



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**“Propuesta de una Práctica Experimental de Control Automático del
Proceso de Transferencia de Calor, en el Intercambiador de Tubos
Concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad
de San Carlos”**

David Ricardo Cerezo Toledo
Asesorado por: Ing. Manuel Tay

Guatemala, agosto de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

**“Propuesta de una Práctica Experimental de Control Automático del
Proceso de Transferencia de Calor, en el Intercambiador de Tubos
Concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad
de San Carlos”**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA**

POR

**DAVID RICARDO CEREZO TOLEDO
ASESORADO POR Ing. MANUEL TAY
AL CONFERIRSELE EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO**

GUATEMALA agosto de 2005

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**“Propuesta de una Práctica Experimental de Control Automático del
Proceso de Transferencia de Calor, en el Intercambiador de Tubos
Concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad
de San Carlos”**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 6 de julio de 2005

David Ricardo Cerezo Toledo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS
VOCAL I	
VOCAL II	LIC. AMAHÁN SÁNCHEZ ÁLVAREZ
VOCAL III	ING. JULIO DAVID GARICIA CELADA
VOCAL IV	BR. KENNETH ISSUR ESTRADA RUIZ
VOCAL V	BR. ELISA YAZMINDA VIDES LEIVA
SECRETARIA	INGA. MARCIA IVONNE VÉLIZ VARGAS

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. SINEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
EXAMINADOR	ING. WILLIAMS GUILLERMO ÁLVAREZ MEJÍA
EXAMINADOR	ING. VICTOR HERBERT DE LEÓN MORALES
EXAMINADOR	ING. ESTUARDO EDMUNDO MONRROY BENITES
SECRETARIO	ING. PEDRO ANTONIO AGUILAR POLANCO

AGRADECIMIENTOS

- A DIOS: Por ser la fortaleza y guía en el camino que me ha llevado hasta aquí.
- A MIS PADRES David Alfonso y Ana Maria, por ser el soporte de mi vida, enseñarme y ayudarme a ser quien soy.
- A MIS HERMANOS Pablo Estuardo y Ana Gabriela, por apoyarme en todo momento y ser mis mejores amigos.
- A MI NOVIA Claudia Morales, con quien espero pasar el resto de mi vida, por ser quien es y ayudarme cada vez que lo necesite.
- A MIS MENTORES En especial al Ing. Otto Raúl por haberme guiado hacia el camino profesional.
- A MIS AMIGOS Con quienes compartí estas aulas y se han convertido en parte de mi vida,
- A LAS PERSONAS Que con su consejo y apoyo se han convertido en parte fundamental de este logro, en especial a Sandra de León y Amaury Argueta.

2.3	Curva de respuesta de un proceso	20
2.4	Simbología	22
2.5	Variables de proceso	28
2.5.1	Presión	28
2.5.1.1	Instrumentos para medir presión	31
2.5.2	Flujo	33
2.5.2.1	Pérdida de presión	35
2.5.2.2	Instrumentos (Medidores de flujo)	38
2.5.3	Nivel	45
2.5.3.1	Instrumentos (Medición de presión)	46
2.5.4	Temperatura	55
2.5.4.1	Instrumentos (Medición de temperatura)	56
2.6	Transmisores	60
3.	CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS	63
3.1	Lazos de control	64
3.2	Control proporcional	66
3.3	Control integral	73
3.4	Control derivativo	80
3.5	Control PID	81
3.6	Control en cascada	82
4.	ALARMAS	83
5.	PROPUESTA DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL	87
5.1	Características del equipo	87
5.2	Desarrollo de la propuesta	88
5.3	Equipo actual	90
5.3.1	Funcionamiento del equipo actual	95

5.3.2	Resultados de práctica actual	98
5.3.3	Diagrama de flujo	105
5.3.4	Muestra de calculo	106
5.3.4	Datos calculados	114
5.4	Equipo con control automático	120
5.5	Propuesta de control automático en el intercambiador de calor de tubos concéntricos, en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad de San Carlos de Guatemala	136
5.5.1	Funcionamiento del equipo con control automático	139
5.5.2	Desarrollo del modelo matemático que relaciona flujo másico vrs. Nusselt y Prandtl	
5.5	“Propuesta de una Práctica Experimental de Control Automático del Proceso de Transferencia de Calor, en el Intercambiado de Tubos Concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos”	129
5.5.1	Funcionamiento del equipo con control automático	132
5.5.2	Desarrollo del modelo matemático que relaciona flujo másico vrs. Nusselt y Prandtl	133
5.6	Propuesta económica	136
	CONCLUSIONES	143
	RECOMENDACIONES	144
	BIBLIOGRAFIA	145

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfica de la respuesta dinámica de un instrumento en función del tiempo	17
2.	Gráfica del proceso con dos elementos de capacitancias	18
3.	Respuesta típica de un proceso	19
4.	Gráfica de la curva de respuesta del proceso	21
5.	Clases de presión	30
6.	Manómetro (sistema bourdon)	32
7.	Transmisor y sensor diferencial	33
8.	Perdida de presión Vrs. Curva de flujo	36
9.	Relación perdida presión curva de flujo	37
10.	Válvula cerrada (fluido estático)	37
11.	Medidor de flujo de paleta	40
12.	Placa de orificio	41
13.	Tubo Vénturi	43
14.	Flota switch	47
15.	Medidor de presión diferencial (pierna seca)	49
16.	Medidor de presión diferencial (pierna húmeda)	50
17.	Suspensión del cero	51
18.	Elevación del cero	52
19.	Termo copla	57
20.	RTD	58
21.	Gráfica de la secuencia 1, control proporcional	69
22.	Gráfica de la secuencia 2, control proporcional	70
23.	Gráfica de la secuencia 3, control proporcional	71

24.	Gráfica de la secuencia 4, control proporcional	71
25.	Gráfica del Reset	71
26.	Gráfica de la disminución del error	72
27.	Curva del error	73
28.	Corto tiempo integral	77
29.	Combinación proporcional integral	77
30.	Pequeño tiempo integral	78
31.	Diferencia entre derivadas	79
32.	Derivada 0	79
33.	Organigrama detección y reparación de alarma	86
34.	Equipo actual	90
35.	Gráfica altura de agua 30	99
36.	Gráfica altura de agua 35	100
37.	Gráfica altura de agua 40	101
38.	Gráfica altura de agua 45	102
39.	Gráfica altura de agua 50	103
40.	Equipo con control automático	120
41.	Funcionamiento PID del transmisor de temperatura	124
42.	Métodos de configuración	125
43.	Conexión y cableado de transmisor de temperatura	126
44.	Funcionamiento convencional del transmisor de temperatura	126
45.	Funcionamiento del transmisor de temperatura como controlador PID	127
46.	Configuración multidrop	128
47.	Dimensión del transmisor de temperatura	132
48.	Programación multidrop	134
49.	Posicionador de válvula	135

TABLAS

I.	Clasificación de instrumentos por medio de códigos	23
II.	Datos de vapor	114
III.	Datos de agua	114
IV.	Datos de aceite	115
V.	Flujo de aceite altura 10 Vrs. Altura variable de agua	115
VI.	Flujo de aceite altura 11 Vrs. Altura variable de agua	116
VII.	Flujo de aceite altura 12 Vrs. Altura variable de agua	116
VIII.	Flujo de aceite altura 13 Vrs. Altura variable de agua	117
IX.	Flujo de aceite altura 10 Vrs. Altura variable de agua	117
X.	Flujo de agua altura 30 Vrs. Altura variable de aceite	118
XI.	Flujo de agua altura 35 Vrs. Altura variable de aceite	118
XII.	Flujo de agua altura 40 Vrs. Altura variable de aceite	119
XIII.	Flujo de agua altura 45 Vrs. Altura variable de aceite	119
XIV.	Características del sensor de temperatura 2,3 o 4 cables	129
XV.	Características del sensor de temperatura diferencial	130
XVI.	Precisión de sensores mV, mV diferencial	131
XVII.	Presión de sensores Ohm, Ohm diferencial	131

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Δ	Delta, cambio, diferencia.
Υ	Constante que denota el cambio en la conductividad por grado de cambio en la temperatura.
$^{\circ}\text{F}$	Grados de temperatura Fahrenheit
$^{\circ}\text{C}$	Grados de temperatura Celsius
ρ	Ro, densidad del fluido (kg/m^3 o lbm/pies^3)
μ	Mu, viscosidad del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ o $\text{lbf}/\text{pies}\cdot\text{s}$)
\int	Integral
%	Porcentaje
\propto	Proporcional
β	Perdida de carga de presión del tubo Vénturi
Π	Pi, constante adimensional 3.141596
ε	Épsilon, espesor de la tubería
C_p	Capacidad calorífica ($\text{Btu}/\text{lb}^{\circ}\text{F}$)
	Transmisor de Temperatura
	Posicionador de válvula
	Válvula manual normalmente abierta
	Válvula manual parcialmente cerrada
	Válvula manual normalmente cerrada



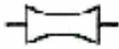
Válvula manual de tres vías



Válvula manual de tres vías



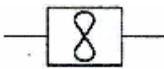
Válvula solenoide



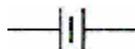
Tubo Vénturi



Indicador de flujo (rotámetro)



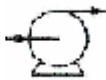
Sensor de turbina



Placa de orificio



Control de velocidad



Bomba centrífuga

GLOSARIO

- Alcance o span:** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del rango del instrumento. Ejemplo: Un transmisor con rango de 30 – 300 grados Fahrenheit tendrá un alcance de 270 grados Fahrenheit.
- Rango:** Son los valores comprendidos entre los límites superior e inferior del instrumento, se expresa por los dos valores extremos. Ejemplo: 30 – 300 grados Fahrenheit, 0 – 1000 PSI.
- Control:** Tiene por objetivo determinar el comportamiento de un fenómeno.
- Control de procesos:** Conjunto de acciones que persiguen que la transformación de un producto en otro sea predecible y que se logre obtener el resultado de las características deseadas.
- Controlador:** Estudia la variable medida y luego determina la acción que el dispositivo de control debe realizar a fin de que la variable medida y por lo tanto la variable controlada, resulte igual a la referencia.

Controladores:	Los controladores reciben las señales procedentes de los transmisores las indica y/o registra. Los controladores envían otra señal de salida, normalmente de 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA en señal eléctrica de corriente. Esta señal de salida actúa sobre el elemento final de control.
Densidad de la masa:	Es definida como la masa del fluido está dada en unidad de volumen. Es medida en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) en el S.I. y libras masa por pies cúbicos (lbm/pe^3) en U.S.
Diagrama de bloques	Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales. Un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar en forma más realista el flujo de las señales del sistema real.
Elevación de cero	Es la cantidad con que el valor cero de la variable del proceso es menor que el límite inferior del rango.
Elementos primarios	Están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio. Esta energía se convierte para dar al sistema de medición una indicación de la variación de la variable. El efecto del elemento

Elemento final de control	Recibe la señal del controlador y modifica la variable que esta bajo el control, puede ser una válvula, un servomotor, un cilindro, etc.
Error	Es la diferencia entre el valor transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.
Exactitud	Es la tolerancia de medida del instrumento, define los límites de error del instrumento en condiciones normales de servicio. Puede expresarse de varias maneras; tanto por ciento del alcance por ejemplo $\pm 5\%$, valor directo por ejemplo $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$, tanto por ciento de la lectura efectuada por ejemplo $\pm 1.5\%$; tanto por ciento del total de la escala.
Gravedad Especifica	Es el ratio de la densidad de la masa de un fluido por la densidad de la masa igual al volumen de referencia del fluido.
Histéresis	Es la diferencia de lecturas de un instrumento cuando se lee subiendo la escala y bajando la escala. Esto es más frecuente en instrumentos neumáticos debido al efecto de la fricción, deslizamiento en pivotes y uniones.
Instrumentos ciegos	Son los que no tienen indicación visible de la medida, tales como, interruptores de presión y temperatura.

**Instrumentos
indicadores**

Disponen de una aguja y de una escala para leer el valor de la variable.

**Instrumentos
registradores**

Registran con trazos continuos los valores de la variable de la variable, suelen ser circulares ó largados.

Proceso

Conjunto de acciones que persiguen la transformación de un producto en otro, cambiándole una o varias características físicas o químicas, generalmente usando energía en cualquiera de sus formas.

Presión atmosférica

Es la presión ejercida por las partículas de la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. Al nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29.9 pulgadas) de mercurio absoluto ó 14.7 psia (libras por pulgada cuadrada absoluta), estos valores definen la presión atmosférica estándar.

Presión de vapor

Es una medida de cómo el fluido es volátil. Presión de vapor corresponde a la presión desarrollada por el fluido cuando este fluye en una tubería a una temperatura dada y el fluido en equilibrio. Está dada en kilo pascal, absoluto (kPa, absoluto) en el S.I. y libras por pulgada cuadrada absolutas (psia) en el U.S.

Presión diferencial	Es la diferencia entre dos presiones, presión 1 (P1) menos presión 2 (P2).
Presión manométrica	Es la determinada por la diferencia entre la presión absoluta menos la presión atmosférica del lugar donde se efectúa la medición, hay que notar que cuando aumenta la presión atmosférica también aumenta la presión leída por el instrumento, sin embargo esto es despreciable al medir altas presiones.
Realimentación negativa	Disminuye el efecto de las perturbaciones y tiende a restablecer el equilibrio entre la referencia y la variable medida.
Realimentación positiva	Aumenta el efecto de las perturbaciones y conduce a la inestabilidad. Este tipo de realimentación no se usa jamás en el control de lazo cerrado.
Repetibilidad	Es la capacidad de leer repetidamente el mismo valor a idénticos valores de la variable, en las mismas condiciones de servicio. Se da en tanto por ciento del alcance del instrumento. También es conocida como precisión.

Resolución	Es el intervalo más pequeño que un instrumento puede discriminar. Por ejemplo, si las resoluciones de dos termómetros digitales A y B, son 0.1 grados Celsius o Fahrenheit y 1 grados centígrados o Fahrenheit, respectivamente, el termómetro A tiene mejor resolución que el B.
Ruido o noise	Perturbaciones eléctricas o señales accidentales que modifican la indicación o transmisión de la medición.
Set point	También llamado Valor de Referencia y corresponde al valor que esperamos mantener en la variable de proceso por medio de la acción del controlador.
Sensibilidad	Es la relación entre el cambio de la lectura y el cambio real de la variable después que ésta ha alcanzado el reposo. No debe confundirse la sensibilidad con la banda muerta. Se da en tanto por ciento del alcance del instrumento.
Sistema	Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objeto determinado. Un sistema no necesariamente es físico. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

Sistema de control en lazo abierto	Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada
Sistemas de control en lazo cerrado	En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.
Supresión de cero	Es la cantidad con que el valor cero de la variable de proceso es mayor que el límite inferior del rango.
Temperatura de servicio	Rango de temperatura dentro del cual el instrumento funciona con los límites y errores especificados.
Vacío	Es la diferencia entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, el vacío es la presión medida por debajo de la presión atmosférica, viene expresado en milímetros columna de mercurio (mmHg), milímetros columna de agua (mm“H2O).

Válvulas de control	La válvula de control realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida. Para esto se comporta como un orificio que varía continuamente su área.
Variable	Característica física de un proceso que puede tomar diferentes valores. Ejemplo: presión, temperatura, etc.
Variable de carga	O perturbación, es la característica de un proceso que tiene influencia en el valor de la variable controlada, pero sobre la cual no tenemos influencia con la modificación de la variable manipulada.
Variable controlada	Conocida como variable de proceso, es la cantidad o condición que se mide y controla. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema.
Variable manipulada	Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
Viscosidad dinámica	Es definida como el grueso de un fluido y como este fácilmente fluye. Está dada en pascal - segundo (Pa-s) en el S.I. y el U.S. en libras-fuerza por pies-segundo (lbf/pies-s).

Zona muerta o banda muerta Es el pequeño campo de valores en donde el instrumento no cambia su indicación o no cambia su señal de salida. Se da en tanto por ciento del alcance del instrumento.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se detalla el funcionamiento de los intercambiadores de calor, enfocado principalmente en el intercambiador de calor que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias, en la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos. Se detalló el funcionamiento actual de este intercambiador de calor así como la práctica actual en la que se determina un modelo matemático que relaciona Reynolds, Nusselt y Prandtl, tres números adimensionales que al entrelazarse relacionan flujo, temperatura y momentum.

Ya comprendido el fenómeno de intercambio de calor presente en el intercambiador de calor de tubos concéntricos se desarrollo el concepto de instrumentación básica, desde los sensores primarios hasta los transmisores más complejos que se encuentran actualmente en el mercado. Utilizando los conocimientos del funcionamiento del intercambio de calor e instrumentación se inicio con el concepto de lazos de control, control en cascada y alarmas.

Utilizando como base todos estos conocimientos se entrelazan los conceptos del funcionamiento de intercambio de calor con la instrumentación y los lazos de control, y se propone una práctica experimental con el equipo de intercambio de calor del laboratorio de operaciones unitarias, controlado automáticamente. Determinando un modelo matemático similar al que se obtiene actualmente pero con mayor precisión, exactitud y en un tiempo menor, además de inducir al estudiante en el mundo del control automático.

OBJETIVOS

- **General:**

Aplicar los conocimientos de intercambio de calor y control automático de procesos, en un equipo de intercambio de calor, realizando la propuesta de una práctica experimental de control automático de procesos de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos situado en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad de San Carlos.

- **Específicos:**

1. Inducir a los estudiantes al estudio del control automático de procesos, intercambio de calor.
2. Dejar una base teórica respecto al control automático de intercambio de calor par el intercambiador de calor de tubos concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación desarrollará la “Propuesta de una Práctica Experimental de Control Automático del Proceso de Transferencia de Calor, en un Intercambiador de Tubos Concéntricos”. Se presentan los conceptos básicos de intercambio de calor así como de instrumentación y consecuentemente automatización.

Se desarrollaron los diferentes mecanismos de intercambio de calor existentes, la clasificación de los equipos de intercambio de calor, así como la instrumentación básica para cada uno de estos equipos, posterior a esto se profundizó en los diferentes diagramas de control. Ya con el conocimiento de los diagramas de control se inició con el control automático del proceso, conociendo a fondo cada uno de los instrumentos utilizados en este control automático; Se realizó una comparación entre la práctica actual del Intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos, desarrollada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, y el cambio que se dará al buscar el control automático de esta práctica, se buscó la manera más eficiente, precisa y económica de llevar a cabo este proyecto.

Además se dará una inducción directa al desarrollo tecnológico actual de la automatización de procesos, partiendo de lo básico y fundamenta, el funcionamiento de los intercambiadores de calor, su correcta instrumentación fundamentada en bases teóricas y prácticas, finalizando con la automatización de los procesos de intercambio de calor, parte fundamental en la evolución tecnológica de hoy en día dentro de las industrias nacionales e internacionales.

1. TRANSFERENCIA DE CALOR

1.1 Mecanismos de transferencia de calor

Los mecanismos de transferencia de calor trata termodinámicamente de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia, la transferencia de calor esta relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor, debe tomarse en cuenta que cuando se vaporiza una libra de agua o se condensa una libra de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico, sin embargo la velocidad a la que cualquiera de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o receptor es inherentemente muy diferente, generalmente la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación, también se ha establecido que dondequiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición. Asimismo en cualquier cuerpo que absorba o pierda calor, deben guardarse especiales consideraciones respecto a si el cambio es de calor latente, sensible o ambos.

Existen tres mecanismos diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres, estas son: *conducción, convección y radiación.*

1.1.1 Conducción

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria.

La dirección del flujo será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Suponiendo que una fuente de calor existe a la izquierda y que existe un receptor de calor en la superficie derecha. Es conocido y después se confirmará por derivación, que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y el área de la pared.

Los fundamentos de la conducción de calor se atribuyen generalmente a Fourier, en muchos sistemas que involucran flujo, tal como flujo de calor, de fluido o de electricidad, se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, o

$$\text{Flujo} \propto (\text{Potencial} / \text{Resistencia}) \quad (\text{Ec. 1})$$

En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a efecto por la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías, cuando dos superficies están a diferentes temperaturas, necesariamente existe un flujo y una resistencia al flujo de calor, por lo que la conductancia es el recíproco de la resistencia al flujo de calor y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Flujo} \propto \text{Potencial} * \text{Conductancia} \quad (\text{Ec.2})$$

La conductancia es una propiedad ponderable de toda la pared, aún cuando se ha encontrado experimentalmente que el flujo de calor esta independientemente influido por el grosor y el área de la misma. Es de desearse diseñar una pared que tenga ciertas características respecto al flujo de calor, para permitir un uso mas amplio de la información experimental, se ha convenido reportar la conductancia únicamente cuando todas las dimensiones se refieren a valores unitarios.

Cuando la conductancia se reporta para una cantidad de material de un pie de grueso con un área de flujo de un pie², la unidad de tiempo 1 h y la diferencia de temperatura 1°F, se llama conductividad térmica k. Las correlaciones entre la conductividad térmica y la conductancia de una pared de grueso L y área A, están entonces dadas por:

$$\text{Conductancia} = k A/L \Delta T \quad (\text{Ec.3})$$

Y

$$Q = k A/L (\Delta T) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde k tiene las dimensiones resultantes de la expresión (QL/AΔT) o Btu/(h)(pie²)(°F)/pie).

1.1.1.1 Influencia de la temperatura y la presión en la conductividad térmica k.

La conductividad térmica de los sólidos es mayor que la de los líquidos, la que a su vez es mayor que la de los gases. Es más fácil transmitir calor a través de un sólido que a través de un líquido y más fácil por un líquido que por un gas. Algunos sólidos, tales como los metales, tienen altas conductividades térmicas y se llaman conductores. Otros tienen bajas conductividades térmicas y son malos conductores de calor. Estos son aislantes. Las conductividades de los sólidos pueden, ya sea aumentar o disminuir con la temperatura, y en algunos casos pueden hasta invertir su velocidad de cambio de una disminución a un incremento. Para la mayoría de los problemas prácticos no hay necesidad de introducir un factor de corrección para las variaciones de la conductividad térmica con la temperatura, sin embargo, la variación puede expresarse usualmente por la ecuación lineal siguiente

$$k = k_0 + \gamma t \quad (\text{Ec.5})$$

Donde k_0 es la conductividad a $^{\circ}\text{F}$ y γ es una constante que denota el cambio en la conductividad por grado de cambio en la temperatura. Uno de los factores que origina error en la determinación de la conductividad térmica, es la naturaleza de la unión formada entre la fuente de calor y el fluido o espécimen sólido que hace contacto con el y transmite el calor, aún cuando un líquido este

en contacto con un metal, la presencia de pequeñas rugosidades puede entrapar permanentemente burbujas infinitesimales de aire, y debe tener en cuenta que pueden causar errores considerables.

1.1.2 Convección

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él. La convección libre o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. Pero cuando el fluido se agita mecánicamente, el calor se transfiere por convección forzada, La agitación mecánica puede aplicarse por medio de un agitador, aún cuando en muchas aplicaciones de proceso se induce circulando los fluidos calientes y fríos a velocidades considerables en lados opuestos de tubos. Las convecciones libre y forzada ocurren a diferentes velocidades, la forzada es la más rápida y por lo tanto la más común. Los factores que promueven altas transferencias para la convección forzada no necesariamente tienen el mismo efecto en la convección libre.

1.1.2.1 Coeficientes de película

En el flujo de calor de una tubería al aire, el paso de calor hacia el aire no se efectúa solamente por convección en lugar de esto, el flujo se efectúa parcialmente por radiación y parcialmente por convección libre, existe una diferencia de temperaturas entre la superficie de la tubería y la temperatura promedio del aire. Puesto que la distancia de la superficie del tubo hasta la región del aire a temperatura promedio es indefinida, la resistencia se computa usando: $\Delta T_a/Q$, si se desea (L_a), puede calcularse también a partir de este valor de R_a y sería la longitud de una capa de aire ficticia de conducción, equivalente a la resistencia combinada de conducción, convección libre y radiación, la longitud de la película es de poco significado aún cuando el concepto de película ficticia encuentra numerosas aplicaciones, en lugar de esto es preferible trabajar con el recíproco de la resistencia unitaria h , que tiene un origen experimental, no todos los efectos de la conducción son necesariamente combinaciones de dos de ellos.

Particularmente en el caso de convección libre o forzada a líquidos y de hecho a muchos gases a temperaturas y diferencia de temperaturas moderadas, la influencia de radiación puede despreciarse y la resistencia experimental corresponde a convección forzada o libre según sea el caso.

Considérese una pared de tubería con convección forzada de diferentes magnitudes en ambos lados del tubo, en el lado interior, el calor es depositado por un fluido caliente, y en el lado exterior el calor es recibido por un líquido frío. Cualquiera de las resistencias puede ser medida independientemente, obteniendo la diferencia de temperatura entre la superficie del tubo y la temperatura promedio del líquido.

La transferencia de calor puede determinarse a partir del cambio de calor sensible en cualquiera de los fluidos y en la longitud del tubo en la cual ocurra transferencia de calor. Designando por R_i la resistencia interior, y la exterior por R_o ; las temperaturas interiores y exteriores de la pared del tubo por t_p y t_w , y aplicando una expresión para el estado estable, se tiene

$$Q = A_i(T_i - t_p)/R_i = A_o(t_w - t_o)/R_o \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde T_i es la temperatura del fluido caliente en la parte interior y t_o , es la temperatura del fluido frío en el exterior, reemplazando las resistencias por sus recíprocos h_i y h_o , respectivamente.

$$Q = h_i A_i \Delta T_i = h_o A_o \Delta T_o \quad (\text{Ec. 7})$$

Los recíprocos de las resistencia de transferencia de calor tienen las dimensionales de $\text{Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F})$ de diferencia de temperatura, y se llaman coeficientes individuales de película o simplemente coeficientes de película.

Además de que el coeficiente de película es una medida del flujo de calor por unidad de superficie y por unidad de diferencia de temperatura, indica la razón o velocidad a la cual fluidos que tienen una variedad de propiedades físicas y bajo diferentes grados de agitación, transfieren calor, hay otros factores que influyen los coeficientes de película, tales como el tamaño del tubo y si el fluido se considera o no que está dentro del tubo. Con tantas variables, y cada una teniendo su propio grado de influencia en la razón de transferencia de calor (coeficiente de película), es fácilmente comprensible porque no hay una derivación racional que permita un cálculo directo de los coeficientes de película.

Por otra parte, no es práctico efectuar un experimento para determinar el coeficiente cada vez que se deba añadir o remover calor de un fluido. En lugar de esto, es deseable estudiar algún método de correlación mediante el cual y con la ejecución de algunos experimentos básicos, con un amplio rango de variables, obtener relaciones que mantengan su validez para cualesquiera otras

combinaciones de variables. El problema inmediato es establecer un método de correlación y luego aplicarlo a datos experimentales.

1.1.2.2. Transferencia de calor entre sólidos y fluidos

Cuando un líquido fluye en un tubo horizontal, puede hacerlo en forma de movimiento de torbellino no localizado conocido como flujo turbulento. Graficando la velocidad local en la tubería vs. La distancia de su centro. Si la velocidad del líquido disminuye, bajo cierto valor determinado, la naturaleza del flujo cambia y desaparece la turbulencia. Las partículas del fluido fluyen en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo, esto se conoce como flujo laminar.

Un experimento usado para la determinación visual del tipo de flujo, consiste en un tubo de vidrio a través del cual fluye agua. Se inyecta una corriente muy fina de anilina en el centro del tubo, y si la tinta permanece en el centro en una distancia razonable, es indicativo de flujo laminar.

Experimentos adicionales han indicado que el flujo laminar procede como el deslizamiento de delgados cilindros concéntricos de líquido, uno dentro de

otro. También se muestra que la distribución de las velocidades de los cilindros es parabólica con el máximo centro aproximándose a cero en la pared del tubo.

Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluya dentro de un tubo, era influido por la velocidad, densidad y viscosidad del líquido, además del diámetro del tubo.

Cuando estas variables se relacionan como ecuación $(dV\rho/\mu)$ llamado el número de Reynolds, se encuentra que siempre existe flujo turbulento cuando el valor excede las cercanías de 2300 y usualmente excede 2100. Por definición la transferencia de calor por convección procede principalmente a resultas de mezcla, y mientras este requerimiento parece ser satisfecho por el flujo turbulento, no lo es por el flujo laminar.

1.1.2.3 Análisis de la forma de convección forzada

La razón de transferencia de calor por convección forzada a un fluido incompresible que viaja en flujo turbulento por una tubería de diámetro uniforme a flujo de masa constante, se ha encontrado que es influida por la velocidad u , densidad ρ , calor específico c , conductividad térmica k , viscosidad μ , así como por el diámetro interno de la tubería D , la velocidad, viscosidad, densidad y

diámetro, afectan el grueso de la película del fluido. k es la conductividad térmica del fluido, y el calor específico refleja la variación del promedio de la temperatura del fluido como resultado de la absorción uniforme de calor. A los demás grupos adimensionales al igual que al número de Reynolds se les ha asignado nombres en honor a los primeros investigadores en el campo de la mecánica de fluidos y transferencia de calor.

Uno de los aspectos más útiles del análisis dimensional es su habilidad de proveer correlaciones entre variables cuando la información acerca de un fenómeno es incompleta. Uno podría especular que tanto la fricción del fluido y la convección forzada, son influidas por la tensión superficial del fluido.

La tensión superficial podría haber sido incluida como variable, en cualquier caso se obtienen una correlación mediante el análisis dimensional.

1.1.2.4 Diferencia de temperatura entre un fluido y la pared de un tubo

Antes de tratar de evaluar las constantes para una ecuación de convección forzada a partir de datos experimentales, debe tomarse en consideración otro factor. Cuando un líquido fluye a lo largo del eje de un tubo y absorbe o transmite calor sensible, la temperatura del líquido varía en la

longitud del tubo. En el caso de flujo de calor a través de una pared plana, la temperatura sobre el área completa de cada cara de la pared fue idéntica y las diferencias de temperatura fueron simplemente las diferencias entre cualquier punto de las dos caras. Si la temperatura de la circunferencia interior de la pared de un tubo es casi constante en toda su longitud, como sucede cuando el fluido dentro del tubo se calienta por vapor, habrá dos diferencias de temperatura distintas en los finales: una entre la pared del tubo y el líquido que entra y otra en el otro extremo entre la pared del tubo y el líquido calentado. Si se supone que el calor específico es constante para el líquido, el aumento en la temperatura es proporcional al calor total recibido por el líquido al pasar de la temperatura t_1 a la temperatura exterior t_2 y si h_i se considera constante:

$$Q = [h_i A_i (\Delta t_2 - \Delta t_1)] / [\ln \Delta t_2 / \ln \Delta t_1] \quad (\text{Ec. 8})$$

1.2 Clasificación de equipos para intercambio de calor

Un aparato cuyo propósito principal es la transferencia de energía entre dos fluidos se llama Intercambiador de Calor. Los Intercambiadores de calor por lo general se clasifican en tres categorías:

1. Generadores
2. Intercambiadores de tipo abierto
3. Intercambiadores de tipo cerrado o recuperadores.

Los generadores son intercambiadores en los que fluyen, alternadamente fluidos calientes y fríos a través del mismo espacio con la menor mezcla posible entre ambas corrientes. La cantidad de transferencia de energía depende de las propiedades del flujo y del fluido así como la geometría de las propiedades térmicas de la superficie.

Los intercambiadores de calor de tipo abierto son, como lo indica su nombre, aparatos donde realmente ocurre la mezcla física de las dos corrientes de fluido, uno caliente y uno frío, entran en los intercambiadores de calor de tipo abierto y salen con una sola corriente. La naturaleza de la corriente de salida se predice por continuidad. No se necesitan ecuaciones de rapidez para analizar este tipo de intercambiador.

El tercer tipo de intercambiador de calor, el recuperador, es de primordial importancia y a él se dirigirá toda la atención, ya que el intercambiador de calor de tubos concéntricos entra dentro de esta denominación. En el recuperador, las corrientes calientes y frías de fluido no entran en contacto directo entre sí, sino que están separadas por la pared de un tubo o por una superficie que puede ser plana o estar curvada de alguna manera.

Por lo tanto, el intercambio de energía se realiza de un fluido a una superficie, por convección; a través de la pared o placa por conducción y después, de la superficie al segundo fluido.

1.3 Coeficiente global de transferencia de calor

La ecuación básica de diseño para un intercambiador de calor es:

$$dA = dQ / U \Delta T \quad (\text{Ec. 9})$$

En donde dA es el elemento de área superficial que se requiere para transferir una cantidad de calor dQ a un punto en el intercambiador, donde el coeficiente global de transferencia de calor es U y donde la diferencia global de temperaturas masivas entre las dos corrientes es ΔT . El coeficiente global de transferencia de calor se relaciona con los coeficientes individuales de transferencia de calor de película y con las resistencias de paredes y suciedades, mediante la ecuación:

$$dq = \frac{t_1 - t_2}{(1/h_{id}A_i) + (x/kdA_{\text{prom}}) + 1/(h_{dd}A_d) + (1/h_{od}A_o)} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$dq = U dA (t_1 - t_2) \quad (\text{Ec.11})$$

Al basar U_o sobre el área de la superficie exterior A_o , se obtiene:

$$A_o = \int dQ / U_o \Delta Q \quad (\text{Ec. 12})$$

Valuando de 0 a Q.

Para muchos casos prácticos, es posible calcular un coeficiente global medio constante U_{om} a partir de de la ecuación 9 y definir un valor medio correspondiente de ΔT_m , tal que:

$$A_o = QT / U_{om} \Delta T_m \quad (\text{Ec. 13})$$

Es preciso tener cuidado de que U_o no varíe demasiado, que se escojan las ecuaciones y la condiciones apropiadas para calcular los coeficientes individuales y que la diferencia media de temperaturas se la correcta para la configuración especificada del intercambiador.

1.3.1 Diferencia media de temperaturas

La diferencia de temperaturas entre los dos fluidos en el intercambiador de calor variará, en general, de un punto a otro. La diferencia media de temperaturas (DMT) se puede calcular a partir de las temperaturas finales de las dos corrientes, si son validas las suposiones siguientes:

1. Todos los elementos de un corriente dada, de un fluido tienen el mismo historial térmico al pasar por el intercambiador.
2. El intercambiador funciona en estado estacionario.

3. El calor específico es constante para cada corriente.
4. El coeficiente global de transferencia de calor es constante.
5. La pérdidas de calor son despreciables.

2. INSTRUMENTACIÓN

En todos los procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como: presión, caudal o flujo, nivel, temperatura, pH, etc. Los instrumentos de medición y control permiten mantener constantes y regular las magnitudes de una manera más idónea que el propio operador.

Dentro de los diferentes tipos de instrumentos existe una gran variedad de clasificaciones de los instrumentos dentro de los primero se encuentran los llamados instrumentos ciegos los cuales no tienen indicación visible de la medida, tales como, interruptores de presión y temperatura. También se encuentran los que disponen de una aguja y de una escala para leer el valor variable, este tipo de instrumentos se llaman instrumentos indicadores. Así como los instrumentos indicadores existen los instrumentos registradores los cuales registran con trazos continuos los valores de la variable, estos trazos pueden ser circulares o alargados.

Dentro de estos instrumentos se encuentran los elementos primario de medición los cuales están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio. Esta energía se convierte para dar al sistema de medición una indicación de la variación de la variable. El efecto del elemento primero al sistema de medición pueden ser cambios de presión, fuerza, posición, cambios eléctricos, etc. Por ejemplo los elementos primarios de nivel, el efecto es la variación de presión hidrostática del fluido bajo medición.

El elemento primario puede estar integrado en el instrumento, como un termómetro de bulbo y capilar. En otros casos el elemento primario no está integrado en el instrumento, como en un transmisor de caudal con placa de orificio como elemento primario.

2.1 Características de los instrumentos

Cuando se elige un instrumento es muy conveniente tener en cuenta sus características estáticas y dinámicas. La precisión, resolución, sensibilidad y banda muerta son características que no se pueden dejar de lado.

También es importante conocer la rapidez con que un instrumento puede reaccionar frente a una perturbación del parámetro medido. Esto lleva a introducir otro conjunto de características tales como: tiempo muerto, tiempo de subida y tiempo de estabilización. Estas son llamadas características dinámicas.

Las características dinámicas de un instrumento o sensor se pueden determinar modificando bruscamente (perturbación) la variable medida. Luego, se registra la respuesta dinámica del instrumento bajo ensayo en función del tiempo. La figura No. 1 muestra la curva que representa dicha respuesta.

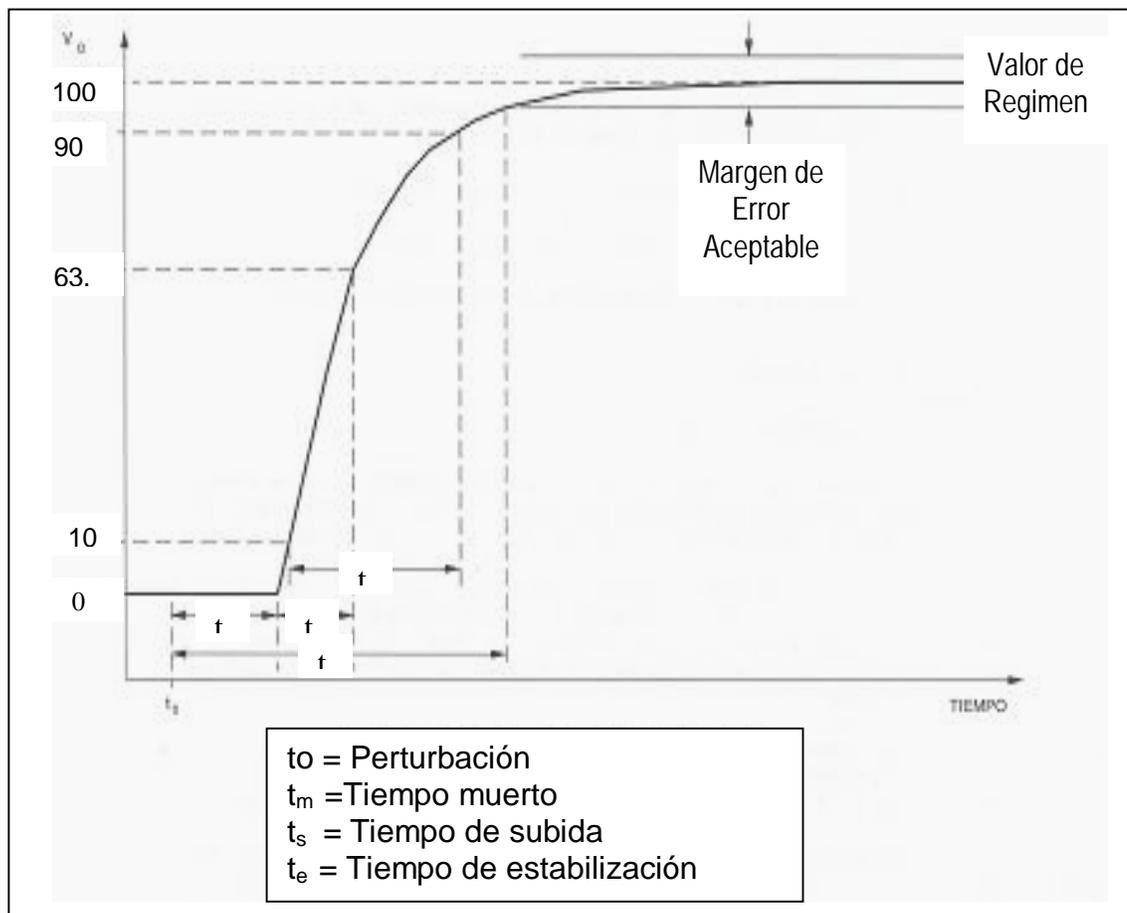
El intervalo de tiempo comprendido entre el momento en que ocurre la perturbación (t_0) y el instante en que el valor entregado por el instrumento comienza a cambiar, se llama tiempo muerto (t_m).

El tiempo de subida (t_s) es el lapso necesario para que el valor entregado por el instrumento pase de 10 a 90% del valor de régimen.

El tiempo de estabilización (t_e) representa el tiempo requerido para que el valor entregado por el instrumento alcance cierto porcentaje del valor de régimen.

El tiempo requerido para que el valor entregado por un instrumento alcance el 63.2%, del valor de régimen, después de una perturbación de la variable medida, se llama constante de tiempo (T). Se considera que el valor entregado por el instrumento alcanza el valor de régimen final después de cinco constantes de tiempo.

Figura 1. **Respuesta dinámica de un instrumento en función del tiempo**



2.2 Características de los procesos

El proceso con una capacitancia representa un proceso que cuenta con un sólo elemento de capacitancia y un único elemento de resistencia. La capacitancia representa la capacidad de almacenaje. La resistencia representa una resistencia u oposición al flujo de energía o materia.

Los procesos con dos capacitancias representan un proceso que cuenta con dos elementos de capacitancia.

Figura 2. **Proceso con dos elementos de capacitancia**

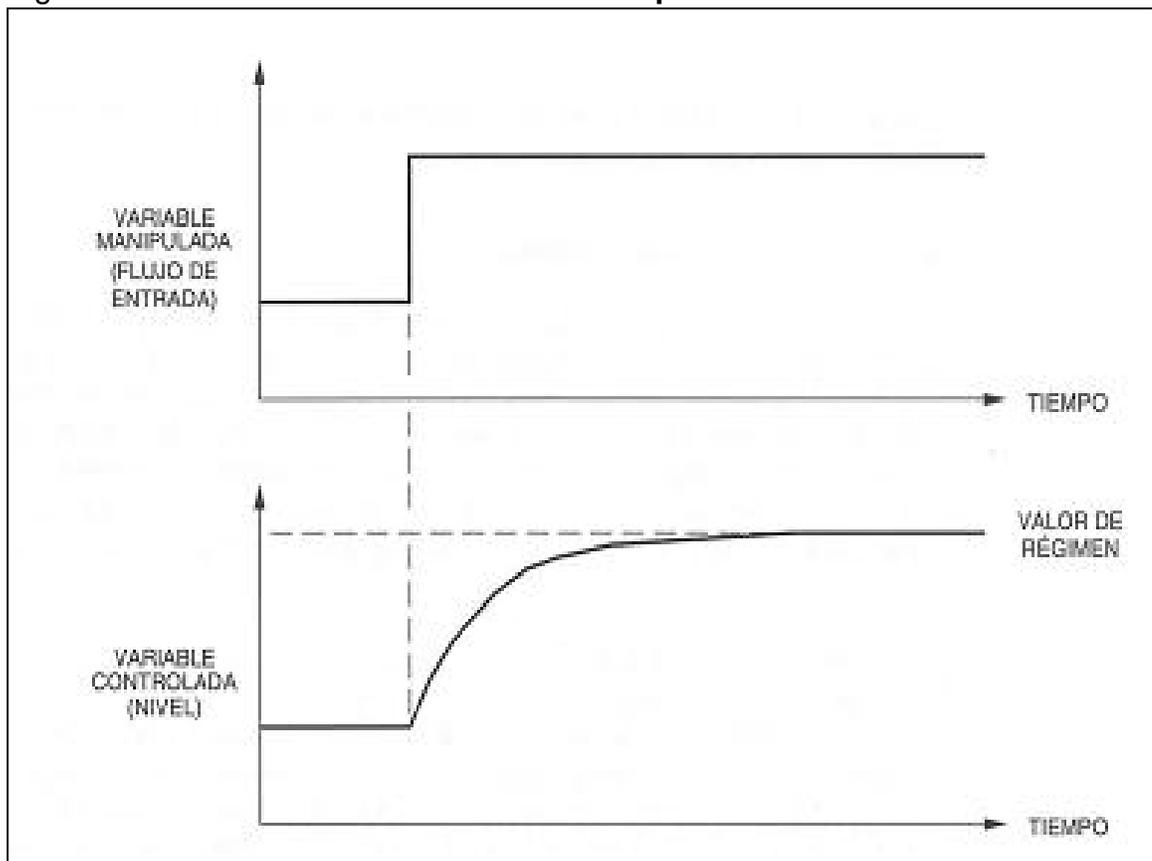
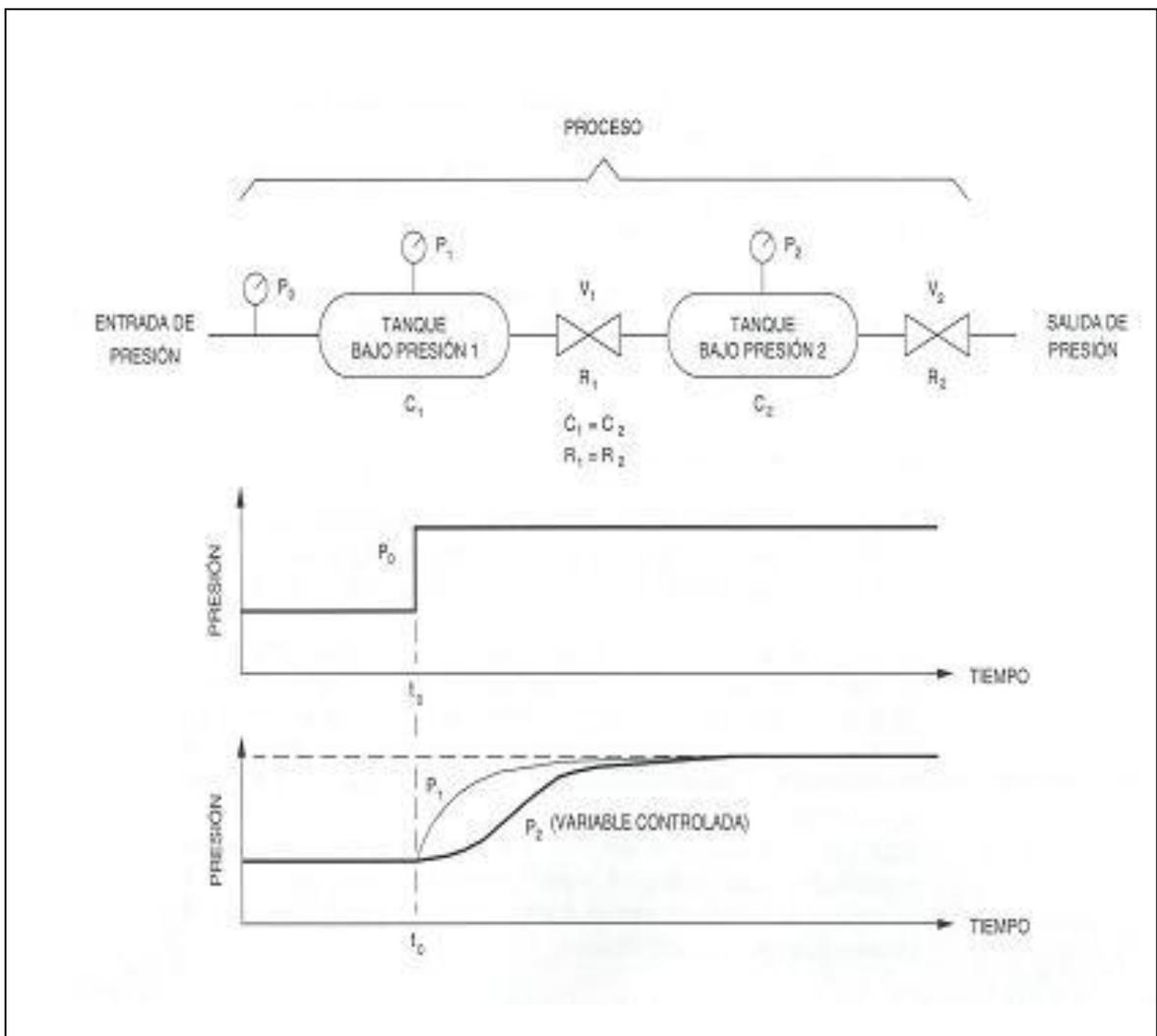


Figura 3. Respuesta típica de un proceso ante una perturbación de la variable manipulada



2.3 Curva de respuesta de un proceso

Los científicos Ziegler y Nichols desarrollaron un método para calcular rápidamente las características de un proceso. Esta técnica permite determinar los ajustes óptimos del controlador a fin de obtener los mejores resultados. Este método consiste en alterar intencionalmente el proceso mediante una perturbación y luego registrar la respuesta de bucle abierto del sistema. Luego se analiza el registro de la variable controlada para determinar las características del proceso. La curva resultante se llama curva de respuesta de un proceso.

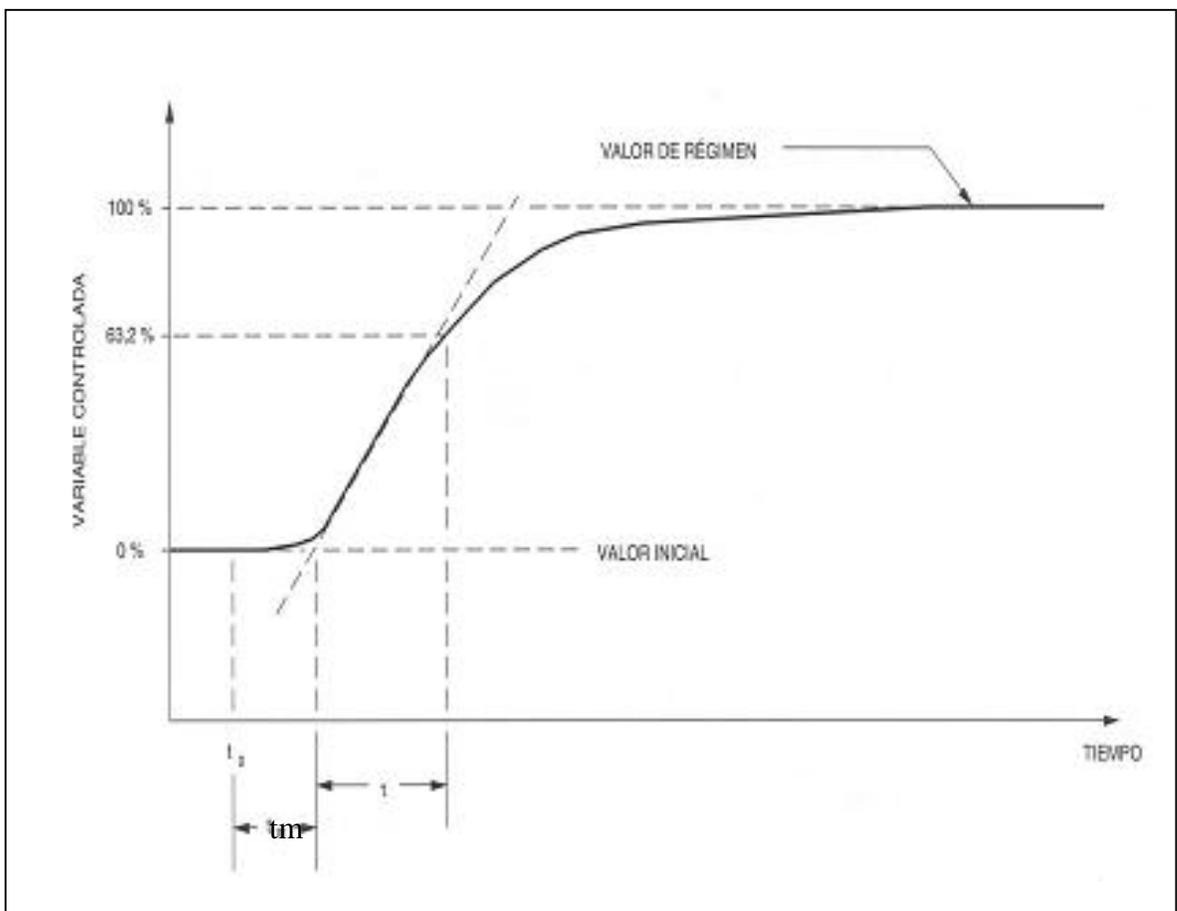
Se necesitan tres parámetros para caracterizar un proceso. Son: ganancia K del proceso, tiempo muerto t_m y la constante de tiempo T .

- § La ganancia del proceso indica cuánto varía la variable controlada ante un cambio de la variable manipulada.
- § El tiempo muerto es el lapso requerido por el proceso para responder a una variación.
- § La constante de tiempo indica el tiempo que toma la variable controlada para alcanzar el 63.2%, de su valor de régimen final.

Para estimar el tiempo muerto y la constante de tiempo se necesita una representación gráfica. La figura muestra el método que se debe seguir. La ganancia del proceso se calcula dividiendo la variación de la variable controlada por la variación de la variable manipulada.

Para los resultados obtenidos con este método sean significativos, la respuesta del sensor a las variaciones debe ser mucho más rápido que la de todo el proceso.

Figura 4. Curva de respuesta de un proceso



Fuente: Adriano Olivera. LD301 Operation & configuration. Pág. 13

2.4 Simbología

Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas dictadas por una o más organizaciones que se dedican a este campo. Una de las más importantes es la “**Sociedad de instrumentos de America ISA**” (Instrument Society of America).

Estas normas tienen como objetivo establecer códigos y símbolos de aplicación para cada instrumento.

Cada instrumento debe identificarse con un sistema de letras y números que lo clasifique funcionalmente. El número de letras y números funcionales debe ser mínimo, deben emplearse letras mayúsculas, se recomienda usar el sistema prefijo – sufijo.

La siguiente tabla muestra las diferentes letras que se utilizan para clasificar los diferentes tipos de instrumentos.

Tabla I. Clasificación de instrumentos por medio de códigos

Primera Letra		Segunda Letra		
Variable medida	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de Modificación
A. Análisis		Alarma		
B. Llama (quemador)		Libre	Libre	Libre
C. Conductividad			Control	
D. Densidad o Peso	Diferencial			
E. Tensión (Fem)		Elemento primario		
F. Caudal	Relación			
G. Calibre		Vidrio		
H. Manual				Alto
I. corriente Eléctrica		Indicación o indicador		
J. Potencia	Exploración			
K. Tiempo			Estación de control	
L. Nivel		Luz piloto		Bajo
M. Humedad				Medio o intermedio
N. Libre		Libre	Libre	Libre
O. Libre		Orificio		
P. Presión o vacío		Punto de prueba		
Q. Cantidad	Integración			
R. Radioactividad		Registro		
S. Velocidad o frecuencia	Seguridad		Interruptor	
T. Temperatura			Transmisión o transmisor	
U. Multivariable		Multifunción	Multifunción	Multifunción
V. Viscosidad			Válvula	
W. Peso o fuerza		Vaina		
X. Sin clasificar		Sin Clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y. Libre			Relé o compresador	Sin clasificar
Z. Posición			Elemento final de control	

Fuente: Tabla de símbolos proporcionada por ISA

La forma de utilizar esta tabla se describe detalladamente a continuación:

1. Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva.

Por ejemplo, la letra N puede representar como primera letra el modelo de elasticidad y como sucesiva un osciloscopio.

2. La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilizan solo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figura en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo XR-3 Registrador de Vibración.
3. Cualquier letra primera se utiliza con las letras de modificación D (diferencial), F (relación) o Q (interpretación) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura, respectivamente.
4. La letra A para análisis, abarca todos los análisis no indicados en la tabla anterior que están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.
5. El empleo de la letra U como multivariable en lugar de una combinación de primera letra, es opcional.
6. El empleo de los términos de modificaciones alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración, es preferible pero opcional.
7. El término seguridad, debe aplicarse solo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal).

Por este motivo, una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV. La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio o válvula de seguridad de alivio.

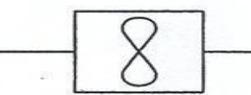
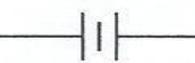
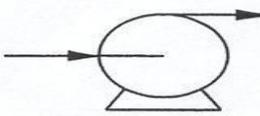
8. La letra de función pasiva vidrio, se aplica a los instrumentos que proporciona una visión directa no calibrada del proceso.
9. La letra indicación se refiere a la lectura de una medida real de proceso. No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.
10. Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva I. Por ejemplo, una luz piloto que indica un periodo de tiempo terminado se designará KI. Sin embargo, si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien alternativamente por una letra única I. Por ejemplo una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse. EI, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL. Suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor, o bien simplemente L.
11. El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación de otras letras es opcional.

12. Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.
13. Los términos alto, bajo y medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.
14. Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre apertura, se definen como sigue:

Alto: indica que la válvula esta, o se aproxima a la posición de apertura completa.

Bajo: Denota que se acerca o esta en la posición completamente cerrada

Lista de instrumentos en forma grafica

Símbolo	Descripción
	Válvula manual normalmente abierta
	Válvula manual parcialmente cerrada
	Válvula manual normalmente cerrada
	Válvula manual de tres vías
	Válvula manual de tres vías
	Válvula solenoide
	Tubo venturi
	Indicador de flujo (rotámetro)
	Sensor de turbina
	Placa de orificio
	Control de velocidad
	Bomba centrífuga

2.5 Variables de proceso

La comprensión y determinación de las variables de proceso es el inicio de la instrumentación y por ende del control automático, convirtiendo su comprensión en fundamental dentro del ámbito de la instrumentación. Para poder realizar un buen control final se deben considerar todas las características que envuelven a cada una de estas variables desarrolladas a continuación:

2.5.1 Presión

Un fluido es una sustancia que tiende a moverse o fluir en respuesta a una fuerza. La presión ocurre cuando una fuerza es aplicada a un volumen de fluido encerrado.

La presión es una fuerza por unidad de área y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósfera, kilogramos por centímetro cuadrado, libras por pulgada cuadrada, pulgadas de agua, pies de agua, metros de agua, etc. En el Sistema Internacional (S.I) está normalizada la presión en pascal, como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean el kilopascal.

Existe diferencias sustanciales entre las diferentes tipos de presión que se pueden determinar por medio de los diferentes instrumentos de medición, dependiendo del proceso y del instrumento la medición a realizar se deberán considerar todos los factores que pueden afectar el resultado de dicha medición.

Dentro de las primeras presiones a determinar se encuentra la atmosférica, la cual es la ejercida por las partículas de la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro.

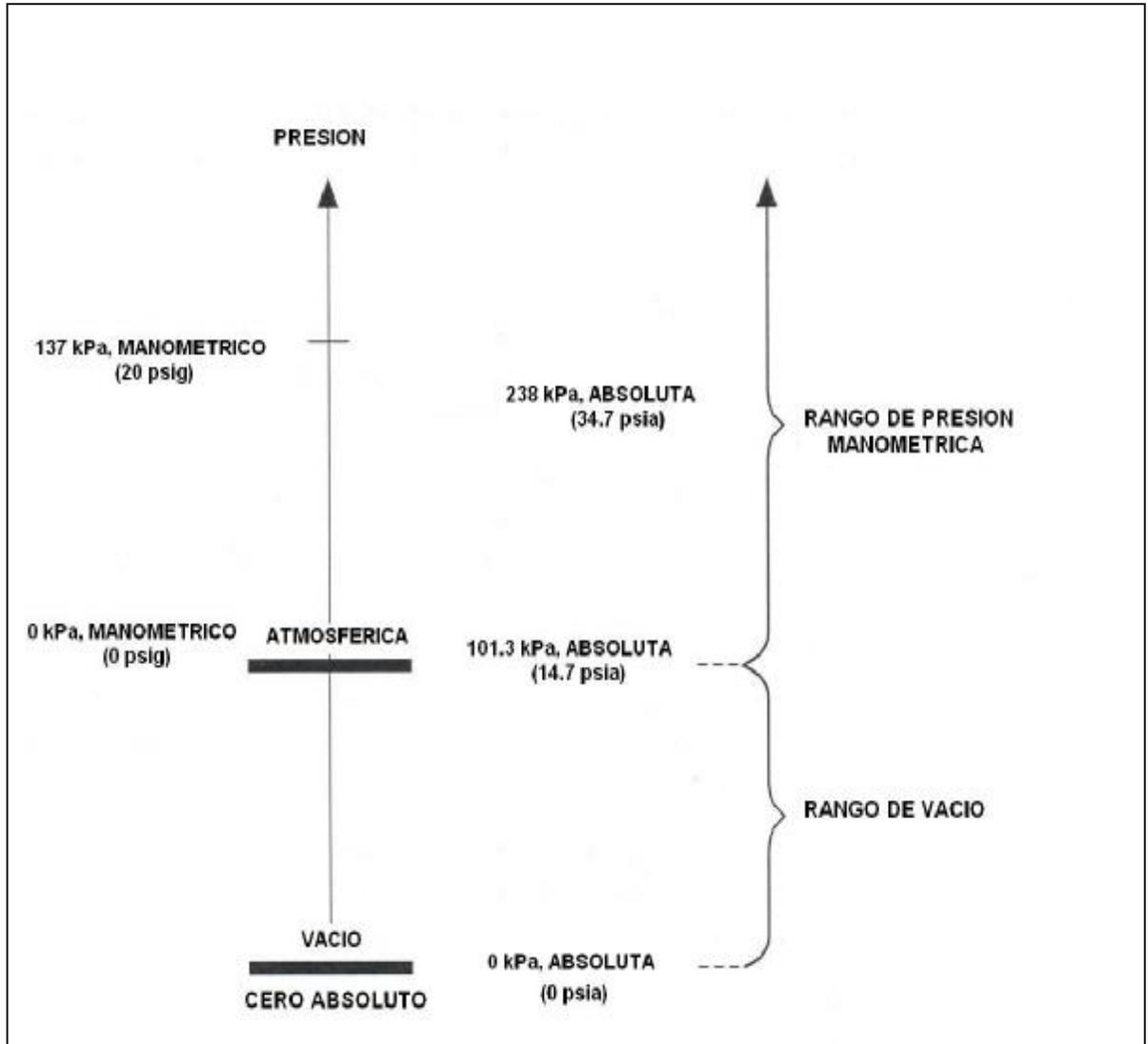
Al nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29.9 pulgadas) de mercurio absoluto ó 14.7 psia (libras por pulgada cuadrada absoluta), estos valores definen la presión atmosférica estándar.

Industrialmente hablando la presión más utilizada es la presión manométrica la cual es la determinada por la diferencia entre la presión absoluta menos la presión atmosférica del lugar donde se efectúa la medición, hay que notar que cuando aumenta la presión atmosférica también aumenta la presión leída por el instrumento, sin embargo esto es despreciable al medir altas presiones. La presión diferencial es la diferencia entre dos presiones, presión 1 (P1) menos presión 2 (P2).

Al igual que estas dos presiones se considera una presión negativa o vacío el cual se considera como la diferencia entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, el vacío es la presión medida por debajo de la presión atmosférica, viene expresado en milímetros columna de mercurio (mmHg), milímetros columna de agua (mm“H2O). Las variaciones en la presión atmosférica influyen considerablemente en las mediciones de vacío).

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la figura siguiente muestran las diferentes clases de presión que lo instrumentos miden comúnmente.

Figura 5. Clases de presión



Fuente: Adriano Olivera. LD301 Operation & configuration. Pág. 45

2.5.1.1 Instrumentos para medir presión

La medición de presión siempre se hace con respecto a un punto de referencia. La presión manométrica se hace con referencia a la presión atmosférica. Una medición manométrica representa un nivel sobre la presión atmosférica, que es 0 psig.

La medición de presión absoluta se hace sobre vacío absoluto o ausencia total de presión que es 0 psia.

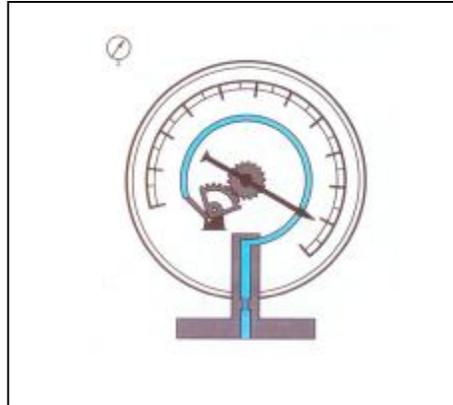
Todas la mediciones de presión son diferenciales aunque éstas esencialmente están referenciadas a un punto constante de presión.

Un medidor de presión diferencial toma la medición de dos puntos de presión en los que ninguno es necesariamente constante y la medición que interesa es la diferencia entre estas dos presiones. Uno de los instrumentos de medición más conocidos es el manómetro

Manómetro (sistema bourdon)

Al entrar el aire en el tubo elástico, la presión se reparte homogéneamente. La diferencia de presión entre la superficie exterior A y la superficie interior B produce una fuerza mayor en la superficie exterior, con lo que se produce una deformación elástica. El consiguiente movimiento es transmitido a una aguja indicadora mediante una palanca, un segmento de ruedas dentadas y un piñón.

Figura 6. **Manómetro (sistema bourdon)**

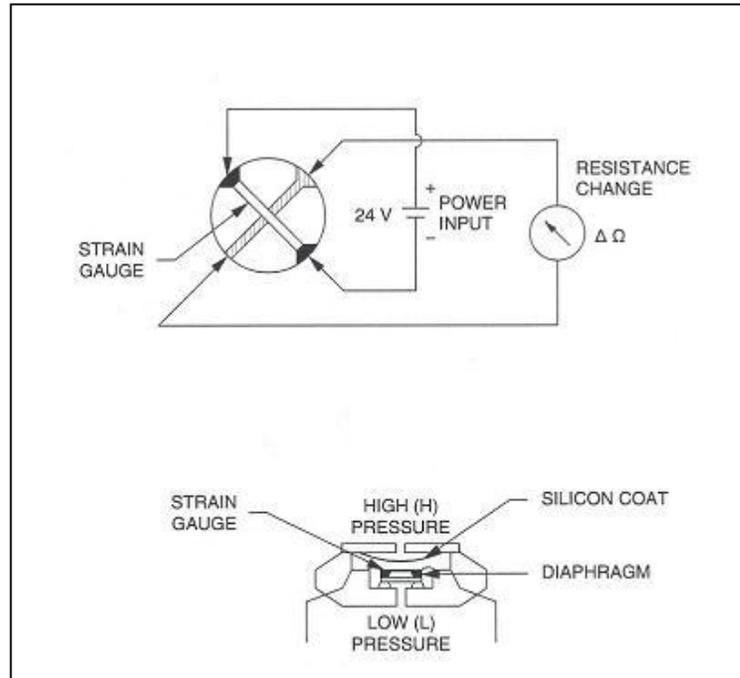


Fuente: Adriano Olivera. **LD301 Operation & configuration. Pág. 18**

Transmisor de presión diferencial (strain gauge)

Consiste en dos elementos básicos: Un elemento primario llamado strain gauge que censa la presión y la convierte proporcionalmente a una resistencia eléctrica. El elemento secundario convierte la resistencia eléctrica en voltaje o corriente que es aceptable para transmitirlo al controlador.

Figura 7. Transmisor y sensor de presión diferencial (stranig gauge)



Fuente: Adriano Olivera. **LD301 Operation & configuration. Pág. 28**

También existen de: un elemento capacitivo variable que convierte la presión en una señal de salida. Se transmite la señal por un diafragma aislante y el fluido de relleno hasta el diafragma sensor. La presión de referencia la siente el otro lado y el cambio en capacitancia generado por ambos lados envía una señal a través de los alambres y hacia el transmisor que los amplifica y cambia a una señal estándar.

2.5.2 Fluidos

Un fluido es una sustancia que tiende a mover o fluye en respuesta a una fuerza. Para poder comprender plenamente lo que es la mecánica de fluidos se deben tener claros ciertos conceptos relacionados con el tema.

Para empezar se definirá la densidad de la masa como la masa del fluido está dada en unidad de volumen. Es medida en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) en el S.I. y libras masa por pies cúbicos (lbm/pie^3) en U.S. Se dice también que la gravedad específica es la relación de la densidad de la masa de un fluido por la densidad de la masa igual al volumen de referencia del fluido.

Se definirá de la misma manera viscosidad dinámica como el grueso del fluido y como este fácilmente fluye. Está dada en pascal-segundo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) en el S.I. y el U.S. en libras-fuerza por pies-segundo ($\text{lbf/pies}\cdot\text{s}$). Y por último pero así no menos importante se define la presión de vapor como, una medida de cómo el fluido es volátil. Presión de vapor corresponde a la presión desarrollada por el fluido cuando este fluye en una tubería a una temperatura dada y el fluido en equilibrio. Está dada en kilopascal, absoluto (kPa , absoluto) en el S.I. y libras por pulgada cuadrada absolutas (psia) en el U.S.

Existen además tres tipos de fluidos laminar, transitorio o turbulento. Definiendo cada uno de estos de la siguiente manera; se define un fluido laminar donde las partículas del fluido se mueven suavemente y ordenadamente a lo largo sin turbulencia. A un fluido transitorio cuando el fluido cambia de laminar a turbulento. Las partículas del fluido se mueven de una capa a otra in una dirección transversal a la dirección del flujo. Y un fluido turbulento cuando las partículas se mueven irregularmente a lo largo, causando que el flujo sea completamente aleatorio. En éste las moléculas de fluido golpean la tubería.

Un flujo turbulento es más probable que ocurra en procesos donde el diámetro de la tubería es relativamente pequeño, la viscosidad del fluido es baja y la velocidad del fluido es alto.

El tipo de fluido se determina mediante algunas características como, gravedad específica, viscosidad, velocidad y depende del diámetro del orificio del componente. Este está dado por Reynolds determina si el fluido a través de un componente es laminar, transitorio o turbulento.

$$Re = \frac{v * \rho * D}{\mu} \quad (\text{Ec. 14})$$

donde;

Re = número Reynolds

v = velocidad del fluido (m/s o pies/s)

ρ = densidad del fluido (kg/m³ o lbm/pies³)

D = diámetro del orificio del componente (m o pies)

μ = viscosidad del fluido (Pa*s o lbf/pies*s)

Si el número Reynolds es menor que 2,000, el flujo es laminar. Si está entre 2,000 y 4,000 es transitorio y si es más grande que 4,000 el flujo es turbulento.

2.5.2.1 Pérdida de presión

Sólo existe pérdida de presión cuando el fluido está en movimiento. Los factores que determinan la cantidad de pérdida de presión causada por un componente dependen del tipo de fluido a través del componente.

Con flujo laminar, la pérdida de presión es directamente proporcional al flujo, la viscosidad del fluido y si el componente está en una tubería, a lo largo de la tubería. La pérdida de presión es inversamente proporcional al diámetro del orificio del componente.

Con flujo turbulento, la pérdida de presión depende de los mismos factores del régimen laminar, pero esto es adicionalmente afectado por la aspereza de la superficie interna del componente. En la gráfica número cuatro se muestra la relación entre el flujo y la pérdida de presión a través de una tubería de acero de 0.5 pulgadas de diámetro. La curva muestra que al incrementarse el flujo, la pérdida de presión incrementa. La pérdida de presión incrementa más conforme el flujo es más alto. Esto indica que la curva es una parábola. Esto ocurre porque la pérdida de presión es proporcional al cuadrado del flujo.

Figura 8. Pérdida de presión Vrs. Curva de flujo de una tubería de acero de 0.5 pulgadas

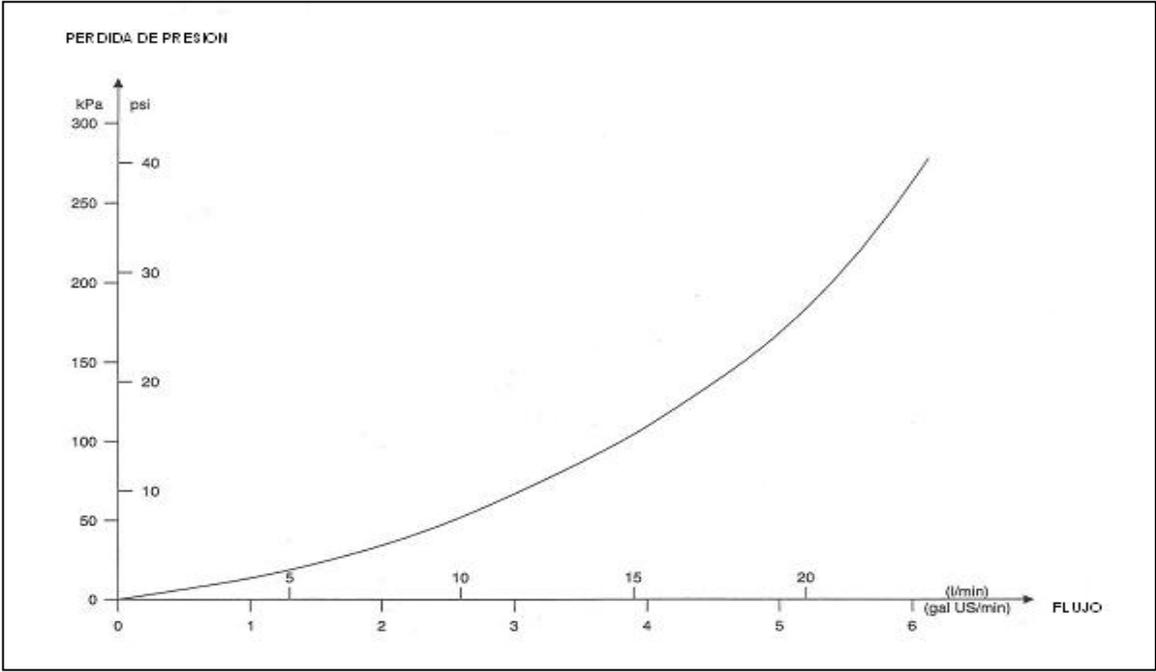
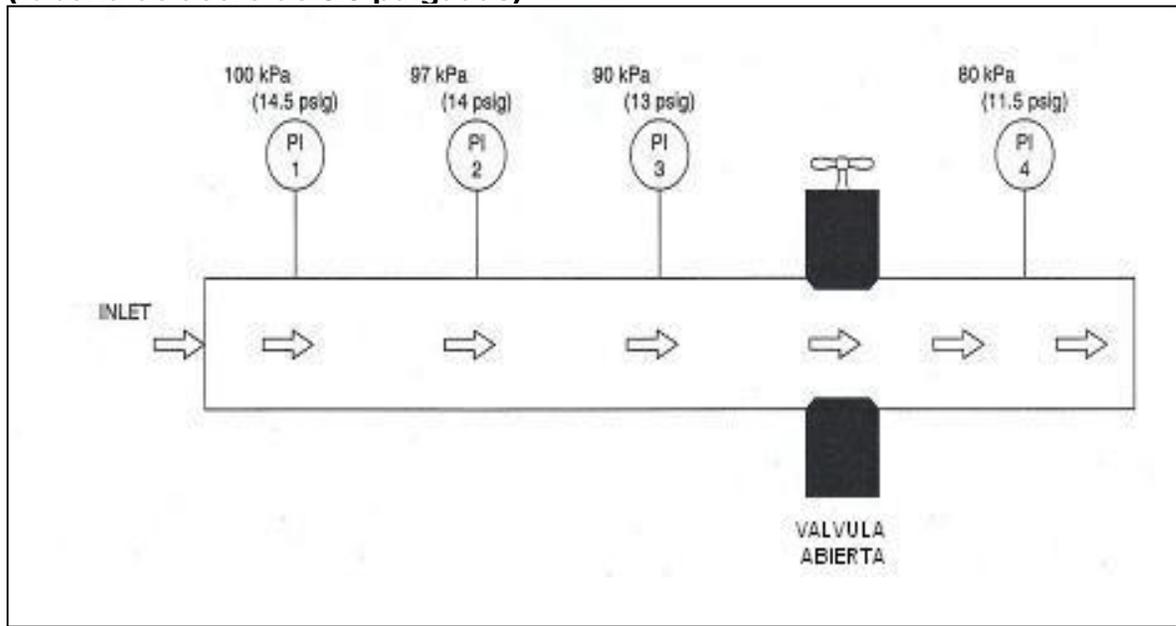
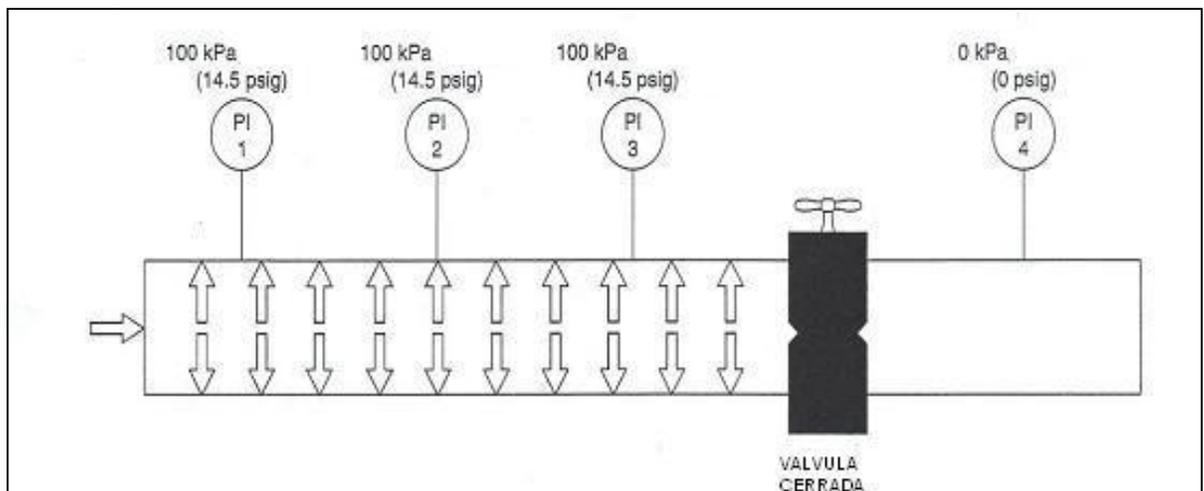


Figura 9. Relación entre pérdida de presión y curva de flujo
(tubería de acero de 0.5 pulgadas)



Fuente: Adriano Olivera. LD301 Operation & configuration. Pág. 30

Figura 10. Válvula cerrada (fluido estático)



Fuente: Adriano Olivera. LD301 Operation & configuration. Pág. 30

2.5.2.2 Instrumentos (Medidores de flujo volumétrico)

Dentro de los diferentes medidores volumétricos se encuentran los más comunes dentro de las industrias nacionales, los medidores de área variable o Rotámetro:

Rotámetro

Son medidores en los cuales un flotador cambia su posición, dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. Es importante notar que las graduaciones en un rotámetro son válidas solamente por la densidad y gravedad específica.

Ventajas y Limitaciones

- § Son fáciles de usar y costo relativamente bajo
- § Causan una pequeña pérdida de presión
- § No requieren de fuente para operar
- § Sólo pueden operar en posición vertical
- § Fluidos limpios y sucios
- § Precisión $\pm 1\%$ a $\pm 10\%$ de la escala completa

Elemento Rotatorio

Medidor de flujo de paleta

Este medidor produce una señal directamente proporcional al flujo. Como indica en la figura este transmisor consiste en dos elementos primario y secundario.

El elemento primario consiste en una rueda de paleta la cual es insertada directamente en la dirección del flujo. Esta es rotada por el movimiento del líquido. Conforme la rueda de paleta gira, estas paletas interrumpen repetidas veces un rayo de luz infrarrojo, causando un pulso al ser producido. La frecuencia de esta señal es directamente proporcional a la velocidad de las paletas y por lo tanto al flujo del líquido.

El elemento secundario convierte la frecuencia de la señal del pulso a un voltaje y corriente proporcional en este caso 0- 5 voltios y 4 – 20 mA.

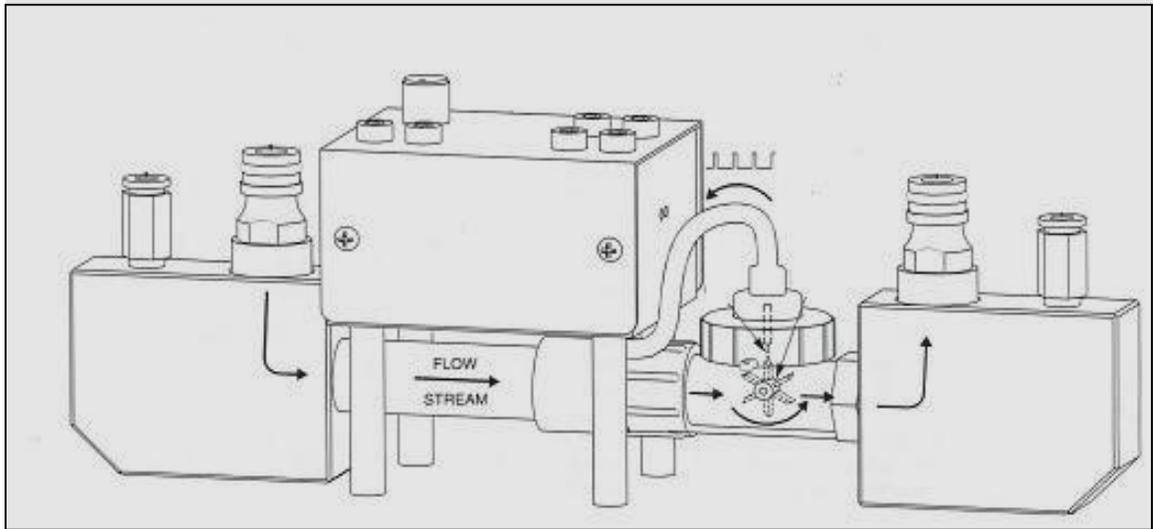
El transmisor tiene también dos salidas que son: f y F, las cuales son utilizadas para calibración.

Ventajas y limitaciones

Tienen una alta repetibilidad, una velocidad de respuesta rápida, son fáciles de instalar, permiten la medición del flujo en largas tuberías y son relativamente pequeños en tamaño y peso comparados con los transmisores de presión diferencial.

Sin embargo estos medidores están sujetos al desgaste y ellos tienen una mala linealidad en flujos bajos. Además no son recomendados para mediciones con líquidos viscosos o sucios.

Figura 11. **Medidor de flujo de paleta**



Fuente: Adriano Olivera. **LD301 Operation & configuration. Pág. 52**

Presión Diferencial

Daniel Bernoulli estableció la relación entre la velocidad y presión de un líquido. Él encontró que cuando un líquido fluye a través de una restricción, éste acelera, la energía de ésta aceleración empieza a obtener presión estática. Consecuentemente, la presión del líquido cae con la restricción. Cuando el líquido sale de la restricción, este desacelera, causando que incremente la presión. Este principio es llamado principio de Bernoulli.

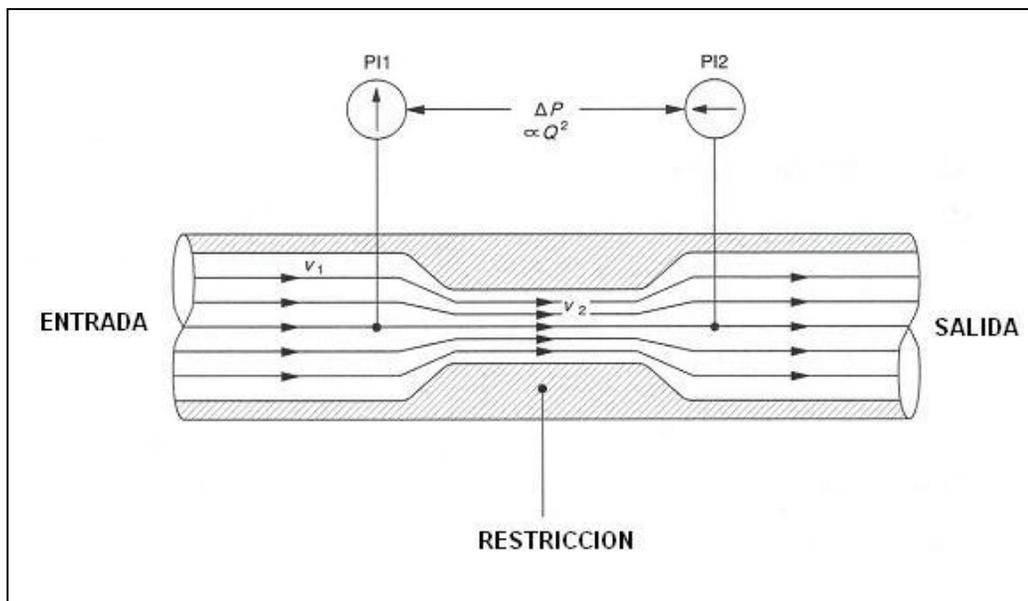
Placa de orificio

Es una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal. Una pérdida de carga de 60% a 80% de la presión diferencial.

$$\Delta P \propto Q^2 \quad (\text{Ec. 15})$$

La figura muestra la señal producida por el transmisor de presión conectado a la restricción. La relación entre el flujo y la caída de presión no es lineal, es una parábola, esto indica que el incremento de la pérdida de presión es más rápido cuando el flujo es mucho más alto. Esto provoca una desventaja en los transmisores de presión porque tienden a ser menos inexacto. Otro problema con esta relación es que algunas funciones de los controladores como: integración, adición y substracción requieren una señal lineal para obtener un control satisfactorio.

Figura 12. **Placa de orificio**



Fuente: Adriano Olivera. **LD301 Operation & configuration. Pág. 24**

Estos problemas pueden solucionarse linealizando la señal producida por el transmisor. Una característica importante es el valor β es:

$$\beta = d/D \quad (\text{Ec. 16})$$

donde

d = diámetro del orificio

D = diámetro interno de la tubería de la parte anterior de la placa.

La pérdida de carga va depender del valor β . Este es inversamente proporcional a la pérdida de carga.

Ventajas y limitaciones:

- § Fluidos limpios
- § Líquidos sucios, pueden tener algunos sólidos
- § Pérdida de presión media
- § Precisión ± 2 a $\pm 4\%$ de la escala completa
- § Diámetros requeridos: 30 antes y 10 después
- § Se requiere de grandes distancias rectas
- § Son inexactas por debajo del 30% del caudal calculado
- § El valor β (d/D) debe estar entre 0.52 y 0.75
- § Su exactitud depende de la presión temperatura y densidad del fluido
- § Costo relativamente bajo

Tubo Venturi

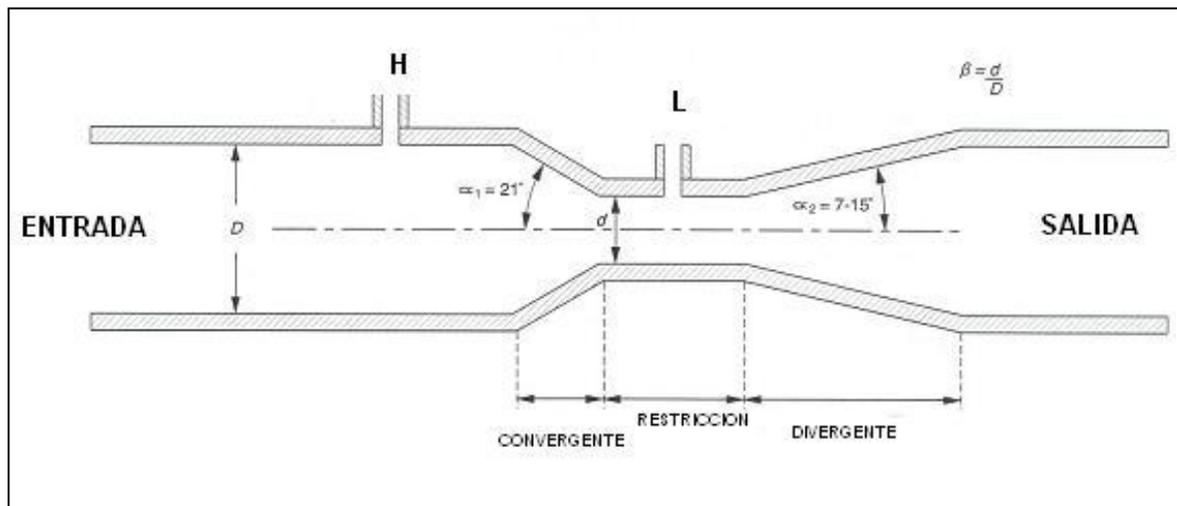
Permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20% de la presión diferencial.

Como en la placa de orificio, el tubo venturi tiene una característica β . La pérdida de carga depende el valor β y el ángulo de divergencia. El ángulo de divergencia es proporcionalmente a la pérdida de carga.

Ventajas y limitaciones

- § Fluidos limpios
- § Líquidos sucios, pero no con sólidos
- § Pérdida de presión media
- § Precisión $\pm 1\%$ del rango calibrado
- § Diámetros requeridos: 20 antes y 10 después
- § Costo relativamente alto.

Figura 13. **Tubo venturi**



Fuente: Adriano Olivera. LD301 Operation & configuration. Pág. 25

Tensión inducida

Medidor magnético

Se basa en el principio de la ley de inducción electromagnética de Faraday. La magnitud del voltaje inducido E es directamente proporcional a la velocidad del conductor V , al diámetro del conductor D y a la fuerza del campo magnético.

Las bobinas colocadas en lados opuestos del tubo generan un campo magnético. El líquido del proceso que es conductivo se mueve a través del campo con una velocidad promedio V . Los electrodos sensan el voltaje inducido, el ancho del conductor está representado por la distancia entre los electrodos. Lleva un aislante conocido como Liner para evitar que la señal generada sea cortocircuitada por la pared metálica del tubo.

Ventajas y limitaciones

- § Fluidos limpios y sucios
- § Líquidos conductivos, viscosos y con sólidos
- § Pérdida de presión ninguna
- § Precisión $\pm 0.5\%$ del rango calibrado
- § Costo relativamente alto

Torbellino (vórtex)

Está basado en el principio del derramamiento de vórtices, conocido como el efecto Von Kaman.

Cuando el fluido pasa a través de la cuña, éste se separa y genera pequeños remolinos o vórtices, que se forman a lo largo de cada lado de la cuña. Estos vórtices causan fluctuaciones de presión que son detectadas por un sensor. La frecuencia de generación de vórtex es proporcional a la velocidad del fluido.

2.5.3 Nivel

Se dice que es la medición de la altura de un material (líquido o sólido) en un depósito, sobre una línea de referencia.

En todas las industrias la medida de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento del proceso como del balance adecuado de materias primas o productos finales.

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, midiendo la presión hidrostática, midiendo el desplazamiento de un flotador dentro del propio líquido aprovechando características físicas del líquido. Los instrumentos que miden el nivel directamente se dividen en: nivel de cristal e instrumentos de flotador.

Los instrumentos que miden el nivel por presión hidrostática se dividen en: medidor manométrico, medidor de membrana, medidor de presión diferencial de diafragma. Los instrumentos que utilizan características físicas del líquido se clasifican en: medidor resistivo, medidor conductivo, medidor de radiación.

2.5.3.1 Instrumentos

Medidor de Cristal

Consiste en un tubo de vidrio con sus extremos conectados a bloques metálicos con prensa estopas y conectados a tanque generalmente por válvulas, la lectura del nivel se efectúa por reflexión o por transferencia.

Ventajas y Desventajas

La seguridad que ofrece en la lectura del nivel del líquido pudiendo controlar con ellos la lectura de los otros tipos de aparatos de nivel. Sólo se tiene indicación local. Son susceptibles de ensuciarse por las características del líquido que miden.

Sensores tipo flote

Consiste en un flotador situado en el seno del líquido y conectado al exterior del depósito indicando directamente el nivel.

Aplicaciones

Tanques de gran capacidad como los fuel – oil y gas – oil.

Inconvenientes

Las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse. El tanque no puede estar sometido a presión. El flotador debe mantenerse limpio

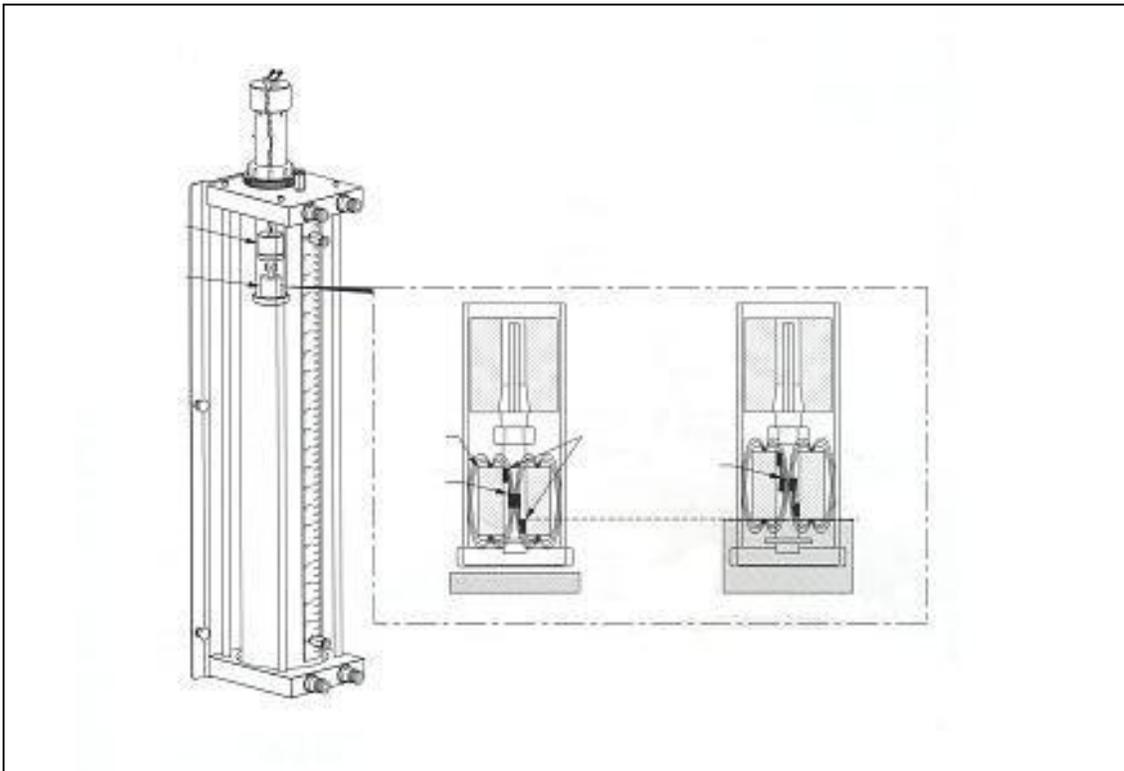
Flota switch

Construcción y operación. Consiste en 2 partes básicas: El flotador y serie de contactos. Ver figura 10.

Cuando el nivel de agua en la columna esté abajo del flotador, el switch está desactivado. En esta condición, el flotador está en reposo y el imán está energizado, consecuentemente el contacto está cerrado.

Cuando el nivel de agua incrementa en la columna y alcanza la activación del switch del flotador, el imán se desenergiza, causando que el contacto se abra.

Figura14. Flota switch



Sensores de nivel por presión

Manométrico

Consiste en un manómetro o un transmisor de presión manométrica conectado directamente a la parte inferior del tanque, el manómetro mide la presión debida a la altura h del líquido que existe entre el nivel del tanque y el eje del manómetro, el instrumento sólo sirve para líquidos limpios ya que con líquidos corrosivos el manómetro se destruye y con líquidos sucios se tapa, además se puede usar sólo en tanques abiertos y la medición del nivel está afectada por las variaciones de la densidad del líquido.

Medidores de presión diferencial

Consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del depósito, en un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido y a su gravedad específica.

En el caso en que el tanque esté cerrado y bajo presión hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido perdiendo precisión, se suele conectar un tubo a la parte superior del tanque y medir la presión diferencial entre la toma inferior y la superior, cuando los gases de la parte superior del tanque son condensables la toma superior tendrá mayor presión que la inferior, por lo tanto habrá que cambiar las conexiones del instrumento ya que sino indicará bajo cuando esté alto y viceversa.

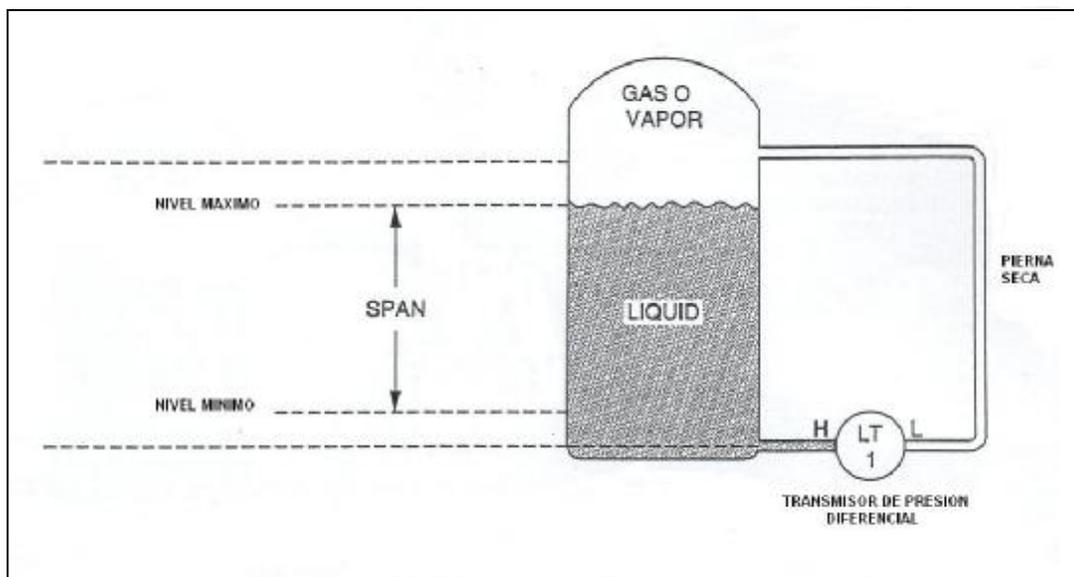
La línea de presión baja del transmisor es llamado pierna de referencia. Hay 2 piernas de referencia usado en el proceso industrial.

Pierna Seca

No contiene líquido, así que la presión del gas o vapor en el tanque, es aplicado directamente al lado bajo del transmisor, (ver figura). La salida del transmisor varia directamente proporcional al nivel de líquido.

Cuando hay condensación de gas o vapor y se expone a la toma baja del transmisor la presión hidrostática varía, causando una medición errónea.

Figura 15. **Pierna seca**



Fuente: Adriano Olivera. **LD301 Operation & configuration. Pág. 42**

Pierna húmeda

Cuando hay mucha condensación de gas o vapor se utiliza pierna húmeda.

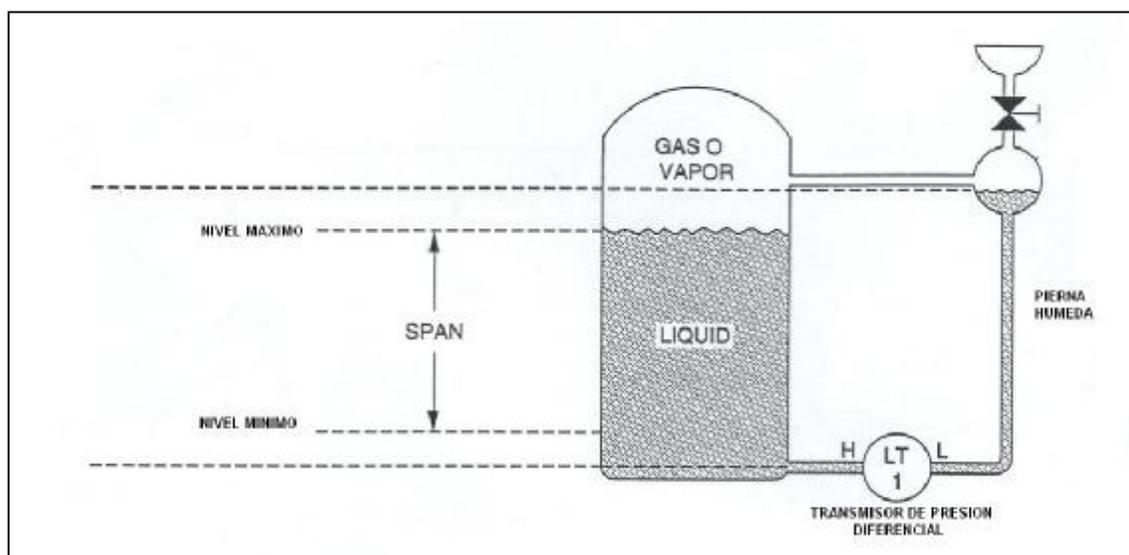
Se instala una botella en la parte alta de la pierna para que ésta se mantenga siempre llena. Ver figura No. 12.

Al calibrar el transmisor utilizado con pierna húmeda hay que tomar en cuenta el peso específico del líquido.

La salida del transmisor varía directamente proporcional al nivel del líquido.

El transmisor puede ser localizado abajo o arriba del nivel de referencia. En esta aplicación, el transmisor debe de ser calibrado tomando en cuenta la supresión o elevación del sensor.

Figura16. **Pierna húmeda**

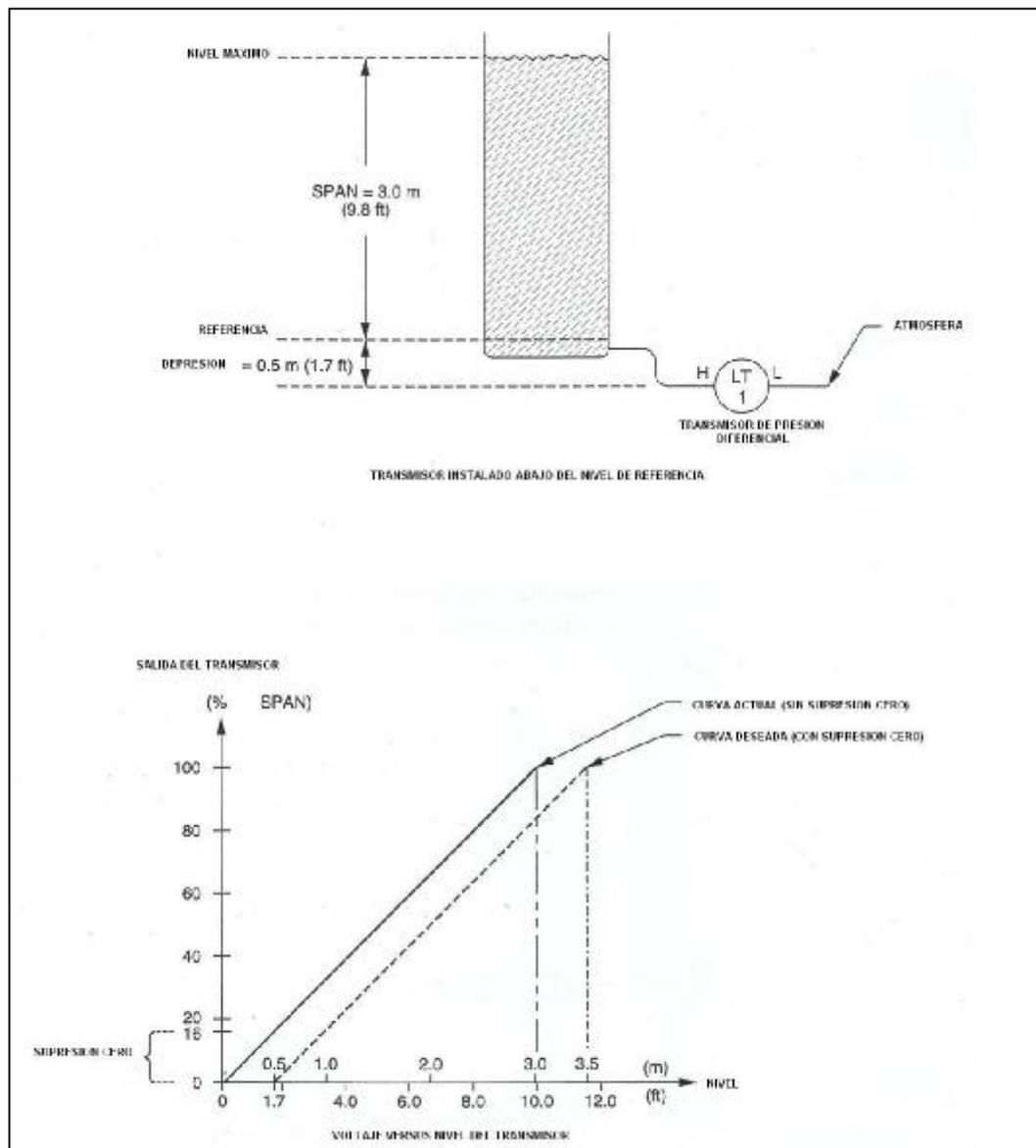


Fuente: Adriano Olivera. **LD301 Operation & configuration. Pág. 43**

Suspensión del cero

El sensor está localizado abajo del nivel de referencia.

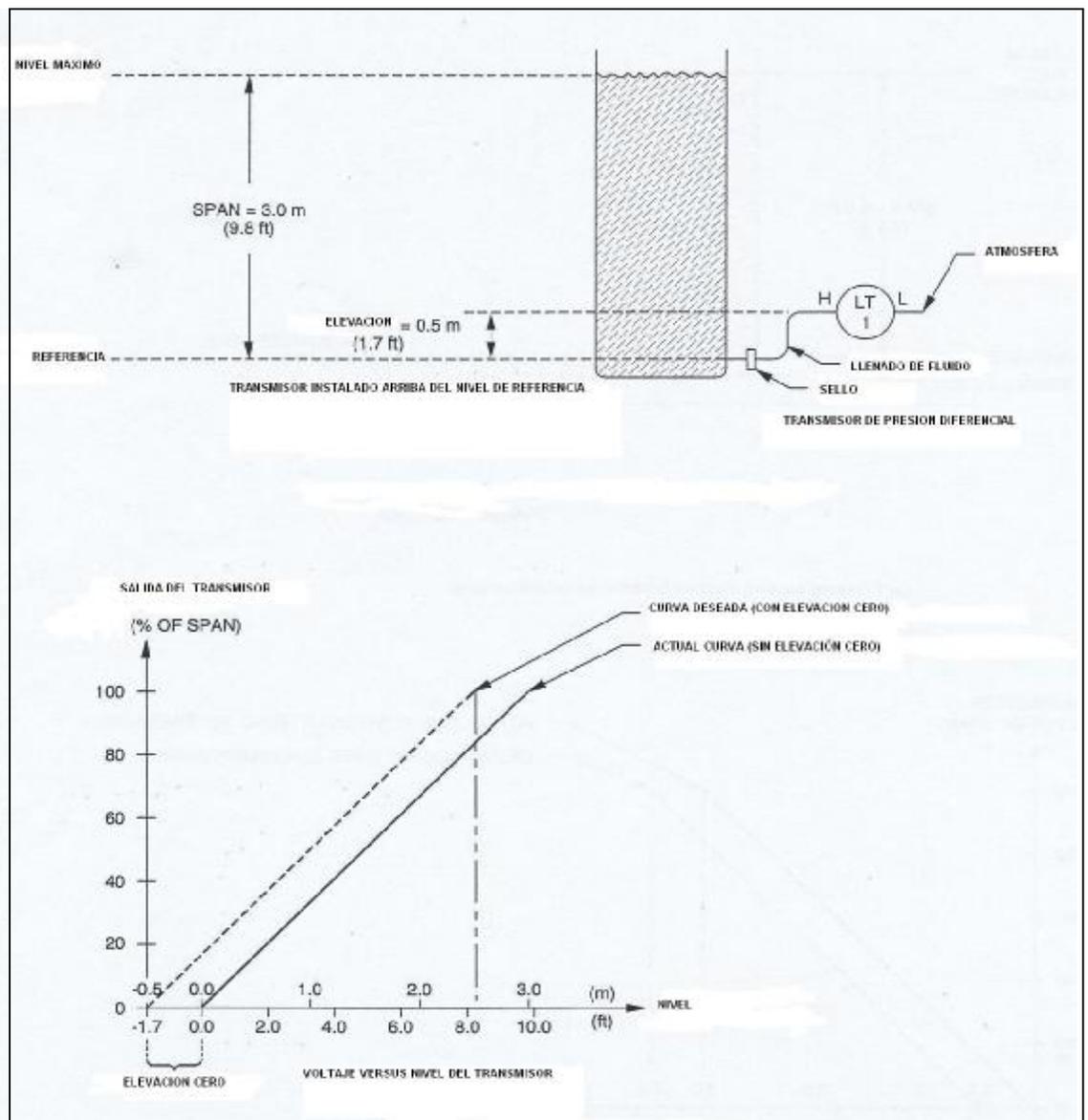
Figura17. Suspensión del cero



Elevación de cero

En algunas aplicaciones el sensor está localizado arriba del nivel de referencia.

Figura18. Elevación de cero



La ecuación que relaciona el nivel del líquido de un depósito, h, con la presión hidrostática del líquido, Pg, es la siguiente:

S.I.

$$h = \frac{P_g * 1000 \text{ Pa/kPa}}{\rho * g} = \frac{P_g * 0.102 \text{ m/kPa}}{SG} \quad (\text{Ec. 17})$$

donde;

h = nivel del líquido (m)

Pg = presión hidrostática del líquido (kPa)

ρ = densidad del líquido (kg/m³)

g = gravedad (m/s²) SG = gravedad específica del líquido

U. S.

$$h = \frac{P_g * g_c * 1728 \text{ in}^3/\text{ft}^3}{\rho * g} = \frac{P_g * 2.31 \text{ ft/psi}}{SG} \quad (\text{Ec. 18})$$

donde;

h = ft

Pg = psig

gc = lbm*ft/lbf*s²

ρ = lbm/ft³

g = ft/s²

1 kPa corresponde a una columna de agua de 0.102 m en 15.5 grados centígrados. Y 1 psi corresponde a una columna de agua de 2.31 ft en 60 grados farenheith.

Esta ecuación nos indica que el nivel del líquido varía directamente proporcional a la presión hidrostática del líquido. Ya que la temperatura y la densidad del líquido permanece constante en el depósito.

Un cambio en la temperatura o densidad del líquido necesita recalibración el transmisor. Por ejemplo, un líquido al incrementar la temperatura, la densidad del líquido disminuye pero incrementa el volumen, consecuentemente, el nivel del líquido incrementará causando que el transmisor de presión diferencial indique un nivel más bajo que el nivel actual.

Cálculo de valores de calibración para tanque abierto (Ec. 19)

$$\text{Span} = A * G$$

$$\text{Rango bajo} = S * G$$

$$\text{Rango alto} = (S * G) + (A * G)$$

donde

A = altura máxima del nivel

S = altura entre la conexión del transmisor y el nivel mínimo a medir

G = peso específico del fluido

Cálculo de valores de calibración para tanque cerrado (Ec. 20)

$$\begin{aligned}\text{Span} &= A * Gt \\ \text{Rango bajo} &= (S * Gt) - (E * Gs) \\ \text{Rango alto} &= (A + S) Gt - (E * Gs)\end{aligned}$$

donde;

A = altura máxima de nivel

S = altura entre la conexión del transmisor y el nivel mínimo a medir

Gt = peso específico del líquido en el tanque

Gs = peso específico del líquido en la pierna

E = altura de la pierna

2.5.4 Temperatura

Es la medida de calor asociada con el movimiento de las moléculas de una sustancia.

Es una escala de medición de la energía calorífica. En términos simples, la temperatura es la medición de que tan caliente o que tan frío está determinada sustancia.

Cuatro escalas de temperatura se encuentran en la instrumentación y control industrial: Fahrenheit, Celsius, Ranking y Kelvin.

Sensores para la medición:

- Termómetros
- Termocoplas
- RTD

2.5.4.1 Instrumentos

Termómetros

Sistemas térmicos a base de presión de vapor. Trabaja con el principio del tubo Bourdon. Parcialmente está lleno con un líquido volátil y de vapor. Opera en base a la presión del vapor.

En los sistemas térmicos a base de presión de vapor el líquido (mercurio, hidrocarburo inerte, xileno) se expande cuando se incrementa la temperatura, entonces, la presión en el tubo Bourdon aumenta y da como resultado el movimiento de él.

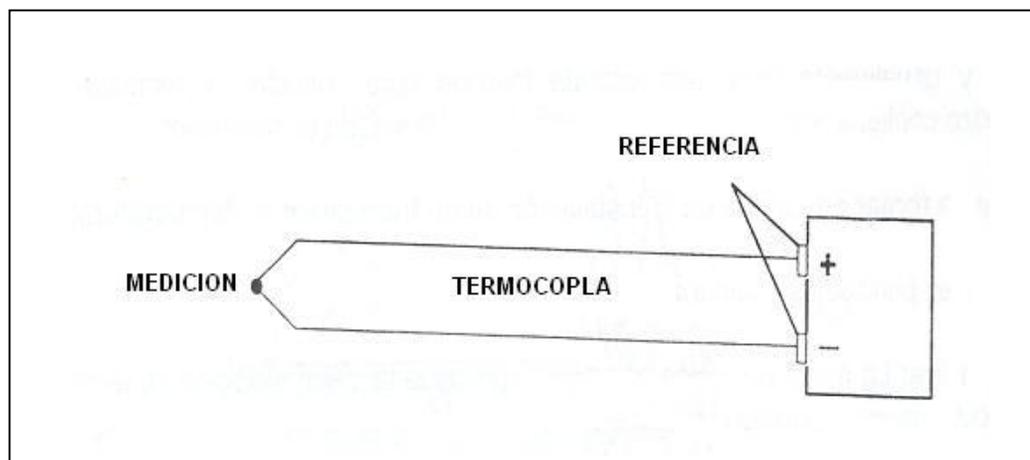
Termocoplas

Está compuesta por dos partes principales una unión de referencia o unión fría, que va en el transmisor y una unión de medición que va en el proceso. La diferencia de temperatura entre estos dos puntos genera una señal en milivoltios medida por el transmisor. El cable de termocoplas se usa a veces para llevar la señal de bloque de terminales al transmisor y debe tener las mismas características de la termocopla.

Ventajas y limitaciones

- Sensibles al ruido.
- Amplio rango.
- Costo bajo.

Figura 19. **Termocopla**



Fuente: Adriano Olivera. **TT301 Operation & configuration. Pág. 65**

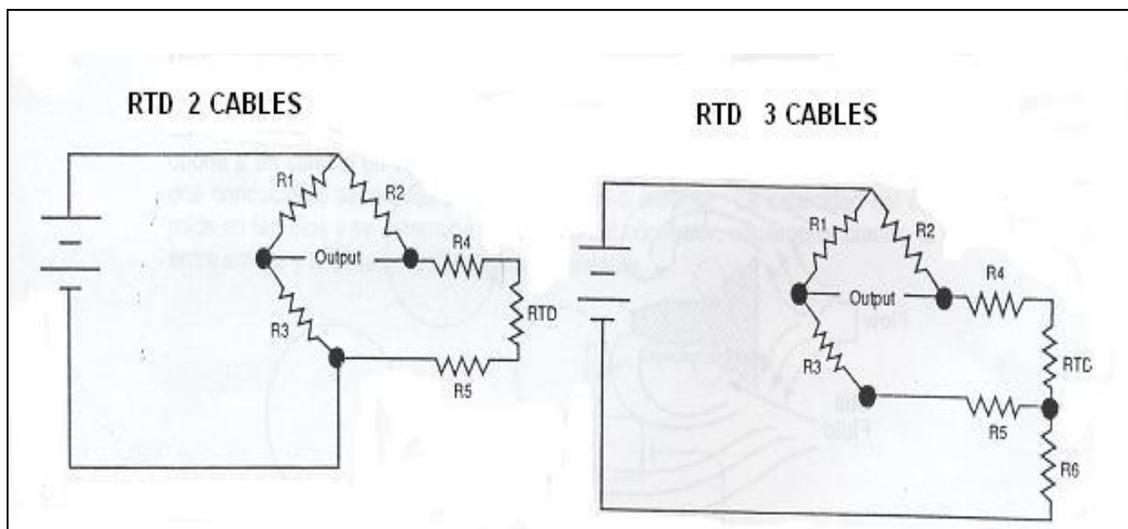
RTD

Los detectores de temperatura por resistencia o RTDs funcionan basados en el principio físico que un material metálico variará su resistencia con relación a la temperatura.

Hay de muchas formas y configuraciones de acuerdo a su uso.

Usualmente las RTDs se conectan a un circuito de puente de Wheatstone, en el cual las demás resistencias determinan el cero y el span. Para evitar problemas de exactitud derivados de larga distancia en los cables es a veces necesario colocar una tercera resistencia, que compensará por inexactitudes resultantes de los cables. Como R4 y R5 tienen la misma temperatura y longitud, los cambios en resistencia se cancelan. La corriente que fluye por R6 no del balancea el puente.

Figura 20. RTD's



Fuente: Adriano Olivera. **TT301 Operation & configuration. Pág. 67**

Los metales más utilizados son platino, níquel y cobre.

Ventajas y limitaciones

- Buena sensibilidad.
- Buena estabilidad.
- Buena exactitud.
- Tiempo de respuesta lento.
- Costo alto.

2.6 Transmisores

Los transmisores son instrumentos que captan la variable del proceso y la transmiten a distancia a otro instrumento receptor que puede ser un indicador, registrador, controlador o una combinación de estos.

Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática normalizada de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada).

Los transmisores electrónicos emplean la señal normalizada de 4-20 mA, se puede usar a distancias de 200 m hasta 1Km, todavía pueden encontrarse transmisores que envían señales de 1-5 V, 10-50 mV, 1-5 mA, 0-20 mA, utilizados antes de la normalización de 4-20 mA.

La señal 4-20 mA al ser continua y no alterna elimina la posibilidad de captar ruido, esta libre de corrientes parásitas, emplea sólo dos hilos que no necesitan blindaje. La relación 4-20 es la misma que la relación 3-15 y el nivel mínimo seleccionado de 4 mA elimina el problema de corrientes residuales al desconectar circuitos electrónicos y además permite detectar una avería por corte de un hilo.

El microprocesador se utiliza en los transmisores por las ventajas de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, confiabilidad, precio cada vez más competitivo y por ser capaz de realizar cálculos adicionales dentro del propio transmisor.

Los controladores reciben las señales procedentes de los transmisores las indica y/o registra. Los controladores envían otra señal de salida, normalmente de 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA en señal eléctrica de corriente. Esta señal de salida actúa sobre el elemento final de control.

El elemento final de control es que recibe la señal del controlador y modifica la variable que esta bajo el control, puede ser una válvula, un servomotor, un cilindro, etc.

La válvula de control realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida. Para esto se comporta como un orificio que varía continuamente su área.

Una válvula de control se compone básicamente del cuerpo y un servomotor. El servomotor está constituido por el actuador y el posicionador, su función es proporcionar la fuerza necesaria para regular la apertura de la válvula.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador o tapón y el asiento (lo que constituye el "trim").

Para que una válvula de control cumpla con su función adecuadamente, debe además de regular el flujo, tener capacidad de manejar el flujo máximo, no tener fugas, cumplir con los requerimientos de hermeticidad cuando esta cerrada, soportar la presión, temperatura, erosividad y abrasividad del fluido que maneja y además contar con las conexiones adecuadas para unirse con la tubería.

Los actuadores de válvulas de vástago corredizo se instalan en la parte superior de la válvula y suministran el movimiento vertical que acciona el vástago y el tapón de la válvula. Pueden ser de diafragma y resorte o de pistón. Son los encargados de suministrar la energía para el movimiento de la válvula. Pueden ser neumáticos, hidráulicos y eléctricos.

Los posicionadores controlan movimiento del vástago y lo colocan donde el controlador dice. Fundamental es un control fino. Enemigos de la fricción y desgaste. Dan mejor cierre, rápidos. Retroalimentación del vástago para lograr su correcta operación.

3. CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS

Industrias de proceso proveen tipos innumerables de bienes y servicios. Tal como los tipos de bienes y servicios varían, los métodos de control usados en la producción varían. Algunos procesos requieren un control muy pequeño, que es que ellos pueden operar satisfactoriamente con un amplio rango de tolerancia. Otros pueden requerir un mejor control. Un proceso específico determinaría el tipo de control requerido. El componente en el lazo que provee un control de proceso automático es el controlador.

Un lazo de control esta diseñado para responder un upsets en el proceso. Los upsets son condiciones externas que cambian la demanda colocada en el sistema de control y causan cambios en el proceso de variables. El controlador toma decisiones que afectan las variables en el proceso, así que el rol del controlador es crítico.

Los aparatos en un típico proceso de lazo incluyen un sensor, transmisor, controlador y un elemento de control final. El sensor mide el valor de la variable controlada. Este valor es un convertido en un instrumento de señal estándar por un transmisor. El transmisor envía la señal al controlador. El controlador compara la señal a un set point y basado en cualquier desviación, decide si alguna acción es requerida. La señal de salida del controlador posiciona el elemento de control final. El elemento de control final responde a la señal de salida cambiando el valor de la variable manipulada. La variable manipulada, afecta el valor de la variable controlada, la cual es de nuevo detectado por el sensor. Esta acción continua hasta que el valor de la variable controlada se une al set point.

La acción de algoritmos entre el controlador son combinados para producir la acción de control deseada. Estas algoritmos son usualmente referidos como modos de control.

3.1 Diagramas de lazos de control

Los diagramas de instrumentación de proceso, o tubería y diagramas de instrumentación (P&ID), son un buen medio de información acerca de sistemas de proceso. P&ID proveen una gran distribución de información incluyen la identificación de todas las variables del proceso en el sistema, una descripción de cada lazo en el sistema, e información acerca de cada instrumento en los lazos. Por lo tanto, un P&ID provee una pintura completa del proceso e instrumentación asociada.

Un diagrama de lazo provee una vista más detallada de un lazo de instrumentos de un proceso y permite un mejor entendimiento de la operación del lazo. El arreglo de los instrumentos está indicado en el diagrama. Esta información permite que usted identifique las conexiones entre los aparatos, los componentes de acción, y los caminos de comunicación. Además, en algunos diagramas de lazo, las especificaciones dadas por la medida y control de hardware proveen un medio relativamente simple de determinados requerimientos cuando es necesario ordenar partes de reemplazo para el sistema.

3.1.1 Lazos de control

Los diagramas de instrumentación de proceso, o tubería y diagramas de instrumentación (P&ID), son un buen medio de información acerca de sistemas de proceso. P&ID proveen una gran distribución de información incluyen la identificación de todas las variables del proceso en el sistema, una descripción de cada lazo en el sistema, e información acerca de cada instrumento en los lazos. Por lo tanto, un P&ID provee una pintura completa del proceso e instrumentación asociada.

Controladores de tipo continuo y discontinuo

En los sistemas de control de procesos de lazo cerrado, se necesita un controlador para dirigir el dispositivo de control. En pocas palabras, el controlador examina la variable medida y luego determina la acción que el dispositivo de control debe llevar a cabo para que la variable medida y, por lo tanto, la variable controlada, sea igual a la referencia.

Los controladores se pueden separar en dos grupos, dependiendo si su señal de salida varía gradualmente o mediante pasos discretos.

Cuando la señal de salida toma sólo ciertos valores discretos, se dice que el controlador es de tipo discontinuo. Por otro lado, cuando la señal de control varía continuamente, se dice que el controlador es de tipo continuo.

Controlador de 2 posiciones

Uno de los controladores de tipo discontinuo más comunes es el de 2 posiciones, o controlador todo o nada.

Supongamos que la señal de salida del controlador es $u(t)$ y que la señal de error es $e(t)$. En el control de dos posiciones, la señal $u(t)$ permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo si la señal de error es positiva o negativa.

En los sistemas de control de procesos que emplean un controlador de dos posiciones, puede llegar a existir una mayor amplitud de la oscilación de la salida.

3.2 Controlador proporcional

El controlador de tipo continuo más simple utilizado en los sistemas realimentados es el controlador proporcional (P). Con un controlador proporcional la acción correctiva, o acción de control, es proporcional al error del proceso, es decir, proporcional a la diferencia entre la referencia y la variable medida. Por ejemplo, en un sistema de control de nivel en que la referencia de nivel permanece fija, el error de nivel aumenta cuando el nivel disminuye. La relación lineal entre el error del proceso y la señal de salida del controlador se puede expresar matemáticamente por medio de la siguiente fórmula:

$$P = K_p * E_p \quad (\text{Ec. 21})$$

donde

P es la señal de salida del controlador

K_p es la ganancia proporcional

E_p es el error del proceso (referencia menos variable medida).

El controlador proporcional no puede eliminar completamente el error del proceso. Esto se debe a que para mantener la señal de salida del controlador con un valor dado, se requiere un error de régimen. Generalmente, a este error se le llama desviación proporcional y representa la principal desventaja de los controladores proporcionales.

Se puede ayudar a hacer mínima la desviación proporcional, aumentando lo más posible la ganancia proporcional. Lamentablemente, incrementando la ganancia proporcional también se aumenta la tendencia hacia la inestabilidad. En realidad, cuando la ganancia es muy elevada, el controlador proporcional se comporta como un controlador de dos posiciones y presenta oscilaciones alrededor de la referencia. Por lo tanto, aumentar la ganancia proporcional no es una solución ideal para eliminar el error del proceso.

Banda proporcional

Expresada como un porcentaje de la variable controlada, es el margen de error necesario para que la señal de salida del controlador pase de su valor mínimo (0%) a su valor máximo (100%) y viceversa.

La banda proporcional (PB) se determina con la siguiente ecuación:

$$PB = (1/ K_p) 100\% \quad (\text{Ec. 22})$$

Esta ecuación muestra que la banda proporcional está relacionada inversamente con la ganancia proporcional.

Reset manual

Uno de los métodos para eliminar el error, en un sistema de control de proceso que cuenta con un controlador proporcional, es agregando una desviación en la salida del controlador.

Para que el error del proceso resulte nulo, el valor de esa desviación se ajusta manualmente con el valor nominal de la carga. Por esto último, este método suele llamarse reposición manual. Cuando se agrega una desviación en la salida del controlador, la fórmula que relaciona el error del proceso y la señal de salida del controlador, se transforma en:

$$P = K_p \cdot E_p + P_o \quad (\text{Ec. 23})$$

donde

P es la señal de salida del controlador

K_p es la ganancia proporcional

E_p es el error del proceso (referencia menos variable medida).

P_o es la desviación en la salida del controlador

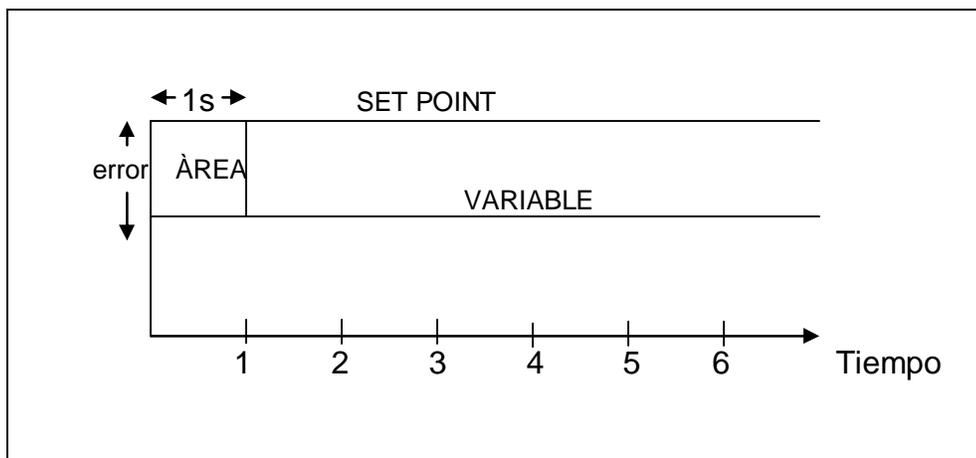
Este método para eliminar el error del proceso funciona para una carga dada. Si ésta cambia, ese error no es más nulo. Por lo tanto, este método se puede emplear en los sistemas de control de procesos en que el valor medio de la carga es constante.

El término proporcional de control se encarga de la magnitud del error. Ahora se debe incluir un término que se encargue del tiempo que dura este error (para generar un reset automático).

Si hacemos que un número varíe de acuerdo con el tamaño y el tiempo que dure el error, entonces podríamos sustituir al reset manual.

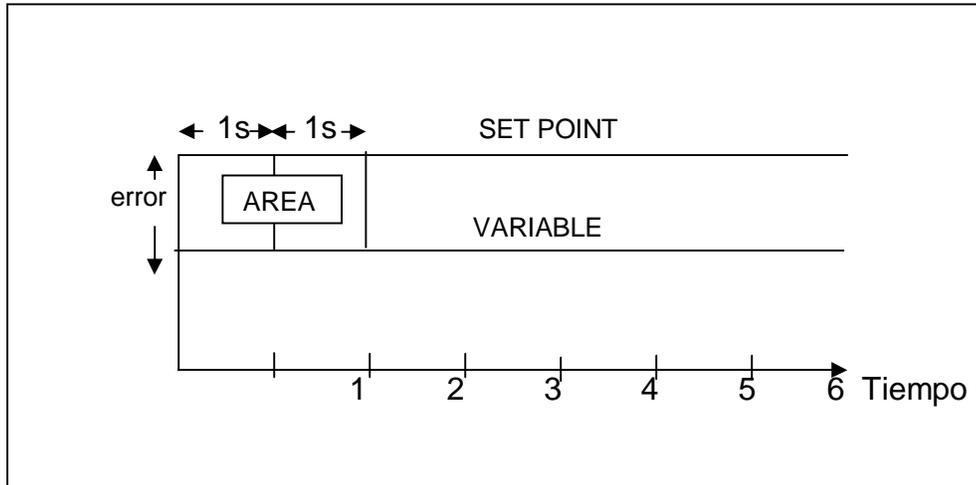
Por cada unidad de tiempo (ejemplo: segundos), agregamos una pequeña cantidad a nuestro VALOR el cual equivale al área formada entre el tiempo y el error.

Figura 21. **Gráfica de secuencia 1 control proporcional**



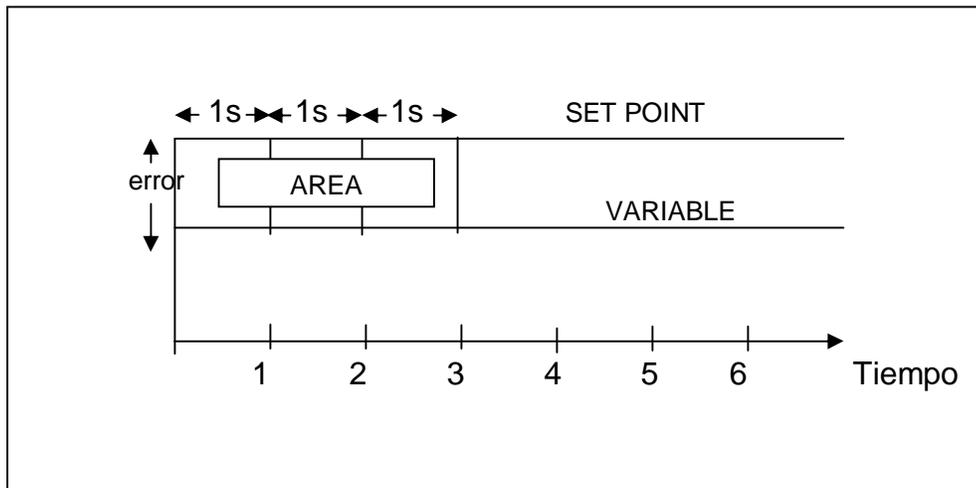
A los 2 segundos nuestra área aumenta otro poco.

Figura 22. **Gráfica de secuencia 2 control proporcional**



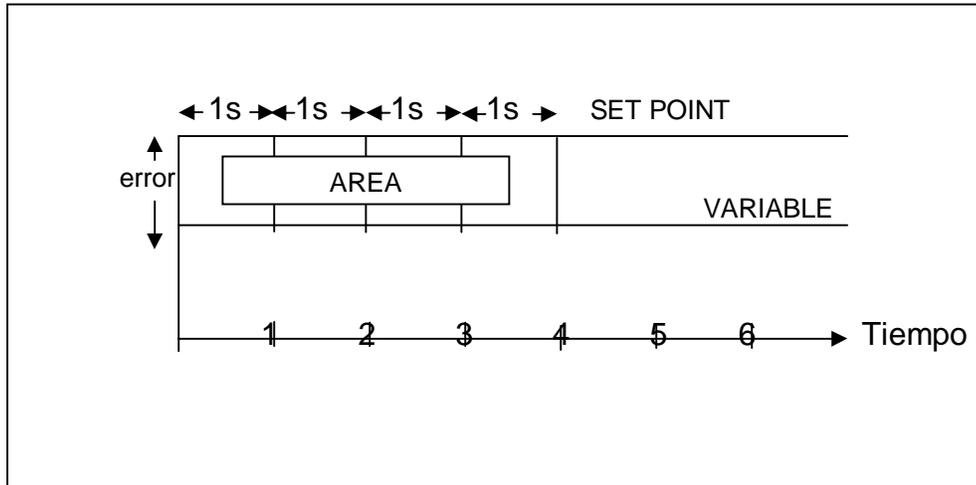
3 segundos después el área aumenta otro poco.

Figura 23. **Gráfica de secuencia 3 control proporcional**



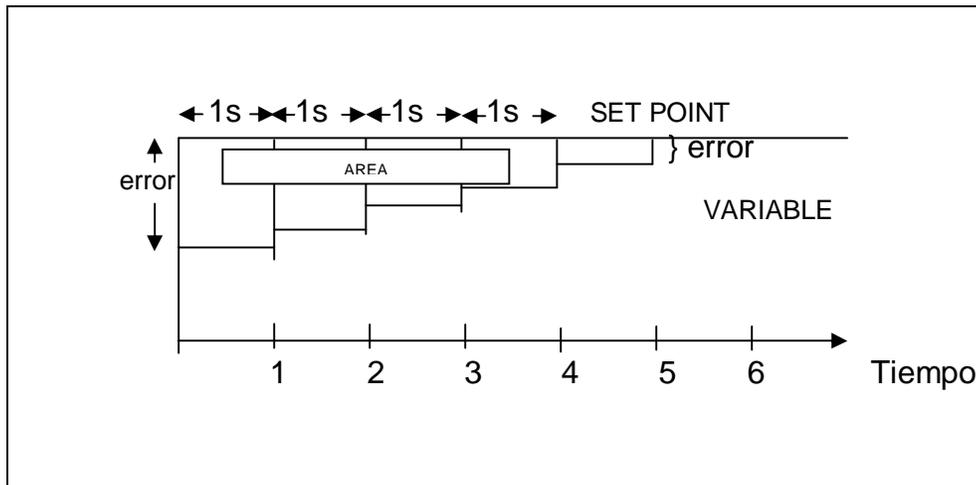
4 Segundos más tarde

Figura24. **Gráfica de secuencia 4 control proporcional**



Si se utiliza ésta área como RESET, entonces el RESET variaría produciendo cambios en la variable y disminuyendo el error.

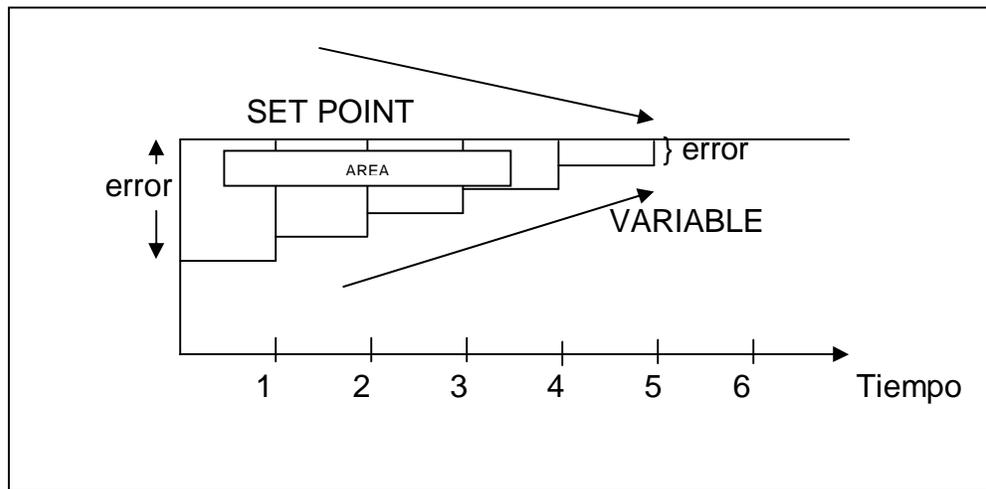
Figura 25. **Reset**



El área va cambiando en el sentido tal que la variable poco a poco alcance el setpoint.

Dado que conforme se alcance el setpoint, el error se hace cada vez menor, entonces los incrementos que se hacen también son menores, hasta que en algún momento el error se hace cero. Y por ende se deja de ajustar el área.

Figura 26. **Gráfica de disminución de error**

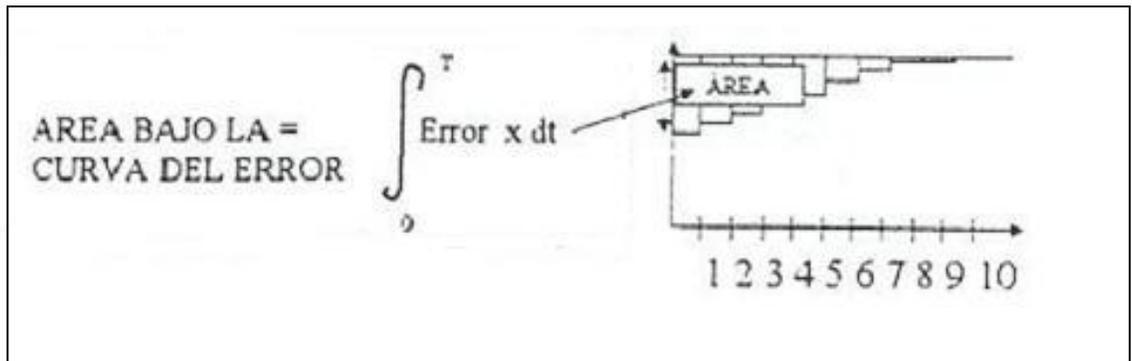


Como se pudo observar, el área entre las curvas del setpoint y la variable (o sea el área bajo la curva del error), se puede utilizar para generar el RESET.

3.3 Controlador integral

Para calcular el área bajo la curva del error se puede utilizar una función matemática: LA INTEGRAL.

Figura 27. Gráfica de la curva del error



El área se forma con el tiempo. Para poder establecer que tan rápidamente ajustamos el RESET, la mayoría de los controladores utilizan un parámetro. EL TIEMPO INTEGRAL, así:

$$\text{RESET (AUTOMÁTICO)} = \frac{\text{GANANCIA}}{\text{TIEMPO INTEGRAL}} \int_0^T \text{Error} \times dt \quad (\text{Ec. 24})$$

En la ecuación anterior, el término $\int_0^T \text{Error} \times dt$ está etiquetado como 'ÁREA' y el denominador 'TIEMPO INTEGRAL' está etiquetado como 'FACTOR DE ESCALA'.

Como se puede observar si el TIEMPO INTEGRAL, es grande entonces el factor de escala es pequeño, por lo tanto el tiempo que se va a tardar el control en ajustar el setpoint es también grande.

Por el contrario, si el TIEMPO INTEGRAL es pequeño, entonces el tiempo en que se alcanza el ajuste del RESET es pequeño.

El tiempo integral se da generalmente en minutos /repetición.

$$\text{RESET (AUTOMÁTICO)} = \frac{\text{GANANCIA}}{\text{TIEMPO INTEGRAL}} \int_0^T \text{Error} \times dt \quad (\text{Ec. 25})$$

Algunos fabricantes utilizan el factor integral, el cual se da en repeticiones/minuto y es simplemente el inverso del tiempo integral:

$$\text{RESET (AUTOMÁTICO)} = \text{GANANCIA} \times \text{INTEGRAL} \int_0^T \text{Error} \times dt \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\text{INTEGRAL} = \frac{1}{\text{TIEMPO INTEGRAL}}$$

Es importante determinar si el controlador usa minutos / repetición o bien repeticiones / minuto.

En el primer caso es el tiempo integral: entre más grande, más tiempo se tarda en ajustar el Reset.

En el caso de usar Repeticiones/Minuto, entre más grande sea el valor del Integral, más rápido se ajusta el Reset.

La ecuación a utilizar en el controlador será

$$\begin{array}{c}
 \text{TÉRMINO} \\
 \text{PROPORCIONAL} \\
 \hline
 \text{TÉRMINO} \\
 \text{INTEGRAL} \\
 \hline
 \text{SALIDA} = \text{GANANCIA} \times \text{ERROR} + \frac{\text{GANANCIA}}{\text{TIEMPO INTEGRAL}} \int_0^T \text{Error} \times dt \\
 \hline
 \text{RESET AUTOMÁTICO}
 \end{array}
 \quad (\text{Ec.27})$$

$$\begin{array}{c}
 \text{TÉRMINO} \\
 \text{PROPORCIONAL} \\
 \hline
 \text{TÉRMINO} \\
 \text{INTEGRAL} \\
 \hline
 \text{SALIDA} = \text{GANANCIA} \times \text{ERROR} + \frac{\text{GANANCIA}}{\text{TIEMPO INTEGRAL}} \int_0^T \text{Error} \times dt \\
 \hline
 \text{RESET AUTOMÁTICO}
 \end{array}
 \quad (\text{Ec. 28})$$

Conclusiones del control PI

Tiene dos parámetros a sintonizar:

- La ganancia o la banda proporcional, la cual proporciona la estabilidad de la variable.
- El tiempo integral o el integral, la cual proporciona la velocidad con que alcanzamos al setpoint (Reset Automático)

Este tipo de controlador es el más utilizado de todos.

Recomendaciones al sintonizar

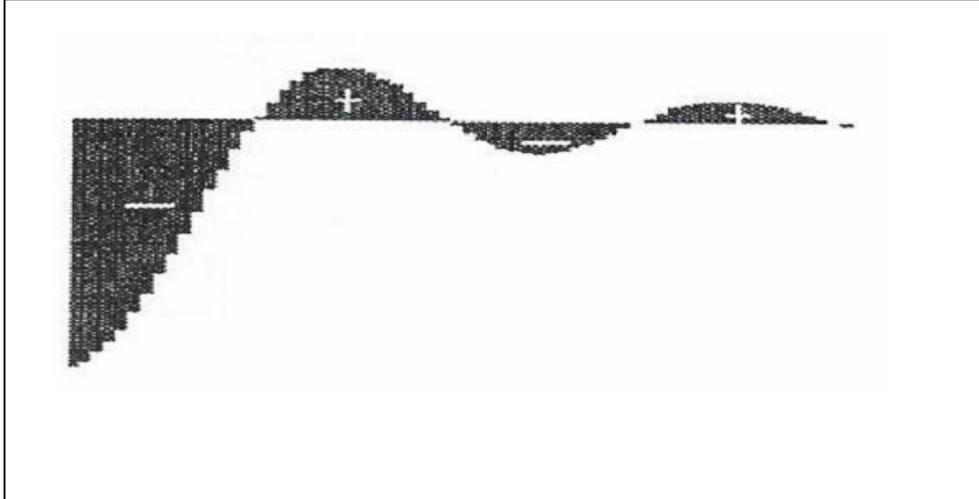
La función del proporcional es estabilizar el proceso (aunque no se alcance el setpoint).

Por lo tanto éste debe ser el primer parámetro a sintonizar, dejando prácticamente deshabilitada la acción integral (por ejemplo usando un valor muy grande como tiempo integral).

Una vez encontrado un valor adecuado para el proporcional, se procede a sintonizar el tiempo integral. Si se deja un valor muy grande, tardará mucho en alcanzar al setpoint cuando existan cambios en las condiciones del proceso. Y si se deja un valor muy pequeño, podemos tener oscilaciones en el proceso.

Tiempo integral muy corto, produce oscilaciones, las cuales pueden disminuir en amplitud y período con el tiempo (aceptables hasta cierto punto)

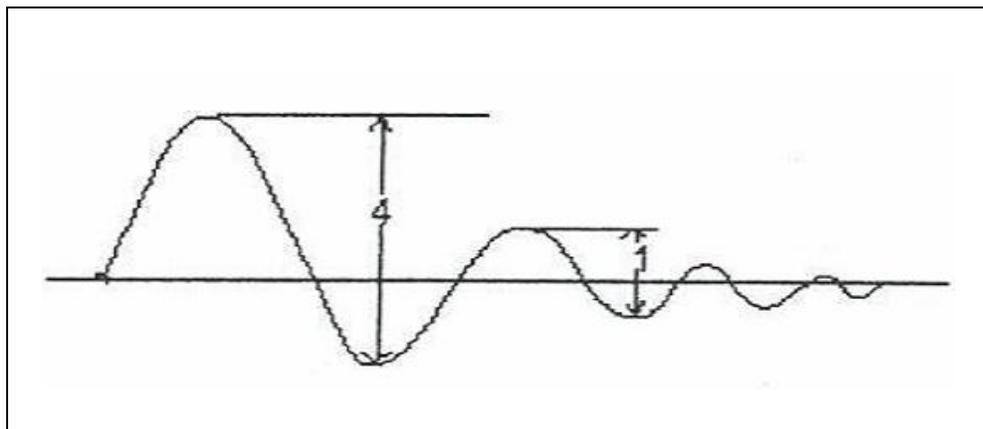
Figura28. **Corto tiempo integral**



Fuente: Adriano Olivera. **LC700 configuration. Pág. 38**

La variable de control oscilará alrededor del setpoint hasta que se estabiliza. (Esta oscilación es una combinación de la acción proporcional y la integral)

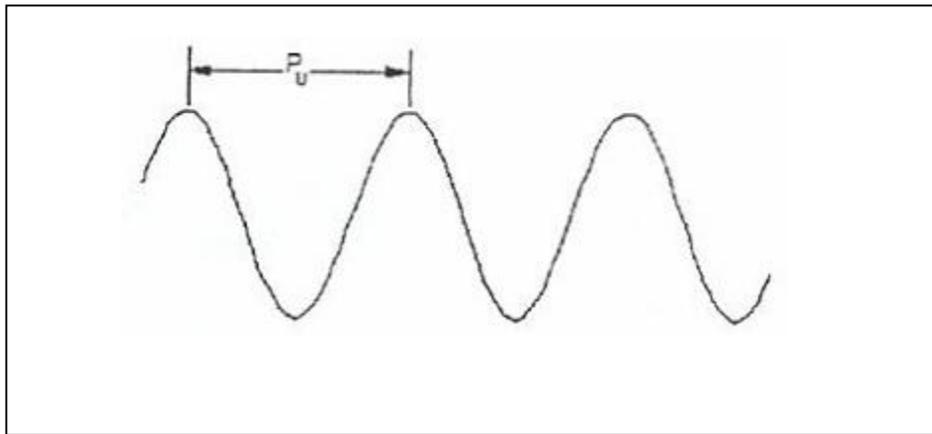
Figura 29. **Gráfica de la combinación de acción proporcional e integral**



Fuente: Adriano Olivera. **LC700 configuration. Pág. 39**

Si el término integral es muy pequeño, la acción del control puede ser muy rápido, por lo que podemos llegar a tener oscilaciones (que nunca disminuyen)

Figura 30. **Pequeño tiempo integral**



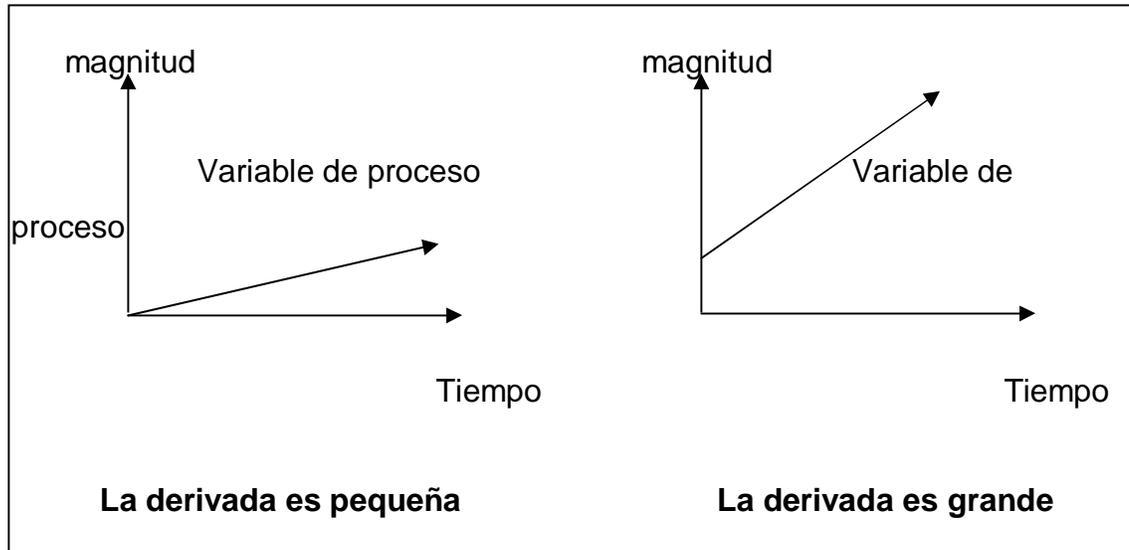
Fuente: Adriano Olivera. **LC700 configuration. Pág. 40**

Este tipo de oscilación generalmente no es aceptada y puede crecer en cualquier momento pudiendo poner en peligro el proceso.

Hay que recordar que la acción proporcional también puede colaborar a la oscilación y no sólo la integral. El término integral trabaja en función del tiempo que dura el error. Existe otro término: el derivativo, el cual se encarga de la velocidad con que cambia el error (o bien la variable del proceso).

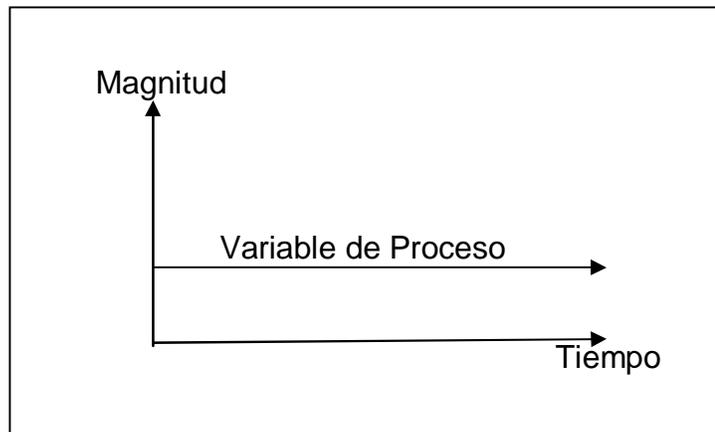
La derivada es una función matemática que nos da la pendiente de la curva.

Figura 31. **Diferencia entre derivadas**



Si la variable de proceso no cambia, entonces la derivada es cero (no produce cambios a la salida).

Figura 32. **Derivada cero**



2.3 Control derivativo

El término derivativo sirve para adelantarse a los cambios de la variable y no esperar a que el error se produzca.

La cantidad de tiempo que la acción derivativa se adelanta a la salida es conocida como “tiempo derivativo” y se mide en minutos.

La mayoría de los fabricantes proporciona este término como Derivativo y otros lo llamarán Rate (Razón de Cambio) pero es lo mismo.

En los sistemas de control de procesos, no se puede utilizar solamente la acción de control derivativo porque no se genera ninguna señal de control cuando hay un error de régimen (desviación).

Por lo tanto, la acción de control derivativo se debe combinar con una acción de control proporcional (P) o una acción de control proporcional e integral (PI).

La acción de control proporcional y derivativo (PD) se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$P = K_p (E_p + K_D (dE_p / dt)) \quad (\text{Ec. 29})$$

donde;

K_D es la constante derivativa

3.5 Controlador proporcional integral y derivativo (PID)

El controlador proporcional, integral y derivativo (P.I.D.), también llamado controlador de tres modos, es la prolongación natural de los controladores P, P.I. y P.D.

Combina las ventajas de cada acción de control individual. Por lo tanto, se puede usar para controlar casi todos los procesos.

La acción de control PID se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$P = K_p * E_p + K_p * K_p \int_0^t E_p dt + K_p * K_D (dE / dt) \quad (\text{Ec. 30})$$

Los principios de cada acción de control son los siguientes:

PROPORCIONAL: Se encarga de la magnitud del error.

INTEGRAL: Trabaja en función del tiempo que dura el error.

DERIVATIVO: Se anticipa a las variaciones del error.

3.6 Control en cascada

Un control en cascada utiliza dos lazos de control: un lazo maestro y un lazo esclavo.

El lazo maestro contiene el controlador maestro y el lazo esclavo contiene el controlador esclavo.

La salida del controlador maestro está conectado a la entrada del setpoint del controlador esclavo, causando que los dos controladores estén en cascada.

El principal objetivo de un control en cascada es eliminar o minimizar las perturbaciones que afectan la variable manipulada antes que causen cambios en el proceso.

Sintonización de un control en cascada

1. Con el controlador maestro en modo manual, el controlador esclavo es sintonizado de primero. Normalmente, la acción proporcional solamente es utilizada para controladores esclavos. Aunque la acción integral es usada algunas veces cuando el proceso tiene constantes de tiempos cortos, como los procesos de flujo.
2. Una vez sintonizado el controlador esclavo. Dejarlo en modo automático y sintonizar el controlador maestro.

El lazo esclavo puede ser tratado como un elemento final de control. Entonces el lazo maestro puede ser considerado como un lazo de control simple.

4. ALARMAS:

La mayoría de los controladores comerciales poseen alarmas. Estas se usan para alertar al operador cuando uno de los parámetros excede alguno de los límites establecidos. La alarma puede consistir en una indicación visual (luz intermitente), una señal audible (bocina) o, con frecuencia, ambas. Una alarma puede activar tanto un relé o una válvula, como un motor o una bomba, a fin de interrumpir el funcionamiento de una parte del proceso.

Es posible asignar prioridades a las alarmas, pudiendo ir de alarmas que se disparen por un determinado acontecimiento o por una emergencia. Dependiendo de la prioridad correspondiente, esas alarmas se emplean para el control de calidad, evitar fallas o actuar ante ciertas condiciones críticas que requieran una acción inmediata por parte del operador.

Tipos de alarmas

Ciertos controladores presentan numerosos tipos de alarmas. Los más comunes son las alarmas absolutas BAJA Y ALTA.

Se genera una alarma absoluta BAJA cuando el parámetro controlado es inferior al umbral de la alarma.

Se genera una alarma absoluta ALTA cuando el parámetro controlado es superior al umbral de la alarma.

Acción de las alarmas

Después de detectar una condición de alarma, se debe seguir un protocolo de reconocimiento. Este depende de la acción de la alarma seleccionada. Dicha acción puede ser de tipo con cerrojo o sin cerrojo.

Cuando la alarma es accionada sin cerrojo, ésta requiere que el operador la reconozca. Este reconocimiento no es necesario una vez que el parámetro controlado ya no provoca la alarma.

Cuando la alarma es accionada con cerrojo, ésta requiere que el operador la reconozca. No obstante, este reconocimiento es necesario aunque el parámetro controlado ya no provoque la alarma. Este tipo de acción permite que el operador se entere de que una condición de alarma se produjo, aunque el parámetro controlado recupere su estado normal.

En ambos casos, el indicador de alarma destella cuando se debe reconocer una alarma. Si después del reconocimiento por parte del operador la condición de alarma del parámetro controlado aún persiste, el indicador de alarma permanecerá iluminado.

Detección y reparación de fallas:

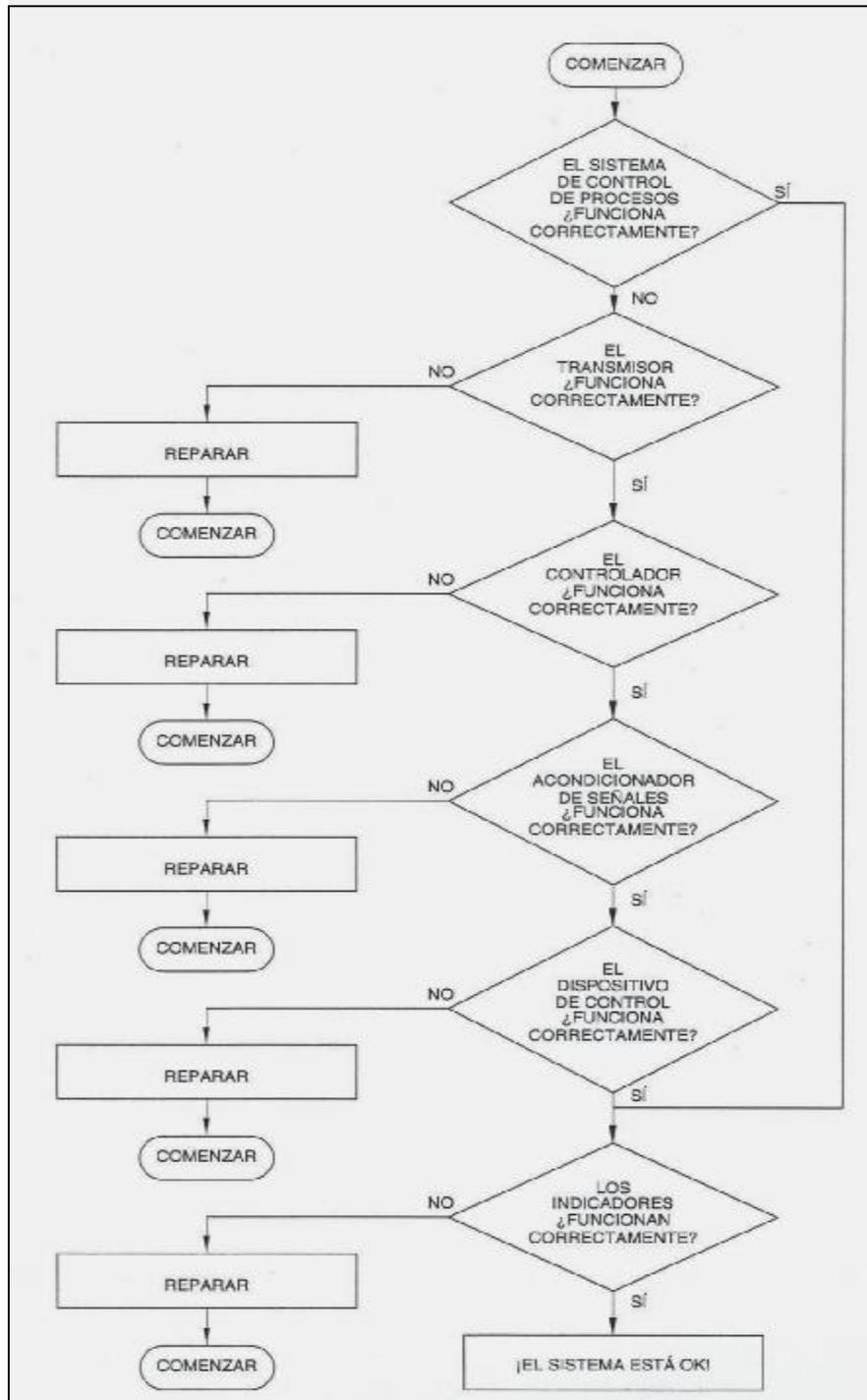
La detección y reparación de fallas engloba una variedad de técnicas que se utilizan para reducir a un sólo componente la causa de una avería producida en un sistema de control de procesos complejo. No obstante, lo anterior implica que se debe emplear algún método lógico y preconcebido para llevar a cabo esa reducción.

Dicho método debe ser lo suficientemente general como para permitir, si se lo respeta, localizar todo elemento defectuoso en el sistema de control de procesos. El método secuencial para la detección y reparación de fallas forma parte de este tipo de procedimientos lógicos.

El método secuencial para la detección y reparación de fallas se basa en el empleo de un organigrama para tal fin. La figura 29 ilustra un organigrama simplificado para la detección y reparación de fallas en los sistemas de control de procesos. Cada verificación u observación efectuada por el técnico, lo ayudará a definir más claramente la naturaleza de la avería.

Con el organigrama para la detección y reparación de fallas el técnico puede realizar las pruebas apropiadas y sacar conclusiones lógicas sobre los resultados de cada verificación u observación. Además, como el organigrama se puede utilizar para cualquier problema que presente el sistema, el técnico cuenta con un método secuencial y lógico para la detección y reparación de fallas.

Figura 33. Organigrama de detección y reparación de fallas



5. PROPUESTA DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE CONTROL AUTOMÁTICO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.

5.1 Características del equipo

El equipo de intercambio de calor, que se utiliza para estudiar el comportamiento de un fluido en un sistema de transferencia de calor, esta unidad es llamada “Intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos” esta conformada por un tubo de interno donde se encuentra el fluido de trabajo, de diámetro interno ($D_n = 25.4 \text{ mm}$) a rededor de este se encuentra otro tubo de diámetro mayor ($D_n = 38.1 \text{ mm}$), la tubería es de cobre tipo K, el tubo exterior que enchaqueta al tubo interior rodea al de menor diámetro se encuentra sellado en sus extremos, por el interior de este fluye el fluido de proceso, el cual es vapor sobre calentado a 15 PSI cuando se calienta o agua a temperatura ambiente, 25 °C cuando se enfría, los flujos de estos fluidos de proceso se dan a contracorriente y en paralelo consecuentemente.

El sistema esta constituido por un intercambiador de tubos concéntricos, que consta de 8 pasos, 3 pasos de calentamiento y 5 de enfriamiento. En el sistema de calentamiento se hace fluir por el interior de los tubos aceite “Texatherm 46” y por el exterior o enchaquetamiento vapor sobrecalentado a 15 PSI, con estos parámetros se regula la velocidad y conforme la velocidad del aceite, así será el aumento o disminución de la temperatura del mismo, la temperatura del aceite será inversamente proporcional a la velocidad del mismo.

En el sistema de enfriamiento sucede lo contrario ya que el mismo aceite caliente que viene de la primera etapa se enchaqueta, con un tubo de la misma clase K solamente que de un diámetro mayor entre los tubos se introduce agua a temperatura ambiente la cual enfría el aceite calentada en la primera etapa.

Este es el funcionamiento del sistema de calentamiento y enfriamiento presentes en el intercambiador de calor que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad de San Carlos.

Actualmente el control de el sistema es totalmente manual lo que se refiere al encendido de las bombas, la apertura de las válvulas, además los sensores de temperatura y flujo son de primer orden a lo que respecta los termómetros, medidores de flujo de área variable (rotámetros).

5.2 Desarrollo de la propuesta

Se inició con la comprensión del fenómeno de intercambio de calor, por medio de convección, conducción y radiación. Posterior a esto se desarrollaron los diferentes tipos de intercambiadores de calor y en concreto lo que es un intercambiador de tubos concéntricos.

Desarrollado el tema de calor, fundamentos, mecanismos y equipo se procedió a desarrollar el área de instrumentación y control automático de procesos. Iniciando con la instrumentación básica para diferentes procesos, características de estos y fundamentalmente las variables de procesos; nivel, flujo, presión, temperatura ya con una comprensión más clara de la importancia de las variables de proceso, del comportamiento de la medición y control, se procedió a explicar lo que refiere un control automático, sintonización y control en cascada.

Con los conceptos básicos desarrollados se procede a una completa comprensión del intercambiador de tubos concéntricos situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos de Guatemala, ya que en este equipo se implementara la automatización del proceso.

Ya con estos conocimientos de base se inicia el desarrollo de lo que es el control automático del intercambiador de calor situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

El desarrollo de este control se desglosara de la siguiente manera:

- Equipo actual: Funcionamiento y práctica desarrollada
- Equipo automatizado: Funcionamiento y práctica desarrollada
- Transición: equipo actual - equipo automatizado
- Ingeniería, tiempo, costo de la automatización

5.3 Equipo actual

Figura 34. **Equipo actual**



El funcionamiento actual del equipo de intercambio de calor se desarrolla de una manera totalmente manual y con equipos de medición directa como lo son, medidores de flujo de área diferencial, termómetros y manómetros. La exactitud en la medición de los parámetros necesarios para desarrollar la practica son muy bajos por el tipo de instrumentos utilizados, las variables medidas en el desarrollo de la práctica son el flujo, la presión de vapor y la temperatura del fluido tanto de proceso como el fluido de trabajo.

La medición inexacta dada por este tipo de equipos da una incertidumbre alta con relación a los datos reales esperado, además de que al error de medición que trae cada equipo, se de adhiere el error dado por el hombre.

En la practica de laboratorio se determinaron la constante de condensación y la constante de transferencia total de calor, estas constantes se calcularon a partir de los datos experimentales que se obtenidos durante la realización de la práctica, las diferentes temperaturas de entrada y salida del aceite en las dos etapas, así como la presión a la que se trabajó el vapor utilizado en la primera etapa, a estos datos experimentales utilizados se les suma los datos termodinámicos y fisicoquímicos de cada uno de los fluidos utilizados para la realización de la práctica así como las diferentes condiciones a las que se trabajó.

Se observó del funcionamiento del intercambiador de calor de tubos concéntricos descrito anteriormente según un análisis secuencial y científico de los datos obtenidos en el que el coeficientes de condensación para la primera etapa vapor-aceite aumenta secuencialmente conforme se va corriendo la práctica, pero los coeficientes de transferencia de calor en la segunda etapa, aceite-agua, fueron mayores, esto se da porque esto coeficiente vienen directamente relacionados con el área de transferencia de calor, "Los cálculos de transmisión de calor se basan en el área de las superficies de calentamiento o enfriamiento a través de la cual fluye calor".

El intercambiador de calor utilizado para esta práctica consta de un total ocho tubos, de los cuales tres son del sistema vapor-aceite, calentamiento del aceite y los tres restantes son del sistema agua-aceite, enfriamiento del aceite, es por esta razón que se dice que la transferencia se dio en una mayor proporción en la segunda etapa de enfriamiento del aceite.

En este caso se trabajo con fluidos laminares determinados por el número de Reynolds, este número afecta grandemente el modelo matemático, ya que este número adimensional está determinado por la velocidad del fluido, la cual se fue variando en el transcurso de la práctica.

Por esta razón se encontró que los fluidos que se trabajaron en la primera etapa particularmente el aceite estuvo dentro de un régimen laminar, por consiguiente en la segunda etapa también se trabajo con el aceite dentro de un régimen laminar ya que el mismo aceite que pasa por la primera etapa es el que recorre la segunda etapa, es el mismo fluido con el mismo caudal, lo que cambia en cada caso es la temperatura, el agua utilizada en la segunda etapa también entra dentro del régimen laminar.

Estos distintos regímenes determinados para cada uno de los fluidos se encontraron por medio de operatoria con la determinación del antes mencionado número de Reynolds el cual relaciona el diámetro interno, la densidad, la velocidad de flujo, y la viscosidad del fluido, los datos expulsados con esta ecuación fueron lo que sirvieron de base para determinar dentro de que régimen se encontraba el fluido, en el se dice que si el número de Reynolds es menor de 2100 es un régimen laminar, si se encuentra entre los 2100 y los 6000 es un fluido en transición y superior a los 6000 es un fluido turbulento "Cuando el número de Reynolds es menor de 2100 para una tubería circular recta, al flujo siempre es laminar. Cuando el valor es superior a 4000, el flujo será turbulento excepto en algunos casos especiales. Entre estos dos valores, o Región de transición, el flujo puede ser viscoso o turbulento, dependiendo de los detalles del sistema, que no se pueden predecir."

Para el calculo de los diferentes coeficientes se obvio el termino F_t , que es el factor de corrección que se le debió de aplicar a la fórmula, esto se dio por que los diferentes fluidos que se estaban trabajando entraron siempre dentro del régimen de flujo laminar, como anteriormente se explicó, y como se considera que en los fluidos con un flujo laminar el F_t o factor de corrección debe de ser 1.

El número de Prandtl es otro número adimensional determinado en la práctica, con este se determinarán los diferentes coeficientes de condensación y de transferencia de calor, el número de Prandtl describe el flujo calórico del fluido, razón por la cual se tomó como una constante en la determinación de los diferentes coeficientes.

Como se puede observar la determinación de estos coeficientes viene determinada por una serie de factores que intrínsecos del proceso, tanto de los fluidos utilizados como del diseño del intercambiador en sí, esta es la razón por la cual para este intercambiador se debe determinar un modelo matemático específico y no se puede tomar uno de una bibliografía y aplicarlo como si el teórico fuera igual al experimental, esta es la razón por la cual los número adimensionales utilizados son tan importantes en la determinación de estos coeficientes. Los primeros estudios sobre este caso estaban basados en el análisis dimensional. Las ecuaciones obtenidas son específicas en función de su diseño, y a la vez existe un mejoramiento en las ecuaciones aplicables a estos aparatos a intervalos de condiciones más amplios".

El análisis realizado en el intercambiador de tubos concéntricos se realizó en dos etapas o se considera como dos sistemas separados, por el comportamiento de cada uno de estos, a pesar de ser parte de un mismo intercambiador de calor.

Se analizan como sub-sistemas, ya que los coeficientes para cada fluido y para cada condición de calentamiento o enfriamiento varían teniendo así la diferencia entre la primera etapa en la que se calienta el aceite por medio de vapor y la segunda etapa en la que el aceite anteriormente calentado es enfriado por medio de agua por esta razón es que se tomo como dos sistemas separados.

El problema de predecir la transmisión de calor desde un fluido a otro a través de una pared de separación, se reduce a la predicción de los valores numéricos de los coeficientes individuales de transferencia de los fluidos que intervienen en el proceso global.

Se considera que la transferencia de calor en la segunda etapa se da con mayor facilidad ya que es un sistema contracorriente lo que da como resultado un mayor aprovechamiento de transferencia de calor, el cual incide sobre el sistema con una mayor transferencia debido a la recuperación de calor en el sentido que la diferencia de temperatura se minimizará en cada entrada y salida de cada fluido respectivamente. La imposibilidad para el fluido caliente en flujo paralelo de reducir su temperatura bajo la temperatura del fluido frío, tiene más efecto sobre la habilidad de los aparatos en flujo paralelo para recuperar calor .

Se observan en las diferentes gráficas el comportamiento obtenido entre el Coeficiente Total de Transferencia de Calor y el número de REYNOLDS relacionado con el de Prandtl tiene un comportamiento lineal, debido a que se analiza los diferentes tipos de regresiones y se observa que el coeficiente de correlación lineal es de 0.997, mientras que los demás están por debajo de estas. Lo cual indica que se da una relación directamente proporcional entre estos términos.

Actualmente el Intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos cuenta con:

- Tubería de cobre tipo K de diferentes diámetros
- Bomba centrífuga para aceite "Texatherm 46"
- Bomba centrífuga del agua municipal
- Reducidor de presión
- Regulador de presión
- Manómetro

- Medidor de flujo de área variable para le flujo de agua (Rotámetro)
- Medidor de flujo de área variable para le flujo de aceite (Rotámetro)
- Válvula de compuerta
- Válvula de Globo Reguladora de flujo de agua
- Válvula de Globo Reguladora de flujo de aceite
- Válvula de Globo del agua municipal
- Trampa de vapor
- Llave de paso de aceite
- Tanque de aceite
- Termómetro

5.3.1 Funcionamiento del equipo actual

1. Revisar que el tanque de almacenamiento contenga suficiente aceite.
2. Encender la bomba centrífuga del aceite, accionando el interruptor de la corriente eléctrica.
3. Abrir parcialmente la válvula del paso del aceite.
4. Dejar que fluir por 2 minutos el aceite buscando la estabilidad del sistema.
5. Abrir la válvula del ramal de agua y dejar correr por 2 minutos buscando la estabilidad del sistema de enfriamiento.
6. Abrir la válvula de vapor y fijar la presión a 15 PSI.

7. Definir una altura máxima y una mínima en el medidor de flujo de área variable del aceite y del agua, por medio de la grafica correlacionada se define un flujo máximo y mínimo que se manejará; este rango se divide en diez secciones iguales para así poder tomar diez medidas similares para agua y para aceite.
8. Establecer un flujo constante de agua y variar el flujo del aceite, terminadas las diez variaciones del aceite predeterminados se varía nuevamente el flujo de agua y se deja constante para realizar nuevamente diez variaciones de aceite, encontrando así una gran cantidad de información de calentamiento y enfriamiento, sucesivamente.
9. Tomar la temperatura de entrada y de salida del aceite, en la sección de calentamiento. Para cada una de las variaciones del flujo de aceite.
10. Variar el flujo del aceite en diez ocasiones del punto mínimo al máximo según los parámetros preestablecidos en el medidor de flujo de área variable. Dejando dos minutos entre medición y medición para buscar así la estabilidad en cada medición.
11. Determinar con estas mediciones un modelo matemático que muestre la relación existente entre el coeficiente de condensación, el número de Reynolds y el número de Prandtl para el sistema vapor-aceite.

12. Determinar paralelamente a el paso anterior 10 diferentes alturas para el medidor de área diferencial de agua y se afina una altura para el sistema de aceite, determina un modelo matemático que muestre la relación existente entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandal, para el sistema agua-aceite y conocer el comportamiento gráfico entre ellos.

13. Determinar un modelo matemático que muestre la relación existente entre el coeficiente de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandal para el sistema agua-aceite.

14. Cerrar la válvula de paso de vapor, se da 5 minutos para que se enfríe el sistema, se cierra el sistema de aceite y posterior el de agua.

5.3.2 Resultados de práctica actual

5.3.2.1 Modelo matemático que muestra la relación entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandtl

$$Y = K_i X^a$$

$$Nu = K_i NRe^a Npr^b$$

$$(Nu/Npr^b) = K_i NRe^a \quad (b = 1/3)$$

$$Y = mX + b \quad (Y = Nu/Npr^b ; X = NRe)$$

$$\ln[Nu/Pr^{1/3}] = a \ln(Re) + \ln K \quad (\text{Ec. 31})$$

$$a) y = -0.5668x + 8.4528 \quad (\text{Ec. 32})$$

$$b) y = -0.9022x + 10.39 \quad (\text{Ec. 33})$$

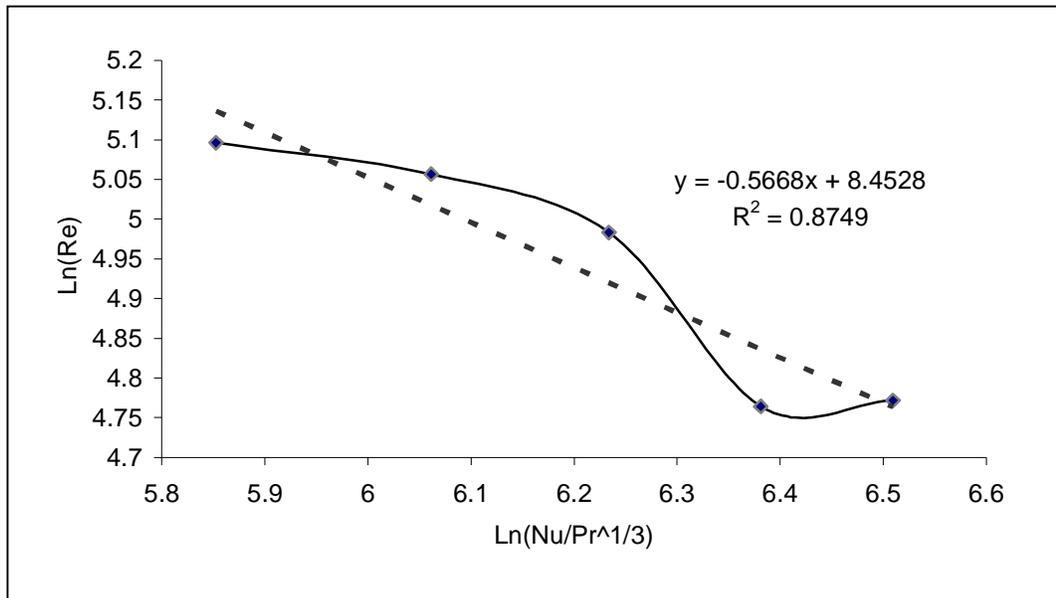
$$c) y = -0.7467x + 9.3474 \quad (\text{Ec. 34})$$

$$d) y = -0.5339x + 8.05 \quad (\text{Ec. 35})$$

$$e) y = -0.5759x + 8.2679 \quad (\text{Ec. 36})$$

- a) Comportamiento gráfico entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandtl

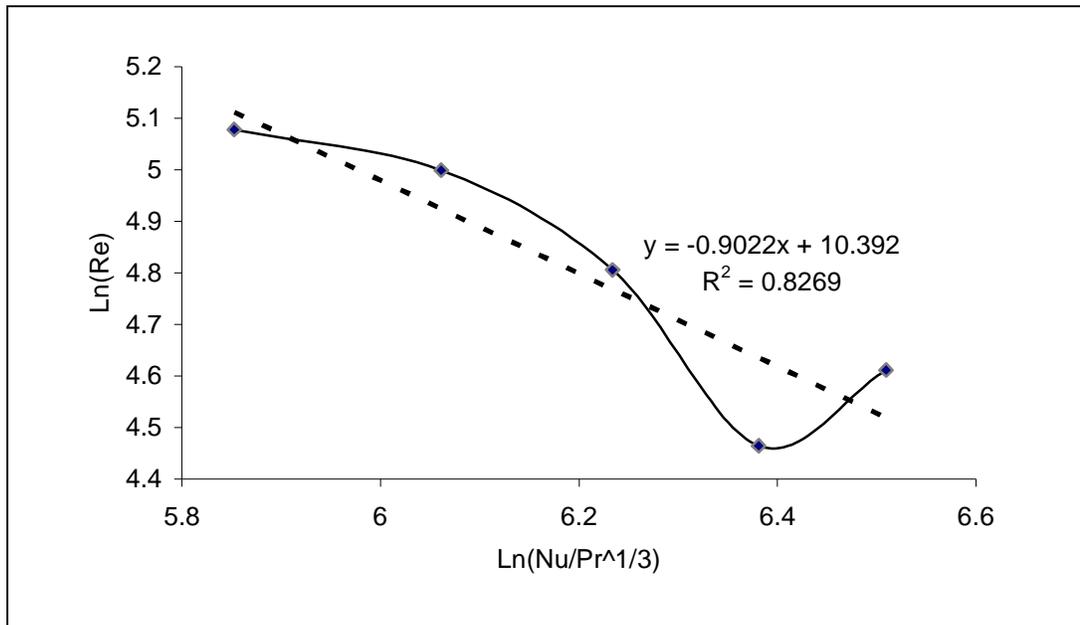
Figura 35. **Altura de agua 30**



Fuente: Datos Calculados

- b) Comportamiento gráfico entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandtl

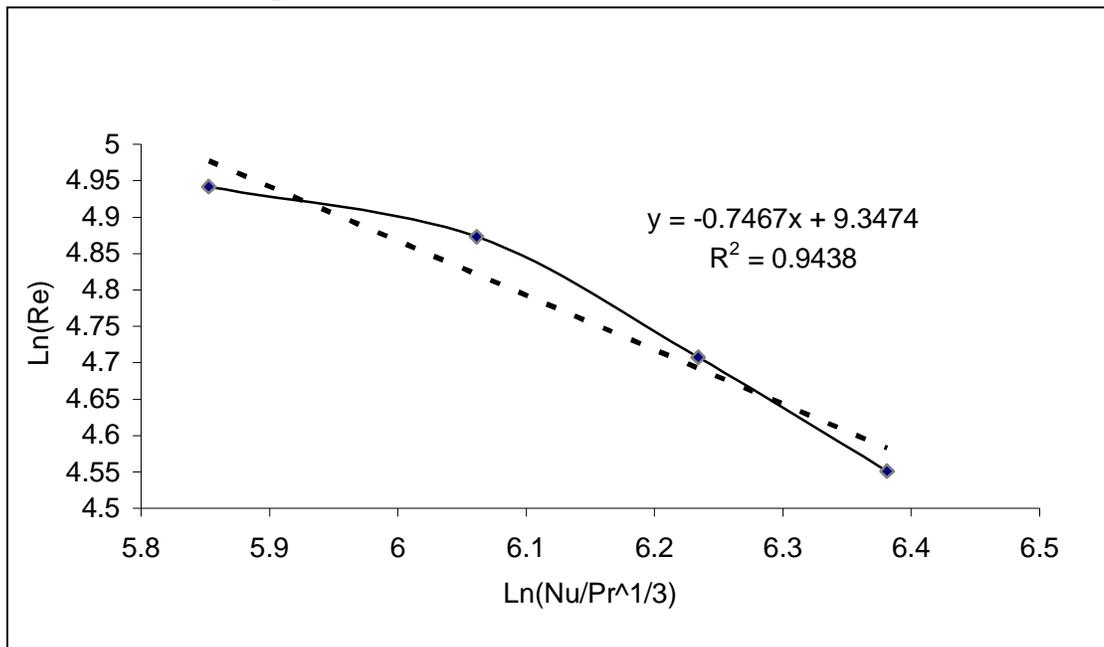
Figura 36. **Altura de agua 35**



Fuente: Datos Calculados

- c) Comportamiento gráfico entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandtl

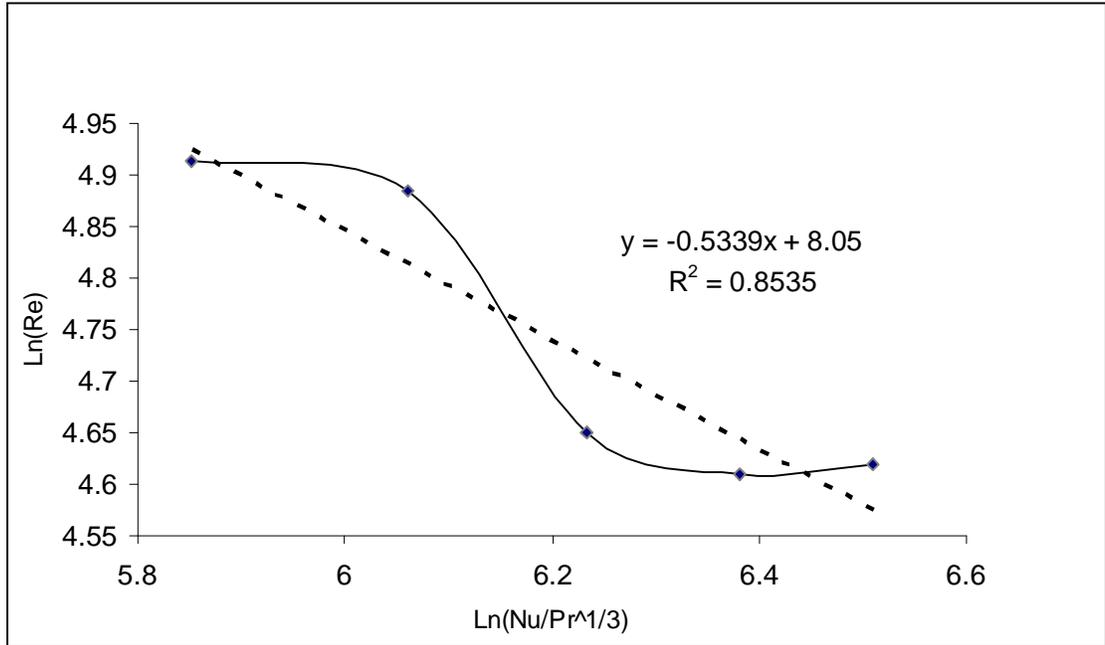
Figura 37. **Altura de agua 40**



Fuente: Datos Calculados

- d) Comportamiento gráfico entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandtl

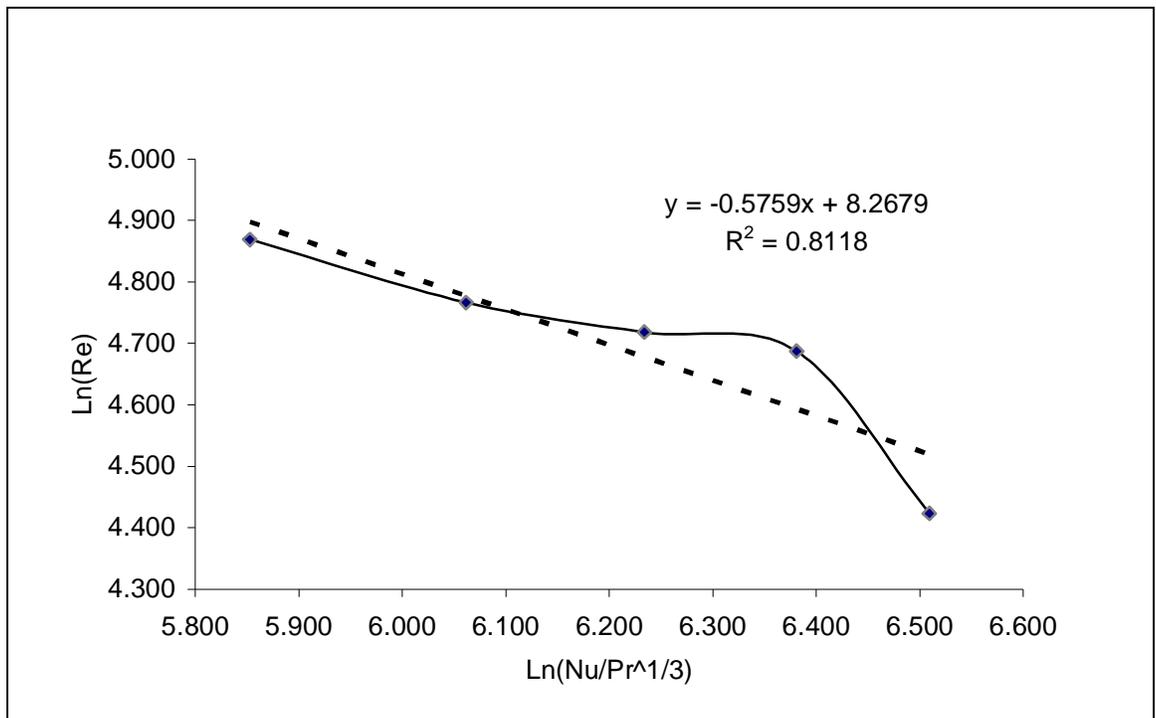
Figura 38. Altura de agua 45



Fuente: Datos Calculados

- e) Comportamiento gráfico entre el coeficiente total de transferencia de calor, el número de Reynolds y el número de Prandtl

Figura 39. **Altura de agua 50**



Fuente: Datos Calculados

5.3.2.2. Modelo matemático que muestra la relación entre el coeficiente de condensación, el número de Reynolds y el número de Prandtl para el sistema vapor-aceite

$$Y = \ln[\text{Nu}/\text{Pr}^{1/3}] = n \ln(\text{Re}) + \ln K \quad (\text{Ec. 37})$$

$$1.1 \ y = 1.4188x - 6.8105 \quad (\text{Ec. 38})$$

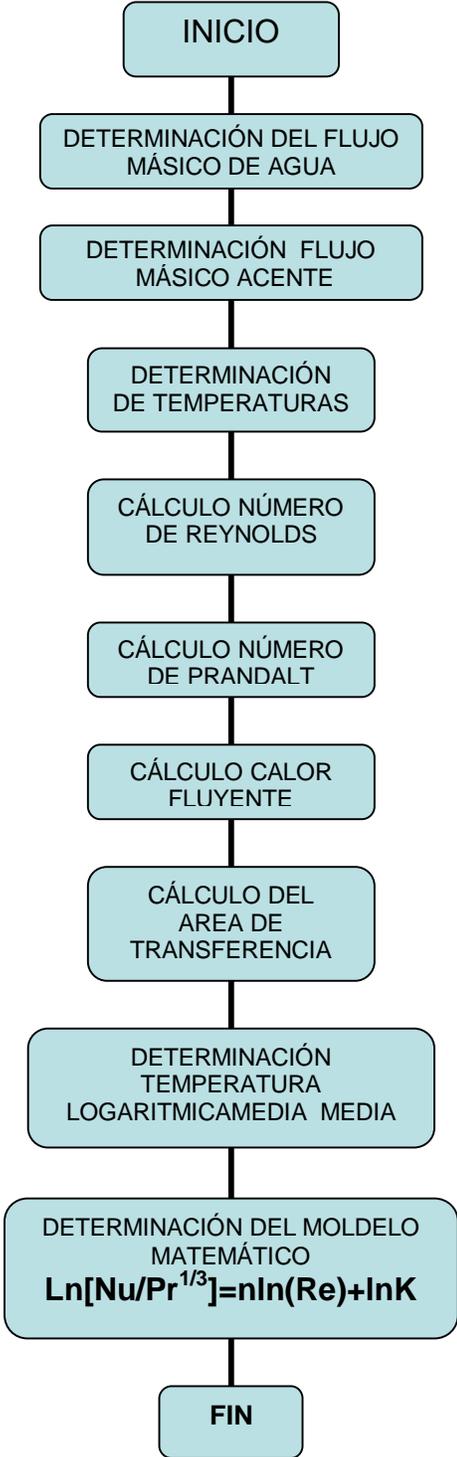
$$1.2 \ y = 1.408x - 6.5367 \quad (\text{Ec. 39})$$

$$1.3 \ y = 1.3717x - 6.0787 \quad (\text{Ec. 40})$$

$$1.4 \ y = 0.9371x - 3.1639 \quad (\text{Ec. 41})$$

$$1.5 \ y = 1.3027x - 5.3215 \quad (\text{Ec. 42})$$

5.3.3 Diagrama de flujo muestra de cálculo



5.3.4 Muestra de cálculo general

1. Cálculo del flujo másico a partir de las alturas en los rotámetros

Debido a que se utilizarán dos rotámetros distintos, se procederá a calcular, por medio de la curva de calibración de cada uno de los rotámetros:

1.1. Cálculo del flujo másico de agua

A partir de la curva de calibración del rotámetro de agua, se tiene que:

$$M = 0.1297 * H - 0.416 \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde:

- M es el flujo másico de agua (lb/s) y
- H es la altura leída en el rotámetro del agua.

1.2. Cálculo Del Flujo De Aceite

Utilizando la curva de calibración del rotámetro de aceite, se tiene que:

$$M = -0.0711 + 0.0084 H \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde:

- M es el flujo másico de aceite (lb/s) y
- H es la altura leída en el rotámetro del aceite.

2. Cálculo de Temperaturas de Operación

2.1. Cálculo de la temperatura de operación para el agua:

Se aplicará la temperatura promedio de entrada y salida.

$$T_{op}=(T_c+T_h)/2 \quad (\text{Ec. 45})$$

Donde:

- T_{op} es la temperatura de operación (°F),
- T_c es la temperatura de entrada fría (°F) y
- T_h es la temperatura de salida caliente (°F).

2.2. Cálculo de la temperatura de operación de aceite

La temperatura de operación del aceite se calculará por medio de las gráficas de la temperatura calórica.

3. Cálculo del Número de Reynolds

Para este cálculo se precisan los datos de viscosidad, densidad del fluido y diámetro de la tubería en función de la temperatura de operación.

3.1. Cálculo del diámetro externo de la tubería

El cálculo del diámetro de la tubería se realizará a partir de la circunferencia externa de la misma. Con la ecuación de la circunferencia de un círculo:

$$D_o=S/\pi \quad (\text{Ec. 46})$$

Donde:

- D_o es el diámetro de la tubería (plg) y
- S es la circunferencia de la tubería (plg).

3.2. Cálculo del diámetro interno:

Para realizar los cálculos de flujo, es indispensable conocer el diámetro interno de la tubería, por lo cual se aplicará la siguiente ecuación:

$$D_i = D_o - 2\varepsilon \quad (\text{Ec. 47})$$

Donde:

- D_i es el diámetro interno de la tubería (plg),
- D_o es el diámetro externo de la tubería (plg) y
- ε es el espesor de la tubería.

3.3. Cálculo del Número de Reynolds:

En general el Número de Reynolds se refiere al régimen de flujo, este se calculará de acuerdo con la ecuación:

$$Re = 4M / \pi D_i \mu \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde:

- D_i es el diámetro interno de la tubería (plg),
- V es la velocidad lineal del fluido (pies/s),
- M es el flujo másico (lb/s) y
- μ es la viscosidad (lb_m/pie·s).

4. Cálculo del número de Prandalt

Para este cálculo es necesario obtener los datos de las conductividades térmicas, capacidades caloríficas y viscosidades.

4.1. Viscosidades:

4.1.1. Viscosidad del agua:

Esta viscosidad se encuentra a partir la tabla A.2-4 (Ref. 3) en función de la temperatura.

4.1.2. Viscosidad de Aceite

Se encuentra a partir de datos proporcionados por el fabricante.

4.2. Capacidades caloríficas:

4.2.1. Capacidad calorífica del Agua

Se encuentra a partir de la tabla A.2.5 (Ref.3)

4.2.2. Capacidad calorífica de Aceite

Se encuentra a partir de datos proporcionados por el fabricante.

4.3. Conductividades Térmicas:

4.3.1. Conductividad térmica del Agua

Se encuentra a partir de la tabla A.2.6 (Ref.3).

4.3.2. Conductividad térmica de Aceite

Se encuentra a partir de datos proporcionados por el fabricante.

4.4. Cálculo de Prandalt

El número de Prandalt, que indica la eficiencia en la transferencia de calor, se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$Pr=C_p\mu/K \quad (\text{Ec. 49})$$

Donde:

- Pr es el número adimensional de Prandalt,
- Cp es la capacidad calorífica (Btu/lb°F) y
- K es la conductividad térmica (Btu/(s*pie*°F))

5. Cálculo de la cantidad de calor fluyente

Esta se calcula, para luego despejar de allí el valor de los coeficientes de transferencia de calor.

$$Q=MC_pdT \quad (\text{Ec. 50})$$

Donde:

- Q es la cantidad total de calor fluyente (BTU/s)
- Cp es la capacidad calorífica a presión constante (BTU/Lb°F)
- Dt es el cambio de temperatura (°F).

6. Cálculo del área de transferencia de calor:

El área es determinante en el coeficiente de transferencia de calor, puesto que determina la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo. La ecuación a utilizar será:

$$A = \pi D L n \quad (\text{Ec. 51})$$

Donde:

- A es el área de transferencia (pie^2),
- D es el diámetro de la tubería (pie),
- L es la longitud de la tubería (pie) y
- n es el número de tubos de los que consiste la unidad.

7. Cambio de Temperatura Logarítmica Media:

Esta se calcula por medio de los cambios de temperatura para la entrada y salida, de la siguiente forma:

$$\Delta T_{lm} = [(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})] / \ln[(T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci})] \quad (\text{Ec. 52})$$

Donde:

- ΔT_{lm} es el cambio de temperatura logarítmica media,
- T son las temperaturas ($^{\circ}\text{F}$) y
- los subíndices c es frío, h es caliente, i es interno y o es externo.

8. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor

$$h_i = Q / (A \cdot \Delta T_{lm}) \quad (\text{Ec. 53})$$

Donde:

- h_i es el coeficiente de transferencia de calor (BTU/hr pie²°F),
- A es el área de transferencia (pie²),
- ΔT_{lm} es el cambio de temperatura logarítmica media (°F) y
- Q es el calor fluyente (BTU).

9. Determinación de un modelo matemático

Debido a que Prandtl es constante en todo el intervalo de trabajo, entonces, a partir de la siguiente ecuación:

$$Nu = k Pr^{1/3} Re^n \quad (\text{Ec. 55})$$

Donde:

- Nu es el número de Nusselt,
- K es una constante arbitraria
- Re es el número de Reynolds y
- N es otra constante arbitraria.
-

Se puede linealizar de la siguiente manera:

$$Y = \ln[Nu / Pr^{1/3}] = n \ln(Re) + \ln K \quad (\text{Ec. 56})$$

Graficando Nusselt contra Reynolds, y realizando una correlación lineal, se puede obtener, una ecuación donde la pendiente es precisamente n y el intercepto es $\ln K$, de donde se puede obtener, por aproximaciones sucesivas un modelo matemático para determinar la relación entre el coeficiente de condensación y el coeficiente de transferencia de calor con respecto de Prandalt y Reynolds.

5.3.5 Datos calculados

Tabla II. Datos del vapor

Viscosidad:	1.88E-05(Lb/Pie*s)
Densidad:	0.0308928(lb/pie ²)
Diámetro externo:	1.14945237 pulg.
Diámetro interno	0.88145237
Temperatura de operación	202°F
Cp	0.49 (BTU/lb°F)
Reynolds	7.68E+04

Fuente Cálculo de muestra

Tabla III. Datos del agua

Viscosidad	4.95E-04(Lb/Pie*s)
Densidad	62.1553 (lb/pie ²)
Diámetro externo:	1.6041808 pulg.
Diámetro Interno	1.3361808 pulg.
Temperatura de operación entrada	33.828 °F
Temperatura de operación salida	92.8904 °F
Cp	1 (BTU/Lb°F)
K	0.363
Reynolds/M	1.92E+03
Prandalt	1.36E-03

Fuente Cálculo de muestra

Tabla IV. Datos del aceite

Viscosidad	2.07E-04 (Lb/Pie*s)
Densidad	44.751816 (lb/pie ²)
Diámetro externo	2.122065908 pulg.
Diámetro interno	1.854065908 pulg.
Temperatura de operación entrada	55.66266667 °F
Temperatura de operación salida	132.1928 °F
Cp	0.656 (BTU/h*pie°F)
K	0.067
Reynolds	3.31E+03
Prandtl	2.03E-03

Fuente Cálculo de muestra

Tabla V. Flujo de aceite altura 10 vrs altura variable de agua

Altura Aceite 10					
Altura de Agua	30	35	40	45	50
DT Im	9.27649	11.0222392	9.56518	9.2824106	8.247474
Flujo másico	0.1809	0.2229	0.2649	0.3069	0.3489
Q	1.2663	1.89465	2.27814	2.63934	2.7912
hi	0.13650	0.17189338	0.23817	0.28433777	0.338431
Nusselt	0.50247	0.63272902	0.87669	1.04662994	1.245743
Ln(Nusselt/Pr^{1/3})	1.51	1.74	2.07	2.24	2.42
Reynolds	348.120	428.944045	509.768	590.591868	671.4158
LnReynolds	5.85254	6.06132648	6.23396	6.38112520	6.509389

Fuente Cálculo de muestra

Tabla VI. Flujo de aceite altura 11 vrs altura variable de agua

Altura Aceite 11					
Altura de Agua	30	35	40	45	50
DT Im	9.22969	8.79848464	8.86958	8.22722242	7.39891
Flujo másico	0.1809	0.2229	0.2649	0.3069	0.3489
Q	1.53765	1.91694	2.59602	2.7621	3.1401
hi	0.16659	0.21787160	0.29269	0.33572691	0.4244
Nusselt	0.61323	0.80197205	1.07737	1.23579021	1.562192
Nusselt/Pr^{1/3}	5.53	7.23	9.71	11.14	14.09
Reynolds	348.120	428.944045	509.768	590.591868	671.4158
LnRe	5.85	6.06	6.23	6.38	6.51

Fuente Datos Calculados

Tabla VII. Flujo de aceite altura 12 vrs altura variable de agua

Altura Aceite 12					
Altura de Agua	30	35	40	45	50
DT Im	8.06655	7.36066345	7.08477	7.18737008	6.716543
Flujo másico	0.1809	0.2229	0.2649	0.3069	0.3489
Q	1.6281	2.13984	2.649	3.25314	3.27966
hi	0.20183	0.29071292	0.3739	0.45261896	0.488296
Nusselt	0.74293	1.07009647	1.37631	1.66606269	1.797387
Nusselt/Pr^{1/3}	6.70	9.65	12.41	15.02	16.21
Reynolds	348.120	428.944045	509.768	590.591868	671.4158
LnRe	5.85	6.06	6.23	6.38	6.51

Fuente Datos Calculados

Tabla VIII. Flujo de aceite altura 13 vrs altura variable de agua

Altura Aceite 13					
Altura de Agua	30	35	40	45	50
DT Im	9.46873	8.38950	8.65147	8.1563	7.7175
Flujo másico	0.1809	0.2229	0.2649	0.3069	0.3489
Q	2.7135	3.38808	3.92052	4.11246	4.1868
hi	0.28657	0.403847	0.45316	0.504203	0.54250
Nusselt	1.05486	1.48653	1.66806	1.85594	1.9969
Nusselt/Pr ^{1/3}	9.51	13.40	15.04	16.73	18.01
Reynolds	348.120	428.944	509.768	590.591	671.4158
LnRe	5.85	6.06	6.23	6.38	6.51

Fuente Datos Calculados

Tabla IX. Flujo de aceite altura 14 vrs altura variable de agua

Altura Aceite 14					
Altura de Agua	30	35	40	45	50
DT Im	8.1563	7.982356	6.3952	7.913601	10.8381
Flujo másico	0.1809	0.2229	0.2649	0.3069	0.3489
Q	2.3155	3.1206	3.92052	4.23522	7.4664
hi	0.2838	0.390937	0.61303	0.5351	0.6889
Nusselt	1.0449	1.439015	2.25654	1.96997	2.53583
Nusselt/Pr ^{1/3}	9.42	12.98	20.35	17.76	22.86
Reynolds	348.12	428.944	509.768	590.591	671.41
LnRe	5.85	6.06	6.23	6.38	6.51

Fuente Datos Calculados

Tabla X. Flujo de agua altura 30 vrs altura variable de aceite

Altura Agua 30					
Altura de Aceite	10	11	12	13	14
DT Im	9.27649	9.2296	8.0665	9.4687	8.1563
Flujo másico	0.881	1.0107	1.1404	1.2701	1.3998
Q	6.9352	6.6301	5.3863	4.5825	4.4076
hi	0.74761	0.7183	0.6677	0.4839	0.5403
Nusselt	20.6884	19.878	18.478	13.392	14.954
Ln(Nusselt/Pr ^{1/3})	1.63E+02	1.57E+02	1.46E+02	1.06E+02	1.18E+02
Reynolds	348.120	428.94	509.76	590.59	671.41
Ln Reynolds	5.85254	6.0613	6.2339	6.3812	6.5093

Fuente Datos Calculados

TablaXI. Flujo de agua altura 35 vrs altura variable de aceite

Altura Agua 35					
Altura de Aceite	10	11	12	13	14
DT Im	11.0222	8.7984	7.3603	8.3895	7.9823
Flujo másico	0.881	1.0107	1.1404	1.2701	1.3998
Q	8.0911	5.9671	4.1145	3.3327	3.6730
hi	0.73407	0.6782	0.5589	0.3972	0.4601
Nusselt	20.3136	18.7677	15.468	10.992	12.733
Ln(Nusselt/Pr ^{1/3})	1.60E+02	1.48E+02	1.22E+02	8.68E+01	1.01E+02
Reynolds	348.120	428.94	509.76	590.59	671.41
Ln Reynolds	5.85254	6.0613	6.2339	6.3811	6.5093

Fuente Datos Calculados

TablaXII. Flujo de agua altura 40 vrs altura variable de aceite

Altura Agua 40					
Altura de Aceite	10	11	12	13	14
DT Im	9.56517	8.8695	7.0847	8.6514	9.5651
Flujo másico	0.881	1.0107	1.1404	1.2701	0.881
Q	6.12612	5.3041	3.5908	3.7493	6.1261
hi	0.64046	0.5980	0.5068	0.4333	0.6404
Nusselt	17.7232	16.548	14.025	11.992	17.723
Ln(Nusselt/Pr ^{1/3})	1.40E+02	1.31E+02	1.11E+02	9.47E+01	1.40E+02
Reynolds	348.120	428.94	509.76	590.59	348.12
Ln Reynolds	5.85254	6.0613	6.2339	6.3811	5.8525

Fuente Datos Calculados

TablaXIII. Flujo de agua altura 45 vrs altura variable de aceite

Altura Agua 45					
Altura de Aceite	10	11	12	13	14
DT Im	9.28241	8.2272	7.1873	8.15632	7.91360
Flujo másico	0.881	1.0107	1.1404	1.2701	1.3998
Q	5.77936	4.9724	3.4412	3.7493	3.67307
hi	0.62261	0.6044	0.4787	0.4596	0.464147
Nusselt	17.2293	16.725	13.249	12.720	12.84416
Ln(Nusselt/Pr ^{1/3})	1.36E+02	1.32E+02	1.05E+02	1.00E+02	1.01E+02
Reynolds	348.120	428.94	509.767	590.59	671.415
Ln Reynolds	5.85254	6.06132	6.23395	6.3811	6.50938

Fuente Datos Calculados

5.3 Equipo con control automático

Figura40. Equipo con control automático



Dentro del control automático del equipo de intercambio de calor se buscó la manera más eficaz, eficiente y económica de poder realizar un buen control automático de este proceso, en pro del mejoramiento de la escuela de Ingeniería Química.

Además se escogió la tecnología más avanzada para la realización del proyecto buscando así estar a la vanguardia del desarrollo en la automatización de procesos, tema sumamente importante en el desarrollo de todas las industrias dentro del istmo centroamericano.

Para la implementación del proyecto se modificó parte de diseño del equipo, así como la práctica a realizar substituyendo algunos elementos de medición directa, por algunos elementos de medición indirecta, y agregando un elemento final de control, como lo fue un actuador en la válvula para el flujo de aceite.

Dentro de los tres posible protocolos a utilizar, Hart + 4 a 20 mA, Fieldbus y Profibus, se utilizó el protocolo más utilizado en la industria nacional que es el de Hart + 4 a 20 mA, el cual es sumamente funcional, aun que no es lo último en tecnología, la decisión de trabajar sobre la plataforma de 4 a 20 mA se tomó por diversas razones. Este protocolo de comunicación es el más utilizado dentro de las diferentes industrias, considerando la industria del azúcar como una de las más importantes se estima que el 70% de los ingenios trabajan con este tipo de protocolo, además el medidor de área diferencial a utilizar en este proyecto viene únicamente en el protocolo de 4 a 20mA y el utilizar un transductor de este protocolo a otro representaría un gasto mayor al estimado y con fines didácticos se considera que este protocolo será lo suficientemente útil para iniciar al estudiante al mundo de la automatización de procesos.

Otra de las ventajas de los diferentes instrumentos a instalar es que son fabricados con tecnología de punta, y considerados de alta eficiencia, desempeño y lo más importantes de gran flexibilidad en el sentido de los diferentes protocolos.

Cualquiera de los instrumentos que se utilizará en el control automático del proceso, a excepción del medidor de flujo de área diferencial, pueden ser utilizados con cualquiera de los tres protocolos antes mencionados, con tan solo cambiar una tarjeta de comunicación cuyo valor es mínimo. Esta es una de las razones primordiales por la cuales se utilizará este tipo de instrumentos y protocolos, buscando siempre en un futuro próximo expansión y evolución acorde el desarrollo industrial lo demande.

El equipo utilizado en el control automático del intercambiador de tubos concéntricos ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos, fue mínimo, únicamente seis elementos cuatro elementos sensores-trasmisores, un elementos final de control, y un controlador.

La especificación de cada uno de los instrumentos utilizados es la siguiente:

Transmisores de temperatura marca SMAR (TT301-110BDTDL3)

Características:

- Unidad simple que acepta señales de:
 - RTDs estándar y termopares
 - Señales finales o de sensores diferenciales
 - Señales en Ohm de indicadores de posición etc.
- Precisión básica de 0.02%
- Excelente estabilidad térmica
- Signo de insolación
- Dos cables, 4-20 mA de salida más la comunicación HART

- Remota configuración via Hand-Held Terminal, o vía PC
- Configuración en línea o fuera de línea
- Función PID opcional con curva se set point programable
- A prueba de explosiones y de agua
- Intrínsecamente seguro

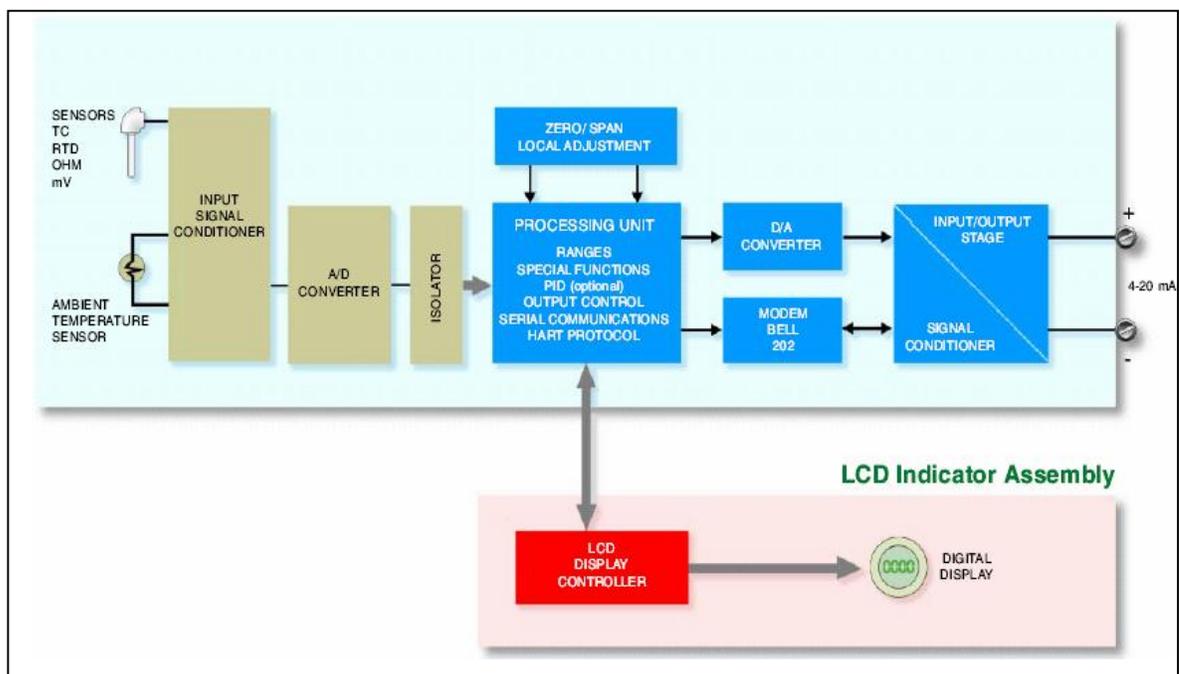
El transmisor de temperatura SMAR TT301 es un transmisor de temperatura muy poderoso y extremadamente versátil, el cual puede ser usado prácticamente en todos lo relacionado con el censo de temperatura. Como unidades similares puede ser utilizado con diferentes rangos de temperatura así como con diferentes sensores de temperatura como termocoplas, RTD's y otros.

Este tipo de transmisor reduce drásticamente el tiempo de calibración y mantenimiento. Junto a la señal de 4-20 mA en el mismo par de cables, se puede realizar la calibración ya que es una señal digital. Con este tipo de señal digital el instrumento se puede configurar y dar un nuevo rango de trabajo por medio de un Hand-Held o controlador manual el cual puede se conectado en cualquier sitio sobre los cables de 4-20 mA que llevan la señal. El TT301 puede operar como cualquier transmisor convencional de temperatura pero el usuario puede escoger o no el usar la comunicación digital.

Una de las características únicas del TT301 es la capacidad de control PID con la instrucción dada vía Hand-Held o por medio de ajuste local, el transmisor empieza trabajando como un "Transmitter Plus Controler". Los 4-20mA es la salida del controlador PID, la variable de proceso medida es temperatura y el set point es ajustado por el operador o por un controlador conectado al transmisor.

La señal de salida va conectado con el elemento final de control, lo que en este caso sería una válvula de control, cuando la parte digital de la señal informa la variable de proceso, salida, el setpoint, y todas las otras transmisiones y parámetros PID. El TT 301 opera como un diagrama de bloques presentado.

Figura 41. **Funcionamiento PID del TT 301**



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág.B49*

El TT301 puede ser configurado por Hand-Held o por una computadora personal utiliza el software CONF 301 junto a la interface SMAR HI311 el configurador corre bajo la aplicación MSWindows operating system. Lo que es la configuración, el cambio de rango, el ajuste del PID(opcional), el cambio de set point, y otros.

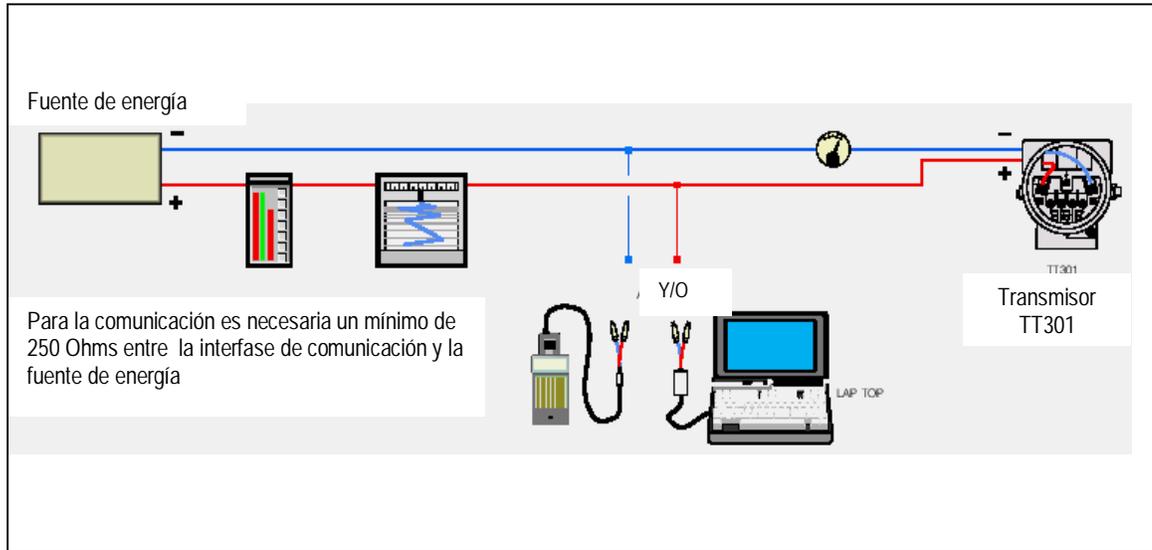
Puede ser realizado por el Hand-Held o por medio de este configurador, un solo Hand-Held puede ser utilizado para configurar cualquier número de transmisores, también se puede dar un ajuste local por medio de una varilla magnética, por medio de la cual se pueden dar ajustes del cero, del span y otras funciones como el cambio de calibración etc. Todas estas aplicaciones resultan en una pequeña ingeniería y disminución en el tiempo de Start-up.

Figura 42. **Métodos de configuración transmisor de temperatura**



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B50*

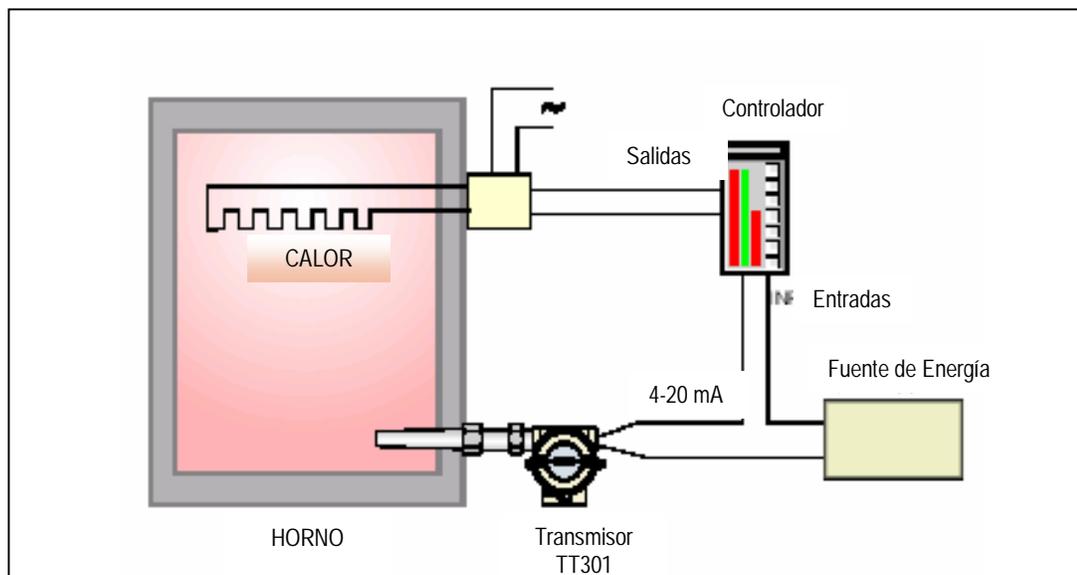
Figura 43. Conexión del cableado



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B50*

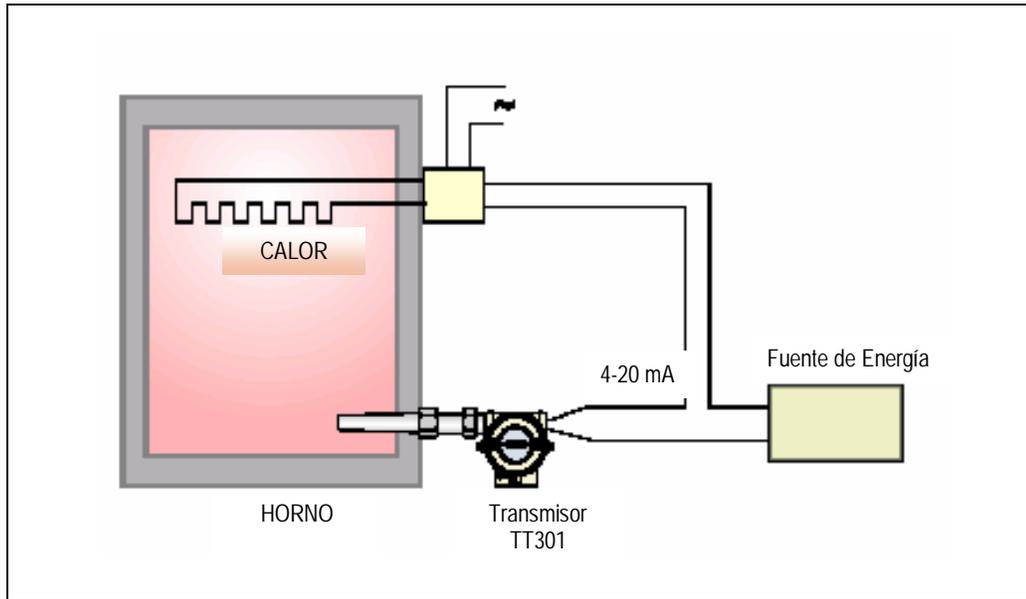
Aplicaciones

Figura 44. Funcionamiento convencional, transmisor de temperatura



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B51*

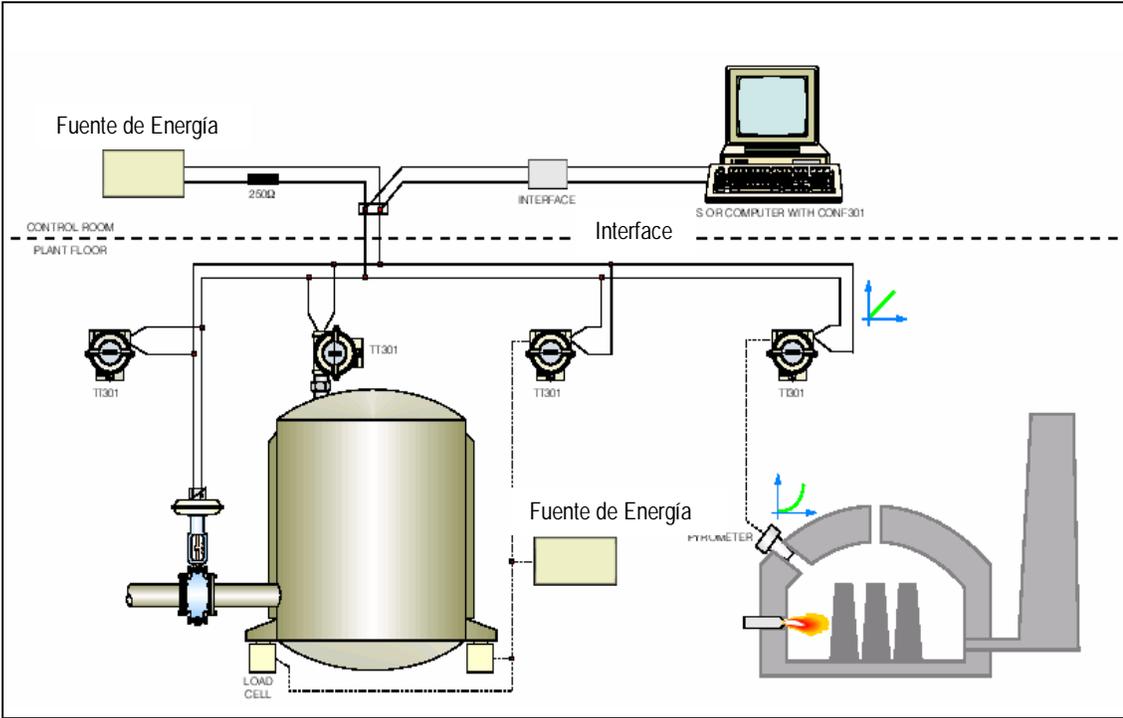
Figura 45. **Funcionamiento controlador PID (opcional) transmisor de temperatura**



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B50*

Cuando el TT301 es configurado como un controlador reemplaza la función de un controlador, reduciendo los costos e incrementando la rentabilidad. Cuando el sensor y el actuador son colocados normalmente y se localizan relativamente cerca comparten el cable, teniendo considerable ahorro en la cantidad de cable utilizado.

Figura 46. Configuración multidrop (con supervisión desde un cuarto de Control)



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B51*

Tabla XIV. **Características del sensor de temperatura 2,3 o 4 cables**

SENSOR	2, 3 or 4 Cables				
	TIPO	RANGO °C	RANGO °F	MINIMO SPAN °C	°C DIGITAL EXACTITUD
RTD	Cu 10 GE	-20 to 250	-4 to 482	50	± 1.0
	Ni120 DIN	-50 to 270	-58 to 518	5	± 0.1
	Pt50 IEC	-200 to 850	-328 to 1562	10	± 0.25
	Pt100 IEC	-200 to 850	-328 to 1562	10	± 0.2
	Pt500 IEC	-200 to 450	-328 to 842	10	± 0.2
	Pt50 JIS	-200 to 600	-328 to 1112	10	± 0.25
	Pt100 JIS	-200 to 600	-328 to 1112	10	± 0.25
THERMOCOUPLE	BNBS	100 to 1800	212 to 3272	50	± 0.5
	ENBS	-100 to 1000	-148 to 1832	20	± 0.2
	JNBS	-150 to 750	-238 to 1382	30	± 0.3
	KNBS	-200 to 1350	-328 to 2462	60	± 0.6
	NNBS	-100 to 1300	-148 to 2372	50	± 0.5
	RNBS	0 to 1750	32 to 3182	40	± 0.4
	SNBS	0 to 1750	32 to 3182	40	± 0.4
	TNBS	-200 to 400	-328 to 752	15	± 0.15
	LDIN	-200 to 900	-328 to 1652	35	± 0.35
	UDIN	-200 to 600	-328 to 1112	50	± 0.5

Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B53*

TablaXV. **Características del sensor de temperatura diferencial**

SENSOR	DIFFERENCIAL			
	RANGO °C	RANGO °F	MINIMO SPAN °C	°C DIGITAL EXACTITUD
RTD	-270 to 270	-486 to 486	50	± 2.0
	-320 to 320	-576 to 576	5	± 0.5
	-1050 to 1050	-1890 to 1890	10	± 1.0
	-1050 to 1050	-1890 to 1890	10	± 1.0
	NA	NA	NA	NA
	-800 to 800	-1440 to 1440	10	± 1.0
	-800 to 800	-1440 to 1440	10	± 1.5
THERMOCOUPLE	-1700 to 1700	-3060 to 3060	60	± 1.0**
	-1100 to 1100	-1980 to 1980	20	± 1.0
	-900 to 900	-1620 to 1620	30	± 0.6
	-1550 to 1550	-2790 to 2790	60	± 1.2
	-1400 to 1400	-2520 to 2520	50	± 1.0
	-1750 to 1750	-3150 to 3150	40	± 2.0
	-1750 to 1750	-3150 to 3150	40	± 2.0
	-600 to 600	-1080 to 1080	15	± 0.8
	-1100 to 1100	-1980 to 1980	35	± 0.7
	-800 to 800	-1440 to 1440	50	± 2.5

Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B53*

Tabla XVI. **Precisión de sensores mV, mVdif**

SENSOR	RANGE mV	MINIMUM SPAN mV	DIGITAL ACCURACY %
mV	-6 to 22	0.4	± 0.02% or ± 2 µV
	-10 to 100	2	± 0.02% or ± 10 µV
	-50 to 500	10	± 0.02% or ± 50 µV
mV DIF.	-28 to 28	0.4	± 0.1% or ± 10 µV
	-110 to 110	2	± 0.1% or ± 50 µV

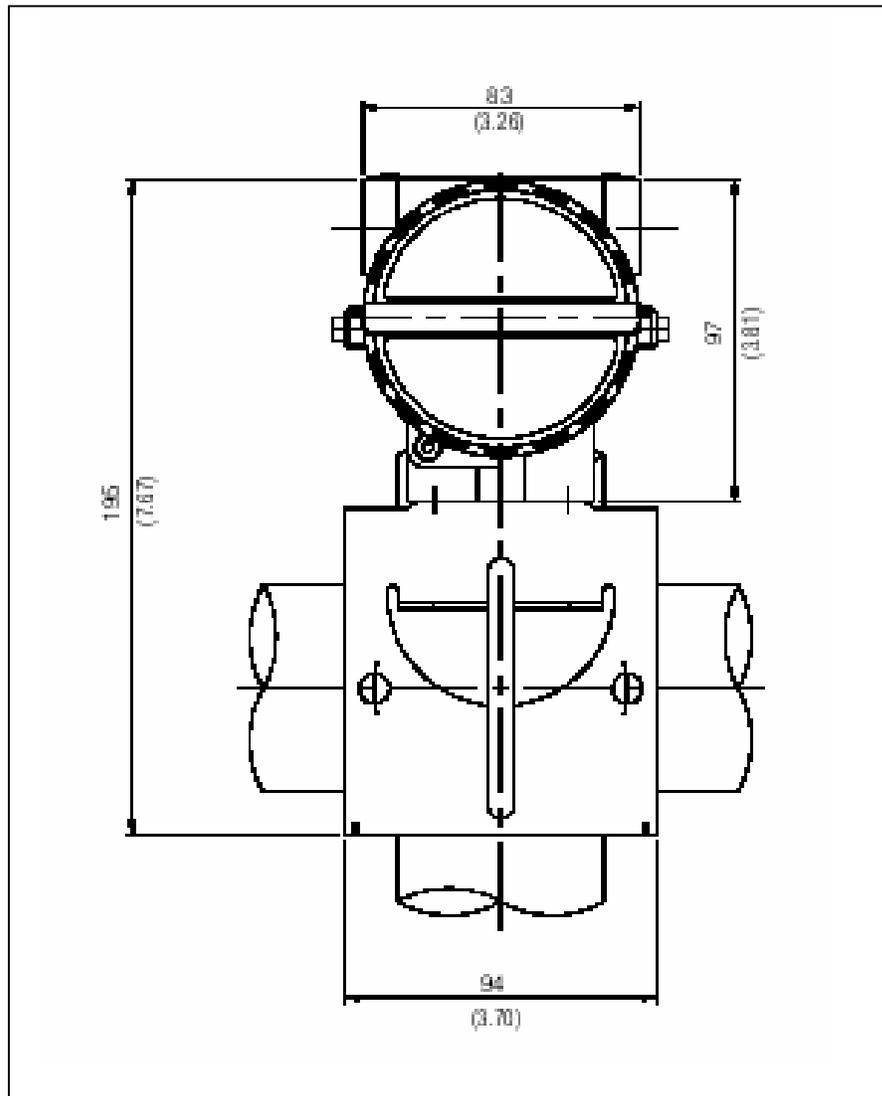
Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B53*

Tabla XVII. **Precisión de sensores Ohm, Ohn dif**

SENSOR	RANGE Ohm	MINIMUM SPAN Ohm	DIGITAL ACCURACY %
Ohm	0 to 100	1	± 0.02% or ± 0.01 Ohm
	0 to 400	4	± 0.02% or ± 0.04 Ohm
	0 to 2000	20	± 0.02% or ± 0.201 Ohm
Ohm DIF.	-100 to 100	1	± 0.08% or ± 0.04 Ohm
	-400 to 400	4	± 0.1% or ± 0.2 Ohm

Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B53*

Figura 47. Dimensión del transmisor de temperatura SMAR TT301



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002*. Pág. B55

Posicionador de Válvula (FY301-11-023-I1)

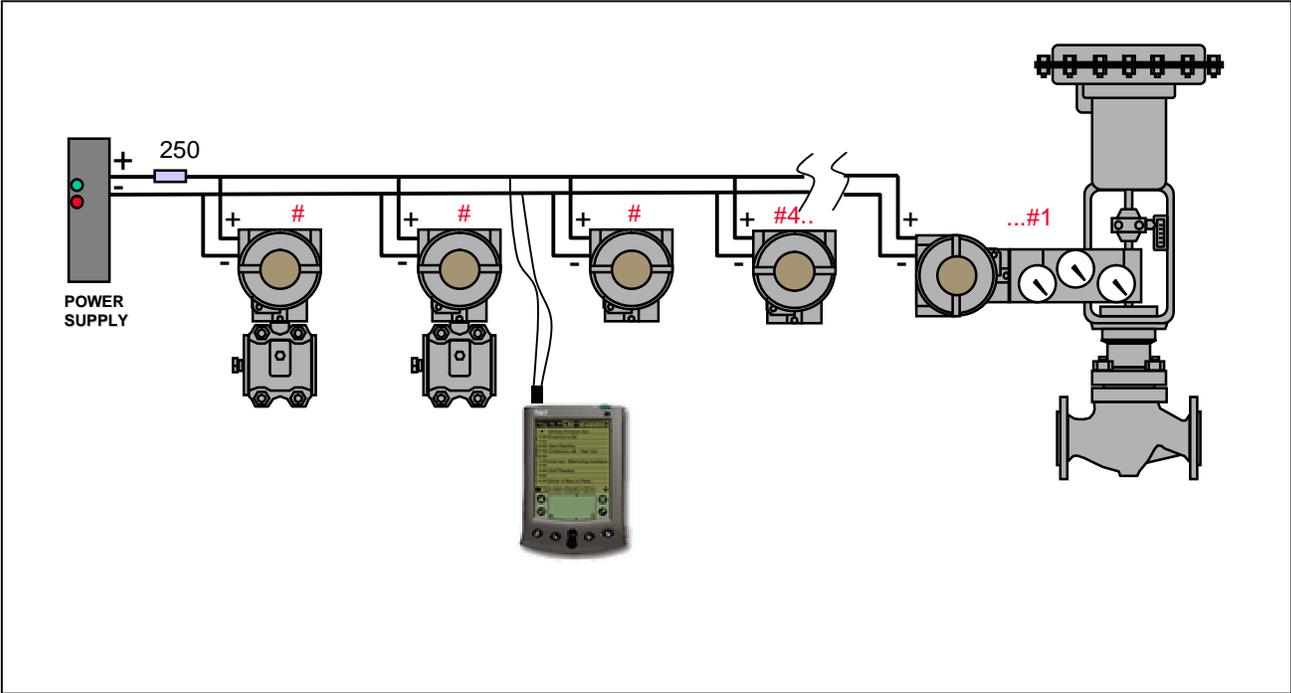
El FY 301 es un micro procesador basado en un posicionador que provee una rápida y exacta posición del diafragma o cilindro de los diferentes actuadores. El FY301 produce la presión requerida para colocar la válvula en la posición exacta según la señal de 4-20 mA suministrada, por el controlador o por algún transmisor.

El FY 301 es compacto y fácil de mantener ajustado por medio de comunicación remota basado en el protocolo HART con interfaces fáciles y entendibles entre el posicionador y el cuarto de control, por sus características reduce el tiempo de instalación y operación considerablemente; además se puede dar una calibración local.

Dentro de las características principales se destacan:

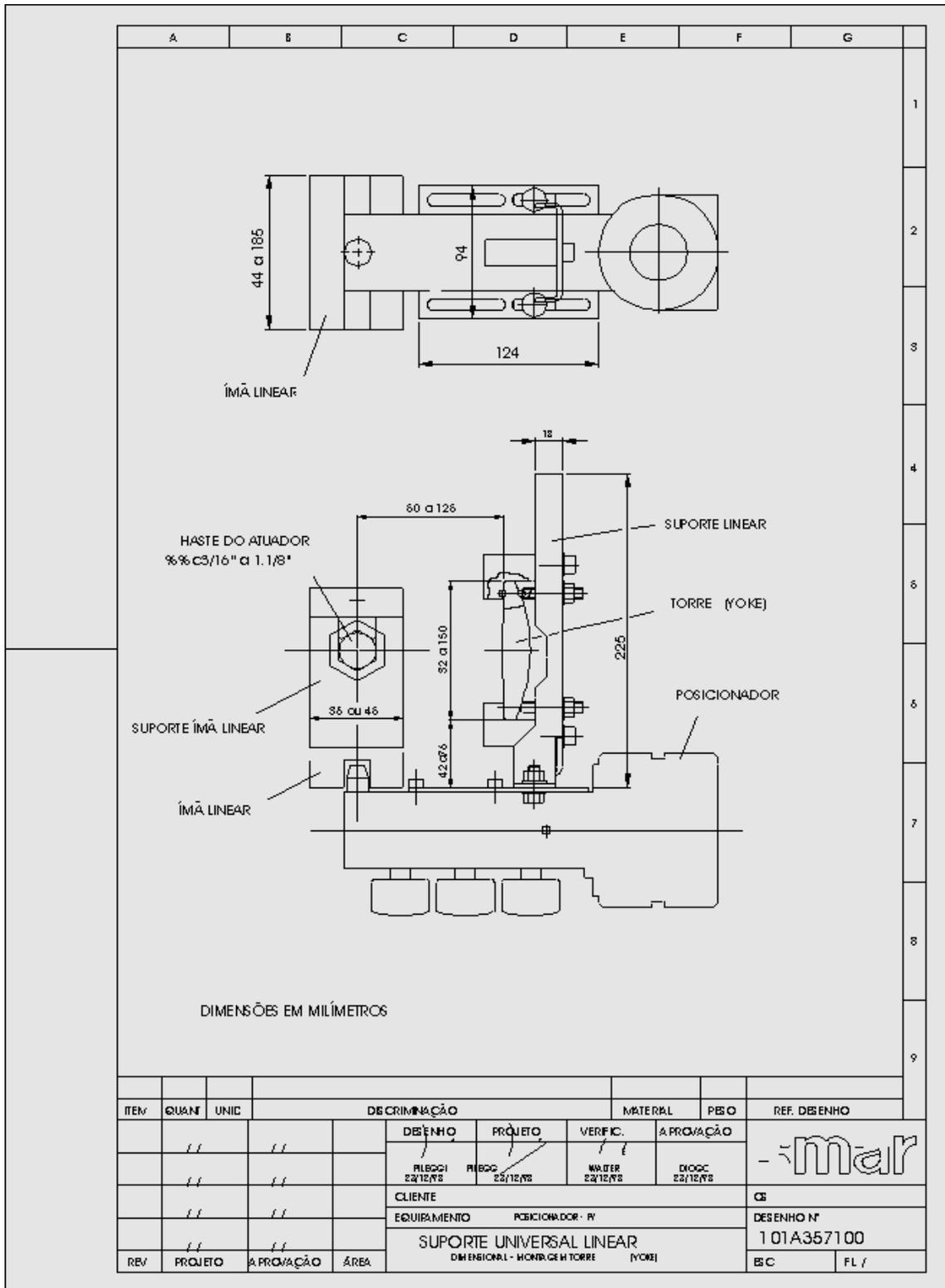
- Diseño compacto y modular
- Bajo consumo de aire
- Fácil instalación
- Operación con movimiento rotatorio y lineal, simple o doble actuación con actuadores neumáticos
- Fácil ajuste y parámetros de seting remotos con comunicación HART o con ajuste local.
- A prueba de agua y de explosiones, intrínsecamente seguro.
- Extremadamente flexible.

Figura 48. Programación multidrop



Fuente: *Industrial automation the hart / 4-20 mA book 2002. Pág. B71*

Figura 49. Posicionador de válvula



5.4 Propuesta de control automático de control en el intercambiador de tubos concéntricos, del laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad de San Carlos de Guatemala

En lo que respecta al control automático del proceso de transferencia de calor se estimo que la manera de llevar a cabo este proyecto es utilizando únicamente tres instrumentos de de medición y control, y un elemento final de control.

Se utilizarán tres transmisores de temperatura los cuales tienen la capacidad de control PID sobre el elemento final de control que en este caso será una válvula, esta válvula se colocará en la tubería de aceite para poder así regular el flujo de aceite, según lo requiera el control instalado.

Los transmisores de temperatura se colocaran de la siguiente manera:

El **TT 01** se colocara a la entrada del aceite antes de ingresar a la sección de calentamiento del intercambiador de calor como se observa en la figura No. 25, este transmisor de temperatura nos dará una fiel lectura de la temperatura a la cual esta ingresando el aceite al sistema, además de proporcionar un buen parámetro de control si se quiere estudiar globalmente el sistema de enfriamiento y calentamiento en conjunto, si se está dando un enfriamiento eficiente en el ciclo de enfriamiento con agua o que tanto se esta enfriando conforme se recircula el aceite, así mismo se puede buscar una estabilidad después de determinados ciclos. Se tiene estimado que la estabilidad del sistema completo se alcanza después de cierto tiempo. Con este tipo de instrumento se podrá encontrar esta estabilidad con una facilidad mayor que con un instrumento de medición directa como lo es el termómetro.

El segundo transmisor de temperatura **TT02** sería colocado en la salida del aceite en el ciclo de calentamiento, este es el transmisor más importante dentro de la práctica de control automático que se quiere realizar ya que es el que indica la temperatura en la salida de aceite en el ciclo de calentamiento y la entrada del aceite en el ciclo de enfriamiento, este instrumento es el que dicta en mayor parte lo que se realizara en esta prueba, este es el transmisor que se utilizará de control para poder manejar el equipo. El tipo de transmisores de temperatura que se utilizaran son de tecnología sumamente avanzada, y como se puede observar en la figura No. 30 este transmisor puede funcionar no sólo para transmitir una lectura de temperatura sino que tiene un sistema de control PID el cual será utilizado en esta práctica.

El tercer transmisor de temperatura que se utilizará será el **TT03** este transmisor de temperatura se colocará en la salida de aceite en la sección de enfriamiento para así poder determinar el grado de intercambio de calor que se dio desde la entrada al ciclo de enfriamiento hasta la salida del mismo ciclo, este transmisor al igual que el **TT01** tendrán la función de señalar el grado de calor del aceite para poder realizar comparaciones.

Finalmente se utilizara un elemento final de control el cual será una válvula de control llamada **FY01** esta válvula estará controlada básicamente por el transmisor de temperatura **TT02**, este transmisor será el encargado de enviar la señal de control a la válvula.

La idea fundamental de esta práctica es poder controlar la transferencia de calor vapor - aceite en el ciclo de calentamiento y aceite caliente - agua fría en el ciclo de enfriamiento, por medio de la regulación del flujo del aceite con una válvula de control, de esta válvula estará comandada dado por el transmisor de temperatura **TT02** transmisor que cuenta con control tipo PID.

Se estabilizará el sistema en un flujo constante de agua y se realizarán cambios del set point en el transmisor de temperatura **TT02** por medio de un Hand Heald o por medio de una varilla magnética, directamente sobre el transmisor en función como se observa en la figura No. 33, con la excepción que únicamente se tiene un transmisor y un elemento final de control. Se realizarán 10 variaciones de temperatura al set point del transmisor **TT02** tomando como resultado las variaciones de la altura del rotámetro y por medio de estas variaciones determinará el flujo. Al terminar estas 10 variaciones de set point se cambiará el flujo de agua y se estabilizará realizando una vez más estas 10 mediciones del flujo de aceite conforme se va cambiando el set point de la temperatura.

Con estas variaciones de set point en la temperatura y por consiguiente de flujo se podrá determinar un modelo matemático que relacione el flujo del aceite contra la transferencia de calor tanto de vapor al aceite, el coeficiente de condensación, como del aceite al agua, el coeficiente de transferencia de calor. Este será un modelo matemático que relacione Reynolds contra Nusselt y Prandtl, desarrollado a continuación.

5.5.1 Funcionamiento del equipo con control automático

1. Revisar que el tanque de almacenamiento contenga suficiente aceite.
2. Encender la bomba centrífuga del aceite, accionando el interruptor de la corriente eléctrica.
3. Alimentar corriente a los transmisores de temperatura así como alimentar de aire presurizado y corriente a la válvula de control Power Supply 12 a 45 Vcd
4. Abrir parcialmente la válvula del paso del aceite.
5. Dejar que fluir por 2 minutos el aceite buscando la estabilidad del sistema.
6. Abrir la válvula del ramal de agua y dejarla estable dejando correr por 2 minutos buscando la estabilidad del sistema de enfriamiento.
7. Abrir la válvula de vapor y fijar la presión a 15 PSI.
8. Establecer las temperaturas de entrada y salida mínimas del sistema de calentamiento teniendo interconectado el transmisor de temperatura TT02 con el elemento final de control.
9. El elaborar una tabla de temperaturas utilizando el transmisor de temperatura TT02 como un controlador, especificando la temperatura deseada, dentro del rango preestablecido y que el transmisor envíe la señal a la válvula de control..

10. Tomar el flujo de aceite cuando este llega a la estabilidad. Y repetir esta metodología en 10 repeticiones dentro del rango de temperatura preestablecido, dejando 2 minutos o más esperando que se llegue a la estabilidad del sistema.
11. Determinar con estas mediciones un modelo matemático que muestre la relación existente entre Reynolds , el coeficiente de condensación y el número de Prandtl para el sistema vapor-aceite.
12. Variar el flujo de agua en 10 unidades en el rotámetro después de estas 10 variaciones realizadas en el flujo de aceite.
13. Determinar un modelo matemático que muestre la relación existente entre el número de Reynolds, el coeficiente de transferencia de calor y el número de Prandtl para el sistema agua-aceite.
14. Cerrar la válvula de paso de vapor y dar 5 minutos para enfriar el sistema, se cierra el sistema de aceite y posterior el de agua.

5.4.2 Desarrollo del modelo matemático que relaciona flujo másico vrs. nusselt y prandtl

1. Por medio de la muestra de cálculo 5.3.3 se obtienen los valores de
 - a. $-(Re)$ Reynolds
 - b. $-(Pr)$ Prandtl
 - c. $-(Nu)$ Nusselt (h_i, h_o)

2. Se propone un modelo matemático:

$$\text{Nu} = K \text{Re}^a \text{Pr}^{1/3} \quad (\text{Ec. 57})$$

3. Se obtienen los valores de K y a por medio de la linealización de la ecuación 57

$$\text{Ln} (\text{Nu} / \text{Pr}^{1/3}) = \text{Ln} K + a \text{Ln} (\text{Re}) \quad (\text{Ec. 58})$$

Donde:

$$Y = \text{Ln} (\text{Nu} / \text{Pr}^{1/3})$$

$$X = \text{Ln} (\text{Re})$$

4. Se tiene el modelo

$$\text{Nu}/\text{Pr}^{1/3} = K \text{Re}^a \quad (\text{Ec. 59})$$

Donde ya se conocen los valores de K y de a por medio de la linealización realizada.

5. Se reescribe el valor de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{4 M}{D_i \mu \pi} \quad (\text{Ec. 60})$$

Donde:

- D_i es el diámetro interno de la tubería (plg),
- M es el flujo másico (lb/s) y
- μ es la viscosidad (lb_m/pie·s).

Se obtiene

$$\text{Nu}/\text{Pr}^{1/3} = K \left(\frac{4 M}{D \mu \pi} \right)^a \quad (\text{Ec. 61})$$

6. Despejando el flujo másico de la ecuación No. 61 se obtiene finalmente un modelo matemático que relaciona el flujo másico con Nusselt y Prandtl.

$$M = D \mu \pi \left(\frac{\text{Nu} (f(\Delta T))}{4 K \text{Pr}^{1/3}} \right)^a \quad (\text{Ec. 62})$$

CONCLUSIONES

1. Se determinó de un modelo matemático que relaciona Reynolds, Prandtl y Nusselt : “ $\ln[\text{Nu}/\text{Pr}^{1/3}] = n \ln(\text{Re}) + \ln K$ ”
2. Se encontró que a mayor flujo de aceite se dará menor transferencia de calor ya que el tiempo de contacto entre el fluido de proceso y el fluido de trabajo es menor.
3. La implementación de un sistema de control automático dará como consecuencia una mejora en la toma de los resultados por el alto grado de exactitud de los equipos, además la relación que el estudiante tendrá con este tipo de equipos será de una relevancia significativa en su futuro profesional.
4. La aplicación de un control PID dentro del control automático en el intercambio de calor, dará una visión mucho más amplia de lo que significa control de procesos a nivel industrial.

RECOMENDACIONES

1. Que se viabilice la práctica experimental por medio de la implementación del equipo de automatización propuesto.
2. Comprobar el modelo matemático que relaciona Reynolds, Prandtl y Nusselt, presentado como consecuencia de la implementación de la práctica.
3. Introducir al estudiante al mundo de la automatización de procesos por medio de la implementación de esta práctica ya que se tendrá un alto beneficio con un costo relativamente bajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adriano Olivera: LC700 configuration, Copyright Smar, Sao Paulo, Brasil 2004
2. Adriano Olivera: TT301 Operation & configuration, Copyright Smar, Sao Paulo, Brasil 2004
3. Industrial automation the hart / 4-20mA book Copyright Smar, Sao Paulo, Brasil 2002
4. Kern, Donald: Transferencia de calor, 28 reimpresión, primera edición, Editorial CECSA, México, 1995.
5. McCabe, Warren / Smith, Julian: Operaciones básicas de Ingeniería Química, Cuarta edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1991.
6. Perry, Robert / Green, Don: Perry's Chemical Engineers' Handbook, sexta edición, McGraw-Hill, San Francisco, USA, 1996.
7. Smith-Van Ness: Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química, Cuarta edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1995.