración

Tipos de instrumentos de medición	Precisión del valor bajo	Precisión de valor alto
0 a 5 VCD, 1 a 5 VCD, ± 5 VCD	0 VCD	+ 5 VCD
±1000 mV	0 VCD	+ 1000 mV
- 50 a +100 mV, T/C	0 VCD.	+ 100 mV
0 a 20 mA, 4 a 20 mA	0 mA	+ 20 mA
RTD	0 Ω	200 Ω

La calibración de la entrada Análoga se efectúa de la siguiente forma:

- 1.- Del menú principal, seleccionar CALIBRATE con ▲▼, presionar SEL.
- 2.- Alimentar el password correcto y presionar ENTER del menú multifunciones.
- 3.- De la pantalla que aparece, seleccionar ANALOG INPUT y presionar SEL.



Pantalla de Calibración

4.- En la pantalla siguiente se tiene que alimentar los valores altos y bajos dependiendo del tipo de entrada análoga (tabla C-4), en el caso del RTD como ya anteriormente se configuró para este sensor, en la pantalla va aparecer el mensaje de 0 Ω , entonces se hace la conexión de la figura C-3 para 0 Ω , y se presiona ENTER del menú multifunciones.

5.- Aparece un mensaje PLEASE WAIT, espere a que desaparezca el mensaje y después en la pantalla aparece el mensaje de 200 Ω y se realiza la conexión que indica la figura C-3 para 200 Ω . Se hacen los mismos pasos que para el valor bajo.

6.- El controlador realiza los cálculos necesarios y guarda la información en NVRAM y regresa al menú principal.

SINTONIZACIÓN (TUNE)

La sintonización es el proceso de cambiar las constantes de la configuración mientras el controlador ejecuta la configuración. La sintonización permite acceder valores numéricos que cambian la respuesta de el controlador.

Al ambiente Sintonización, se puede entrar solo del menú principal, para entrar a este ambiente se debe teclear el password correcto y solo ciertos parámetros se pueden sintonizar.

1.- Del menú principal, seleccionar TUNE, con ▲▼ y presionar SEL.

2.- Alimentar el password correcto seleccionando los tres caracteres con ▲▼ y presionando SEL para pasar de uno a otro.

3.- Presionar una tecla multifunciones, y del menú, presionar ENTER.

4.- Las pantallas que aparecen en este ambiente son iguales a las que aparecen en el ambiente CALIBRATION, en la sección posterior se explica más detalladamente como hacer los cambios a los parámetro que se quieran sintonizar.

CONFIGURACIÓN

En esta sección se va a configurar el controlador de acuerdo al sistema y a las condiciones en las que se está trabajando, se va a elegir el tipo de control, de sensor, el valor de la ganancia, la variable a monitorear, etc. Todos los parámetros necesarios para que el programa del controlador trabaje apropiadamente están dados al final de esta sección (tabla C-5)

Como ya se vio en la sección de calibración, la tarjeta principal contiene una serie de Jumpers, los cuales deben ser revisados para verificar que la configuración que se esta haciendo debe concordar con la posición de los Jumpers (en caso que se haga un cambio de los componentes del lazo de control).

Todos los datos que se tienen que alimentar en esta sección están divididos en las siguientes categorías:

- 1.- Configuración Deseada (Desired Configuration).
- 2.- Parámetros del Controlador (Controller parameters).
- 3.- Parámetros de Entrada Análoga (Analog input parameters).
- 4.- Tipo de Salida Análoga (Analog output mode).
- 5.- Tipo de Salida Digital (Digital Output Mode).
- 6.- Alarmas (Alarms).

Configuración Deseada (Desired Configuration)

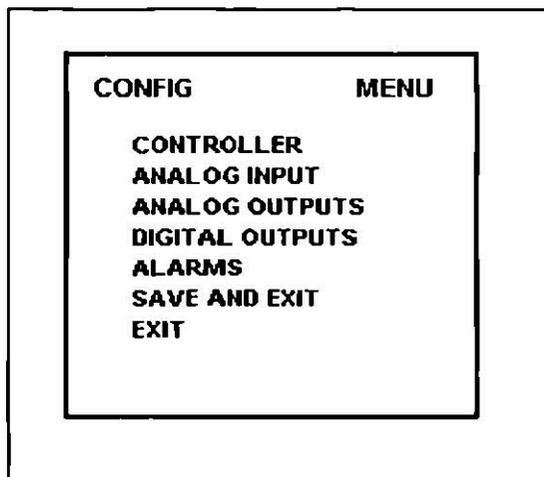
En esta opción se va a seleccionar entre configuración basic o flow.

- 1.- Desde la pantalla del menú principal se selecciona con las flechas CONFIGURE, se presiona SEL.
- 2.- Aparece la siguiente pantalla donde se va a seleccionar la configuración basic o flow, presionando las fechas va a cambiar entre las dos formas de configuración y se presiona SEL para aceptar la configuración.

Parámetros del Controlador (Controller Parameters)

En esta sección se elige el tipo de control, condiciones de la señal de control y los valores asociados con cada opción. Dependiendo del tipo de control que se elija, las pantallas van a variar, pues cada tipo de control necesita diferentes parámetros.

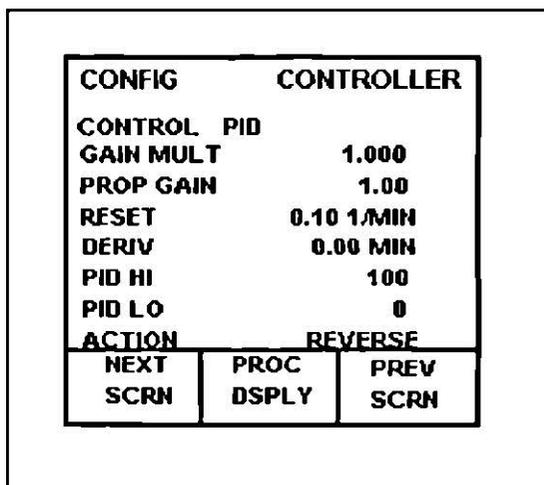
1.- Del menú de configuración seleccionamos con fechas CONTROLLER, y presionamos SEL.



Menú de Configuración.

2.- En la pantalla que aparece, se va a seleccionar el tipo de control con las fechas y ya que esté seleccionado se presiona SEL, para pasar a la siguiente opción, de la misma forma se seleccionan los siguientes valores basándose en la tabla C-5 que se encuentra la final de esta sección.

3.- Cuando se termine de seleccionar los datos de la pantalla, se presiona una tecla multifunciones y de el menú se selecciona NEXT SCRN, y aparece una segunda pantalla en la cual se van a seleccionar los parámetros repitiendo el mismo procedimiento.



Configuración del Controlador.

4.- Se repite el paso 3 para regresar al menú de configuración.

Parámetros de Entrada Análoga (Analog Input Parameters)

En esta sección se elige el tipo de entrada análoga y los valores asociados con el tipo de entrada que es un RTD de platino de 3 cables.

1.- Del menú de configuración se selecciona ANALOG INPUT.

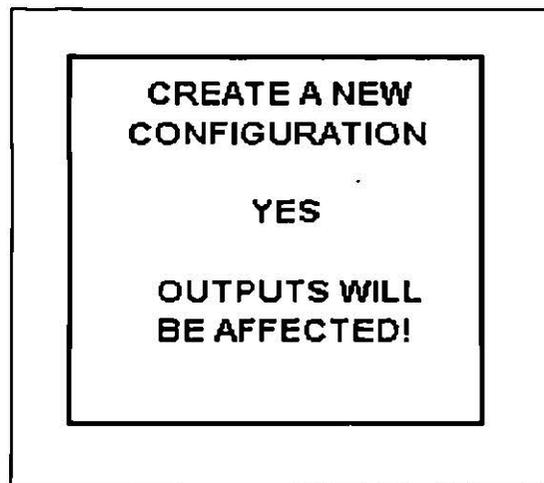
2.- Se repite el mismo procedimiento para seleccionar los parámetros asociados a esta opción.

Se repite el mismo procedimiento para las opciones ANALOG OUTPUTS, DIGITAL OUTPUT y ALARMS.

Gravar y Salir (Save and Exit)

Cuando ya se haya terminado de configurar o que se quiera interrumpir la configuración se selecciona SAVE AND EXIT para guardar la configuración hecha.

La siguiente pantalla aparece al seleccionar esta opción.

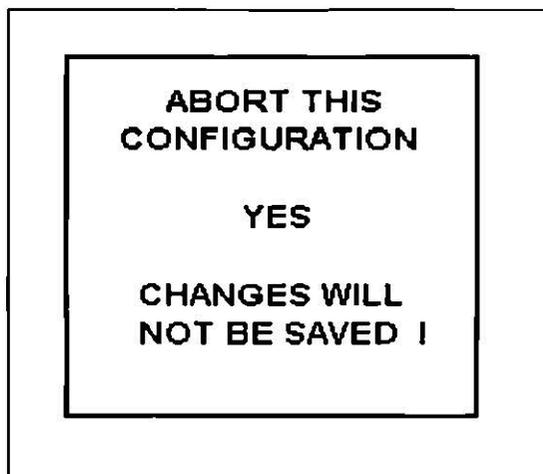


Se puede elegir YES o NO con la flechas, si se selecciona YES, la configuración se guarda en la memoria, y el controlador se va a la pantalla PROCESS DISPLAY.

Si elegimos NO el controlador regresa a la pantalla del menú de configuración.

Salir (Exit)

Esta sección del menú permite salir sin grabar la configuración, al seleccionar esta opción del menú de configuración, aparece la siguiente pantalla.



También podemos elegir entre YES o NO, al elegir YES el controlador se va a la pantalla del menú principal, y en memoria va a tener la configuración anterior.

Si elegimos NO, el controlador regresa a la pantalla CONFIG MENU.

**Tabla C-5
Configuración Utilizada**

TIPO DE CONFIGURACION

Basic Controller

Flow Controller

SELECCION DEL TIPO DE CONTROL.

CONTROL	PID	PID, Proporcional o condiciones de señal.
GAIN MULT	1.0	Limites de 0.0 a 999.9
PROP GAIN	1.0	Limites de 0 a 9999
RESET	1.0 1/min	Limites de 0.00 a 99.99 resets/min.
DERIV	0.00 min	Limites de 0.00 a 99.99 min.
PID HI	100	Limites de -5.0 a +105.0
PID LO	0	Limites de -5.0 a +105.0
ACCION	Reverse	Direct o Reverse
PV ZERO	0	Limites de -9999 a +9999
PV AND SP SPAN	100	Limites de 0.00 a 9999.00

SP TRK	<input checked="" type="checkbox"/> PV	<input type="checkbox"/> None
DISPLAY VAR	<input checked="" type="checkbox"/> PV	<input type="checkbox"/> CO
OUTPUT TYPE	<input checked="" type="checkbox"/> Manual	<input type="checkbox"/> Auto Last
PWR UP CO	<input type="checkbox"/> Hi	<input checked="" type="checkbox"/> Lo Last

PARAMETROS DE ENTRADA ANALOGA

Basic (Básicos)

TYPE	<input type="checkbox"/> 1 a 5 VDC	<input type="checkbox"/> Type E thermocouple
	<input type="checkbox"/> 0 a 5 VDC	<input type="checkbox"/> Type J thermocouple
	<input type="checkbox"/> 4 a 20 mA powered	<input type="checkbox"/> Type K thermocouple
	<input type="checkbox"/> 4 a 20 mA unpowered	<input type="checkbox"/> Type T thermocouple
	<input type="checkbox"/> 0 a 20 mA powered	<input type="checkbox"/> Type S thermocouple
	<input type="checkbox"/> 0 a 20 mA unpowered	<input type="checkbox"/> Type E thermocouple
	<input type="checkbox"/> ± 5 VDC	<input type="checkbox"/> 2-wire 100 ohm RTD
	<input type="checkbox"/> ± 1000 mV	<input checked="" type="checkbox"/> 3-wire 100 ohm RTD / US STD
	<input type="checkbox"/> -50 mV a +100 mV	<input type="checkbox"/> 4-wire 100 ohms RTD

ENGINEERIG UNITS	° C	
EU ZERO	M/A	Limites de -9999 a +9999
EU SPAN	M/A	Limites de 00.00 a 9999
LEAD WIRE OHMS	0.0	Limites de 00.00 a 9999 ohms
DAMPING TIME	2.0 seg	Limites de 0.00 a 999.9 seg.

SELECCION DE SALIDAS DIGITALES

Digital Output 1 (Salida Digital 1)

ALARM

PROCESS VARIABLE

HI PV

LO PV

TURN ON	60 ° C	Limites de -9999 a +9999
TURN OFF	58 ° C	Limites de -9999 a +9999
TIME DELAY	0.25 min	Limites de 0.0 a 99.99 min.

Digital Output 2 (Salida Digital 2)

ALARM

PROCESS VARIABLE

HI PV

LO PV

TURN ON	10 ° C	Limites de -9999 a +9999
TURN OFFT	8 ° C	Limites de -9999 a +9999
TIME DELAY	0.25 min	Limites de 0.0 a 99.99 min.

APÉNDICE D:

GRÁFICAS Y NOTAS IMPORTANTES

NOTAS

Se debe revisar periódicamente la trampa de vapor, pues se puede tapan, y esto ocasiona que el condensado no salga y el serpentín se sature de condensado, por lo tanto el vapor no entra y el agua del tanque no se calentará, este problema ocurrió una vez, cuando se efectuaban las corridas experimentales.

El rotámetro se debe limpiar cada que se requiera, pues se llena de lama y esto hace que no se pueda ver bien la escala.

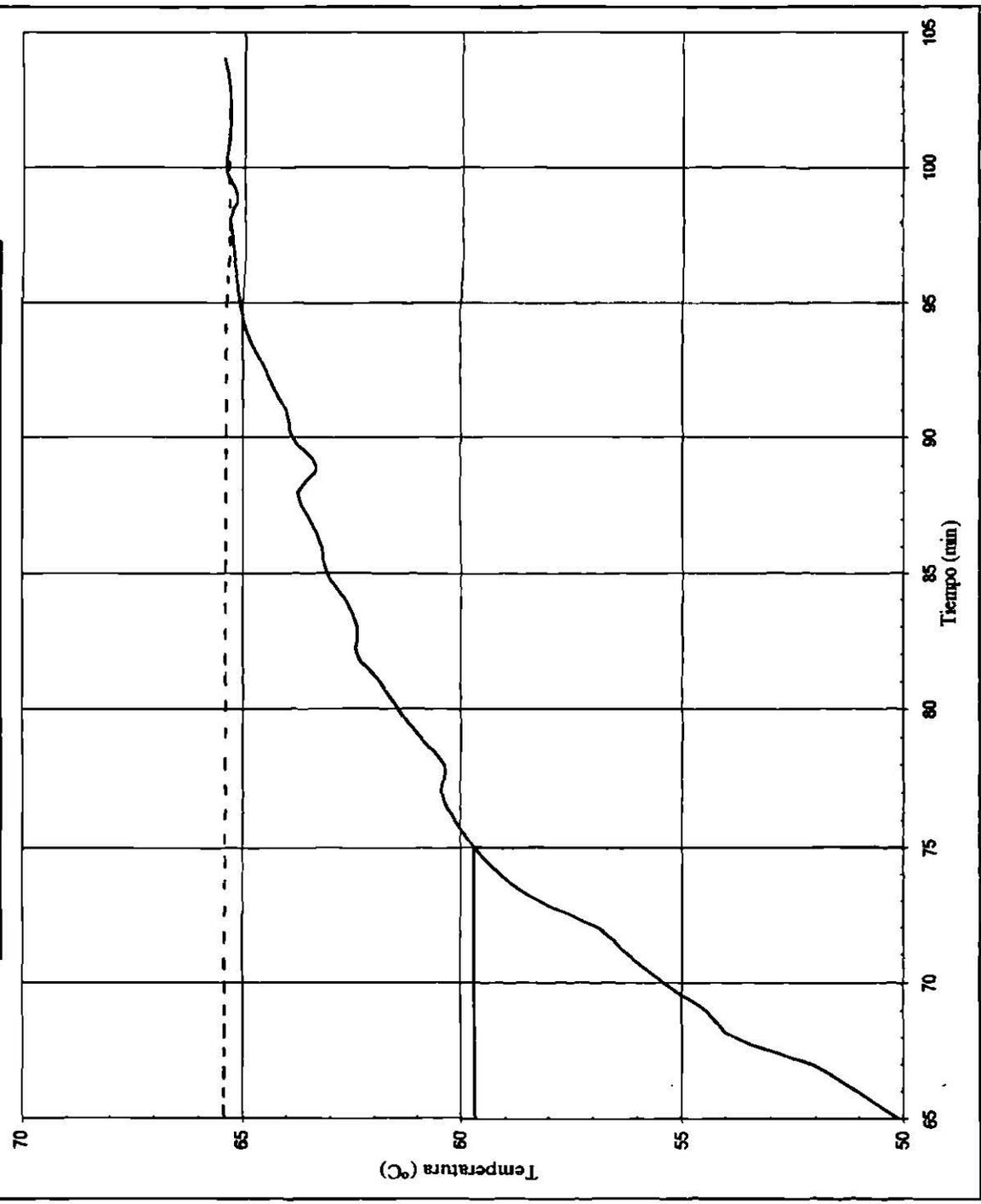
Al terminar de trabajar con el equipo, se deberá tirar el agua de los dos tanques T1 y T2, para evitar incrustaciones y la formación de lama en ellos.

Antes de hacer pasar el vapor al sistema, se deberá purgar la línea del vapor.

La caldera en ocasiones se apaga sola, debiéndose encender automáticamente cuando la presión de esta llega al valor mínimo para encenderse, cuando ocurre esto la presión de vapor que llega al equipo baja y esto afecta a la respuesta dinámica del proceso (Práctica 10). Por eso es importante verificar que la caldera encienda cuando llegue a la presión mínima para su encendido.

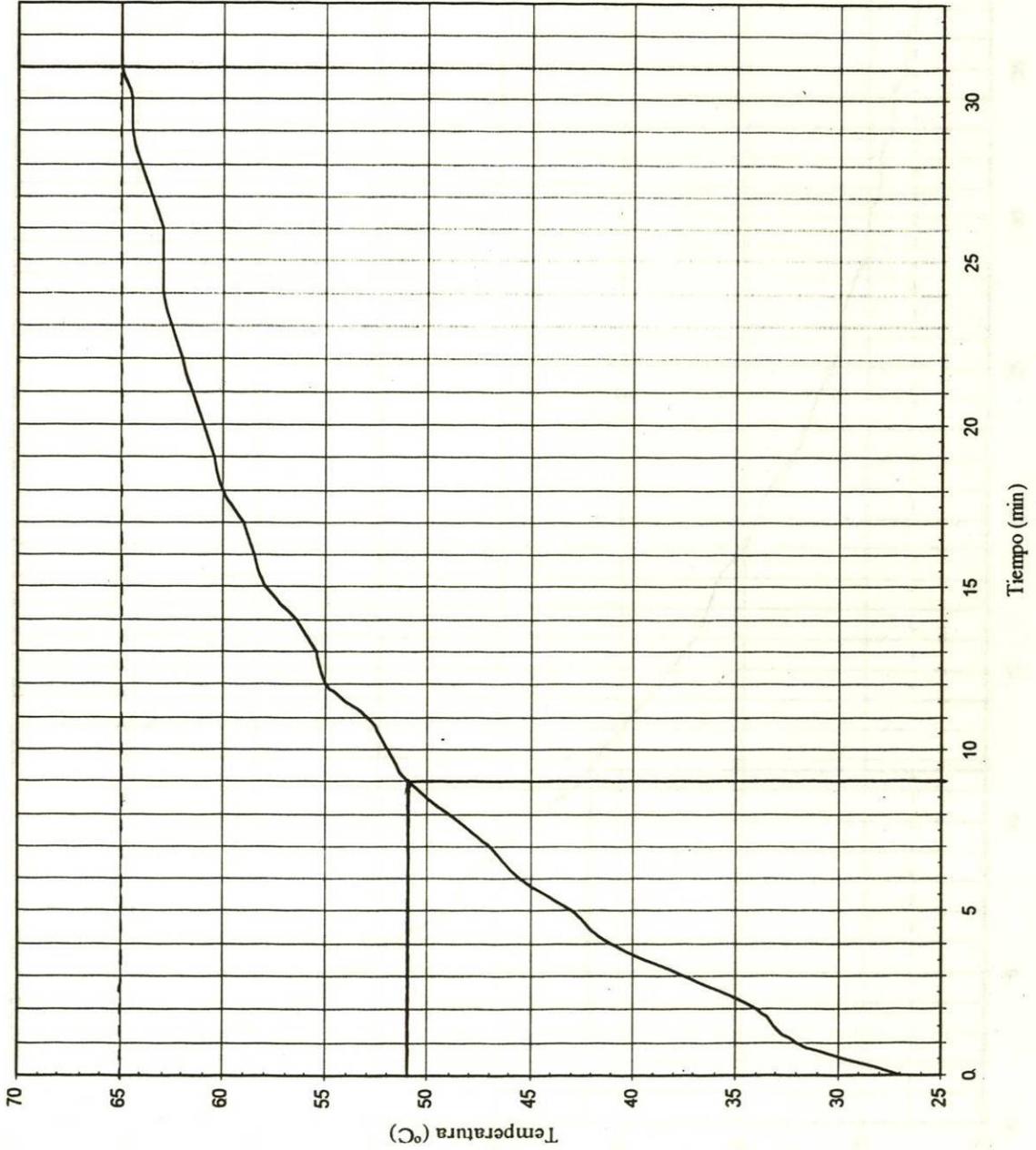
GRÁFICA No. 1

Fe=2 gal/min, Ganancia=1.0, Set Point=50°C, Apertura de la Válvula=47%



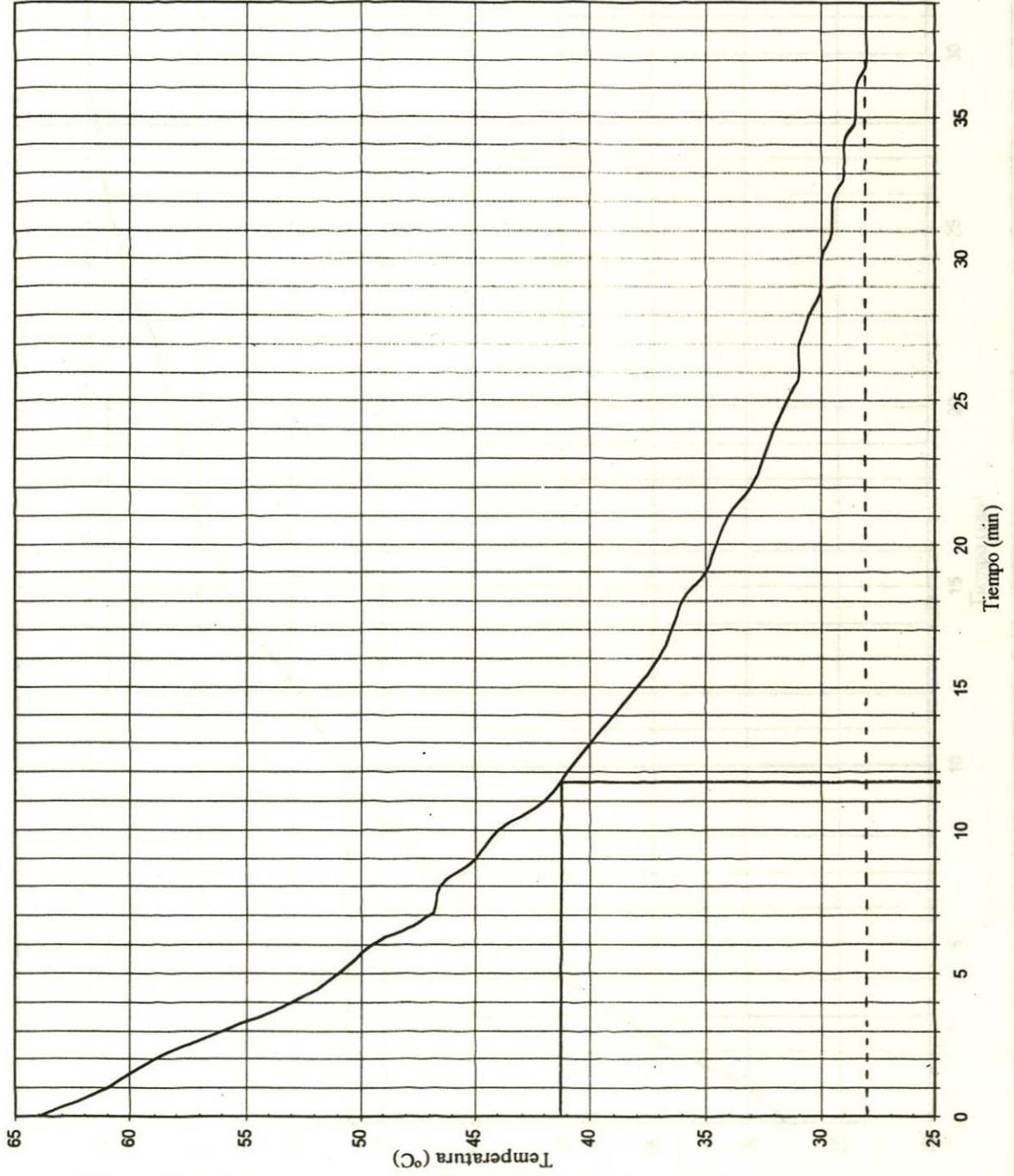
GRÁFICA No. 2

Fe=2 gal/min, Te=27°C, P_{vap}=20 psi, Val Vapor=4.75 vueltas



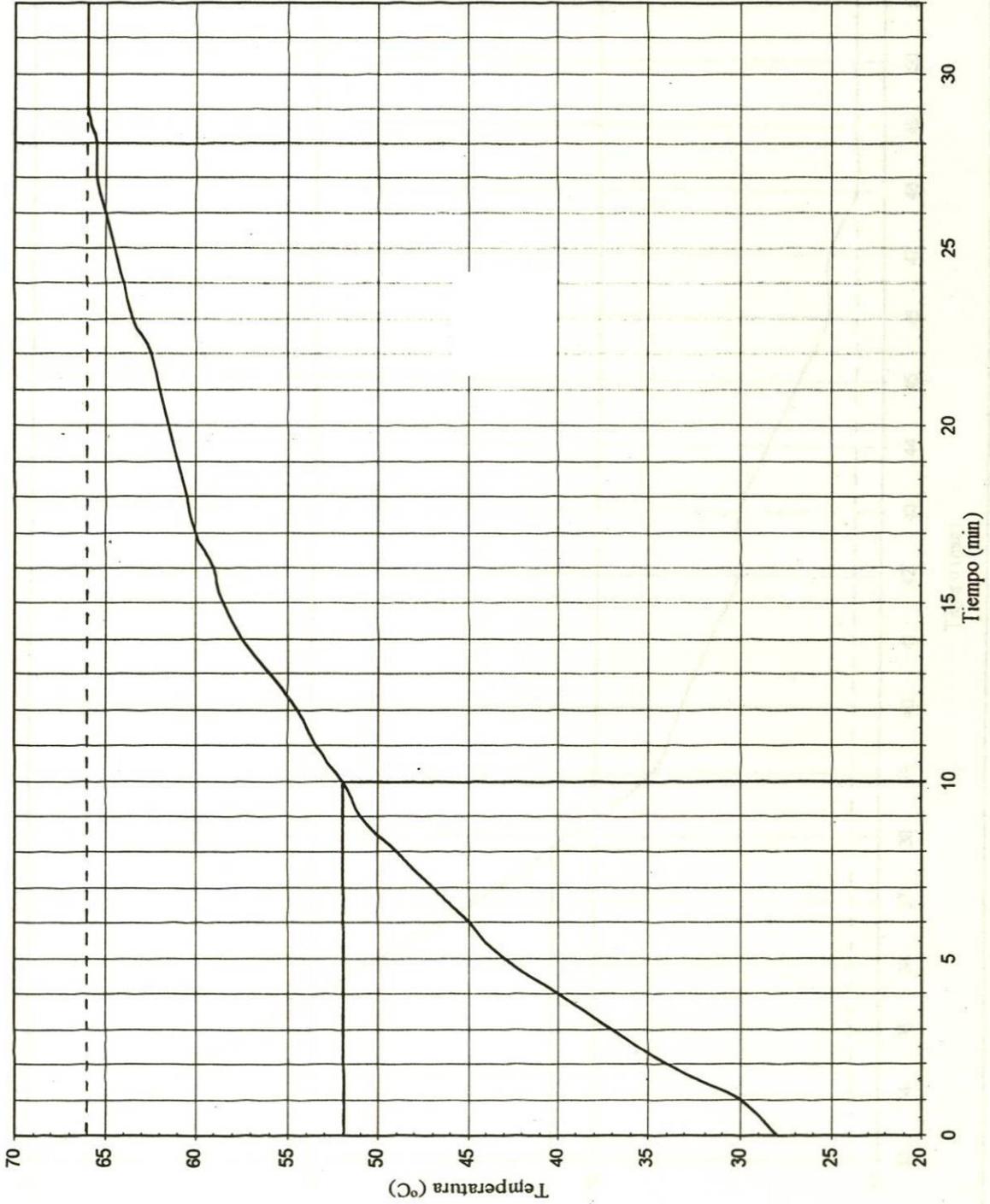
GRÁFICA No. 3

Fe=2 gal/min, Te=64°C, P_{vap}=20 psi, Val vapor=cerrada



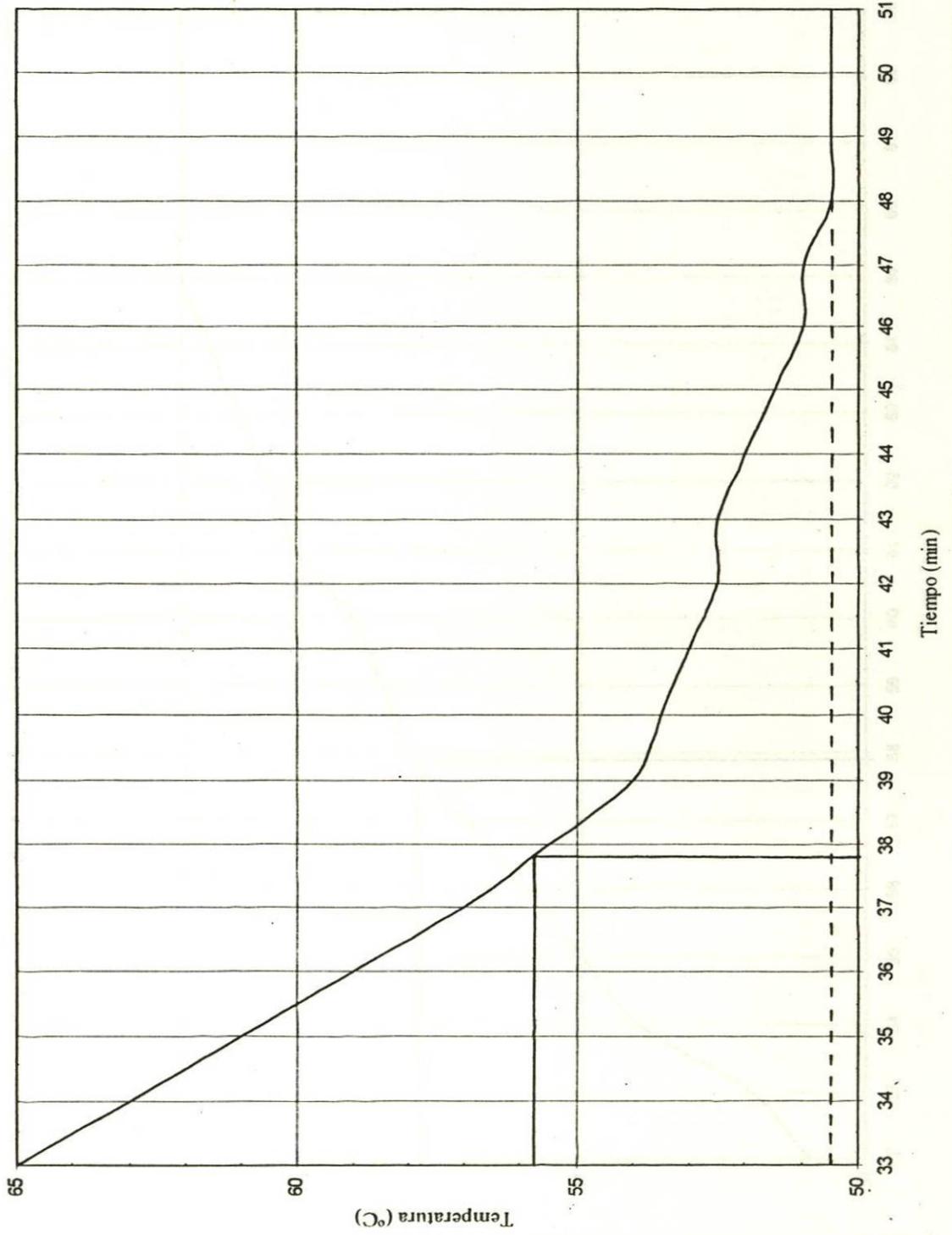
GRÁFICA No. 4

Fe=2 gal/min, Te=28°C, P_{vapor}=20 psi, Val.vapor=3 vueltas



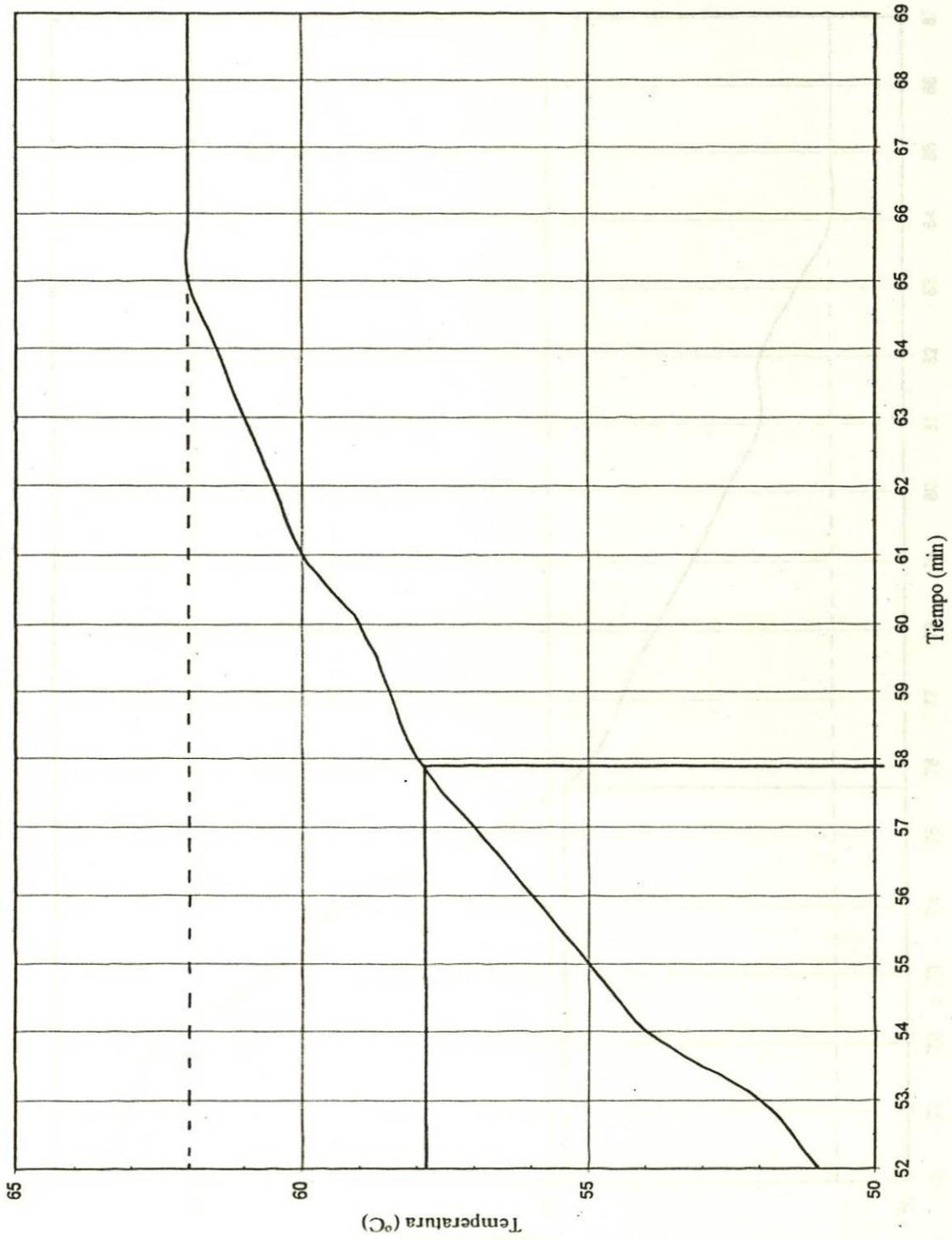
GRÁFICA No. 5

Fe=4 gal/min, Te=65°C, P_{vap}=20 psi, Val vapor=3 vueltas



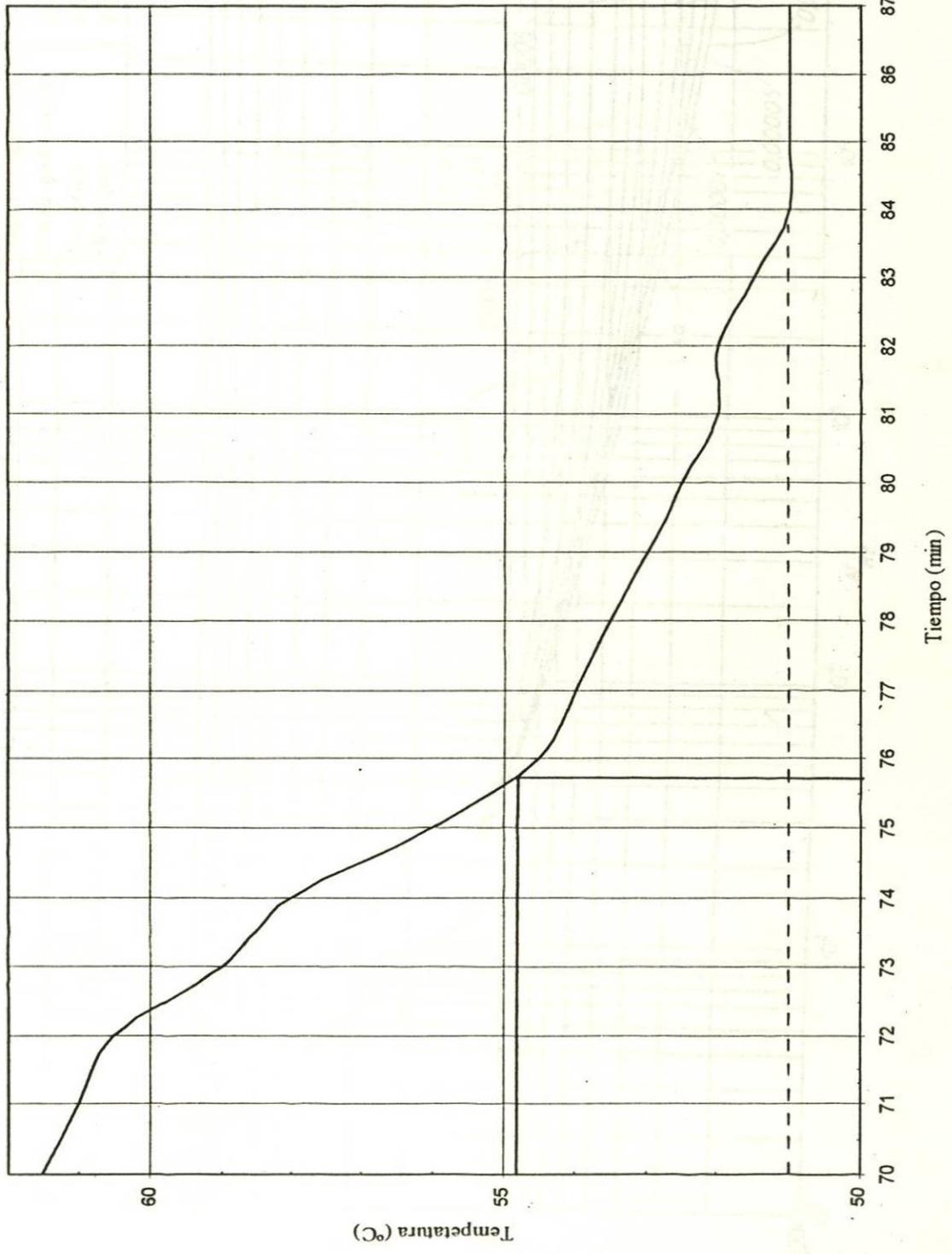
GRÁFICA No. 6

Fe=2 gal/min, Te=51°C, P_{vap}=20 psi, Val. vapor=3 vueltas

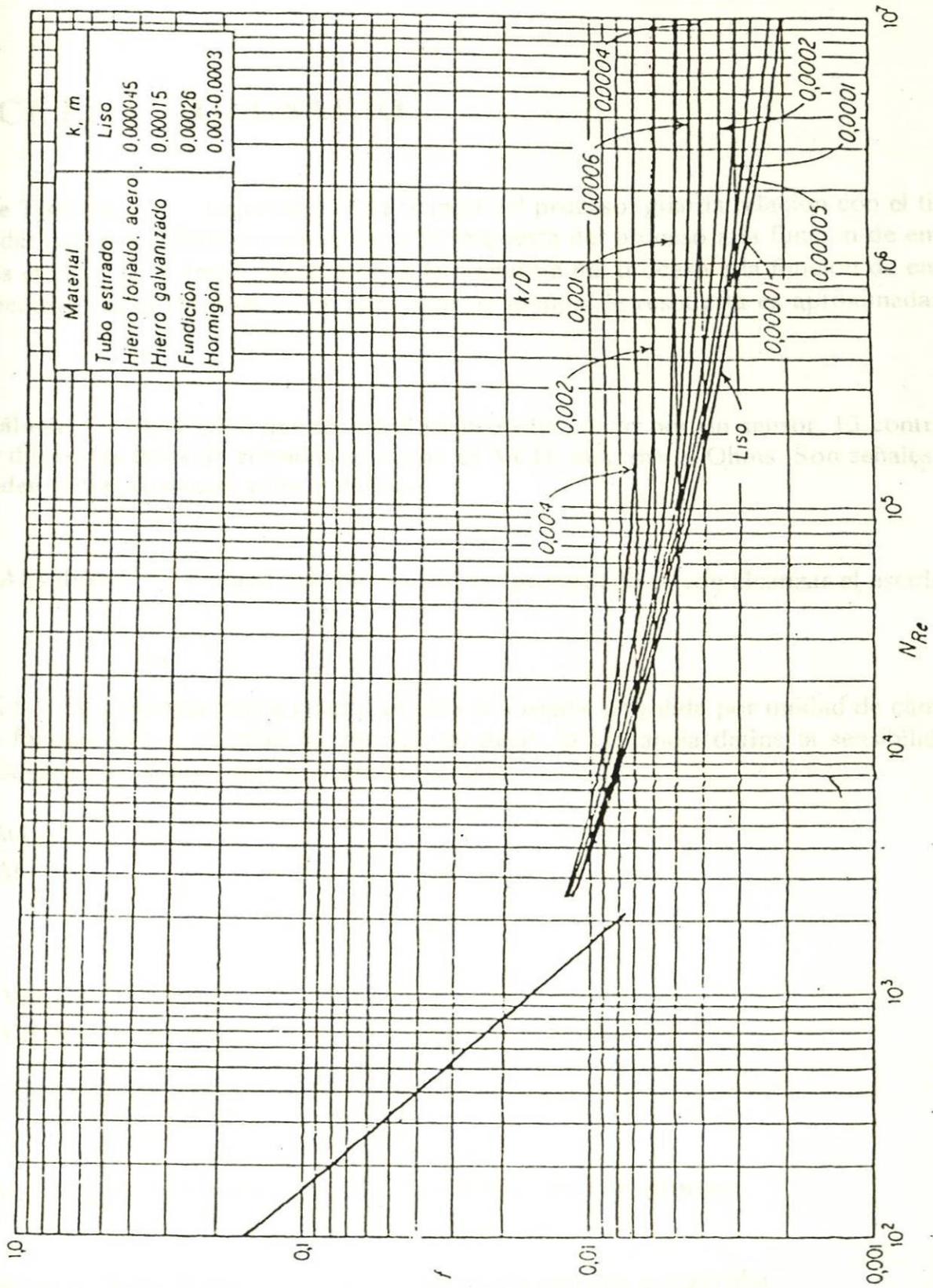


GRÁFICA No. 7

Fe=4 gal/min, Te=61.5°C, P_{vap}=20 psi, Val.vapor=3 vueltas



GRÁFICA No. 8



APÉNDICE E: GLOSARIO

Constante de Tiempo, τ : La constante de tiempo del proceso, guarda relación con el tiempo de respuesta del proceso. Mientras más lenta es la respuesta del proceso a la función de entrada, más grande es el valor de τ ; tanto más rápida es la respuesta del proceso a la función de entrada, cuanto más pequeño es el valor de τ . En particular, el tiempo de respuesta es aproximadamente 4τ

Entrada Análoga: Es la señal que recibe el controlador, dado por un sensor. El controlador puede recibir diferentes tipos de entradas análogas en VCD, mA, mV y Ohms. Son señales continuas que pueden tomar cualquier valor numérico.

Estabilidad Absoluta: Es cuando un proceso al ser perturbado puede alcanzar el estado estacionario.

Ganancia, K : La ganancia indica cuanto cambia la variable de salida por unidad de cambio en la función de forzamiento o variable de entrada, es decir, la Ganancia define la sensibilidad del proceso. La Ganancia se define matemáticamente como:

$$K = \frac{\Delta O}{\Delta I}$$

donde:

ΔO = Variable de Salida.

ΔI = Variable de entrada.

Jumpers : Switch de configuración.

Perturbación: Cualquier variable que perjudica la respuesta del proceso.

Punto de Consigna / Set - Point: Valor deseado en la variable a controlar.

Tiempo Muerto, t_0 : Es el intervalo entre el momento en que la función de forzamiento entra al proceso y el tiempo en que empieza a responder la variable a controlar. También se le llama tiempo de retardo o retraso puro.

Sintonización: Encontrar el conjunto de parámetros del controlador que dan la mejor respuesta posible de acuerdo a cierto criterio de funcionamiento (i.e. ISE).

APÉNDICE F: TABLAS UTILIZADAS

De las tablas que se incluyen en este apéndice, solo se utilizó la tabla No. 18 para el RTD de platino de 100 Ohms de resistencia.

Se incluyeron más tablas de calibración de los termopares más usados, pues pueden servir como consulta para la calibración de estos sensores.

TABLE 18 100 Ohm Platinum RTD
DIN 43760 Curve

Resistance in Ohms		Temperature in Degrees Celsius																																																	
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41	107.80	108.19	108.58	108.97	109.36	109.75	110.14	110.53	110.92	111.31	111.70	112.09	112.48	112.87	113.26	113.65	114.04	114.43	114.82	115.21	115.60	115.99	116.38	116.77	117.16	117.55	117.94	118.33	118.72	119.11	119.50
50	119.39	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.70	122.09	122.47	122.85	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.15	125.54	125.92	126.31	126.69	127.07	127.45	127.84	128.22	128.60	128.98	129.37	129.75	130.13	130.52	130.90	131.28	131.66	132.05	132.43	132.81	133.20	133.58	133.96	134.34	134.73	135.11	135.49	135.87	136.26	136.64	137.02	137.40	137.79	138.17	138.55
100	138.50	138.89	139.28	139.66	140.04	140.42	140.80	141.18	141.56	141.94	142.32	142.70	143.08	143.46	143.84	144.22	144.60	144.98	145.36	145.74	146.12	146.50	146.88	147.26	147.64	148.02	148.40	148.78	149.16	149.54	149.92	150.30	150.68	151.06	151.44	151.82	152.20	152.58	152.96	153.34	153.72	154.10	154.48	154.86	155.24	155.62	156.00	156.38	156.76	157.14	157.52
150	157.32	157.69	158.06	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.67	161.04	161.41	161.78	162.15	162.52	162.89	163.26	163.63	164.00	164.37	164.74	165.11	165.48	165.85	166.22	166.59	166.96	167.33	167.70	168.07	168.44	168.81	169.18	169.55	169.92	170.29	170.66	171.03	171.40	171.77	172.14	172.51	172.88	173.25	173.62	173.99	174.36	174.73	175.10	175.47	175.84
200	175.84	176.21	176.58	176.95	177.31	177.68	178.05	178.41	178.78	179.15	179.51	179.88	180.25	180.61	180.98	181.34	181.71	182.08	182.44	182.81	183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.46	186.82	187.19	187.55	187.92	188.28	188.65	189.01	189.38	189.74	190.11	190.47	190.84	191.20	191.57	191.93	192.30	192.66	193.03	193.39	193.76	194.12
250	194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33	197.69	198.05	198.41	198.77	199.13	199.49	199.85	200.21	200.57	200.93	201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53	204.89	205.25	205.61	205.97	206.33	206.69	207.05	207.41	207.77	208.13	208.49	208.85	209.21	209.57	209.93	210.29	210.65	211.01	211.37	211.73	
300	208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67	212.03	212.39	212.74	213.10	213.45	213.81	214.16	214.52	214.87	215.23	215.58	215.94	216.29	216.65	217.00	217.36	217.71	218.07	218.42	218.77	219.13	219.48	219.84	220.19	220.54	220.90	221.25	221.61	221.96	222.31	222.67	223.02	223.38	223.73	224.09	224.44	224.80	225.15	225.51		
350	229.69	230.04	230.39	230.74	231.09	231.44	231.79	232.14	232.49	232.84	233.19	233.54	233.89	234.24	234.59	234.94	235.29	235.64	235.99	236.34	236.69	237.04	237.39	237.74	238.09	238.44	238.79	239.14	239.49	239.84	240.19	240.54	240.89	241.24	241.59	241.94	242.29	242.64	242.99	243.34	243.69	244.04	244.39	244.74	245.09	245.44	245.79	246.14	246.49		
400	247.06	247.41	247.76	248.11	248.46	248.81	249.16	249.51	249.86	250.21	250.56	250.91	251.26	251.61	251.96	252.31	252.66	253.01	253.36	253.71	254.06	254.41	254.76	255.11	255.46	255.81	256.16	256.51	256.86	257.21	257.56	257.91	258.26	258.61	258.96	259.31	259.66	260.01	260.36	260.71	261.06	261.41	261.76	262.11	262.46	262.81	263.16	263.51			
450	264.14	264.49	264.84	265.19	265.54	265.89	266.24	266.59	266.94	267.29	267.64	268.00	268.35	268.70	269.05	269.40	269.75	270.10	270.45	270.80	271.15	271.50	271.85	272.20	272.55	272.90	273.25	273.60	273.95	274.30	274.65	275.00	275.35	275.70	276.05	276.40	276.75	277.10	277.45	277.80	278.15	278.50	278.85	279.20	279.55	279.90	280.25				
500	282.64	282.99	283.34	283.69	284.04	284.39	284.74	285.09	285.44	285.79	286.14	286.49	286.84	287.19	287.54	287.89	288.24	288.59	288.94	289.29	289.64	289.99	290.34	290.69	291.04	291.39	291.74	292.09	292.44	292.79	293.14	293.49	293.84	294.19	294.54	294.89	295.24	295.59	295.94	296.29	296.64	296.99	297.34	297.69	298.04	298.39	298.74				

TABLE 18 100 Ohm Platinum RTD Continued
DIN 43760 Curve

Resistance in Ohms		Temperature in Degrees Celsius																																																	
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
500	280.93	281.28	281.63	281.98	282.33	282.68	283.03	283.38	283.73	284.08	284.43	284.78	285.13	285.48	285.83	286.18	286.53	286.88	287.23	287.58	287.93	288.28	288.63	288.98	289.33	289.68	290.03	290.38	290.73	291.08	291.43	291.78	292.13	292.48	292.83	293.18	293.53	293.88	294.23	294.58	294.93	295.28	295.63	295.98	296.33	296.68	297.03	297.38	297.73	298.08	
550	297.43	297.78	298.13	298.48	298.83	299.18	299.53	299.88	300.23	300.58	300.93	301.28	301.63	301.98	302.33	302.68	303.03	303.38	303.73	304.08	304.43	304.78	305.13	305.48	305.83	306.18	306.53	306.88	307.23	307.58	307.93	308.28	308.63	308.98	309.33	309.68	310.03	310.38	310.73	311.08	311.43	311.78	312.13	312.48	312.83	313.18	313.53	313.88	314.23	314.58	
600	313.65	313.99	314.34	314.69	315.04	315.39	315.74	316.09	316.44	316.79	317.14	317.49	317.84	318.19	318.54	318.89	319.24	319.59	319.94	320.29	320.64	320.99	321.34	321.69	322.04	322.39	322.74	323.09	323.44	323.79	324.14	324.49	324.84	325.19	325.54	325.89	326.24	326.59	326.94	327.29	327.64	327.99	328.34	328.69	329.04	329.39	329.74	330.09	330.44	330.79	
650	329.57	329.92	330.27	330.62	330.97	331.32	331.67	332.02	332.37	332.72	333.07	333.42	333.77	334.12	334.47	334.82	335.17	335.52	335.87	336.22	336.57	336.92	337.27	337.62	337.97	338.32	338.67	339.02	339.37	339.72	340.07	340.42	340.77	341.12	341.47	341.82	342.17	342.52	342.87	343.22	343.57	343.92	344.27	344.62	344.97	345.32	345.67	346.02			
700	345.21	345.56	345.91	346.26	346.61	346.96	347.31	347.66	348.01	348.36	348.71	349.06	349.41	349.76	350.11	350.46	350.81	351.16	351.51	351.86	352.21	352.56	352.91	353.26	353.61	353.96	354.31	354.66	355.01	355.36	355.71	356.06	356.41	356.76	357.11	357.46	357.81	358.16	358.51	358.86	359.21	359.56	359.91	360.26	360.61	360.96	361.31				
750	360.55	360.90	361.25	361.60	361.95	362.30	362.65	363.00	363.35	363.70	364.05	364.40	364.75	365.10	365.45	365.80	366.15	366.50	366.85	367.20	367.55	367.90	368.25	368.60	368.95	369.30	369.65	370.00	370.35	370.70	371.05	371.40	371.75	372.10	372.45	372.80	373.15	373.50	373.85	374.20	374.55	374.90	375.25	375.60	375.95	376.30	376.65				
800	375.61	375.96	376.31	376.66	377.01	377.36	377.71	378.06	378.41	378.76	379.11	379.46	379.81	380.16	380.51	380.86	381.21	381.56	381.91	382.26	382.61	382.96	383.31	383.66	384.01	384.36	384.71	385.06	385.41	385.76	386.11	386.46	386.81	387.16	387.51	387.86	388.21	388.56	388.91	389.26	389.61	390.00	390.35	390.70	391.05	391.40					

TABLE 4 Type B Thermocouples Temperature in Degrees Celsius (IFTS 1968)

Table with columns for DEG C (0-10) and DEG C (0-10). Header: EMF in Absolute Millivolts. Sub-header: THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS. Reference Junctions at 0 C.

TABLE 4 Type B Thermocouples Continued Temperature in Degrees Celsius (IFTS 1968)

Table with columns for DEG C (0-10) and DEG C (0-10). Header: EMF in Absolute Millivolts. Sub-header: THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS. Reference Junctions at 0 C.

TABLE 8 Type J Thermocouples

NOTE.—The maximum recommended temperature limit for Type J thermocouples is 1400 F (760 C) as specified in Table 2. Extension of the Type J tables beyond 1400 F gives temperature - electromotive force data to 1922 F (1050 C). This extension is a mathematical extrapolation based on limited calibration data and caution should be exercised in its use. The basis for the extended curve is discussed in NBS Monograph 123. It should be noted that limits of error for Type J thermocouples (Table 1) do not apply above 1400 F (760 C).

Table with columns: DEC C (0-10), EMF in Absolute Millivolts, THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS, and Reference Junctions at 0 C (0-10 DEC C).

TABLE 5 Type J Thermocouples Continued

Table with columns: DEC C (0-10), EMF in Absolute Millivolts, THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS, and Reference Junctions at 0 C (0-10 DEC C).



TABLE 10 Type K Thermocouples
Temperature in Degrees Celsius (ITS 1968)

TABLE 10 Type K Thermocouples
Temperature in Degrees Celsius (ITS 1968)

Table with columns for temperature (DEG C, 0-900) and EMF in Absolute Millivolts (0.000-0.400). Includes sub-headers for EMF in Absolute Millivolts and THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS.

Table with columns for temperature (DEG C, -270 to 900) and EMF in Absolute Millivolts (-0.400 to 0.000). Includes sub-headers for EMF in Absolute Millivolts and THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS.

TABLE 12 Type R Thermocouples Continued Temperature in Degrees Celsius (IPTS 1968)

Table with columns for temperature in degrees Celsius (0 to 1400) and millivolts (0 to 10). Reference junctions at 0°C. Title: EMF in Absolute Millivolts. Subtitle: THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS.

TABLE 12 Type R Thermocouples Continued Temperature in Degrees Celsius (IPTS 1968)

Table with columns for temperature in degrees Celsius (0 to 1400) and millivolts (0 to 10). Reference junctions at 0°C. Title: EMF in Absolute Millivolts. Subtitle: THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS.

T[°]F

T[°]C

TABLE No. 7

TABLE 14 Type T Thermocouples
Temperature in Degrees Celsius (IPTS 1968)

Reference Junctions at 0°C

Table with columns DEC C (0-10) and DEG C (0-10). Title: EMF in Absolute Millivolts. Subtitle: THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS. Contains two rows of data for each temperature point.

TABLE 15 Type T Thermocouples
Temperature in Degrees Fahrenheit*

Reference Junctions at 32°F

Table with columns DEG F (0-750) and DEG C (0-10). Title: EMF in Absolute Millivolts. Subtitle: THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS. Contains two rows of data for each temperature point.

*Converted from degrees Celsius (IPTS 1968).

Ni°C

TABLA No. 8

Cu°F

TABLE 20 110 Ohm Nickel RTD 7 NA Curve

Resistance in Ohms		Temperature in Degrees Celsius										
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
-100	63.73	63.29	62.86	62.42	61.99	61.55						-100
-90	68.09	67.65	67.22	66.78	66.35	65.91	65.47	65.04	64.60	64.17	63.73	-90
-80	72.45	72.01	71.58	71.14	70.71	70.27	69.83	69.40	68.96	68.53	68.09	-80
-70	76.81	76.39	75.95	75.51	75.08	74.64	74.20	73.76	73.32	72.89	72.45	-70
-60	81.17	80.82	80.38	79.93	79.49	79.04	78.59	78.14	77.69	77.23	76.78	-60
-50	85.53	85.33	84.88	84.43	83.97	83.52	83.07	82.62	82.17	81.72	81.27	-50
-40	90.40	90.93	91.47	92.01	92.54	93.08	93.62	94.15	94.68	95.21	95.74	-40
-30	95.14	96.01	96.88	97.74	98.61	99.48	100.34	101.21	102.08	102.95	103.82	-30
-20	100.00	101.00	102.00	103.00	104.00	105.00	106.00	107.00	108.00	109.00	110.00	-20
-10	104.96	106.00	107.00	108.00	109.00	110.00	111.00	112.00	113.00	114.00	115.00	-10
0	110.00	110.62	111.25	111.88	112.51	113.14	113.77	114.40	115.03	115.66	116.29	0
10	115.10	115.86	116.62	117.38	118.14	118.90	119.66	120.42	121.18	121.94	122.70	10
20	120.71	121.58	122.45	123.32	124.19	125.06	125.93	126.80	127.67	128.54	129.41	20
30	126.20	127.16	128.12	129.07	130.03	130.98	131.94	132.89	133.85	134.80	135.76	30
40	131.42	132.39	133.35	134.31	135.27	136.23	137.19	138.15	139.11	140.07	141.03	40
50	137.59	138.57	139.54	140.52	141.50	142.48	143.46	144.44	145.42	146.40	147.38	50
60	143.47	144.46	145.44	146.42	147.40	148.38	149.36	150.34	151.32	152.30	153.28	60
70	149.49	150.50	151.51	152.52	153.53	154.54	155.55	156.56	157.57	158.58	159.59	70
80	155.65	156.68	157.70	158.72	159.74	160.76	161.78	162.79	163.81	164.83	165.85	80
90	161.99	162.83	163.67	164.51	165.35	166.19	167.03	167.87	168.71	169.55	170.39	90
100	168.44	169.09	169.75	170.40	171.06	171.72	172.38	173.04	173.70	174.36	175.02	100
110	175.04	175.71	176.38	177.06	177.74	178.41	179.09	179.76	180.44	181.12	181.80	110
120	181.84	182.53	183.22	183.91	184.61	185.30	186.00	186.70	187.40	188.10	188.81	120
130	188.81	189.52	190.22	190.93	191.63	192.34	193.04	193.75	194.45	195.15	195.86	130
140	195.95	196.67	197.38	198.09	198.80	199.51	200.22	200.93	201.64	202.35	203.06	140
150	203.26	204.00	204.74	205.48	206.22	206.96	207.70	208.44	209.18	209.92	210.66	150
160	210.75	211.51	212.27	213.04	213.80	214.57	215.34	216.11	216.88	217.65	218.42	160
170	218.45	219.23	220.01	220.79	221.57	222.35	223.13	223.91	224.69	225.47	226.25	170
180	228.35	229.15	229.95	230.75	231.55	232.35	233.15	233.95	234.75	235.55	236.35	180
190	238.42	239.24	240.06	240.88	241.70	242.52	243.34	244.16	244.98	245.80	246.62	190
200	242.72	243.56	244.40	245.24	246.08	246.92	247.76	248.60	249.44	250.28	251.12	200
210	251.19	252.05	252.91	253.77	254.63	255.49	256.35	257.21	258.07	258.93	259.79	210
220	259.91	260.80	261.68	262.57	263.47	264.36	265.26	266.15	267.05	267.95	268.85	220
230	268.88	269.79	270.71	271.62	272.54	273.47	274.39	275.32	276.25	277.17	278.10	230
240	278.12	279.06	280.00	280.94	281.89	282.83	283.78	284.74	285.69	286.65	287.61	240
250	287.61	288.57	289.54	290.51	291.48	292.45	293.42	294.40	295.38	296.36	297.35	250
260	297.35	298.34	299.33	300.32	301.32	302.32	303.33	304.33	305.34	306.35	307.37	260
270	307.37	308.39	309.42	310.45	311.48	312.51	313.55	314.60	315.64	316.70	317.75	270
280	317.75	318.80	319.85	320.93	321.99	323.06	324.13	325.21	326.28	327.37	328.45	280
290	328.45	329.54	330.63	331.73	332.83	333.93	335.04	336.15	337.27	338.39	339.51	290
300	339.51	340.64	341.78	342.92	344.06	345.21	346.36	347.52	348.68	349.85	351.02	300

TABLE 21 9.042 Ohm Copper RTD SAMA Standard Curve

Resistance in Ohms		Temperature in Degrees Fahrenheit										
DEG F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG F
-100	6.202	6.180	6.159	6.137	6.115	6.093	6.072	6.050	6.028	6.006	5.984	-100
-90	6.419	6.398	6.376	6.354	6.332	6.311	6.289	6.267	6.246	6.224	6.202	-90
-80	6.636	6.615	6.593	6.571	6.550	6.528	6.506	6.484	6.463	6.441	6.419	-80
-70	6.853	6.832	6.810	6.788	6.766	6.744	6.722	6.701	6.680	6.658	6.636	-70
-60	7.070	7.049	7.027	7.005	6.983	6.961	6.939	6.918	6.896	6.874	6.853	-60
-50	7.287	7.265	7.243	7.220	7.198	7.177	7.155	7.133	7.112	7.090	7.069	-50
-40	7.504	7.482	7.460	7.437	7.414	7.392	7.371	7.349	7.328	7.306	7.285	-40
-30	7.721	7.699	7.677	7.654	7.632	7.610	7.588	7.566	7.545	7.523	7.502	-30
-20	7.938	7.916	7.894	7.871	7.849	7.827	7.805	7.783	7.762	7.741	7.720	-20
-10	8.155	8.133	8.111	8.088	8.066	8.044	8.022	8.000	7.978	7.957	7.935	-10
0	8.372	8.350	8.328	8.305	8.283	8.261	8.239	8.217	8.195	8.173	8.151	0
10	8.589	8.567	8.544	8.522	8.499	8.477	8.455	8.433	8.411	8.389	8.367	10
20	8.806	8.784	8.761	8.739	8.716	8.694	8.672	8.650	8.628	8.606	8.584	20
30	9.023	9.001	8.978	8.956	8.933	8.911	8.889	8.867	8.845	8.823	8.801	30
40	9.240	9.218	9.195	9.173	9.150	9.128	9.106	9.084	9.062	9.040	9.018	40
50	9.457	9.435	9.412	9.390	9.367	9.345	9.323	9.301	9.279	9.257	9.235	50
60	9.674	9.652	9.629	9.606	9.584	9.562	9.540	9.518	9.496	9.474	9.452	60
70	9.891	9.869	9.846	9.824	9.801	9.779	9.757	9.735	9.713	9.691	9.669	70
80	10.108	10.086	10.063	10.041	10.018	10.000	9.978	9.956	9.934	9.912	9.890	80
90	10.325	10.303	10.280	10.258	10.235	10.213	10.191	10.169	10.147	10.125	10.103	90
100	10.542	10.520	10.497	10.475	10.452	10.430	10.408	10.386	10.364	10.342	10.320	100
110	10.759	10.737	10.714	10.692	10.669	10.647	10.625	10.603	10.581	10.559	10.537	110
120	10.976	10.954	10.931	10.909	10.886	10.864	10.842	10.820	10.798	10.776	10.754	120
130	11.193	11.171	11.148	11.126	11.104	11.082	11.060	11.038	11.016	10.994	10.972	130
140	11.410	11.388	11.365	11.343	11.321	11.299	11.277	11.255	11.233	11.211	11.189	140
150	11.627	11.605	11.582	11.560	11.538	11.516	11.494	11.472	11.450	11.428	11.406	150
160	11.844	11.822	11.799	11.777	11.755	11.733	11.711	11.689	11.667	11.645	11.623	160
170	12.061	12.039	12.016	11.994	11.972	11.950	11.928	11.906	11.884	11.862	11.840	170
180	12.278	12.256	12.234	12.212	12.190	12.168	12.146	12.124	12.102	12.080	12.058	180
190	12.495	12.473	12.451	12.429	12.407	12.385	12.363	12.341	12.319	12.297	12.275	190
200	12.712	12.690	12.668	12.646	12.624	12.602	12.580	12.558	12.536	12.514	12.492	200
210	12.929	12.907	12.885	12.863	12.841	12.819	12.797	12.775	12.753	12.731	12.709	210
220	13.146	13.124	13.102	13.080	13.058	13.036	13.014	12.992	12.970	12.948	12.926	220
230	13.363	13.341	13.319	13.297	13.275	13.253	13.231	13.209	13.187	13.165	13.143	230
240	13.580	13.558	13.536	13.514	13.492	13.470	13.448	13.426	13.404	13.382	13.360	240
250	13.797	13.775	13.753	13.731	13.709	13.687	13.665	13.643	13.621	13.599	13.577	250
260	14.014	13.992	13.970	13.948	13.926	13.904	13.882	13.860	13.838	13.816	13.794	260
270	14.231	14.209	14.187	14.165	14.143	14.121	14.099	14.077	14.055	14.033	14.011	270
280	14.448	14.426	14.404	14.382	14.360	14.338	14.316	14.294	14.272	14.250	14.228	280
290	14.665	14.643	14.621	14.599	14.577	14.555	14.533	14.511	14.489	14.467	14.445	290
300	14.882	14.860	14.838	14.816	14.794	14.772	14.750	14.728	14.706	14.684	14.662	300

TABLA No. 9

Longitud equivalente a tramo recto de tubo expresada en centímetros, válida para agua y líquidos poco viscosos.

Los valores tabulados son válidos para uniones rosca das. Para uniones por brida, multiplicar el valor tabulado como sigue:

Válvula de compuerta por 0.8
 Válvula de globo por 0.96
 Válvula de ángulo por 0.90
 Codos, te etc. por 0.75

Diámetro del tubo in	Válvula de compuerta	Válvula de globo	Válvula de ángulo	Codo 90° estandar	Codo 45° estandar	Codo de retorno	Te como cople	Te como codo	Válvula de check
0.5	13.0	326.1	161.5	29.3	19.5	70.1	22.9	70.1	131.1
0.75	16.5	493.8	231.6	42.7	29.6	112.8	36.6	112.8	161.5
1	22.7	670.5	332.2	59.4	39.6	146.3	48.8	146.3	207.3
1.25	29.9	838.2	402.3	73.5	48.8	185.9	61.0	185.9	271.3
1.5	30.5	1136.9	512.1	91.4	80.2	240.8	73.1	240.8	317.0
2	52.4	1377.7	688.9	121.9	84.8	310.9	106.6	310.9	408.4
2.5	61.0	1737.3	868.7	152.4	103.6	381.0	128.0	381.0	484.6
3	76.2	2103.1	1051.6	186.0	128.0	472.4	155.5	472.4	603.5
3.5	82.3	2468.9	1234.4	219.5	152.4	548.6	179.8	548.6	670.6
4	106.7	2849.9	1423.4	250.0	176.8	640.1	213.4	640.1	792.5
5	131.1	3627.1	1798.3	326.0	225.5	816.8	268.2	816.8	1005.8
6	161.5	4389.1	2194.6	384.0	274.3	990.6	329.2	990.6	1188.7
8	219.5	5913.2	2956.6	518.2	368.8	1325.9	442.0	1325.9	1585.0
10	277.4	7437.1	3718.6	670.6	463.3	1676.4	557.8	1676.4	1981.2
12	335.3	8930.6	4465.0	792.5	573.3	2087.9	670.5	2087.9	2347.0

