

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMÁTICO PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**ASENCIOS CERNA VLADMIR RENATO**

**ASESOR**

**ING. JUAN MEDINA COLLANA**

**CALLAO-PERÚ**

**2005**



000467

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMÁTICO PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”**

**TESIS**

**PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**ASENCIOS CERNA VLADMIR RENATO**

**ASESOR**

**ING. JUAN MEDINA COLLANA**

**CALLAO-PERÚ**

**2005**



## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>III. ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
<b>IV. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>V. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1.1 Recuperadores</b> .....	<b>8</b>
<b>5.1.2 Intercambiadores de Contacto Directo sin</b> <b>Almacenamiento de Calor</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1.3 Regeneradores</b> .....	<b>24</b>
<b>5.2 BALANCE DE ENERGÍA EN UN INTERCAMBIADOR DE</b> <b>CALOR PARA UN SISTEMA ABIERTO</b> .....	<b>25</b>
<b>5.3 INSTRUMENTOS DE CAMPO</b> .....	<b>31</b>
<b>5.3.1 Sensor</b> .....	<b>31</b>
<b>a.- Termocuplas</b> .....	<b>35</b>
<b>a.1.- Termocuplas estándar</b> .....	<b>36</b>
<b>a.2.- Termocuplas no estándar</b> .....	<b>44</b>
<b>5.3.2 TRANSMISORES</b> .....	<b>48</b>
<b>5.3.3 ELEMENTO DE CONTROL FINAL</b> .....	<b>52</b>
<b>Válvulas de Globo</b> .....	<b>53</b>
<b>Servomotor</b> .....	<b>54</b>
<b>Posicionador</b> .....	<b>57</b>
<b>5.4 SISTEMA DE CONTROL</b> .....	<b>60</b>
<b>5.5 ESTRATEGIA DE CONTROL</b> .....	<b>65</b>
<b>Control Por Retroalimentación</b> .....	<b>65</b>
<b>Control Por Acción Precalculada</b> .....	<b>68</b>
<b>Funciones de Transferencia y Diagramas de B.</b> .....	<b>71</b>

5.6 MODO DE CONTROL PID.....	75
5.6.1 Estructura del PID.....	76
5.6.2 Métodos Clásicos de Ajuste de Ziegler y Nichols.....	80
5.7 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).....	85
5.7.1 Fuente de Alimentación .....	86
5.7.2 Unidad Central de Procesamiento (CPU).....	86
5.7.3 Módulos de Entrada / salida (E/S) .....	86
5.7.4 Memorias.....	88
5.7.5 El Diálogo Hombre – Máquina.....	90
5.7.6 Tipos de Señales.....	91
5.7.7 Programación Básica: Funciones Lógicas.....	92
5.8 SOFTWARE DE SUPERVISIÓN SCADA.....	96
5.8.1 Funciones Principales.....	97
5.8.2 Funciones Más Específicas.....	97
5.8.3 Prestaciones.....	98
5.8.4 Requisitos.....	99
5.8.5 Módulos.....	100
5.8.6 Componentes Hardware.....	103
5.8.7 Interfase de Comunicación.....	105
5.8.8 Redes Industriales.....	108
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	111
6.1 MATERIALES.....	111
6.1.1 Equipo Experimental.....	111
6.1.2 Elementos De Control .....	115
6.1.3 Software Usados Para El Sistema De Control.....	117
6.2 METODOLOGÍA.....	118
6.3 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	122
6.3.1 Diagrama De Bloques Del Sistema De Control.....	122
6.3.2 Diagrama De Bloques Simplificado.....	123



<b>6.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA.....</b>	<b>124</b>
<b>6.4.1 Función de Transferencia del Proceso.....</b>	<b>124</b>
<b>6.4.2 Función de Transferencia del Controlador .....</b>	<b>129</b>
<b>6.4.3 Función de Transferencia del Medidor.....</b>	<b>130</b>
<b>6.4.4 Función de Transferencia del Elemento de Control Final.....</b>	<b>130</b>
<b>6.5 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PID UTILIZANDO MAT LAB.....</b>	<b>135</b>
<b>6.6 CONTROL PID EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR UTILIZANDO PLC(Controlador Lógico Programable) .....</b>	<b>139</b>
<b>6.7 SUPERVISIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE CIMPLICITY EL SISTEMA DE CONTROL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....</b>	<b>146</b>
<b>VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>155</b>
<b>VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>159</b>
<b>8.1 CONCLUSIONES.....</b>	<b>159</b>
<b>8.2 RECOMENDACIONES.....</b>	<b>161</b>
<b>IX . FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS.....</b>	<b>163</b>
<b>APÉNDICE</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## RESUMEN

Este trabajo experimental presenta el Diseño de un Sistema de Control Automático del Intercambiador de Calor en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Se ha obtenido analíticamente y experimentalmente los PID (Proporcional, Integral y Derivativo) del sistema de control automático utilizando los software MAT LAB y VERSAPRO del Controlador lógico programable (PLC).

De acuerdo a los resultados con MAT LAB se obtienen los PID (P=10, I=5 y D=0.5) y al utilizar el controlador lógico programable en el lenguaje de programación ladder se obtuvo los PID (P=5, I=1.2 y D=0.5).

Hallados los PID mas adecuados para el correcto funcionamiento del sistema de control se ha supervisado con el software CIMPLICITY el intercambiador de calor del laboratorio de operaciones unitarias.



## I.

## INTRODUCCIÓN

Los Sistema de Control Automático juegan un papel importante en el avance de la ciencia y de la ingeniería. Además de su importancia en vehículos espaciales, sistemas de guía de proyectiles, sistema de piloto automático de aeronaves, sistemas robóticos y otros.

El control automático se ha vuelto parte integral e importante de los procesos industriales y de manufactura modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en control numérico de maquinas y herramientas en las industrias manufactureras .

También resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de transformación.

Como los avances en la teoría y practica del control automático brindan medios para lograr el funcionamiento optimo de sistemas dinámicos, mejorar la productividad, liberarse de la monotonía de muchas operaciones manuales rutinarias y repetitivas, y otras ventajas, la mayoría de los ingenieros y científicos deben poseer un buen conocimiento de este campo.

En este trabajo se desarrollo el diseño de un sistema de control automático de un intercambiador de calor, utilizando tecnología de vanguardia.

El proceso comienza con la alimentación de agua tratada al caldero para su producción de vapor que ingresara al intercambiador de calor por una línea a través de la válvula de control en contracorriente con el agua fría que ingresa a través de la válvula manual de tal manera que se origina el intercambio de calor entre los dos fluidos obteniéndose como productos el agua con una temperatura superior al agua fría de ingreso y el condensado.

Para el sistema de control automático diseñado se controló la temperatura de salida del agua manipulándose a través de la abertura de la válvula de control .

Se desarrolló el balance de energía del proceso obteniéndose la función de transferencia del sistema.

Mediante MAT LAB se halló los PID (Proporcional, Integral y Derivativo) analizando la respuesta al escalón unitario y con el software de programación VERSAPRO en el lenguaje ladder se halló los valores de PID experimentales .

Finalmente se supervisa el sistema de control automático con el software CIMPLICITY a través de la PC en tiempo real.



## **II. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un Sistema de Control Automático del Intercambiador de Calor de LOPU.

### **2.2 OBJETIVO ESPECIFICO**

- a) Realizar los balances de Materia y Energía en el Intercambiador de Calor para obtener la Función de Transferencia del Proceso.
- b) Seleccionar los elementos de campo necesarios para el control automático (sensor, transmisor, actuador).
- c) Definición de las herramientas a utilizar para el desarrollo de un sistema de control Automático del Intercambiador de calor (PLC, software de Supervisión).
- d) Realizar el Sistema de Control automático a través del lenguaje de programación Ladder en el PLC.
- e) Supervisar mediante el Software CIMPLICITY en tiempo Real el Sistema de Control automático del Intercambiador de Calor.

### **III. ANTECEDENTES**

Investigando las bibliotecas de diversas Facultades de Ingeniería Química, el tesista se pudo dar cuenta que si bien hay bastante información sobre automatización la propuesta de un sistema de control supervisado por el software CIMPLICITY en un intercambiador de calor no se encontró, navegando en Internet y suscribiéndose en revistas y paginas virtuales se pudo encontrar información referida al tema, pero no un trabajo de investigación específico y completo cómo será la presente tesis. Sin embargo debo mencionar que existe una tesis de la Universidad Nacional de Ingeniería cuyo Titulo es Automatización de un Laboratorio de Ingeniería Química Utilizando PLC'S, Conectados a Través de una Red Industrial Supervisada por Medio un Sistema SCADA esta tesis contribuirá como fuente de apoyo.

#### **IV. JUSTIFICACIÓN**

- a) La contribución del presente trabajo estará orientada a la preparación y el entrenamiento de los alumnos de Ingeniería Química en el campo de control de procesos utilizando la tecnología de controladores lógicos programables y el software de supervisión CIMPLICITY.
  
- b) La tesis a proponer aportará al conocimiento y la cultura de la Automatización mediante la supervisión en tiempo real de un sistema de control en el intercambiador de calor de LOPU.

## V. MARCO TEÓRICO

### 5.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Los intercambiadores de calor son aparatos para transferir calor desde una corriente fluida caliente a una corriente fluida fría aplicando los fenómenos de transferencia por conducción, convección y radiación. Actualmente se han desarrollado muchos tipos de intercambiadores de calor para ser usados en variados grados de tamaño y sofisticación tecnológica, como las plantas de potencia de vapor, calefacción y acondicionamiento de aire en edificios, refrigeradores, radiadores, etc.

Existen tres grandes tipos de intercambiadores:

**El recuperador o intercambiador a través de una pared sin almacenar calor.**

**El intercambiador de contacto directo sin almacenar calor.**

**El regenerador, acumulador o intercambiador con almacenamiento de calor.**

El tipo a escoger en cada situación depende en gran parte de la naturaleza de las fases presentes, gas-gas, gas-liquido, gas-sólido, liquido-liquido, liquido-sólido, sólido-sólido, y solubilidad mutua de dichas fases.

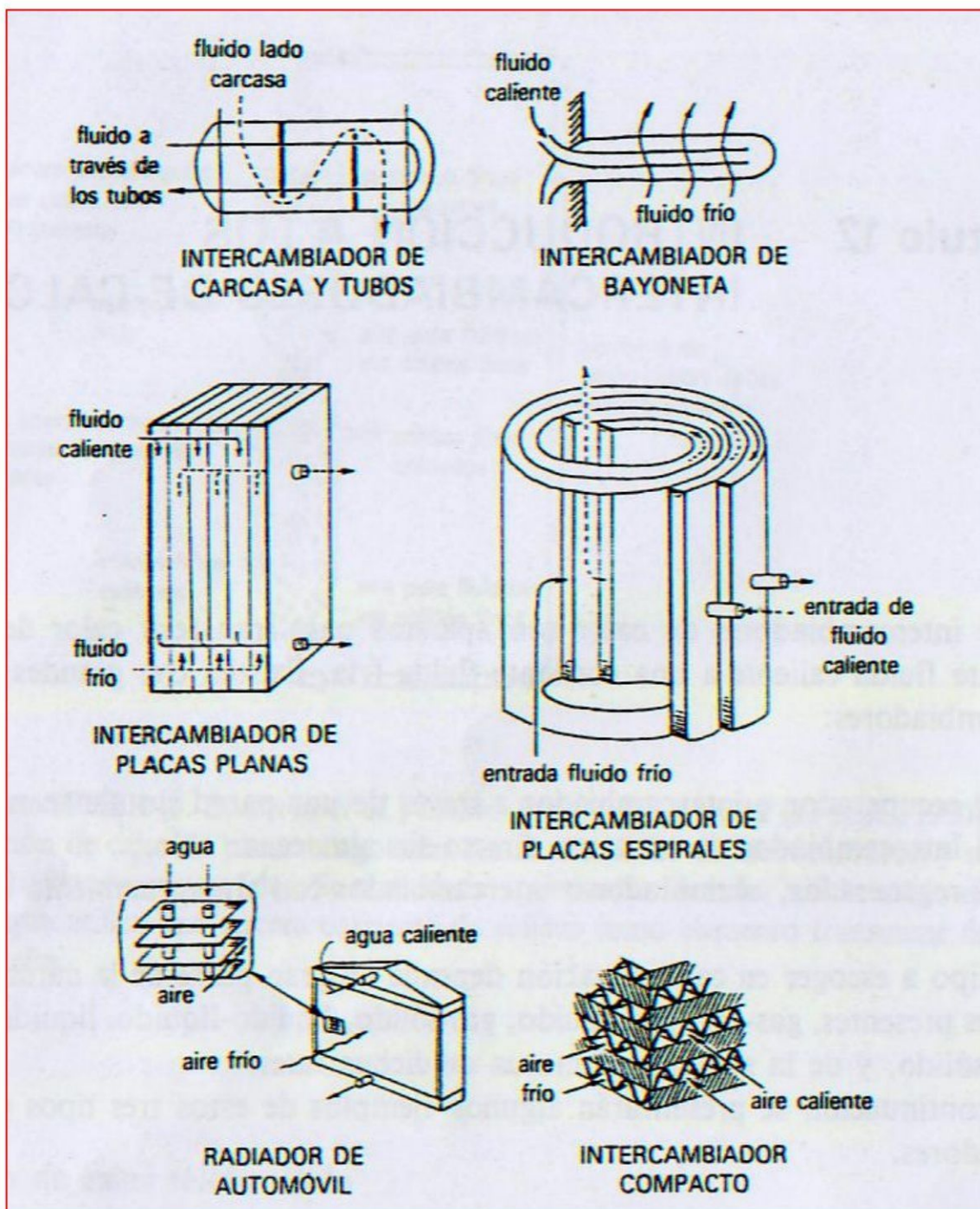
Seguidamente se presentaran algunos ejemplos de estos tres tipos de intercambiadores.

### **5.1.1 Recuperadores** (Intercambiadores a través de una pared sin almacenamiento de Calor).

En los recuperadores las dos corrientes circulantes están separadas por una pared y el calor tiene que pasar a través de esta pared. Se han utilizado muchos modelos diferentes.

Los recuperadores son ciertamente menos eficaces que los intercambiadores de contacto directo, ya que la presencia de la pared estorba el flujo de calor. Pero este tipo de intercambiador se utiliza cuando los fluidos no pueden ponerse en contacto directo, como sistemas gas-gas, líquidos miscibles, sólidos solubles o productos reactivos.





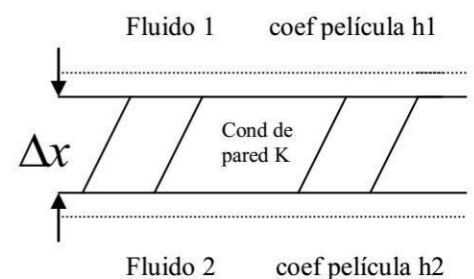
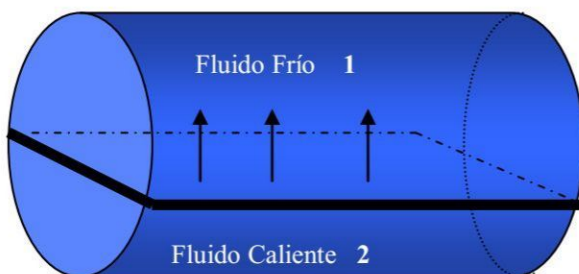
**Fig. 1 Tipos diversos de recuperadores o intercambiadores a través de una pared.**

A continuación extenderemos el desarrollo de **Recuperadores** (Intercambiadores a Través de la Pared sin Almacenamiento de Calor) ya que es de nuestro interés conocer esta parte.

Como mencionamos anteriormente que los recuperadores son intercambiadores de calor donde los dos fluidos que se transfieren se mantienen separados uno del otro mediante una pared. Su diseño requiere dos informaciones:

1. **El Coeficiente Global de Transmisión de Calor U**, que tiene en cuenta la resistencia global a la transferencia, incluida la pared. Incluye pues las resistencias individuales y de la pared.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\Delta x}{k A_{medio}} + \frac{1}{h_2 A_2}$$



2. **El Modelo de Contacto de las dos Fases,** Este puede ser muy complejo y difícil de evaluar. Para hacer el análisis de intercambiadores e idealizan los modelos reales de contacto considerándolos combinaciones de flujo pistón, flujo mezclado, fluido y en reposo.

En este capítulo de la tesis se utilizará la siguiente nomenclatura:

$A$  área del intercambiador [ $m^2$ ]

$C$  calor específico de un fluido [J/kg K]

$F$   $\overline{\Delta T} / \Delta T_{ml}$ , fuerza impulsora media de temperatura en el intercambiador comparada a la de flujo en contracorriente, que es la mejor posible [-].

$\overset{0}{m}$  caudal de un fluido [kg/s]

$\overset{0}{q}$  caudal de calor ganado por una fase [W]

$Q$  calor ganado o perdido por un fluido hasta un punto determinado en el intercambiador [J/kg de una de las fases]

$R$  razón de cambios de temperatura o flujos de calor de los dos fluidos

$\Delta T$  Diferencia de temperatura entre fases (o fuerza impulsora de temperatura) en una localización dada en el intercambiador [K]

$\Delta T_g$  Variación de temperatura de la fase gaseosa [K].

$\Delta T_l$  Variación de temperatura de la fase líquida [K].

$\Delta T_{ml}$  Fuerza impulsora de temperatura media logarítmica [K].

$\Delta T_{max}$  Diferencia máxima de temperatura entre fases [K].

Subíndices :

0 para tiempo cero

*en* para las condiciones de entrada

*sal* para las condiciones de salida

*g,l* se denominaran las dos fases en contacto gas y liquido por conveniencia, aunque puede tratarse de otras

*tx* transferido

Para los intercambiadores de carcasa y tubos :

$\overset{0}{M}$  ,  $C$  y  $T$  se refieren al caudal, calor especifico y temperatura, respectivamente, para el lado de la carcasa.

$\overset{0}{m}$  ,  $c$  y  $t$  se refieren al caudal, calor especifico y temperatura respectivamente, para el lado de los tubos.

A continuación se desarrollaran las ecuaciones de rendimiento para diversos modelos de contacto.

#### **A. Flujo en Pistón en Contracorriente y en Paralelo**

Estos dos modelos de contacto son una idealización y una aproximación de los flujos reales en los intercambiadores de calor de doble tubo. Para desarrollar la ecuación de rendimiento para estos modelos de contacto, y en general para cualquier otro modelo de contacto, se utiliza la siguiente relación :

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Caudal de pérdida} \\ \text{de calor} \\ \text{Por el gas} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Caudal de ganancia} \\ \text{de calor por el} \\ \text{fluido} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{caudal de} \\ \text{transmisión calor} \\ \text{desde el gas al liq} \end{array} \right]$$

(1 a)

Entonces :

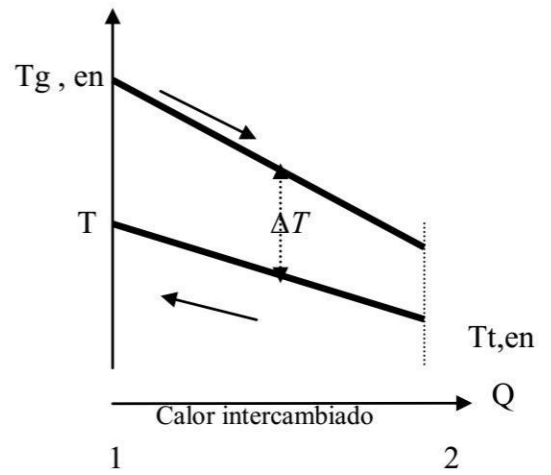
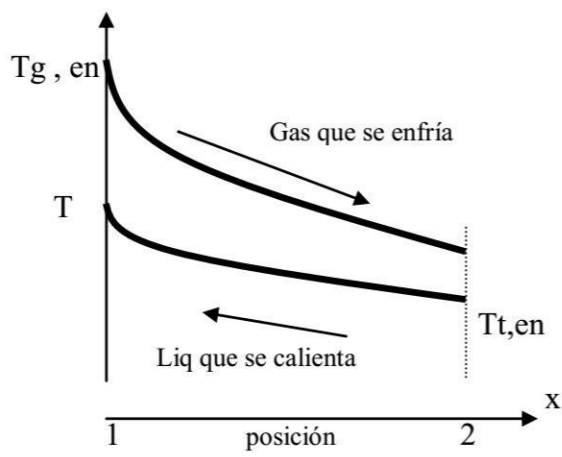
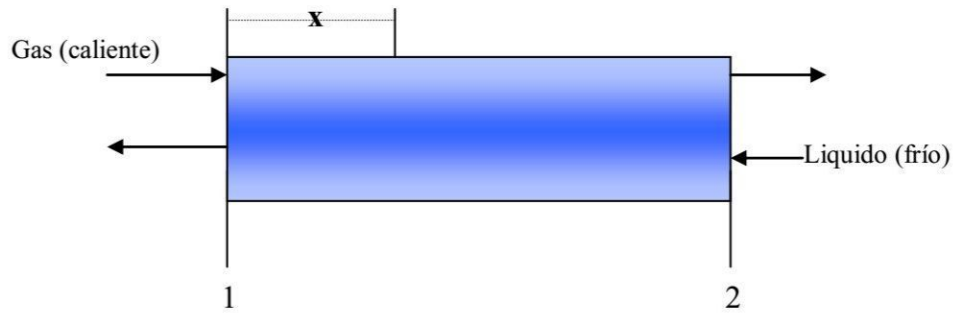
$$\overset{\circ}{\mathbf{q}}_{\text{Perdido por el gas}} = \overset{\circ}{\mathbf{q}}_{\text{ganado por el liquido}} = \overset{\circ}{\mathbf{q}}_{\text{transferido}} \quad (1b)$$

Se trataran dos casos amplios; en primer lugar, los fluidos sin cambio de fase y con calores específicos constantes y, en segundo lugar, los intercambiadores de calor con cambios de fase (ebullición o condensación).

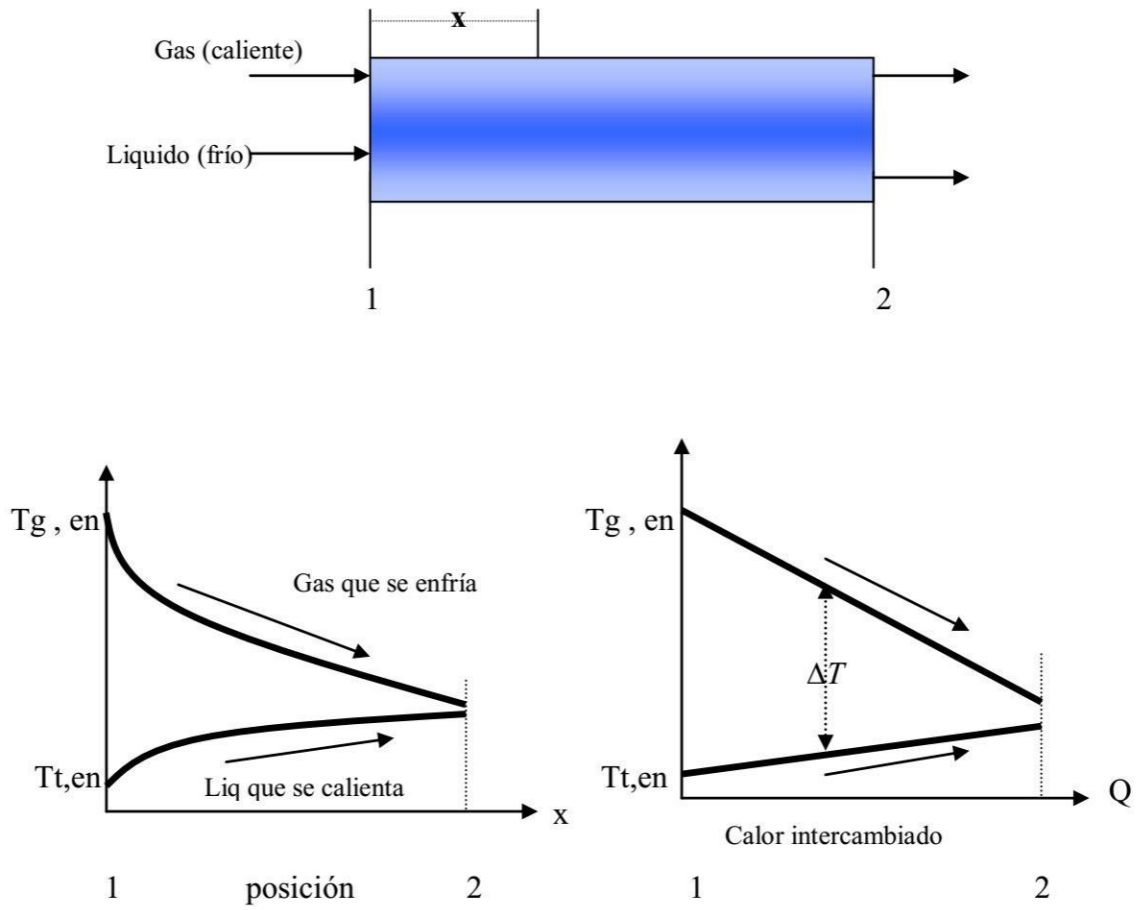
### **Sin cambio de fase, Cp independiente de temperatura**

En la Fig. 2 se esquematiza el diagrama de temperatura frente a la distancia y el diagrama mas útil de T frente a Q para estos dos modelos idealizados de flujo. Nótese que Q representa la cantidad de calor intercambiado a medida que los fluidos pasan a través de intercambiador. Esta cantidad se mide convenientemente por el cambio entalpico de uno de los fluidos [J/kg] , o como fracción del calor total transferido.

## FLUJO EN PISTÓN EN CONTRACORRIENTE



## FLUJO EN PISTÓN EN PARALELO



**Fig.2 Perfiles de temperatura en intercambiadores ideales en contracorriente y en paralelo, como una función de la posición y una función del calor transferido entre las corrientes.**



a. **Intercambiadores en Contracorriente.** Alrededor de todo el intercambiador, el balance de calor de la ecuación (1) se puede escribir como .

$$q = -m_g C_g (T_{g,sal} - T_{g,en}) = m_l C_l (T_{l,sal} - T_{l,en}) = UA\Delta T \quad (2)$$

Análogamente para una sección diferencial del intercambiador de área interfacial  $dA$  , se tiene :

$$dq = \underset{\text{I}}{-m_g^0 C_g^0 dT_g} = \underset{\text{II}}{m_l^0 C_l^0 dT_l} = \underset{\text{III}}{U\Delta T dA} \quad (3)$$

Donde  $\Delta T = T_g - T_l$  se denomina fuerza impulsora de temperatura.

Combinando los términos I y III, II y III e integrando (se considera U constante), después de operar se obtiene

$$q = m_g C_g (T_{g,en} - T_{g,sal}) = m_l C_l (T_{l,sal} - T_{l,en}) = UA\Delta T_{ml} \quad (4)$$

Donde la fuerza impulsora adecuada de temperatura es fuerza impulsora de temperatura media logarítmica, definida como

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{(T_{g,sal} - T_{l,en}) - (T_{g,en} - T_{l,sal})}{\ln \frac{T_{g,sal} - T_{l,en}}{T_{g,en} - T_{l,sal}}} \quad (5)$$

Reagrupando las ecuaciones 4 y 5 se obtiene, después de mas operaciones, la eficacia del intercambiador de calor como

$$\eta_l = \frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = \frac{T_{l,sal} - T_{l,en}}{T_{g,en} - T_{l,en}} = \frac{1 - K}{(m_l C_l / m_g C_g) - K} \quad (6)$$

o bien

$$\eta_g = \frac{\Delta T_g}{\Delta T_{\max}} = \frac{T_{g,en} - T_{g,sal}}{T_{g,en} - T_{l,en}} = \frac{1 - K}{1 - (m_g C_g / m_l C_l)K} \quad (7)$$

donde

$$K = \exp \left[ -UA \left( \frac{1}{m_g C_g} - \frac{1}{m_l C_l} \right) \right] \quad (8)$$

En el caso especial de iguales capacidades caloríficas

( $m_g C_g = m_l C_l = m C$ ) las líneas de operación en el gráfico T frente

a Q se hacen paralelas y

$\Delta T_{ml} - \Delta T$  constante a través del intercambiador

En esta situación las ecuaciones 6 y 7 se reducen a

$$\eta_l = \eta_g = \frac{\Delta T_g}{\Delta T_{\max}} = \frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = \frac{UA / m C}{1 + (UA / m C)} \quad (9)$$

Las ecuaciones 4 y 5 son útiles para encontrar el tamaño de un intercambiador dadas las temperaturas de entrada y salida deseadas.

Las ecuaciones 6 y 9 son útiles para el problema inverso, encontrar las temperaturas de salida en un sistema dado .

**b. Intercambiador en Paralelo.** Igual que para el contacto en contracorriente, el tamaño del intercambiador (o caudal) para dar las temperaturas terminales deseadas se encuentra que es

$$\dot{q} = \dot{m}_g C_g (T_{g,en} - T_{g,sal}) = \dot{m}_l C_l (T_{l,sal} - T_{l,en}) = UA\Delta T_{ml} \quad (10)$$

donde

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{(T_{g,sal} - T_{l,sal}) - (T_{g,en} - T_{l,en})}{\ln \frac{T_{g,sal} - T_{l,sal}}{T_{g,en} - T_{l,en}}} \quad (11)$$

A partir de estas expresiones la eficacia del intercambiador de calor ( y por tanto, las temperaturas terminales ) en un intercambiador dado se encuentra que es

$$\eta_l = \frac{T_{l,sal} - T_{l,en}}{T_{g,en} - T_{l,en}} = \frac{\dot{m}_g C_g}{\dot{m}_l C_l + \dot{m}_g C_g} (1 - K') \quad (12)$$

o bien

$$\eta_g = \frac{T_{g,en} - T_{g,sal}}{T_{g,en} - T_{l,en}} = \frac{\dot{m}_l C_l}{\dot{m}_l C_l + \dot{m}_g C_g} (1 - K') \quad (13)$$

$$K' = \exp \left[ -UA \left( \frac{1}{m_g C_g} + \frac{1}{m_l C_l} \right) \right] \quad (14)$$

Para iguales capacidades caloríficas ( $m_g C_g = m_l C_l = m C$ ) las expresiones de eficacia se reducen a

$$\eta_l = \eta_g = \frac{\Delta T_g}{\Delta T_{\max}} = \frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - e^{-(UA/2mC)} \right] \quad (15)$$

## B. Intercambiadores de Carcasa y Tubos

Para los intercambiadores de carcasa y tubos se tienen varios modelos de flujo diferentes del sencillo de flujo en pistón en paralelo y en contracorriente. Todos son menos eficaces que el flujo en pistón en contracorriente. Esto significa que se necesita mas área superficial del intercambiador para las condiciones finales dadas. A pesar de este inconveniente estos intercambiadores se utilizan ampliamente en la industria, ya que con frecuencia son más convenientes, más compactos y menos caros de construir para una finalidad dada.

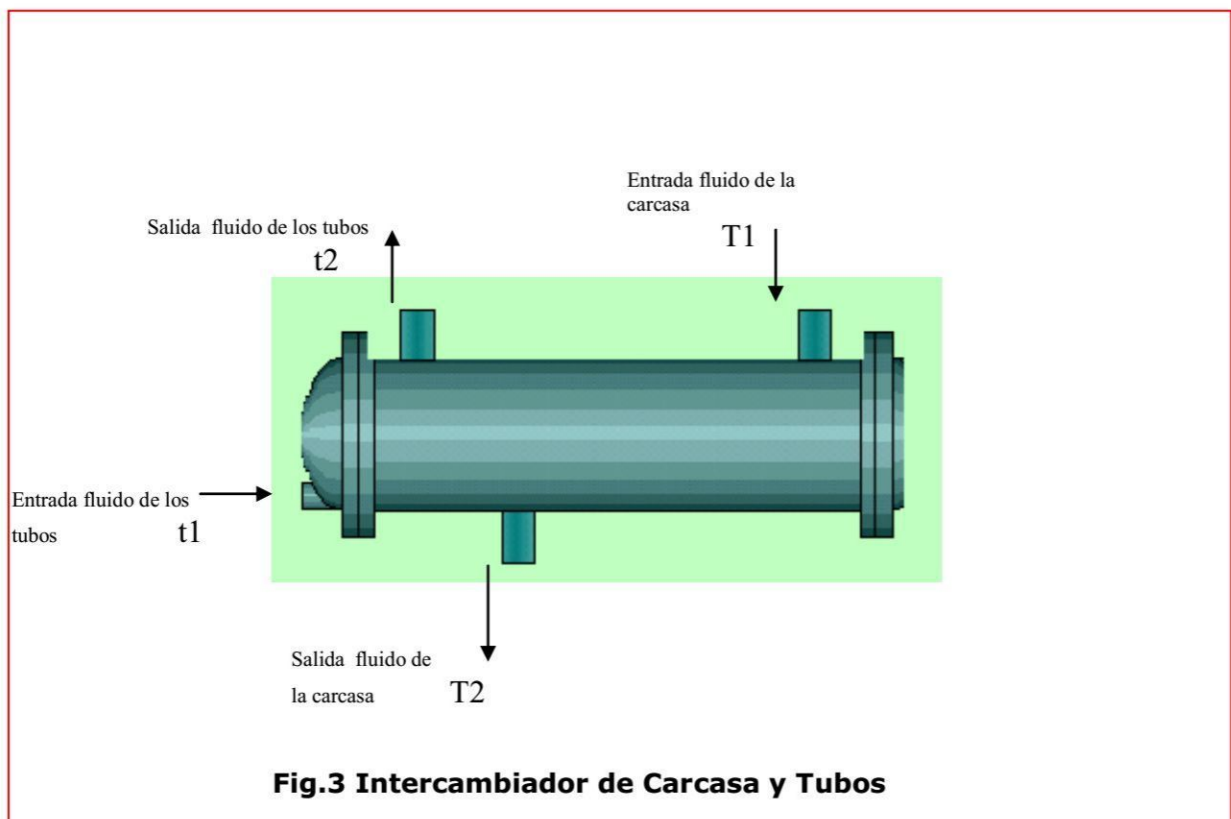
Se tratan estos intercambiadores como unidades de flujo en pistón en contracorriente con un factor de corrección  $F$ , entre 0 y 1, para tener en cuenta la disminuida eficacia de contacto.

Por tanto las ecuaciones de rendimiento para estos intercambiadores, suponiendo U constante, son

$$q = -[mC(T_{sal} - T_{en})]_{carcasa} = [mC(T_{sal} - T_{en})]_{tubo} = UA\Delta T_{ml}F \quad (16)$$

o con la nomenclatura especial de esta sección

$$q = -\dot{M}C(T_2 - T_1) = \dot{m}c(t_2 - t_1) = UA\bar{\Delta T} \quad (17)$$

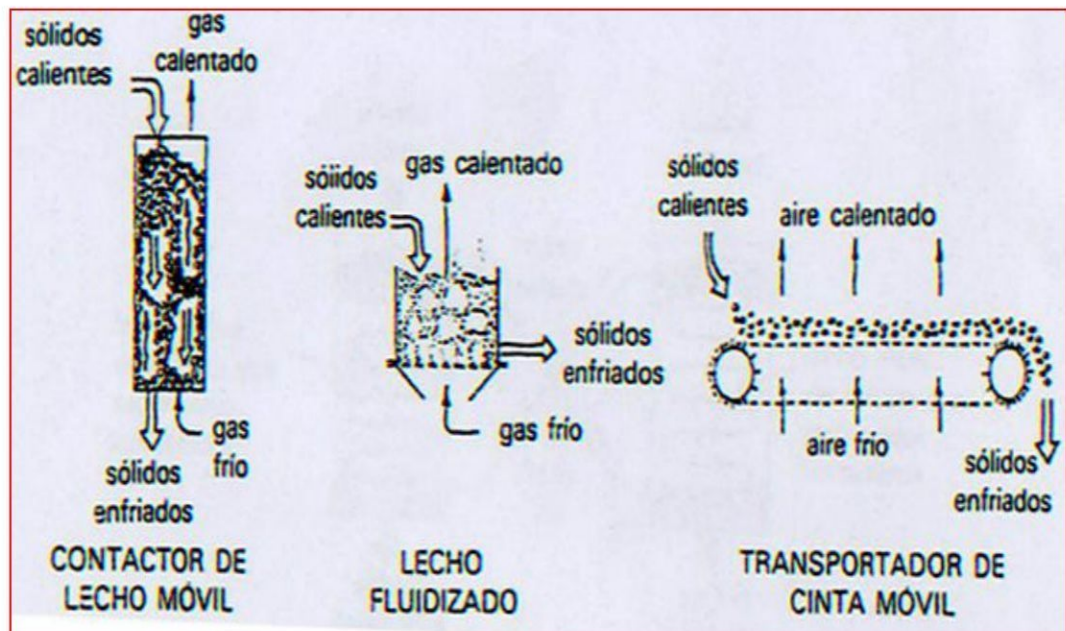


### 5.1.2 Intercambiadores de Contacto Directo sin Almacenamiento de Calor

En los intercambiadores de contacto directo sin almacenamiento de calor las corrientes contactan una con otra íntimamente, cediendo la corriente mas caliente directamente su calor a la corriente mas fría. Este tipo de intercambiador se utiliza naturalmente cuando las dos fases en contacto son mutuamente insolubles y no reaccionan con una o otra, Por consiguiente, no puede utilizarse con sistemas gas-gas.

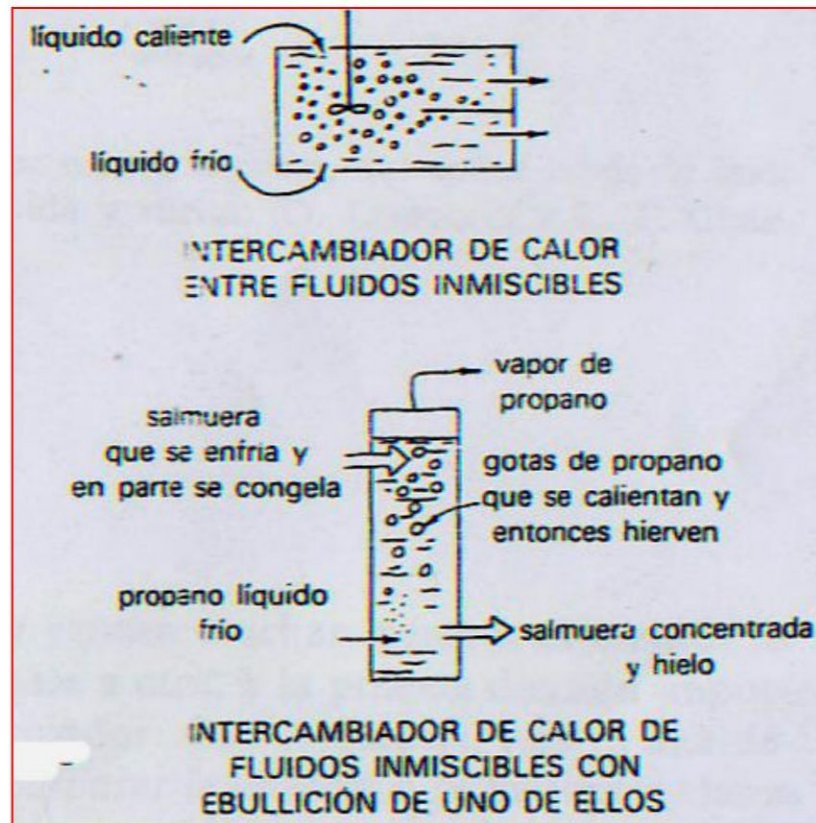
Los intercambiadores de Calor de contacto directo son tres amplios tipos.

En primer lugar, se tienen los intercambiadores gas-sólido. En la Fig.4 se muestran diversas formas de los mismos.



**Fig. 4 Intercambiadores de contacto directo gas-sólidos sin almacenamiento de calor.**

A continuación se tienen los intercambiadores fluido-fluido, en los que los dos fluidos en contacto son mutuamente inmiscibles. En la Fig. 5 se muestran algunos esquemas.

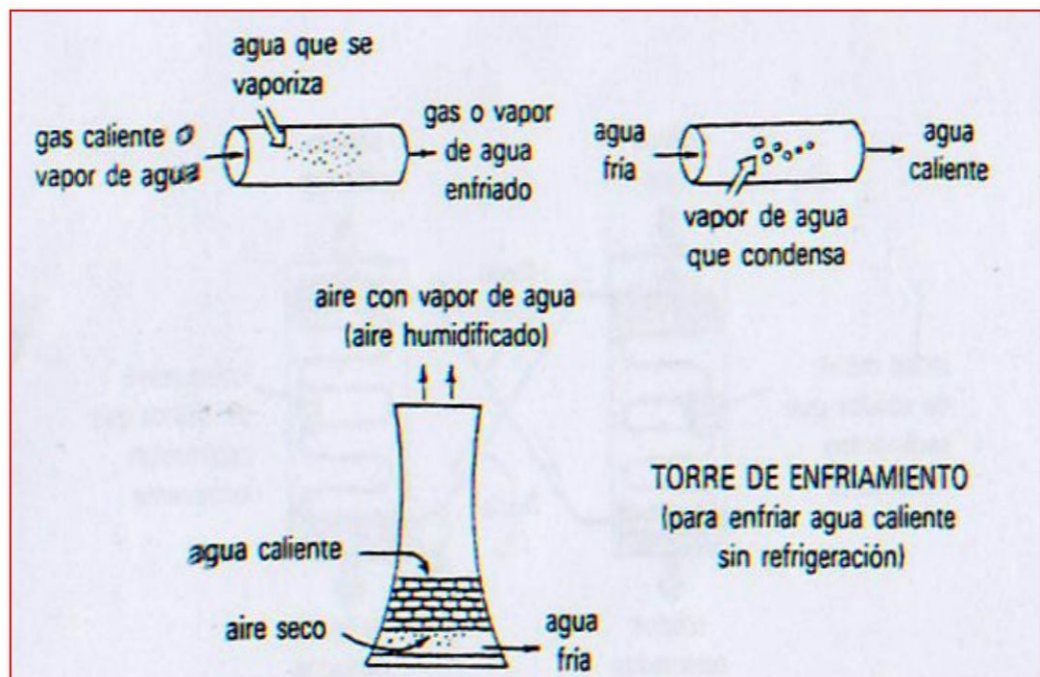


**Fig. 5 Intercambiadores de contacto directo fluido-fluido sin almacenamiento de calor.**

Finalmente, no siempre es necesario que los dos fluidos en contacto sean mutuamente insolubles, y la Fig. 6 muestra intercambiadores donde uno de los fluidos circulantes se disuelve en el otro.



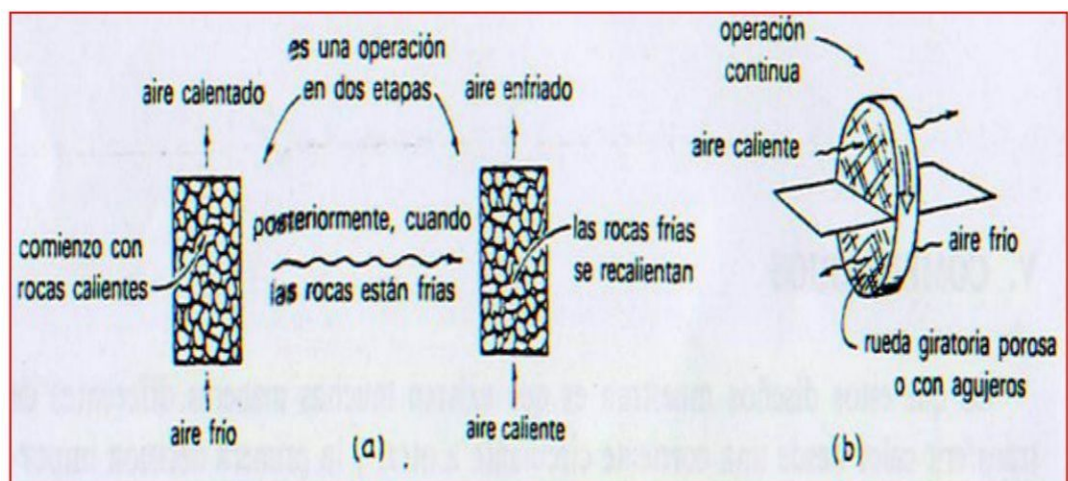
En particular, en los sistemas aire-agua el intercambiador de contacto directo es de gran importancia ya que justo una de las fases (agua) se disuelve, o evapora, en la otra fase (aire). La torre de enfriamiento de agua, mostrada en la Fig. 6, es un ejemplo de este tipo, y de hecho, representa el tipo mas ampliamente utilizado de intercambiador de calor en la industria.



**Fig. 6 Intercambiadores de calor de contacto directo fluido-fluido en los que una fase puede disolverse en la otra**

### 5.1.3 Regeneradores ( Intercambiadores de Contacto Directo Con Almacenamiento de Calor).

En los regeneradores una corriente caliente de un gas transfiere su calor a un compuesto intermedio, normalmente un sólido, que posteriormente cede este calor almacenado a una segunda corriente de un gas frío. Existe una serie de diferentes maneras de hacer esto, como se muestra en la Fig. 7.



**Fig.7 Regeneradores de calor o intercambiadores con almacenamiento de calor : a) los sólidos que almacenan el calor están quietos; b) los sólidos que almacenan el calor circulan entre las corrientes caliente y Fría .**

Lo que estos diseños muestran es que existen muchas maneras diferentes de transferir calor desde una corriente circulante a otra, y la primera decisión importante es elegir el tipo correcto de intercambiador. Con frecuencia, esta es una decisión clara, pero algunas veces hay que comparar la economía de bastantes clases diferentes de intercambiadores.

## 5.2 BALANCE DE ENERGÍA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA UN SISTEMA ABIERTO (MODELAMIENTO)

Escribiendo para un sistema abierto (donde puede ocurrir entrada y salida de flujo material) esto es

$$\begin{array}{l}
 \text{Flujo de energía} \\
 \text{interna, Cinética y} \\
 \text{potencial entrando al} \\
 \text{sistema por convección y} \\
 \text{difusión} \quad \text{---} \\
 \\
 \text{Flujo de energía} \\
 \text{interna, Cinética y} \\
 \text{potencial saliendo del} \\
 \text{sistema por convección y} \\
 \text{difusión} \quad \text{---} \\
 \\
 \text{Calor adicionado} \\
 \text{al sistema por} \\
 \text{conducción, radiación y} \\
 \text{reacción} \quad \text{+} \\
 \\
 \text{Trabajo realizado por} \\
 \text{el sistema sobre los} \\
 \text{alrededores (trabajo de} \\
 \text{eje y de cambio de} \\
 \text{volumen PV)} \quad \text{---} \\
 \\
 \text{Cambio con el} \\
 \text{tiempo de la} \\
 \text{energía interna,} \\
 \text{cinética y} \\
 \text{potencial dentro} \\
 \text{del sistema} \quad \text{---}
 \end{array} \quad (18)$$

Aplicando la ecuación 18 para una corriente cualquiera en el intercambiador de calor se tiene :

$$V_o \rho_o (U_o + K_o + \phi_o) - V \rho (U + K + \phi) + (Q_G + Q) - (W + VP - V_o P_o) = \frac{d}{dt} [(U + K + \phi) V' \rho] \quad (19)$$

Donde :

$U$  = Energía Interna (energía por unidad de masa)

$K$  = Energía Cinética (energía por unidad de masa)

$\phi$  = Energía Potencial (energía por unidad de masa)

$W$  = Trabajo de eje realizado por el sistema (energía/tiempo)

$P$  = Presión del Sistema.

$P_o$  = Presión de la corriente de alimentación.

$V$  = Caudal Volumétrico (volumen / tiempo)

$V'$  = Volumen del sistema ocupado por el fluido

$\rho$  = densidad (masa / volumen)

$Q_G$  = Calor generado por reacción

$Q$  = Calor transferido

$t$  = Tiempo

$o$  = el subíndice  $o$  significa entrada al sistema.

Notar que todos los términos en la ecuación 19 deben de tener las mismas unidades(energía/tiempo), así los términos  $VP$  deben usar el factor de conversión apropiado.

En el intercambiador de calor en estudio no se genera calor por lo que  $QG=0$ , y no se hace ningún trabajo de eje, así  $W=0$ . Si las velocidades de flujo de entrada y salida no son muy altas, el termino de energía cinética es despreciable. Si la elevación de los flujos de entrada y salida están mas o menos al mismo nivel, el termino de energía potencial es pequeño. Entonces la ecuación 19 se reduce a:

$$\begin{aligned}\frac{d(\rho V U)}{dt} &= V_o \rho_o U_o - V \rho U + Q - V \rho \frac{P}{\rho} + V_o \rho_o \frac{P_o}{\rho_o} \\ &= V_o \rho_o (U_o + P_o \bar{V}_o) - V \rho (U + P \bar{V}) + Q\end{aligned}\quad (20)$$

Donde  $\bar{V}$  es el volumen especifico(  $pies^3 / lbm$  o  $m^3 / kg$  ), el reciproco de la densidad.

La entalpía  $H$  o  $h$ , se define :

$$H \text{ o } h = U + P \bar{V}\quad (21)$$

Para el análisis usaremos  $h$  para la entalpía de una corriente líquida y  $H$  para la entalpía de una corriente de gas o vapor. Luego, para una corriente cualquiera del intercambiador se obtiene :

$$\frac{d(\rho V' U)}{dt} = V_0 \rho_0 h_0 - V \rho h + Q \quad (22)$$

Para líquidos el término  $P\bar{V}$  es despreciable comparado con el término  $U$ , y podemos usar la velocidad de cambio de la entalpía del sistema en lugar de la energía interna del sistema

$$\frac{d(\rho V' h)}{dt} = V_0 \rho_0 h_0 - V \rho h + Q \quad (23)$$

Las entalpías son funciones de la composición, temperatura, y presión, pero principalmente de la temperatura. A partir de la termodinámica, la capacidad calorífica a presión constante,  $C_p$ , y a volumen constante  $C_v$ , son:

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (24)$$

Para demostrar que la energía siempre es influenciada por la temperatura, haremos una simplificación del problema asumiendo que la entalpía del líquido puede ser expresada como un producto de la temperatura absoluta y una capacidad calorífica promedio  $C_p$ , (Btu/lbm °R o kJ/kg °K) que es constante.

$$H = C_p T \quad (25)$$

También asumiremos que las densidades de todas las corrientes líquidas son constantes. Con estas simplificaciones la ecuación 23 será :

$$\rho C_p \frac{d(V'T_c)}{dt} = \rho C_p (V_0 T_0 - VT) + Q \quad (26)$$

De la ecuación de Fourier, para el calor transferido se tiene:

$$Q = UA\Delta T \quad (27)$$

Donde

$U$  = Coeficiente total de transferencia de calor.  
 $A$  = Área de transferencia de calor

Reemplazando la ecuación 27 y considerando que el volumen ocupado por la corriente es constante, la ecuación 26 quedara de la siguiente forma:

$$\rho V' C_p \frac{d(T_c)}{dt} = \rho C_p (V_0 T_0 - VT) + UA\Delta T \quad (28)$$

Considerando que:

$\rho V' = M$  : masa de fluido dentro del sistema

$\rho V_0 = \rho V = F(t)$  : Flujo de masa entrando y saliendo del sistema, el cual varia con el tiempo de acuerdo a las condiciones de operación del intercambiador, y si los flujos de masa varían, también variara el coeficiente total de transferencia de calor . Por lo tanto  $U=U(t)$ . Con estas simplificaciones y asunciones la ecuación 28 será:

$$MC_p \frac{d(T_c)}{dt} = C_p F(t)(T_0 - T) + U(t)A\Delta T \quad (29)$$

Tomando la temperatura  $T_C$  de la corriente como el promedio entre las temperaturas de entrada  $T_0$  y salida  $T$

$$T_C = (T_0 + T) / 2 \quad (30)$$

Reemplazando la ecuación 30 en 29 y considerando que la temperatura de entrada es constante, se tiene:

$$\frac{d(T)}{d(t)} = 2[F(t)(T_0 - T) + U(t)A\Delta T(T) / C_p] / M \quad (31)$$

Aplicando la ecuación 31 tanto para el fluido de calentamiento como para el fluido de proceso del intercambiador, y considerando que el fluido de calentamiento cede calor y el fluido de proceso absorbe calor, se tiene:

$$\frac{d(T_C)}{dt} = 2[F_C(t)(T_{CO} - T_C) - U(t)A\Delta T(T) / C_{p_c}] / M_C \quad (32)$$

$$\frac{d(T_P)}{dt} = 2[F_P(t)(T_{PO} - T_P) + U(t)A\Delta T(T) / C_{p_p}] / M_P \quad (33)$$

Donde  $T = (T_C, T_{CO}, T_P, T_{PO})$  es un vector de temperaturas de los fluidos de entrada y salida,  $\Delta T(T)$  es la diferencia media efectiva de temperaturas, la cual puede ser la diferencia media aritmética de temperaturas (DMAT).

$$\Delta T(T) = \frac{(T_P - T_{CO}) - (T_{PO} - T_C)}{2} \quad (34)$$



O como en la mayoría de los casos prácticos, la diferencia media logarítmica de temperaturas (DMLT).

$$\Delta T(T) = \frac{(T_{CO} - T_P) - (T_C - T_{PO})}{\ln(T_{CO} - T_P) - \ln(T_C - T_{PO})} \quad (35)$$

La dependencia del tiempo del coeficiente de transferencia de calor es importante para variaciones en el área de transferencia de calor. En este caso asumimos que  $U(t) \neq 0, t \geq 0$  y  $T_{CO} > T_{PO}$  ó  $(T_{CO} < T_{PO})$  respectivamente). Las asunciones precedentes implican que bajo condiciones normales de operación,  $T_{CO} > T_C$  o  $(T_{CO} < T_C)$  respectivamente), de modo que el sistema de control esta bien definido para todo  $t > 0$ .

## **5.3 INSTRUMENTOS DE CAMPO**

### **5.3.1 SENSOR**

Convertidor técnico, que convierte una variable física ( temperatura, distancia, presión) en otra variable diferente, más fácil de evaluar generalmente una señal eléctrica, (tensión, intensidad, resistencia, frecuencia de oscilación). Dispositivo que pueden funcionar tanto por contacto físico (finales de carrera, sensores de fuerza) como sin contacto físico (barrera fotoeléctrica, barreras de aire, sensores de reflexión).

Dentro de un proceso controlado representan los “perceptores” que supervisan un proceso, indicando errores, recogiendo los estados y transmitiendo esta información a los demás componentes del proceso.

Se les denomina también como: codificadores(encoders), efectores, convertidores, detectores, transductores, iniciadores.

### **SEÑALES DE SENSORES**

Generalmente, los sensores convierten un valor físico en una señal eléctrica.

Los sensores pueden dividirse, según el tipo de señal de salida, en sensores binarios, conocidos también como interruptores y en sensores analógicos.

#### **Sensores binarios**

Los sensores binarios o digitales solamente generan dos señales de salida diferentes.

Los estados de conmutación "On -conectado" y "Off -desconectado".

## Sensores analógicos

Los sensores analógicos crean una señal eléctrica que cambia continuamente, de acuerdo con los constantes cambios del valor físico.

Los sensores analógicos ofrecen más información que los binarios; aunque el procesamiento de las señales es más laborioso.

## SENSORES DE TEMPERATURA

La temperatura puede medirse de numerosas maneras y con una gran variedad de elementos. Cada proceso en la industria debe ser controlado de alguna manera, y esta necesidad con frecuencia incluye la medición de temperaturas. Se dispone de una gran variedad de sensores de temperatura para llevar a cabo esta tarea, tal como se muestra en la tabla1. El ingeniero de procesos y el instrumentista deben decidir cuál de los sensores es mejor para una situación en particular.

<b>Tabla1 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA</b>			
<b>Eléctricos</b>	<b>Mecánicos</b>	<b>Radiación térmica</b>	<b>Varios</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Termocuplas</li><li>• Termorresistencias</li><li>• Termistores</li><li>• Resistores de carbono</li><li>• Diodos</li><li>• Detectores de ruido Johnson</li><li>• Transistores</li><li>• Cristales de cuarzo</li><li>• Sales paramagnéticas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistemas de dilatación</li><li>• Termómetros de vidrio con líquidos</li><li>• Termómetros bimetalícos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pirómetros de radiación</li><li>- Total ( banda ancha)</li><li>- Óptico</li><li>- Pasabanda</li><li>- Relación</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Indicadores de color<ul style="list-style-type: none"><li>- Lápices</li><li>- Pinturas</li></ul></li><li>• Sondas neumáticas</li><li>• Sensores ultrasónicos</li><li>• Indicadores pirométricos</li><li>• Termómetros acústicos</li><li>• Cristales líquidos</li><li>• Sensores fluídicos.</li></ul>

Veamos primero el concepto de **transductores**:

**Transductores** son aquellos elementos de un circuito electrónico que efectúan una trasposición de una variable física en una eléctrica.

Podemos diferenciar dos clases de transductores:

**1) Los de entrada:** (o sensores) que transforman una variable física dada, en una variable eléctrica - por lo general la primera se encuentra en uno de los 5 campos de señales más comunes - radiante, químicas, magnética, térmica ó mecánica, mientras que la segunda queda restringida normalmente a variaciones de tensión y corriente, a veces en forma directa o indirectamente a través de variación de algún parámetro pasivo (Resistencia, capacidad, inductancia).

**2) Los de Salida:** (o actuadores) estos traducirán una variable eléctrica a una variable física en alguno de los 5 campos mencionados.

**Transductores de temperatura**, los más comunes son: Termocupla, termorresistencia y termistores .

A fin de seleccionar el mejor sensor para una aplicación dada, se deben considerar varios factores, como ser rangos de temperatura, exactitud, velocidad de respuesta, costo y requerimientos de mantenimiento.

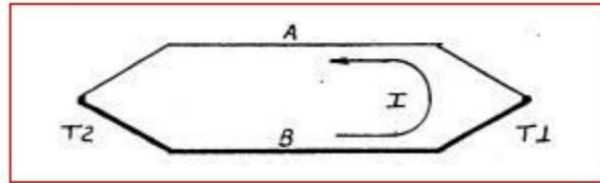
Estos factores serán analizados a continuación con relación a aquellos dispositivos de uso más común en las industrias de proceso: termocuplas, termoresistencias, termistores, sistemas de dilatación y pirómetros de radiación u ópticos.

En la Tabla 2 se listan los rangos de temperatura medidos normalmente mediante sensores estándar. Estos rangos no representan los extremos alcanzables, sino los límites que pueden medirse con los dispositivos disponibles por lo general en el mercado y que son suministrados por la mayoría de los fabricantes. Se pueden medir mayores y menores temperaturas, pero generalmente con una menor exactitud y a un mayor costo.

<u>Tabla 2 - Rangos de temperatura correspondientes a los métodos más comunes de medición.</u>	
<b>SISTEMA</b>	<b>RANGO EN °C</b>
Termocuplas	-200 a 2800
Sistemas de dilatación (capilares o bimetálicos)	-195 a 760
Termoresistencias	-250 a 850
Termistores	-195 a 450
Pirómetros de radiación	-40 a 4000

### a.- Termocuplas

Las termocuplas se basan para su funcionamiento en el efecto SEEBEK :



**Fig.8 Efecto SEEBEK**

Calentado la juntura de dos materiales distintos que componen un circuito cerrado, se establece una corriente.

Las leyes principales que rigen su funcionamiento son:

- 1) Ley de Homogeneidad del circuito: No se puede obtener corriente calentando. Un solo metal. (efecto Thompson)
- 2) Ley de Metales Intermedios: La sumatoria de las diferencias de potencial térmicas es cero en un circuito con varios metales, si estos están a temperatura uniforme.
- 3) Ley de Temperaturas intermedias: La fuerza electromotriz térmica de una TMC no depende de las temperaturas -intermedias.

La tensión de una Termocupla cuyas junturas se hallan a temperaturas  $T$  y  $T_R$  respectivamente es:

$$E = k_1(T - T_R) + \frac{k_2}{2}(T^2 - T_R^2) + k_3(T^3 - T_R^3) + \dots \quad (36)$$

Se ve que a medida que  $T - T_R$  crece la respuesta se hace no-lineal.

Es deseable entonces para que una TMC tenga un gran rango de medición, que:

- 1)  $K_1$  sea lo mayor posible
- 2)  $K_2, K_3 \dots K_n$  sean lo menor posible
- 3) el punto de fusión de sus metales componentes sea lo mayor posible.
- 4) gran resistencia al ataque químico.

Una termocupla consiste de un par de conductores de diferentes metales o aleaciones. Uno de los extremos, la junta de medición, está colocado en el lugar donde se ha de medir la temperatura. Los dos conductores salen del área de medición y terminan en el otro extremo, la junta de referencia que se mantiene a temperatura constante. Se produce entonces una fuerza electromotriz (fem) que es función de la diferencia de temperatura entre las dos juntas .

#### **a.1 Termocuplas estándar**

Hay siete tipos de termocuplas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instrument Society of America (ISA). El U.S. National Bureau of Standardg (NBS), por su parte, ha preparado tablas de correlación temperatura fem para estas termocuplas, las que han sido publicadas por el American National Standards Institute (ANSI) y el American Society for Testing and Materials (ASTM).

Durante el año 1986. se ha procedido a uniformar las normas europeas DIN (alemanas), BS (inglesas), NF (francesas) y las antedichas ANSI (norteamericanas) en cuanto a la correlación de temperaturas y fem, así como en lo que hace a las tolerancias de estas fem en las distintas aleaciones.

Esto ha quedado homologado en la norma IEC 584 (International Electrotechnical Commission).

En la Tabla 4 se detallan las tolerancias de calibración estándar según IEC 584 Parte 1 actualmente en vigencia. En la Tabla 3 se comparan las capacidades de las termocuplas para enfrentarse a distintas condiciones ambientales.

#### **Tipo B ( PtRh 30% - PtRh 6%)**

Las ventajas de la termocupla Tipo B sobre la Tipo R o Tipo S son su capacidad para medir temperaturas levemente más altas, su mayor estabilidad y resistencia mecánica, y su aptitud de ser utilizada sin compensación de junta de referencia para fluctuaciones normales de la temperatura ambiente. Las termocuplas Tipo B resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes o inertes a temperaturas hasta 1.700° C. También resultan satisfactorias durante cortos períodos de tiempo en vacío.



Las desventajas de la termocupla Tipo B son su baja tensión de salida y su incapacidad para ser utilizada en atmósferas reductoras (como ser hidrógeno o monóxido de carbono) y cuando se encuentran presentes vapores metálicos (eso es, de plomo o zinc ) o no metálicos (eso es, de arsénico, fósforo o azufre). Nunca se la debe usar con un tubo de protección metálico o termovaina (a partir de aquí, simplemente se la menciona como vaina).

### **Tipo R (PtRh 13% - Pt )**

Las termocuplas Tipo R pueden ser utilizadas en forma continua en atmósferas oxidantes o inertes hasta 1.400° C. No son tan estables como las Tipo B en vacío. La ventaja de la termocupla Tipo R sobre la Tipo B es su mayor fem de salida.

La ASTM establece las siguientes limitaciones que se aplican al uso de las termocuplas Tipo R:

- Nunca se las deben usar en atmósferas reductoras, ni tampoco en aquellas que contienen vapores metálicos o no metálicos u óxidos fácilmente reducidos, a menos que se las protejan adecuadamente con tubos protectores no metálicos.
- Nunca deben ser insertadas directamente dentro de una vaina metálica.

### **Tipo S (PtRh 10 % - Pt )**

La termocupla Tipo S es la termocupla original platino-rodio. Es el estándar internacional (Escala Práctica Internacional de Temperaturas de 1968, IPTS-68) para la determinación de temperaturas entre el punto de solidificación del antimonio 630,74° C (1.167,33° F ) y el punto de solidificación del oro 1.064,43° C (1.917° F).

Las termocuplas Tipo S, igual que las Tipo R, pueden ser utilizadas en forma continua en atmósferas oxidantes o inertes hasta 1.480° C. Tienen las mismas limitaciones que las termocuplas Tipo R y Tipo B y también son menos estables que la termocupla Tipo B cuando se las utiliza en vacío .

### **Tipo J (Fe - CuNi )**

La termocupla Tipo J, conocida como la termocupla hierro - constantán, es la segunda más utilizada en los EE.UU. El hierro es el conductor positivo, mientras que para el conductor negativo se recurre a una aleación de 55 % de cobre y 45 % de níquel (constantán). Las termocuplas Tipo J resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes y en vacío hasta 760° C. Por encima de 540° C, el alambre de hierro se oxida rápidamente, requiriéndose entonces alambre de mayor diámetro para extender su vida en servicio. La ventaja fundamental de la termocupla Tipo J es su bajo costo.

Las siguientes limitaciones se aplican al uso de las termocuplas Tipo J:

- No usar en atmósferas sulfurosas por encima de 540° C.
- A causa de la oxidación y fragilidad potencial , no se las recomienda para temperaturas inferiores a 0° C .
- No deben someterse a ciclos por encima de 760° C , aún durante cortos períodos de tiempo, si en algún momento posterior llegaran a necesitarse lecturas exactas por debajo de esa temperatura.

El constantán utilizado para termocuplas Tipo J no es intercambiable con el constantán de las termocuplas Tipo T y Tipo E, ya que el constantán es el nombre genérico de aleaciones cobre-níquel con un contenido de cobre entre 45 % y 60 %. Los fabricantes de las termocuplas Tipo J regulan la composición del conductor de cobre-níquel de manera que la fem de salida de la termocupla siga la curva de calibración publicada. Los elementos fabricados por las distintas empresas, con frecuencia no son intercambiables para el mismo tipo de termocupla.

**Tabla 3:** Composición, rango de Temperaturas, Diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices (fem) correspondientes a distintas Termocuplas.

<b>Tipo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Composición y símbolo</b>	<b>Rango de temperaturas (1)</b>	<b>Diámetro del alambre apropiado (2)</b>	<b>F.e.m.en mV (3)</b>
<b>B</b>	Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%	PtRh 30% - PtRh 6%	0 ...1.500 (1.800)	0,35 y 0,5 mm	0...10,094 (13,585)
<b>R</b>	Platino-rodio 13% vs. platino	PtRh 13% - Pt	0...1.400 (1.700)	0,35 y 0,5 mm	0.16,035 (20,215)
<b>S</b>	Platino-rodio 10% vs. platino	PtRh 10% - Pt	0...1300(1.600)	0,35 y 0,5 mm	0...13,155 (15,576)
<b>J</b>	Hierro vs. Constatán	Fe - CuNi	-200 ... 700 (900) -200 ... 600 (800)	3 mm 1mm	-7.89 ... 39,130 (51,875) -7.89 ... 33,096 (45,498)
<b>K</b>	Níquel-cromo vs. níquel (Chromel vs. Alumel )	NiCr - Ni	0...1000(1.300) 0 ... 900 (1.200)	3 ó 2 mm 1,38 mm	0...41,269 (52,398) 0...37,325 (48,828)
<b>T</b>	Cobre vs. Constatán	Cu - CuNi	-200 ... 700 (900)	0,5 mm	-5,60 ... 14,86 (20,86)
<b>E</b>	Níquel-cromo vs. constatán (Chromel vs. Constatán )	NiCr - CuNi	-200 ... 600 (800)	3 mm	-9,83 ... 53,11 (68,78) -8,83 ... 45,08 (61,02)

(1) Los valores entre paréntesis son los admitidos en intervalos cortos (no permanentes )

(2) Los diámetros de alambres no son indicativos

(3) Valores de fem (mV) en función de ° C , referencia junta fría 0° C.

### **Tipo K (NiCr Ni)**

La termocupla Tipo K se la conoce también como la termocupla Chromel-Alumel (marcas registradas de Hoskins Manufacturing Co., EE.UU.). El Chromel es una aleación de aproximadamente 90% de níquel y 10% de cromo, el Alumel es una aleación de 95% de níquel, más aluminio, silicio y manganeso, razón por la que la norma IEC la especifica NiCr - Ni. La Tipo K es la termocupla que más se utiliza en la industria, debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas que la termocupla Tipo J.

Las termocuplas Tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1.260° C y constituyen el tipo más satisfactorio de termocupla para uso en atmósferas reductoras o sulfurosas o en vacío.

#### **Tipo T (Cu - CuNi )**

La termocupla Tipo T se conoce como la termocupla de cobre constantán. Resulta satisfactoria para uso continuo en vacío y en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes. Su desventaja reside en el hecho de que su límite máximo de temperatura es de tan sólo 370° C para un diámetro de 3,25 mm.

Aunque las termocuplas Tipo T resulten adecuadas para mediciones debajo de 0° C, la ASTM recomienda para ese propósito a las termocuplas Tipo E.

#### **Tipo E ( NiCr - CuNi)**

La termocupla Tipo E, o Chromel-constantán, posee la mayor fem de salida de todas las termocuplas estándar. Para un diámetro de 3,25 mm su alcance recomendado es - 200° C a 980° C.

Estas termocuplas se desempeñan satisfactoriamente en atmósferas oxidantes e inertes, y resultan particularmente adecuadas para uso en atmósferas húmedas a temperaturas subcero a raíz de su elevada fem de salida y su buena resistencia a la corrosión. La termocupla Tipo E es mejor que la Tipo T, para este propósito a causa de su mayor salida y puesto que la conductividad térmica del alambre de Chromel es menor que la del alambre de cobre de la termocupla Tipo T.

Tabla 4: Tolerancias de Calibración para Termocuplas (referencia junta fría 0°C )  
según IEC 584 Parte 1.

<b>Termocupla</b>	<b>Rango</b>	<b>Clase 1. Desviación máxima (<math>\pm</math>) (1)</b>
Cobre vs. Cobre-níquel, Tipo T	-40 a + 350°C	0,5 °C ó 0,004 (t)
Hierro vs. cobre- níquel, Tipo J	-40a+ 750 °C	1,5 °C ó 0,004 (t)
Níquel-cromo vs. Níquel, Tipo K	- 40 a 1.000 °C	1,5 °C ó 0,004 (t)
Platino-rodio 13% vs. Platino, Tipo R.	0 a + 1.600°C	1 °C ó 1 + 0,003 (t - 1. 100)°C
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S	0 a + 1. 600°C	1 °C ó 1 + 0,003 ( t - 1.100)°C
Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	--	
<b>Termocupla</b>	<b>Rango</b>	<b>Clase 2. Desviación máxima (<math>\pm</math>) (1)</b>
Cobre vs. cobre-níquel, Tipo T	-40a+ 350°C	1°C ó 0,0075(t)
Hierro vs. cobre-níquel, Tipo J	-40a+ 750 °C	2,5 °C ó 0,0075 (t)
Níquel-cromo vs. Níquel, Tipo K	- 40 a + 1.200°C	2. 5 °C ó 0.0075 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R	0 a + 1.600 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Platino- rodio 10% vs. platino, Tipo S	0 a + 1.600 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Platino- rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	+ 600 a + 1700 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
<b>Termocupla</b>	<b>Rango</b>	<b>Clase 3(2). Desviación máxima (<math>\pm</math>) (1)</b>
Cobre vs. Cobre-níquel, Tipo T	-200 a + 40 °C	1 °C ó 0,015 (t)
Hierro vs. cobre- níquel, Tipo J	-200 a + 40 °C	2,5 °C ó 0,015 (t)
Níquel-cromo vs. Níquel, Tipo K	-200 a + 40 °C	2,5 °C ó 0,015 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R	--	--
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S	--	--
Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	+600 a + 1.700 °C	4 °C ó 0,005 (t)

(1) La desviación máxima debe ser calculada como el mayor valor de las dos expresiones: el valor en °C o su equivalente calculado reemplazando (t) por la temperatura en cuestión.

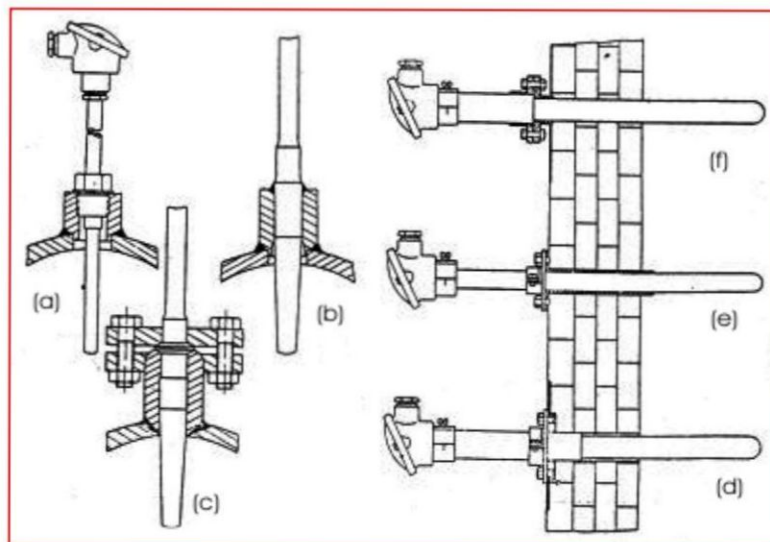
(2) Normalmente, las termocuplas y los cables compensados se suministran con tolerancias especificadas por encima de -40 °C. Para termocuplas utilizadas por debajo de -40 °C . Debe entenderse que sus tolerancias son para ese material mayor que las especificadas en Clase 3.

## **a.2 Termocuplas no estándar**

Hay muchos otros materiales que se utilizan para construir termocuplas además de aquellos que tienen asignada una denominación con letra por la ISA (IEC). Estas otras termocuplas exhiben características especiales que no se encuentran en los tipos estándar, lo cual las hace adecuadas para aplicaciones especiales.

Las características y la fem de salida pueden variar de un fabricante a otro, razón por la que se debe consultar al fabricante con relación a aplicaciones específicas.

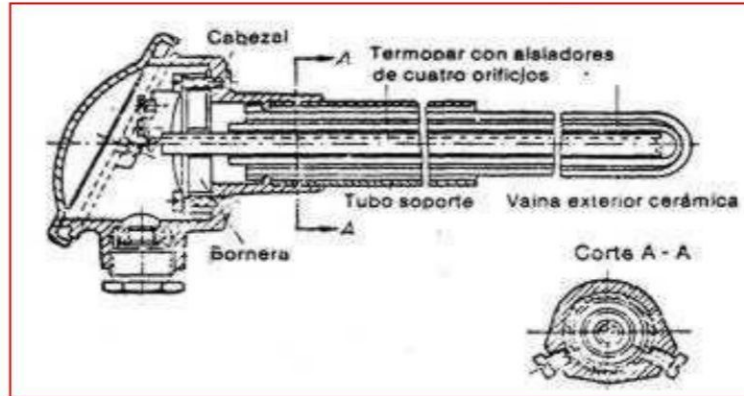
Hay una aleación en particular, muy difundida especialmente en Argentina, que debemos considerar por separado. Se trata de la aleación hierro-constantán Fe - CuNi. Quizás la más difundida antes de la homologación de las normas ANSI MC 96.1 (IPTS - 68) y DIN 43710, las más importantes a nivel mundial.



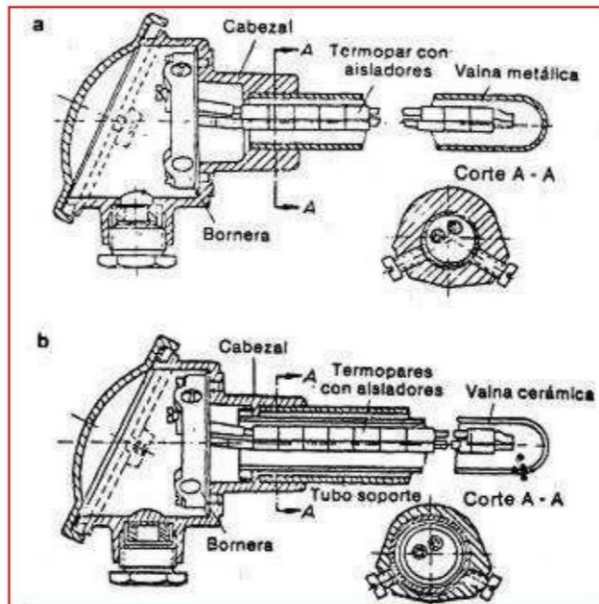
**Fig. 9.** Montaje de sensores de temperatura.

- a.** Con rosca a proceso - **b.** Para soldar - **c.** Con brida - **d.** Montaje de una termocupla de vaina cerámica con brida tope deslizante en la pared de un horno con chapa protectora - **e.** Montaje de una termocupla de vaina metálica con brida tope y buje pasante - **f.** Montaje similar a d., con protección de escape de gases.

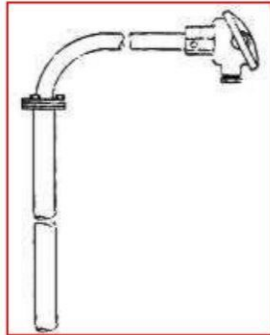




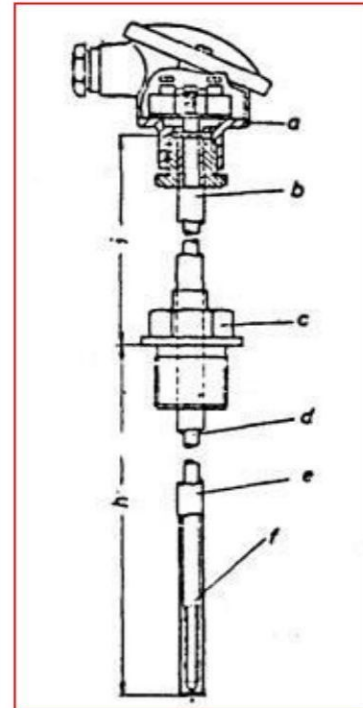
**Fig. 10** Termocupla recta con vaina exterior e interior, termopar doble de ptrh-pt, aislador cerámico de un solo tramo y cuatro orificios.



**Fig. 11** Termocuplas rectas. a. Con termopar CICR-Ni ó Fe-CuNi y vaina metálica. b. Con termopar NiCr-Ni , vaina cerámica y tubo soporte.



**Fig. 12-** Termocupla del tipo acodado con brida .



**Fig. 13.** Termocupla con vaina y rosca a. proceso con cabezal de conexiones (sonda intercambiable colocada según DIN 161601. a. Cabezal - b. Cuello - c. Rosca a proceso - d. Aislador cerámico - e. Vaina metálica - f Termocupla -h. Longitud de la vaina - l, Longitud del cuello.

### 5.3.2 TRANSMISORES

Los transmisores son instrumentos que captan la variable del proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Existen varios tipos señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las mas empleadas en la industria son las tres primeras, las señales hidráulicas se utilizan ocasionalmente cuando se necesita una gran potencia y las señales telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre transmisor y el receptor. Los transmisores neumáticos generan una señal neumática variable linealmente de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada) para el campo de medida de 0-100% de la variable, Esta señal esta normalizada por el SAMA – Asociación de fabricantes de instrumentos ( Scientific Apparatus Makers Association) y ha sido adoptada en general por los fabricantes de transmisores y controladores neumáticos en Estados Unidos. En los países que se utilizan el sistema métrico decimal se emplea además la señal 0.2-1 bar ( 1 bar= 1.02 kg/cm<sup>2</sup> ) que equivale aproximadamente a 3-15 psi ( 3 psi = 0.206 bar o 0.21kg/cm<sup>2</sup> , que cada vez es menos utilizada por no estar normalizada (según sé vera en él capitulo de “Medidas de Presión” las unidades normalizadas son el pascal y el bar (1bar= 10<sup>5</sup> pascal).

El alcance de esta señal métrica es un 6 % mas corto que la señal de 3-15 psi, por lo cual la adopción en una planta industrial de una u otra forma obliga a calibrar con la misma señal adoptada el conjunto completo transmisor, controlador, válvula de control y todos los instrumentos accesorios que se utilicen ( extractores de raíz cuadrada, computadores neumáticos, posicionadores, etc.).

Nótese que en las válvulas de control pueden emplearse señales neumáticas de 0.6-1.4 de 0.4-2 o de 0.8-2.4 bar, gracias a la función de conversión de la señal de entrada 3-15 psi (0.2-1 bar) que puede realizar el posicionador acoplado a la válvula o bien mediante resortes especiales dispuestos en el servomotor de válvula.

Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20 mA c.c, a distancias de 200m a 1 km, según sea el tipo de instrumento transmisor. Todavía pueden encontrarse transmisores que envían las señales de 1-5 mA c.c, 10-50 mA c.c, 0-20 mA c.c, 1-5 V c.c, utilizadas anteriormente a la normalización a la señal indicada de 4-20 mA c.c.

La señal electrónica de 4-20 mA c.c, tiene un nivel suficiente y compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones esta libre de corrientes parásitas y emplea solo dos hilos que no precisan blindaje.

La relación de 4-20 mA c.c, es de 1 a 5, la misma que la razón de 3-15 psi en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de 4 mA elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor.

El “cero vivo” con que comienza la señal (4-20 mA c.c) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por un corte de hilo (la señal se anula) y de permitir el diferenciar todavía mas el “ruido” de la transmisión cuando la variable esta en su nivel mas bajo.

Salvo indicación contraria, en lo que sigue se supondrá que la señal neumática es de 0.2-1 bar (3-15 psi) y la electrónica de 4-20 mA c.c.

Nótese que el nivel mínimo de la señal neumática de salida no es cero, sino que vale 3 psi (0.2 bar. De este modo se consigue calibrar correctamente el instrumento, comprobar su correcta calibración y detectar fugas de aire en los tubos de enlace con los demás instrumentos de neumáticos.

Y así, se comprueba rápidamente que un transmisor neumático de temperatura de intervalo de medida 0-150 °C con el bulbo a 0°C y con señal de salida 1 psi esta descalibrado; Si el nivel estándar mínimo de salida fuera de 0 psi no seria posible esta comprobación rápida y para efectuarla habría que aumentar la temperatura hasta detectar la presión en la salida.

Asimismo, cuando el conducto neumático que llega hasta el receptor se perfora por accidente, la señal neumática puede llegar a anularse, facilitando la detección de la avería la lectura del instrumento receptor (en el ejemplo anterior, si el receptor fuera un manómetro de margen 3-15 psi con graduación de 0-150 °C el índice señalaría un valor inferior al cero del instrumento).

### 5.3.3 ELEMENTO DE CONTROL FINAL

Actualmente se sabe que la productividad aumenta por medio de la optimización, lo cual significa que el proceso se debe estar adaptando a condiciones cambiantes.

Como consecuencia, las propiedades a controlar no se mantienen en valores constantes. Un buen procedimiento de control consiste en no mantener constantes caudales y niveles con objeto de maximizar la eficacia del proceso, por lo que algunas de las variables en cada proceso en particular deben flotar en función de una carga que no se mantiene constante.

En los sistemas de Control es importante que la válvula de Control funcione de forma estable y tenga un buen comportamiento, lo cual significa que:

- Tenga estabilidad a lo largo de todo el recorrido.
- No opere cerca de ninguno de los extremos.
- Sea suficientemente rápida para corregir las perturbaciones.

Los Elementos finales de control modifican la variable manipulada del proceso de acuerdo a la señal del controlador.

- Válvulas
- Motores
- Bombas de velocidad variable
- Amplificadores de potencia

## **Válvulas de Globo**

Sin tener en cuenta el actuador, el conjunto de una válvula de globo esta compuesto, normalmente por:

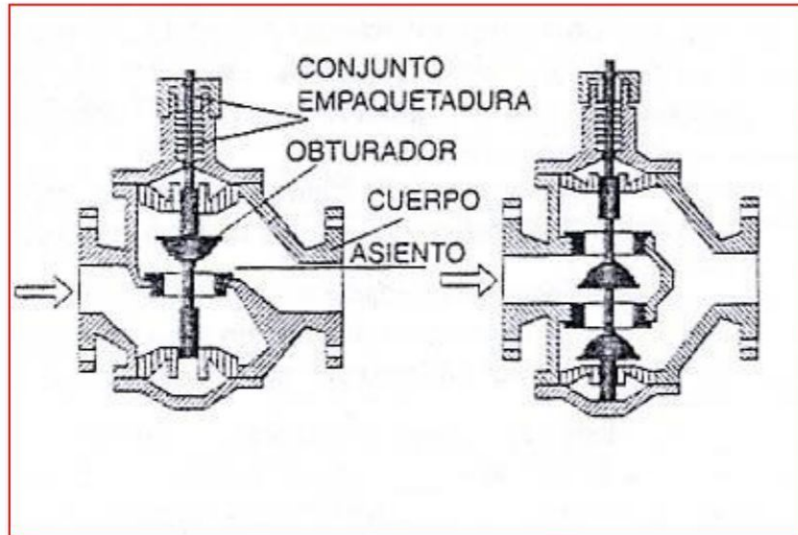
- Cuerpo de la Válvula, incluyendo tapa inferior y demás elementos externos.
- Elementos internos (Obturador y Asiento).
- Conjunto de empaquetadura.

La válvula será de acción directa o inversa dependiendo si el servomotor tiende a cerrar o abrir el paso del fluido. A su vez, el sentido del flujo puede tender a abrir o cerrar la válvula. En general es preferible que el fluido tienda a abrir. En caso contrario, si la válvula se encuentra totalmente cerrada, la fuerza necesaria para contrarrestar la acción del resorte mas la del fluido sé muy grande para despegar el obturador, bajando bruscamente en el momento de abrir por equilibrarse las presiones antes y después del conjunto obturador-asiento. Este fenómeno crea una perturbación que puede ocasionar inestabilidad en el proceso.

La figura 14 muestra dos válvulas, una de simple y otra de doble asiento. En la primera de ellas el fluido tiende a abrir, mientras que en la segunda es auto equilibrada.

Las válvulas auto equilibrado mejoran la estabilidad. En efecto al tener doble asiento, el fluido empuja al obturador de uno de los asientos en la dirección de abrir el paso, mientras que en el otro hace para cerrarlo. De esta manera se compensan los empujes.



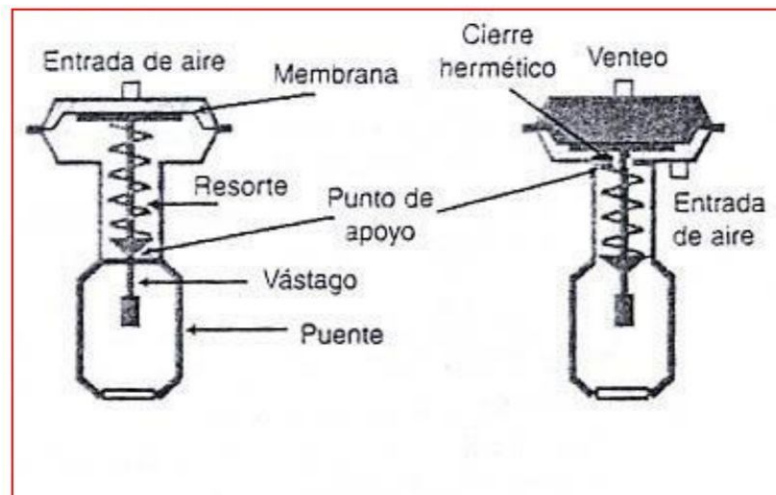


**Fig. 14 Válvula Simple y de Doble Asiento.**

### **Servomotor**

Conceptualmente un actuador o servomotor es la parte de la válvula automática que respondiendo a la señal de control aplicada, ocasiona el movimiento que repercute en la modificación del flujo de un fluido. Este apartado se va a centrar en el actuador neumático de resorte-membrana que es el más utilizado en las válvulas automáticas.

El servomotor neumático de resorte-membrana está basado en el movimiento de una membrana que se deforma bajo la acción de la señal de aire modulado procedente del controlador o convertidor electro-neumático. La membrana empuja al vástago hacia abajo si se trata de acción directa (Fig. 15 izq.) , o la empuja hacia arriba si es de acción inversa ( Fig. 15 der.). El movimiento del vástago se contrarresta con la acción del resorte.

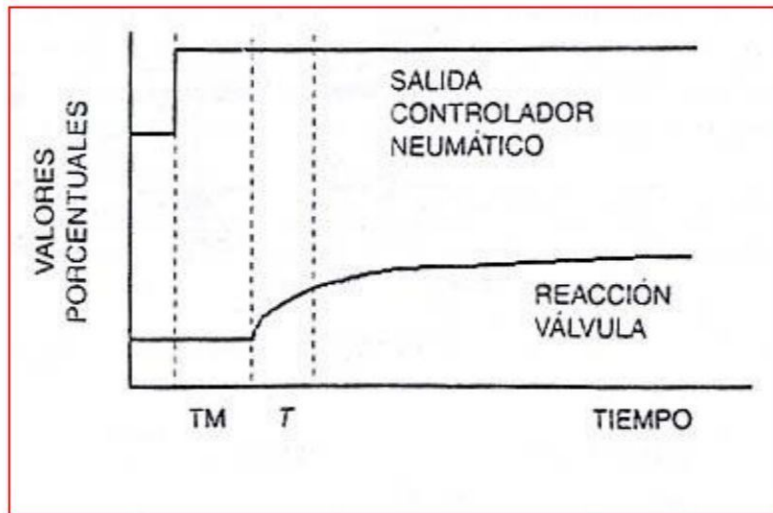


**Fig. 15 Servomotor**

Para la elección del servomotor se tiene en cuenta principalmente:

- Características Dinámicas
- Requerimiento de esfuerzo
- Requerimiento *Fail Safe*.

Como resumen de las características mencionadas, la respuesta dinámica de una válvula automática depende fundamentalmente de la inercia de la propia válvula, rozamientos y volumen de aire que hay que aportar o eliminar del circuito neumático (tubos de señal y el que actúa sobre el diafragma). La curva característica aparece en la figura 16, siendo básicamente una función de tiempo compuesta por tiempo muerto y retardo de primer orden.



**Fig. 16 Curva Característica**

El actuador se dimensiona sobre la base de la fuerza necesaria para llevar a cabo el equilibrio de fuerzas en el cuerpo de la válvula, es decir, la fuerza requerida para cerrar y la rigidez necesaria para mantener la estabilidad. El empuje es función del área de diafragma y de la presión de aire. La posición del vástago se obtiene por un balance de fuerzas que actúa sobre el mismo. Estas fuerzas se deben a la presión sobre el diafragma, carrera del resorte y fuerza del fluido sobre el obturador, tal como muestra la ecuación siguiente, aplicada a un conjunto de acción directa:

$$Pa * Am = Fr * Mv + Pf * Ao \quad (37)$$

$Pa$  = Presión del aire Modulado       $Am$  = Área de la Membrana

$Fr$  = Fuerza del Resorte               $Mv$  = Movimiento del Vástago

$Pf$  = Presión del Fluido                 $Ao$  = Área del Obturador

Dependiendo de la acción directa o inversa del obturador, así como si el fluido tiende a abrir o cerrar, los términos de la ecuación pueden cambiar de signo. En la ecuación anterior no se han tenido en cuenta factores tales como rozamiento en la empaquetadura o inercia.

### **Posicionador**

Como se ha mencionado anteriormente, las válvulas presentan alguna banda muerta debido a la fricción de la empaquetadura. Para evitarlo se utiliza un posicionador que, con carácter general es un amplificador para, con la misma presión de mando ( 3 a 15 psi), se obtiene mayor fuerza actuando sobre la membrana. A veces el rozamiento puede ser tan grande que exista banda muerta incluso aunque exista posicionador cuando la dirección de la señal de control se invierte, el vástago permanece en la última posición hasta que sobrepase la banda muerta.

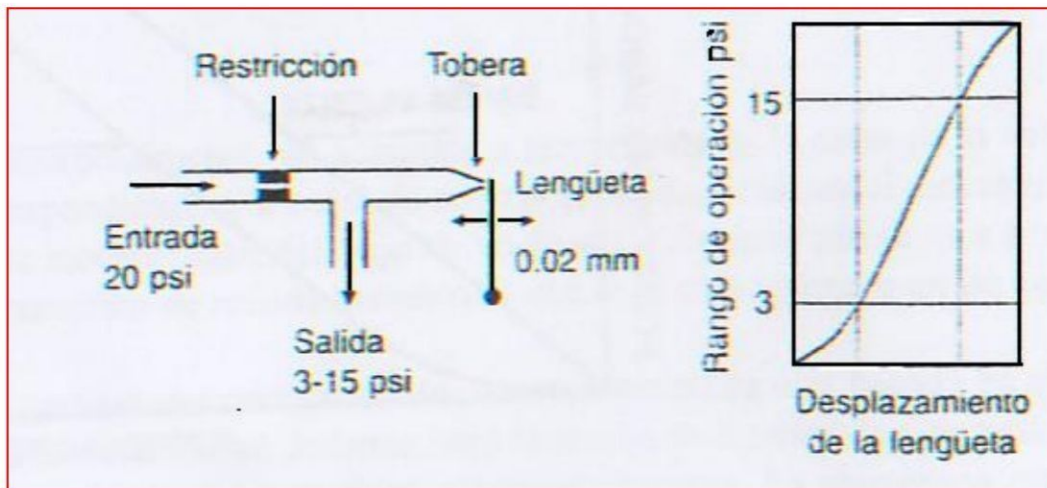
Un posicionador es un accesorio montado sobre la válvula, operada neumáticamente, que conduce las partes móviles a la posición precisa requerida por la señal de control, desde el punto de vista de control, un posicionador es un controlador de posición. Cuando se coloca una válvula de control, el posicionador se comporta como el secundario de un lazo de control cascada, cuyo primario es el valor de la variable correspondiente.

Las razones más importantes para el uso del posicionador son:

- Proteger el proceso controlado de las desviaciones ocasionadas por alteraciones en el comportamiento de la válvula debidas a agarrotamiento, suciedad o cualquier otra causa que ocasione histéresis.
- Aumentar la velocidad de respuesta del actuador, aumentando la presión de suministro o el volumen de aire.
- En algunas válvulas, los posicionadores pueden modificar las características de la válvula por medio de levas mecánicas o generadores de función.

Antes de ver la operación de un posicionador, es necesario comprender primero el funcionamiento del mecanismo lengüeta-tobera en el que están basados los posicionadores tradicionales. La parte izquierda de la figura 17 muestra de forma simplificada este conjunto, el cual es un dispositivo simple de control. La alimentación de aire pasa a través de una restricción de tipo capilar y después a una tobera de mayor diámetro si no existe nada que produzca obstrucción en la tobera, la presión en el circuito de salida será baja, ya que el caudal de aire que atraviesa la restricción pasa libremente por la tobera. Si por medio de algún mecanismo la lengüeta se acerca a la tobera, la obstrucción que provoca en la salida del aire hace que aumente la presión en el circuito de salida.

La parte derecha de la figura 17 muestra que con un pequeño desplazamiento de la lengüeta (0.02mm aproximadamente), se produce una salida de 3 a 15 psi prácticamente lineal. Esta relación se conoce como sensibilidad optima del conjunto. Si la lengüeta se mueve mas allá de la región de sensibilidad optima de salida se ira a cero o bien alcanzara la presión de alimentación.



**Fig.17 POSICIONADOR**



**Figura 18. Válvula de Control**

#### 5.4 SISTEMA DE CONTROL

En los primeros tiempos de la industrialización las plantas eran supervisadas y controladas manualmente, basándose en las indicaciones de instrumentos instalados en campo. La supervisión requería que el operador estuviera en planta para llevar a cabo el control manual directo del proceso .

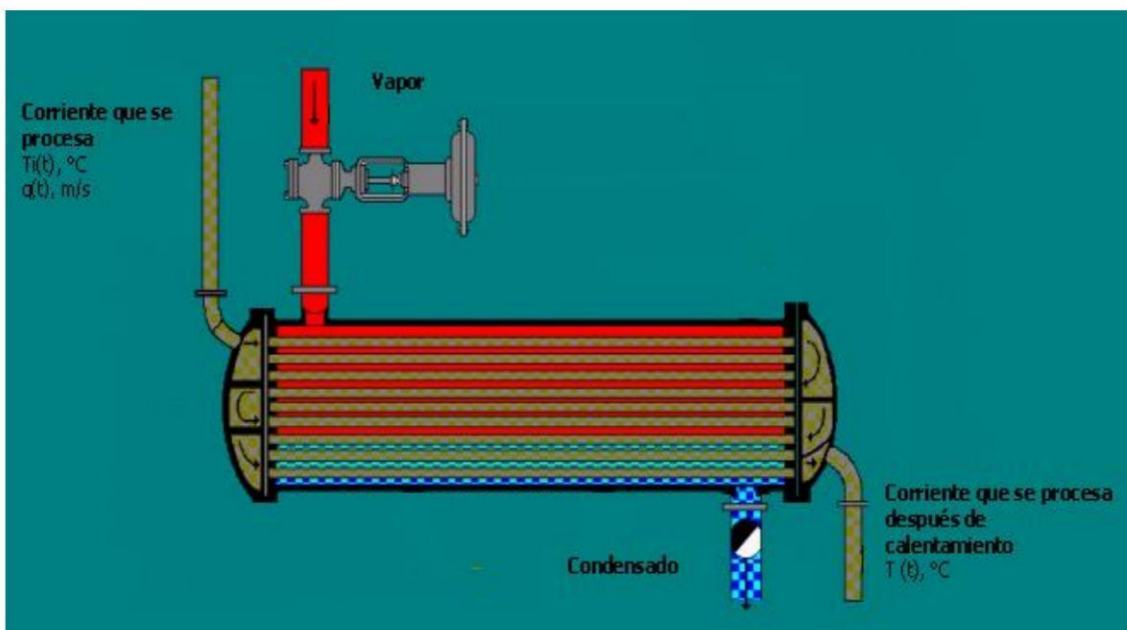
Desarrollo posteriores en la instrumentación, tal como sensores con posibilidad de transmitir las principales variables de proceso (temperatura, presión, nivel, caudal), así como controladores neumáticos, hidráulicos y neumáticos, contribuyeron en los años cuarenta a la automatización gradual de las plantas. La tendencia de automatización continua durante los años cincuenta al aparecer los instrumentos electrónicos. Todo ello condujo a la centralización en salas donde se ubicaron los elementos necesarios para llevar a cabo la supervisión y control con la introducción de señales estándar para transmisión, tanto neumáticas (3 a 15 psi) como electrónicas (4 a 20 mA), los distintos fabricantes hicieron compatibles los elementos que componen un lazo de control, como sensor, transmisor, controlador, convertidor, elemento final, indicador, registrador, etc. Esto simplificó el diseño, instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de control industriales.

A mediados de los años veinte se utilizó en la industria el control todo-nada, y al final de los años veinte el control proporcional. Los controladores con acciones proporcional, integral y derivativa fueron de uso común en los años treinta. Los valores de referencia (puntos de consigna o SP) , podían ser fijados por el operador de planta.



La necesidad de comprender los problemas inherentes al ajuste o sintonía de los controladores PID, hizo que apareciera la simulación del lazo de control. Para el ajuste de los parámetros de control se empezaron a utilizar las reglas de Ziegler Nichols, basadas en la sensibilidad de lazo de control.

Para aclarar las ideas, considérese un intercambiador de calor en el cual la corriente de proceso se calienta mediante vapor de condensación, como se ilustra en la figura 19.



**Figura 19. Intercambiador de Calor**

El propósito de la unidad es calentar el fluido que se procesa, de una temperatura dada de entrada  $T_i(t)$ , a cierta temperatura de salida,  $T(t)$ , que se desea. Como se dijo, el medio de calentamiento es vapor de condensación y la energía que gana el fluido en proceso es igual al calor que libera el vapor, siempre y cuando no haya pérdidas de calor en el entorno, esto es, el intercambiador de calor y la tubería tienen un aislamiento perfecto; en este caso, el calor que se libera es el calor latente en la condensación del vapor.

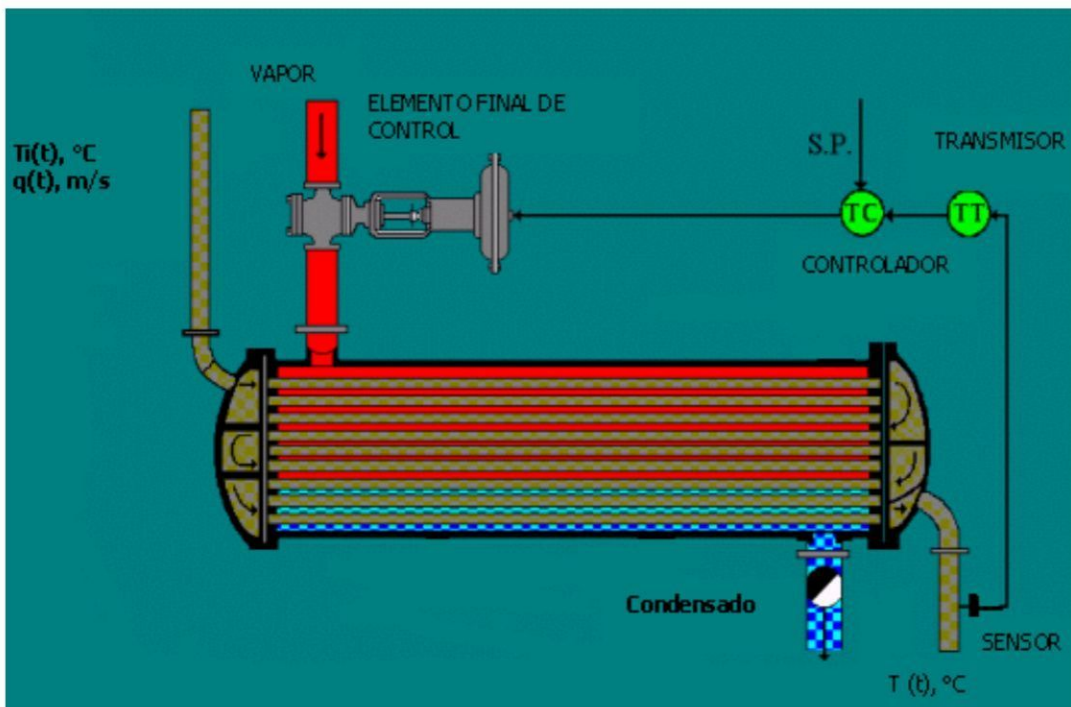


En este proceso existen muchas variables que pueden cambiar, lo cual ocasiona que la temperatura de salida se desvíe del valor deseado, si esto llega a suceder, se deben emprender algunas acciones para corregir la desviación; esto es, el objetivo es controlar la temperatura de salida del proceso para mantenerla en el valor que se desea.

Una manera de lograr este objetivo es primero, medir la temperatura  $T(t)$ , después comparar esta con el valor que se desea y, con base en la comparación, decidir que se debe hacer para corregir cualquier desviación. Se puede usar el flujo de vapor para corregir la desviación, es decir, si la temperatura esta por arriba del valor deseado, entonces se puede cerrar la válvula del vapor para cortar el flujo de 1 mismo (energía) hacia el intercambiador de calor. Todo esto lo puede hacer manualmente el operador y puesto que el proceso es bastante sencillo no debe representar ningún problema. Sin embargo, en la mayoría de las plantas de proceso existen cientos de variables que se deben mantener en algún valor determinado y con este procedimiento de corrección se requeriría una cantidad tremenda de operarios, por ello, seria preferible realizar el control de manera automática, es decir, contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad que intervenga el operador. Esto es lo que significa control automático de proceso.

Para lograr este objetivo se debe diseñar e implementar un sistema de control. En la figura 20 se muestra un sistema de control y sus componentes básicos. El primer paso es medir la temperatura de salida de la corriente del proceso, esto se hace mediante un sensor (termopar, dispositivo de resistencia térmica, termómetros de sistema lleno, termistores, etc).

El sensor se conecta físicamente al transmisor, el cual capta la salida del sensor y la convierte en una señal lo suficientemente intensa como para transmitirla al controlador. El controlador recibe la señal, que esta en relacion a la temperatura, la compara con el valor que se desea y, según el valor que se desea y, según el resultado de la comparación, decide que hacer para mantener la temperatura en el valor deseado. Con base en la decisión, el controlador envía otra señal al elemento final de control, el cual, a su vez, maneja el flujo de vapor.



**Figura 20. Sistema de Control**

En el párrafo mencionado anteriormente se presentan los cuatro componentes básicos de todo sistema de control, estos son:

- Sensor, conocido como elemento primario.
- Transmisor, el cual se conoce como elemento secundario.
- Controlador, que es el “cerebro” del sistema de control.
- Elemento final de control, frecuentemente se trata de una válvula de control aunque no siempre. Otros elementos finales de control comúnmente utilizadas son las bombas de velocidad variable, los transportadores y los motores eléctricos.

La importancia de estos componentes estriba en que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control; estas operaciones son:

Medición (M) : La medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.

Decisión (D) : Con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.

Acción (A) : Como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente esta es realizada por el elemento final de control

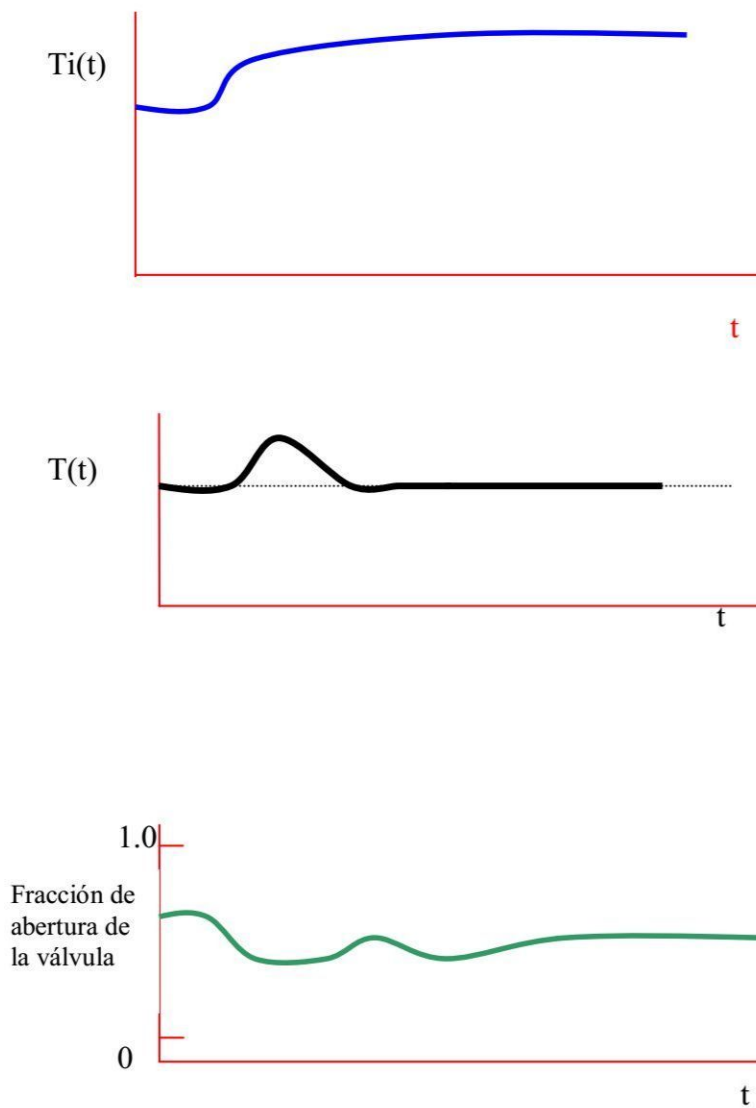
Como se menciono estas tres operaciones, M, D y A son obligatorias para todo sistema de control. En algunos sistemas, la toma de decisión es sencilla, mientras que en otros es más compleja. El ingeniero que diseña el sistema de control debe asegurarse que las acciones que se emprendan tenga su efecto en la variable controlada, es decir, que la acción emprendida repercuta en el valor que se mide, de lo contrario el sistema no controla y puede ocasionar mas perjuicio que beneficio.

## **5.5 ESTRATEGIA DE CONTROL**

### **CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN:**

El esquema que se muestra en la Figura 20 se conoce como control por retroalimentación, también se le llama circuito de control por retroalimentación. Esta técnica la aplico por primera vez James Watt hace 200 años, para controlar un proceso industrial; consistía en mantener constante la velocidad de una maquina de vapor con carga variable; se trataba de una aplicación del control regulador. En este procedimiento se toma la variable controlada y se retroalimenta al controlador para que este pueda tomar una decisión. Es necesario comprender el principio de operación del control por retroalimentación para conocer sus ventajas y desventajas; para ayudar a dicha comprensión se presenta el circuito de control del intercambiador de calor de la figura 20.

Si la temperatura de entrada al proceso aumenta y en consecuencia crea una perturbación, su efecto se debe propagar a todo el intercambiador de calor antes de que cambie la temperatura de salida. Una vez que cambia la temperatura de salida, también cambia la señal del transmisor al controlador, en ese momento el controlador detecta que debe compensar la perturbación mediante un cambio en el flujo de vapor, el controlador señala a la válvula a cerrar su apertura y de este modo decrece el flujo vapor. En la figura 21 se ilustra gráficamente el efecto de perturbación y la acción del controlador.



**Figura21. Respuesta del sistema de control del intercambiador de calor.**

Es interesante hacer notar que la temperatura de salida primero aumenta a causa del incremento en la temperatura de entrada, pero luego desciende incluso por debajo del punto de control y oscila alrededor de este hasta que finalmente se estabiliza.

Esta respuesta oscilatoria demuestra que la operación del sistema de control por retroalimentación es esencialmente una operación de ensayo y error, es decir, cuando el controlador detecta que la temperatura de salida aumento por arriba del punto de control, indica a la válvula que cierre, pero esta cumple con la orden mas allá de lo necesario, en consecuencia la temperatura de salida descende por debajo del punto de control; al notar esto, el controlador señala a la válvula que abra nuevamente un tanto para elevar la temperatura. El ensayo y error continua hasta que la temperatura alcanza el punto de control donde permanece posteriormente.

**La ventaja del control por retroalimentación** consiste en que es una técnica muy simple, como se muestra en la figura 20, que **compensa todas las perturbaciones**. Cualquier perturbación puede afectar a la variable controlada, cuando esta se desvía del punto de control, el controlador cambia su salida para que la variable regrese al punto de control.

El circuito de control no detecta que tipo de perturbación entra al proceso, únicamente trata de mantener la variable controlada en el punto de control y de esta manera compensar cualquier perturbación. **La desventaja del control por retroalimentación** estriba en que únicamente puede compensar la perturbación hasta que la variable controlada se ha desviado del punto de control, esto es, la perturbación se debe propagar por todo el proceso antes de que pueda compensar el control por retroalimentación.

El trabajo del ingeniero es diseñar un sistema de control que pueda mantener la variable controlada en el punto de control. Cuando ya ha logrado esto, debe ajustar el controlador de manera que se reduzca al mínimo la operación de ensayo y error que se requiere para mantener el control. Para hacer un buen trabajo, el ingeniero debe conocer las características o **personalidad** del proceso que se va controlar, una vez que se conoce la **personalidad del proceso** el ingeniero puede diseñar el sistema de control y obtener la personalidad del controlador que mejor combine con la del proceso. El significado de **personalidad** trata principalmente cuando uno convence a alguien de que se comporte a cierta manera, es decir controlar el comportamiento de alguien; entonces uno es el controlador y ese alguien es el proceso. Lo más prudente es que uno conozca la personalidad de ese alguien para poder adaptarse a su personalidad si pretende efectuar un buen trabajo de persuasión o de control. Esto es lo que significa el **ajuste del controlador**, es decir, el controlador se adapta o ajusta al proceso. En la mayoría de los controladores se utilizan hasta tres parámetros para su ajuste.

### **CONTROL POR ACCIÓN PRECALCULADA:**

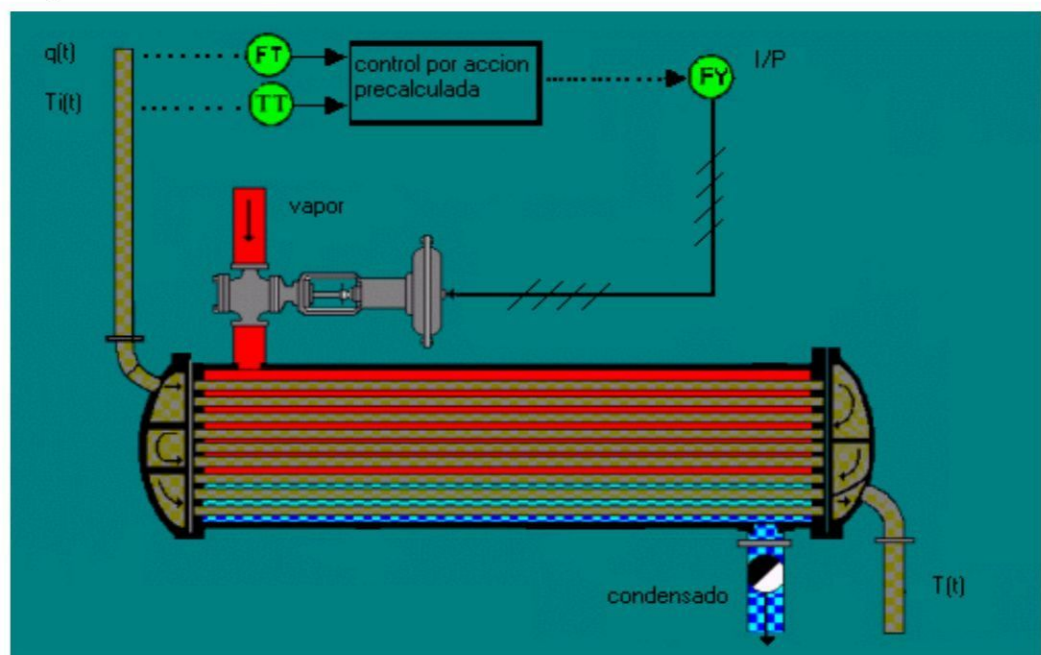
El control por retroalimentación es la estrategia del control más común en las industrias de proceso, ha logrado tal aceptación por su simplicidad; sin embargo, en algunos procesos de control por retroalimentación no proporciona la función de control que se requiere, para esos procesos se deben diseñar otros tipos de control. Una de las estrategias es el control por acción precalculada.



El objetivo de control por acción precalculada es medir las perturbaciones y compensarlas antes de que la variable controlada se desviara del punto de control; si se aplica de manera correcta, la variable controlada no-se desvía del punto control.

Un ejemplo concreto de control por acción precalculada es el intercambiador de calor que aparece en la figura 19. Supóngase que las perturbaciones **más serias** son la temperatura de entrada,  $T_i(t)$ , y el flujo del proceso,  $q(t)$ ; para establecer el control por acción precalculada primero se deben medir estas dos perturbaciones y luego se toma una decisión sobre la manera de manejar el flujo de vapor para compensar los problemas.

En la figura 22 se ilustra esta estrategia de control; el controlador por acción precalculada decide como manejar el flujo de vapor para mantener la variable controlada en el punto de control, en función de la temperatura de entrada y flujo de proceso.

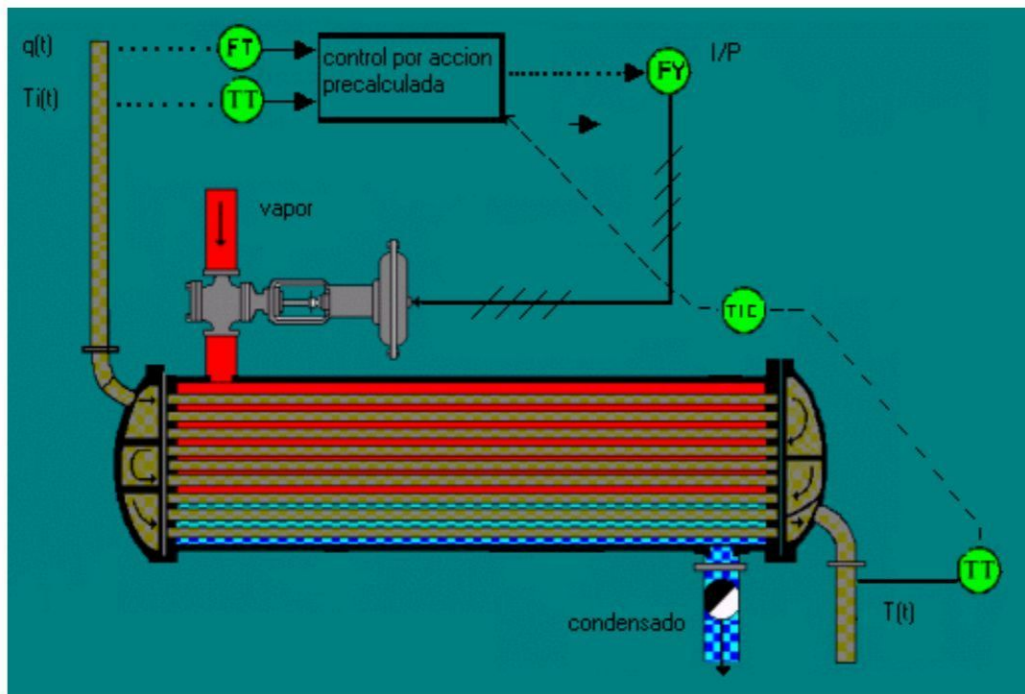


**Figura 22. Control Por Acción Precalculada**



Existen varios tipos de perturbaciones; el sistema de control por acción precalculada que se muestra en la figura 22, solo compensa a dos de ellas, si cualquier otra perturbación entra al proceso no se compensara con esta estrategia y puede originarse una desviación permanente de la variable respecto al punto de control.

Para evitar esta desviación se debe añadir alguna retroalimentación de compensación al control por acción precalculada, esto se muestra en la figura 23. Ahora el control por acción precalculada compensa las perturbaciones mas seria,  $T_i(t)$  y  $q(t)$ , mientras que el control por retroalimentación compensa todas las demás.



**Figura 23.**

Es importante hacer notar que en esta estrategia de control mas **avanzada** aun están presentes las tres operaciones básicas, M, D y A. Los sensores y los transmisores realizan la medición; la decisión la toman el controlador por acción precalculada y el controlador por retroalimentación, TIC-10; la acción la realiza la válvula de vapor.

## **FUNCIONES DE TRANSFERENCIA Y DIAGRAMAS DE BLOQUES**

### **Funciones De Transferencia**

El concepto función de transferencia es uno de los más importantes en el estudio de la dinámica de proceso y del control automático de proceso, por lo que es recomendable considerar aquí algunas de sus propiedades y características.

La función de transferencia se define como la relacion de la transformada de Laplace de la variable de salida sobre la transformada de Laplace de la variable de entrada.

La función de transferencia se representa por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + 1)}{(b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + 1)}$$

(38)

donde:

G(s) = representación general de una función de transferencia

Y(s) = transformada de Laplace de la variable de salida.

X(s) = transformada de Laplace de la función de forzamiento o variable de entrada.

K, a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>... =constantes.

En la ecuación (38) se muestra la mejor manera de escribir la función de transferencia; cuando se escribe de esta manera,  $K$  representa la ganancia del sistema y tiene como unidades las de  $Y(s)$  sobre las unidades de  $X(s)$ . Las otras constantes, las  $a$  y las  $b$ , tienen como unidades, donde  $i$  es la potencia de la variable de Laplace,  $s$ , que se asocia con la constante particular, lo que da como resultado un término sin dimensiones dentro del paréntesis, ya que la unidad de  $s$  es  $1/\text{tiempo}$ .

La función de transferencia define completamente las características de estado estacionario y dinámico, es decir, la respuesta total de un sistema que se describe mediante una ecuación diferencial lineal. Esta es característica del sistema, y sus términos determinan si el sistema es estable o inestable y su respuesta a una entrada no oscilatoria es oscilatoria o no. Se dice que el sistema o proceso es estable cuando su salida se mantiene limitada (finita) para una entrada limitada.

Aquí tenemos algunas propiedades importantes de funciones de transferencia:

- En las funciones de transferencia de los sistemas físicos reales, la potencia más alta  $s$  en el numerador nunca es mayor a la del denominador; entonces,  $n \geq m$ .
- La función de transferencia relaciona las transformadas de las variables de entrada con las de la salida, a partir de algún estado inicial estacionario; de lo contrario, las condiciones iniciales que no son cero originan términos adicionales en la transformada de la variable de salida.
- Para los sistemas estables, la relación de estado estacionario entre el cambio en la variable de entrada y el cambio en la variable de salida se obtiene con :

$$\lim_{s \rightarrow 0} G(s)$$

$$\lim_{t \rightarrow x} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)X(s) = [\lim_{s \rightarrow 0} G(s)][\lim_{s \rightarrow 0} sX(s)] = [\lim_{s \rightarrow 0} G(s)] \lim_{t \rightarrow x} x(t) \quad (39)$$

Esto significa que el cambio en la variable de salida, después de un tiempo muy largo, si esta limitado, se obtiene al multiplicar la función de transferencia con  $s=0$  veces el valor final del cambio en la entrada.

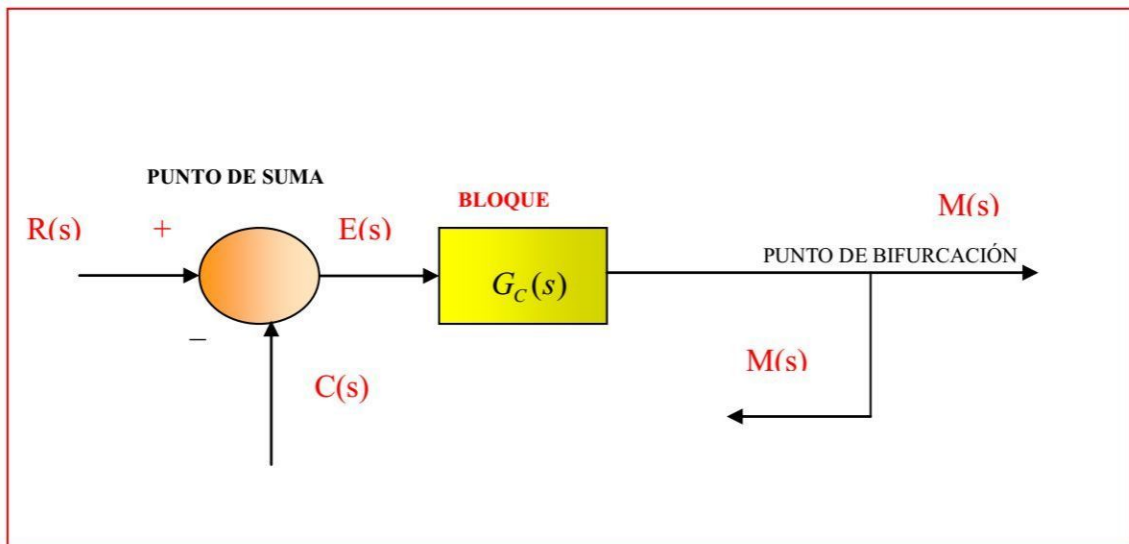
### Diagramas de Bloques

La representación gráfica de las funciones de transferencia por medio de diagramas de bloques es una herramienta muy útil en el control de proceso. James Watt introdujo por primera vez estos diagramas de bloques cuando aplico el concepto de control por retroalimentación a la maquina de vapor, como se menciona en la parte de sistema de control. La maquina de vapor constaba de varios acoplamientos y otros dispositivos mecánicos lo suficientemente complejos como que Watt decidiera ilustrar gráficamente en su esquema de control la interacción de todos esos dispositivos. En esta sección se presenta una introducción a los diagramas y álgebra de bloques.

En general, los diagramas de bloques constan de cuatro elementos básicos: flechas, puntos de sumatoria, puntos de derivación y bloques; en la figura 24 se ilustran estos elementos, de cuya combinación se forman todos los diagramas de bloques. Las flechas indican, en general, el flujo de información; representan las variables del proceso o las señales de control; cada punta de flecha indica la dirección del flujo de información. Los puntos de sumatoria representan la suma algebraica de las flechas que entran ( $E(s) = R(s) - C(s)$ ). El punto de bifurcación es la posición sobre una flecha, en la cual la información sale y va de manera concurrente a otros puntos de sumatoria o bloques.

Los bloques representan la operación matemática, en forma de función de transferencia, por ejemplo,  $G_C(s)$ , que se realiza sobre la señal de entrada (flecha) para producir la señal de salida. Las flechas y bloques de la figura 24 representan la siguiente expresión matemática:

$$M(s) = G_C(s)E(s) = G_C(s)(R(s) - C(s)) \quad (40)$$



**Figura 24. Elementos de un Diagrama de Bloques**

## 5.6 MODO DE CONTROL PID

En este capítulo examinamos una particular estructura de control que es casi universalmente utilizada en la industria.

Se trata de la familia de controladores de estructura fija llamada **familia de controladores PID**.

Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones de importancia en la industria.

PID significa:

- Proporcional
- Integral
- Derivativo

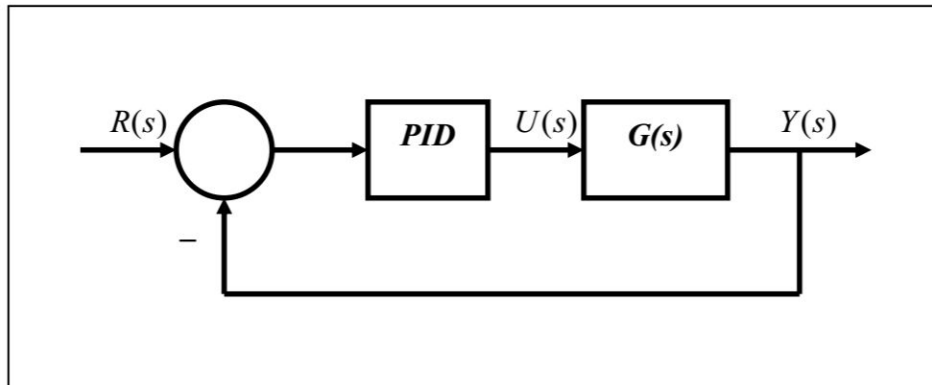
Históricamente, ya las primeras estructuras de control usaban las ideas del control PID. Sin embargo, no fue hasta el trabajo de Minorsky de 1922, sobre conducción de barcos, que el control PID cobró verdadera importancia teórica.

Hoy en día, a pesar de la abundancia de sofisticadas herramientas y métodos avanzados de control, el controlador PID es aún el más ampliamente utilizado en la industria moderna, controlando más del 95 % de los procesos industriales en lazo cerrado.

La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden estabilizadas con ningún un miembro de la familia PID). En este capítulo estudiaremos los enfoques tradicionales al diseño de controladores PID.

### 5.6.1 Estructura del PID

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida:



**Fig. 25 Diagrama de Bloques PID**

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

**P: acción de control proporcional,** da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:  $u(t) = K_p \cdot e(t)$ , que descrita desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \quad (41)$$

Donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

**I: acción de control integral:** da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (42)$$

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

**PI: acción de control proporcional-integral**, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (43)$$

donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (44)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente.

Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.



Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

**PD: acción de control proporcional-derivativa**, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (45)$$

donde  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador.

La acción de control derivativa nunca se utiliza por si sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \quad (46)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

**PID: acción de control proporcional-integral-derivativa,**

esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

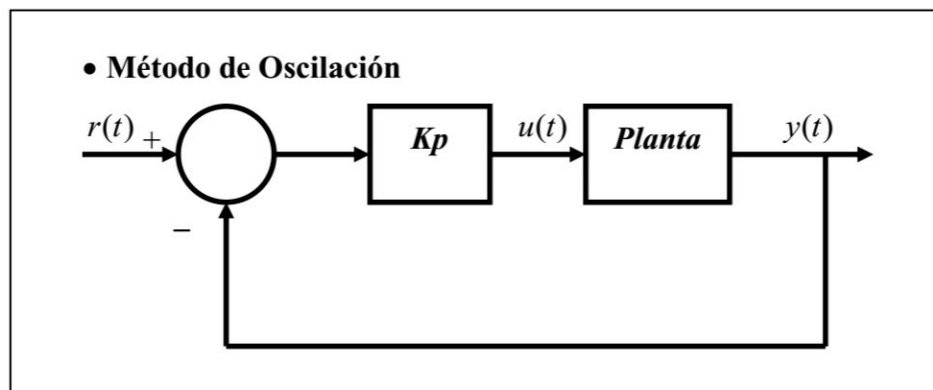
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (47)$$

y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (48)$$

### 5.6.2 Métodos Clásicos de Ajuste de Ziegler y Nichols

En esta sección verán dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el Método de Oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia y el Método Basado en la Curva Reacción o Método de Respuesta al Escalón. El primero se basa en un lazo de control solo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al periodo de esas oscilaciones, pueden establecer las ganancias del controlador PID. El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PID. Estos métodos fueron propuestos por Ziegler y Nichols (Z-N) en 1942, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos.



**Figura 26. Lazo Cerrado con Ganancia Proporcional**

Este procedimiento es valido solo para plantas estables a lazo abierto y se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

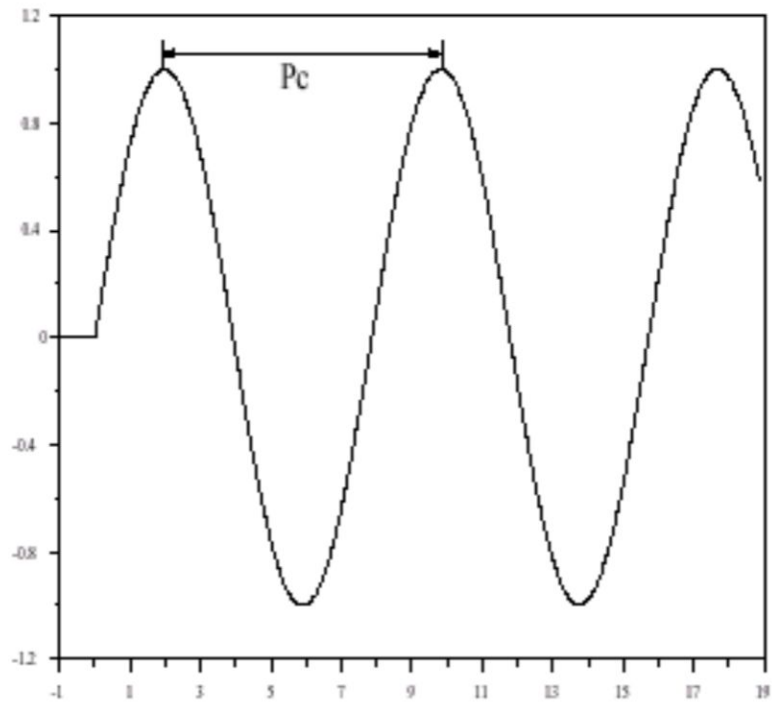
1. Utilizando solo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que estas deben ser observadas en la salida del controlador.
2. Registrar la ganancia critica del controlador  $Kp = Kc$  y el periodo de oscilación de la salida del controlador,  $Pc$ . (en el diagrama de Nyquist, corresponde a que  $Kc G(jw)$  cruza el punto  $(-1, 0)$  cuando  $Kp = Kc$ ).
3. Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla 5:

**Tabla 5: Parámetros de Ajuste(método de oscilación)**

	$Kp$	$Ti$	$Td$
P	$0.50Kc$		
PI	$0.45Kc$	$Pc/1.2$	
PID	$0.60Kc$	$0.5Pc$	$Pc/8$

Dicha tabla fue obtenida por Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_o(s) = \frac{K_o e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1} \quad \text{donde} \quad v_0 > 0 \quad (49)$$



**Fig.27 Respuesta de la Planta con Ganancia Crítica**

• **Método Basado en la Curva Reacción**

Muchas plantas, pueden ser descritas satisfactoriamente por el modelo:

$$G_o(s) = \frac{K_o e^{-s\tau_0}}{\nu_0 s + 1} \quad \text{donde} \quad \nu_0 > 0 \quad (50)$$

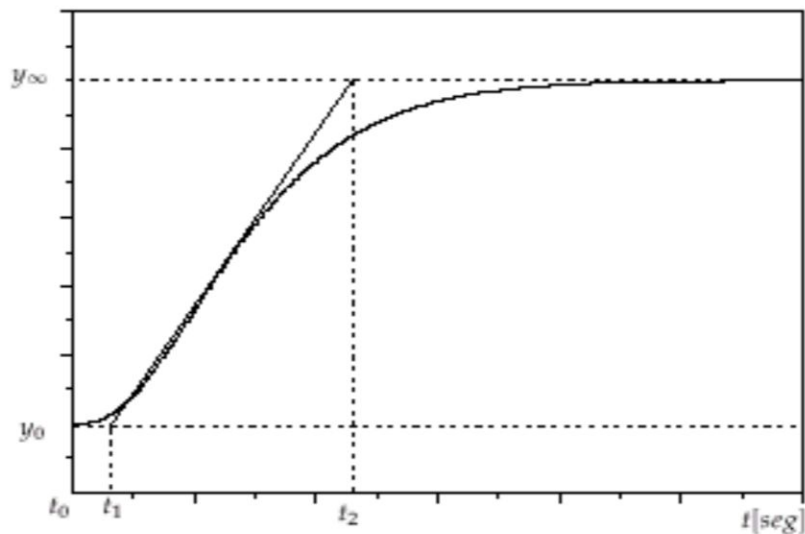
Una versión cuantitativa lineal de este modelo puede ser obtenida mediante un experimento a lazo abierto, utilizando el siguiente procedimiento:

1. Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Digamos que la salida de la planta se estabiliza en  $y(t) = y_0$  para una entrada constante  $u(t) = u_0$ .

2. En el instante inicial  $t_0$ , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde  $u_0$  a  $u_\infty$  (esto debería ser en un rango de 10 al 20% de rango completo).
3. Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Supongamos que la curva que se obtiene es la que se muestra en la Figura 28 . Esta curva se llama curva de reacción del proceso.

Calcular los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0} \quad \tau_0 = t_1 - t_0 \quad \nu_0 = t_2 - t_1 \quad (51)$$



**Figura 28. Respuesta al Escalón de la Planta**

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. Uno de estos también fue propuesto por Ziegler y Nichols. El objetivo de diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos por Z-N son los que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6: Parámetros de Ajuste (método curva de reacción)**

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{v_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$0.9 \frac{v_0}{K_0 \tau_0}$	$3 \tau_0$	
PID	$1.2 \frac{v_0}{K_0 \tau_0}$	$2 \tau_0$	$0.5 \tau_0$

## 5.7 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Es un equipo electrónico e inteligente diseñado sobre la base de micro-procesadores, que consta de unidades o módulos que cumplen funciones específicas, los que permiten recibir información de todos los sensores y comandar todos los actuadores del sistema.

Ventajas del PLC :

- Confiabilidad.
- Velocidad.
- Tamaño Reducido.
- Modularidad.
- Fácil de Programar.
- Flexibilidad.
- Economía.
- Inteligente.

El PLC esta compuesto de módulos tales como:

- Una unidad central de procesamiento (CPU), que se encarga de casi todo el control del sistema.
- Módulos que reciben información de los sensores.
- Módulos que permiten comandar los actuadores del sistema.
- Además, es posible agregarle otros módulos inteligentes para funciones de pre-procesamiento y comunicación.



### **5.7.1 Fuente de Alimentación:**

Tiene la función de adaptar la tensión de la red (220V y 60Hz) a la de funcionamiento de los circuitos electrónicos internos del autómata y otras tarjetas, tales como entradas / salidas, etc.

### **5.7.2 Unidad Central de Procesamiento (CPU) :**

- Es el cerebro del controlador.
- Es la parte más compleja del controlador programable.
- Está hecha a base de microprocesadores y memorias.
- Tiene dos tipos de memorias: ROM y RAM.

### **5.7.3 Módulos de Entrada / salida (E/S) :**

Son tarjetas electrónicas, a través de las cuales se intercambia información entre la CPU del controlador programable y los dispositivos de campo del sistema.

Estas tarjetas pueden ser: discretas o análogas, en DC o AC.

- Módulo de Entrada Discreta :

Estos módulos son los encargados de leer los datos del proceso, de tipo discreto.

A estos módulos o tarjetas se conectan: pulsadores, interruptores, conmutadores, selectores, finales de carrera, detectores de proximidad, interruptores de nivel, etc.

En el módulo está un opto-acoplador que aísla eléctricamente el dispositivo de campo con el procesador del PLC.

- Módulo de Salida Discreta:

Estos módulos convierten las señales procedentes de la CPU, y transmiten las ordenes hacia los dispositivos externos (actuadores), en la que sólo es necesario transmitir dos estados lógicos: activado o desactivado.

Los actuadores que se conectan a estas interfases pueden ser: contactores, relés, lámparas indicadoras, electro válvulas, displays, anunciadores, etc.

- Módulo de Entrada Analógica:

Estos módulos tienen como función, digitalizar las señales analógicas para que puedan ser procesadas por la CPU.

Estas señales analógicas pueden ser magnitudes de temperaturas, presiones, tensiones, corrientes, velocidades, etc.

El tipo de señal que reciben, puede ser de tensión o de corriente, en rangos normalizados:

- Señal de corriente: 0-20 mA, 4-20mA,  $\pm 10$ mA.
- Señal de tensión: 0-10V, 0-5V, 0-2V,  $\pm 10$ V.

- Módulo de Salida Analógica:

Estos módulos son usados cuando se desea transmitir hacia los actuadores analógicos señales de tensión o de corriente que varían continuamente.

Su principio de funcionamiento puede considerarse como un proceso inverso al de los módulos de entrada analógica.

Las señales analógicas de salida son de dos tipos: señales de corriente y señales de tensión.

Dentro de los valores normalizados tenemos:

- Señal de corriente: 0-20mA, 4-20mA,  $\pm 20$  mA.
- Señal de tensión: 0-10V,  $\pm 10$ V

#### **5.7.4 Memorias:**

##### *La memoria ROM (Read Only Memory)*

Es una memoria de sólo lectura, que contiene el sistema operativo con que opera el controlador, NO SE BORRA. Se dice también que es una memoria ejecutiva, fue programada por el fabricante del PLC para ejecutar las instrucciones.

##### *La memoria RAM (Random Access Memory)*

Memoria de acceso aleatorio (volátil), es fácil de modificarla; su información desaparece al faltarle corriente.

Se dice también que es una memoria de aplicación, pues en ésta se ubica el programa del usuario, pudiendo ser modificado cuando se requiera.

##### *Módulos de Memoria Adicionales*

Son dispositivos electrónicos enchufables en la CPU, destinados a guardar información de manera provisional o permanente.

Se cuentan con dos tipos de memorias:

*Volátiles:* RAM, ya mencionada, con la diferencia que también pueden ser enchúfales.

*No volátiles:* EPROM y EEPROM.

*Memoria EPROM (Enable programmable Read Only Memory)*

Es un módulo de memoria enchufable del tipo no volátil. Se utiliza normalmente para guardar programas definitivos ya probados y debidamente depurados, además pueden ser transportados y utilizados en cualquier momento. Estos módulos son programados con señales eléctricas, mientras que para borrarlos debe ser sometidos luz ultravioleta.

*Memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)*

Este módulo tiene las mismas características que el módulo EPROM, con la única diferencia que tanto la escritura como el borrado se realiza eléctricamente.

*Bateria de Respaldo*

El contenido de la memoria RAM, es volátil, generalmente se salvaguarda mediante una batería de larga duración (entre 2 a 5 años) enchufable en la CPU; por lo tanto, es importante que esta batería se mantenga en perfectas condiciones.

### 5.7.5 El Diálogo Hombre – Máquina:

La etapa que permite la comunicación entre el operador humano y la inteligencia del PLC se denomina diálogo hombre-máquina. El dispositivo que se usa para esta comunicación se denomina terminal de programación.



**Fig. 29**

Las unidades o terminales de programación, son el medio por el cual el hombre podrá acceder a la escritura, lectura, modificación, monitoreo, forzado, diagnóstico y la puesta a punto de los programas.

Teclado y un visualizador o pantalla.

Son una herramienta muy importante y necesaria para el diálogo con el PLC, pero físicamente independiente.



**Fig. 30**

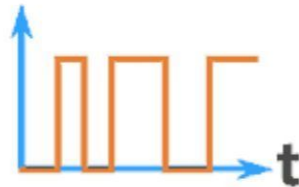
### 5.7.6 Tipos de Señales

Señales discretas:

Sólo toman dos valores perfectamente distinguibles: hay señal o no hay señal.

Proviene de transductores discretos.

Ej. : La señal de un pulsador.



**Figura 31.**

Señales Analógicas:

Varían en el tiempo en forma continua.

Proviene de transductores continuos.

Ej. : La señal de un tacogenerador.



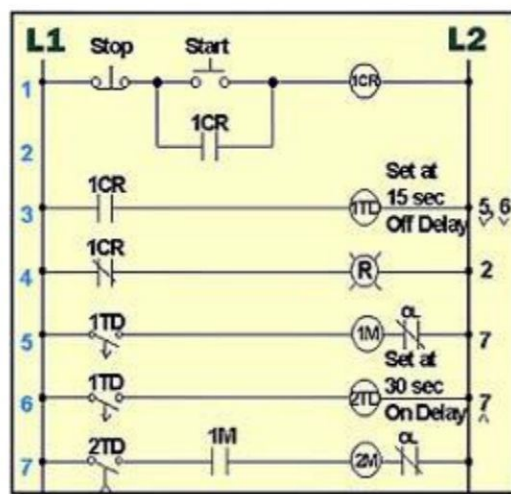
**Figura 32.**



**Figura 33. Elementos que Controla el PLC**

### 5.7.7 Programación Básica: Funciones Lógicas

Un diagrama eléctrico representa la conexión entre los diferentes componentes del tablero eléctrico.



**Figura 34. Diagrama Eléctrico**

Esta conexión se realiza cumpliendo ciertas reglas lógicas, las que se basan en el álgebra booleana, y que veremos a continuación.

Las señales eléctricas son señales binarias, y estas se pueden procesar empleando las tres operaciones:

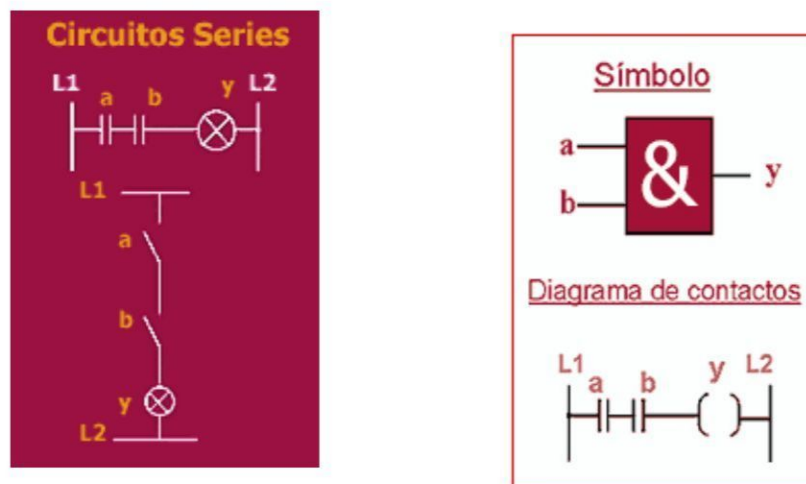
**Y (AND)**

**O (OR)**

**NO (NOT)**

Lógica Y "AND "

La señal de salida es 1 únicamente si todas las señales de entrada son 1.



**Figura 35. Diagrama Ladder en Serie**



Lógica O "OR"

La señal de salida es 1 si al menos una de las señales de entrada es 1.

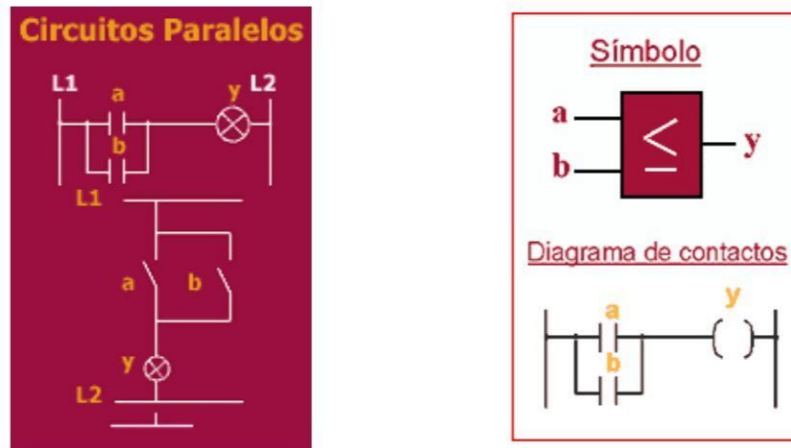


Fig. 36 Diagrama Ladder en Paralelo

Lógica NO "NOT"

La señal de salida es 1 si la señal de entrada es 0. Si esta es 1, la salida es 0.

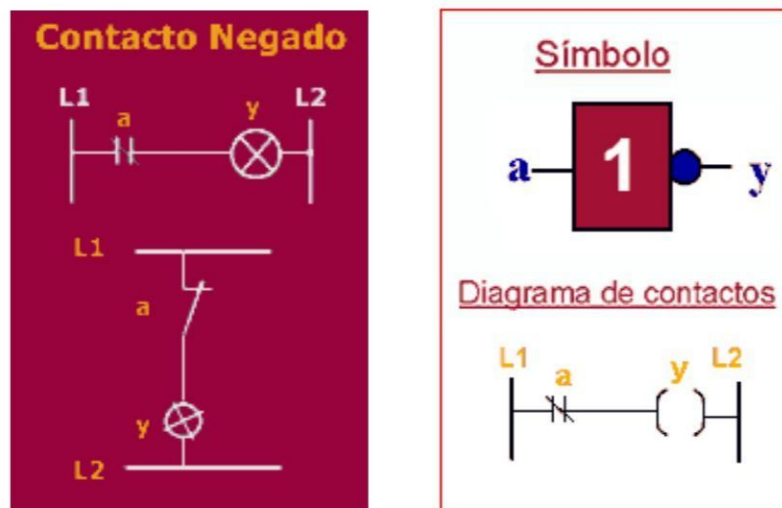


Fig. 37

PLC controlando un proceso

- El PLC realiza el “tratamiento” de la información.
- Recibe la información, la procesa y emite órdenes.



**Fig. 38**

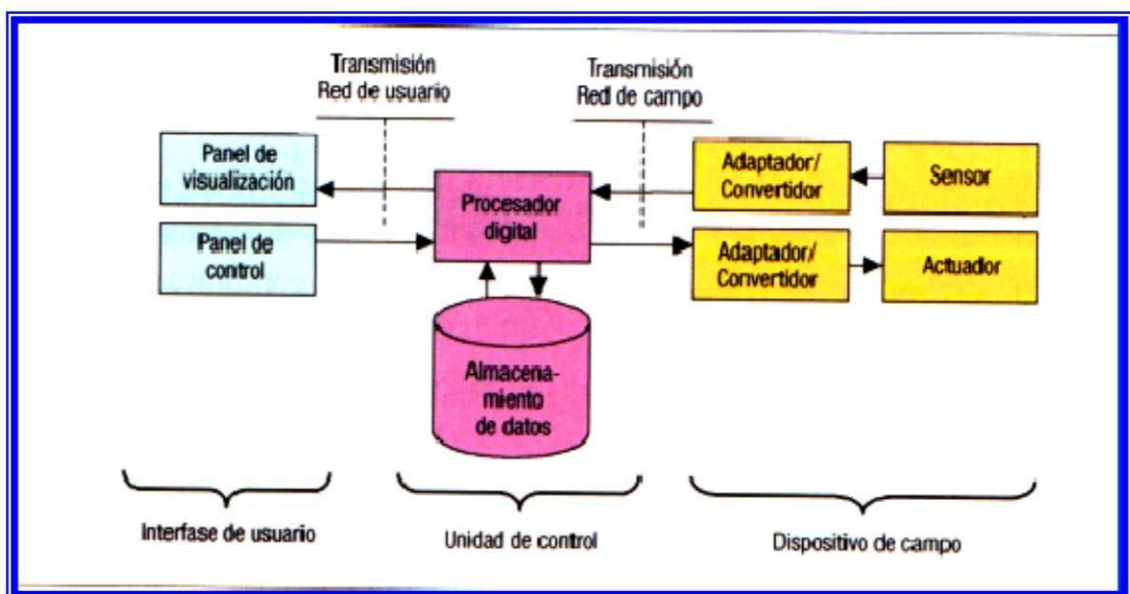
## 5.8 SOFTWARE DE SUPERVISIÓN SCADA

SCADA proviene de las siglas de **S**upervisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition (Adquisición de datos y supervisión de control).

Es una aplicación software de control de producción, que se comunica con los dispositivos de campo y controla el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador, proporciona información del proceso a diversos usuarios: operadores, supervisores de control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

Los sistemas de interfaz entre usuario y planta basados en paneles de control repletos de indicadores luminosos, instrumentos de medida y pulsadores, están siendo sustituidos por sistemas digitales que implementan el panel sobre la pantalla de un ordenador.

El control directo lo realizan los controladores autónomos digitales y/ o autómatas programables y están conectados a un ordenador que realiza las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de la información y control de la producción, utilizando el SCADA.



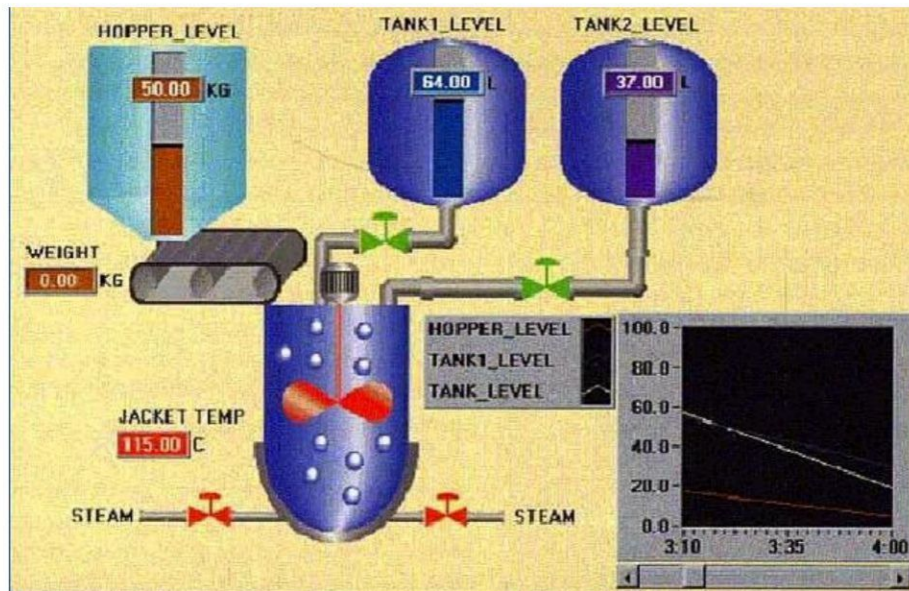
**Fig 39. Esquema básico de un sistema de Adquisición, supervisión y control.**

### **5.8.1 Funciones Principales**

- *Adquisición de datos*, para recoger, procesar y almacenar la información recibida.
- *Supervisión*, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- *Control*, para modificar la evolución del proceso, actuando bien sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc.) bien directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.

### **5.8.2 Funciones Más Específicas**

- *Transmisión*. De información con dispositivos de campo y otros PC.
- *Base de datos*. Gestión de datos con bajos tiempos de acceso. Suele utilizar ODBC.
- *Presentación*. Representación gráfica de los datos. Interfaz del Operador o HMI (Human Machine Interface).
- *Explotación*. De los datos adquiridos para gestión de la calidad, control estadístico, gestión de la producción y gestión administrativa y financiera.



**Fig. 40 Interfaz de Operario**

### 5.8.3 Prestaciones

Un paquete SCADA debe de ofrecer las siguientes prestaciones:

- *Posibilidad de crear paneles de alarma*, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- *Generación de históricos de señal de planta*, que puede ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- *Ejecución de programas*, que modifican la ley de control, o incluso el programa total sobre el autómeta, bajo ciertas condiciones.
- *Posibilidad de programación numérica*, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador, y no sobre la del autómeta, menos especializado, etc.

- *Con ellas*, se pueden **desarrollar aplicaciones** basadas en el PC, con captura de datos, análisis de señales, presentaciones en pantalla, envío de resultados a disco e impresora, etc.
- *Además*, todas estas acciones se llevan a cabo mediante un **paquete de funciones** que incluye zonas de programación en un lenguaje de uso general como C o Pascal, aunque actualmente se está imponiendo VBA (Visual Basic for Applications), lo cual confiere una potencia muy elevada y una gran versatilidad.

#### **5.8.4 Requisitos**

Un SCADA debe cumplir varios objetivos:

- Deben ser sistemas de arquitectura abierta, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben comunicarse con total facilidad y de forma transparente al usuario con el equipo de planta y con el resto de la empresa (redes locales y de gestión).
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware, y fáciles de utilizar, con interfaces amigables con el usuario.

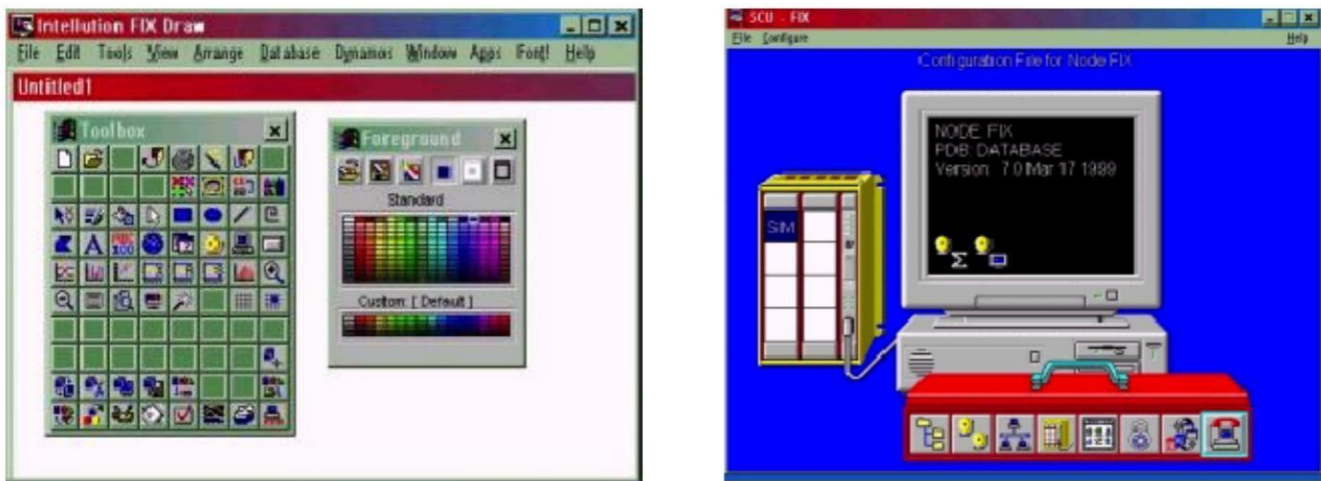


### 5.8.5 Módulos

Los módulos o bloques software son los siguientes:

- Configuración.
- Interfaz Gráfico del Operador.
- Módulo de Proceso.
- Gestión de Archivo de Datos.
- Comunicación.

- *Configuración* : permite al usuario definir el entorno de trabajo de su SCADA, adaptándolo a la aplicación particular que se desea desarrollar.



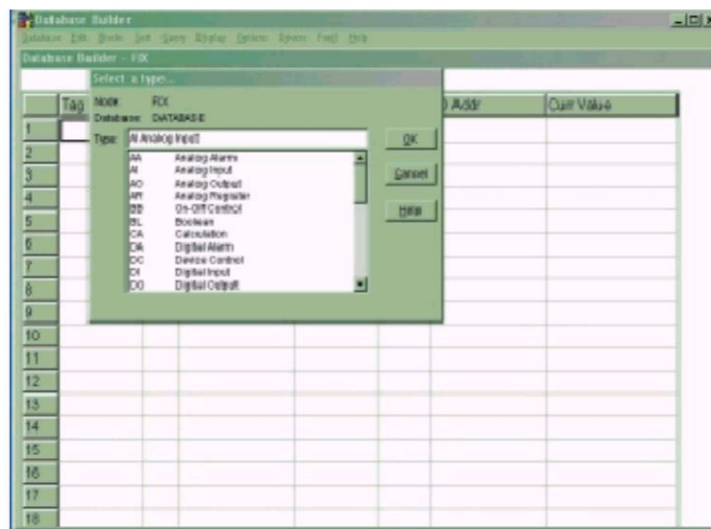
**Fig. 41 Pantallas de Configuración**

- *Interfaz gráfico del operador*: proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso se representa mediante sinópticos gráficos.



**Fig. 42 Interfaz Grafico-Operador**

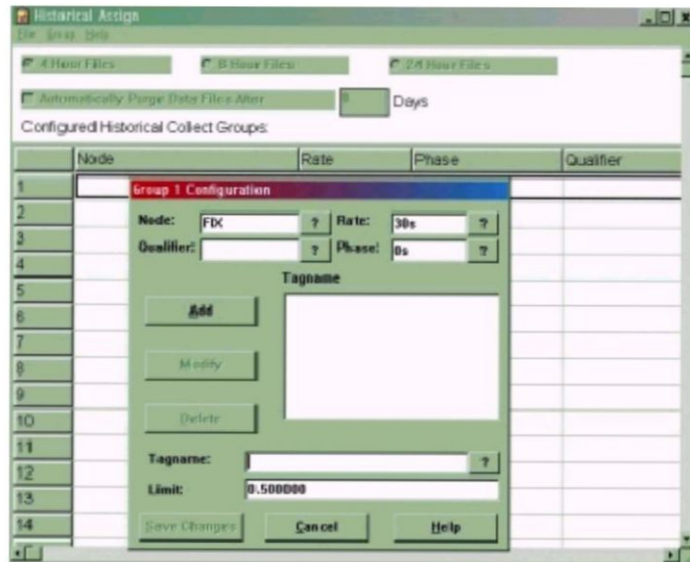
- **Módulo de proceso:** ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de los valores actuales de variables leídas. La programación se realiza por medio de bloques de programa en lenguaje de alto nivel (como C, Basic, etc.).



**Fig. 43 Acciones de Mando**

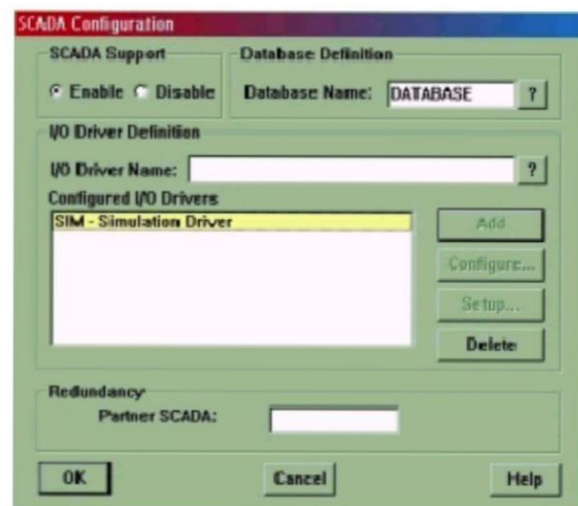
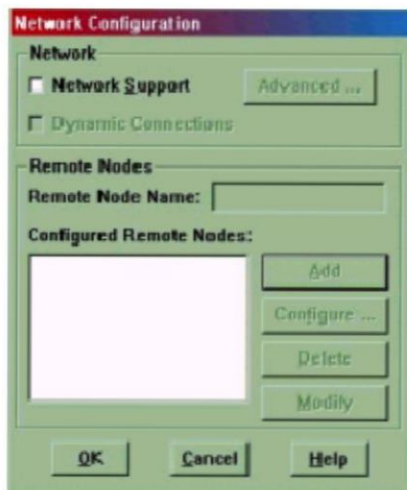


- *Gestión y archivo de datos:* se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.



**Fig. 44 Almacenamiento y Procesamiento de Datos**

- *Comunicaciones:* se encarga de la transferencia de información entre la planta y la arquitectura hardware que soporta el SCADA, y entre ésta y el resto de elementos informáticos de gestión.

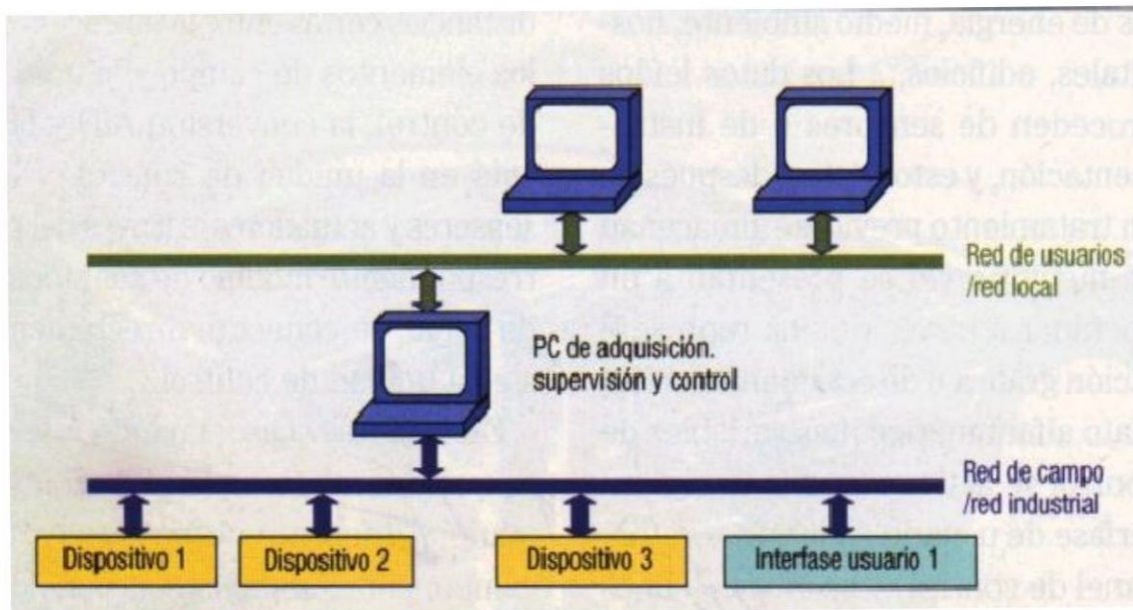


**Fig. 45 Comunicación**

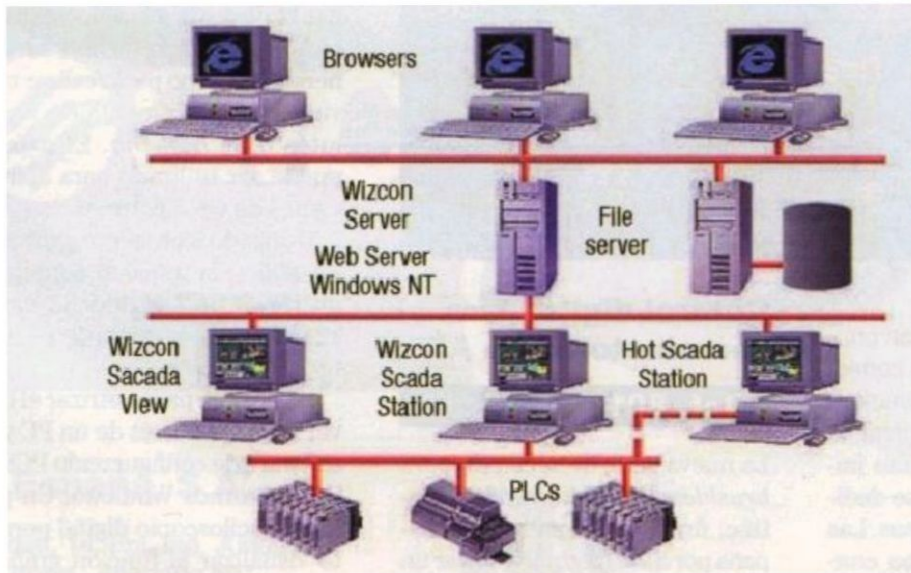
### 5.8.6 Componentes Hardware

Un SCADA está formado por:

- Ordenador Central o MTU (master terminal unit).
- Ordenadores Remotos o RTU's (remote terminal units).
- Red de comunicación.
- Instrumentación de campo.



**Fig. 46 Componentes Hardware**



**Fig. 47 Conexión con Internet**

### **Ejemplos de Software SCADA**

Algunos de los programas SCADA, o que incluyen

SCADA como parte de ellos, son:

- *Aimax* , de Desin Instruments S. A.
- *CUBE* , Orsi España S. A.
- *FIX* , de Intellution.
- *Lookout*, National Instruments.
- *Monitor Pro*, de Schneider Electric.
- *SCADA InTouch* , de LOGITEK.
- *SYSMAC SCS* , de Omron.
- *Scatt Graph 5000*, de ABB.
- **WinCC** , de Siemens.
- *CIMPLICITY*, GE Fanuc

### 5.8.7 Interfase de Comunicación

- Permite al PC acceder a los dispositivos de campo.
- *Drivers Específicos*. Utilizar el driver específico al bus de campo.



Fig. 48

- *Drivers OPC*. Utilizar un driver genérico OPC que cada fabricante proporciona.

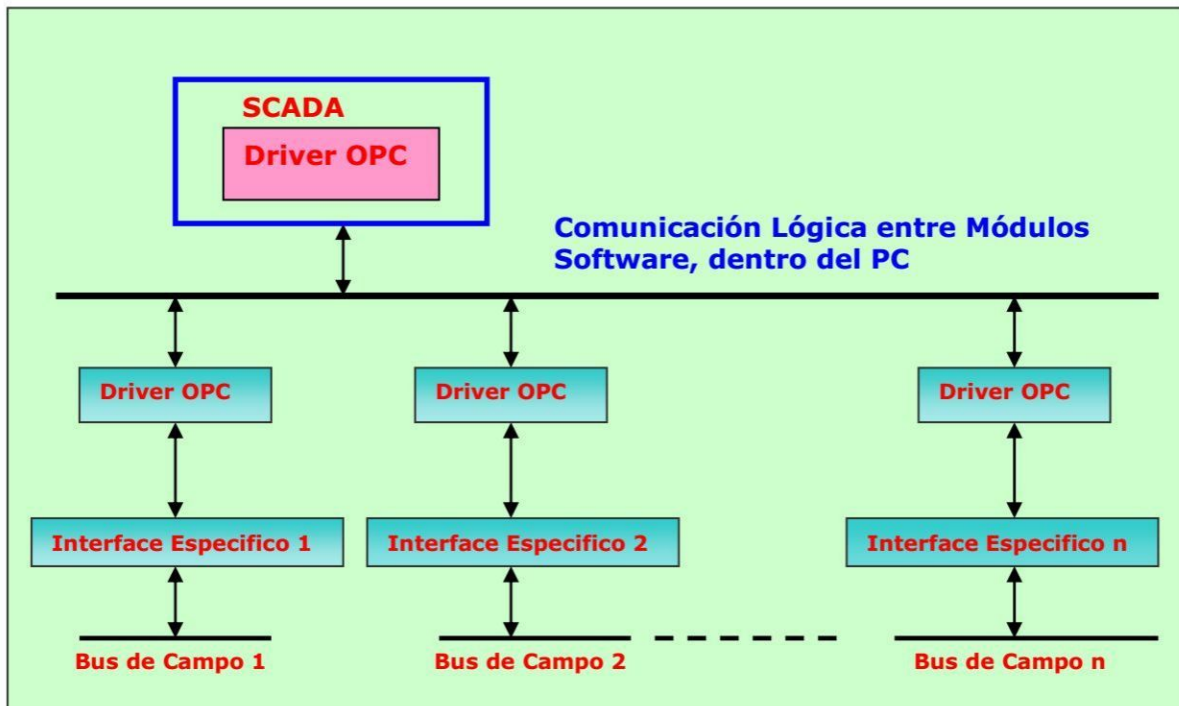
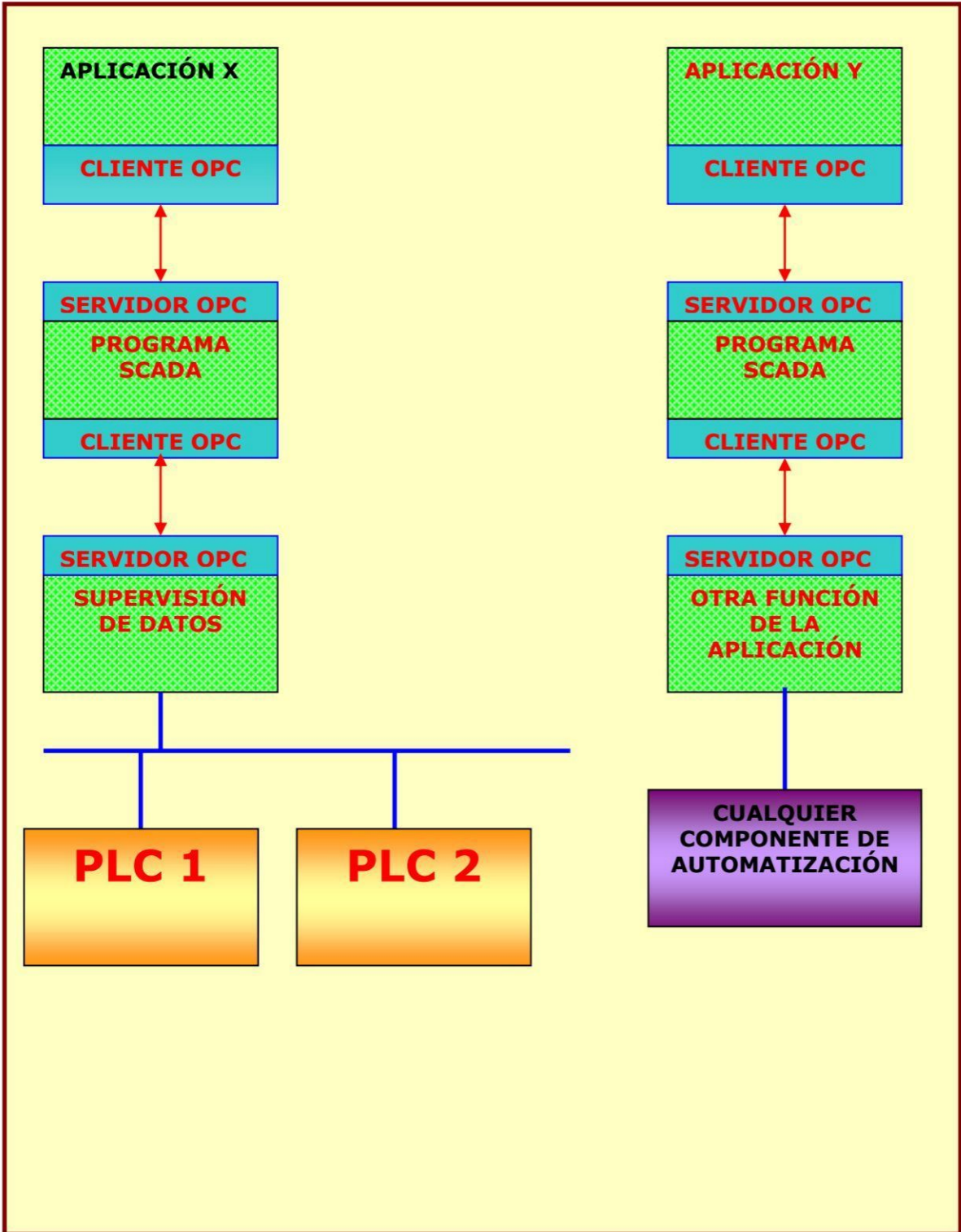


Fig. 49

## **Interface OPC**

- **OPC** (OLE for Process Control) de Microsoft es un interfaz con componentes de automatización, proporcionando un acceso simple a los datos. La **Fundación OPC** está formada por: Siemens, Fisher, Intuitive, OPTO 22, Intellution, Rockwell, etc.
- Las aplicaciones que requieren servicios, es decir datos, desde el nivel de automatización para procesar sus tareas, los piden como clientes desde los componentes de automatización, quienes a la vez proveen la información requerida como servidores. La idea básica del OPC está en normalizar la interfase entre el servidor OPC y el cliente OPC independientemente de cualquier fabricante particular.
- Los servicios prestados por los servidores OPC para clientes OPC por medio de la interfase OPC típicamente implican la lectura, cambio y verificación de variables de proceso. Mediante estos servicios es posible operar y controlar un proceso. Los servidores OPC apoyan el nexo de tales aplicaciones a cualesquiera componentes de automatización que esté en red por medio de un bus de campo o Ethernet Industrial.





**FIG. 50 ARQUITECTURA OPC**

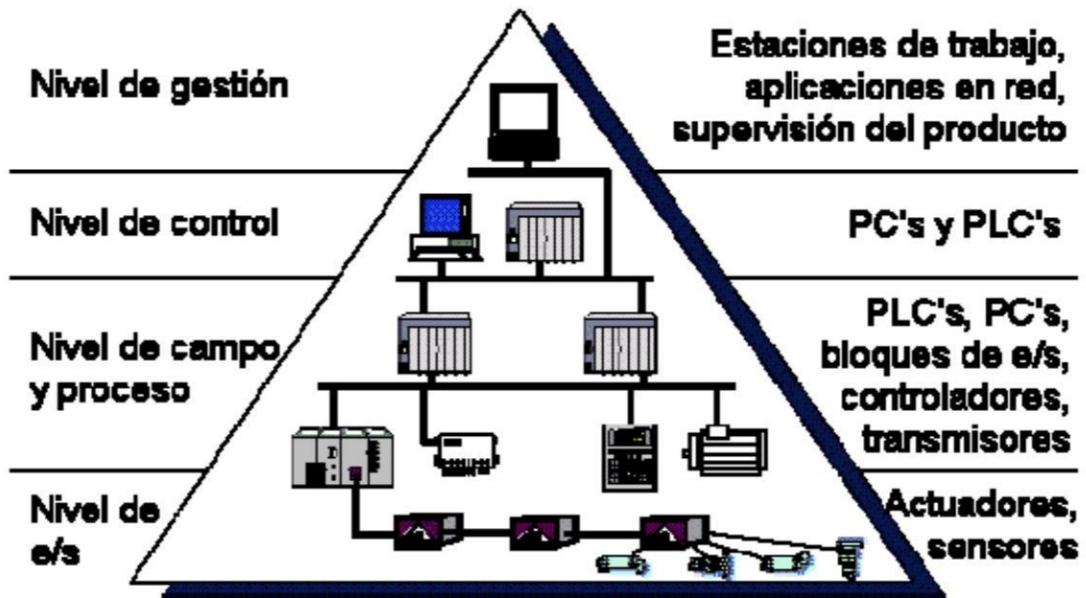
### 5.8.8 Redes Industriales

- La automatización industrial inicialmente dio lugar a **islas automatizadas** que eran equipos ( autómatas, controles numéricos, robots, ordenadores, et c) aislados entre sí.
- La integración de las islas automatizadas dio lugar a las redes industriales.
- Niveles de las Redes Industriales:
  - Nivel bus de campo.
  - Nivel LAN.
  - Nivel LAN/ WAN.

*Nivel de bus de campo*, Nivel de red más próximo al proceso y se encarga de la integración de pequeños automatismos (autómatas compactos, multiplexores de E/S, controladores PID, equipos de medida, etc.) . Suelen formar células de fabricación.

*Nivel de LAN*, Nivel superior al anterior que enlaza las células de fabricación. Esta formado por autómatas de gama alta y ordenadores para control de calidad.

*Nivel de LAN/ WAN*, Nivel más próximo al área de gestión, que integra los niveles anteriores en una estructura de fábrica o múltiples factorías. Esta formado por ordenadores y redes de ordenadores.



**Fig. 51 REDES INDUSTRIALES**

### **Bus de Campo**

- El bus de campo constituye el nivel más simple y próximo al proceso dentro de la estructura de comunicaciones industriales. Los buses de campo más recientes permiten la comunicación con buses jerárquicamente superiores y más potentes.
- Hay diversos buses según fabricantes y agrupaciones de fabricantes, siendo los más extendidos los siguientes:
  - *Modbus Modicon*: marca registrada de GOULD INC. Define un protocolo de Comunicación de topología maestro- esclavo. Su principal inconveniente es que no está reconocido por ninguna normal internacional.



- **BITBUS:** marca registrada por Intel. De bajo coste y altas prestaciones. Intel cedió a dominio público el estándar, por lo que se considera un estándar abierto. Está reconocido por la normativa IEE 1118. Se trata de un bus síncrono, cuyo protocolo se gestiona completamente mediante el microcontrolador 8044.
  
- **Profibus:** impulsado por los principales fabricantes alemanes. El protocolo es un subjuego de MINIMAP. Está impulsado por ser un estándar abierto y bajo norma DIN 19. 245.
  
- **S- BUS:** no es un bus de campo propiamente dicho, sino un sistema multiplexor / demultiplexor que permite la conexión de E/ S remotas a través de dos pares trenzados.
  
- **FIP (Factory Instrumentation Bus):** impulsado por fabricantes y organismos oficiales franceses.
  
- **MIL- STD- 1553B:** adoptado por algunos fabricantes en USA.

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 MATERIALES

#### 6.1.1 EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo que se ha requerido para el presente estudio e investigación, es un intercambiador de calor de doble tubo, de material de cobre operando en contracorriente y tiene las siguientes dimensiones:

**Diámetro nominal del tubo interior** (Acero Normal):  $D_1 = 3/4$  ”

Cedula 40 ; Diámetro Interior: 0.824”      Diámetro Exterior: 1.050”

**Diámetro nominal del tubo exterior** (Acero Normal):  $D_2 = 2$  ”

Cedula 40 ; Diámetro Interior: 2.067”      Diámetro Exterior: 2.375”

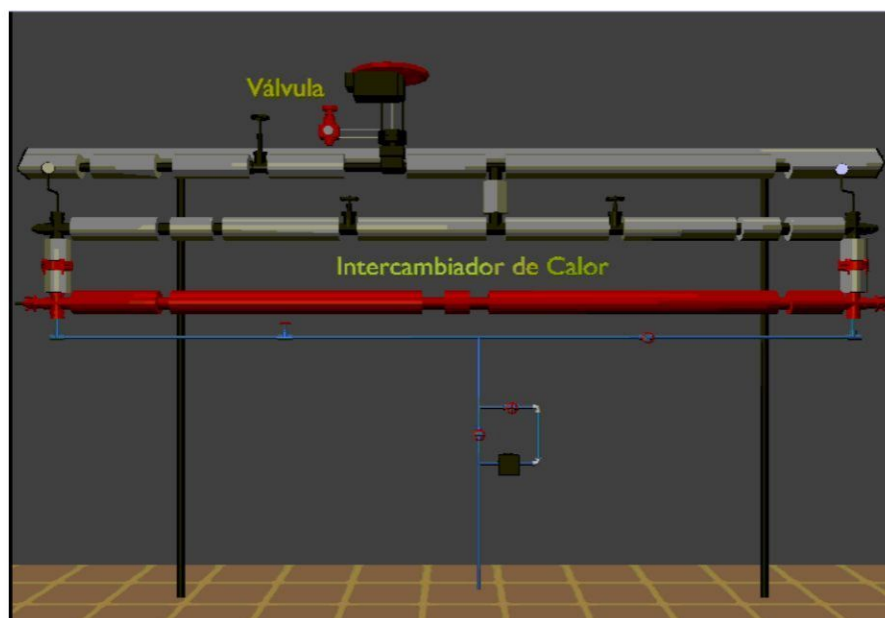
**Longitud :**  $L = 3.4$  m

**Área transversal del tubo interior:**  $2.85$   $cm^2$

**Área transversal del tubo exterior:**  $20.27$   $cm^2$

**Volumen del tubo interior:**  $969$   $cm^3$  (agua)

**Volumen del tubo exterior:**  $6891$   $cm^3$  (vapor).



**Fig.52 Intercambiador de Calor**

Además del intercambiador se usaron equipos auxiliares como la caldera y el compresor.

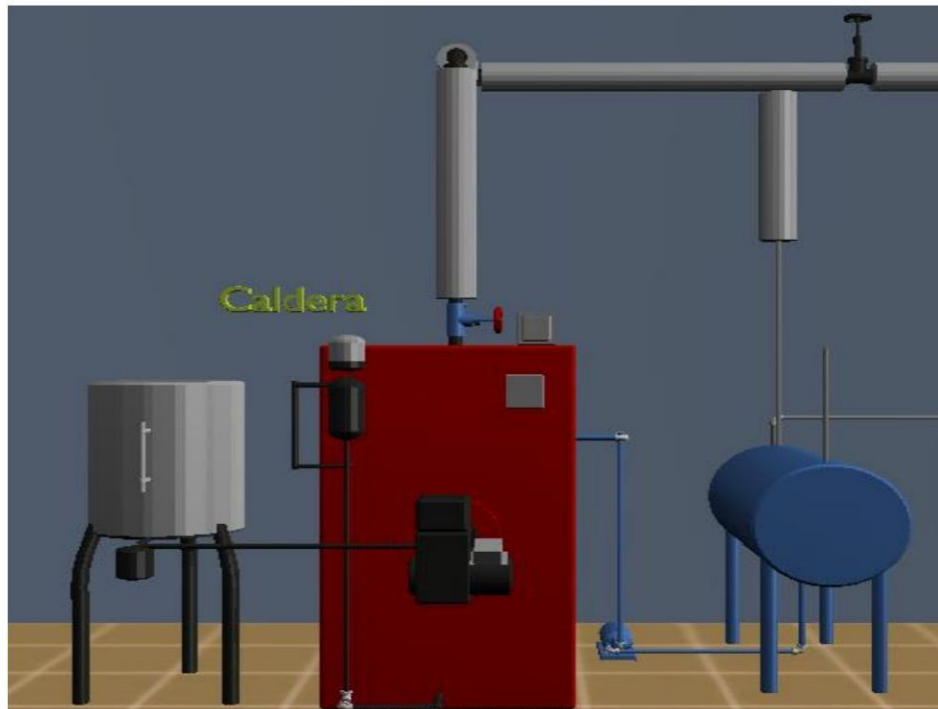


Fig.53 CALDERA

Especificaciones de la Caldera:

Presión de Operación:  $90 \vec{lb} / pul^2$

Modelo : VTB -12

Serie: 300-175

Potencia : 12 BHP

Superficie de Calefacción : 36

Presión de Diseño: 125 *psi*

Prod Vapor: 415 *lb/hr*

Quemador: Motor Eléctrico 110 V

Bomba Combustible ( $110 \vec{lb} / pul^2$ )

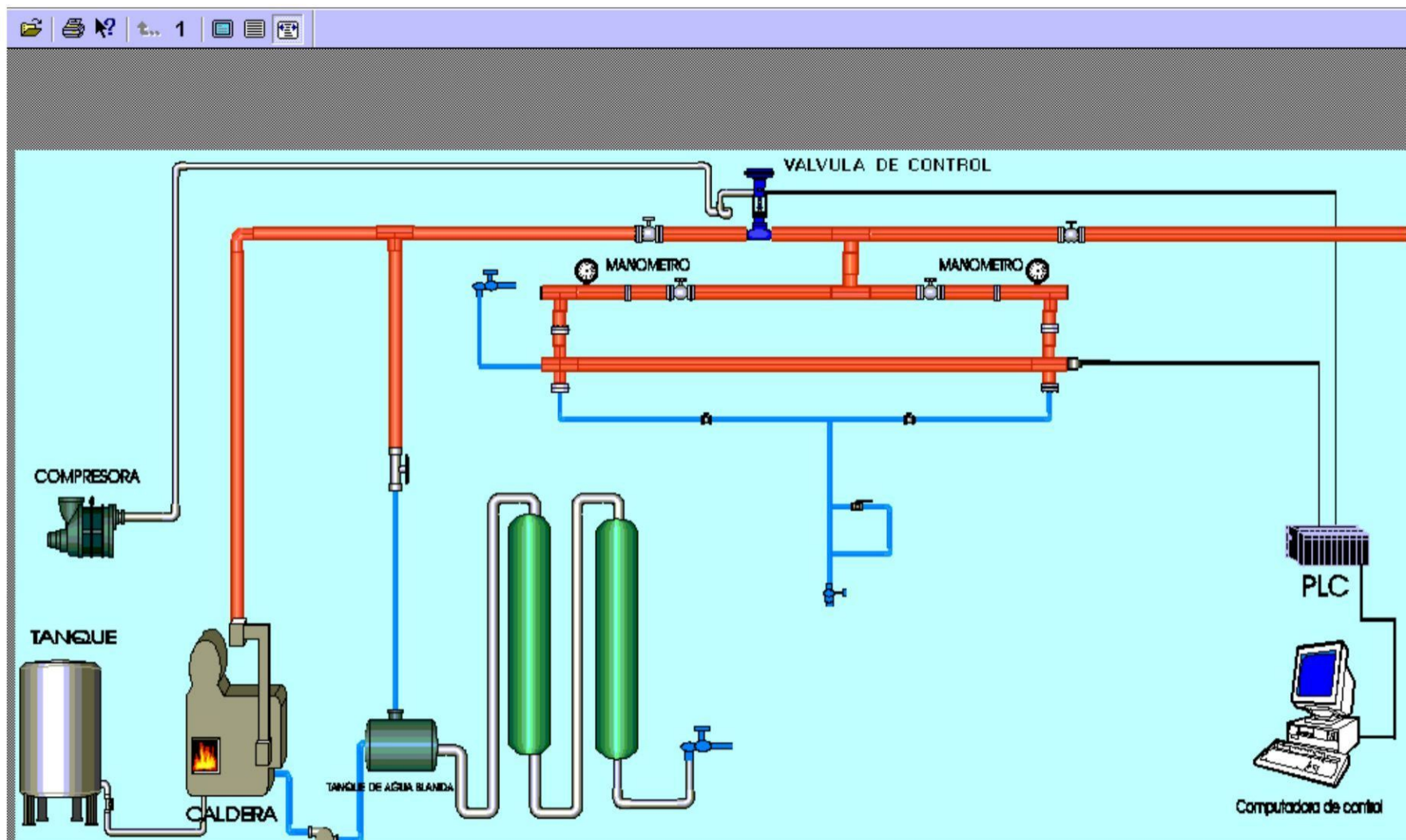
Tanque de Petróleo: 40 Galones



**Fig.54 COMPRESOR**

Especificaciones del Compresor:

Capacidad del Compresor :	60 galones
Controlador Automático de Presión:	0 - 125 psi
Cabezales de Compresión:	2
Volante de transmisión de Movimiento:	1
Válvula reductora de Presión	0-100 psi



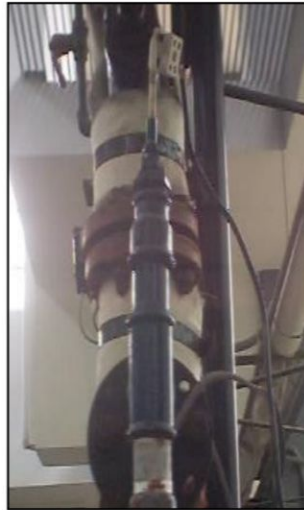
**FIG. 55 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO**

## 6.1.2 ELEMENTOS DE CONTROL

### **SENSOR:**

Termocupla Tipo J, conocida como la termocupla hierro – constantán

Rango de trabajo: -40 a 750 °C



**FIG. 56**

### **TRANSMISOR:**

Tipo: RTD

Thermocouple Input

Voltage Output: 0-5V ó 0-10V (default)

Current Output: 0-20 mA ó 4-20 mA (default)



**FIG. 57**



**CONTROLADOR :**

Controlador Lógico Programable (PLC)

PLC GE FANUC VERSAMAX

120/240 VAC

50/60 HZ 27 VA

8 OUT DISCRETA

8 IN DISCRETA

2 OUT ANALOGA

4 IN ANALOGA



**FIG. 58**

**ACTUADOR :**

Válvula De Control

Electro/Pneumatic

Válvula Posicionadora

Presión Máxima De Aire : 60 psi

Máxima Temperatura : 450 °C

SERIE : 80 LESLIE



**FIG. 59**

### **6.1.3 SOFTWARE USADOS PARA EL SISTEMA DE CONTROL**

#### **MAT LAB 6.5 THE LANGUAGE OF TECHNICAL COMPUTING**

Con este software se obtiene la respuesta al escalón unitario de la función de transferencia del sistema y los valores de  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  que están relacionados directamente con los PID.

#### **VERSAPRO**

Es el software del controlador lógico programable(PLC) donde se realiza la programación de todo el sistema de control a través del lenguaje ladder que nos permite hallar en forma experimental los PID.

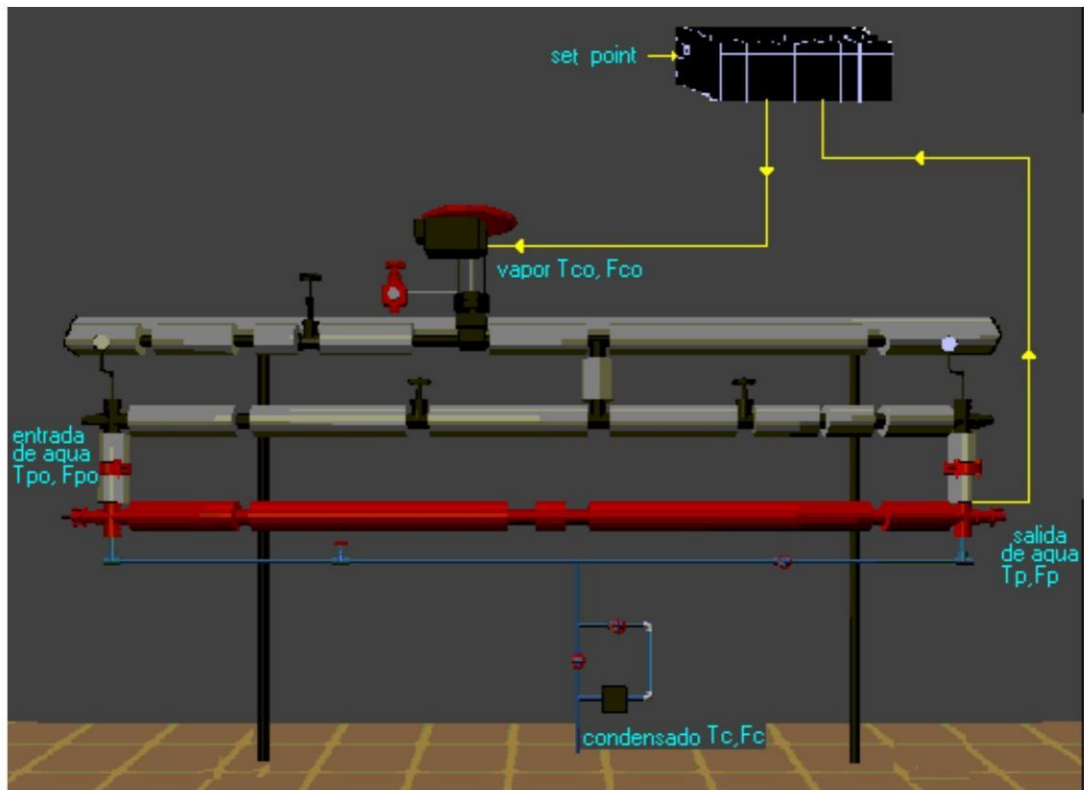
#### **CIMPLICITY HMI (SCADA)**

Permite supervisar el proceso mediante la adquisición de datos en tiempo real a través del computador el sistema de control automático del intercambiador de calor del laboratorio de operaciones unitarias.



## 6.2 METODOLOGÍA

El proceso comienza con la alimentación de agua tratada al caldero para su producción de vapor que ingresara al intercambiador de calor por una línea a través de la válvula de control en contracorriente con el agua fría que ingresa a través de la válvula manual de tal manera que se origina el intercambio de calor entre los dos fluidos obteniéndose como productos el agua con una temperatura superior al agua fría de ingreso y el condensado. El sistema de control que se ha diseñado en este trabajo experimental (Fig. 60), la variable controlada es la temperatura de salida del agua ( $T_p$ ), la variable manipulada es el flujo masico de vapor ( $F_{co}$ ) y el set point se fija en el PLC; el sistema de control se inicia con la lectura del sensor (termocupla) que percibe el calor en que se encuentra en ese instante y rápidamente manda la señal al transmisor que hace la transformación de la señal física a señal electrónica y esto a su vez es recibido por el PLC que compara esta medida de temperatura con el set point asignado al controlador (PLC) y toma una decisión para enviarla al dispositivo de la válvula de control que hace que esta señal electrónica enviada por el PLC sea transformada a señal neumática y esta señal permitirá abrir o cerrar la válvula dependiendo de cómo se encuentre el error.



**Fig.60 Sistema de Control de un Intercambiador de Calor**

Ahora para llegar a que la temperatura de salida del agua ( $T_p$ ) se iguale al set point o que el error sea mínimo dependerá fundamentalmente de los valores de P, I, D.

Para la obtención de los parámetros PID con el software MAT LAB debemos tener en cuenta el comportamiento de la respuesta transitoria de un sistema de control ya que con frecuencia se presenta oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estable.

Al especificar las características de la respuesta transitoria de un sistema de control para una entrada escalón unitario, se debe especificar los siguientes términos:

1. Tiempo de retardo ( $t_d$ )
2. Tiempo de levantamiento ( $t_r$ )
3. Tiempo pico ( $t_p$ )
4. Sobrepasso máximo ( $M_p$ )
5. Tiempo de asentamiento ( $t_s$ )

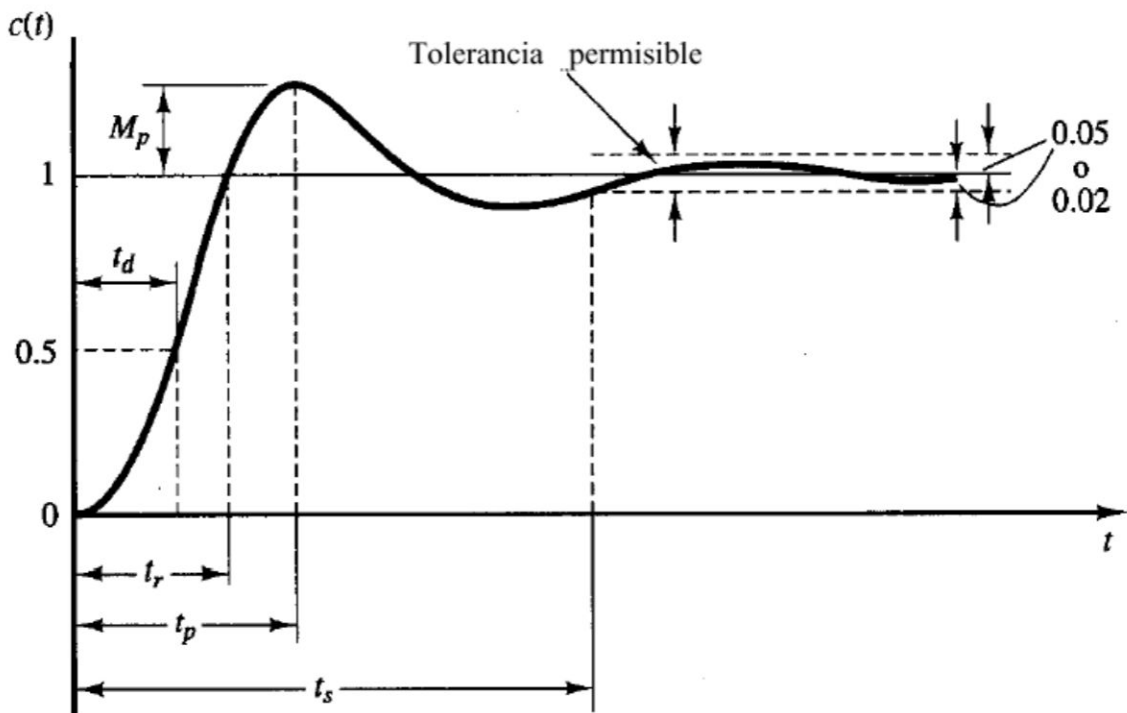


Fig.61

Además tenemos que tener en cuenta que un controlador proporcional ( $K_p$ ) tendrá el efecto de reducir el tiempo de elevación y reducirá, sin eliminar el error de estado estacionario.

Un control integral ( $K_i$ ) tendrá el efecto de eliminar el error de estado estacionario, pero puede empeorar la respuesta transitoria. Un control derivativo ( $K_d$ ) tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema, reduciendo el sobrepico, y mejorando la respuesta transitoria. Los efectos de cada uno de los controladores  $K_p$ ,  $K_d$ , y  $K_i$  en un sistema a lazo cerrado se resumen en la tabla de abajo.

Tabla 7: Efecto de los Controladores  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ .

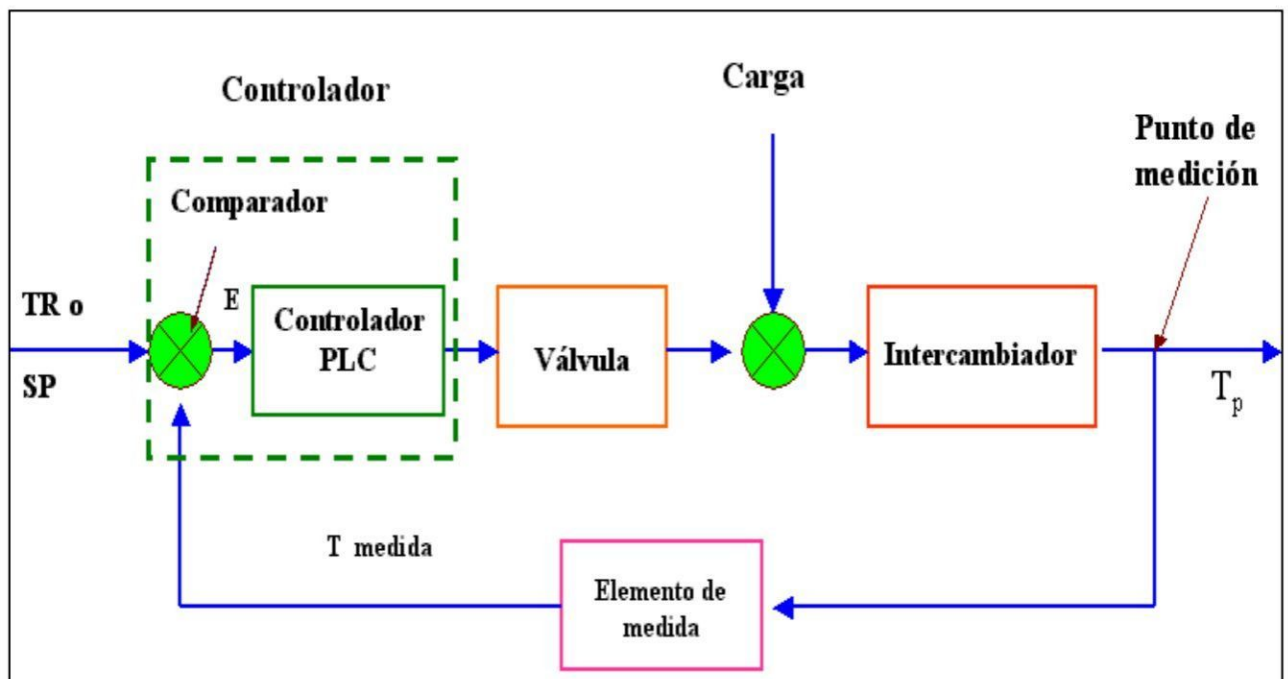
<b>Respuesta al L. Cerrado</b>	$T_r$	$t_p$	$t_s$	ERROR
<b><math>K_p</math></b>	Baja	Sube	Poco Cambio	Baja
<b><math>K_i</math></b>	Baja	Sube	Sube	Elimina
<b><math>K_d</math></b>	Poco Cambio	Baja	Baja	Poco Cambio

Luego de encontrar los valores de PID con MAT LAB se prosigue a hallar los PID en forma experimental con el PLC mediante la programación en lenguaje ladder para lo cual se realizo el escalamiento de señal de la termocupla que mide la salida de temperatura del agua, la lectura de la válvula de control que nos muestra en unidades de cuentas y la incursión del bloque PID ISA donde colocaremos los valores de PID (Proporcional, Integral y Derivativo) hasta encontrar los valores adecuados que nos permita tener al sistema de control estable.

Finalmente encontrado los valores de PID del Sistema de Control a través de Controlador Lógico Programable (PLC) con su respectiva programación en el lenguaje ladder se supervisa a través del software CIMPLICITY mediante la adquisición de datos que nos permitirá observar todo el proceso en el computador en tiempo real.

### 6.3 DIAGRAMA DE BLOQUES

#### 6.3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL



**Fig.62 Diagrama de bloques del Sistema de Control**

Donde:

TR o SP : Temperatura de referencia ó set point.

T medida : Temperatura de medida.

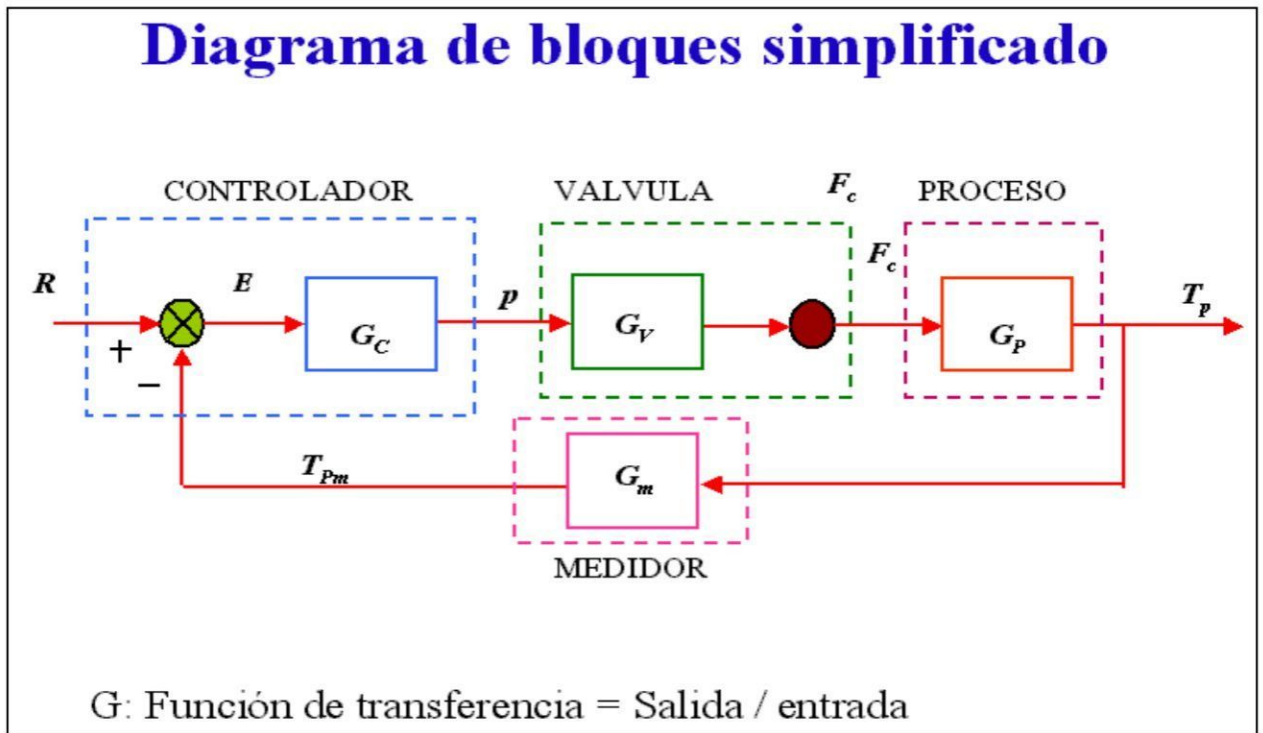
Tp : Temperatura de salida del agua (temperatura del proceso)

Carga : Fc (flujo masico de vapor)

Comparador : Punto de Suma.

E : Señal de entrada al PLC

### 6.3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES SIMPLIFICADO



**Fig.63**

Donde:

R : Set Point

$T_{pm}$  :Temperatura de salida del Transmisor

E : Señal de entrada al controlador.

$p$  : Señal de entrada a la Válvula.

$G_c$  : Función de Transferencia del Controlador

$G_v$  : Función de Transferencia de la Válvula de Control

$G_p$  : Función de Transferencia del Proceso

$G_m$  : Función de Transferencia del Medidor (sensor-transmisor )

## 6.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA

Para obtener la función de transferencia del sistema tenemos que conocer la función de cada bloque.

A continuación se ha determinado las diferentes funciones de transferencia que intervienen en el sistema de control automático.

### 6.4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL PROCESO

La función de transferencia para el proceso en el intercambiador de calor debe relacionar en el dominio de Laplace a la variable de salida (controlada)  $T_p$  y a la variable de entrada (regulada)  $F_c$ , considerando constante el flujo de entrada.

De la ecuación 33 del capítulo 5.2 se tiene:

$$\frac{d(T_p)}{dt} = 2[F_p(t)(T_{PO} - T_p) + U(t)A\Delta T(T) / C_{p_p}] / M_p \quad (33)$$

Reacomodando se tiene:

$$\frac{M_p}{2F_p} \frac{d(T_p)}{dt} = (T_{PO} - T_p) + U(t)A\Delta T(T) / F_p C_{p_p} \quad (52)$$

Donde:

$T_c$  = temperatura de salida del fluido caliente

$T_{co}$  = temperatura de entrada del fluido caliente

$T_p$  = temperatura de salida del fluido de proceso

(variable que se va a controlar)

$T_{po}$  = temperatura de entrada del fluido de proceso

$F_c$  = flujo de masa del fluido caliente

(variable que se va a manipular)

$F_p$  = flujo de masa del fluido de proceso

$U$  = coeficiente total de transferencia de calor

$A$  = área de transferencia de calor

$\Delta T$  = diferencia verdadera de temperaturas

$C_{pc}$  = capacidad calorífica del fluido caliente

$C_{pp}$  = capacidad calorífica del fluido de proceso

$M_c$  = masa del fluido caliente dentro del intercambiador

$M_p$  = masa del fluido de proceso dentro del intercambiador

$t$  = tiempo

Si:

$$\tau_P = \frac{M_P}{2F_P} \quad \text{y} \quad k_1 = A\Delta T(T) / F_P C_{P_P}$$



La ecuacion 52 se puede escribir como:

$$\tau_p \frac{d(T_p)}{dt} + T_p = T_{PO} + k_1 U \quad (53)$$

En el estado estacionario la ecuacion 53 quedará:

$$\tau_{PS} \frac{d(T_{PS})}{dt} + T_{PS} = T_{POS} + k_1 U_S = 0 \quad (54)$$

De (54) y (53) se tiene.

$$\tau_p \frac{d(T_p - T_{PS})}{dt} + (T_p - T_{PS}) = (T_{PO} - T_{POS}) + k_1 (U - U_S) \quad (55)$$

Definiendo las variables de desviacion :

$$(T_p - T_{PS}) = \mathbf{Tp}$$

$$(U - U_S) = \mathbf{U}$$

Ademas, ( $T_{PO} = T_{POS}$ ) la temperatura de entrada es la misma en cualquier

instante. Con lo cual la ecuacion (55) será:

$$\tau_p \frac{d(\mathbf{Tp})}{dt} + \mathbf{Tp} = \mathbf{U} k_1 \quad (56)$$

Aplicando la transformada de laplace a la ecuacion (56) se tiene:

$$\tau_p [S\mathbf{Tp}(s) - \mathbf{Tp}(0)] + \mathbf{Tp}(s) = \mathbf{U}(s) k_1 \quad (57)$$

Donde  $\mathbf{Tp}(0) = 0$ , ya que en el tiempo cero recién se inicia el proceso y no hay variacion del estado estacionario.

Simplificando la ecuacion (57) se tiene:

$$\frac{T_p(s)}{U(s)} = \frac{k_1}{(\tau_p s + 1)} \quad (58)$$

Ahora usando el mismo procedimiento para la obtencion de la ecuacion (58), obtendremos la otra relacion pero esta vez involucrando la temperatura de calentamiento  $T_c$  con la ecuacion (32) de igual manera del capitulo 5.2 y la siguiente ecuacion a mostrar (59):

$$\frac{d(T_c)}{dt} = 2[F_c(t)(T_{co} - T_c) - U(t)A\Delta T(T) / C_{p_c}] / M_c \quad (32)$$

$$C_{p_c}F_c(T_c - T_{co}) = UA\Delta T = Q \quad (59)$$

Combinando la ecuacion (32) y (59) se obtiene

$$\frac{M_c}{2F_c} \frac{dU}{dt} + U = \frac{C_{p_c}F_c(T_{co} - T_c)}{A\Delta T} \quad (60)$$

Ahora definimos la relacion  $T_{co} \langle T_o \rangle T_c$  y la combinamos con la ecuación (60), obtendremos lo siguiente:

$$\frac{M_c}{2F_c} \frac{dU}{dt} + U = \frac{C_{p_c}F_c(T_{co} - T_o)}{A\Delta T} + \frac{C_{p_c}(T_o - T_c)}{A\Delta T} F_c \quad (61)$$

$$\text{Si } \frac{M_c}{2F_c} = \tau_c, \quad U_o = \frac{C_{p_c}F_c(T_{co} - T_o)}{A\Delta T}, \quad k_2 = \frac{C_{p_c}(T_o - T_c)}{A\Delta T}$$

Reemplazando las relaciones anteriores en la ecuacion (61) se tiene:

$$\tau_c \frac{dU}{dt} + U = U_o + k_2 F_C \quad (62)$$

En el estado estacionario la ecuacion (62) quedará:

$$\tau_{CS} \frac{d(U_S)}{dt} + U_S = U_{OS} + k_2 F_{CS} = 0 \quad (63)$$

Restando ambas ecuaciones (62) y (63).

$$\tau_c \frac{d(U - U_S)}{dt} + (U - U_S) = (U_o - U_{OS}) + k_2 (F_C - F_{CS}) \quad (64)$$

Definiendo las variables de desviacion :

$$(U - U_S) = U$$

$$(F_C - F_{CS}) = Fc$$

Entonces la ecuacion (64) quedaria de la siguiente manera :

$$\tau_c (dU/dt) + U = k_2 Fc(s) \quad (65)$$

Aplicando Laplace a la ecuacion (65) se obtiene:

$$\tau_c [S U(s) - U(0)] + U(s) = k_2 Fc(s) \quad (66)$$

Simplificando y reordenando la ecuacion (66) se obtiene :

$$\frac{U(s)}{Fc(s)} = \frac{k_2}{\tau_c S + 1} \quad (67)$$

Ahora finalmente obtenida la ecuacion (67) se hace el producto con la ecuacion

(58) para obtener la funcion de transferencia del proceso.

$$\frac{Tp(s)}{U(s)} \cdot \frac{U(s)}{Fc(s)} = \frac{K}{(\tau_c S+1)(\tau_p S+1)}$$

$$K = k_1 \cdot k_2$$

$$G_P = \frac{Tp(s)}{Fc(s)} = \frac{K}{(\tau_c S+1)(\tau_p S+1)} \quad (68)$$

(Funcion de Transferencia del Proceso)

#### 6.4.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CONTROLADOR

Su función de transferencia viene dada por la siguiente expresión:

$$G_C = K_P \left( 1 + \frac{1}{\tau_i S} + \frac{1}{\tau_d S} \right) \quad (69)$$

Donde:

$G_C$  = Funcion de transferencia del Controlador

$K_p$  = ganancia proporcional,

$\tau_i$  = tiempo integral

$\tau_d$  = tiempo derivativo.

### 6.4.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MEDIDOR (Sensor-Transmisor)

Siendo la variable leída ( $Y$ ) y el valor emitido hacia el controlador ( $Y_m$ ), la función de transferencia es:

$$G_m = \frac{Y_m(s)}{Y(s)} = \frac{Tp_m(s)}{Tp(s)} = 1$$

Donde :

$G_m$  = Funcion de Transferencia del Sensor-Transmisor

$Y$  = Variable leída

$Y_m$  = Variable emitida

$Tp$  = Temperatura de Proceso leída

$Tp_m$  = Temperatura emitida al controlador

### 6.4.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ELEMENTO DE CONTROL FINAL (Válvula de Control)

En muchos sistemas prácticos, la constante tiempo de la válvula es muy pequeña comparada con las constantes de tiempo de otros componentes del sistema de control, y su función de transferencia puede ser aproximada a una constante.

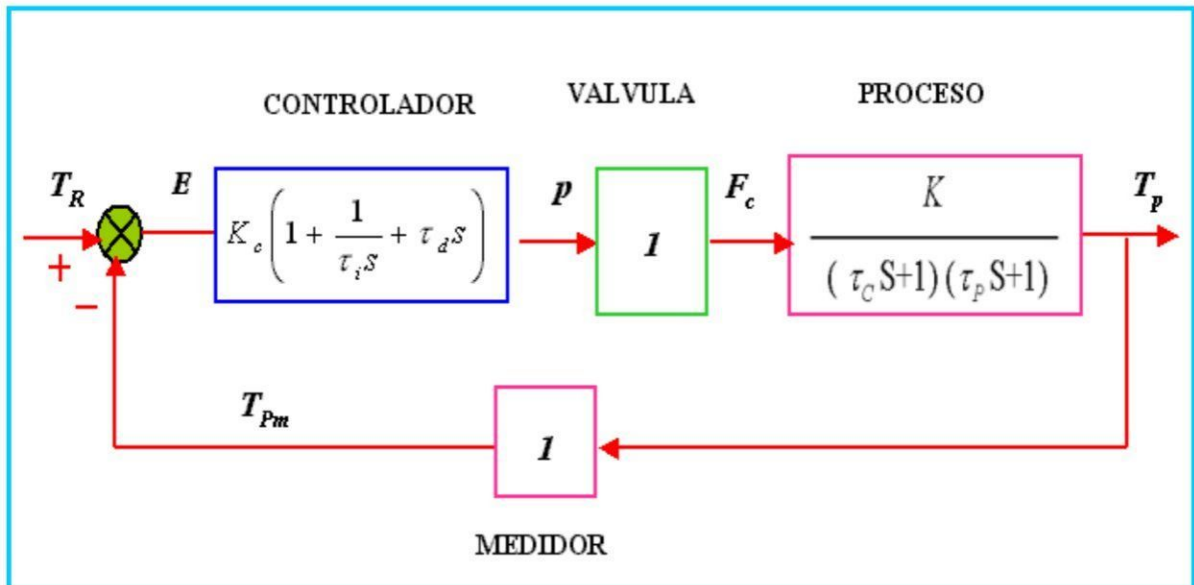
$$G_V = K_V = 1$$

Donde:

$G_V$  = Función de transferencia de la Válvula

$K_V$  = Constante de la Válvula

Luego de hallar la función de transferencia de cada bloque, el diagrama de bloques simplificado queda como sigue:



**Fig.64**

Donde:

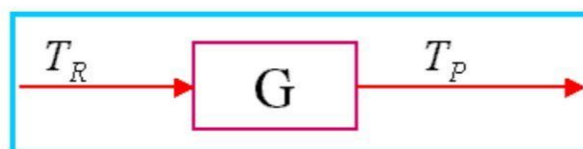
$T_R$  : Set Point

$T_{Pm}$  : Temperatura de salida del Transmisor

$E$  : Señal de entrada al controlador

$p$  : Señal de entrada a la Válvula.

El siguiente paso es reducir a un solo bloque de la forma:



**Fig.65**

Aplicando el álgebra de bloques en la figura 64 se tiene:

$$\frac{Tp(s)}{Tr(s)} = \frac{K_d S^2 + K_C S + K_i}{\frac{\tau_C \tau_P S^3}{K} + \left(\frac{\tau_C + \tau_P}{K} + K_d\right) S^2 + \left(\frac{1}{K} + K_C\right) S + K_i}$$

**Fig.66(FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE TODO EL SISTEMA)**

Donde:

$K_C$  = Ganancia Proporcional

$K_i = K_C / \tau_i$

$K_d = K_C \tau_d$

**Experimentalmente las condiciones de Operación que se han determinado son:**

$F_c$  (Flujo de Vapor) = 0.01833 kg/s

$F_p$  (Flujo de Agua) = 0.28311 kg/s

$M_c$  (Masa de Vapor en el Intercambiador) = 6.891 kg

$M_p$  (Masa de agua en el Intercambiador) = 0.969 kg

$T_c$  (Temperatura de vapor) = 125 °C

$T_{co}$  (Temperatura de condensado) = 130 °C

$T_p$  (Temperatura de calentamiento del agua) = 35 °C (Set Point)

$T_{po}$  (Temperatura de entrada del agua) = 23 °C

Calculos de las variables  $K$ ,  $\tau_C$  y  $\tau_P$  .

El balance de energia en el Intercambiador para estado estacionario:

$$(T_p - T_{p_0})F_p C_{p_p} = (T_c - T_{c_0})F_c C_{p_c} \quad (70)$$

$$T_p = F_c \left( \frac{T_{c_0} - T_c}{F_p} \right) + T_{p_0} \quad (71)$$

De donde  $T_p$ , depende unicamente de  $F_c$  .

$$\text{Entonces se define la siguiente expresion : } K = \left( \frac{T_{c_0} - T_c}{F_p} \right) \quad (72)$$

Reemplazando en la ecuacion anterior y las que involucre  $\tau_C$  y  $\tau_P$  :

$$K = \left( \frac{130 - 125}{0.28311} \right) = 17.6600 \text{ sC}^{\circ} / \text{kg}$$

$$\tau_C = \frac{M_C}{2F_C} = \frac{6.891 \text{ kg}}{2 * 0.0183 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 188.2787 \text{ s}$$

$$\tau_P = \frac{M_P}{2F_P} = \frac{0.969 \text{ kg}}{2 * 0.2831 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 1.7114 \text{ s}$$



Ahora reemplazando  $K$ ,  $\tau_C$  y  $\tau_P$  en la función de transferencia del sistema de la ecuación de la figura 71.

$$\frac{T_p(s)}{T_R(s)} = \frac{K_d S^2 + K_C S + K_i}{18.2458 S^3 + (10.7582 + K_d) S^2 + (0.0566 + K_C) S + K_i}$$

(73)

## 6.5 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PID UTILIZANDO MAT LAB

La programación en MAT LAB de la función de transferencia del sistema se muestra a continuación:

Valores Iniciales de;  $K_p=50$ ,  $K_d=10$ , y  $K_i=10$

```
C:\MATLAB6p5\work\Untitled.m
File Edit View Iext Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 - kp=50;
2 - kd=10;
3 - ki=10;
4 - num=[kd kp ki] ;
5 - den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki] ;
6 - step(num,den)
7
```

Fig.67-a

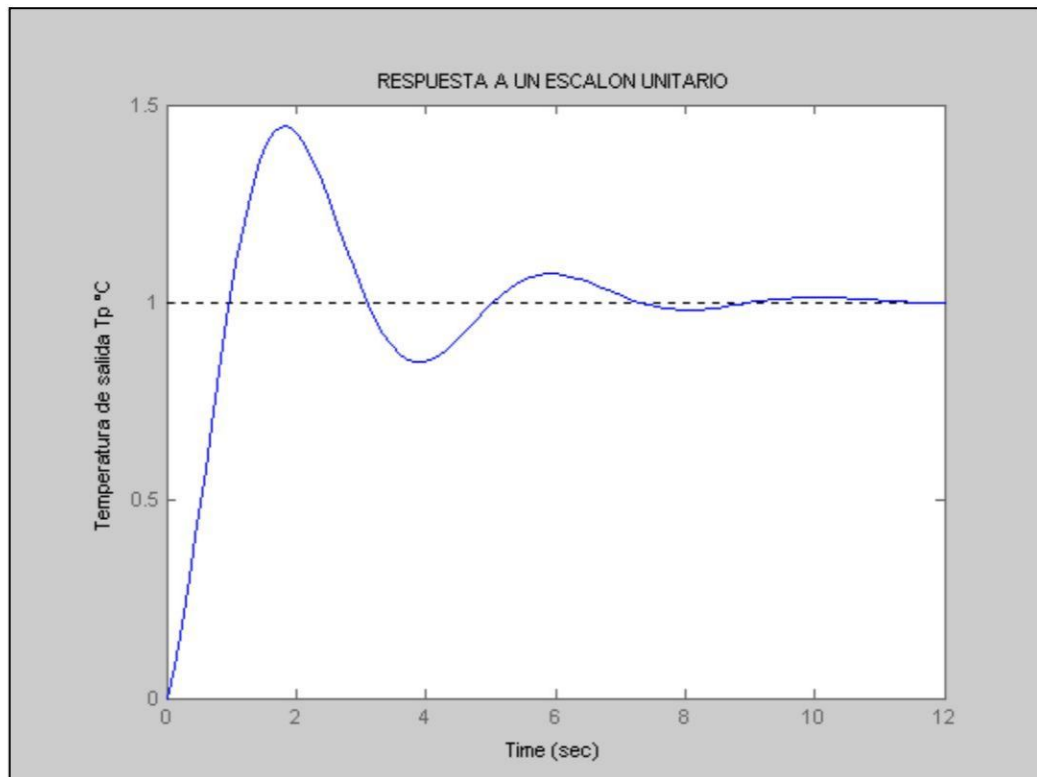


Fig.67-b

Analizando la figura 67-b podemos ver claramente que tiene una demasiada sobrelongación o sobrepaso máximo ( $M_p$ ) además el tiempo de restablecimiento es considerable.

Para lo cual asignaremos otro juego de valores  $K_p$ ,  $K_d$ , y  $K_i$  de tal manera que corrija las observaciones mencionada anteriormente y mejore la respuesta.

Valores Secundarios de;  $K_p=10$ ,  $K_d=4$ , y  $K_i=2$

```
C:\MATLAB6p5\work\Untitled.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 - kp=10;
2 - kd=4;
3 - ki=2;
4 - num=[kd kp ki] ;
5 - den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki] ;
6 - step(num,den)
7
```

Fig.68-a

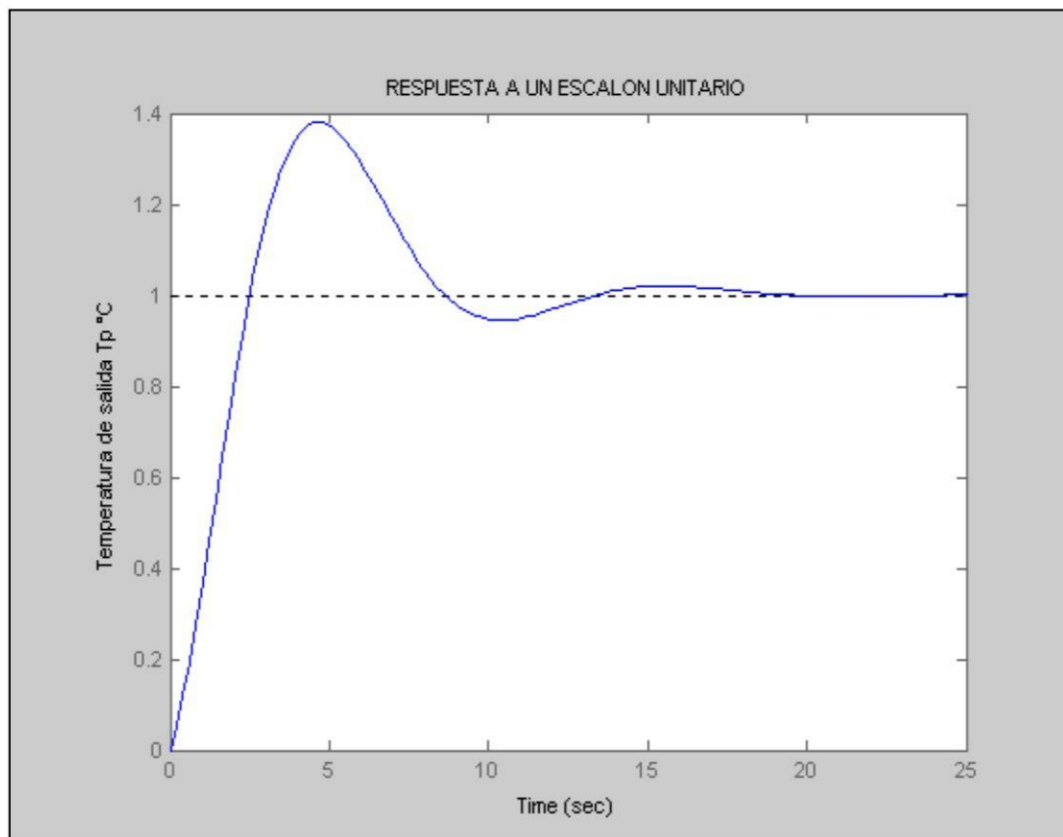


Fig.68-b

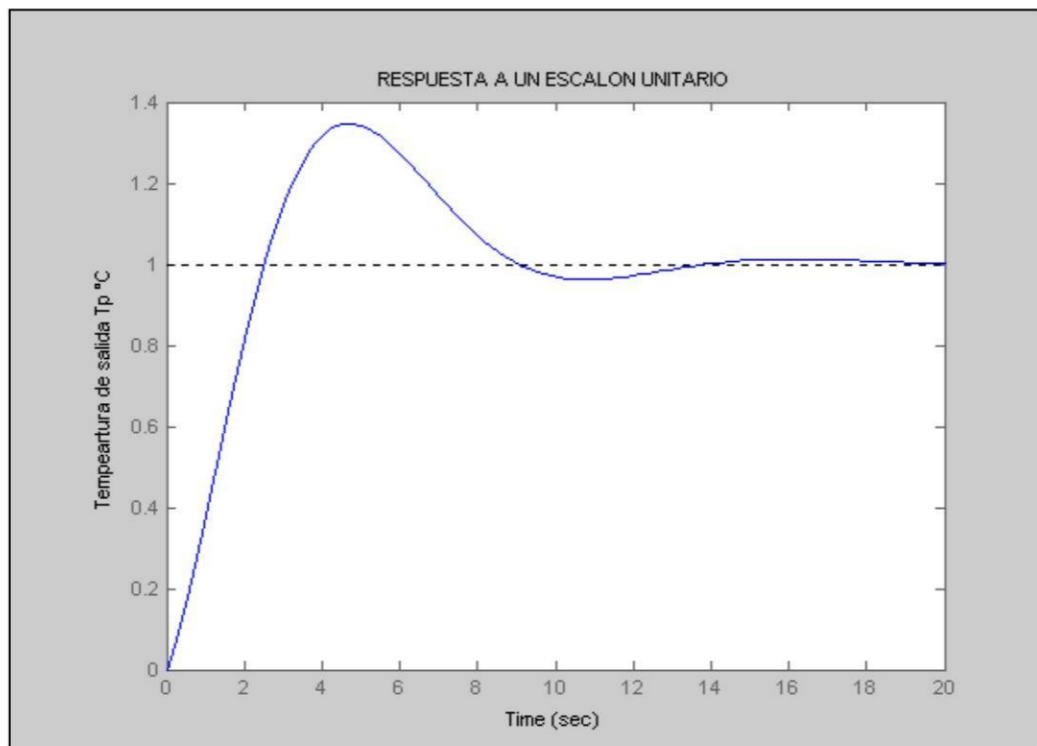
Analizando la figura 68-b podemos ver claramente que la sobrelongacion o sobrepaso maximo ( $M_p$ ) a disminuido aproximadamente a 38 % y el error a comparación con la grafica anterior es menor y las oscilaciones de la respuesta a disminuido.

Pero aun este juego de valores de  $K_p$ ,  $K_d$ , y  $K_i$  se puede mejorar para tener una sintonia fina del controlador PID.

Valores Finales de:  $K_p= 10$ ,  $K_d=5$ , y  $K_i=2$

```
C:\MATLAB6p5\work\Untitled.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 - kp=10;
2 - kd= 5;
3 - ki=2;
4 - num=[kd kp ki] ;
5 - den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki] ;
6 - step(num,den)
7
```

**Fig.69-a**



**Fig.69-b**

En esta ultima grafica podemos observar que se alcanza el set point en un tiempo menor además el tiempo de asentamiento ha disminuido con relacion al caso anterior.

Finalmente se tiene  $K_p=10$ ,  $K_d=5$ , y  $K_i=2$

Aplicando las siguientes relaciones :

$$K_i = K_C / \tau_i$$

$$K_d = K_C \tau_d$$

Hallamos  $\tau_i$  y  $\tau_d$

Realizando las operaciones correspondientes obtenemos lo siguiente:

$$K_p = 10$$

$$\tau_i = 5$$

$$\tau_d = 0.5$$

Entonces  $P=10$ ,  $I=5$  y  $D=0.5$

## **6.6 CONTROL PID EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR UTILIZANDO PLC(Controlador Lógico Programable) .**

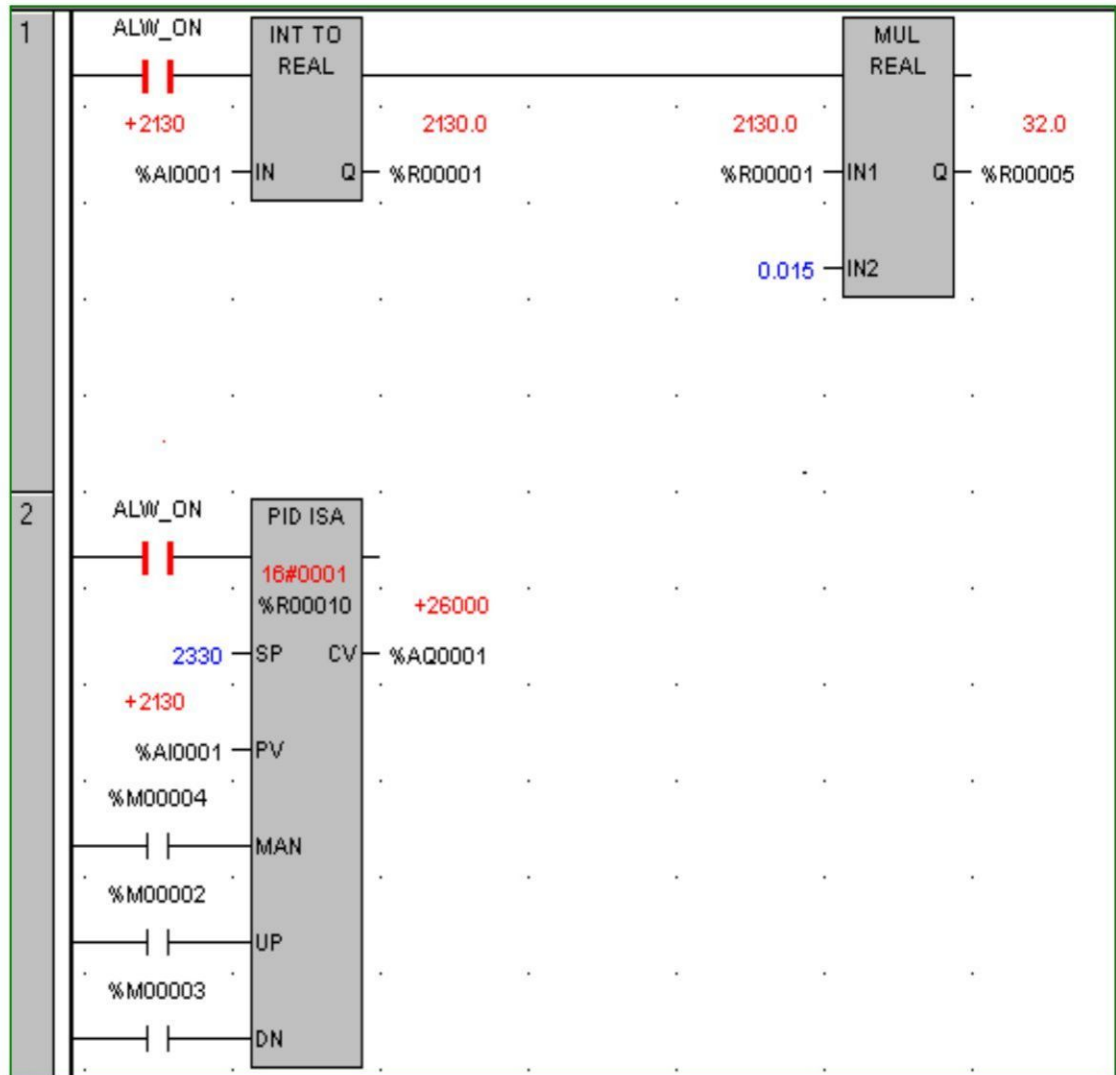
En este estudio se ha realizado un control en lazo cerrado usando el PLC y se ha obtenido los valores experimentales P, I, D ; se observa en tiempo real como el set point se iguala a la variable del proceso (PV) de acuerdo a las condiciones de operación establecidas.

En el lenguaje ladder se ha desarrollado un programa , los dos primeros bloques de la línea 1 corresponden a la señal de la termocupla , en la figura se observa el valor de 32, se refiere a 32 °C que indica la variable del proceso, mientras que el set point es de 35 °C.

El bloque en la línea 2 nos muestra la variable de proceso (PV), el set point (SP) y la abertura de la válvula (CV) , en la parte izquierda SP=2330 indica el set point que equivale a 35 °C y PV=2130 indica la variable del proceso que en estos momentos equivale a 32 °C tal como indica en la programación del bloque .

La diferencia entre PV y SP es el error, en la parte derecha del bloque PID ISA podemos observar un valor de 26000 que nos indica la abertura de la válvula de control en este caso nos muestra una abertura de 81 %.

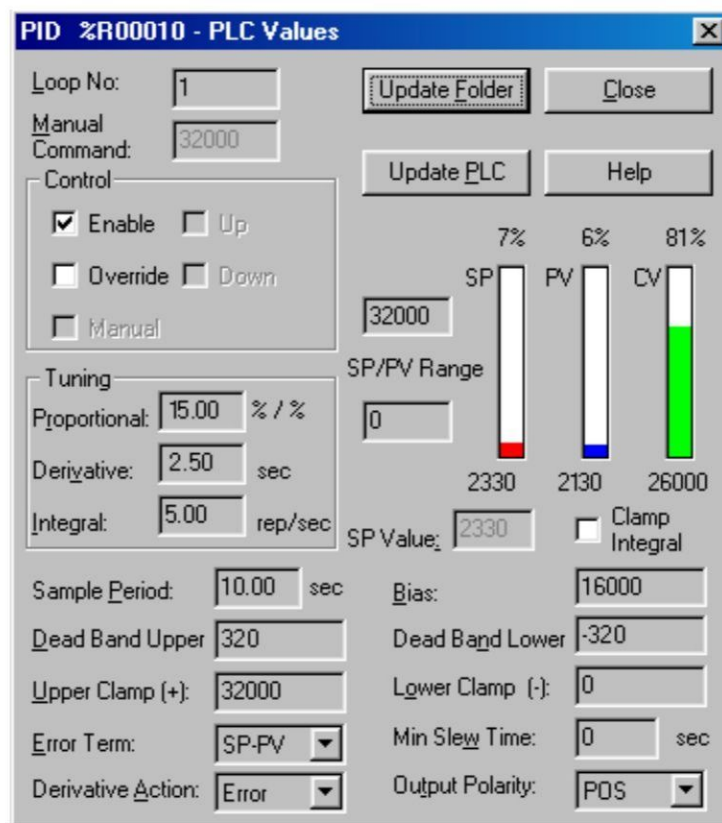
**PROGRAMACION LADDER (ESCALERA) DEL SISTEMA DE CONTROL**



**Fig.70**

En la figura 71 se muestra configuración del bloque PID ISA, se observa la relación que del set point, variable del proceso y abertura de válvula de control; La franja roja nos indica el set point, la azul como varía la variable del proceso hasta llegar al valor de set point y la verde la abertura de válvula.

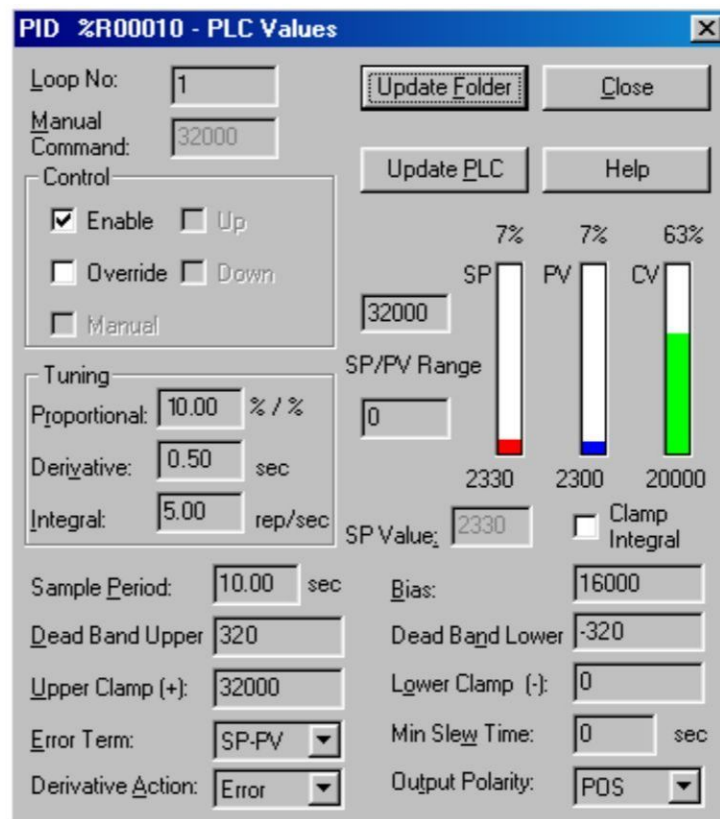
### BLOQUE PID ISA



**Fig. 71**



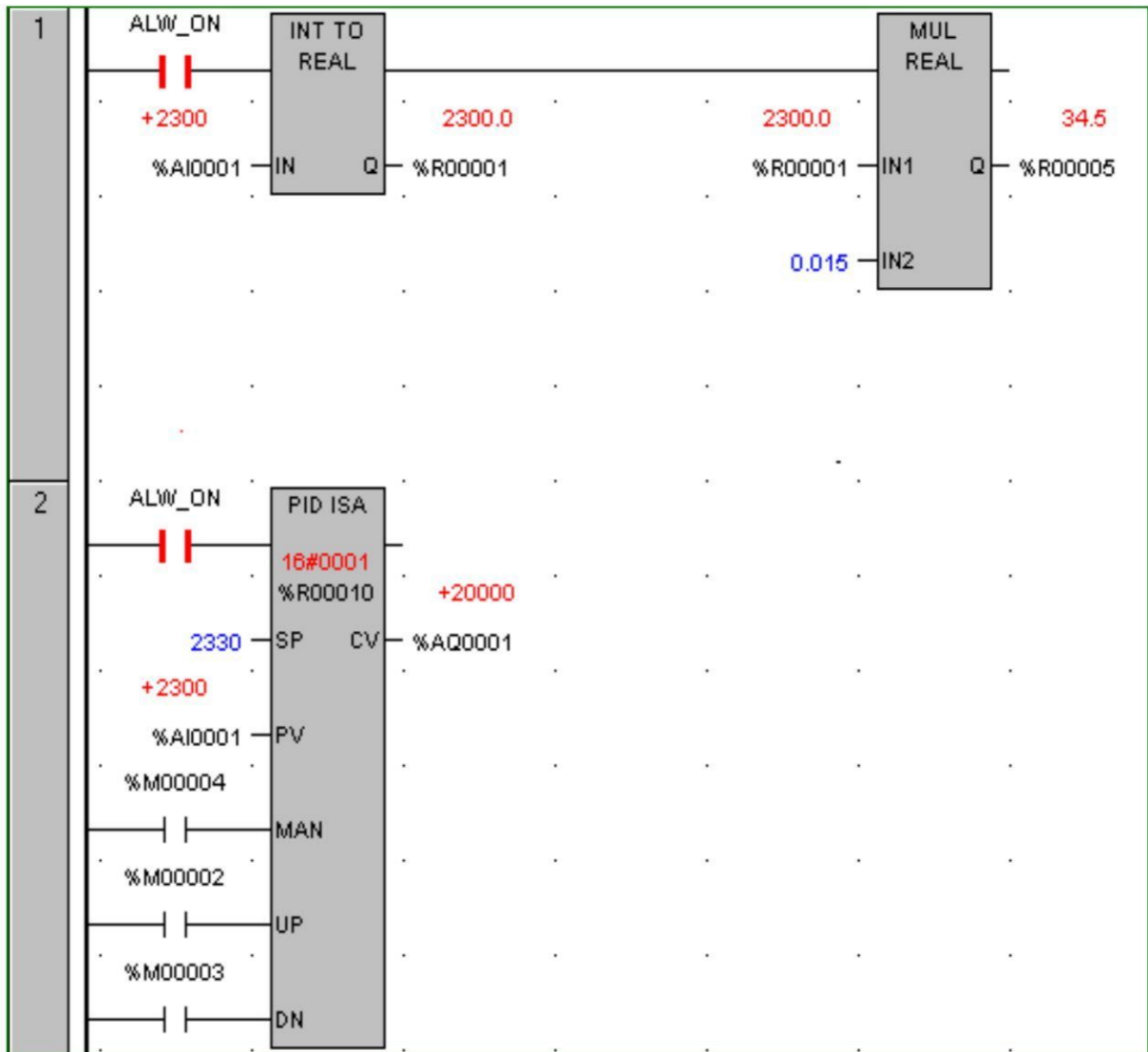
Para encontrar los valores experimentales de P, I, D en el bloque PID ISA insertamos los valores obtenidos en la programación con MAT LAB : P=10, I=5 y D=0.5.



**Fig. 72**

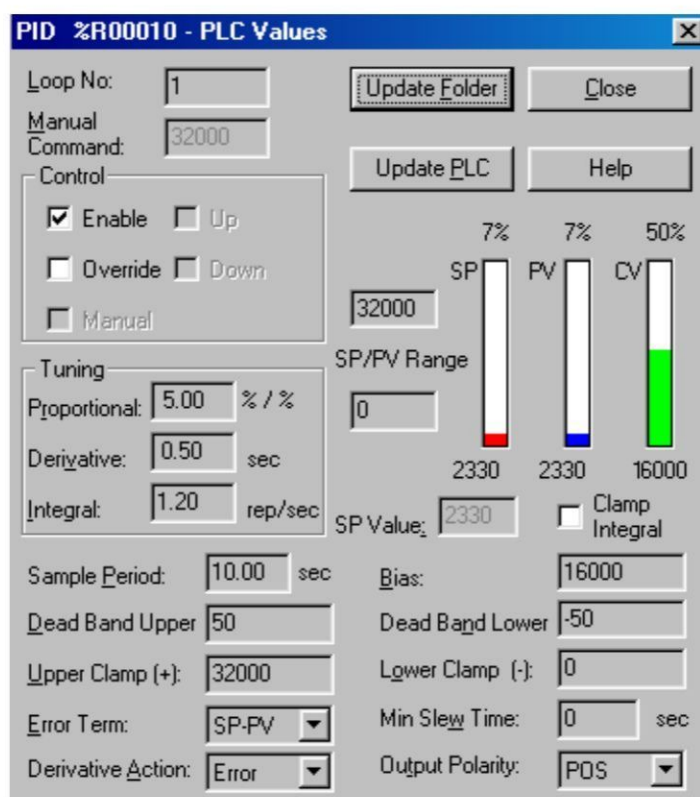
Podemos ver en la figura 72 que la variable del proceso no se iguala con el Set Point asignado y la valvula no llega a estabilizarse en el valor programado de operación que son 16000 cuentas.

La figura 73 nos muestra la programación en el lenguaje ladder luego de asignar los valores de P, I, D obtenidos en MAT LAB.



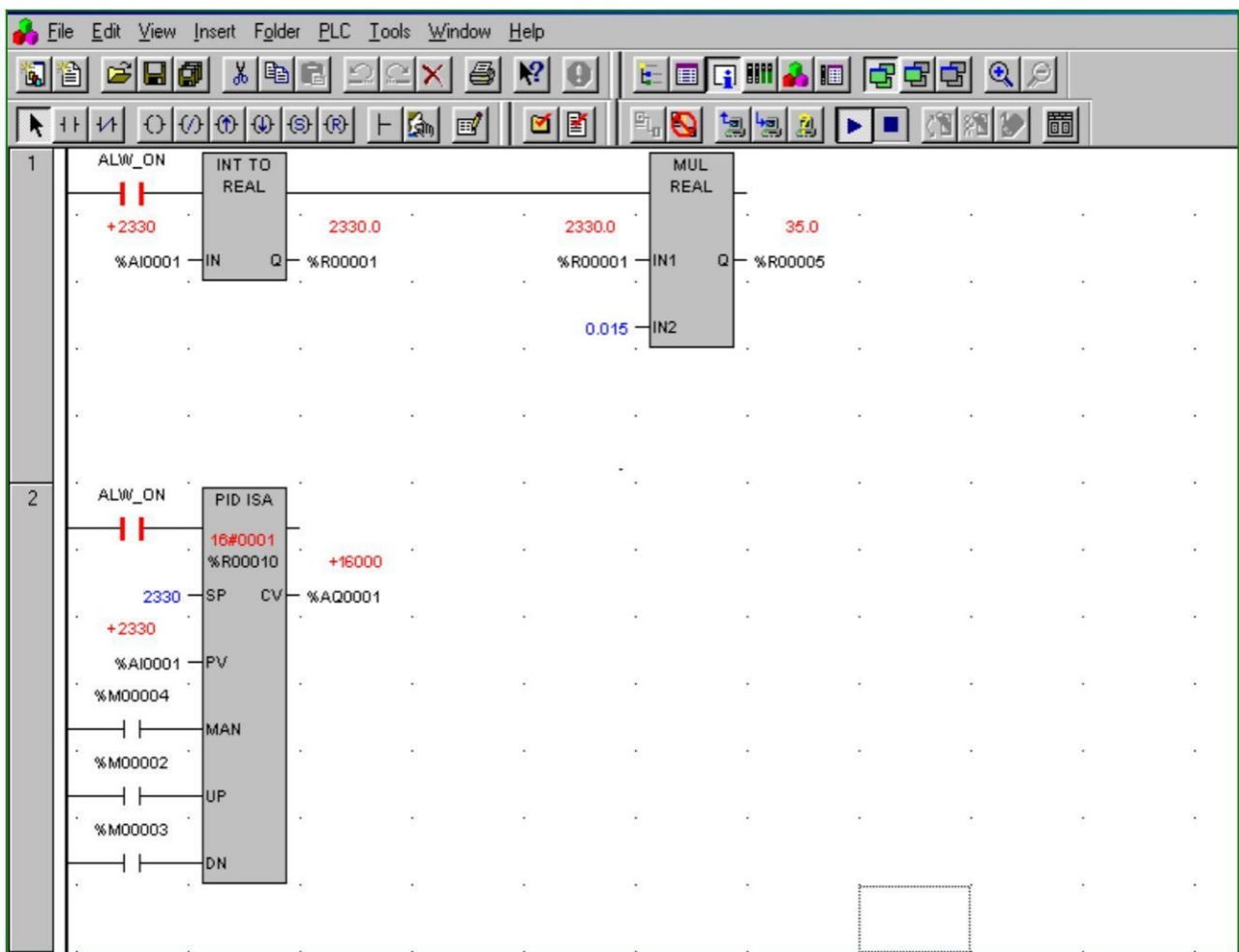
**Fig.73**

Seguidamente asignamos los valores adecuados de P,I,D de tal manera que el error sea minimo y la valvula en la franja verde indique apertura de 50 % que equivale a 16000 cuentas, rrealizamos la variación de los P, I, D hasta llegar a que el set point se iguale con la variable del proceso y la válvula de control fije su posición a 16000 cuentas que equivale a una apertura de 50 % , para lo cual luego de varias asignaciones de P, I, D al bloque PÍD ISA del programa del sistema de control del intercambiador en el PLC, se obtuvo que para los valores de P= 5, I=1.2, D=0.5 se logra estabilizar el sistema de control.



**Fig.74**

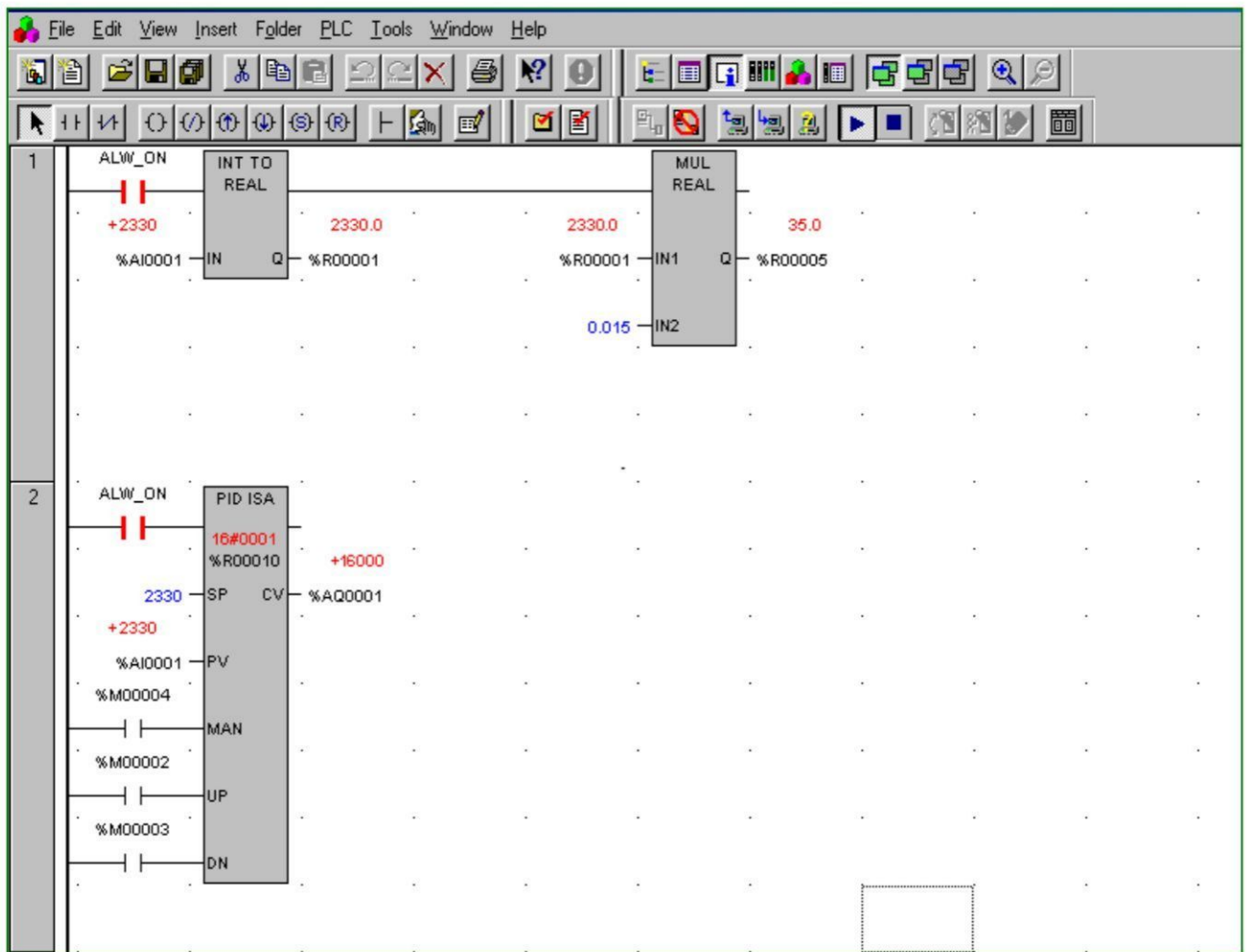
En la figura 74 se observa el set point (SP) se iguala a la variable del proceso (PV) y la válvula de control es fijada en su condición de operación que son 16000 cuentas; por lo tanto podemos decir que los valores de P, I, D obtenidos han sido hallados de manera experimental de acuerdo a las condiciones de operación ya mencionadas, a continuación muestro como queda finalmente el programa elaborado en el lenguaje ladder en el Controlador Lógico Programable (PLC).



**Fig.75 Programa Final**



Luego creamos los puntos de enlace que van a ser posible comunicar, que son las variables, temperatura de proceso (T ESCALAMIENTO) y apertura de válvula (VÁLVULA) para lo cual se muestran los puntos creados, que son puntos extraídos del programa elaborado en el PLC en tiempo real y se puede visualizar a través de las direcciones que hacen posible esta comunicación.



**Fig.77**





Luego de crear los puntos procedemos a la elaboración de un diagrama de proceso y una grafica donde nos muestra y representa la supervisión de las variables en tiempo real, esto se realiza a través del archivo screen utilizando la majestuosa librería de equipos y accesorios de ingeniería que tiene el software de supervisión CIMPLICITY.



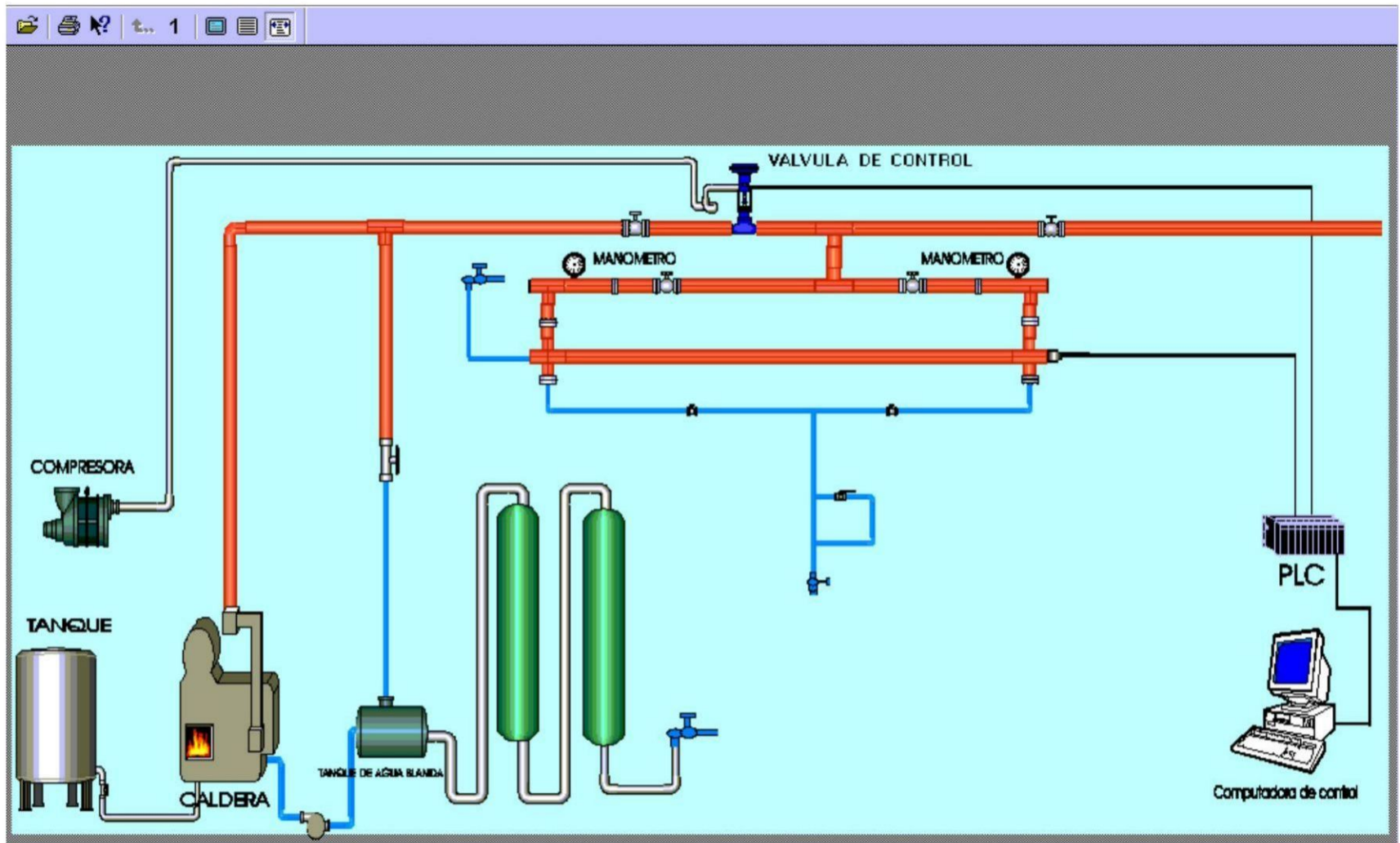


Fig.80 Diagrama del Proceso a Supervisar

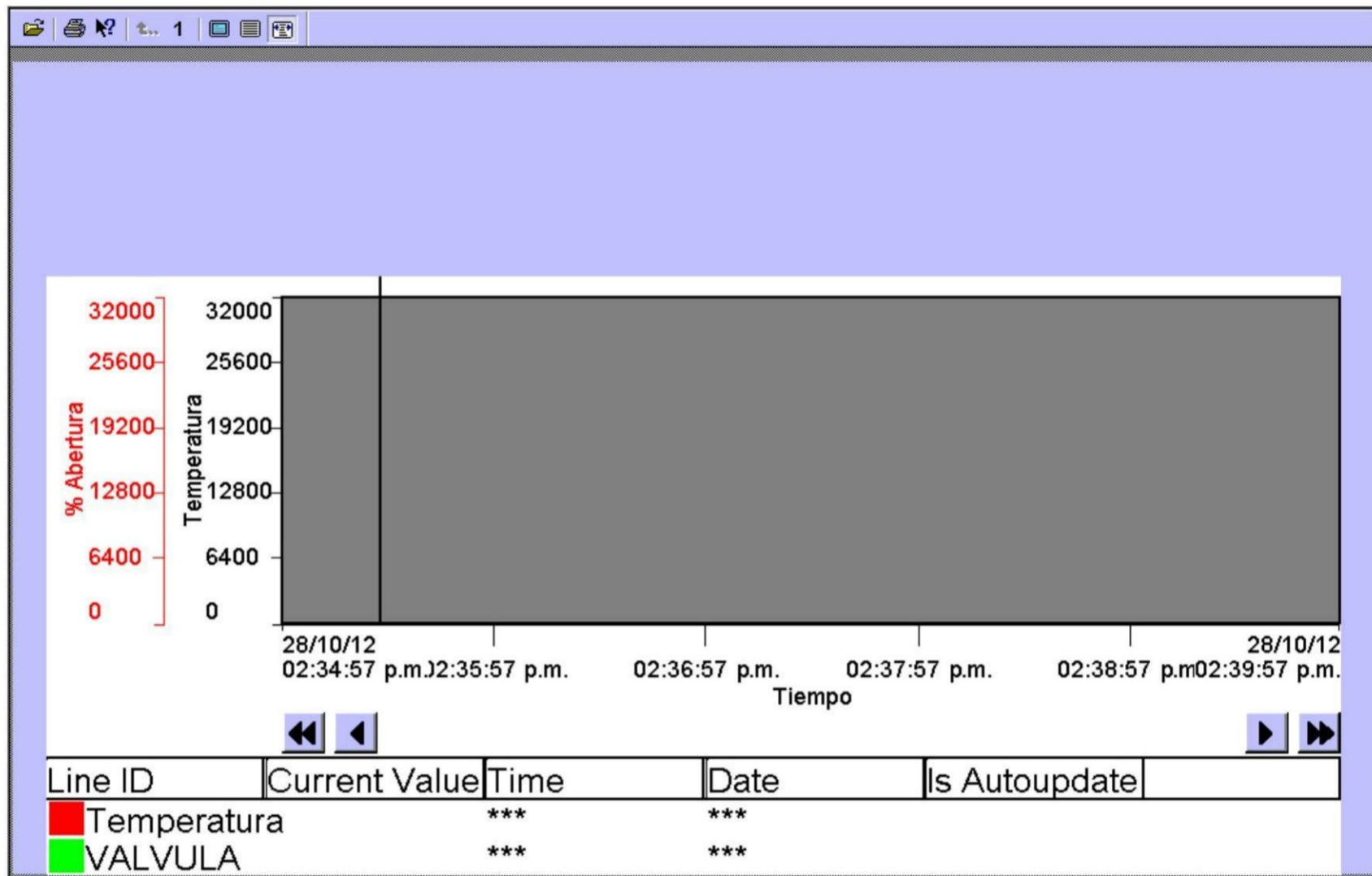


Fig.81 Grafica a Utilizar

Luego después de realizar el diagrama del proceso y la grafica configuramos los puntos creados anteriormente de tal manera que los valores que se van supervisar se observen en la grafica y en el diagrama del proceso.

Como podemos observar en la figura 82 se supervisan las dos variables del sistema de control que interactúan constantemente la abertura de la válvula de control y la temperatura del proceso, teniendo como valores 16000 cuentas y 35 °C respectivamente.

Finalmente en la figura 83 se muestra como la temperatura del proceso es fijada en su set point 35 °C y la válvula de control en 16000 cuentas donde se muestra su condición de estabilidad, ambas líneas de la grafica tanto la que corresponde a la válvula y la temperatura son constante.

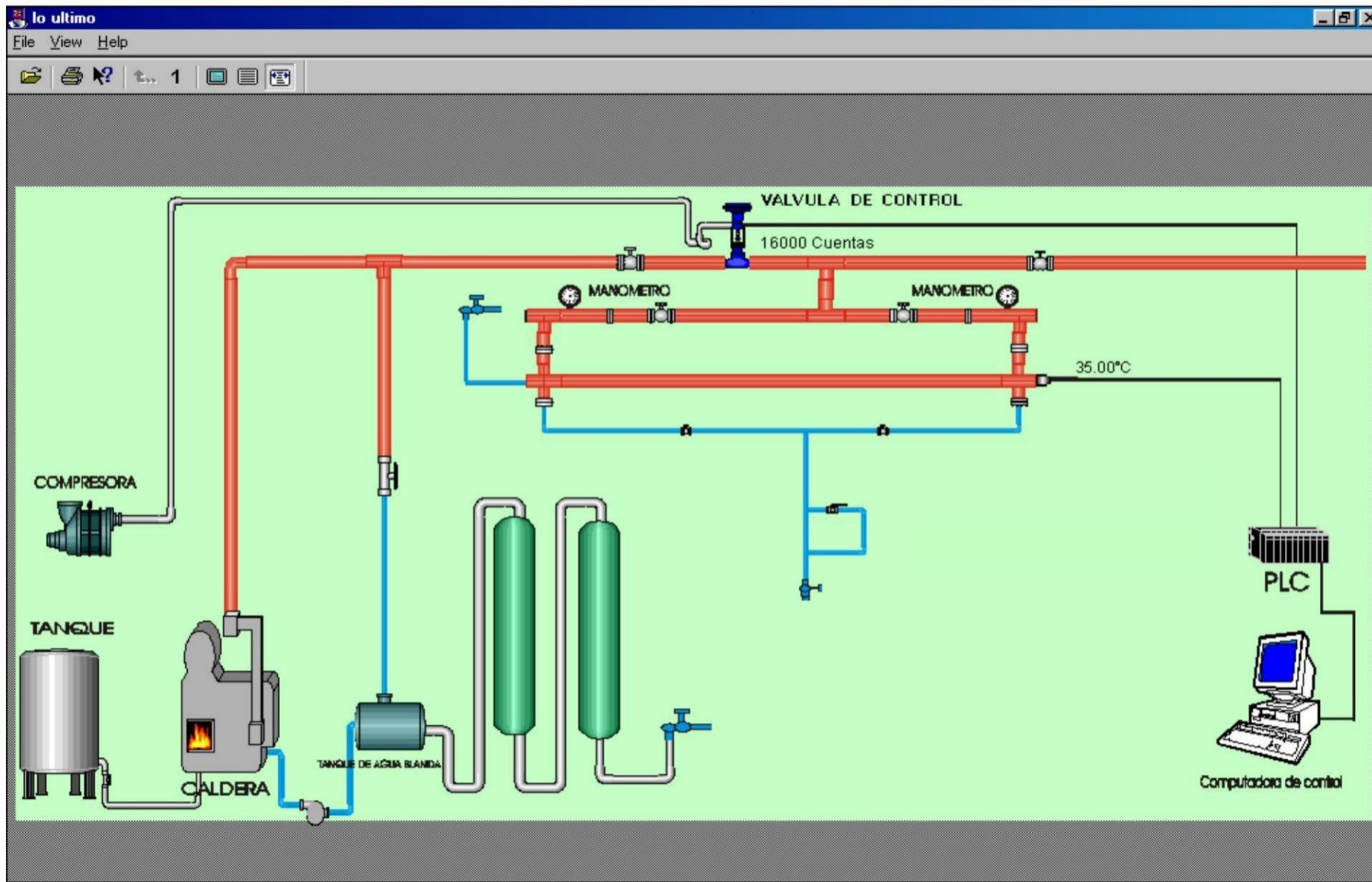


Fig.82

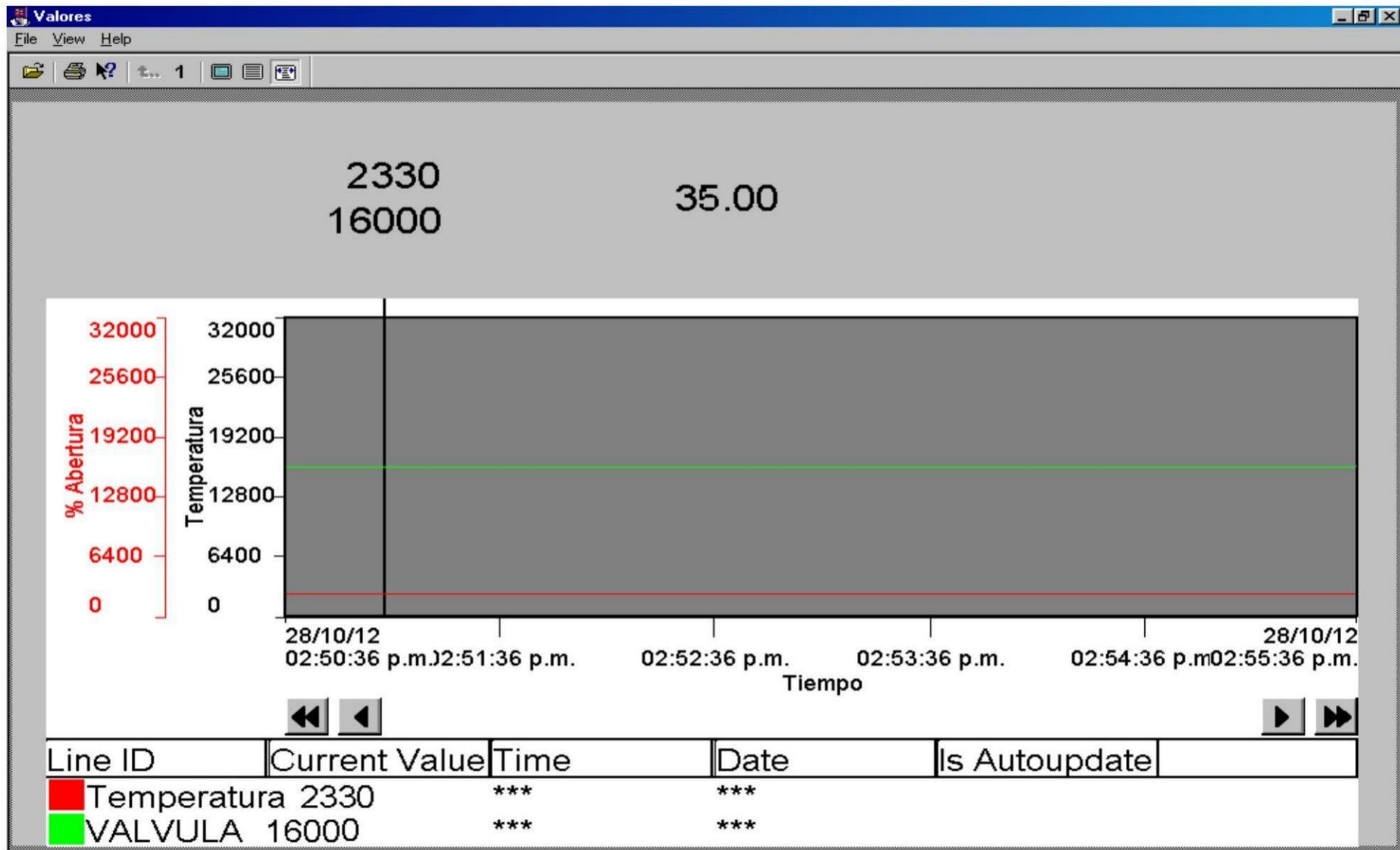


Fig.83





## VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis y la discusión de resultados se realizaron haciendo uso de las condiciones de operación medidas experimentalmente. Se usó el balance de energía del equipo (modelamiento) y posteriormente se halló la función de transferencia de todo el sistema de control.

Aquí se muestra la Función de Transferencia del Sistema de control que se utilizó en MATLAB:

$$\frac{T_p(s)}{T_R(s)} = \frac{K_d S^2 + K_C S + K_i}{18.2458 S^3 + (10.7582 + K_d) S^2 + (0.0566 + K_C) S + K_i}$$

Donde:

$K_C$  = Ganancia Proporcional      y       $K_C$  = P (Proporcional)

$K_i = K_C / \tau_i$        $\tau_i$  = I (Integral)

$K_d = K_C \tau_d$        $\tau_d$  = D (Derivativo)

A continuación se muestran los PID del sistema de control obtenidos a través del análisis con MATLAB y de forma experimental con el Controlador lógico Programable (PLC) a través de su programación en el lenguaje ladder utilizando el software VERSAPRO.

Tabla 8 :Cuadro de Comparación de los PID

SOFTWARE	MAT LAB			MAT LAB			VERSAPRO ( PLC)		
PARAMETROS	Kc	Ki	Kd	P	I	D	P	I	D
Primera Corrida	50	10	10	50	5	0.2	15	5	2.5
Segunda Corrida	10	2	4	10	5	0.4	10	5	0.5
Tercera Corrida	10	2	5	10	5	0.5	5	1.2	0.5

Observando los valores de PID de la primera corrida asignados en MAT LAB el parámetro P tiene el mayor valor debido a su importancia en la respuesta escalón unitario.

Los valores de PID (P= 10, I=5, D=0.5) de la tercera corrida con MAT LAB alcanzan el set point en 20 s un tiempo menor que el de la segunda corrida (25 s) a la vez el tiempo de asentamiento ha disminuido como se puede observar en las figuras .



### RESPUESTA CON LA SEGUNDA CORRIDA

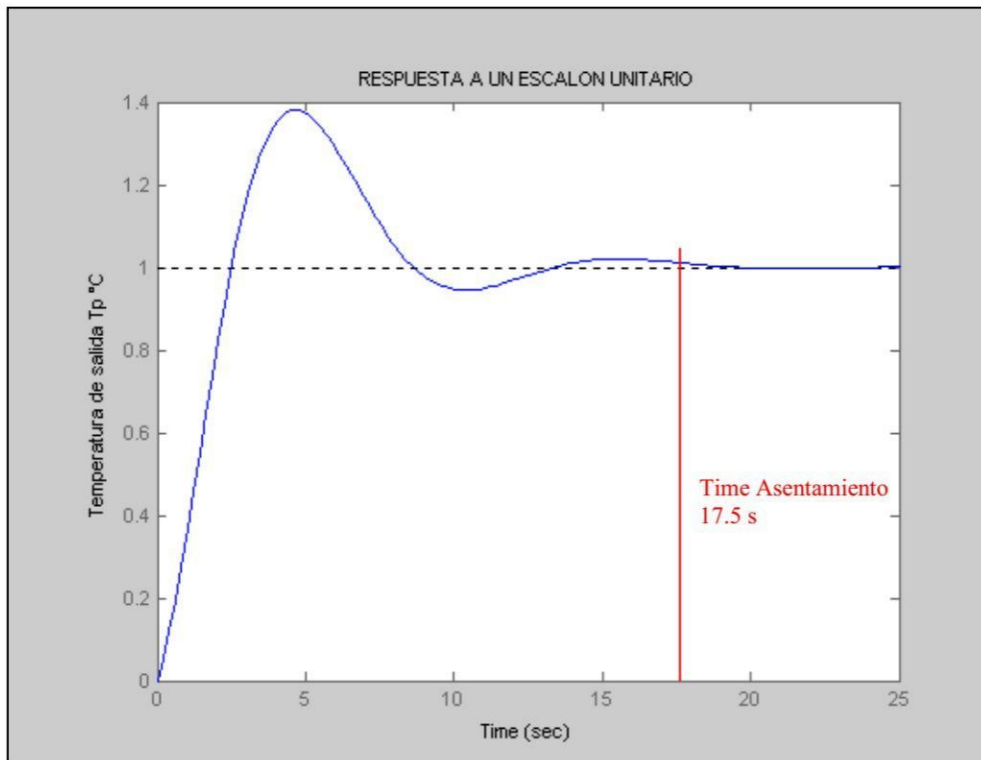


Fig.84

### RESPUESTA CON LA TERCERA CORRIDA

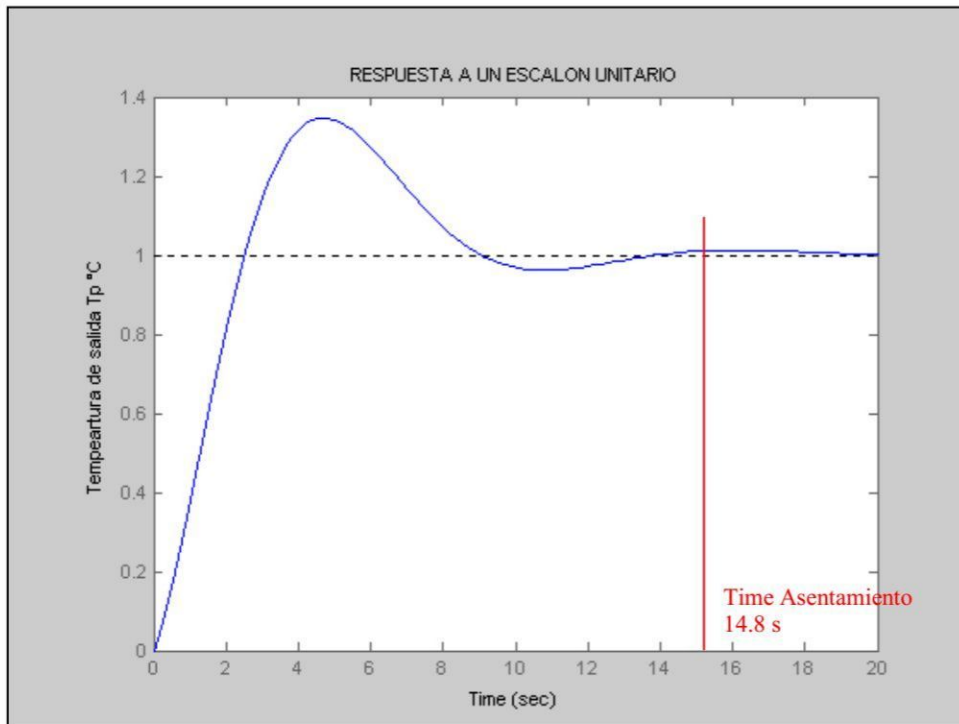


Fig.85

Para los valores de PID (P= 5, I=1.2, D=0.5) de la tercera corrida con el PLC se logra estabilizar el sistema de control ya que el set point se iguala con la variable del proceso y la válvula de control se mantiene en una posición fija sin oscilaciones quedando finalmente el programa en el controlador lógico programable como se muestra.

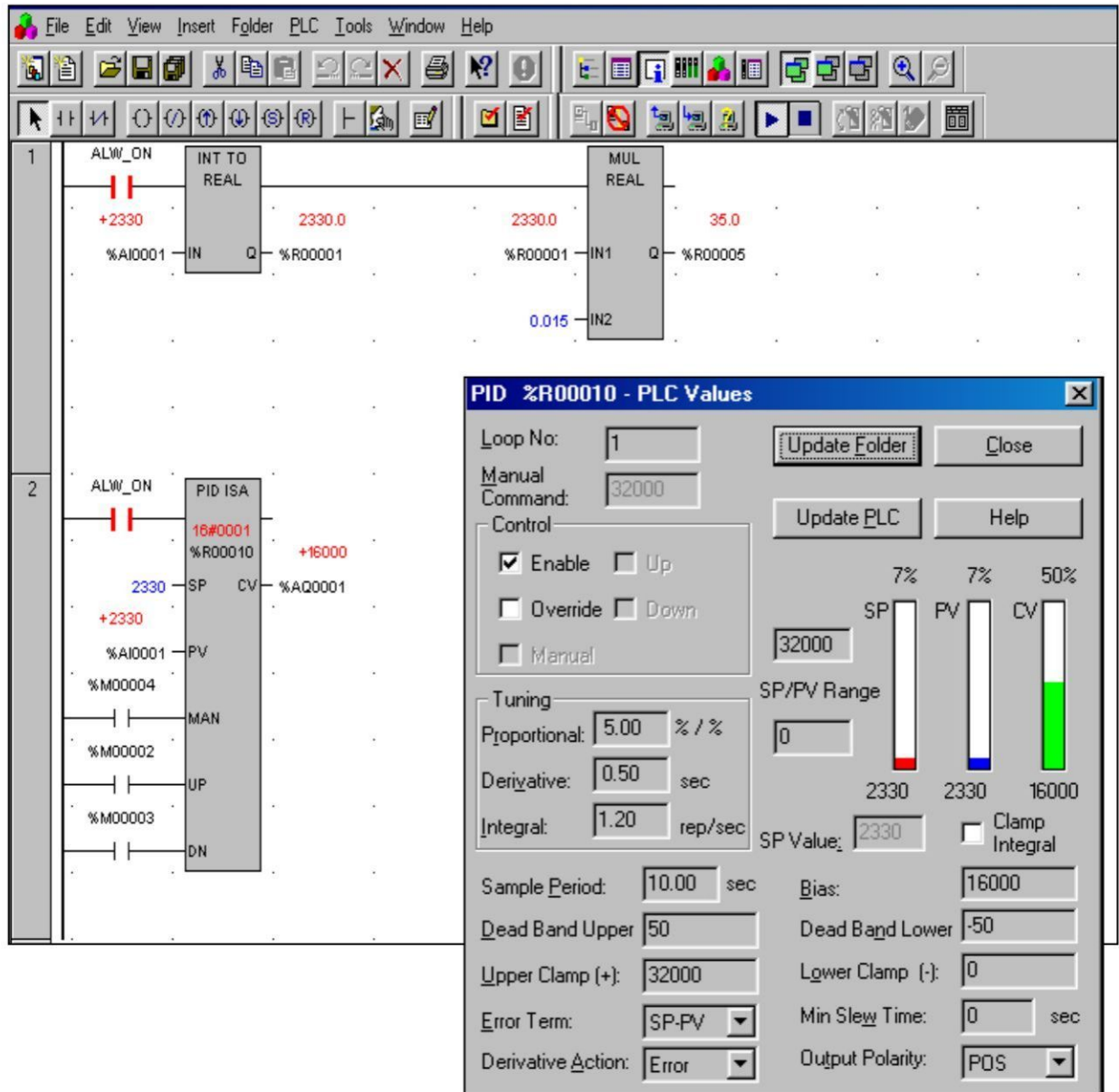


Fig.86 PROGRAMA FINAL EN EL VERSAPRO DEL SISTEMA DE CONTROL

## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

- Se llegó a Diseñar e implementar un Sistema de Control Automático en el Intercambiador de Calor del laboratorio de operaciones unitarias controlando, manipulando y supervisando la temperatura de salida del proceso y la abertura de la Válvula de Control.
- Se obtuvo la función de transferencia del proceso previo MODELAMIENTO y se halló la función de transferencia del sistema de control .
- Los parámetros PID para el sistema de control hallados a través del Software MAT LAB analizando la respuesta al escalón unitario finales son:  $P=10$ ,  $I=5$  y  $D=0.5$ .
- Los Parametros PID hallados experimentalmente usando el PLC a través de el software VERSAPRO en el lenguaje promacion ladder son:  $P= 5$ ,  $I=1.2$ ,  $D=0.5$  .

- La diferencia de los parametros PID obtenidos con los software MATLAB y VERSAPRO radica principalmente en la variables perturbadoras del proceso como la temperatura de entrada del agua, caudal de entrada del agua y el error que se origina al medir las condiciones de operación.
- Mediante el Software CIMPLICITY se obtuvo la adquisición de datos de las variables temperatura de salida del agua y abertura de válvula supervisando en tiempo Real el Sistema de Control automático del Intercambiador de Calor.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Tener el aire comprimido y limpio suficiente en el Compresor para dar funcionamiento a la Válvula de Control tipo LESLIE.
- Realizar la calibración y configuración de los instrumentos que intervienen en el sistema de control sensor (termocupla), transmisor (RTD), controlador lógico programable (PLC) y actuador (válvula de control).
- Mantener el flujo de vapor constante a la alimentación del intercambiador de calor ya que si no fuese así originaría una perturbación en el sistema de control.
- Tener cuidado en la manipulación del Controlador Lógico Programable (PLC) porque puede dañar la configuración programada y esto puede originar que las señales no se reciban del sensor y actuador respectivamente.
- Realizar la configuración adecuada y correcta del Software CIMPLICITY al momento de enlazarlo con el Controlador Lógico Programable(PLC).

- Al momento de realizar la supervisión mediante el software CIMPPLICITY cerrar la ventana principal del VERSAPRO pero manteniéndolo en modo run.
- Queda abierta la posibilidad de implementar otra estrategia de control en el Intercambiador de Calor que corrija las variables que perturban el Proceso y así contribuir con la ciencia y tecnología de la Ingeniería Química en el campo de la Automatización Industrial.

## IX . FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS

### CITA DE TEXTOS:

1. Acedo Sánchez José, CONTROL AVANZADO DE PROCESOS Editorial Díaz de Santos, S.A, Madrid 2003.
2. Bacells - Romeral AUTÓMATAS PROGRAMABLES Editorial Alfaomega .
3. Luyben, W. PROCESS MODELLING SIMULATION AND CONTROL FOR CHEMICAL ENGINEERING Editorial McGraw Hill, Singapore 1990.
4. Katsuhiko Ogata, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA Editorial Printice Hall, Cuarta edición 2003.
5. Katsuhiko Ogata, PROBLEMAS DE INGENIERÍA DE CONTROL UTILIZANDO MATLAB Editorial Printice Hall, Primera edición 1999.
6. Perry Robert H. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' Editorial McGraw Hill, Septima edición 1999.
7. Roca Alfredo; CONTROL DE PROCESOS Editorial Omega S.A, Segunda Edición 2002.
8. Smith Carlos A. ; Corripio Armando B., CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS Editorial LIMUSA,S.A, Primera edición 1991.
9. Turton, R. ANALYSIS, SYNTHESIS AND DESIGN OF CHEMICAL PROCESS Editorial Prentice Hall, Primera edición 1998.
10. Valverde, J. Gomes, J. SIMULACIÓN DEL CONTROL DEL PROCESOS EN UN REACTOR TANQUE AGITADO. Revista de Ingeniería Química – marzo 1997 ( Pagina 165-169). España.

## **CITAS CIBERNÉTICAS:**

1. <http://www.isa.cie.uva.es/~prada>
2. <http://www.es.searchdevice.com>
3. <http://www.jashaw.com/pid/index.htm>
4. <http://www.automatas.org>
5. <http://lorca.umh.es/isa/es/temas/plc/index.html>
6. <http://lorca.umh.es/isa/es/temas/plc/doc/docencia.html>
7. <http://digital.ni.com>
8. <http://eniac.rhon.itam.mx/~cacosta/auto.html>
9. <http://www.alfredorooca.com/>



## APÉNDICE

1. Figura N° 55 : Diagrama de Flujo del Proceso.
2. Figura N° 60 : Sistema de Control del Intercambiador de Calor.
3. Figura N° 62 : Diagrama de bloques del Sistema de Control.
4. Figura N° 69-a : Programación en MAT LAB.
5. Figura N° 69-b : Respuesta al Escalón Unitario
6. Figura N° 86 : Programa Final del Sistema de Control en el Versapro
7. Tabla N° 8 : Cuadro de Comparación de Los PID.

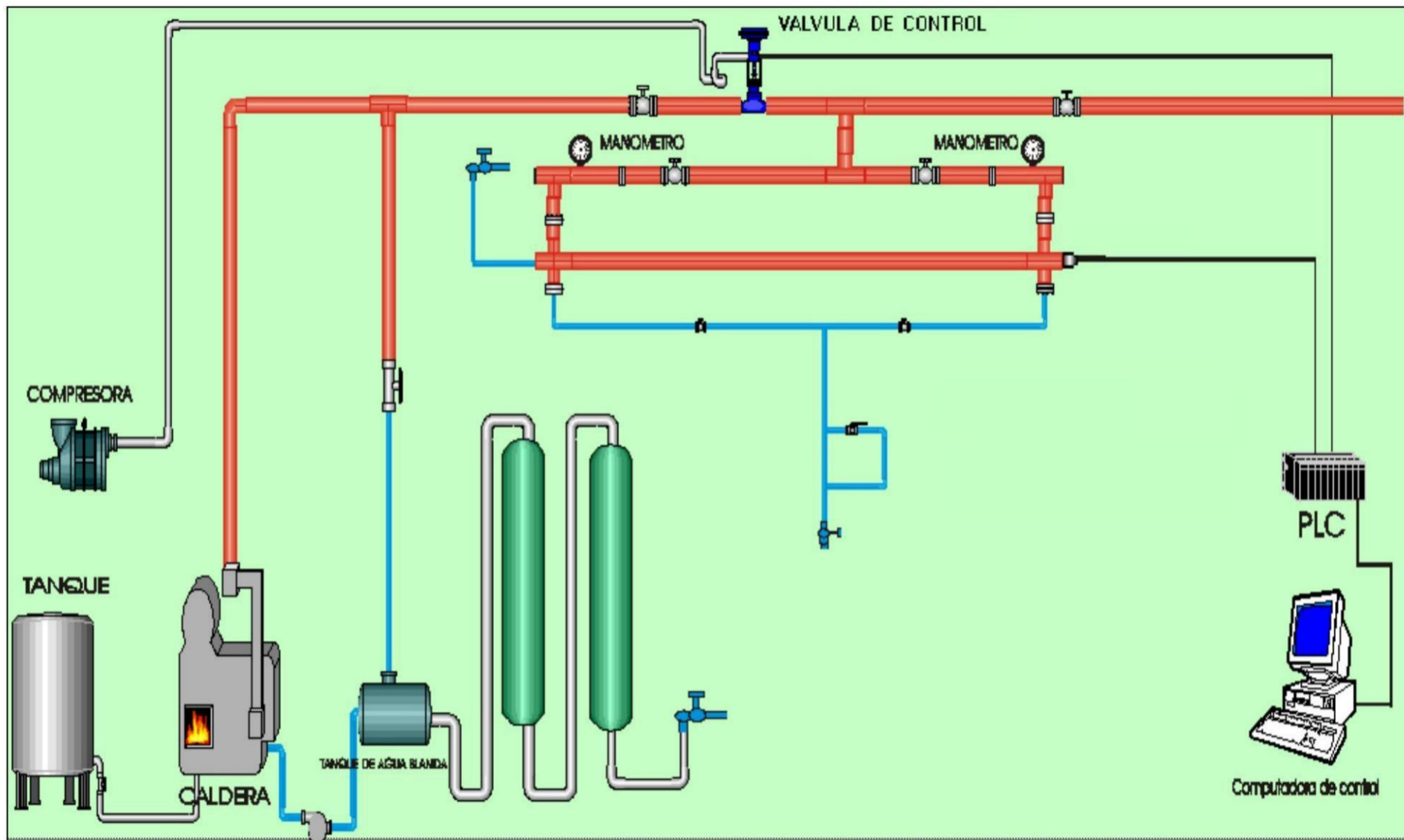


FIG. 55 Diagrama de Flujo del Proceso

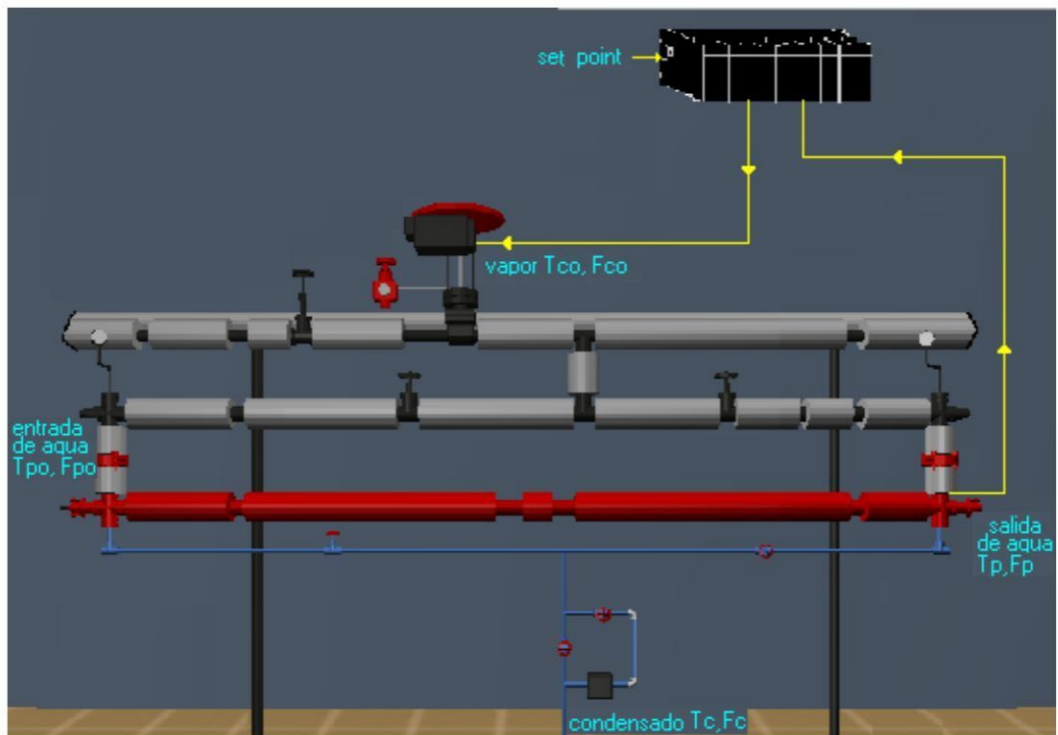


Fig. 60 Sistema de Control del Intercambiador de Calor

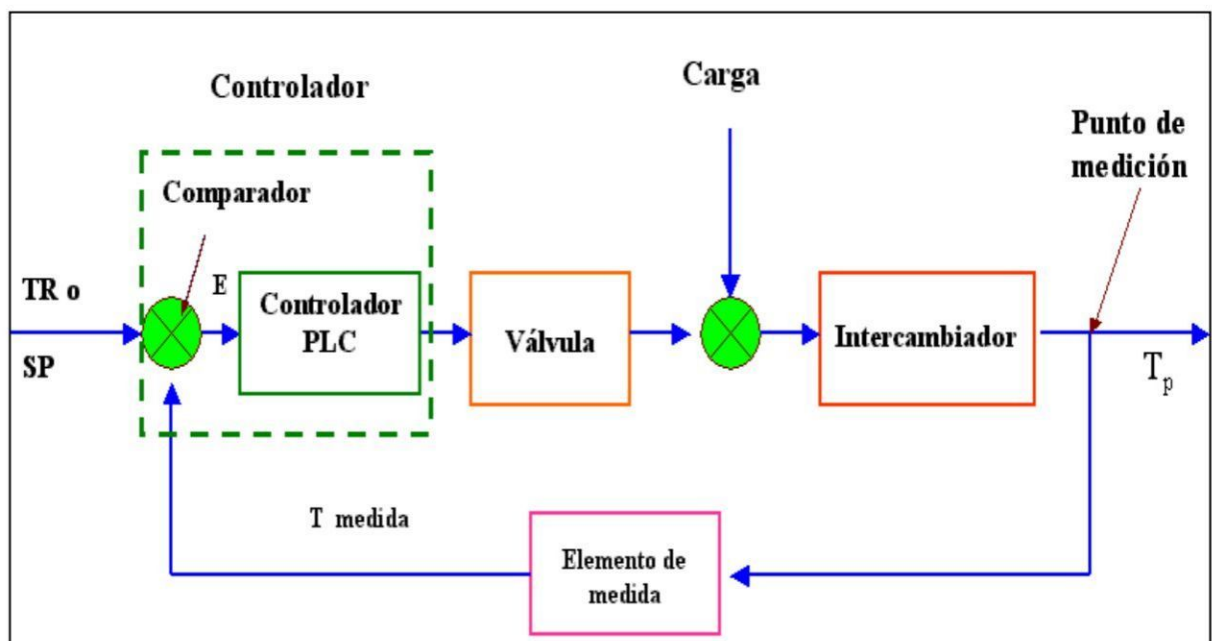
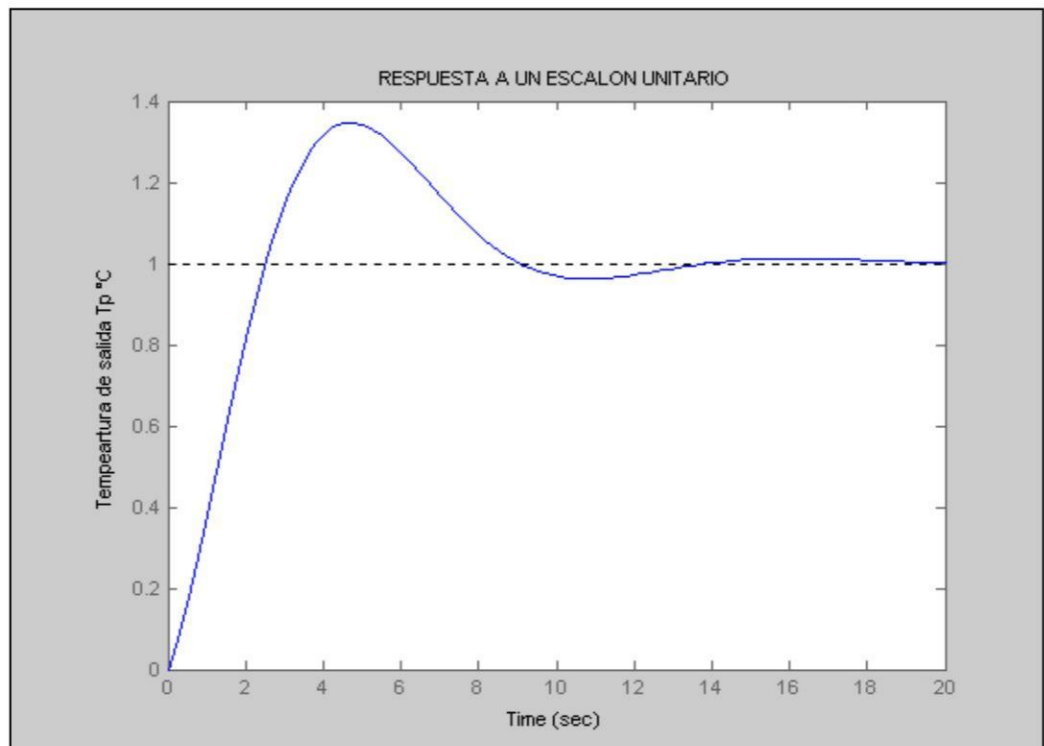


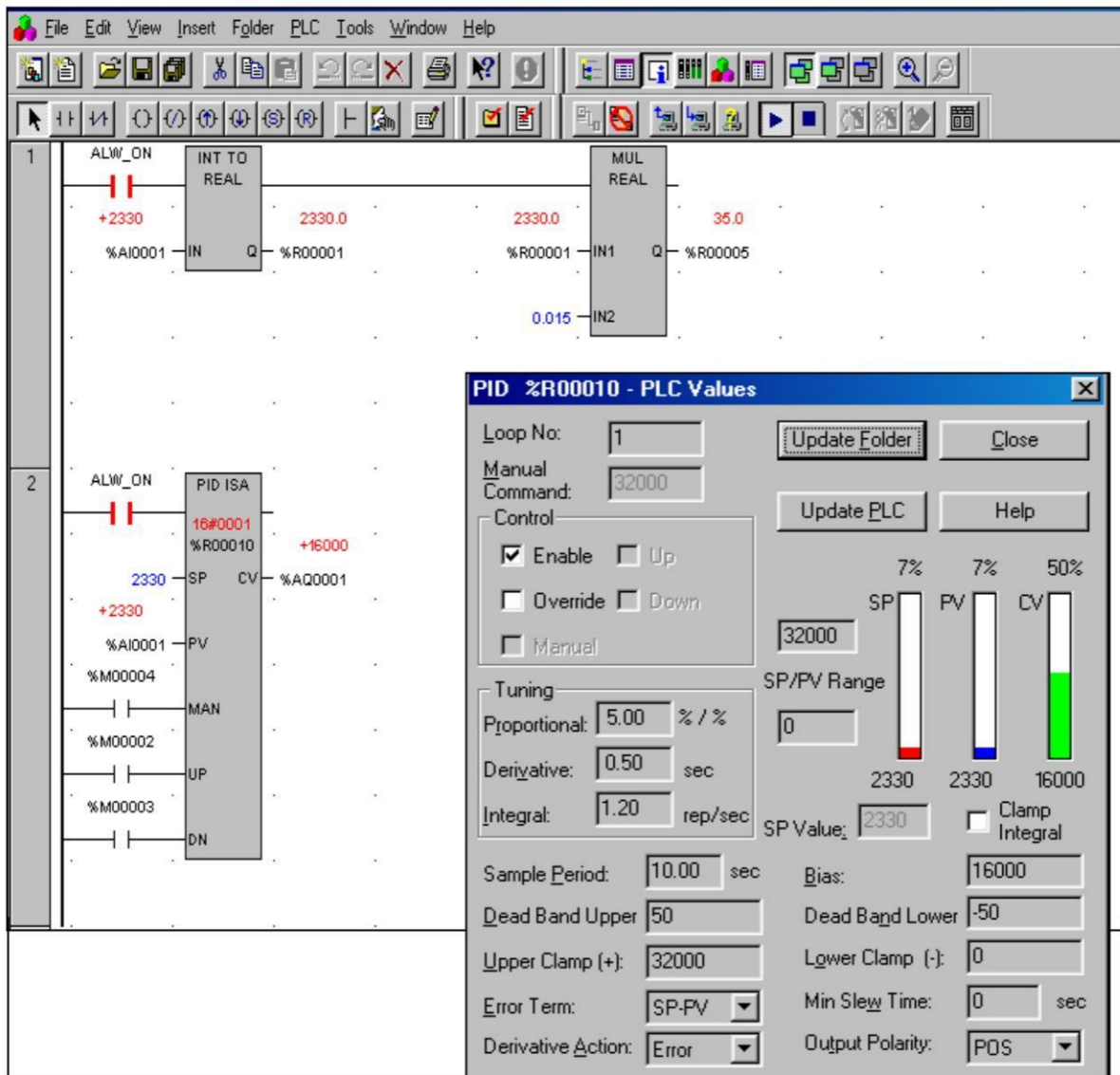
Fig. 62 Diagrama de Bloques del Sistema de Control

```
C:\MATLAB6p5\work\Untitled.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 - kp=10;
2 - kd= 5;
3 - ki=2;
4 - num=[kd kp ki] ;
5 - den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki] ;
6 - step(num,den)
7
```

**Fig.69-a Programacion en MAT LAB**



**Fig.69-b Respuesta al Escalón Unitario**



**Fig.86 Programa Final del Sistema de Control en el VERSAPRO**

**Tabla 8:Cuadro de Comparación de los PID**

SOFTWARE	MAT LAB			MAT LAB			VERSAPRO ( PLC)		
	Kc	Ki	Kd	P	I	D	P	I	D
Primera Corrida	50	10	10	50	5	0.2	15	5	2.5
Segunda Corrida	10	2	4	10	5	0.4	10	5	0.5
Tercera Corrida	10	2	5	10	5	0.5	5	1.2	0.5

## **ANEXOS**

- A.1** Cuando y en que aplicaciones usar una Termocupla J, Termocupla K ó Pt100.
- A.2** Selección del sistema de medición de temperatura correcto.
- A.3** PLC Consideraciones de Costo (TECSUP VIRTUAL).
- A.4** Programación y Corridas utilizando MAT LAB Versión 6.5.

**ANEXO 1**

## Nota técnica 1 :

### Cuando y en que aplicaciones usar una Termocupla J, Termocupla K ó Pt100 ?

***Por que usar uno de estos ?***

Las termocuplas J y K junto con los Pt100 són los sensores de temperatura de uso industrial más comunes, económicos y fáciles de reemplazar que existen.

***Que es una termocupla ?***

Una termocupla es simplemente dós alambres de distinto material unidos en un extremo. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivolts el cual aumenta proporcionalmente con la temperatura. Las termocuplas J y K són económicas, físicamente muy rígidas y cubren un amplio rango de temperaturas (-180 a 1370 °C).

***Que es un Pt100 ?***

Un Pt100 es un sensor de temperatura hecho con un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Un Pt100 es un tipo particular de RTD. (Dispositivo Termo Resistivo)

***Cuando no usar una termocupla?***

No es recomendable usar termocuplas cuando el sitio de medición y el instrumento están lejos ( más de 10 a 20 metros de distancia). El problema de las termocuplas es que suministran un voltaje muy bajo y susceptible a recibir interferencias eléctricas. Además para hacer la extensión se debe usar un cable compensado para el tipo específico de termocupla lo que aumenta el costo de la instalación.

Tampoco es recomendable usar termocuplas cuando es necesaria una lectura de temperatura muy precisa ( décima de °C ) pues la compensación de cero requerida por las termocuplas introduce un error típicamente del orden de 0.5 °C.



Otro problema que puede ocurrir con las termocuplas es que alguna contaminación ú oxidación en los metales de la unión podría provocar una lectura errónea ( hasta 4 ó 5 ° C ) sin que se detecte la falla. Luego en algunos casos es conveniente verificar periódicamente la precisión de la lectura.

***Cuando usar un Pt100 ?***

Por otra parte los Pt100 siendo lévemente más costosos y mecánicamente no tán rígidas como las termocuplas, las superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °).

Los Pt100 pueden fácilmente entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone graduálmente entregando lecturas erróneas, si no que normálmente se abre con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediátamente la falla del sensor y da aviso.

Además la Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros ) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión. (aún así deben tomarse ciertas precauciones en la instalación. Ver la nota técnica 4 )

***Usar Pt100 en :***

Medición de -100 a 200 °C con muy buena precisión y estabilidad  
Industria de alimentos en general ( envasado, pasteurizado, cocción, conservación, etc )  
Circuitos de líquidos. ( aguas de enfriamiento, aceites, etc)  
Industria química (temperatura de reactivos)  
Cámaras de secado (textiles, alimentos, papel, etc)

***Usar termocupla J :***

Mediciones de 0 a 700 °C  
Industria del plástico y goma (extrusión e inyección)  
Medición en tambores rotatorios con termocupla de contacto.  
Temperatura de motores ( carcaza ) con termocupla autoadhesiva.  
Procesos en general donde el sensor está sometido a vibración.

***Usar termocupla K :***

Fundición de metales hasta 1300°C (no ferrosos)  
Hornos en general  
Usar cuando hay que poner las termocuplas en vainas muy delgadas  
Por ejemplo en agujas de una jeringa para tomar temperatura en el interior de una fruta.

**ANEXO 2**

# Seleccionar el sistema de medición de temperatura correcto

## 1. ¿Medición con o sin contacto?

Se usan básicamente dos métodos importantes para medir la temperatura de los objetos. Las sondas de contacto sólo pueden utilizarse para

- Mediciones de penetración/inmersión o
- mediciones de temperatura ambiente.

Existen algunas aplicaciones en las que la medición por contacto es el método más aconsejables para medir temperaturas de superficie, mientras que existen otras aplicaciones en las que se ha demostrado que la medición de temperatura sin contacto es la más aconsejable. Un instrumento con la combinación de los dos métodos normalmente es lo ideal.

### Aplicaciones típicas de contacto

#### 1. Objetos con elevada capacidad de calor

- Metales
- Grandes masas metálicas

#### 2. Objetos con superficies lisas

- Láminas pulidas de acero
- Tuberías pulidas de calefacción

## 2. Seleccionar la sonda correcta

El trabajo de medición determina el tipo de sonda. Según los siguientes criterios se debe seleccionar el sensor de temperatura más idóneo:

- Rango
- Exactitud
- Diseño
- Tiempo de respuesta
- Resistencia

Testo dispone de una variedad de elementos sensores y termómetros para suministrar las sondas necesarias para sus aplicaciones:

- Sensor termopar
- Termoresistencias (PT 100)
- Termistores (NTC)

### Termopares

La medición de temperatura utilizando termopares se basa en el efecto termoeléctrico. Los termopares consisten en dos hilos soldados. Los hilos son de distintos metales o aleaciones. Las normas DIN IEC 584 definen los valores básicos de voltaje termoeléctrico y tolerancias máximas de los termopares. El termopar más frecuente es NiCr-Ni (denominado tipo K).

### Termoresistencias (Pt100)

Cuando se mide temperatura utilizando una resistencia sensible, se varía a una "resistencia" de platino. La resistencia de medición se suministra con una corriente constante y una caída de voltaje, que varían con el valor de resistencia via la temperatura que es lo que se mide. Valores y tolerancias básicas para termómetros de resistencia se definen en DIN IEC 751.

### Termistores (NTC)

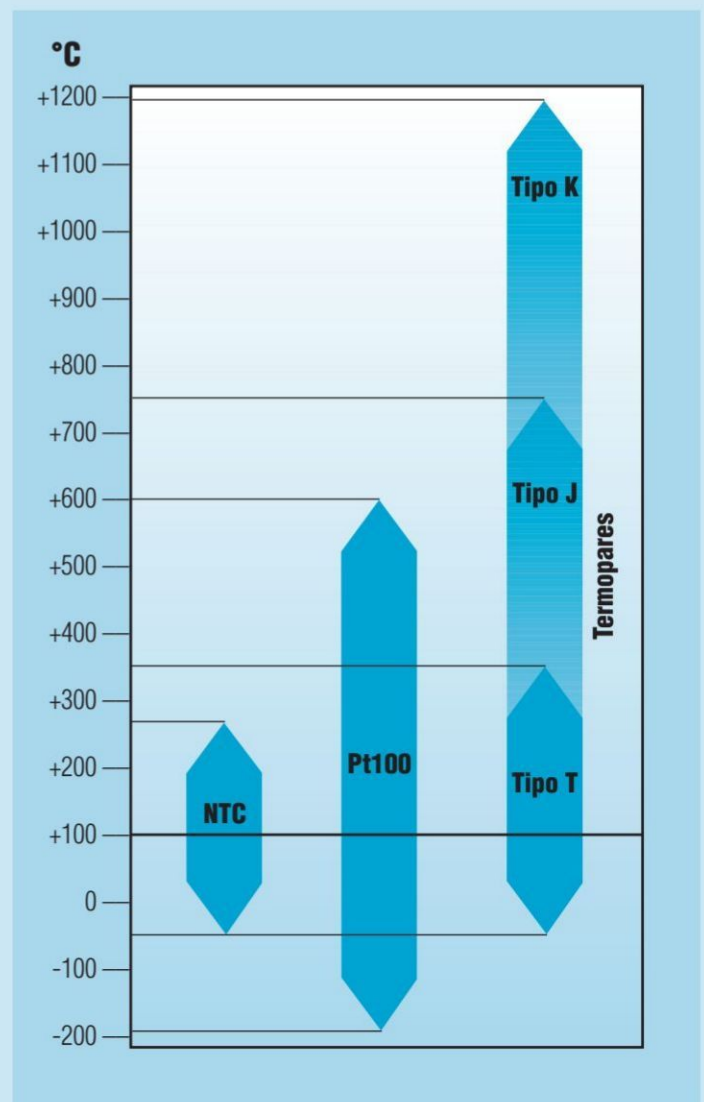
La medición de temperatura con termistores también se basa en una variación sensible de la temperatura en la resistencia del elemento sensor. Los termómetros de resistencia, termistores, tienen un coeficiente de temperatura negativo (la resistencia disminuye al aumentar la temperatura). Las propiedades y tolerancias no están estandarizadas.

### Norma:

Los termopares son rápidos y tienen un amplio rango de medición. Las termoresistencias y NTC son más lentas pero más precisas. A más amplio rango de medición mayor universalidad de las aplicaciones.

### Rango de medición

Primero eliminar el tipo de sonda que no se adecua a su rango de medición. El diagrama inferior muestra el rango de aplicaciones de los diferentes sensores de temperatura.



# Medición con contacto

## Exactitud

Seleccionar en el diagrama o tabla el sensor con la exactitud que necesita para su aplicación.

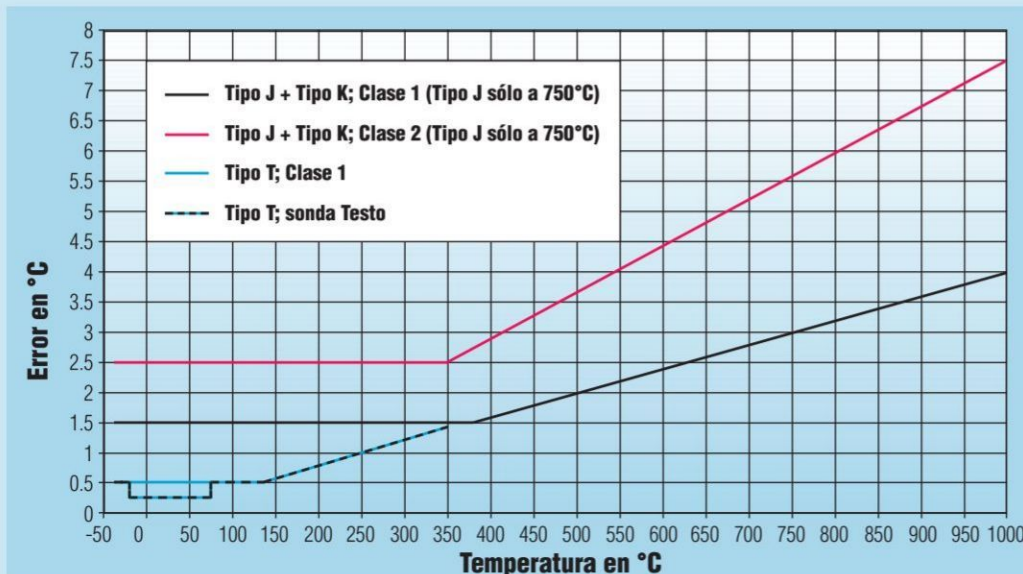
Especificaciones de exactitud				
Sensor	Rango de temperatura	Clase	Tolerancias máximas	
			Valor fijo	Referido a temperatura
<b>Termopar</b> Tipo K (NiCr-Ni)	-40 a +1200 °C	2	±2.5 °C	±0.0075 x  t
	-40 a +1000 °C	1	±1.5 °C	±0.004 x  t
Tipo T	-40 a +350 °C	1	±0.5 °C	±0.001 x  t
Tipo J	-40 a +750 °C	1	±1.5 °C	±0.004 x  t
<b>Pt100</b>	-100 a +200 °C	B	± (0.3 + 0.005 •  t )	
	-200 a +600 °C	A	± (0.15 + 0.002 •  t )	
<b>NTC</b> (Estándar)	-50 a -25.1 °C	-	±0.4 °C	
	-25 a +74.9 °C		±0.2 °C	
	+75 a +150 °C		±0.5 % del valor medido	
<b>NTC</b> (Temperatura alta)	-30 a -20.1 °C	-	±1 °C	
	-20 a 0 °C		±0.6 °C	
	+0.1 a +75 °C	- °C	±0.5 °C	
	+75.1 a +275 °C		±0.5 °C ±0.5 % del valor medido	

t = temperatura medida

Datos para termopares según EN 60584-1 (antes IEC 584-1). Se dan dos valores. Un valor fijo en °C y una fórmula.

Siempre se aplica el valor mayor. Datos para Pt100 según EN 60751 (antes DIN IEC 751).

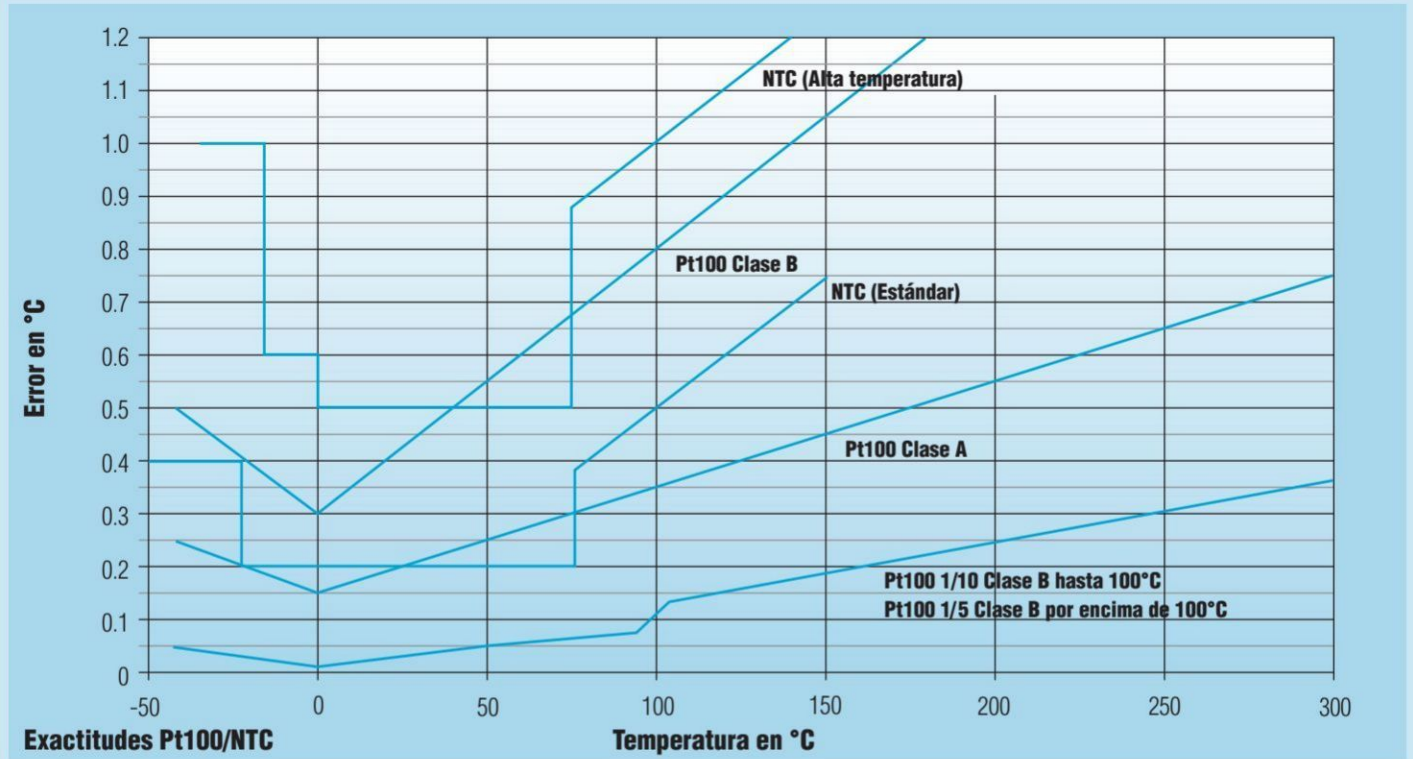
No hay estandarización para sensores NTC.



## Elevada exactitud también con termopares

Testo utiliza material seleccionado especialmente para termopares tipo T en el rango de -20 a 70 °C, para conseguir un elevado nivel de exactitud del ± 0.2 °C en este rango.





## La precisión más alta

testo 950 tiene un funcionamiento de máxima precisión con menú guiado sin complicaciones. Además de sondas termopar, fiables y de rápida acción, también

pueden conectarse sondas Pt100, correspondiente a EN 60751 (antes IEC 751), o sondas seleccionadas de elevada precisión Pt100 de exactitud 1/10 DIN.

Cuando se comparan sondas de precisión "estándar" con sensores Pt100 muy precisos, estos sensores de precisión son diez veces más precisos.

Cuando nos referimos a Clase B que tiene un error de  $\pm 0.3 + 0.005 \times |Temperatura|$ , se reduce a un error de sólo  $\pm 0.03 + 0.005 \times |Temperatura|$ .

## 3. ¿Qué sensor se necesita en que instrumento?

Ahora Vd. puede seleccionar los instrumentos que puede utilizar en su aplicación escogiendo el tipo o tipos de sensores idóneos

basándose en el rango de medición y precisión. Algunos de los instrumentos Testo tienen otras funciones, además de visualizar

las lecturas, que le ayudan a solucionar su tarea de medición. En las páginas de productos seleccione las funciones que

son importantes para Vd. y el correspondiente instrumento.

Resumen de todos los termómetros TESTO	Instrumentos de control															Data loggers		Instrumento de referencia
	Mini termómetro	Termómetro alarma	testo 905-T1/T2	testo 105	testo 106	testo 110	testo 720	testo 915	testo 922	testo 925	testo 935	testo 945	testo 926	testo 946	testo 171	testo 175	testo 950	
Termopar - Tipo K			x					x	x	x	x	x		x	x		x	
Termopar - Tipo T												x	x	x	x		x	
Termopar - Tipo J																	x	
Pt 100 /1/10 DIN																	x	
Pt 100							x					x		x			x	
Termistor (NTC)	x	x		x	x	x						x		x	x	x	x	
*Sonda integrada	x	x	x	x	x			x										
Medición elevada exactitud							x	x				x		x	x		x	

\* Los instrumentos con sondas integradas tienen las exactitudes de los instrumentos.

## 4. Cómo encontrar las sondas adecuadas para los instrumentos:

### Tiempo de respuesta:

**tiempo t<sub>99</sub> = Tiempo necesario para que la sonda muestre el 99% del cambio en temperatura**

**t<sub>99</sub> = 4.6 x t<sub>63</sub> - Tiempo**

**t<sub>99</sub> = 2 x t<sub>90</sub> - Tiempo**

### Sonda de inmersión/penetración:



#### Sonda de inmersión

(NiCr-Ni, Pt100, NTC) para mediciones en líquidos pero también para medir en sustancias en polvo o en aire.



#### Sonda de penetración

(NiCr-Ni, Pt100, NTC) para medir en plástico o medio pastoso.

- Las sondas termopar pueden fabricarse con un diámetro muy pequeño (0.25mm) y por tanto son ideales para mediciones rápidas y en objetos pequeños.
- Sólo sensores de resistencia con un diámetro de 2 mm pueden fabricarse a un bajo coste. Son normalmente más precisos que las sondas termopar.

### Resistencia

La funda del termopar en las sondas de inmersión es de Inconel (2.4816). En el resto de diseños se utiliza acero inoxidable V4A (1.4571). La resistencia frente a medios corrosivos es normalmente suficiente debido al elevado estándar del material utilizado. Testo tiene sondas recubiertas de vidrio para su uso en medios muy corrosivos.

### Información adicional

- El tiempo de respuesta especificado de t<sub>99</sub> está medido en líquido en movimiento (agua) a 60 °C.
- Normalmente, cuanto más fina es la sonda más rápida es, y tiene que sumergirse menos en el objeto a medir.
- Para determinar la temperatura real, la sonda tiene que penetrar como mínimo 10 veces el diámetro de la misma en el objeto a medir (es mejor 15 veces el diámetro).
- No obstante, cuanto más delgada es una sonda, más cuidado se debe tener con ella.

### Sonda ambiente



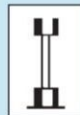
(NiCr-Ni, Pt100, NTC)

Para facilitar una medición rápida, el sensor está normalmente al descubierto.

- El tiempo de respuesta especificado de t<sub>99</sub> se mide en un túnel de viento a 2 m/s y 60 °C.
- Las sondas de inmersión/penetración pueden utilizarse para mediciones ambiente. El tiempo de respuesta es de 40 a 60 veces superior al valor especificado medido en agua.

### Sonda de superficie

Diseño en NiCr-Ni, Cu-CuNi; PT100; sondas NTC. Con punta de medición amplia para medir en superficies lisas. Para una óptima transmisión de calor recomendamos pasta de silicona (T<sub>max</sub> 260°C).



#### Ventajas:

- Diseño resistente
- Sensor de elevada exactitud

#### Inconvenientes:

- Tiempo de respuesta lento
- Precisa un manejo preciso

Sólo es adecuada para superficies lisas y objetos con una capacidad de calor elevada ej. objetos grandes de metal.

### Recomendación de testo

Diseño de sondas Ni Cr-Ni



Para mediciones rápidas y en superficies rugosas recomendamos el termopar cruzado

patentado de resorte. El termopar determina en segundos la temperatura actual del objeto a medir:

- De fácil manejo (sin pasta de silicona)
- Resultados rápidos

### Información adicional

- Los tiempos de respuesta dados de t<sub>99</sub> se miden en láminas pulidas de acero a 60 °C.
- Las exactitudes especificadas son las exactitudes del sensor
- La exactitud en su aplicación depende de la condición de la superficie (rugosidad), material del objeto a medir (capacidad de calor así como transmisión de calor) así como la exactitud del sensor. Si quiere conocer las desviaciones de su instrumento de medición, Vd. puede tener un certificado de calibración emitido por Testo. Para esta finalidad Testo ha desarrollado, junto con el German Federal Physical and Technical Institute (Physikalisch Technische Bundesanstalt), un sistema para ensayos de superficie.

Por tanto Testo es uno de los primeros fabricantes capaz de emitir certificaciones DKD e ISO para sus aplicaciones (ver página 270 para solicitar el certificado deseado).

## **ANEXO 3**

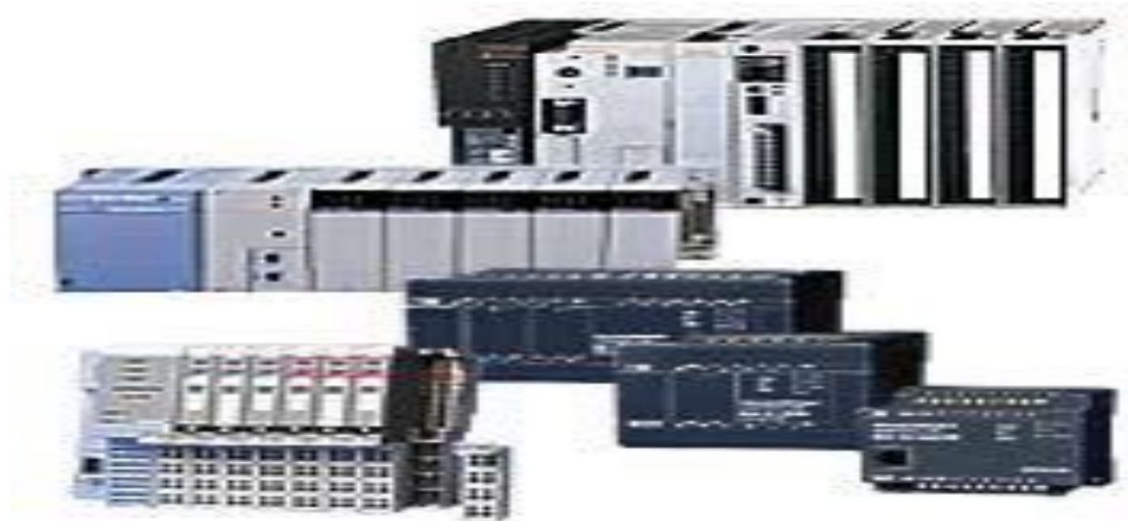


## **PLC Consideraciones de Costo**

El costo de cualquier PLC en lo referente a la instalación debe ser dividido en tres partes principales:

- Costo del PLC mismo.
- Costo de la escritura y documentación del software.
- Gastos de la instalación, cableado y componentes adicionales como fuentes de energía externa

Una buena selección del PLC es vital. Se tiene que encontrar siempre un equilibrio entre los costos y las exigencias técnicas para nuestra instalación.



Los principales factores a tener en cuenta para seleccionar un PLC son :

- Fuente de alimentación.
- C.P.U.
- Entradas y salidas discretas.
- Entradas y salidas analógicas.
- Módulos inteligentes.



- Lenguajes de programación.
- Sistemas de configuración.

Veamos a continuación cuales son los datos técnicos más relevantes de cada uno de estos principales factores.



### **Fuente de Alimentación:**

Cuando se estima la potencia de la fuente, se debe considerar los consumos de las siguientes cargas:

- CPU.
- Módulos E/S (discreta/análoga).
- Módulos inteligentes.
- Ampliaciones futuras.
- Otros.

Para la fuente de alimentación es necesario tener presente los siguientes datos técnicos:

- Tipo de corriente: AC / DC
- Nivel de tensión:
  - Valor nominal :  $V_n$
  - Margen admisible
- Potencia admisible.
- Expresado en (W).
- Frecuencia de la red
  - Valor nominal :  $50/60 \text{ Hz} \pm 5\%$ .
- Capacidad de corriente
  - De entrada a (...V): (A)
  - De salida (usuario) a (...V): (A).
- Condiciones ambientales
  - Temperatura : ( °C )
  - % Humedad ,sin condensación.
- Indice de protección:
  - (IP...



### **Unidad Central de Procesamiento C.P.U :**

Del mismo modo, cuando se selecciona la CPU, debemos tener presente que debe satisfacer los requerimientos del sistema actual y futuro.



- Capacidad de memoria Total: (Kb)  
Interna RAM: Kb o instrucciones.  
Módulos de memorias: EPROM, EEPROM.
- Tiempo de ejecución (SCAN TIME)  
De cada operación binaria: (us)  
De cada operación tipo palabra: (us)  
De una operación mixta: 35% binarias + 65% palabras (us).
- En cada caso éstos varían según el fabricante.
- Tiempo de vigilancia de ciclo:  
Perro guardián (ms).
- Cantidad de E/S discretas.
- Cantidad de E/S análogas.
- Cantidad de memorias internas.
- Cantidad de Temporizadores.
- Cantidad de contadores.
- Reloj-Calendario.
- Algoritmo de Regulación PID.
- Canales de Comunicación



### **Entrada Discreta :**

Cuando deseamos seleccionar los módulos de entrada, es conveniente tener presente:

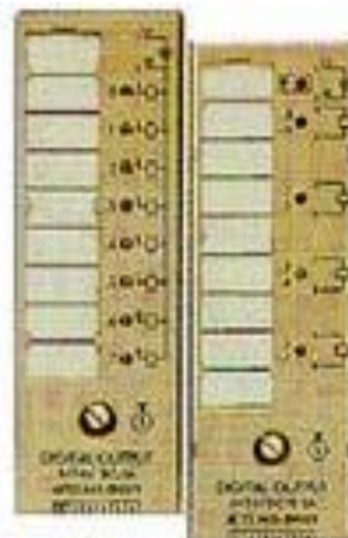
- Cantidad de entradas discretas.
- Tipo de corriente AC / DC.
- Nivel de tensión nominal (V).
- Temperatura ambiente admisible. ( °C )
- Es recomendable usar entradas discretas en DC por razones de seguridad y económicas en lugar de entradas en AC.



### Salida Discreta :

Del mismo modo para las salidas discretas:

- Cantidad de salidas discretas.
- Tipo de corriente AC/DC. Tipo : transistor, relé o Triac.
- Nivel de tensión. Valores más usuales :
  - + 24 VDC, 110/115 VAC, 220/230 VAC.
  - + Capacidad admisible de corriente: mA, A
  - + Potencia : W /DC, VA /AC
  - + Condiciones ambientales de temperatura °C.



### Entradas / Salidas Analógicas :

- Cantidad de entradas/salidas analógicas.
- Tipo de señal en corriente: 0-20mA, 4-20mA, etc.
- En tensión: 0-2 V, 0-5 V, 0-10 V,  $\pm 10V$ , etc
- Resistencia de entrada análogas. Mohmio.
- Resistencia de carga en salidas análogas.
- Resolución: 8, 12, 16 bits Corriente/tensión máxima admisible, en entradas análogas, mA/ V.



## **ANEXO 4**



# PROGRAMACIÓN Y CORRIDAS UTILIZANDO MATLAB VERSIÓN 6.5

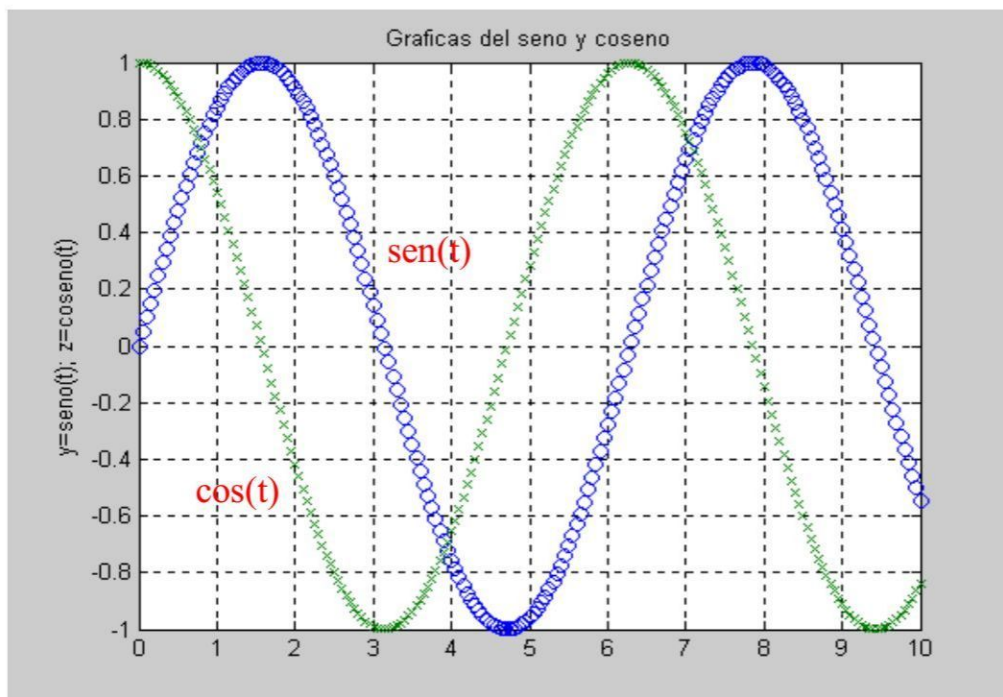
## Representación Grafica de Curvas

MAT LAB tiene una gama de funciones y rutinas para obtener salidas graficas. La orden plot crea dibujos lineales x e y. Si ambos son vectores de la misma longitud. A continuación tenemos un ejemplo:

En la pantalla principal introducimos el siguiente programa:

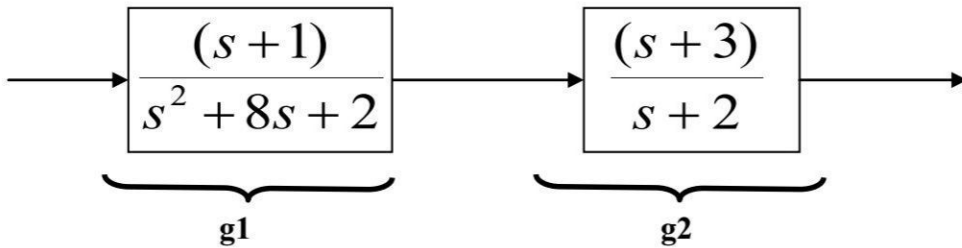
```
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work
>> t=0:0.05:10;
y=sin(t);
z=cos(t);
plot(t,y,'o',t,z,'x')
grid
title('Graficas del seno y coseno')
ylabel('y=seno(t); z=coseno(t)')
>> |
```

Luego digitamos enter y tendremos el resultado del programa que muestro a continuación:



## Funciones de Transferencia

Empecemos manejando los comandos más comunes para calcular funciones de transferencia (FT). Supongamos que tenemos dos bloques cuyas funciones de transferencia son:



Definamos primero cada bloque para esto se ingresan los coeficientes de los polinomios del numerador y del denominador en forma descendente e incluimos el comando `tf` para la función de transferencia.

Para  $g_1$ :

```
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> numg1=[1 1 ]
deng1=[1 8 2]
sys1=tf(numg1,deng1)

numg1 =
     1     1

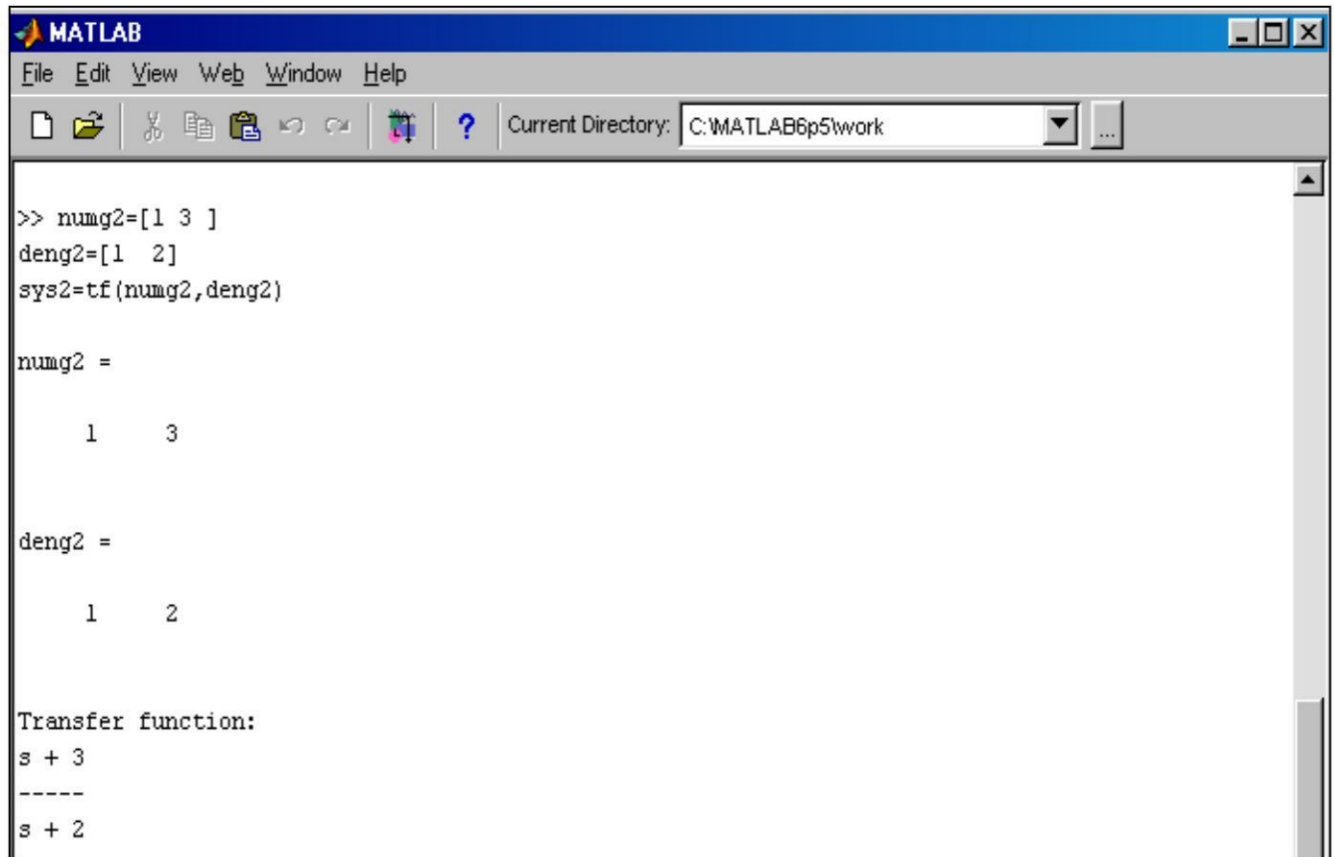
deng1 =
     1     8     2

Transfer function:
   s + 1
-----
s^2 + 8 s + 2

>>
```



Similarmente con g2:



```
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

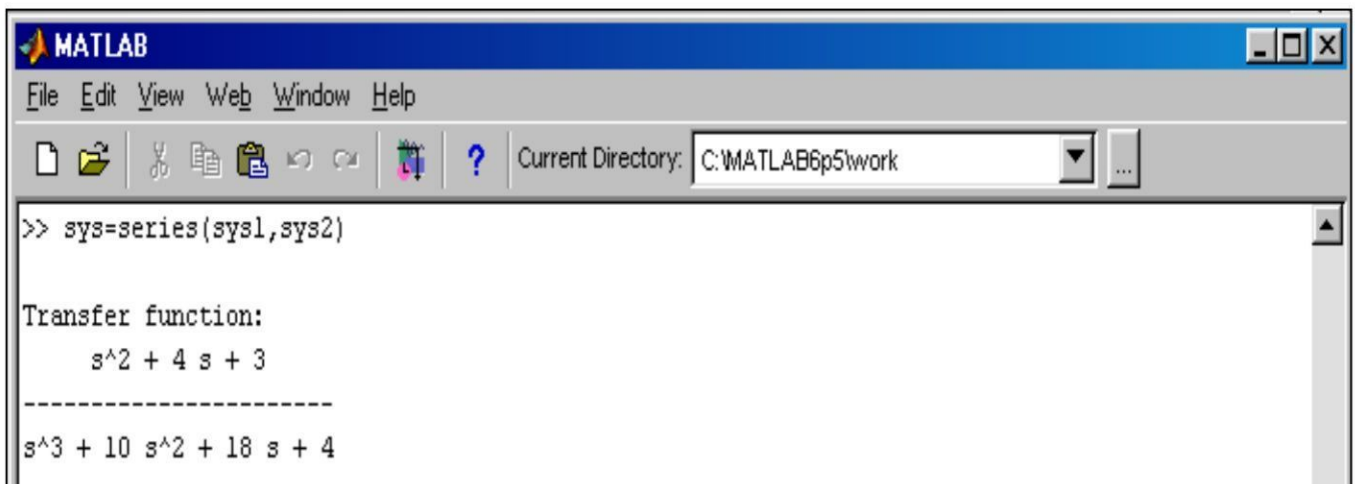
>> numg2=[1 3 ]
deng2=[1 2]
sys2=tf(numg2,deng2)

numg2 =
     1     3

deng2 =
     1     2

Transfer function:
  s + 3
  ----
  s + 2
```

Finalmente para calcular la Función de transferencia resultante de estos dos bloques en serie podemos realizarlo multiplicando directamente estos dos bloques usando el comando **series**; la multiplicación resultante será :



```
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> sys=series(sys1,sys2)

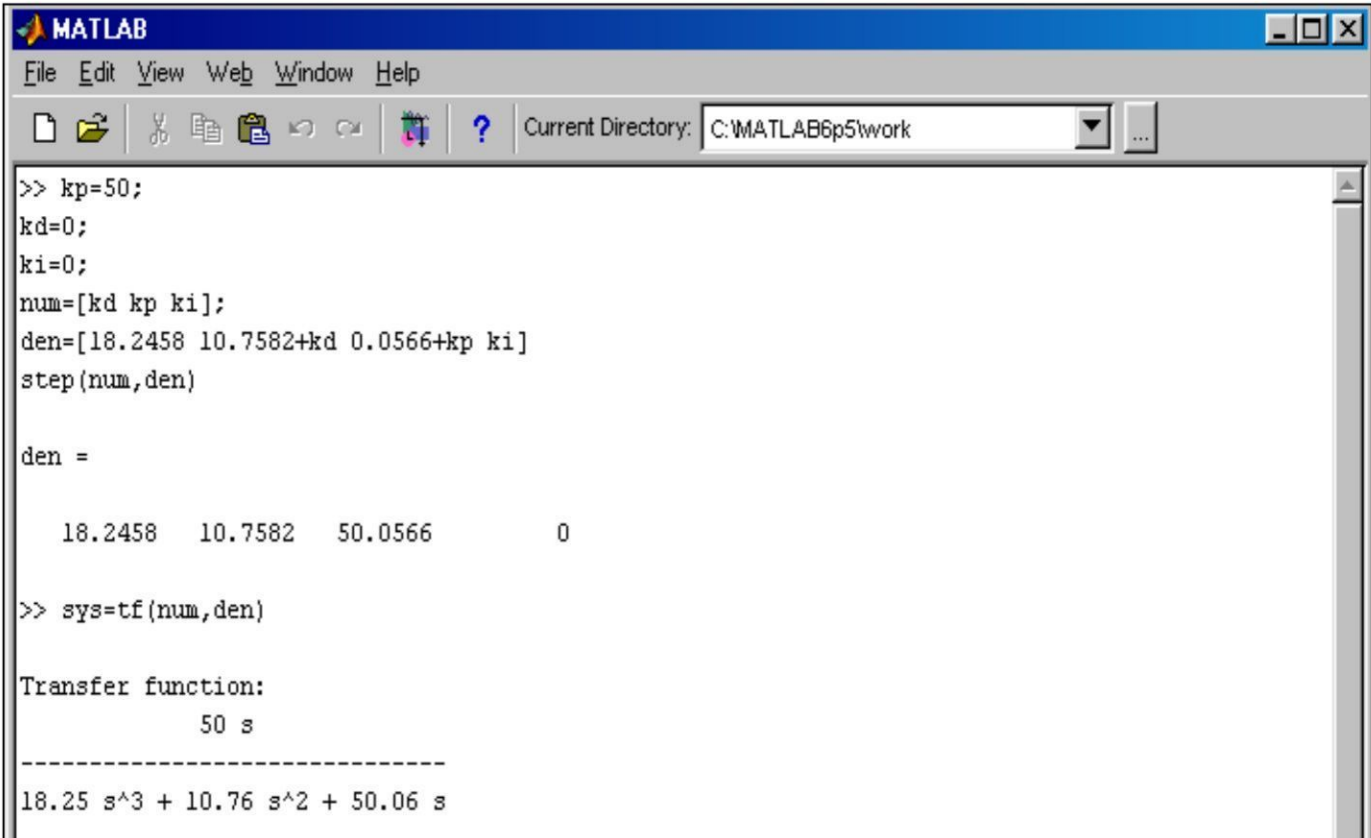
Transfer function:
  s^2 + 4 s + 3
  -----
  s^3 + 10 s^2 + 18 s + 4
```

## Programación del Trabajo Experimental y calculo de los PID.

Función de transferencia a programar:

$$\frac{T_p(s)}{T_R(s)} = \frac{K_d S^2 + K_C S + K_i}{18.2458 S^3 + (10.7582 + K_d) S^2 + (0.0566 + K_C) S + K_i}$$

Entonces programamos la función de transferencia del sistema de control con los valores asignados en MAT LAB como pueden observar.



```
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> kp=50;
kd=0;
ki=0;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)

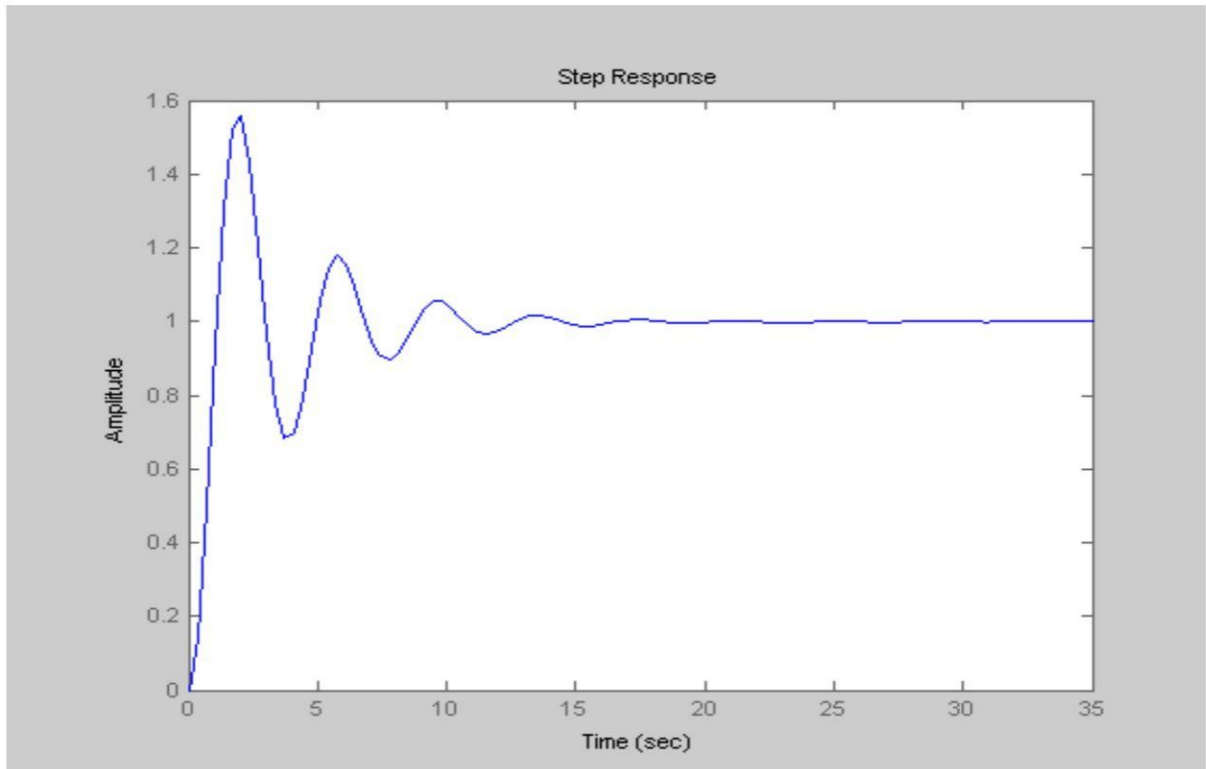
den =

    18.2458    10.7582    50.0566         0

>> sys=tf(num,den)

Transfer function:
           50 s
-----
18.25 s^3 + 10.76 s^2 + 50.06 s
```

Y automáticamente mostrará una respuesta al escalón unitario, observándose la señal de la variable del proceso considerablemente oscilante como pueden observar.



Ahora le asignamos un control PI al sistema de tal manera que se corrija el tiempo de respuesta.

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> kp=50;
kd=0;
ki=10;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)

den =

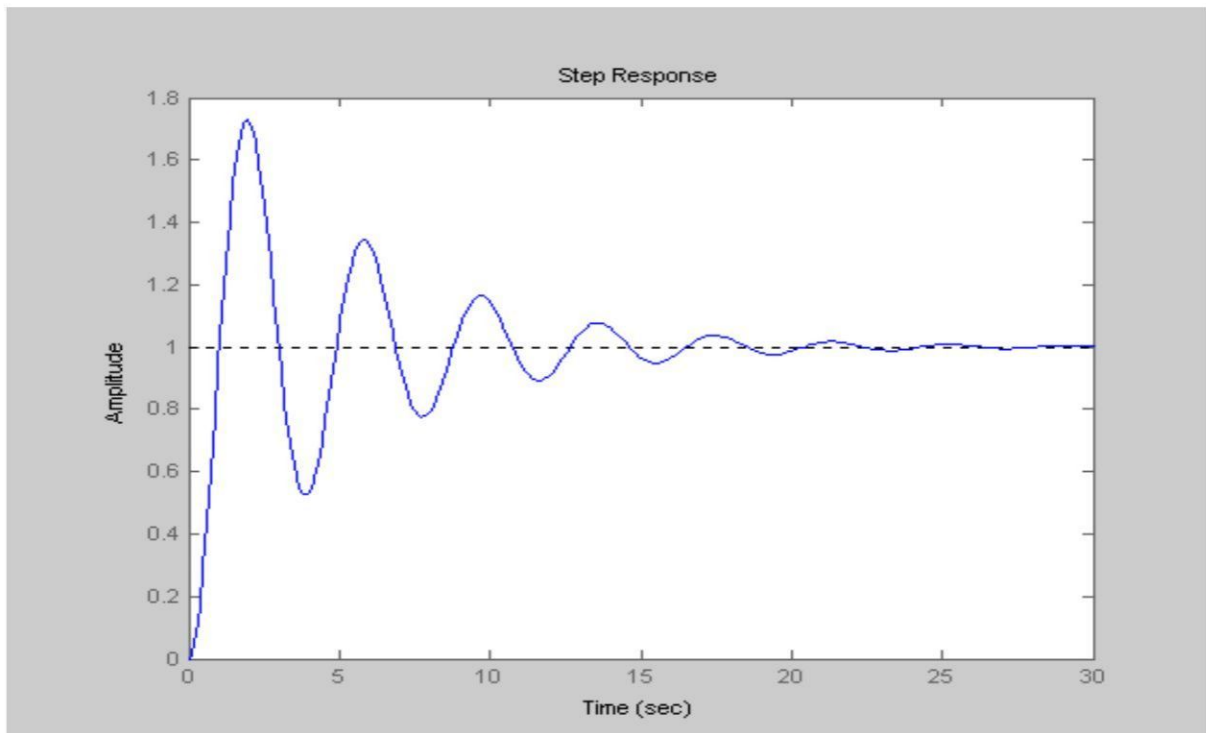
    18.2458    10.7582    50.0566    10.0000

>> sys=tf(num,den)

Transfer function:
           50 s + 10
-----
18.25 s^3 + 10.76 s^2 + 50.06 s + 10

```

Luego podemos observar la grafica que tiene un comportamiento muy oscilatorio, pero el tiempo de respuesta ha disminuido.



Por lo tanto le asignamos un controlador PID con los valores que se muestran en la programación:

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> kp=50;
kd=10;
ki=10;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)

den =

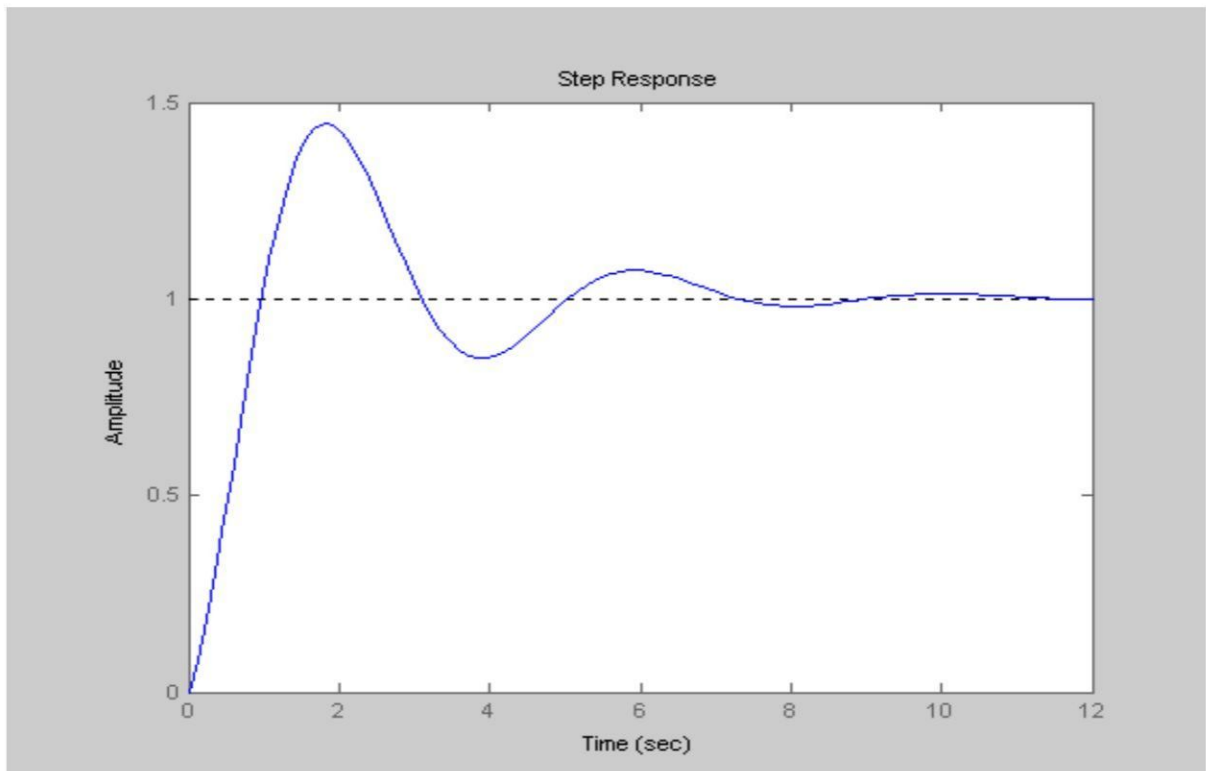
    18.2458    20.7582    50.0566    10.0000

>> sys=tf(num,den)

Transfer function:
      10 s^2 + 50 s + 10
-----
18.25 s^3 + 20.76 s^2 + 50.06 s + 10

```

Y obtendremos como respuesta la siguiente grafica, donde se está mejorando la respuesta considerablemente, además las oscilaciones han disminuido, pero aun tenemos que corregir las anomalías de la respuesta.:



Entonces asignamos otros valores de PID a la programación en MATLAB pero esta vez disminuimos el valor de  $k_p$ .

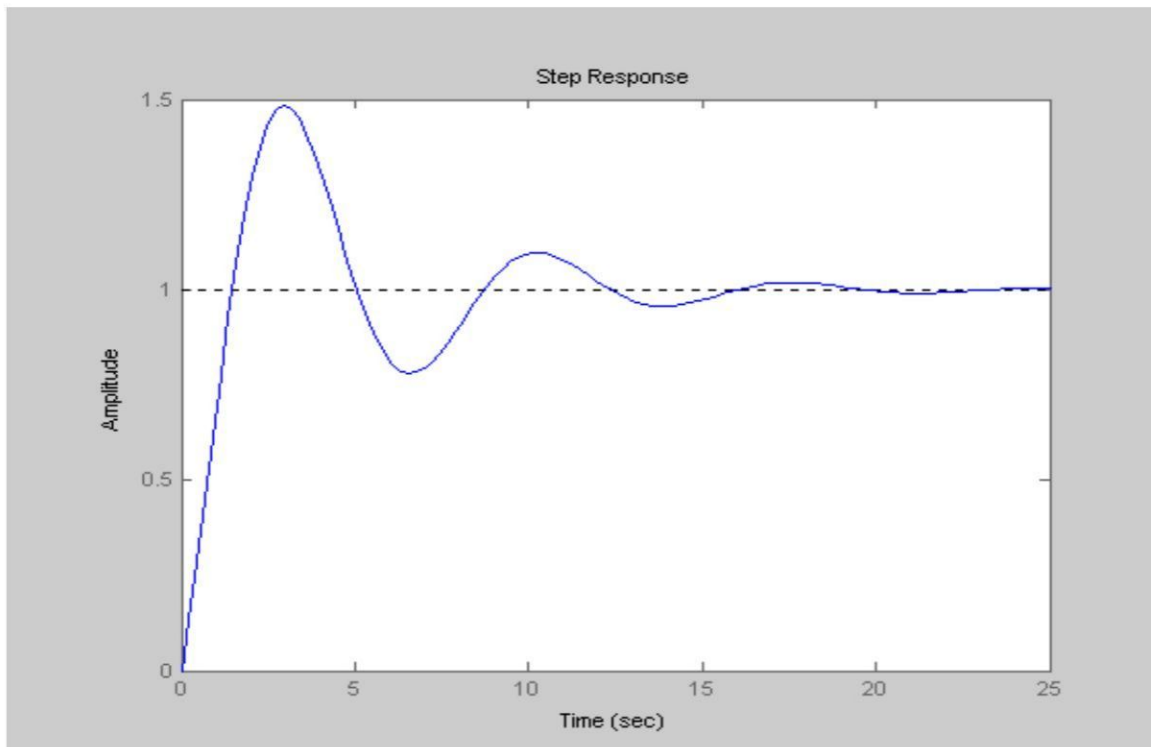
```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> kp=20;
kd=10;
ki=10;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)
den =
    18.2458    20.7582    20.0566    10.0000

```

Y la respuesta que se obtiene es:



Para que la respuesta del proceso sea mas fina se deberá cambiar los valores de  $k_i$ ,  $k_d$  para obtener una respuesta aceptable.

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

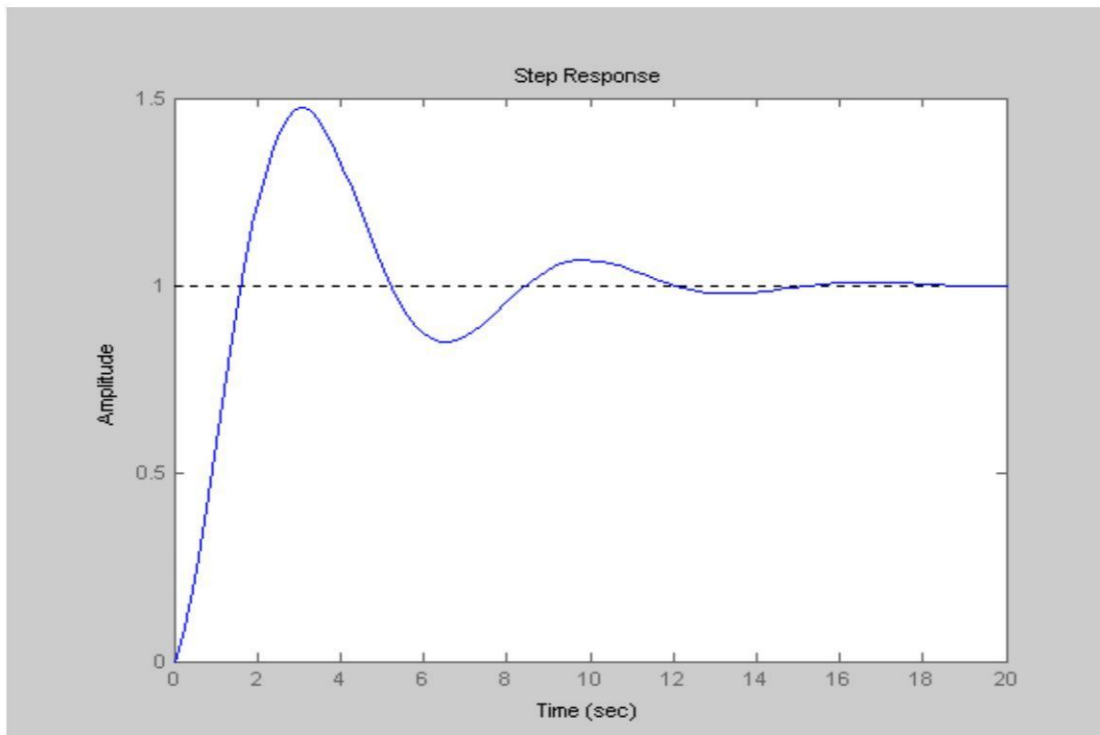
>> kp=20;
kd=5;
ki=5;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)
den =
    18.2458    15.7582    20.0566     5.0000

>> sys=tf(num,den)

Transfer function:
           5 s^2 + 20 s + 5
-----
18.25 s^3 + 15.76 s^2 + 20.06 s + 5

```

Se observa un pequeño cambio en la respuesta:



Entonces, ahora variamos los tres parámetros de PID en forma paralela.

```

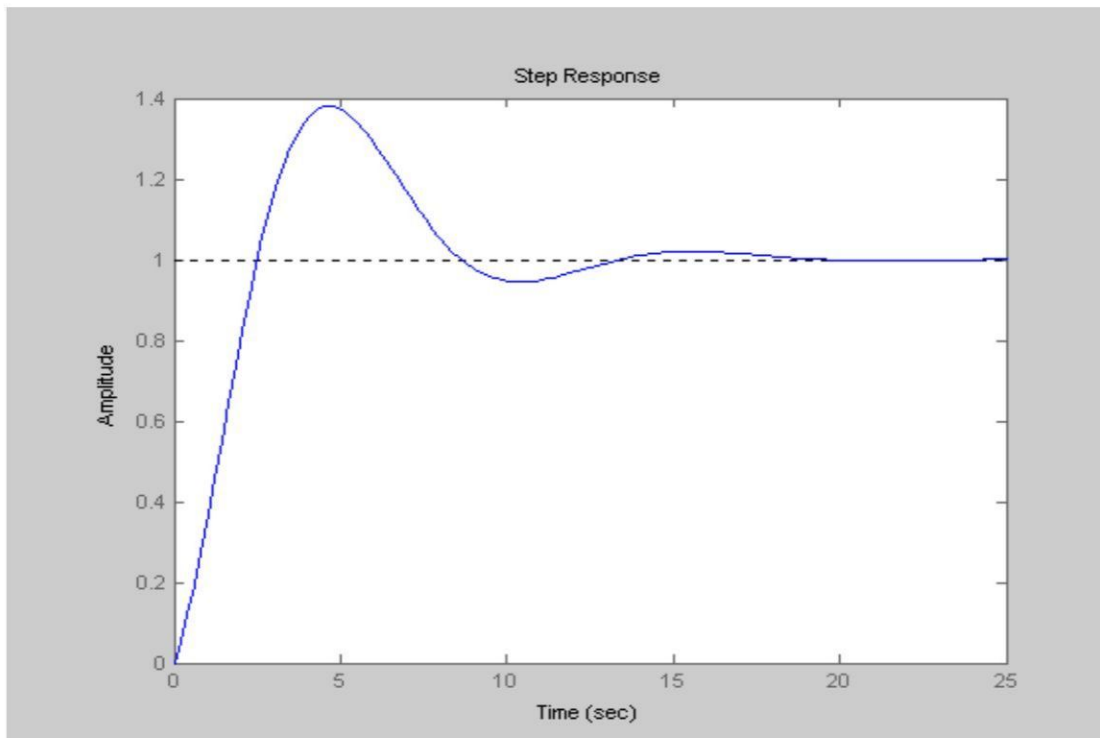
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> kp=10;
kd=4;
ki=2;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)
den =
    18.2458    14.7582    10.0566     2.0000
>> sys=tf(num,den)

Transfer function:
      4 s^2 + 10 s + 2
-----
18.25 s^3 + 14.76 s^2 + 10.06 s + 2

```

Obteniendo una respuesta aceptable como se puede mostrar en la grafica :



Finalmente se le agrega en una unidad el valor de kd y los valores anteriores lo mantenemos constantes , podremos observar que mejora el tiempo de respuesta y el tiempo de restablecimiento.

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

>> kp=10;
kd=5;
ki=2;
num=[kd kp ki];
den=[18.2458 10.7582+kd 0.0566+kp ki]
step(num,den)
den =
    18.2458    15.7582    10.0566     2.0000

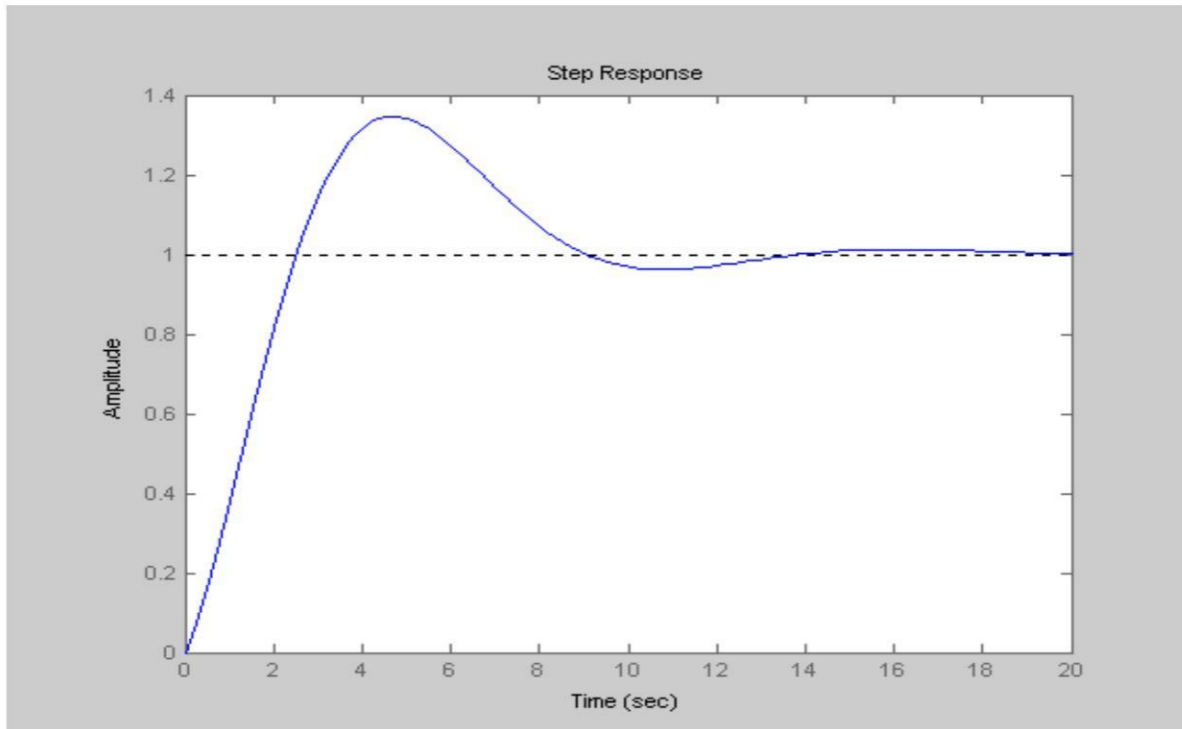
>> sys=tf(num,den)

Transfer function:
      5 s^2 + 10 s + 2
-----
18.25 s^3 + 15.76 s^2 + 10.06 s + 2

```

Y la respuesta final de la programación del sistema de control en MAT LAB queda de la siguiente manera:





RESUMEN DE TODAS LAS CORRIDAS REALIZADAS

SOFTWARE	MAT LAB			MAT LAB		
PARÁMETROS	Kc	Ki	Kd	P	I	D
Primera Corrida	50	0	0	50	0	0
Segunda Corrida	50	10	0	50	5	0
Tercera Corrida	50	10	10	50	5	0.2
Cuarta Corrida	20	10	10	20	2	0.5
Quinta Corrida	20	5	5	20	4	0.25
Sexta Corrida	10	4	2	10	2.5	0.2
Septima Corrida	10	5	2	10	2	0.2