

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
TEMPERATURA EN TANQUE ESFERICO PARA EL HOSPITAL PABLO
TOBON URIBE

OSCAR DARIO ALVAREZ GIL
JUAN PABLO ARANGO ATEHORTUA

INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERIA
TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA
MEDELLÍN
2013

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
TEMPERATURA EN TANQUE ESFERICO PARA EL HOSPITAL PABLO
TOBON URIBE

OSCAR DARIO ALVAREZ GIL
JUAN PABLO ARANGO ATEHORTUA

Monografía para optar el título de Tecnólogos en Mecatrónica

Asesor:
Ing. Guillermo Carvajal Rincón
Msc (e) Maestría en Gestión Energética Industrial

INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERIA
TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA
MEDELLÍN
2013

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GENERAL	15
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
4. REFERENTES TEORICOS	16
4.1 ANTECEDENTES	16
4.2 ESTADO DEL ARTE	17
4.3 CONTROL DE LA TEMPERATURA	19
4.3.1 Inicios de la teoría de control y control de la temperatura	19
4.3.1.1 Historia de la teoría de control	19
4.3.1.2 Aportes de los griegos y árabes	20
4.3.1.3 Revolución industrial	21
4.3.1.4 Regulador de temperatura	22
4.3.1.5 Regulador flotador	22
4.3.1.6 Regulador de presión	23
4.3.2 La influencia de las matemáticas en la teoría de control	23
4.3.3 Procesos industriales	24
4.3.4 El control automático a partir de 1950	24
4.3.5 Historia del control de la temperatura	25

	pág.
4.3.5.1 Los primeros termómetros	26
4.3.5.2 Controladores de temperatura	28
4.4 TUBERIAS UTILIZADAS EN EL TRANSPORTE DE FLUIDOS	28
4.4.1 Tamaños nominales	28
4.4.2 Materiales para tuberías	29
4.4.3 Tubería de cobre	29
4.4.4 Conductos de hierro dúctil	29
4.4.5 Normas para tubería	30
4.4.6 Manejo de tablas para tuberías	30
4.4.7 Numero de cedula (SCHEDULE)	31
4.4.8 Dimensionamiento de tanques y tuberías	32
4.4.9 Tanques de almacenamiento	34
4.4.9.1 Por su uso	34
4.4.9.2 Por su forma	34
4.4.9.3 Recipientes abiertos	35
4.4.9.4 Recipientes cerrados	35
4.4.9.5 Tanques cilíndricos de fondo plano	35
4.4.9.6 Recipientes cilíndricos horizontales y verticales con cabezas formadas	35
4.4.9.7 Recipientes esféricos	36
4.5 VALVULAS DE CONTROL AUTOMATICO	36
4.6 CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS	41
4.6.1 Sistema de control en la lazo abierto	41
4.6.2 Sistema de control en lazo cerrado	42
4.6.3 Controlador MAXTHERMO	42
4.6.4 Modos de control	43
4.6.4.1 Control Proporcional	44
4.6.4.2 Control Integral	47
4.6.4.3 Acción Derivativa	49

	pág.
4.6.4.4 Modo de control ON-OFF	53
4.7 Sensores de temperatura	54
4.7.1 Detectores de temperatura resistivos (RTD)	54
4.7.2 Termistores	57
4.7.3 Termopares	59
4.8 TRAMPAS DE VAPOR	62
4.8.1 Grupo mecánico	63
4.8.1.1 Trampa de flotador libre	63
4.8.1.2 Trampa de balde invertido	64
4.8.2 Grupo termodinámico	65
4.8.3 Grupo termostático	66
4.8.3.1 Trampa de presión balanceada	66
4.8.3.2 Trampa tipo bimetalico	68
4.9 TRANSFERENCIA DE CALOR	70
4.9.1 Conducción de calor	70
4.9.1.1 Ley de Fourier	70
4.9.1.2 Conducción de calor a través de una pared plana simple	71
4.9.1.3 Transferencia de calor a través de una pared compuesta	73
4.9.1.4 Conducción de calor a través de un cilindro hueco (Tubería)	74
4.9.1.5 Aislamientos térmicos. Resistencias térmicas	75
4.9.2 Convección	76
4.9.2.1 Tipos de convección	76
4.9.2.2 Ley de Newton. Coeficientes convectivos	77
4.9.3 Radiación	78
4.9.3.1 Ley de Stefan-Boltzmann	80
4.9.3.2 Radiación desde o hacia cuerpos grises	80
4.10 INTERCAMBIADORES DE CALOR	81
4.10.1 Tipos de intercambiadores de calor	81
4.10.1.1 De tubo concéntrico o doble tubo	81

	pág.
4.10.1.2 De Coraza (casco) y tubos	82
4.10.1.3 Intercambiadores de flujo cruzado (mezclado)	83
4.10.1.4 Intercambiador de flujo transversal (no mezclado)	84
4.10.2 Balances de calor	84
4.10.3 Media logarítmica de temperatura	85
4.10.3.1 Factores de corrección de temperatura	86
4.10.4 Coeficientes globales de transferencia de calor	86
4.10.5 Efectividad de los intercambiadores de calor	87
4.10.6 Diseño de un intercambiador de calor	87
4.10.7 Calculo de intercambiadores de calor	89
5. METODOLOGIA	92
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	92
5.2 MÉTODO ESCOGIDO	92
5.3 APORTES DEL PROYECTO	92
5.3.1 Aporte científico	92
5.3.2 Aporte social	92
5.3.3. Aporte práctico	93
5.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	93
5.5 PROCEDIMIENTO	93
5.6 TIPO DE PROYECTO	94
5.7 PLAN DE TRABAJO	94
6. DESARROLLO DEL TRABAJO	95
6.1 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO	95
6.1.1 Instrumentos usados en las mediciones	99
6.1.2 Diagrama de instrumentación del proceso	100
6.1.3 Variables de proceso	101
6.1.4 Dimensionamiento del tanque y tuberías	101

	pág.
6.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	101
6.2.1 Cálculos para obtener el flujo de vapor	102
6.2.2 Cálculos para obtener la longitud del tubo del serpentín	104
6.3 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL	106
6.3.1 Sensores de temperatura	106
6.3.2 Controlador	106
6.3.3 Válvula de control	107
6.3.4 Indicadores de temperatura	107
6.3.5 Accesorios adicionales	107
6.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	108
6.4.1 Diagrama de instrumentación del proceso terminado	109
6.4.2 Parámetros del controlador	109
6.4.3 Funcionamiento del sistema de control	109
6.5 PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL	110
6.5.1 Resultados y discusión	112
6.5.2 Datos tabulados después de implementar el sistema de control	113
7. RECURSOS	117
7.1 HUMANOS	117
7.2 TÉCNICOS	117
8. CONCLUSIONES	118
9. RECOMENDACIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	120
CIBERGRAFÍA	121

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Válvula de control	38
Figura 2 Características inherentes de flujo de la válvula	39
Figura 3 Sistema de control en lazo abierto	41
Figura 4 Sistema de control en lazo cerrado	42
Figura 5 Controlador MAXTHERMO	43
Figura 6 Control proporcional	44
Figura 7 OFFSET del control proporcional	46
Figura 8 Respuesta de la acción integral	48
Figura 9 Respuesta de la acción integral más proporcional	49
Figura 10 Controlador PID	51
Figura 11 Modo de control ON-OFF	54
Figura 12 Curva de resistencia de varios metales	55
Figura 13 Estructura de un termistor	58
Figura 14 Termopares	60
Figura 15 Trampa de flotador libre	63
Figura 16 Trampas de vapor de balde invertido	64
Figura 17 Trampa de vapor termodinámica	65
Figura 18 Diferentes tipos de trampa de vapor bimetálicas	68
Figura 19 Conducción de calor a través de una pared plana	71
Figura 20 Flujo de calor a través de una pared compuesta	73
Figura 21 Conducción de calor a través de la pared de una tubería	74
Figura 22 Intercambiador de calor de tubo concéntrico	82
Figura 23 Intercambiador de calor de coraza y tubos (1-2)	83
Figura 24 Distribución de temperatura para intercambiadores	86
Figura 25 Factor de corrección F, en intercambiadores	90
Figura 26 Eficiencia de un intercambiador de calor a contracorriente	91
Figura 27 Válvula manual de entrada de vapor	99

	pág.
Figura 28 Termómetro bimetálico para medir temperatura del agua	100
Figura 29 Diagrama de instrumentación del proceso	100
Figura 30 Diámetro del serpentín	105
Figura 31 Diseño del serpentín	106
Figura 32 Conexión a dos hilos	108
Figura 33 Diagrama de instrumentación del proceso terminado	109
Figura 34 Termoresistencia para medir la temperatura del agua	111
Figura 35 Implementación del controlador	111
Figura 36 Implementación de la válvula solenoide con Bypass	112

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Dimensiones de los tubos de acero	31
Tabla 2 Dimensionamiento de tanques	33
Tabla 3 Resistencia en las válvulas	37
Tabla 4 Selección de las curvas características de las válvulas	40
Tabla 5 Características de las sondas de resistencia	56
Tabla 6 Tipos de termopares	61
Tabla 7 Diferencia de las trampas de vapor	69
Tabla 8 Conductividad térmica de algunos materiales	73
Tabla 9 Valores aproximados de coeficientes de transmisión de calor	78
Tabla 10 Valores de coeficiente global de transferencia de calor	87
Tabla 11 Datos del proceso	95
Tabla 12 Datos de temperatura promedio de un turno de 24 horas	96
Tabla 13 Abertura de la válvula de vapor en un mes	97
Tabla 14 Temperatura en diferentes aéreas de trabajo en 24 horas	98
Tabla 15 Especificaciones del controlador MAXTHERMO	107
Tabla 16 Datos promedio de un turno de 24 horas con control	113
Tabla 17 Abertura de la válvula solenoide de vapor con control	114
Tabla 18 Temperaturas en diferentes áreas en 24 horas con control	115
Tabla 19 Costo del material técnico	117

RESUMEN

Se pretende diseñar un sistema de control de temperatura a la salida de un serpentín que hace parte de un sistema de distribución de agua en el Hospital Pablo Tobón Uribe de Medellín. Primero se evalúa la temperatura del proceso y la forma como se controla esta variable de manera manual. Se estudian alternativas de diseño que se adapten al presupuesto del Hospital y se implementa el sistema más adecuado.

Se evalúa el sistema de control de temperatura y se comparan los datos para verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño.

INTRODUCCION

Se pretende diseñar un control automático de calentamiento y monitoreo de temperatura del agua en un tanque esférico con una capacidad de almacenamiento de 22.500 litros.

El proyecto se desarrolla en Hospital Pablo Tobón Uribe con el fin de facilitar el calentamiento del agua almacenada en un tanque esférico; la cual es utilizada para los baños de las habitaciones de hospitalización de pacientes y algunas áreas de servicio que requieran agua caliente; además de ello se busca cubrir otras exigencias en el Hospital. Se pretende que con sistema de control se ahorre energía que se consume en la producción de vapor.

Para la ejecución de este proyecto se desarrolló un cronograma de actividades para cubrir el análisis de proceso, el diseño del sistema de control, la implementación y las pruebas finales para evaluar las especificaciones de diseño.

El diseño de un sistema de control en un proceso industrial permite monitorear las variables de proceso y garantizar el control de la variable de proceso de acuerdo a la consigna que introduzca el operario en el controlador.

De esta forma esperamos que esta implementación libere al operario del control manual de la válvula de regulación de vapor y el sistema funcione de manera autónoma y garantice el control en la temperatura del agua de suministro.

1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

El Hospital Pablo Tobón Uribe como empresa prestadora de servicios de salud cuenta con las áreas de hospitalización, fisioterapia, centrales de esterilización, restaurante, las cuales requieren el suministro del agua con una temperatura entre 38°C y 45°C.

En estos momentos el calentamiento del agua se hace utilizando un tanque de agua de almacenamiento que contiene un serpentín. Al serpentín se le inyecta vapor, para que por transferencia de calor el agua almacenada en el tanque adquiera temperatura requerida.

Actualmente un operario debe dirigirse con frecuencia a monitorear la temperatura y de acuerdo al valor debe abrir o un cerrar una válvula manualmente para llevar la temperatura a un intervalo adecuado.

Algunas veces la válvula que controla el flujo de vapor queda abierta y este se pierde. Lo anterior también provoca un aumento exagerado de temperatura del agua que requieren las diferentes áreas de servicio.

En este momento no es posible garantizar una temperatura adecuada para las instalaciones del Hospital, puesto que el control es manual y depende de la habilidad y disponibilidad del operario. Las variaciones en la temperatura también son afectadas por cambios en la temperatura del vapor generado en la caldera.

2. JUSTIFICACION

El proyecto surge de la necesidad de controlar de una manera automática y económica el calentamiento del agua que es suministrada a las áreas de hospitalización, fisioterapia, centrales de esterilización, restaurante, entre otras del Hospital Pablo Tobón Uribe.

Será de gran ayuda en el manejo del suministro de agua caliente para el baño de los pacientes, el lavado de la loza en el restaurante y a su vez el operario no tendrá que estar visualizando cada hora la temperatura en el termómetro del tanque y estar manipulando la válvula de vapor cada vez que esta cambie de valor con respecto a la consigna. (38°C y 45°C).

El desarrollo de este proyecto tendrá una reducción en costos para el Hospital Pablo Tobón Uribe, ya que con este control se tendrá una óptima temperatura en el agua del tanque y se evitará el desperdicio de vapor por sobrecalentamiento de la misma, de igual manera no se necesitará un operario para monitorear y controlar la temperatura del proceso.

En el área de salud ocupacional se garantizará una mayor seguridad industrial, ya que el operario no tendrá que estar manipulando las válvulas de vapor y se evitará el riesgo de quemaduras y accidentes.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de control automático de suministro de vapor para un serpentín que se encuentra sumergido en un tanque de almacenamiento de agua, para garantizar un abastecimiento continuo de agua a la temperatura requerida en el proceso.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar un análisis de funcionamiento del proceso para determinar cuál es la solución adecuada que se adapte a las necesidades y presupuestos del Hospital.

Elaborar el diseño del sistema de control de acuerdo a las especificaciones obtenidas en el objetivo anterior.

Seleccionar los instrumentos de medición y control.

Implementar el control y programar los parámetros para que funcione correctamente.

Realizar pruebas de funcionamiento para verificar que el sistema cumpla con las especificaciones.

4. REFERENTES TEORICOS

4.1 ANTECEDENTES

El HOSPITAL PABLO TOBON URIBE en procura de prestar un servicio de la mejor calidad decidió en el año 1975 contar con un suministro de agua caliente eficaz, para este fin contó con la ayuda de la empresa ENERGÍA SOLAR LTDA, la cual recomendó la construcción de un tanque esférico con capacidad para 22500 litros, que se calentaría por medio de un serpentín instalado en la parte interna del tanque, al que se le suministraría vapor de una caldera. Hasta la fecha esta maniobra de suministrar vapor al serpentín se está realizando manualmente.

El aumento paulatino en las áreas del HOSPITAL PABLO TOBON URIBE ha incrementado el consumo de agua caliente, razón por la cual es indispensable pensar en el diseño de un control automático de temperatura; por lo anterior el departamento de Ingeniería y mantenimiento se ha visto obligado en adquirir tecnología para garantizar calidad, bajos costos, seguridad y confiabilidad en los procesos.

Por ello uno de nuestros integrantes que hace parte del departamento de mantenimiento, presentó ante las directivas de ingeniería y mantenimiento el presente proyecto “Diseño e Implementación de un sistema de control de temperatura en tanque esférico” el cual fue aprobado.

4.2 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, en la Unión Europea, el consumo de energía en edificios residenciales y públicos constituye más del 40% de la totalidad de energía que se utiliza en todos los países miembros.

La creciente eficiencia energética en el sector de la construcción puede ayudar significativamente a reducir la cantidad de energía importada, que es actualmente de un 48%. Se prevé que la Unión Europea estará importando 67% de su energía para el año 2020.

Como consecuencia, los países de la UE están obligados a mejorar la eficiencia energética en los edificios existentes y están obligados a la implementación de nuevas tecnologías y soluciones en nuevos proyectos. Son requisitos adicionales que incluyen un edificio normal y la instalación de controles para implantar una gestión energética más eficiente.

Las normas mínimas de la eficiencia energética se han establecido para el agua de calderas que funcionan con combustibles líquidos o gaseosos.

El objetivo de estas actividades es estimular a los productores a buscar alternativas de tecnificación (reciclaje de energía, la biomasa, los sistemas integrados) para mejorar la eficiencia energética en el sector de la construcción, reducir el consumo de combustible, y reducir al mínimo la emisión de la contaminación y de efecto invernadero los gases a la atmósfera.

El sector de la construcción consume gran parte de la energía térmica y eléctrica en la UE y por lo tanto contribuye de manera significativa a las emisiones de dióxido de carbono en el medio ambiente.

El consumo de calor en los hospitales para el propósito de suministrar agua caliente sanitaria se caracteriza por una gran estabilidad y constancia durante todo el año.

Por lo tanto, es posible aplicar energía solar a sistemas y bombas de calor para producir agua caliente sanitaria en este tipo de instalaciones. Por el contrario, Ruan et al. Analizaron la aplicación de sistemas de cogeneración (CHP) en cuatro típicos edificios (hoteles, tiendas, hospitales y oficinas) en el no-residencial (NR) categoría.

Una de las conclusiones a las que se ha elaborado de este estudio es que los hoteles y los hospitales son los más adecuados lugares para la aplicación de los sistemas de producción combinada de calor y (CHP), ya que tienen la demanda de calor bastante constante a lo largo del año. [1]

Un estudio teórico se ha llevado a cabo en el comportamiento transitorio del calentador de agua de uso doméstico central. El calentador está modelado matemáticamente y las ecuaciones que gobiernan se resuelven por el método de Runge-Kutta.

La variación de los parámetros de rendimiento, tales como la duración de calentamiento de agua hasta que la temperatura del agua en el tanque de calentador alcanza hasta 60°C, que es el parámetro de diseño para el calentador y la temperatura del agua en el tanque durante un período de consumo de agua en función del caudal de flujo de masa a través de la bobina del calentador se estudió para determinar un rango óptimo para la tasa de flujo de masa que especifica el tamaño de la bomba de circulación.

En muchos edificios, como hoteles, apartamentos, etc. Se proporciona agua caliente sanitaria a los residentes mediante el uso del calentador de agua integrado en una caldera de calefacción central del edificio.

El calentador por lo general consiste de un depósito de agua y una bobina helicoidal o de tubo en U. Agua caliente en torno a 90°C de la calefacción central de la caldera fluye dentro de la bobina para calentar agua para uso doméstico en el depósito y devuelve a la caldera.

Este es una circulación de bucle cerrado y realizado por una bomba de circulación y por conveniencia, se llama calentamiento "loop" a lo largo de este documento.

La temperatura del agua en el tanque se puede medir por un termostato que controla tanto una válvula de solenoide que se coloca en un tubo que conecta el tanque principal de abastecimiento de agua y una bomba de circulación de calentamiento de bucle.

Si la temperatura del agua en el depósito alcanza hasta la temperatura de ajuste, que es por lo general 60°C, el termostato activa la válvula solenoide permitiendo agua de la red para entrar al tanque de agua caliente doméstica y está listo para el consumo en este punto. [2]

4.3 CONTROL DE LA TEMPERATURA

A continuación se hace un resumen de lo que se ha hecho desde sus inicios para controlar la temperatura en los procesos industriales.

4.3.1 Inicios de la teoría de control y control de la temperatura.

4.3.1.1 Historia de la teoría de control. El Control Automático ha tomado un papel muy importante en la actualidad ya que ha tenido un rápido desarrollo en los últimos años. El control a lo largo del tiempo ha tenido un proceso de evolución que se inició, aproximadamente, en el año 300 A.C.

Año en el que los griegos empezaron a tener la necesidad de medir empíricamente el tiempo, y que ha continuado con etapas tan importantes como lo fueron la Revolución Industrial y las Guerras Mundiales.

Cuando la máquina de vapor fue inventada y se dio inicio a la Revolución Industrial, se inició paralelamente la necesidad de realizar un sistema de control para poder manipular los diferentes parámetros de esta máquina.

Desde el año de 1957, cuando empieza la era espacial y de la informática, hasta la actualidad, con el desarrollo tecnológico en las diferentes áreas, el Control Automático es algo con lo que se convive día a día, y hace que la vida de sea cada día más fácil.

4.3.1.2 Aportes de los griegos y árabes. Entre los años 300 a.C. y 1200 d.C., la necesidad de los griegos y los árabes por obtener una medida de forma exacta el tiempo los llevó a realizar grandes aportaciones a la teoría y a la práctica del control automático.

Uno de los primero inventos de los griegos fue el reloj de agua, el cual fue el primer dispositivo realimentado, este fue implementado mediante un regulador de flotador, el cual tenía la función de mantener el nivel del agua de un tanque a una cierta profundidad constante.

Al tener una profundidad constante, se produce un flujo también de manera constante que atraviesa por un tubo u orificio el que llena al segundo tanque, entonces según sea el nivel del segundo tanque era el tiempo transcurrido.

Con este aporte los griegos usaron el regulador del flotador para otras aplicaciones y así empezar con el control automático, se diseñaron sifones para mantener diferencia de nivel constantes entre dos tanques y poco después este sistema se lo uso para abrir puertas de templos.

Entre los años 800 y 1200 varios ingenieros árabes usaron el regulador para relojes de agua y otras aplicaciones. En estos mismos años se empezó a usar el término “todo/nada”, con lo que con el pasar de los tiempos empezarían a existir los diferentes tipos de controladores.

En 1354 se construyó el famoso reloj de Estrasburgo (Suiza), este era un reloj en forma de ave, hecho de metal que no sólo podía abrir el pico, sacar la lengua y cantar, sino que además podía extender sus plumas y mover sus alas.

Como resultado de la evolución de la Ciencia y del pensamiento durante los siglos XVI y XVII, se formó en el siglo XVIII todo un movimiento ideológico, fundamentalmente racionalista y crítico, llamado Ilustración.

Este siglo se denominó el "Siglo de la Razón" o "Siglo de las Luces" ya que los filósofos pretendían iluminar con la razón todos los misterios del mundo y del hombre, a la vez que terminar con la oscuridad de la ignorancia y de la superstición que en esos tiempos era algo muy común entre las personas.

4.3.1.3 Revolución industrial. La Revolución Industrial en Europa logró un gran avance ya que se produjo la introducción de motores o máquinas auto-conducidas. Esto vino marcado por la invención de molinos de grano avanzados, hornos, calderas, y el motor de vapor.

Estos dispositivos no se podían regular adecuadamente a mano, por lo que surgió una nueva exigencia para los sistemas de control automáticos. Una variedad de dispositivos de control fue inventada, incluyendo los reguladores de flotador, de temperaturas, de presión y dispositivos de control de velocidad. J. Watt inventó su motor de vapor en 1769, marcando el principio de la Revolución Industrial.

Es importante reconocer que otros, principalmente T. Newcomen en 1712, construyeron los primeros motores de vapor. Sin embargo, los intentos iniciales eran ineficaces, sobretodo porque los motores eran regulados a mano.

Es sumamente importante comprender que la Revolución Industrial no comenzó hasta la invención de los motores mejorados y los sistemas de control automáticos regulados.

4.3.1.4 Regulador de temperatura. Alrededor de 1624, J. Kepler desarrolló un sistema de control automático de temperaturas para un horno, motivado por su creencia, basada en que los metales podrían transformarse en oro manteniéndolos a una temperatura exactamente constante durante largos períodos de tiempo. También usó este regulador de temperatura en una incubadora para pollos.

Los Reguladores de temperaturas fueron estudiados por J.J. Becher en 1680, y usados otra vez, en una incubadora por el Príncipe de Conti y R.A.F. de Réaumur en 1754.

"El registro del centinela" fue desarrollado en América por W. Henry alrededor de 1771, quien sugirió su empleo en hornos químicos, en la fabricación de acero y porcelana, y en el control de temperaturas de un hospital.

En 1777, se desarrolló un regulador conveniente de temperatura para el uso industrial por Bonnemain, quien lo utilizó para una incubadora.

Su dispositivo fue instalado más adelante en el horno de una planta de calefacción de agua caliente.

4.3.1.5 Regulador flotador. Hubo dos aspectos principales para los cuales fue necesario perfeccionar y profundizar el sistema del regulador de flotador. La caldera de un motor de vapor y los sistemas de distribución doméstica de agua.

El empleo más temprano de un regulador de válvula de flotador conocido fue en una caldera de vapor, Wood usó un regulador de flotador para un motor de vapor en su cervecería en 1784.

En 1791, este tipo de regulador se lo utilizaba frecuentemente en motores de vapor.

4.3.1.6 Regulador de presión. Además de controlar el líquido en la caldera, era necesario aprender a regular la presión del vapor para mantenerla constante. En 1681, D. Papin inventó una válvula de seguridad para una cocina de presión, y en 1707 la usó como un dispositivo de regulación de su motor de vapor. Esto se convirtió, entonces, una característica habitual de los motores de vapor.

Un regulador de presión más refinado fue realizado en 1799 por R. Delap y M. Murray.

De esta forma se combinó el avance en los reguladores de flotadores y de presión para el control de motores de vapor en 1803.

4.3.2 La influencia de las matemáticas en la teoría de control. El diseño de sistemas de control realimentado después de la Revolución Industrial estaba desarrollándose por medio de prueba y error junto con mucha intuición de la ingeniería. Era más un arte que una ciencia.

En las matemáticas de mediados del siglo XIX, primero fue usado el análisis de la estabilidad de sistemas de control realimentado.

Como la matemática es la lengua formal de la teoría del control automático, se podría llamar al período anterior la prehistoria de la teoría del control.

4.3.3 Procesos industriales. A principios del siglo XX, hubo una necesidad industrial de instrumentos capaces de medir, grabar y controlar presiones, temperaturas y otras variables.

Desde mediados de 1930 Estados Unidos ha mantenido un liderazgo sobre otras potencias como Europa en materia de instrumentos controladores y sensores. Los controladores automáticos eran de tres tipos, mayormente.

Relé eléctrico con válvula operada por un solenoide que da una acción de on/off.

Relé eléctrico con válvula operada por un motor una acción proporcional de banda ancha.

En 1922 lo valioso de un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) había sido mostrado por Minorsky.

La función proporcional se conocía desde el comienzo del relé. Sin embargo, la parte integral no se conoció hasta 1920 y la derivativa en 1930.

4.3.4 El control automático a partir de 1950. Conforme las plantas modernas con muchas entradas y salidas se vuelven más y más complejas, la descripción de un sistema de control moderno requiere una gran cantidad de ecuaciones.

La teoría de control clásica que trata de los sistemas con una entrada y una salida, pierde su solidez ante sistemas con entradas y salidas múltiples.

Desde 1960, debido a que la disponibilidad de las computadoras digitales hizo posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos, la teoría de control moderna, basada en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a

partir de variables de estados, se ha desarrollado para enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos respecto a la precisión, el peso y el coste en aplicaciones militares, espaciales e industriales.

Durante los años comprendidos entre 1960 y 1980, se investigaron a fondo el control óptimo, tanto de sistemas determinísticos como estocásticos, y el control adaptable, mediante el aprendizaje de sistemas complejos.

En la actualidad la teoría de control ha tomado un papel muy importante ya que por medio de esta herramienta podemos realizar la identificación de un sistema.

4.3.5 Historia del control de la temperatura. La temperatura de los cuerpos es un concepto que el hombre en la era primitiva captó a través de sus sentidos. Un gran ejemplo de esto es que si tocamos dos piedras iguales, una a la sombra y otra calentada por el sol (o por el fuego de una hoguera) las encontramos diferentes. Tienen algo distinto que detecta nuestro tacto, es la temperatura.

En base a este hecho el hombre empezó a interesarse por el estudio del fenómeno físico como es la temperatura.

Las primeras valoraciones de la temperatura dadas a través del tacto son simples y poco matizadas. De una sustancia sólo podemos decir que está caliente, tibia (caliente como el cuerpo humano), templada (a la temperatura del ambiente), fría y muy fría

Con el diseño de aparatos se pudieron establecer escalas para una valoración más precisa de la temperatura.

4.3.5.1 Los primeros termómetros. Inicialmente se elaboraron termómetros con materiales de coeficiente elevados de dilatación aprovechando el fenómeno de la dilatación. De este modo al aumentar la temperatura, su estiramiento era fácilmente visible. El metal base que se utilizaba en este tipo de termómetros ha sido el mercurio, encerrado en un tubo de vidrio que incorporaba una escala graduada.

El creador del primer termómetro fue Galileo Galilei, este consistía en un tubo de vidrio terminado en una esfera cerrada, el extremo abierto se sumergía boca abajo dentro de una mezcla de alcohol y agua, mientras la esfera quedaba en la parte superior. Al calentar el líquido, éste subía por el tubo.

Para evaluar la temperatura ambiente, calentaba con la mano el bulbo e introducía parte del tubo boca abajo en un recipiente con agua.

El aire circundante, más frío que la mano, enfriaba el aire encerrado en el bulbo y el agua ascendía por el tubo.

La distancia entre el nivel del líquido en el tubo y en el recipiente se relacionaba con la diferencia entre la temperatura del cuerpo humano y la del aire.

Si se enfriaba la habitación el aire se contraía y el nivel del agua ascendía en el tubo. Si se calentaba el aire en el tubo, se dilataba y empujaba el agua hacia abajo.

Las medidas de temperaturas obtenidas por el método de Galileo tenía errores, debido a que en dicho termómetro había la intervención de otro fenómeno físico que Galileo no considero como es la presión, ya que existe variaciones de presión atmosférica que soporta el agua que pueden hacer variar el nivel del líquido sin que varíe la temperatura. En 1644 Torricelli estudió la presión y construyó el primer barómetro para medirla.

En 1641, el Duque de Toscana, construye el termómetro de bulbo de alcohol con capilar sellado, como los que usamos actualmente. Para la construcción de estos aparatos fue fundamental el avance de la tecnología en el trabajo del vidrio. A mediados del XVII, Robert Boyle descubrió las dos primeras leyes que manejan el concepto de temperatura.

En los gases encerrados a temperatura ambiente constante, el producto de la presión a que se someten por el volumen que adquieren permanece constante

La temperatura de ebullición disminuye con la presión.

Posteriormente se descubrió, pese a la engañosa evidencia de nuestros sentidos, que todos los cuerpos expuestos a las mismas condiciones de calor o de frío alcanzan la misma temperatura (ley del equilibrio térmico). Al descubrir esta ley se introduce por primera vez una diferencia clara entre calor y temperatura.

En 1717 Fahrenheit, un germano-holandés fabricante de instrumentos técnicos, construyó e introdujo el termómetro de mercurio con bulbo y tomó como puntos fijos:

El de congelación de una disolución saturada de sal común en agua, que es la temperatura más baja que se podía obtener en un laboratorio, mezclando hielo o nieve y sal.

La temperatura del cuerpo humano, una referencia demasiado ligada a la condición del hombre.

Además dividió la distancia que recorría del mercurio en el capilar entre estos dos estados en 96 partes iguales.

Con este termómetro de precisión Fahrenheit consiguió medir la variación de la temperatura de ebullición del agua con la presión del aire ambiente y comprobó que todos los líquidos tienen un punto de ebullición característico.

En la actualidad para el uso industrial se encuentran diferentes tipos de sensores de temperatura como son las termocupla, termistores, etc.

4.3.5.2 Controladores de temperatura. Los primeros controladores de temperatura se dieron con la llegada de la revolución industrial, ya que en dichos años las personas empezaban a querer ciertos fluidos a una cierta temperatura deseada. Y así con la llegada de la revolución industrial se introducen los términos de controlador o regulador de temperatura.

Con el pasar de los años y con la ayuda de la teoría de control se han diseñado diferentes tipos de controladores que se describirán más adelante.

En la actualidad existen muchos procesos industriales que requieren un cierto controlador de temperatura, como ejemplo si estamos en una fábrica que fabrica galletas bañadas en chocolate, se requiere tener una cierta cantidad de agua a una cierta temperatura para que de esta manera el chocolate se mantenga en estado líquido.

Por esta razón los controladores de temperaturas se han ido mejorando y han llegado a tomar un papel muy importante a nivel industrial.

4.4 TUBERÍAS UTILIZADAS EN EL TRANSPORTE DE FLUIDOS

4.4.1 Tamaños nominales (comerciales). Las tuberías en las plantas de proceso representan aproximadamente un 30% del costo del material, corresponden a cerca de un 35% del trabajo del montaje y consumen más o

menos un 50 % de las horas-hombre de ingeniería. De ahí su importancia en el desarrollo de un proyecto.

4.4.2 Materiales para las tuberías. En la antigüedad se utilizaba troncos de madera huecos para transportar agua y tuberías de barro principalmente para drenajes. En la actualidad se fabrican para muy variados procesos y de diferentes materiales, destacándose el acero al carbono, aleaciones de acero, cobre, aluminio, vidrio. Los conductos de latón se utilizan con fluidos corrosivos, al igual que el acero inoxidable.

Otros materiales utilizados son: el plomo, el estaño, arcilla vitrificada, concreto y muchos tipos de plásticos, como el polietileno, el nylon y el cloruro de polivinilo (PVC). Los materiales más usados en definitiva son el acero y sus aleaciones.

4.4.3 Tuberías de cobre. Las líneas de plomería doméstica, para refrigeración y de aire comprimido, con frecuencia utilizan tubería de cobre manufacturadas como las denominadas tipo K o tipo L. El tipo K tiene mayor grosor de pared y es recomendable para instalaciones subterráneas. El tipo L es adecuado para tuberías domésticas de propósito general. El tamaño nominal de los tubos de cobre es de 1/8 de pulgada, menos el diámetro exterior real del tubo.

4.4.4 Conductos de hierro dúctil. A menudo, las líneas de conductos de agua y drenaje se hacen con hierro dúctil, debido a su resistencia, ductilidad y relativa facilidad de manejo.

Ha sustituido al hierro forjado en muchas aplicaciones. Junto con los tubos, se proporcionan conectores estándar para la instalación adecuada de la tubería ya sea subterráneas o no. Varias clases de conductos de hierro dúctil están disponibles para su uso en sistemas que manejan un intervalo de presiones.

4.4.5 Normas para las tuberías. Las tuberías son fabricadas de acuerdo a las especificaciones de la tabla 1 y cumplen con estándares internacionales como las de la ASTM, el Código ANSI y el estándar del Instituto Americano del Petróleo (API). Cuando se trata por ejemplo de tuberías de acero al carbono, las especificaciones más usadas son las de la ASTM A-53 y la ASTM A-106, que se refieren exclusivamente a tuberías sin costura.

4.4.6 Manejo de tablas para tuberías. Los diámetros reales internos y externos de conductos y tubos estándares disponibles comercialmente, pueden ser bastante diferentes del tamaño nominal dado. En la tabla 1 se dan los datos correspondientes al diámetro exterior, diámetro interior, grueso de pared y área de flujo para algunos de tales tipos. Los tamaños nominales para los conductos comercialmente disponibles todavía están en unidades de pulgadas, a pesar de que la adopción del SI es una tendencia internacional.

Puesto que el tamaño nominal se utiliza solamente para el diseño de ciertos conductos y tuberías, en este texto se utilizará el tamaño estándar convencional.

Sin embargo, ahora vienen las dimensiones en milímetros (mm) para los diámetros interior y exterior y para el grueso (espesor) de las paredes. El área de flujo está dada en metros cuadrados para ayudarle a mantener la consistencia de unidades en los cálculos. Los datos se dan en también se dan en el sistema Británico de unidades.

Tabla 1. Dimensiones de tubos de acero

Diámetro nominal	Diámetro exterior		Diámetro interior		Área de flujo	
	Pulg.	mm	Pulg.	mm	Pie ²	m ²
1/8	0.405	10.3	0.269	0.0224	0.000 394	3.660 x 10 ⁻⁵
¼	0.540	13.7	0.364	0.0303	0.000 723	6.717 x 10 ⁻⁵
3/8	0.675	17.1	0.493	0.0411	0.001 33	1.236 x 10 ⁻⁴
½	0.840	21.3	0.622	0.0518	0.002 11	1.960 x 10 ⁻⁴
¾	1.050	26.7	0.824	0.0687	0.003 70	3.437 x 10 ⁻⁴
1	1.315	33.4	1.049	0.0874	0.006 00	5.574 x 10 ⁻⁴
1 ¼	1.660	42.2	1.380	0.1150	0.010 39	9.653 x 10 ⁻⁴
1 ½	1.900	48.3	1.610	0.1342	0.014 14	1.314 x 10 ⁻³
2	2.375	60.3	2.067	0.1723	0.023 33	2.168 x 10 ⁻³
2 ½	2.875	73.0	2.469	0.2058	0.033 26	3.090 x 10 ⁻³
3	3.500	88.9	3.068	0.2557	0.051 32	4.768 x 10 ⁻³
3 ½	4.000	101.6	3.548	0.2957	0.068 68	6.381 x 10 ⁻³
4	4.500	114.3	4.026	0.3355	0.088 40	8.213 x 10 ⁻³
5	5.563	141.3	5.047	0.4206	0.139 0	1.291 x 10 ⁻²
6	6.625	168.3	6.065	0.5054	0.200 6	1.864 x 10 ⁻²
8	8.625	219.1	7.981	0.6651	0.347 2	3.226 x 10 ⁻²
10	10.750	273.1	10.020	0.8350	0.547 9	5.090 x 10 ⁻²
12	12.750	323.9	11.938	0.9948	0.777 1	7.219 x 10 ⁻²
14	14.000	355.6	13.126	1.094	0.939 6	8.729 x 10 ⁻²
16	16.000	406.4	15.000	1.250	1.227	0.1140

Fuente: Prácticas de Laboratorio de Procesos. Orlando Palacios. Politécnico JIC. 2005

4.4.7 Número de cédula (Schedule). El Schedule de una tubería se obtiene en forma aproximada a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Numero de Cedula} = (\text{Schedule}) = 100P/S \quad (1)$$

Dónde:

S: es el esfuerzo admisible de trabajo en Psi o Mpa determinado en tablas según el material.

P: es la presión manométrica interna en Psi o Mpa.

La expresión anterior se basa en la fórmula para el cálculo del espesor del tubo:

$$t = (PD / 2 S) + C \quad (2)$$

Dónde:

D: es el diámetro exterior de la tubería en pulg. omm.

t: es el espesor de la tubería en pulg. omm.

C: Tolerancia por corrosión en pulg. omm.

En conclusión, el Schedule es una expresión que viene a ser más o menos proporcional a la relación entre la presión de trabajo y el esfuerzo admisible y también a la relación entre el espesor corroído y el diámetro.

4.4.8 Dimensionamiento de tanques y tuberías. Para la selección de tuberías y dimensionamiento de tanques se deberán tener en cuenta variables como la cantidad y tipo de fluido que se almacenará en cierto tiempo.

Para dimensionamiento de tanques se tiene en cuenta la geometría del tanque para determinar el volumen y luego de se puede determinar la capacidad de acuerdo a las dimensiones.

Tabla 2. Dimensionamiento de tanques

Geometría del tanque	Volumen	Dimensiones
Cubo	$V = L^3$	Longitud del lado
Cilíndrico	$V = \pi r^2 h$	Radio del cilindro Altura del tanque
Esférico	$V = 4/3 \pi r^3$	Radio de la esfera
Cónico	$V = 1/3 \pi r^2 h$	Radio y altura del tanque

Fuente: Tabla diseñada por los autores

Para las tuberías, el tipo de fluido: las propiedades físico-químicas del fluido (densidad, viscosidad, pH, etc), la presión y temperatura del fluido, la corrosión y el costo, el flujo (Q) que transportará, lo mismo que la velocidad del fluido, v.

De acuerdo a la ecuación de continuidad ($Q = v \cdot A$), donde A es el área de flujo, la velocidad del fluido aumenta a medida que se disminuye el área de flujo. Por consiguiente las tuberías más pequeñas producirán velocidades más altas, y, al contrario, las tuberías más grandes producirán bajas velocidades.

Las pérdidas de energía aumentan drásticamente a medida que se aumenta la velocidad (en función cuadrática). Es por esto que se hace deseable mantener velocidades bajas. Pero debido a que las tuberías más grandes son más costosas, es necesario establecer algunas limitaciones

Una velocidad de flujo razonable para sistemas de flujo es de aproximadamente 3.0 m/s (alrededor de 10 pies /s). Aplicable a fluidos como: agua, aceite y otros líquidos de uso común en las tuberías de descarga de las bombas.

4.4.9 Tanques de almacenamiento. Existen numerosos tipos de recipientes que se utilizan en las plantas industriales o de procesos.

Algunos de estos tienen la finalidad de almacenar sustancias que se dirigen o convergen de algún proceso, este tipo de recipientes son llamados en general tanques.

Los diferentes tipos de recipientes que existen, se clasifican de la siguiente manera:

4.4.9.1 Por su uso. Los podemos dividir en recipientes de almacenamiento y en recipientes de procesos. Los primeros nos sirven únicamente para almacenar fluidos a presión y de acuerdo con sus servicios son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc.

4.4.9.2 Por su forma. Los recipientes a presión pueden ser cilíndricos o esféricos. Los primeros son horizontales o verticales, y pueden tener en algunos casos, chaquetas para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según sea el caso.

Los esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento, y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes a altas presiones.

Puesto que la forma esférica es la forma natural que toman los cuerpos al ser sometidos a presión interna esta sería la forma más económica para almacenar fluidos a presión, sin embargo en la fabricación de estos es mucho más cara a comparación de los recipientes cilíndricos.

Los tipos más comunes de recipientes pueden ser clasificados de acuerdo a su geometría como:

4.4.9.3 Recipientes abiertos. Los recipientes abiertos son comúnmente utilizados como tanque igualador o de oscilación como tinajas para dosificar operaciones donde los materiales pueden ser decantados como: desecadores, reactores químicos, depósitos, etc.

Obviamente este tipo de recipiente es más que el recipiente cerrado de una misma capacidad y construcción. La decisión de que un recipiente abierto o cerrado es usado dependerá del fluido a ser manejado y de la operación.

Estos recipientes son fabricados de acero, cartón, concreto, etc. Sin embargo en los procesos industriales son construidos de acero por su bajo costo inicial y fácil fabricación.

4.4.9.4 Recipientes cerrados. Fluidos combustibles o tóxicos o gases finos deben ser almacenados en recipientes cerrados. Sustancias químicas peligrosas, tales como ácidos o soda cáustica son menos peligrosas si son almacenadas en recipientes cerrados.

4.4.9.5 Tanques cilíndricos de fondo plano. El diseño en el tanque cilíndrico vertical operando a la presión atmosférica, es el tanque cilíndrico con un techo cónico y un fondo plano descansando directamente en una cimentación compuesta de arena, grava o piedra triturada.

En los casos donde se desea usar una alimentación de gravedad, el tanque es levantado arriba del terreno y el fondo plano debe ser incorporado por columnas y vigas de acero.

4.4.9.6 Recipientes cilíndricos horizontales y verticales con cabezas formadas. Son usados cuando la presión de vapor del líquido manejado puede determinar un diseño más resistente. Varios códigos han sido desarrollados o por medio

de los esfuerzos del API y el ASME para gobernar el diseño de tales recipientes.

Una gran variedad de cabezas formadas son usadas para cerrar los extremos de los recipientes cilíndricos. Las cabezas formadas incluyen la semiesférica, elíptica, toriesférica, cabeza estándar común y toricoidal.

Para propósitos especiales de placas planas son usadas para cerrar un recipiente abierto. Sin embargo las cabezas planas son raramente usadas en recipientes grandes.

4.4.9.7 Recipientes esférico. El almacenamiento de grandes volúmenes bajo presiones materiales es normalmente en los recipientes esféricos. Las capacidades y presiones utilizadas varían grandemente. Para los recipientes mayores el rango de capacidad es de 1000 hasta 25000 Psi (70.31 - 1757.75 Kg/cm²).y de 10 hasta 200 Psi (0.7031 - 14.06 Kg/cm²) para los recipientes menores.

Cuando una masa dada de gas esta almacenada bajo la presión es obvio que el volumen de almacenamiento requerido será inversamente proporcional a la presión de almacenamiento.

En general cuando para una masa dada, el recipiente esférico es más económico para grandes volúmenes y bajas presiones de operación. A presiones altas de operación de almacenamiento, el volumen de gas es reducido y por lo tanto en tipo de recipientes cilíndricos es más económico.

4.5. VÁLVULAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Perdidas menores (locales): En los sistemas de flujo además de que se presentan las pérdidas por fricción en las tuberías también ocurren pérdidas de carga en los diversos accesorios que incluyen el sistema.

Las pérdidas menores se deben a cambios de dirección del fluido, a reducciones o ampliaciones en las en las corrientes del flujo, a restricciones del flujo como sucede en una válvula.

Coeficiente de resistencia de válvulas (K) y accesorios: Estas pérdidas llamadas menores, h_v , están dadas en función un coeficiente de resistencia, K, que depende del tipo de accesorio y de la cabeza de velocidad del fluido. Mediante la siguiente expresión: $h_v = K (v^2 / 2g)$. Donde K depende del tipo de accesorio.

Tabla 3. Resistencia en las válvulas

Tipo de válvula	Longitud en diámetros de conducto
Válvula de globo-completamente abierta.	340
Válvula de ángulo-completamente abierta	150
Válvula de compuerta-completamente abierta	8
Válvula de verificación-tipo giratorio	100
Válvula de verificación-tipo de bola	150
Válvula de mariposa-completamente abierta	45
Codo Standard de 90°	30
Codo de radio de largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Te Standard-con flujo a través de un tramo	20
Te Standard-con flujo a través de una rama	60
Válvula de bola (Cierre Rápido) Abierta	3

Fuente: Válvulas de sifón. Joliet, IL.

Por la ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas de carga: $h_f = f (L/D) (v^2 / 2g)$ equivale a la misma pérdida pero en tramos rectos de tubería. En consecuencia, igualando las dos ecuaciones, queda que $K = f (L / D)$.

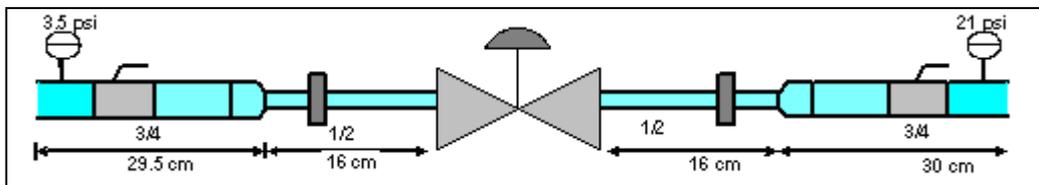
Donde: f es el factor de fricción, L se convierte en la longitud equivalente y D es el diámetro interior de la tubería. De tal forma que $L/D = K/f$.

L/D es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta donde se produce la misma pérdida que en el accesorio del mismo tamaño de la tubería.

En la tabla 3 encontramos algunos valores de L/D para diversos accesorios.

El esquema de la figura 1 muestra el montaje requerido el cual se complementa con un medidor de flujo tipo venturi utilizado para determinar experimentalmente el coeficiente de resistencia de una válvula en el laboratorio.

Figura 1. Válvula de control



Fuente: Mecánica de Fluidos. Mauricio Velásquez. Politécnico JIC. 2010

Coeficiente de flujo de una válvula (C_v o K_v): La capacidad y el tamaño de las válvulas de control se reflejan en su coeficiente de la válvula.

Inicialmente se utilizó el C_v definido como “El caudal de agua a 60 °F (15.5 °C) en galones USA por minuto que pasa a través de una válvula totalmente abierta y con una pérdida de carga de un psi”.

Posteriormente se definió un coeficiente para manejo en unidades métricas, K_v , diferentes al sistema Inglés utilizado hasta el momento en la norma internacional IEC-534-1987 sobre válvulas de control de procesos industriales como: “Caudal de agua (20 °C) en m^3/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar ($10^5 Pa$).

La equivalencia entre K_v y C_v , para válvula totalmente abierta es:

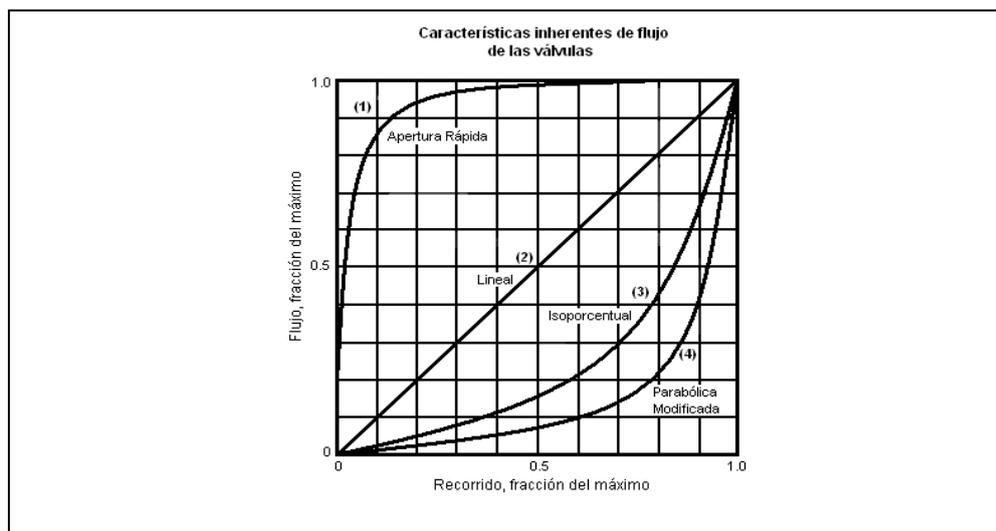
$$K_v = 0,86 C_v \quad (3)$$

Características de caudal efectivas e inherentes de las válvulas: Las curvas de caudal efectivas de la válvula de control nos muestran como está trabajando la válvula en un sistema ya instalado.

En los sistemas de flujo reales, la caída de presión ocasionada por una válvula de control varía según su porcentaje de apertura. Esta situación hace que la característica de caudal efectiva sea diferente a la llamada característica inherente, la cual es obtenida en fábrica con caída de presión constante a través de la válvula.

Los tipos más comunes de características inherentes de las válvulas son: De apertura rápida (1), lineal (2), isoporcentual (3), parabólica modificada (4). Véase figura 2. Características inherentes de flujo de las válvulas.

Figura 2. Características inherentes de flujo de las válvulas



Fuente: Instrumentación Industrial. Antonio Creus. 1998.

Aunque existen otras características obtenidas según el diseño del obturador y el asiento de la válvula para tipos específicos de válvulas como: mariposa, Saunders de obturadores excéntricos.

Selección de una válvula de control: Para seleccionar una válvula como elemento final de control se tiene en cuenta no solo su dimensionamiento, esto es su coeficiente de caudal, C_v ó K_v , sino también, la variable que se controla en el sistema de control y al cual sirve como elemento de regulación según su aplicación en los procesos. Véase para el efecto la tabla 4.

Tabla 4. Selección de las curvas características de las válvulas

Variable	Aplicaciones	Característica
Presión	Líquidos y gases en general	Igual Porcentaje (%)
	Gas con retardo considerable entre la toma de presión y la válvula de control y con alta pérdida de carga de la válvula de control	Lineal
Caudal	Margen de caudal amplio	Lineal
	Margen de caudal estrecho y alta pérdida de carga de la válvula de control	Igual Porcentaje (%)
Nivel	Pérdida de carga constante	Lineal
	Aumento de la pérdida de carga de la válvula con la carga del sistema sobrepasando el doble la pérdida de carga mínima de la válvula	Apertura rápida
Temperatura	En general	Igual Porcentaje (%)

Fuente: Prácticas de Laboratorio de Procesos. Orlando Palacios. Politécnico JIC. 2005

4.6 CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS INDUSTRIALES

Los sistemas de control permiten monitorear el estado en el que se encuentran las variables industriales y controlar el valor de estas, de acuerdo con lo que defina el usuario del proceso.

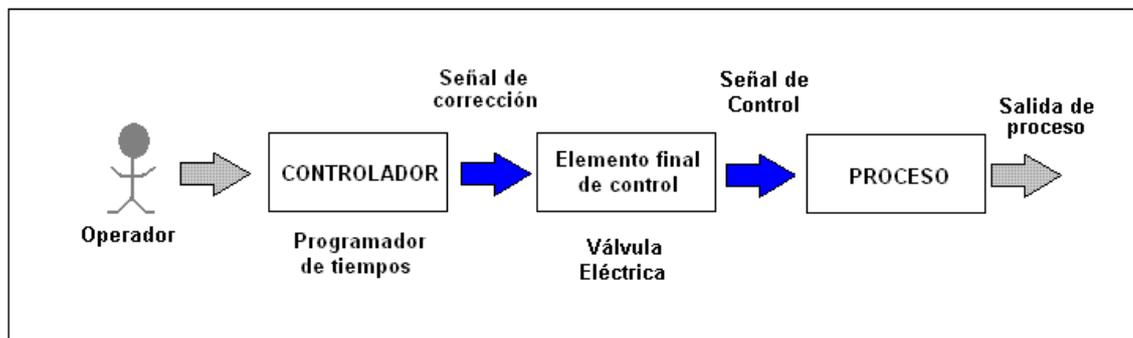
Un sistema de control está compuesto por: Un dispositivo de medición de la variable, un controlador que actúa como cerebro del sistema y un elemento final que aporta la energía para corregir las desviaciones que se presentan en el proceso.

El sistema de control puede ser en lazo abierto y en lazo cerrado. A continuación se explica en detalle el funcionamiento de cada uno de estos sistemas de control.

4.6.1 Sistema de control en lazo abierto. La característica que determina este sistema es, que para garantizar el control de la variable se emplea un controlador que cumple su función, de acuerdo con unos tiempos programados por el diseñador del dispositivo.

No se comprueba el valor de la variable controlada y cuando hay perturbaciones en el proceso el sistema no controla la variable. Ver la figura 3

Figura 3. Sistema de control en lazo abierto



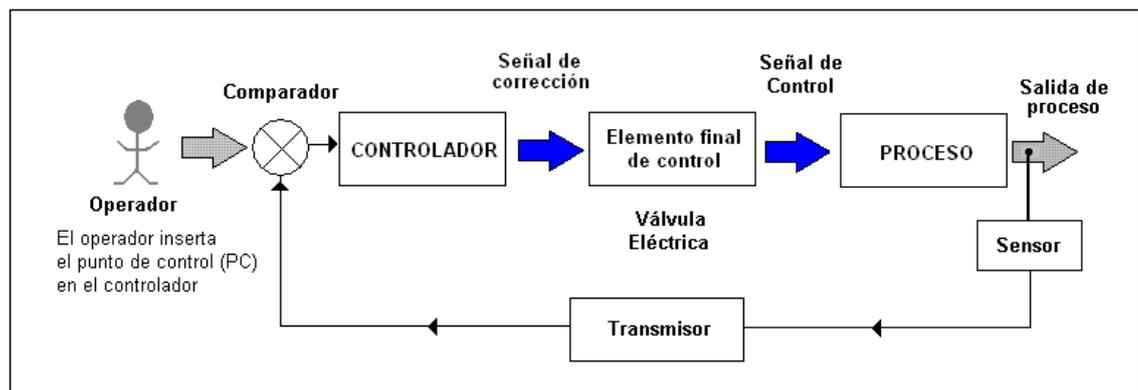
Fuente: Grafico elaborado por los autores

4.6.2 Sistema de control en lazo cerrado La característica determinante de este sistema es que, la señal generada por el sensor, a partir de la variable medida, es realimentada al controlador por medio de un instrumento transmisor.

La señal de realimentación se compara con un valor deseado y de acuerdo con la diferencia de estos dos valores y el programa del controlador, se envía una señal de corrección al proceso por medio del elemento final de control.

Cuando hay perturbaciones en el proceso el sistema garantiza el control de la variable de acuerdo con el valor deseado. Ver figura 4.

Figura 4. Sistema de control en lazo cerrado



Fuente: Grafico elaborado por los autores

4.6.3 Controlador MAXTHERMO. El controlador Maxthermo es un dispositivo mediante el cual puedo regular la temperatura de algún sistema físico tal como una pieza de algún material cualquiera o un recinto, etc. para un fin determinado.

Figura 5. Controlador Maxthermo MC 5438



Fuente: http://www.tcrsoluciones.com.mx/productos_maxthermo_digital_5438.html

4.6.4 Modos de control. El control automático nace de la consideración del principio de realimentación el cual es bastante simple y muy poderoso. A lo largo de su historia, ha tenido una fuerte influencia en la evolución de la tecnología.

Las aplicaciones del principio de realimentación han tenido éxito en los campos del control, comunicaciones e instrumentación.

Para entender el concepto, asuma que el proceso es tal que cuando el valor de la variable manipulada se incrementa, entonces se incrementan los valores de las variables del proceso. Bajo este concepto simple, el principio de realimentación puede ser expresado como sigue:

Incrementar la variable manipulada cuando la variable del proceso sea más pequeña que la referencia y disminuirla cuando ésta sea más grande.

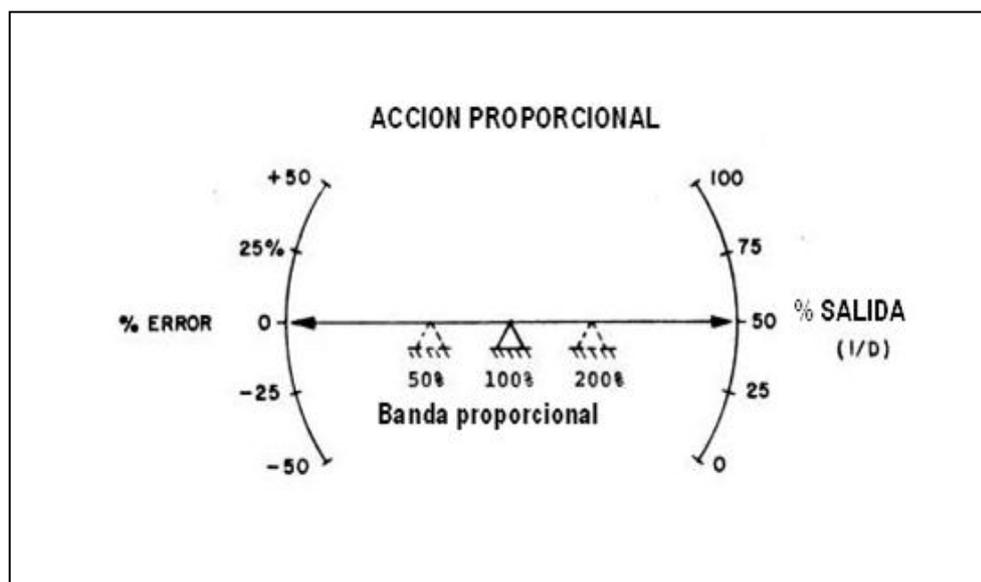
4.6.4.1 Control Proporcional. La respuesta proporcional es la base de los tres modos de control, si los otros dos, control integral y control derivativo están presentes, éstos son sumados a la respuesta proporcional.

Proporcional, significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún múltiplo del porcentaje del cambio en la medición.

Este múltiplo es llamado “ganancia” del controlador. Para algunos controladores, la acción proporcional es ajustada por medio de tal ajuste de ganancia, mientras que para otros se usa una “banda proporcional”. Ambos tienen los mismos propósitos y efectos.

La figura 6, muestra la respuesta de un controlador proporcional por medio de un indicador de entrada/salida pivotando en una de estas posiciones. Con el pivó en el centro entre la entrada y la salida dentro del gráfico, un cambio del 100% en la medición es requerido para obtener un 100% de cambio en la salida, o un desplazamiento completo de la válvula.

Figura 6. Control Proporcional



Fuente: www.sapiensman.com

Un controlador ajustado para responder de ésta manera se dice que tiene una banda proporcional del 100%. Cuando el pivot es hacia la derecha, la medición de la entrada debería tener un cambio del 200% para poder obtener un cambio de salida completo desde el 0% al 100%, esto es una banda proporcional del 200%.

Finalmente, si el pivot estuviera en la posición izquierda y si la medición se moviera sólo cerca del 50% de la escala, la salida cambiaría 100% en la escala. Esto es un valor de banda proporcional del 50%. Por lo tanto, cuanto más chica sea la banda proporcional, menor será la cantidad que la medición debe cambiar para el mismo tamaño de cambio en la medición. O, en otras palabras, menor banda proporcional implica mayor cambio de salida para el mismo tamaño de medición.

Esta misma relación está representada por la figura 6. El gráfico muestra cómo la salida del controlador responderá a medida que la medición se desvía del valor de consigna. Cada línea sobre el gráfico representa un ajuste particular de la banda proporcional.

Dos propiedades básicas del control proporcional pueden ser observadas a partir de éste gráfico: Por cada valor de la banda proporcional toda vez que la medición se iguala al valor de consigna, la salida es del 50%.

Cada valor de la banda proporcional define una relación única entre la medición y la salida. Por cada valor de medición existe un valor específico de salida. Por ejemplo, usando una línea de banda proporcional del 100%, cuando la medición está 25% por encima del valor de consigna, la salida del controlador deberá ser del 25%. La salida del controlador puede ser del 25% sólo si la medición esta 25% por encima del valor de consigna.

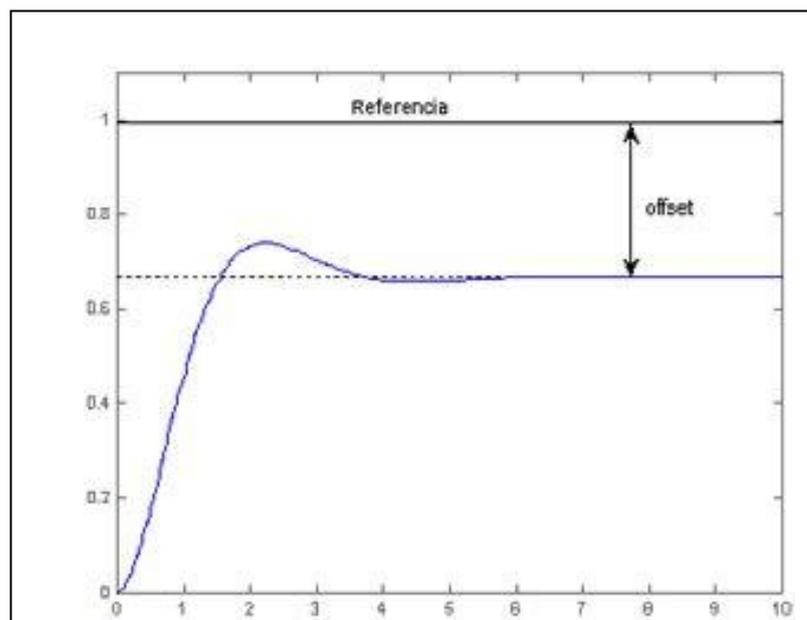
De la misma manera, cuando la salida del controlador es del 25%, la medición será del 25% por encima del valor de consigna. En otras palabras, existe un valor específico de salida por cada valor de medición.

Idealmente, la banda proporcional correcta producirá una amortiguación de amplitud de un cuarto de ciclo en cada ciclo, en el cual cada medio ciclo es $\frac{1}{2}$ de la amplitud del medio ciclo previo.

La banda proporcional que causará una amortiguación de onda de un cuarto de ciclo será menor, y por lo tanto alcanzará un control más ajustado sobre la variable medida, a medida que el tiempo muerto en el proceso decrece y la capacidad se incrementa .

Una consecuencia de la aplicación del control proporcional al lazo básico de control es el offset. Offset significa que el controlador mantendrá la medida a un valor diferente del valor de consigna. Esto es más fácilmente visto al observar la figura7.

Figura 7. Offset del control proporcional



Fuente: <http://sistemasdecontrol.wordpress.com>

Note que si la válvula de carga es abierta, el caudal se incrementará a través de la válvula y el nivel comenzará a caer, de manera de mantener el nivel, la válvula de suministro debería abrirse, pero teniendo en cuenta la acción proporcional del lazo el incremento en la posición de apertura puede sólo ser alcanzado a un nivel menor.

En otras palabras, para restaurar el balance entre el caudal de entrada y el de salida, el nivel se debe estabilizar a un valor debajo del valor de consigna (o setpoint).

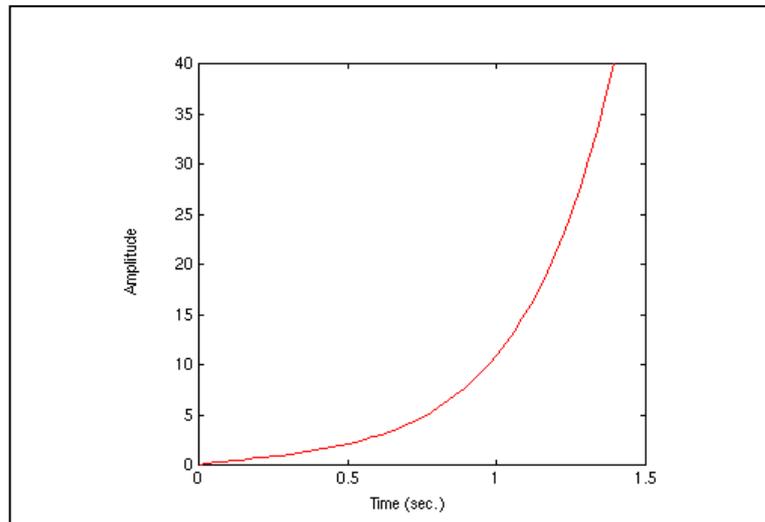
Esta diferencia, que será mantenida por el lazo de control, es llamada offset, y es característica de la aplicación del control proporcional único en los lazos de realimentación. La aceptabilidad de los controles sólo-proporcionales dependen de si este valor de offset será o no tolerado, ya que el error necesario para producir cualquier salida disminuye con la banda proporcional, cuanto menor sea la banda proporcional, menor será el offset.

Para grandes capacidades, aplicaciones de tiempo muerto pequeñas que acepten una banda proporcional muy estrecha, el control sólo- proporcional será probablemente satisfactorio dado que la medición se mantendrá a una banda de un pequeño porcentaje alrededor del valor de consigna.

4.6.4.2 Control Integral. Cuando es necesario que no haya una diferencia de estado estable entre la medición y el valor de consigna bajo todas las condiciones de carga, una función adicional deberá ser agregada al controlador proporcional, esta función es llamada acción integral.

La respuesta del lazo abierto del modo integral es mostrada en la figura8, que indica un escalón de cambio en algún instante en el tiempo.

Figura 8. Respuesta a la acción integral



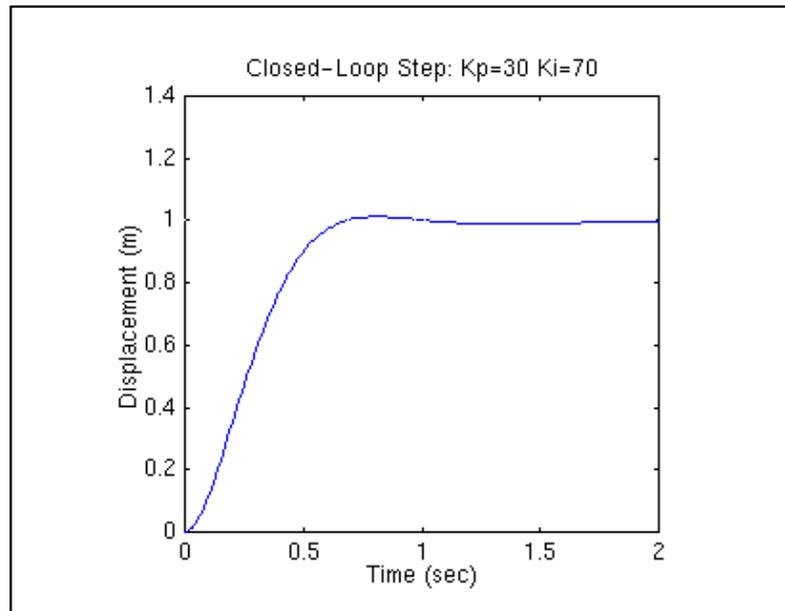
Fuente: www.ib.cnea.gov.ar

En tanto que la medición estuviera en su valor de consigna, no existiría ningún cambio en la salida debido al modo integral del controlador.

Sin embargo, cuando cualquier error exista entre la medición y el valor de consigna, la acción integral hace que la salida comience a cambiar y continúe cambiando en tanto el error exista.

Esta función, entonces, actúa sobre la salida para que cambie hasta un valor correcto necesario para mantener la medición en el valor de consigna. Esta respuesta es agregada a la banda proporcional del controlador según se muestra en la figura9.

Figura 9. Respuesta a la acción proporcional más integral



Fuente: www.ib.cnea.gov.ar

El escalón de cambio en la medición primero produce una respuesta proporcional, y luego una respuesta integral es agregada a la proporcional. Cuanta más acción integral exista en el controlador, más rápido cambia la salida en función del tiempo.

4.6.4.3 Acción Derivativa. La tercera respuesta encontrada en controladores es la acción derivativa. Así como la respuesta proporcional responde al tamaño del error y el Integral responde al tamaño y duración del error, el modo derivativo responde a cuán rápido cambia el error.

La primera es una respuesta a un corte en la medición alejada del valor de consigna. Para un escalón, la medición cambia en forma infinitamente rápida, y el modo derivativo del controlador produce un cambio muy grande y repentino en la salida, que muere inmediatamente debido a que la medición ha dejado de cambiar luego del escalón.

La segunda respuesta muestra la respuesta del modo derivativo a una medición que está cambiando a un régimen constante.

La salida derivativa es proporcional al régimen de cambio de éste error. Cuanto mayor sea el cambio, mayor será la salida debido a la acción derivativa.

La acción derivativa mantiene ésta salida mientras la medición esté cambiando. Tan pronto como la medición deja de cambiar, esté o no en el valor de consigna, la respuesta debido a la acción derivativa cesará.

El tiempo derivativo en minutos es el tiempo que la respuesta proporcional del lazo abierto más la respuesta derivativa está delante de la respuesta resultante del valor proporcional solamente. Así, cuanto más grande sea el número derivativo mayor será la respuesta derivativa.

Los cambios en el error son un resultado de los cambios tanto en el valor de consigna como en la medición o en ambos. Para evitar un gran pico causado por las escalones de cambio en el valor de consigna, la mayoría de los controladores modernos aplican la acción derivativo sólo a cambios en la medición.

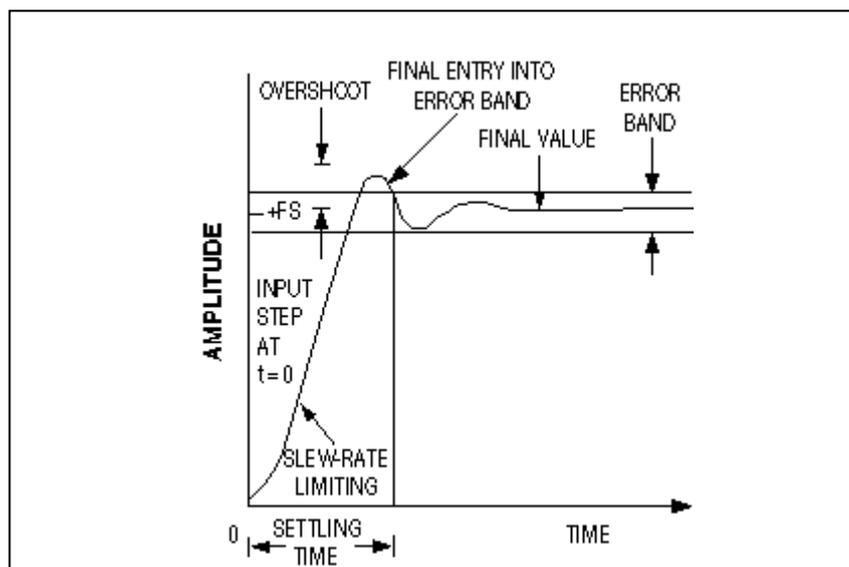
La acción derivativa en los controladores ayuda a controlar procesos con constantes de tiempo especialmente grandes y tiempo muerto significativo, la acción derivativa es innecesaria en aquellos procesos que responden rápidamente al movimiento de la válvula de control, y no puede ser usado en absoluto en procesos con ruido en la señal de medición, tales como caudal, ya que la acción derivativa en el controlador responderá a los cambios bruscos en la medición que el mismo observa en el ruido.

Esto causará variaciones rápidas y grandes en la salida del controlador, lo que hará que la válvula esté constantemente moviéndose hacia arriba o hacia abajo, produciendo un desgaste innecesario en la misma.

La figura 10, muestra una acción combinada de respuesta proporcional, integral y acción derivativa para la medición de temperatura de un intercambiador de calor simulado que se desvía del valor de consigna debido a un cambio de carga.

Cuando la medición comienza a desviarse del valor de consigna, la primera respuesta del controlador es una respuesta derivativa proporcional al régimen de variación de la medición que se opone al movimiento de la medición al alejarse del valor de consigna.

Figura 10. Controlador PID



Fuente: www.rocatek.com

La respuesta derivativa es combinada con la respuesta proporcional agregada, a medida que la integral en el controlador ve el error incrementarse, el mismo controla la válvula más fuerte aún. La acción continua hasta que la medición deja de cambiar, entonces la acción derivativa se detiene.

Dado que existe aún un error, la medición continúa cambiando debido a la integral, hasta que la medición comienza a retornar hacia el valor de consigna.

Tan pronto como la medición comienza a moverse retornando hacia el valor de consigna, aparece una acción derivativa proporcional al régimen de cambio en la variación oponiéndose al retorno de la medición hacia el valor de consigna.

La acción integral continúa debido a que aún existe un error, a pesar de que su contribución disminuye con este. Además, la salida debido al valor proporcional está cambiando.

Así, la medición retorna hacia el valor de consigna. Tan pronto como la medición alcanza el valor de consigna y deja de cambiar, la acción derivativa cesa nuevamente y la salida proporcional vuelve al 50%. Con la medición nuevamente en su valor de consigna, no existen más respuestas a variaciones debidas al valor integral.

Sin embargo, la salida está ahora a un nuevo valor. El nuevo valor es el resultado de la acción integradora durante el tiempo en que la medición se alejó del valor de consigna, y compensa el cambio de carga que fue causado por la alteración original.

Finalmente se puede indicar que pese a que se ha indicado la forma de operar de tres modos de control se deberá tener un claro concepto de los siguientes puntos:

Para alcanzar el control automático, el lazo de control deberá estar cerrado.

Para tener una lazo realimentado de control estable, el ajuste más importante del controlador es la selección de la acción correcta, sea directa o inversa.

El valor correcto de los ajustes de banda proporcional, Integral, y tiempo derivativo dependen de las características del proceso, cabe consignar que en

los controladores actuales dichos valores se pueden detectar en forma automática.

El controlador dispone de un modo en que produce alteraciones controladas, y dentro de ciertos límites establecidos previamente por el operario, en la salida se miden los resultados del proceso para una cierta cantidad de ciclos de alteración, en base a éste comportamiento pueden detectarse cuál es el mejor conjunto de ajustes para controlar un proceso mediante el software interno del aparato.

La función del modo integral es para eliminar el offset. Si mucho valor de offset es usado, el resultado será una oscilación de la medición. Si un valor muy bajo de reset es usado, el resultado será que la medición retorna al valor de consigna más lentamente que lo posible.

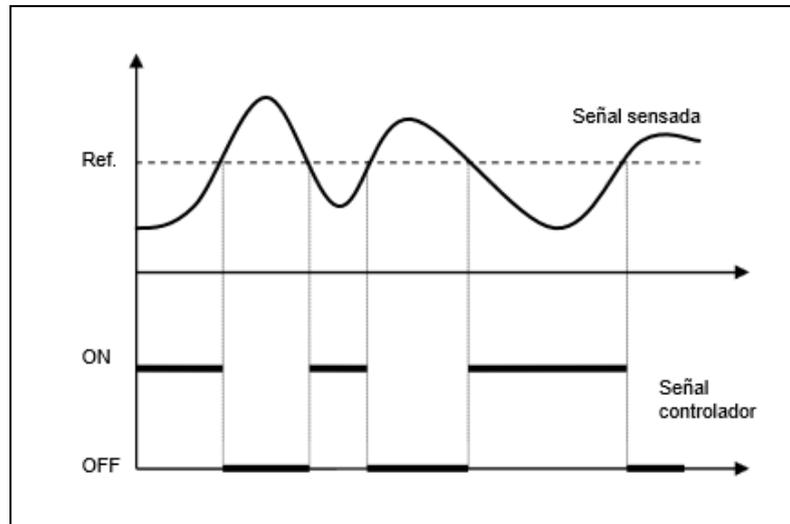
El modo derivativo se opone a cualquier cambio en la medición. Una acción derivativa muy pequeña no tiene efecto significativo, una acción con valores muy altos provoca una respuesta excesiva del controlador y un ciclo en la medición.

4.6.4.4 Modo de control ON-OFF. Este método solo acepta dos posiciones para el actuador: encendido (100%) y apagado (0%). La lógica de funcionamiento es tener un punto de referencia, si la variable es mayor el actuador asume una posición, y si la variable es menor el actuador asume la otra posición.

Por ejemplo tenemos los sistemas de seguridad contra robos, las refrigeradoras domésticas, sistemas de aire acondicionado, etc.

A continuación se muestra su función en el tiempo.

Figura 11. Modo de control ON-OFF



Fuente: www.rocatek.com

4.7 SENSORES DE TEMPERATURA. Los instrumentos electrónicos de medición de temperatura requieren sensores de tipo eléctrico, como termómetros de resistencia o RTDs y los termopares. También suele emplearse termistores, los cuales son sensores para compensar la temperatura ambiente en los termopares.

A continuación se hará una descripción de cada uno de estos sensores y se explicarán sus características y aplicaciones.

4.7.1 Detectores de Temperatura Resistivos (RTD). La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia, en función de la temperatura que son propias del elemento de detección.

El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado, bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el coeficiente de temperatura de resistencia que se expresa a una temperatura específica, la variación de la resistencia por cada grado que cambia su temperatura.

La ecuación que describe su funcionamiento es:

$$R_t = R_o (1 + \alpha t) \quad (4)$$

En donde:

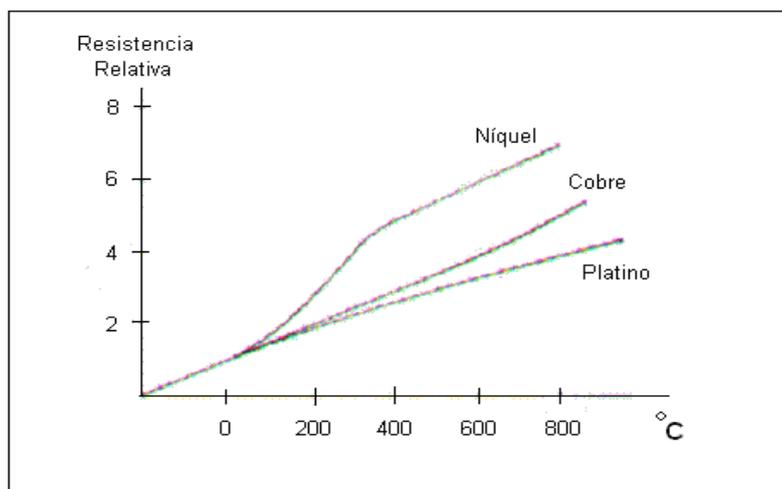
R_t : Resistencia en ohmios a $t^\circ\text{C}$

R_o : Resistencia en ohmios a 0°C

α : coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0°C y 100°C es de $0,00358 \Omega / \Omega,^\circ\text{C}$.

En la figura 12 pueden verse las curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura.

Figura 12. Curva de Resistencia de Varios Metales



Fuente: Instrumentación Industrial. Antonio Creus. 1998

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

Alto coeficiente de temperatura. Esta característica mejora la sensibilidad.

Alta resistividad. Mejora la resolución.

Relación lineal de resistencia-temperatura.

Rigidez y ductilidad de los materiales para simplificar los procesos de fabricación.

Estabilidad de las características durante la vida útil del sensor.

De la figura 12, puede verse que el material que mejor cumple con las características anteriores es el platino desde el punto de vista de la exactitud y de estabilidad pero es costoso.

En la tabla 5, se indican las características de las sondas de resistencia de platino, níquel y cobre.

Tabla 5. Características de sondas de resistencia

Metal	Resistividad $\mu\Omega/\text{cm}$	Coficiente de temperatura $/\Omega^\circ\text{C}$	Intervalo de temperatura $^\circ\text{C}$	Resistencia de la sonda a 0°C	Precisión $^\circ\text{C}$
Platino	9,83	0,00385	-200 a 950	100	0,01
Níquel	6,38	0,0063	-150 a 300	100	0,50
Cobre	1,56	0,00425	-200 a 120	10	0,10

Fuente: Instrumentación Industrial. Antonio Creus. 1998

Limitaciones:

No es posible medir temperaturas próximas al punto de fusión del conductor.

Es necesario que el sensor esté a la temperatura de medida.

Deformaciones mecánicas.

Ventajas:

Sensibilidad 10 veces mayor que las termopares.

Alta repetitividad.

Estabilidad y exactitud.

Aplicaciones:

Medición de temperatura.

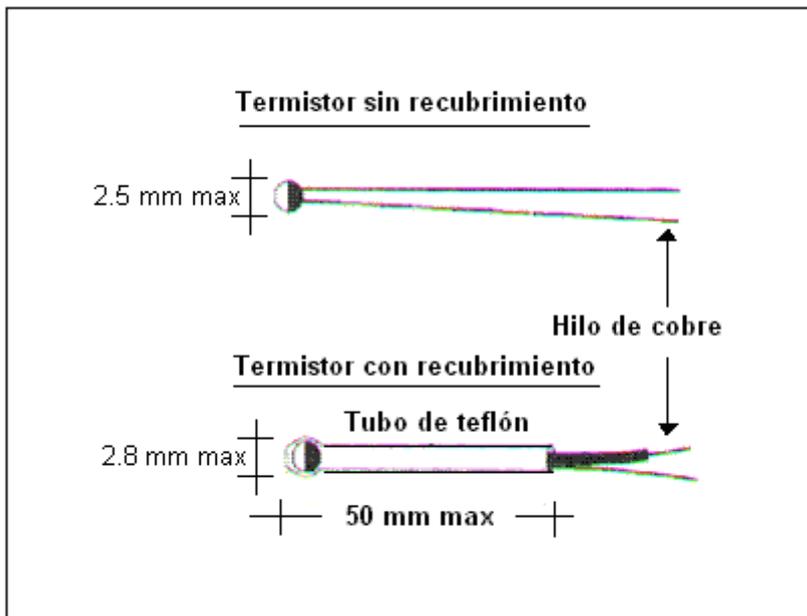
Patrón para temperaturas entre $-182,96\text{ °C}$ y $630,74\text{ °C}$.

Medición de temperatura en gases de chimeneas para optimizar la combustión en las calderas y reducir la contaminación y la formación de hollín.

Medición de velocidad de un fluido.

4.7.2 Termistores. Son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura. Los Termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto y otros materiales, y están encapsulados en sondas o discos. Ver figura 13

Figura 13. Estructura de un Termistor



Fuente: Mecatrónica. W. Bolton. 4 edición

Los Termistores también se denominan NTC (coeficiente de temperatura negativo) y en algunos casos se pueden encontrar del tipo PTC (de coeficiente de temperatura positivo), que aumentan el valor de su resistencia con el aumento de la temperatura.

Aplicaciones:

En la zona de autocalentamiento el termistor es sensible a cualquier efecto que altere el ritmo de la disipación de calor (caudal, nivel y conductividad calorífica).

Se emplea en el diseño de circuitos de retardo y supresión de transitorios (señales eléctricas elevadas).

Al sustituir un termistor en un circuito es necesario reajustarlo.

Ventajas:

Alta sensibilidad.

Velocidad de respuesta rápida.

Bajo costo.

Otras Aplicaciones:

NTC

Medición de la temperatura del agua de automóviles.

Compensadores térmicos.

Control de temperatura ambiental.

Medición de caudal.

Control de nivel de líquidos.

Retardos de tiempo en circuitos electrónicos.

Limitadores de corriente.

PTC

Arranque de motores monofásicos.

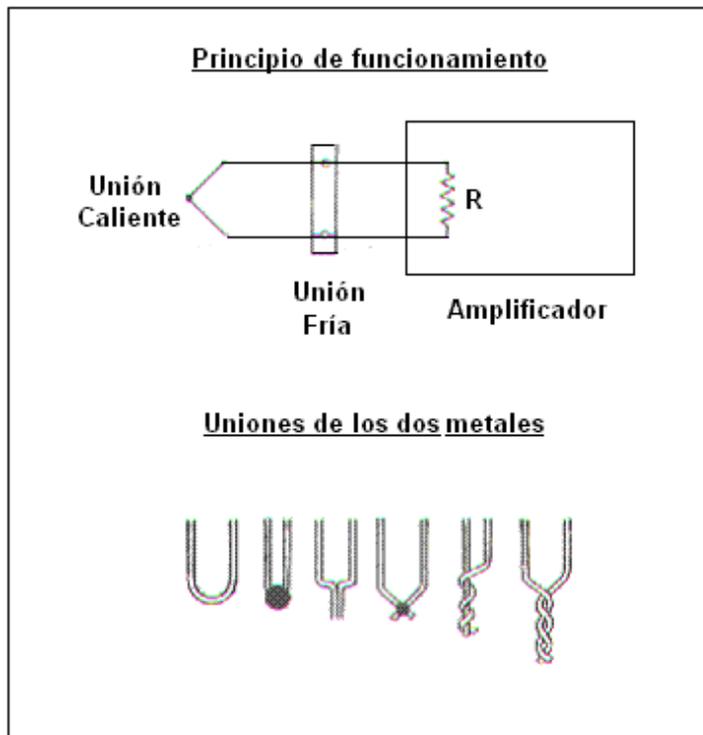
Desmagnetización automática de monitores.

Eliminación de transitorios.

Protección de sobrecargas.

4.7.3 Termopares. Se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a distinta temperatura. Ver figura 14.

Figura 14. Termopares



Fuente: Mecatrónica. W. Bolton. 4 Edición

La circulación de corriente por el circuito obedece al efecto de Pielter y al efecto de Thompson.

Efecto de Pielter: Consiste en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales distintos al pasar una corriente por ella.

Efecto de Thompson: Consiste en la absorción o liberación de calor por un conductor homogéneo sometido a una temperatura no homogénea por el que circule una corriente.

Limitaciones:

Temperatura de fusión de los metales.

El medio no debe atacar los metales ni la unión.

La corriente entregada es muy pequeña.

La temperatura de la unión fría debe ser constante.

Ventajas:

Sensibilidad: 6 a 75 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$

Alcance de medida: -270 $^\circ\text{C}$ a 3000 $^\circ\text{C}$

Para temperaturas bajas tiene mejor exactitud que una RTD.

No tienen el problema de autocalentamiento por carecer de alimentación.

Tipos:

Tipo J: Utilizadas para hornos de combustión.

Tipo K: Se usan en atmósferas no reductoras.

Tipo T: Resisten la corrosión y la humedad.

Tipo N: Medición de altas temperaturas.

En la tabla 6, se encuentran las características de los termopares más comunes.

Tabla 6. Tipos de termopares

Tipo	Composición	Rango $^\circ\text{C}$	Voltaje V	Tolerancia
B	Platino – 30% de Rodio	0 a 1820	0 a 13,814	$\pm 0,5\%$
E	Cromel - Constantan	-270 a 1000	- 9,835 a 76,358	$\pm 0,5\%$
J	Hierro - Constantan	- 210 a 760	-8,096 a 42,922	$\pm 0,75\%$
K	Cromel–Alumel	-270 a 1372	-6,458 a 54,875	$\pm 0,75\%$
R	Platino – 13% Rodio	-50 a 1768	- 0,226 a 21,108	$\pm 0,25\%$
S	Platino – 10% Rodio	-50 a 1768	- 0,236 a 18,698	$\pm 0,25\%$

Fuente: Instrumentación Industrial. Antonio Creus. 1998

4.8 TRAMPAS DE VAPOR

Una trampa para vapor es un dispositivo que permite eliminar condensado, aire y otros gases no condensables, además de prevenir pérdidas de vapor.

Eliminación de condensado: El condensado debe pasar siempre, rápido y completamente a través de la trampa para vapor para obtener un mejor aprovechamiento de la energía térmica del vapor.

Eliminación de aire y otros gases no condensables: El aire y los gases disminuyen el coeficiente de transferencia de calor. Además, se debe tener presente que el O_2 y el CO_2 causa corrosión.

Prevención de pérdidas de vapor: No deben permitir el paso de vapor sino hasta que éste ceda la mayor parte de energía que contiene, también las pérdidas de vapor deben ser mínimas mientras la trampa libera vapor condensado, aire y gases no condensables.

Tan pronto como el vapor deja la caldera empieza a ceder parte de su energía a cualquier superficie de menor temperatura. Al hacer esto, parte del vapor se condensa convirtiéndose en agua, prácticamente a la misma temperatura.

La combinación de agua y vapor hace que el flujo de calor sea menor ya que el coeficiente de transferencia de calor del agua es menor que el del vapor.

De acá nos podemos dar cuenta de la importancia de las trampas de vapor para una empresa que utiliza algún equipo calentado con vapor.

Las ventajas de utilizar trampas son muchas, nombrando unas de las más comunes la de economizar grandes cantidades del combustible requerido para

calentar las inmensas cantidades de agua lo que conlleva a un ahorro en los costos no despreciable.

Luego de tener clara la definición y función de trampa de vapor, analizaremos los diferentes grupos que existen en el mercado: Grupo mecánico, grupo termodinámico y grupo termostático.

4.8.1 Grupo mecánico. Las trampas de vapor del tipo mecánico trabajan con la diferencia de densidad entre el vapor y el condensado. Estas trampas trabajan mediante un flotador, el cual hace de válvula, en la que, cuando se acumula condensado ésta se abre descargándolo.

Entre las trampas de este tipo tenemos:

4.8.1.1 Trampa de flotador libre. Este tipo de trampa consta de una esfera hueca (flotador), en la que al ingresar el flujo de vapor, ésta se mantiene apoyada en un asiento. Cuando el vapor comienza a condensar, el nivel de agua hace subir a la esfera dejando libre el orificio de drenaje.

Una vez que el condensado disminuye la esfera que hace de válvula, retorna paulatinamente a su posición (en el asiento), tapando el orificio de salida causando así la mínima pérdida de vapor. Luego, el nuevo ciclo hará lo mismo, así que entonces el drenado es continuo.

Figura 15. Trampa de flotador libre



Fuente: <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/traps-and-orifices-pt1.html>

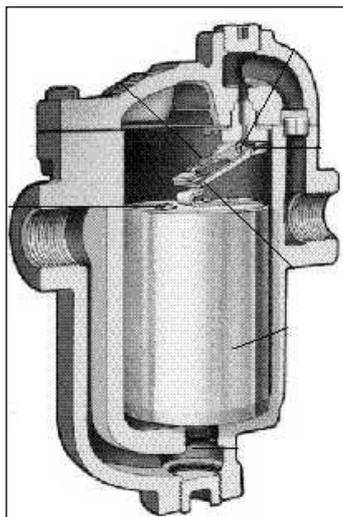
Debido a que estas trampas no poseen partes mecánicas es muy poco probable que falle, lo que nos dice que el mantenimiento es prácticamente cero. De la figura 15, se puede apreciar que la esfera flotadora es bastante grande en comparación con el orificio de drenaje, lo cual hace que sea difícil tener un buen asiento.

4.8.1.2 Trampa de balde invertido. Como su nombre lo dice, éste tipo de trampa posee en su interior un balde cuya abertura está hacia abajo, o sea, de balde invertido.

El sistema de funcionamiento resulta simple. Vemos que el vapor que entra mantiene al balde flotando, si se puede decir así, y mientras flote, éste mantendrá cerrada la válvula de salida.

Cuando comienza a condensar, el interior de la trampa se va llenando del condensado, el que mandará al fondo al balde, causando que la válvula se abra, lo que junto con la presión ejercida por el vapor dentro del balde, descargará el exceso de condensado.

Figura 16. Trampas de vapor de balde invertido



Fuente:<http://www.reocities.com/madisonavenue/6883/trabajos/2trampas/trampas98.htm>

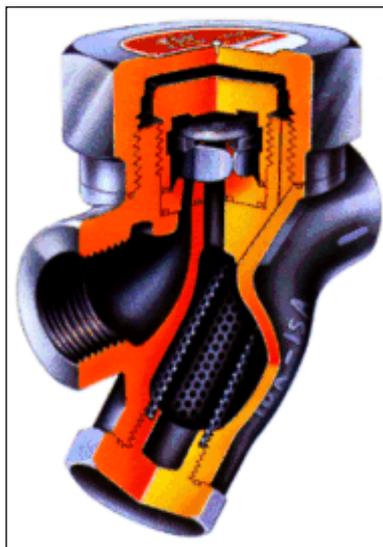
Como se ve en la figura 16, el orificio de escape de aire es pequeño lo que hace que el aire salga lentamente, tampoco puede ser grande porque ocasionará pérdidas de vapor. Por este motivo es que puede ser una desventaja ya que al mantener mayor tiempo el aire, como ya sabemos corroerá la trampa.

En este tipo de trampa, se debe mantener condensado en el fondo, ya que éste hace de sello. Si éste sello se pierde, podría ser a causa de una pérdida de presión del vapor, ocasionará el paso del vapor libremente por la válvula.

4.8.2 Grupo termodinámico. Este tipo de trampas de vapor opera con el principio de diferencia entre flujo de vapor sobre la superficie comparado con el flujo del condensado. Al entrar el vapor este viene con una velocidad mayor y el disco que usan como válvula se cierra, y éste disco se abre al presentarse la baja velocidad del condensado.

Su funcionamiento es relativamente simple, ya que en su interior solo poseen una sola pieza en movimiento, un disco flotante.

Figura 17. Trampa de vapor termodinámica



Fuente: <http://www.reocities.com/madisonavenue/6883/trabajos/2trampas/trampas98.htm>

En el comienzo la presión del condensado y/o aire levanta el disco de su asiento. El flujo es radial debajo del disco, hacia la salida. La descarga prosigue hasta que el condensado se acerca a la temperatura del vapor.

Un chorro de vapor flash reduce la presión debajo del disco y al mismo tiempo por sobrepresión no origina presión en la cámara de control encima del disco, esto empuja a este último contra su asiento, asegurando un cierre perfecto, sin pérdida de vapor.

Luego al acumularse condensado, se reduce el calor en la cámara de control, conforme se va condensando el vapor bloqueado en la cámara la presión se reduce, el disco es levantado por la presión de entrada y se descarga el condensado.

Estas trampas tienen una gran cantidad de descarga ligera, simple y compacta, además debido a que la única parte en movimiento es el disco, es posible hacer un mantenimiento fácil.

4.8.3 Grupo termostático. Estas trampas operan mediante un sensor de temperatura, el que identifica la temperatura del vapor y del condensado. Como el vapor se condensa adquiere una temperatura menor a la del vapor, cuando ésta temperatura del condensado llega a un valor específico, la trampa abrirá para drenar el condensado.

Entre algunas de este tipo tenemos:

4.8.3.1 Trampa de presión balanceada. Este tipo de trampa posee un termostato que en su interior está lleno de una mezcla de alcohol, que siente la temperatura del condensado y el vapor.

Cuando el cuerpo de la trampa está lleno de condensado, la mezcla está a una temperatura baja en comparación con el vapor, debido a esto el alcohol no ejerce presión dentro del tubo corrugado en el que se encuentra, dejando salir el condensado a través por el canal de salida.

Una vez que el vapor entra al cuerpo de la trampa es tal la temperatura de éste, que la mezcla de alcohol comienza a hervir, causando un aumento en la presión del interior del elemento.

Esta presión es superior a la que se encuentra en el cuerpo de la trampa con lo que tendremos una expansión del elemento termostático, causando el cierre de la válvula.

Una vez que la válvula ha cerrado el vapor no puede escapar.

Este vapor nuevamente se condensará y también se enfriará con lo que también enfriará la mezcla de alcohol en el elemento, con esto la presión del elemento disminuirá causando que la válvula se abra, descargando el condensado.

Como se ha visto, cuanto mayor es la presión ejercida por el vapor, mayor será la presión en el elemento termostático que cause el cierre.

Las trampas termostáticas de presión balanceada son de pequeño tamaño, con una gran capacidad de descarga. Además, para variaciones de presión se ajusta automáticamente dentro del rango de trabajo para el que se halla elegido.

En la mayoría de este tipo de trampas no se puede trabajar con vapor sobrecalentado debido a que el exceso en la temperatura en el interior del

elemento origina una presión tan alta que no puede ser balanceada por la presión a su alrededor.

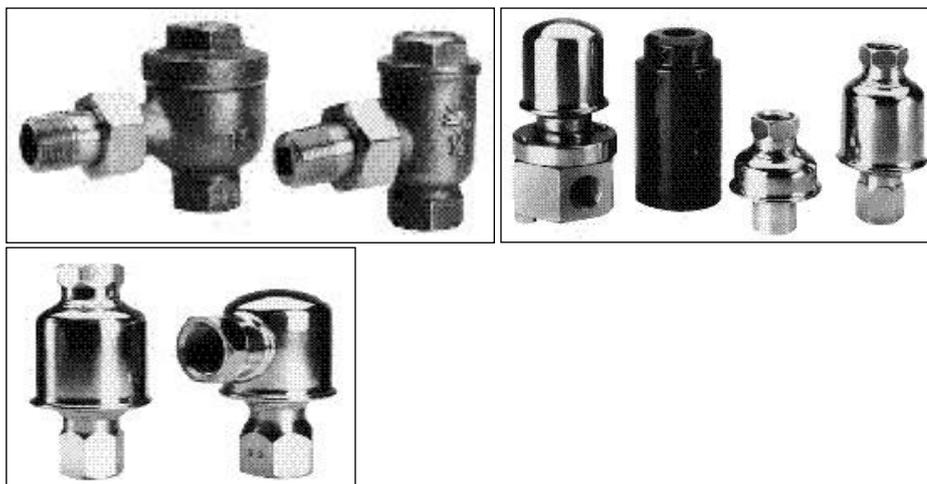
4.8.3.2 Trampa tipo bimetálico. El funcionamiento de esta trampa es simple, al igual que las anteriores, pero antes de entrar en lo que es el funcionamiento tal de la trampa, veremos lo que es llamado bimetálico.

El llamado bimetálico es la unión de dos láminas delgadas de metales distintos, los que al haber una variación de temperatura se dilatan cantidades distintas.

Entonces el funcionamiento de las trampas bimetálicas es el siguiente: la trampa está abierta en su totalidad en el arranque, donde descargará el aire y el condensado que se encuentre al interior del cuerpo ya que la temperatura de éste es menor que la del condensado.

Una vez que comience a venir vapor, la placa bimetálica, donde uno de sus extremos permanece fijo y al otro se le une una válvula, reaccionará al cambio de temperatura, dilatándose, para así cerrar el orificio de salida por medio de la válvula.

Figura18. Diferentes trampas de vapor tipo bimetálico



Fuente:<http://www.reocities.com/madisonavenue/6883/trabajos/2trampas/trampas98.htm>

En este punto debemos decir que este tipo de trampa solo se curva a una temperatura ya designada por la elección de las placas que forman el bimetal, independientemente de las presiones del vapor y por lo tanto, de su temperatura.

Por otro lado, la presión de vapor dentro de la trampa actúa para mantener cerrada la válvula, por lo que para que el bimetalico regrese a su posición de descarga es necesario que el condensado se enfríe considerablemente, lo que a fin de cuentas es una reacción lenta frente a los cambios de temperatura.

Estas trampas son ligeras, de pequeños tamaños, y con gran capacidad de descarga. Además son resistentes a fluidos corrosivos, presiones de vapor elevadas y vapor sobrecalentado.

Tabla 7. Diferencias de las Trampas de Vapor

Tipo de Trampa	Descarga de condensado	Resistencia a cambios de presión	Capacidad al sobrecalentamiento
Flotador libre	Continua	Excelente	Si
Termodinámica	Intermitente	Mediana	Si
Termostática (Bimetal)	Intermitente	Mediana	Si, si es pequeña
Termostática (Presión Balanceada)	Intermitente	Buena	No

Fuente:<http://www.reocities.com/madisonavenue/6883/trabajos/2trampas/trampas98.htm>

4.9 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor (T. de C.) es un proceso de transmisión de calor de un punto que se encuentra a mayor temperatura hacia otro punto con temperatura menor.

Los mecanismos básicos mediante los cuales se transfiere el calor son: conducción, convección y radiación.

Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

4.9.1 Conducción de calor. La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos puntos a diferentes temperaturas basado en el contacto directo de sus partículas.

4.9.1.1 Ley de Fourier. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier planteó una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

Primera ley de Fourier:

$$q / A = -k \, dT / dx \quad (5)$$

k = conductividad térmica W / m.

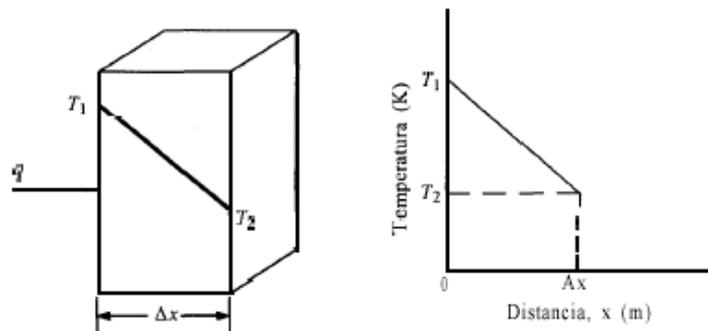
K ó BTU / h. pié. °F;

x = distancia, m ó pié.

4.9.1.2 Conducción de calor a través de una pared plana simple. Al integrar la ecuación diferencial para q/A , k constantes. El flujo de calor (q entendido como calor sobre unidad de tiempo, en W ó BTU/ h) es proporcional al área de transferencia de calor. (A), a la diferencia de temperatura entre los dos puntos que se consideren (T_1-T_2), a la conductividad térmica (k) e inversamente proporcional al espesor o longitud (Δx ó L) según el caso en la dirección del flujo de calor, así:

$$q = k A (T_1 - T_2) / \Delta x \quad (6)$$

Figura 19. Conducción de calor a través de una pared plana y distribución de la temperatura



Fuente: Practicas de Procesos Industriales. Orlando Palacios. Politécnico JIC

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que valora la capacidad de conducir de calor a través de ellos. Los materiales como el cobre, el oro, el aluminio, la plata tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como la fibra de vidrio o el poliuretano tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores (véase tabla 8: Conductividades térmicas de algunos materiales); conducen muy mal el calor y se conocen como aislantes térmicos.

Para que exista conducción térmica hace falta una sustancia, de ahí que es nula en el vacío ideal, y muy baja en ambientes donde se ha practicado un vacío elevado.

En los *materiales conductores* el mecanismo de la transmisión de calor por conducción está asociado a las vibraciones de la *estructura reticular* y al movimiento de los electrones libres, (metales y aleaciones), al igual que en los conductores eléctricos, por lo que materiales buenos conductores de la electricidad son también, en general, buenos conductores del calor (cobre, plata, aluminio, etc.).

En algunos procesos industriales se trabaja para incrementar la conducción de calor, bien utilizando materiales de alta conductividad o configuraciones con un elevado área de contacto. En otros, el efecto buscado es justo el contrario, y se desea minimizar el efecto de la conducción, para lo que se emplean materiales de baja conductividad térmica, vacíos intermedios, y se disponen en configuraciones con poca área de contacto.

En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor, q , a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria.

Con la ayuda de computadores, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

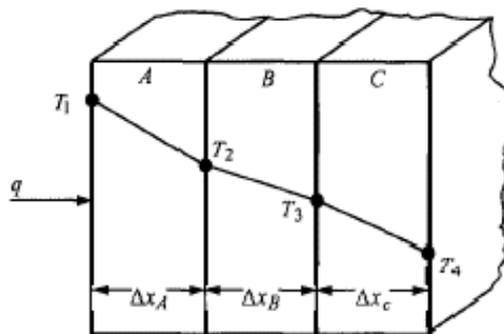
Tabla 8. Conductividad térmica de algunos materiales

Material	k (W/m K) a 300°K
Cobre	386
Aluminio	204
Vidrio	0,75
Plástico	0,2-0,3
Agua	0,6
Freón (líquido)	0,07
Aire	0,026

Fuente: Practicas de Procesos Industriales. Orlando Palacios. Politécnico JIC

4.9.1.3 Transferencia de calor a través de una pared compuesta. El flujo de calor, q , atravesará una pared simple o compuesta de varias capas de diferentes materiales en mayor ó menor cantidad dependiendo de las dimensiones de la pared y sobre todo de las conductividades térmicas de dichos materiales. (Véase figura 20)

Figura 20. Flujo de calor a través de una pared compuesta



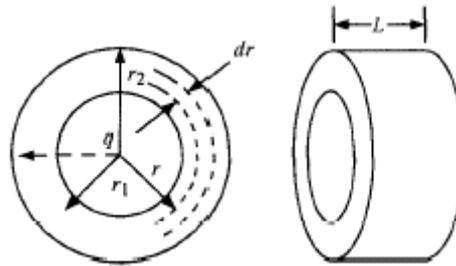
Fuente: Practicas de Procesos Industriales. Orlando Palacios. Politécnico JIC

Al aplicar la ecuación de Fourier para varias capas en serie se plantea así:

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{(\Delta x_1/k_1 + \Delta x_2/k_2 + \Delta x_3/k_3 + \dots \Delta x_n/k_n)} \quad (7)$$

4.9.1.4 Conducción de calor a través de un cilindro hueco (Tubería). En muchos procesos industriales, como por ejemplo en el transporte de fluidos calientes o fríos se transfiere calor a través de capas cilíndricas de la tubería que pueden estar incluso aisladas con otra capa cilíndrica por supuesto.

Figura 21. Conducción de calor a través de la pared de una tubería



Fuente: Practicas de Procesos Industriales. Orlando Palacios. Politécnico JIC

La ley de Fourier se plantea:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

Dónde: dT/dr es el gradiente de Temperatura para una capa cilíndrica.

Al integrar la ley de Fourier, sabiendo que la temperatura varía con respecto al radio que es la dirección en la cual fluye el calor y que el área de T. de C. $A = 2\pi r L$ el flujo de calor queda:

$$\frac{q}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dT}{dr} = -k \int_{r_1}^{r_2} dT$$

$$q = k \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \quad (9)$$

La relación de radios es la misma relación de diámetros $r_2/r_1 = D_2/D_1$

4.9.1.5 Aislamientos térmicos. Resistencias térmicas. El Aislamiento térmico es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción. Dicha capacidad de oposición es la resistencia térmica que tienen los aislamientos. La resistencia térmica se expresa como: $R_t = L / KA$.

La medida de la resistencia térmica, o lo que es lo mismo, de la capacidad de aislar térmicamente, se expresa, en el SI, en $m^2.K/W$ (metro cuadrado y kelvin por vatio).

La magnitud inversa de la resistencia térmica es la conductividad térmica.

Todos los materiales oponen resistencia, en mayor o menor medida, al paso del calor a través de ellos. Algunos muy escasa, como los metales, por lo que se dice de ellos que son buenos conductores; los materiales de construcción (yesos, ladrillos, morteros) tienen una resistencia media. Aquellos materiales que ofrecen una resistencia alta, se llaman aislantes térmicos específicos o, más sencillamente, aislantes térmicos.

Los aislantes térmicos (vidrio, plásticos, etc.) que requieren de una estructura porosa y un gas atrapado en la misma, son también buenos aislantes eléctricos; en estos materiales, la transferencia de calor puede tener lugar de diversas formas:

Conducción a través de la estructura sólida porosa o fibrosa.

Conducción y/o convección a través del aire atrapado en los espacios vacíos.

Radiación entre porciones de la estructura sólida, lo cual es especialmente importante a temperaturas elevadas o en recintos vacíos.

Se han desarrollado materiales superaislantes para aplicaciones criogénicas, que constan de varias capas de materiales altamente reflectantes separados por espacios vacíos, que minimizan la conducción y la convección, alcanzándose conductividades térmicas del orden de $0,02 \text{ W/ m } ^\circ\text{K}$.

4.9.2 Convección. La T. de C. por convección se presenta cuando se realiza un intercambio térmico entre una superficie y un fluido. El flujo de calor viajará desde aquel punto de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. Se caracteriza porque existe un desplazamiento de materia entre los puntos mencionados con diferentes temperaturas.

La *convección* se produce únicamente en materiales fluidos.

4.2.2.1 Tipos de convección. En la convección natural, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a unas fuerzas ascensionales.

El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior; ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento.

La convección en una caldera acuotubular que contiene el agua al interior de los tubos en reposo y al incrementar su temperatura, disminuye su densidad induciéndose unas fuerzas ascensionales que hacen que el agua suba al domo de vapor bajando el agua a menor temperatura a ocupar los espacios dejados por la que ascendió. El calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc.

La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior (por Ej.: un ventilador, una bomba, etc.) mueve un fluido con una velocidad sobre una superficie que se encuentra a una temperatura (T_s) mayor o menor que la del fluido (T_f). Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

4.9.2.2 Ley de Newton. Coeficientes convectivos

Independientemente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitida q , se puede escribir (Ley de Newton) como:

$$q = h_c A (T_s - T_f) \quad (10)$$

Dónde:

q : flujo de calor por convección.

h_c : Coeficiente de T. de C. por convección (coeficiente convectivo).

A : Área de T. de C.

T_s : Temperatura de la superficie del cuerpo.

T_f : Temperatura media del fluido.

En la Tabla 9 se relacionan algunos valores aproximados de los coeficientes de transmisión de calor por convección, incluyendo la vaporización y la condensación, consideradas usualmente como una parte del área de la convección.

Tabla 9. Valores aproximados de coeficientes de transmisión de calor por convección

Tipo de convección y fluido	h_c (W/m ² K)
Convección natural, aire	5-25
Convección natural, agua	20-100
Convección forzada, aire	10-200
Convección forzada agua	50-10.000

Fuente: Practicas de Procesos Industriales. Orlando Palacios. Politécnico JIC

4.9.3 Radiación. La radiación es la T. de C. mediante ondas electromagnéticas. No hay movimiento de fluido porque aún puede darse en el vacío.

Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado; en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas.

La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación.

Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante.

Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite (su emisividad es uno) radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor y se denominan cuerpos grises (emisividad < 1.0).

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura.

Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla.

Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates.

Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores.

Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela.

4.9.3.1 Ley de Stefan-Boltzmann.

La radiación de un cuerpo negro es:

$$q = \sigma A T_1^4 \quad (11)$$

4.9.3.2 Radiación desde o hacia cuerpos grises

El flujo de calor entre cuerpos grises está dado por la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$q = \sigma A \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (12)$$

Dónde:

σ : Es la constante de Stefan-Boltzmann. Sus valores son: 0.173×10^{-8} BTU/h $\text{pie}^2 \text{R}^4$ ó 5.676×10^{-8} W / $\text{m}^2 \text{K}^4$

A: Es el área superficial que recibe o emite el calor por radiación.

ϵ : es la emisividad que depende del material. (Véase tabla de emisividades).

T_1 : Temperatura del cuerpo emisor.

T_2 : Temperatura del cuerpo receptor.

4.10 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Un intercambiador de calor (I. de C.) es un equipo donde dos fluidos intercambian calor, ya sea por contacto directo entre ellos o a través de una superficie que los separa, que son los más comunes. De los primeros un ejemplo típico es una torre de enfriamiento.

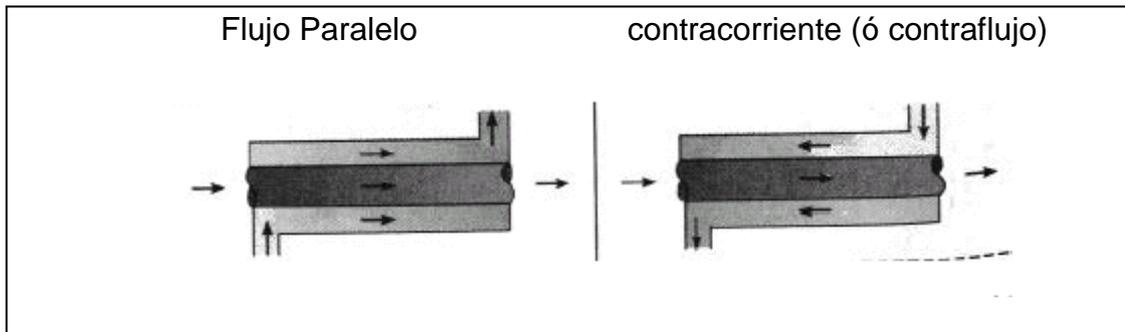
En los procesos industriales el calor se transmite por diferentes mecanismos, donde intervienen uno, dos o aún los tres mecanismos de transferencia de calor estudiados.

Por ejemplo la conducción y radiación en un calentador con resistencia eléctrica, conducción – convección en cambiadores de calor, calderas y condensadores; radiación en hornos y secadores de calor radiante y métodos especiales tales como calentamiento dieléctrico. Con frecuencia el equipo opera en estado estacionario, pero existen también numerosos procesos cíclicos, como es el caso de hornos regenerativos y tanques agitados de secado.

4.10.1 Tipos de intercambiadores de calor

4.10.1.1 De tubo concéntrico o doble tubo. El cambiador indirecto más simple es el cambiador de tubos concéntricos; consta de dos tuberías concéntricas, una en el interior de la otra, circulando los dos fluidos por el espacio anular y por la tubería interior. Los flujos pueden ser en el mismo sentido (corrientes paralelas) o en sentido contrario. (Véase figura 22).

Figura 22. Intercambiador de calor de tubo concéntrico ó doble tubo



Fuente: www.olaer.es/productos/intercambiadores

4.10.1.2 De Coraza (casco) y tubos. Cuando en el proceso se manejan flujos más grandes se usa un intercambiador de coraza (ó casco) y tubos, que es el tipo más importante en las industrias de procesos.

Los flujos de estos intercambiadores son continuos. Se usan muchos tubos en paralelo con uno de los fluidos circulando en su interior. Los tubos, están encerrados en una sola coraza y el otro fluido fluye por el exterior de los tubos, dentro de la coraza.

Según el número de pasos por la coraza y por los tubos los intercambiadores se clasifican en 1-2, 1-4, 2-4.

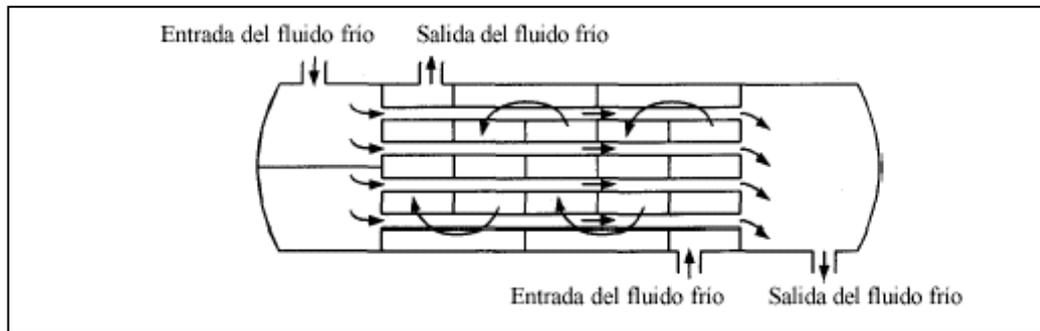
El primer dígito corresponde al número de pasos por la coraza mientras que el segundo es el número de pasos por los tubos. Se usan también otras combinaciones de número de pasos y las más comunes son 1-2 y 1-4.

En la figura 23 se muestra un intercambiador de calor (1-2) paralelo-contracorriente.

El líquido en los tubos fluye pasando dos veces (tal como se indica) y el líquido de la coraza fluye en un solo paso. En el primer paso por los tubos, el fluido frío

fluye a contracorriente del fluido caliente de la coraza y en el segundo paso por los tubos fluye en paralelo con el fluido caliente.

Figura 23. Intercambiador de Calor: Coraza y tubos (1-2)



Fuente: www.olaer.es/productos/intercambiadores

Se usan deflectores transversales de tal manera que el fluido se ve forzado a fluir perpendicularmente por la batería de tubos en lugar de hacerlo en paralelo. Esta turbulencia adicional generada por el flujo transversal, aumenta el coeficiente de transferencia de calor de la coraza.

4.10.1.3 Intercambiadores de flujo cruzado (mezclado)

Cuando se va a calentar o enfriar un gas como el aire, uno de los dispositivos de uso más común es el intercambiador de calor de flujo transversal. Uno de los fluidos, que es un líquido, fluye dentro de tubos y el gas exterior fluye a través del manojó de tubos por convección forzada o a veces natural. El fluido del interior de los tubos se considera sin mezcla, ya que está confinado y no puede mezclarse con ninguna otra corriente.

El otro se mezcla entre sí, dado que puede moverse libremente entre los tubos y habrá una tendencia a que la temperatura del gas se iguale en la dirección normal al flujo. En el fluido no mezclado del interior de los tubos habrá un gradiente de temperatura paralelo y normal a la dirección del flujo.

4.10.1.4 Intercambiador de flujo transversal (no mezclado). Un segundo tipo de intercambiador de calor de flujo transversal se usa comúnmente en aplicaciones de calefacción de espacios y aire acondicionado. En este tipo, el gas fluye a través de un manojó de tubos con aletas y no se mezcla porque queda confinado en canales de flujo separados entre las aletas conforme el gas pasa sobre los tubos. El fluido dentro de los tubos no se mezcla.

4.10.2 Balances de Calor. A partir de la primera ley de la Termodinámica el flujo de calor (q) que pierde o gana un fluido está dado por:

$$q = m (h_2 - h_1) \quad (13)$$

Dónde:

m : es el flujo másico (en Kg / s)

h_2 : entalpía de salida (en Kj / Kg)

h_1 : entalpía de entrada.

Utilizando unidades del Sistema internacional (S.I) el flujo de calor está en KW.

Para fluidos que presentan cambio de estado es conveniente el manejo de las ecuaciones con entalpías.

Cuando el fluido no cambia de estado, el flujo de calor se puede expresar como:

$$q = m C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \text{ para el fluido caliente} \quad (14)$$

$$q = m C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \text{ para el fluido frío} \quad (15)$$

Dónde:

C_{ph} : Calor específico del fluido caliente.

C_{pc} : Calor específico del fluido frío.

T_{hi} : Temperatura de entrada del fluido caliente.

T_{ho} : Temperatura de salida del fluido caliente.

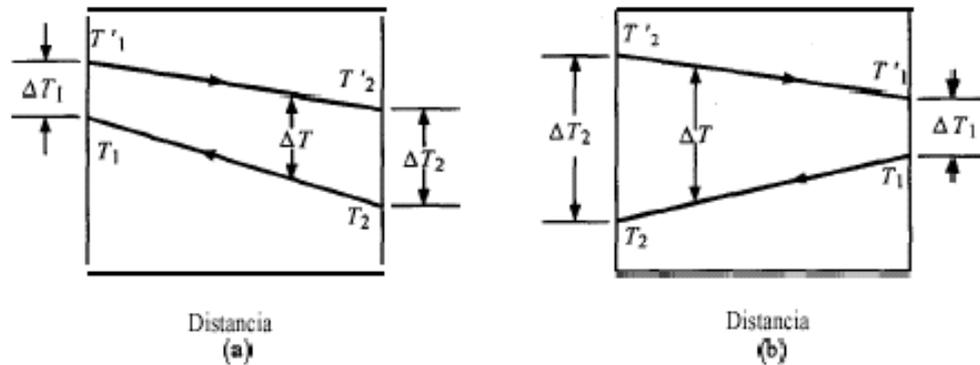
T_{co} : Temperatura de salida del fluido frío.

T_{ci} : Temperatura de entrada del fluido frío

4.10.3 Media logarítmica de Temperatura (MLDT ó ΔT_{ml}). En los I. de C. se trabaja con una media general de temperatura que tiene en cuenta las cuatro temperaturas de los fluidos: dos de entrada y dos de salida. Esta se denomina la media logarítmica de la diferencia de temperaturas: MLDT ó ΔT_{ml} .

La MLDT es mayor para intercambiadores donde los fluidos están en contracorriente (ó contraflujo). (Véase en la figura 24 los perfiles de temperatura para intercambiadores de calor a) en contracorriente y b) flujo paralelo.

Figura 24. Distribución de temperatura para intercambiadores: a) contracorriente y b) flujo paralelo



Fuente: Practicas de Transferencia de Calor. Orlando Palacio. 2006.

La ΔT_{ml} viene dada como:

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 - \Delta T_2) \quad (16)$$

4.10.3.1 Factores de corrección de temperatura. Cuando los intercambiadores son de más de un paso se debe aplicar un factor de corrección F_T , el cual se halla en gráficas según el I. de C. que se trate. Se tienen en cuenta dos parámetros que involucran las cuatro temperaturas de los fluidos.

4.10.4 Coeficientes globales de transferencia de calor. Los coeficientes globales o totales de los I. de C. tienen en cuenta varios parámetros, tales como: el tipo de flujo y de fluido, las temperaturas de los fluidos y de las paredes de contacto, la geometría del intercambiador, entre otros. Dichas condiciones determinan la transferencia de calor de un intercambiador.

Los coeficientes se denotan con U_i y U_o si son evaluados con respecto a las áreas de transferencia de calor interna y externa, respectivamente. Algunos valores experimentales están tabulados como los que aparecen en la tabla 10.

Tabla 10. Valores del coeficiente global de T. de C.

Combinación de fluidos	U (W/m ² .K)
Agua con agua	850 - 1700
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000 - 6000
Condensador de amoniaco (agua en tubos)	800 - 1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250 - 700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25 - 50

Fuente: Practicas de Transferencia de Calor. Orlando Palacio. 2006

4.10.5 Efectividad de los intercambiadores de calor. La efectividad (eficacia: ϵ) de un intercambiador de calor es la relación entre la cantidad real de calor (q) transferido con la máxima cantidad posible de transferencia de calor que se lograría si en Intercambiador tuviese un área de transferencia de calor infinita. En el trabajo no se utiliza ese método. Se hace un cálculo del calor ganado por el agua y ese es el que pierda el vapor.

4.10.6 Diseño de un Intercambiador de calor. Los conceptos generales sobre transmisión de calor, con el balance de calor y las ecuaciones básicas utilizadas en los intercambiadores permiten efectuar diseños preliminares de estos equipos. En el trabajo se hace un balance de energía para determinar el flujo de vapor.

En primer lugar se plantean balances de energía, a partir de los cuales se calcula los parámetros desconocidos. Luego a partir de valores experimentales del coeficiente global de T. de C. (véase tabla 10), esto para un cálculo rápido, pero aún confiable, se pueda determinar el área de transferencia de calor requerida para unas condiciones dadas de operación.

Las magnitudes que es preciso calcular son el coeficiente global de transmisión de calor.

Algunos parámetros en sistemas sencillos se puede evaluar fácilmente y con una exactitud considerable, pero en las unidades complejas la evaluación puede resultar difícil y estar sometida a una considerable incertidumbre, y requiere un diseño térmico más complejo basado en un análisis dimensional de la transferencia de calor.

El diseño final es casi un compromiso, basado en el criterio de ingeniería, que trata de conseguir la mejor operación global teniendo en cuenta los requerimientos del servicio.

Algunas veces el diseño está condicionado por consideraciones que tienen poco que ver con la transmisión de calor, como puede ser el espacio disponible para la instalación del equipo o la caída de presión tolerable en las corrientes de los fluidos.

Los intercambiadores de calor se diseñan de acuerdo con diversas normas y códigos, tales como las Standards of the tubular exchanger manufactures association (TEMA), el código ASME (Unfired pressure vessel code- Sección VIII), las normas del API (American Petroleum Institute).

Además otros fabricantes tienen en cuenta también otras normas como: el Código Alemán (AD-Merkeblätter, las normas DIN (Standard), el código Francés (CODAP Standard), la WRC 107, La Heat Exchanger Institut Standards.

Los intercambiadores de calor son tan importantes y tan ampliamente utilizados en los procesos industriales que su diseño se encuentra muy desarrollado.

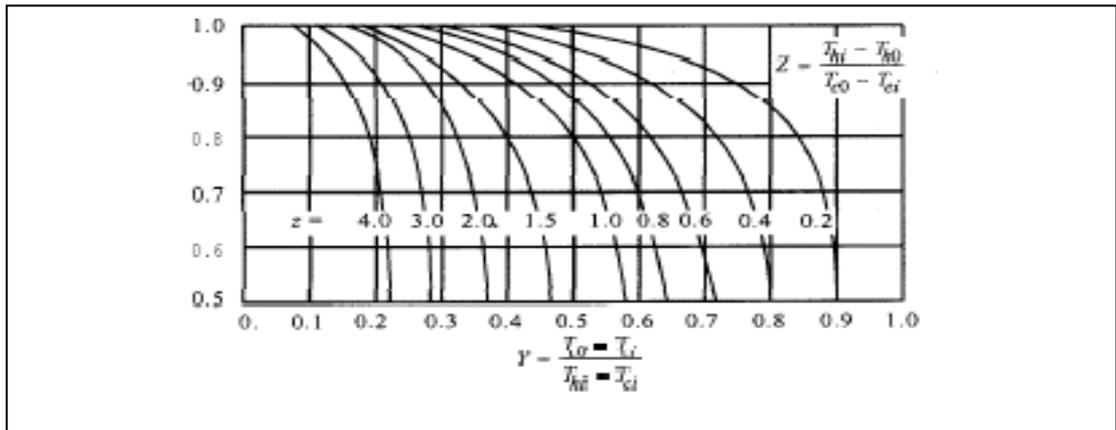
Las normas recogidas y aceptadas por la TEMA comprenden con todo detalle tanto material (acero inoxidable, Acero al Carbón, Aleaciones especiales: Cupro-Niquel, Monel, Titanio y Hastelloy), como métodos de construcción, técnicas de diseño y dimensiones de los intercambiadores. Ahora se mencionaran los tipos más importantes de intercambiadores y se consideran los aspectos fundamentales de su ingeniería, diseño y operación.

4.10.7 Cálculo de los intercambiadores. En resumen para realizar cálculos preliminares de intercambiadores se procede de la siguiente manera:

Cuando se conocen al menos tres temperaturas de los fluidos podemos mediante un balance de calor, utilizando las ecuaciones precedentes derivadas de la primera ley de la Termodinámica, se determina la cuarta temperatura y se halla la ΔT_{ml} .

A partir de la ecuación: $q = U A \Delta T_{ml}$ para un intercambiador 1-1, o con la ecuación $q = U A (F \Delta T_{ml})$ para intercambiadores de más de un paso. Donde F es un factor de corrección de la media logarítmica de la diferencia de temperatura (ΔT_{ml}), el cual se halla en gráficas como la de la figura 25 que tiene en cuenta las cuatro temperaturas de los fluidos: dos de entrada y dos de salida. Nota: El valor de F se encuentra en la ordenada, interceptando los valores de Y, verticalmente y Z en la curva.

Figura 25. Factor de corrección, F, Intercambiadores 1-2



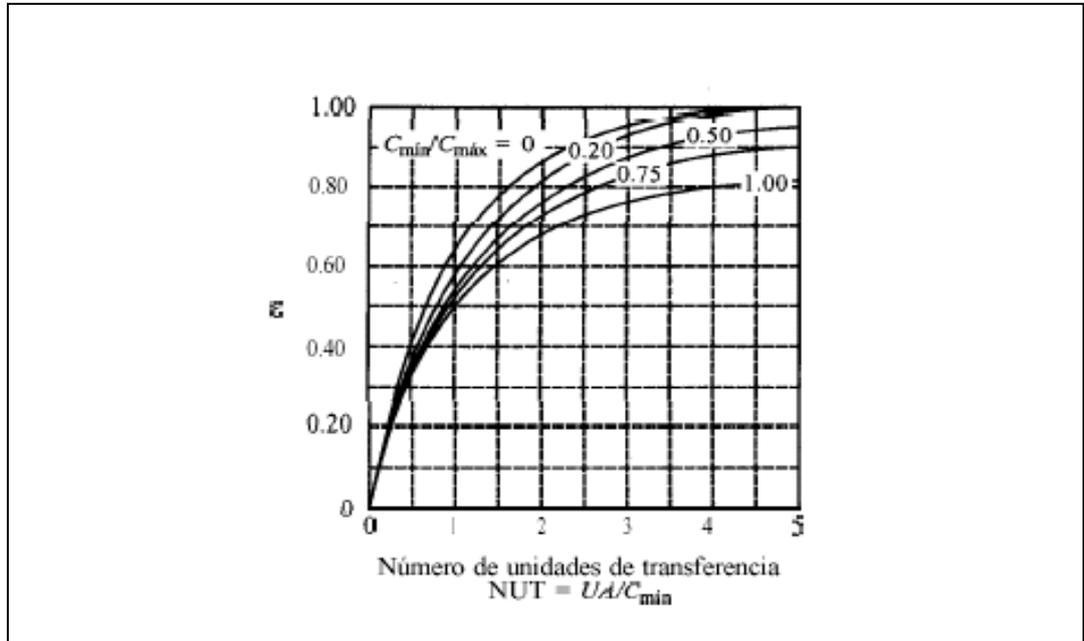
Fuente: Practicas de Transferencia de Calor. Orlando Palacio. 2006

Se asume valor experimental de U de la tabla 10 o similar, según el proceso de transferencia entre fluidos se determina el Área (A) de transferencia de calor que requiere el equipo para unas condiciones de operación dadas.

Con el valor del área se determina las dimensiones de los tubos para lo cual se dispone de las tablas para tuberías de intercambiadores de calor suministradas por los fabricantes.

Usando la ecuación: $q = \epsilon C_{\min} (T_{hi} - T_{ci})$ se halla la transferencia de calor, donde ϵ , es la efectividad y se halla a partir de gráficas de efectividad según el NUT (Número de unidades de transferencia) y las relaciones de capacitancia térmica: C_{\min} / C_{\max} , como la de la figura 26, que es el número de unidades de transferencia. El C_{\min} es el menor valor entre el C_{ph} y el C_{pc} . El número de Unidades de transferencia: $NUT = U A / C_{\min}$. Las temperaturas ya están definidas.

Figura 26. Eficiencia de un intercambiador de calor a contracorriente



Fuente: Practicas de Transferencia de Calor. Orlando Palacio. 2006

5 METODOLOGIA

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo está enfocado en la exploración de todo lo relacionado con el proyecto, modelo de investigación en experiencia, reproductivo, búsqueda parcial y el investigativo.

Mediante los conocimientos obtenidos pasamos a explorar las áreas relacionadas para el diseño, se organizó la información, se calcularon los datos del serpentín y finalmente se llegan a conclusiones con miras al diseño de calentamiento del agua.

5.2 MÉTODO ESCOGIDO

En este proyecto se realizó un análisis detallado y amplio sobre el comportamiento y funcionamiento de cada uno de los componentes y su función dentro de las etapas que conforman el proyecto.

5.3 APORTES DE PROYECTO

5.3.1 Aporte científico: El proyecto aporta al desarrollo de la que es llamada automatización industrial puesto que se mejora el funcionamiento del sistema de calentamiento de agua y a los sistemas de seguridad y calidad para el hospital.

5.3.2 Aporte social. Se entregará a la comunidad del Hospital Pablo Tobón Uribe un suministro de agua caliente más óptimo que mejora el servicio prestado.

5.3.3. Aporte práctico. Aporta un gran aprendizaje durante el proceso de investigación y diseño, al igual que a la capacitación de los integrantes del grupo de trabajo en las áreas aplicadas.

5.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la elaboración de este proyecto fue necesario investigar en textos de control y automatización industrial, revistas y artículos relacionados con el tema. (Katsuhico, 2003), (tomas, 2000), (E., 1997), entre otras mencionadas más adelante en la bibliografía.

De todo lo anterior se procedió a seleccionar la información necesaria para la elaboración de cada una de las etapas del proyecto, garantizando así una ruta eficaz para alcanzar el objetivo principal.

Primero se realizó la observación y análisis del sistema manual ya existente, de esta forma se comprendió más su inmensa importancia en el medio, además de las adecuaciones y mejoras que eran posibles realizar, tales como la implementación del Maxthermo para la automatización del sistema y la instalación de un sensor para un mejor control de la temperatura en el lugar de medición.

5.5 PROCEDIMIENTO

Hacer un análisis del sistema actual de calentamiento del agua para los pacientes y áreas relacionadas, así como el control de temperatura, y evaluar los problemas de funcionamiento y las posibles soluciones.

Recopilar la información necesaria sobre la operación de dicho sistema y las condiciones para que el nuevo diseño de automatización funcione de acuerdo a las especificaciones.

Hacer el diseño del nuevo sistema de automatización del control de la temperatura para luego hacer pruebas de funcionamiento.

Evaluar los resultados de las pruebas para corregir las posibles inconsistencias.

5.6 TIPO DE PROYECTO

Este proyecto consta de una mejora que se le hará al sistema que controla la temperatura del agua suministrada a los pacientes y diferentes áreas que lo requieren en el Hospital Pablo Tobón Uribe, ya que en momento se está haciendo de forma manual.

5.7 PLAN DE TRABAJO

Elaborar el diseño del nuevo sistema de automatización y efectuar la implementación de acuerdo al diseño. Terminado el diseño se hacen pruebas y se corrigen los inconvenientes que pueda haber en el desarrollo de las pruebas.

6. DESARROLLO DEL TRABAJO

6.1 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO ANTES DE INSTALAR EL SISTEMA DE CONTROL

Para definir las especificaciones que debe tener el sistema de control se midieron algunos datos del proceso que se encuentran registrados en la tabla 11. Los datos adquiridos son un promedio de mediciones hechas durante una semana.

Tabla 11. Datos del proceso

Presión de vapor a la entrada del tanque esférico	110 psi
Temperatura del vapor a la entrada del serpentín	168 ° C
Temperatura promedio del condensado a la salida del serpentín	75 ° C
Diámetro de la tubería del serpentín	2 Pulg. SCH 40

Fuente: Tabla elaborada por los autores

En la tabla 12 se registran los datos de las temperaturas en diferentes partes del proceso y la presión de vapor. Estos con el fin de compararlas luego de implementar el sistema de control.

El proceso consiste en hacer pasar vapor por un serpentín que se encuentra sumergido en el tanque de almacenamiento. Cabe anotar que el tanque y el serpentín ya se encuentran diseñados y más adelante se dan detalles de la construcción y las dimensiones del serpentín.

La entrada de vapor es regulada por una válvula manual que es accionada esporádicamente por un operario.

El tiempo que la válvula está abierta se contabiliza para determinar el consumo de vapor y de acuerdo a ese dato el ingeniero determina el consumo de energía.

A mayor tiempo de abertura de la válvula más consumo de vapor, por lo tanto la caldera se energiza con más frecuencia y por lo tanto se incrementa la energía consumida.

En la tabla 12 se registran la presión de vapor, la temperatura del agua a la entrada del tanque, la temperatura del agua a la salida y la del agua que retorna al tanque.

Tabla 12. Datos promedio en un turno de 24 Horas

Hora	Presión de Vapor (psi)	Temperatura T1 °C	Temperatura T2 °C	Temperatura T3 °C
12 AM	110	23	40	38
2AM	105	23	40	38
4 AM	110	23	40	36
6AM	100	23	40	38
8AM	110	23	42	38
10AM	115	23	46	36
12PM	110	23	46	38
2 PM	100	23	50	36
4 PM	115	23	54	38
6 PM	100	23	50	38
8 PM	110	23	50	38
10 PM	115	23	44	38

Fuente: Tabla elaborada por los autores

Temperatura T1: Es la temperatura del agua del acueducto que alimenta el tanque de almacenamiento.

Temperatura T2: Es la temperatura del agua a la salida del tanque de almacenamiento, donde se desea controlar la variable de proceso.

Temperatura T3: Es la temperatura de retorno de proceso que se hace recircular al tanque de almacenamiento.

En la tabla 13 se pueden observar los datos tabulados de la apertura de la válvula en un mes. En total la válvula estuvo abierta 85 Horas aproximadamente. Se espera que con el control ese dato se reduzca y que el operario no tenga que monitorear permanentemente el proceso.

Tabla 13. Abertura de la válvula de vapor en un mes

Día	Tiempo de apertura en fracción de hora	Día	Tiempo de apertura en fracción de hora
1	3,58	16	1,48
2	4,29	17	3,24
3	4,58	18	1,07
4	3,8	19	1,05
5	4,21	20	4,39
6	4,07	21	1,62
7	3,27	22	1,51
8	5,83	23	4,76
9	2,48	24	1,49
10	1,82	25	2,11
11	1,52	26	4,44
12	2,00	27	1,78
13	1,77	28	1,57
14	2,73	29	5,64
15	1,77	30	1,26
Total de Horas		85,13	

Fuente: Tabla elaborada por los autores

El operario debe garantizar que la temperatura en los diferentes puntos donde se tomaron las medidas pertinentes de consumo sea de 38 °C.

Para garantizar esa temperatura en estos momentos se confía en la experiencia y pericia del operario para abrir oportunamente la válvula de regulación de vapor.

El tiempo de abertura de la válvula de vapor dependerá del consumo de agua caliente en las diferentes áreas del hospital.

En la tabla 14 se puede apreciar la temperatura en las diferentes áreas. Para la medición se emplea un termómetro portátil que el operario instala en cada punto temporalmente. Se mide en un punto a la vez. En este caso se puede observar que en todo momento el operario estuvo muy atento para garantizar que la temperatura es igual es todos los puntos.

Tabla 14. Temperaturas en diferentes áreas del trabajo en un turno de 24 horas

Hora	Temperatura promedio del agua en Habitaciones	Temperatura del agua en el área de lavandería	Temperatura del agua en el área de alimentos
12 AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
2AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
4 AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
6AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
8AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
10AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
12PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
2 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
4 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
6 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
8 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
10 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C

Fuente: Tabla elaborada por los autores

6.1.1 Instrumentos usados en las mediciones. En la figura 27, se detalla la válvula manual que el operario debe manipular para regular el vapor. Esta válvula se encuentra instalada en una tubería de dos pulgadas a la entrada del serpentín.

Para medir la temperatura en los diferentes puntos del proceso se emplea un termómetro bimetálico cada 2 ó 3 horas.

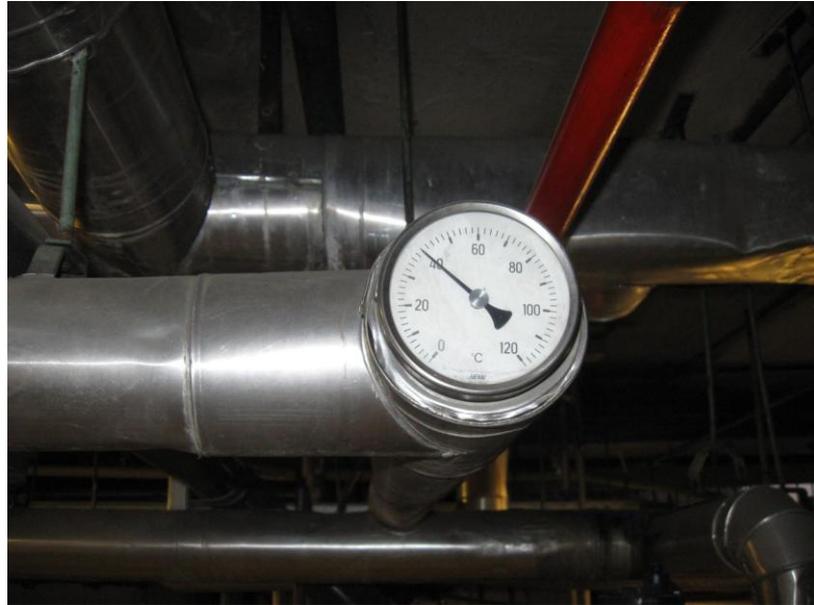
Figura 27. Válvula manual de entrada de vapor



Fuente: Fotografía del proceso en HTPU

La temperatura de la salida de agua en el tanque también se mide utilizando un termómetro bimetálico que tiene un campo de medida de 0 a 120 °C. La resolución de ese termómetro es de ± 1 °C. Ver figura 28.

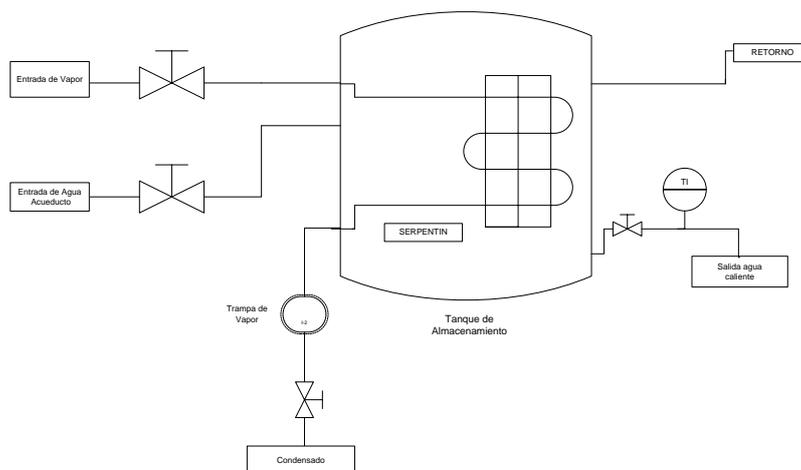
Figura 28. Termómetro bimetálico para medir temperatura de agua



Fuente: Fotografía del proceso en HTPU

6.1.2 Diagrama de Instrumentación del proceso. Para tener claridad de lo que se debe implementar en el proceso, se hace un diagrama de instrumentación preliminar, donde se muestran los elementos principales de medición que hacen parte del sistema que controla la temperatura actualmente. Ver figura 29.

Figura 29. Diagrama de instrumentación del proceso



Fuente: Grafico elaborado por los autores

6.1.3 Variables de proceso. Las variables de proceso que se miden en el proceso son:

Temperatura del agua a la entrada y salida del serpentín

Temperatura del vapor

Temperatura de condensado

Presión de vapor

6.1.4 Dimensionamiento del tanque y tuberías. En este trabajo no es necesario dimensionar el tanque puesto que ya se encuentra instalado. El tanque es esférico por la gran capacidad en volumen y está en capacidad de almacenar 22500 litros de agua.

La tubería que hace parte del proceso también esta dimensionada y es de 2 pulgadas, de acero al carbón y con recubrimiento para evitar pérdidas de calor por transferencia de calor por convección y conducción.

El tanque es esférico y el radio es de 1.75m

La capacidad volumétrica del tanque es de 22500 m³ aproximadamente.

6.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el diseño del sistema de control se tienen en cuenta las especificaciones dadas por el ingeniero encargado del mantenimiento del hospital y la disponibilidad presupuestal para realizar dicha automatización.

En las especificaciones se define realizar un control ON-OFF de la temperatura a la salida del agua del tanque.

Se instalará una válvula solenoide de vapor en la entrada de vapor del serpentín con un Bypass por si es necesario el control manual de la entrada de vapor.

La estrategia de control ON-OFF es idónea puesto que aunque se requiere un control en la temperatura del agua no es problemático manejar un pequeño rango de error a la salida de la temperatura.

Para la medición de la temperatura se utilizara una termoresistencia PT100.

El serpentín ya está diseñado, en este trabajo se calcula nuevamente la longitud del serpentín para calentar el agua y se compara con el diseño actual.

6.2.1 Cálculos para obtener el flujo de vapor. Para obtener el flujo de vapor se hace un balance de energía consiste en igualar el calor perdido por el vapor y el calor ganado por el agua.

$$q_v \text{ (calor cedido por el vapor)} = q_a \text{ (calor ganado por el agua)}$$

$$q_a = m_a \times C_p \times (\Delta T) \quad (17)$$

Para calcular la m_a (masa del agua), se obtiene del proceso, el radio del tanque esférico que es de 1.75 m. La densidad del agua es 995 kg/m^3 a $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

El volumen de una esfera es: $4\pi R^3/3$

$$\text{Volumen del tanque} = (4\pi \times (1.75\text{m})^3) / 3 = 22.45 \text{ m}^3$$

$$m_a = (995 \text{ kg/m}^3) \times (22.45 \text{ m}^3) = 22337.75 \text{ kg}$$

Esa masa de agua se divide entre el tiempo que demora en calentarse a 40 °C.
El tiempo es de 90 minutos ó 5400 segundos

El flujo másico (m_a) entonces queda: $m_a = 22337.75 \text{ kg} / 5400 \text{ s}$.

$$m_a = 4.137 \text{ kg} / \text{s}$$

El calor específico del agua es: 4185 J / kg °C.

La temperatura a la entrada de agua 23 °C y la temperatura a la salida del agua 40 °C.

$$q_a = (4.137 \text{ kg} / \text{s}) \times (4185 \text{ J} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}) \times (40 - 23 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$q_a = 294326.86 \text{ J} / \text{s} \text{ ó (W)}$$

Como $q_a = q_v$; entonces:

$$q_v = 294326.86 \text{ J} / \text{s} \text{ ó (W)}$$

Para calcular el flujo másico de vapor (m_v) se requieren las entalpías del vapor y del condensado a la temperatura especificada.

Entalpia del vapor a 168 °C = 2768 KJ / kg

Entalpia del condensado a 75 °C = 313 KJ / kg

$$q_v = m_v (h_g T_v - h_f T_c) \quad (18)$$

Entonces:

$$m_v = [(294326.86 \text{ J / s}) \times 3600 \text{ s}] / (2768 - 313) (\text{KJ / kg}) (\text{h})$$

Se multiplico por 3600 s para obtener el (mv) en kg/h-

$$m_v = 443.36 \text{ kg / h.}$$

El flujo másico de vapor para el proceso es de 443.36 kg / h

6.2.2 Cálculos para obtener la longitud del tubo del serpentín. A continuación se va a calcular las dimensiones del serpentín y se compara con el que ya se encuentra instalado en el proceso.

Para calcular el área de transferencia de calor se utiliza la ecuación:

$$Q_v = U \times A \times \Delta T \quad (19)$$

$$\text{Para } \Delta T = (\Delta T_a - \Delta T_b) / \ln (\Delta T_a / \Delta T_b)$$

$$\text{Entonces } \Delta T = (168 - 23) - (75 - 40) / \ln (147 / 35) = 78.32 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

El ΔT es 78.32 $^\circ\text{C}$

El coeficiente global de transferencia de calor U es 2900 W $^\circ\text{C} / \text{m}^2$

Se despeja A de la ecuación 19 y queda:

$$A = 294326.86 \text{ W} / (2900 \text{ W } ^\circ\text{C} / \text{m}^2 \times 78.32 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$A = 1.3 \text{ m}^2$$

El área de transferencia de calor es: 1.3 m^2

El área de transferencia de calor también es: $\pi \times D \times L$, donde D es el diámetro interior de la tubería y L la longitud de la tubería. La tubería es de 2 pulgadas y en metros es 0.0508 m.

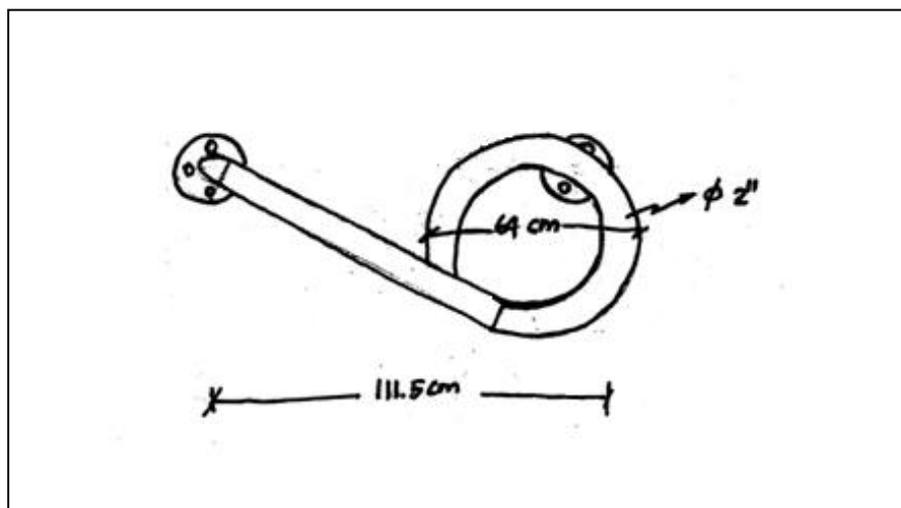
Entonces:

$$L = 1,3 \text{ m}^2 / (\pi \times 0.0508) \text{ m}$$

$$L = 8.14 \text{ m.}$$

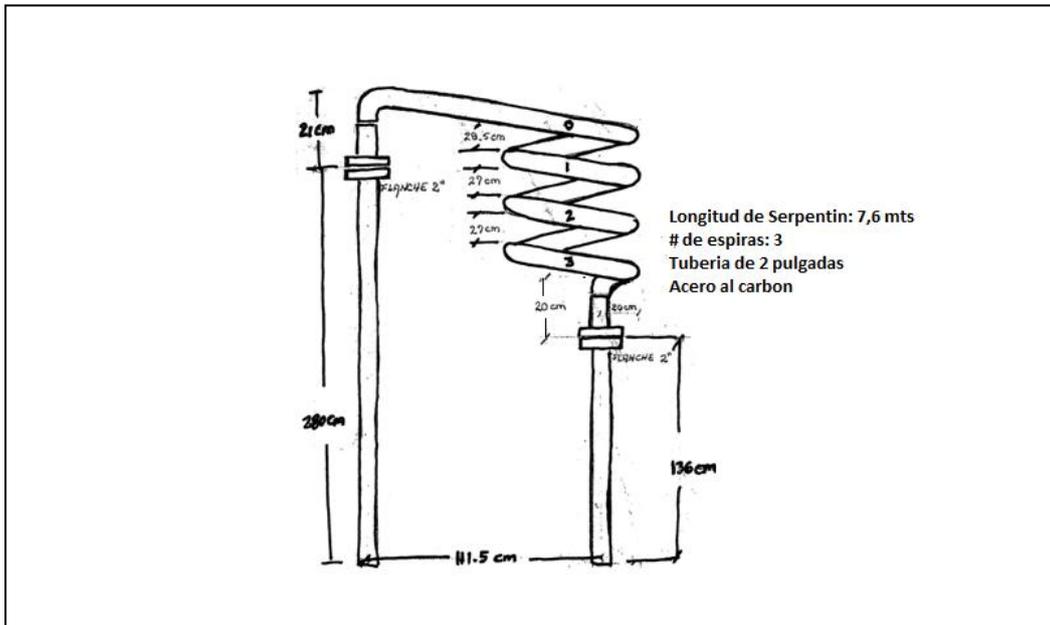
En la figura 30 podemos observar el diámetro del serpentín y en la figura 31, podemos apreciar que el diseño del serpentín instalado es aproximado al valor calculado. Llegamos a la conclusión que el serpentín instalado es el adecuado.

Figura 30. Diámetro del serpentín



Fuente: Diseño del HPTU

Figura 31. Diseño del serpentín



Fuente: Diseño del HPTU

6.3 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL

En esta sección se hace una selección de los instrumentos de medición y control.

6.3.1 Sensores de temperatura. Para medir la temperatura se selecciona un termoresistencia (RTD) PT100. Luego de realizar la compra de este sensor nos dimos cuenta que una Termocupla tipo J también era adecuada para hacer la medición.

También se seleccionaron unos termómetros bimetálicos de 0 a 100 °C y de 0 a 200 °C para ubicarlos en algunos puntos del proceso.

6.3.2 Controlador. Para controlar la temperatura se seleccionó un controlador de la marca MAXTHERMO. Ese es adecuado porque se puede configurar como un controlador ON-OFF. Tiene una entrada análoga por PT100 y maneja una salida por relé por contacto abierto para manejar la válvula solenoide.

En la tabla 15 se muestran las demás especificaciones de dicho controlador.

Tabla 15. Especificaciones del controlador Maxthermo

PV entrada	Tipo de entrada	TC (J,K,T,R,E,S,B,N)
		RTD (PT100, JPT100)
		Lineal (1- 5v, 4 – 20 mA)
	Tiempo de muestreo de entrada	300 ms
Indicación	Indicación PV/SV	4 dígitos
	Sistema de almacenaje de valor constante	Memoria permanente
Modo de control	Banda proporcional (p)	0.0 – 3000
	Tiempo integral (i)	0 – 3600
	Tiempo derivativo (d)	0 – 900
	Tiempo de ciclo	0 – 150
	Zona muerta	0.0 – 200.0
Salidas	Relé de salida	Contacto, SPDT 3A/240VAC
	Voltaje de salida	Pulso de voltaje
	Salida lineal	4 – 20 mA, 1–5v
	Salida de control de motor	Válvula de motor de lazo abierto
Alarma	Canal	3 canales (opcional)
Comunicación	Tipo de comunicación	Rs-232, Rs-485

Fuente:http://www.termaltec.servicios.com/sigetes/pdf/mc5x38manual_2.pdf

6.3.3 Válvula de control. Como elemento final de control se seleccionó una válvula solenoide normalmente cerrada para vapor de 2 pulgadas.

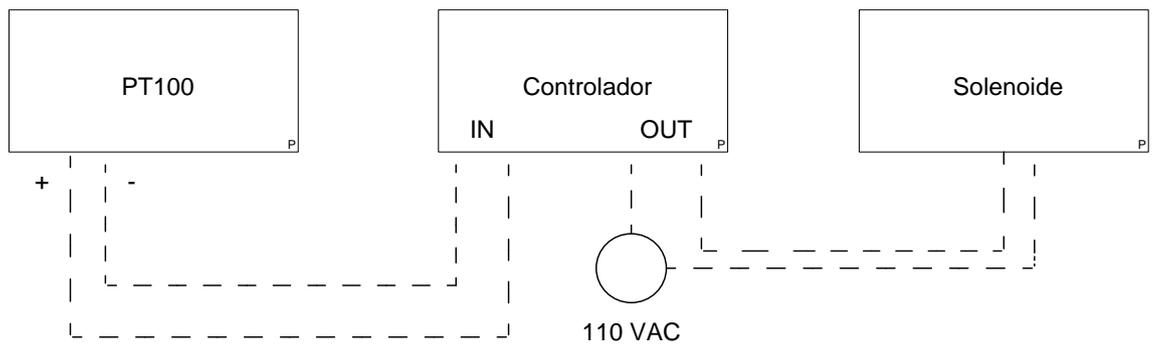
6.3.4 Indicadores de temperatura. Se utilizaron 2 termómetros bimetálicos de carátula de 0 a 120 °C

6.3.5 Accesorios adicionales. Para adaptar los instrumentos se utilizó tubería de acero al carbón, codos, tes, universales y niples de diferentes dimensiones.

También se utilizó cable eléctrico AWG 18, canaletas e insumos eléctricos para la conexión de los dispositivos eléctricos.

Para la conexión de la parte eléctrica se empleó la técnica de conexión a dos hilos como se ilustra en la figura 32.

Figura 32. Conexión a dos hilos



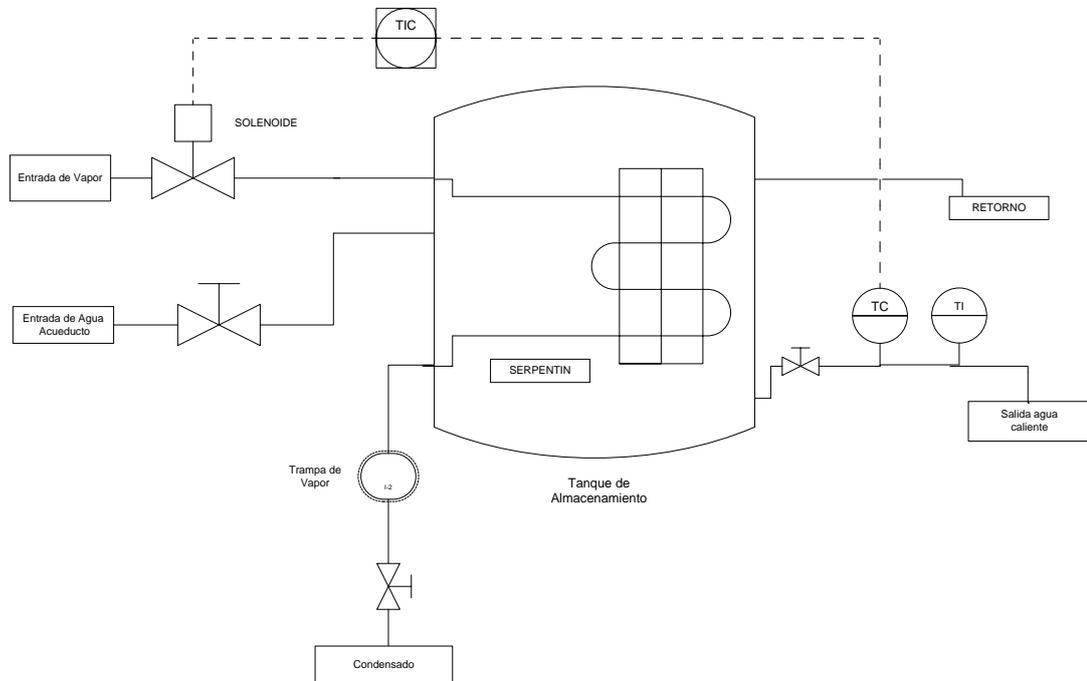
Fuente: Imagen elaborada por los autores

6.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez el hospital adquirió los elementos solicitados para la implementación se procedió a la instalación de los instrumentos de medición y control y a la configuración del controlador.

6.4.1 Diagrama de instrumentación del proceso terminado

Figura 33. Diagrama de instrumentación del proceso terminado



Fuente: Diagrama realizado por los autores

6.4.2 Parámetros del controlador. Para configurar el controlador en el modo ON-OFF se ajusta la ganancia en un valor mínimo y el controlador da la posibilidad de ajustar el diferencial de temperatura. Se ubicó la ganancia en 1,0 y el diferencial en ± 2 °C. Cuando el set point se ajusta en 39 °C, la temperatura puede variar entre 37 y 41 °C.

6.4.3 Funcionamiento del sistema de control. El termómetro bimetalico indica la temperatura en la salida del agua y la PT100 también capta la temperatura y genera una señal eléctrica en función de la temperatura del agua.

La señal de la PT100 es recibida por el controlador y este la procesa para comparar el valor de la variable con el set point.

De la comparación se obtiene una señal de error que es procesada por el algoritmo de control que en este caso es ON-OFF.

El control envía una señal para abrir o cerrar el contacto que suministra la alimentación a la válvula solenoide.

Si la temperatura está por debajo del diferencial la válvula abre y si la temperatura está por encima del diferencial la válvula cierra. Y este ciclo se repite indefinidamente garantizando que la temperatura se mantenga dentro del rango especificado por el set point y el diferencial.

6.5 PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez se implementó el sistema de control se procedió a hacer las pruebas y en esta sección se obtienen unos datos tabulados que nos permiten evaluar si el sistema es efectivo.

En las figuras 34, 35 y 36 se evidencia la implementación del sistema de control y el momento en que se hacían algunas pruebas.

Figura 34. Termoresistencia para medir temperatura de agua



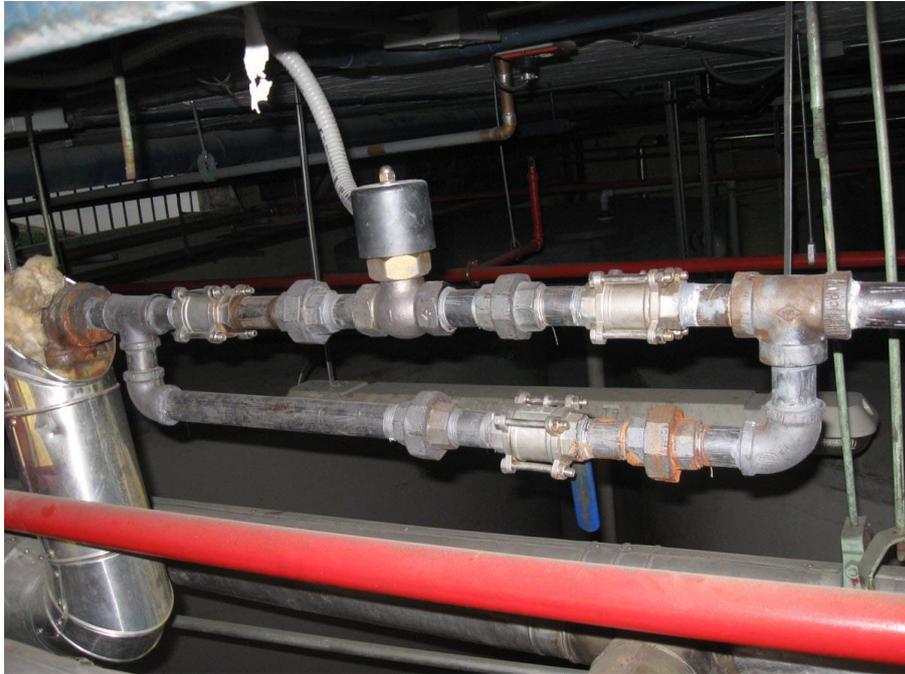
Fuente: Fotografías del área de mantenimiento HPTU

Figura 35. Implementación del controlador



Fuente: Fotografías del área de mantenimiento HPTU

Figura 36. Implementación de la válvula solenoide con bypass



Fuente: Fotografías del área de mantenimiento HPTU

6.5.1 Resultados y discusión. En la puesta de funcionamiento se verificaron los instrumentos de medición y control y ajustamos los parámetros de control. Se conmutó el controlador en automático y comenzamos a tomar datos por varios días.

Al principio tuvimos inconvenientes con la configuración del controlador. Pero luego de varios intentos y consultando el manual de puesta en operación logramos programarlo.

La PT100 al comienzo no estaba dando la indicación de temperatura. La causa es que la conectamos al revés en el controlador.

Algo nuevo que agregamos al proceso fue que el agua que se consume del proceso se retorna nuevamente al tanque y de esa forma se ahorra energía.

También sería conveniente recircular el condensado para alimentar la caldera de esa forma la caldera consumirá menos combustible para generar el vapor.

6.5.2 Datos tabulados después de implementar el sistema de control

Tabla 16. Datos promedio en un turno de 24 Horas con control

Hora	Presión de Vapor (psi)	Temperatura T1 °C	Temperatura T2 °C	Temperatura T3 °C
12 AM	110	23	41	38
2AM	100	23	41	38
4 AM	115	23	41	38
6AM	110	23	41	38
8AM	100	23	38	38
10AM	105	23	41	38
12PM	115	23	42	38
2 PM	100	23	38	38
4 PM	110	23	42	38
6 PM	105	23	42	38
8 PM	115	23	42	38
10 PM	100	23	42	38

Fuente: Tabla elaborada por los autores

Temperatura T1: Es la temperatura del agua del acueducto que alimenta el tanque de almacenamiento.

Temperatura T2: Es la temperatura del agua a la salida del tanque de almacenamiento, donde se desea controlar la variable de proceso.

Temperatura T3: Es la temperatura de retorno de proceso que se hace recircular al tanque de almacenamiento.

Tabla 17. Abertura de la válvula solenoide de vapor en un mes con control

Día	Tiempo de abertura en fracción de hora	Día	Tiempo de abertura en fracción de hora
1	0,81	16	1,69
2	0,73	17	0,27
3	0,71	18	1,02
4	1,32	19	1,28
5	1,01	20	2,98
6	0,98	21	1,05
7	1,43	22	1,82
8	2,93	23	0,56
9	0,77	24	0,94
10	1,31	25	0,81
11	0,66	26	0,57
12	0,66	27	1,31
13	1,04	28	1,82
14	0,59	29	0,97
15	1,48	30	1,12
Total de Horas		34,64	

Fuente: Tabla elaborada por los autores

Tabla 18. Temperaturas en diferentes áreas del trabajo en un turno de 24 horas con control

Hora	Temperatura promedio del agua en Habitaciones	Temperatura del agua en el área de lavandería	Temperatura del agua en el área de alimentos
12 AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
2AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
4 AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
6AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
8AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
10AM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
12PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
2 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
4 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
6 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
8 PM	38 ° C	38 ° C	38 ° C
10 PM	38 ° C	38 ° C	38 C

Fuente: Tabla elaborada por los autores

Después de hacer pruebas y tabular nuevamente los datos, obtuvimos los siguientes resultados:

Con el sistema de control podemos garantizar que la temperatura en todas las áreas de trabajo permanezca constante. Ver tabla 18.

En la tabla 16 la temperatura T2 cambia levemente pero los otros datos son muy similares a la toma de datos anterior.

En la tabla 17 se observa que le promedio de abertura de la válvula en hora en un mes bajo a 34 Horas.

De acuerdo al dato anterior la reducción de la abertura de la válvula a un 58% aproximadamente ahorra energía por se consume menos vapor.

Estos datos se entregaron al ingeniero del Hospital para cuantificar cuanto se ahorra el hospital anualmente con este sistema de control.

Otro beneficio que se logro es que el operario no tiene que monitorear el proceso permanentemente, liberándolo para que pueda desempeñar otras tareas de mantenimiento.

Por los resultados obtenidos y los comentarios hechos por el ingeniero concluimos que se logró el objetivo de este trabajo.

7. RECURSOS

7.1 HUMANOS

Tecnólogo en Mecatrónica (2)

Ingeniero del área de la Electromecánica, Mecatrónica o Electrónica. (1).

7.2 TECNICOS

Tabla 19. Costo material técnico

Ítem	Materiales	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
1	Controlador Maxthermo	2	171,680.00	343,360.00
2	TermoresistenciaPT100	2	128,122.00	256,244.00
3	Electroválvula	1	251,720.00	251,720.00
4	Cable para Termo resistencia	30 m	2,088.00	62,640.00
5	Otros Insumos (tubería y accesorios)	1	500,000.00	500,000.00
6	Mano de Obra	1	2,000,000.00	2,000,000.00
	Costo aproximado			3,413,964.00

Fuente: Tabla elaborada por los autores

8. CONCLUSIONES

La realización de este trabajo nos permitió aplicar algunos conocimientos adquiridos en el transcurso de nuestros estudios en la institución. Este tipo de trabajo nos permitió experimentar con equipos que miden y controlan la temperatura de un proceso industrial.

El control de procesos industriales garantiza que las variables permanezcan en algún valor pedido por el operario. Este control permite al operario liberarlo de un monitoreo permanente en el proceso para que se pueda dedicar a otras tareas de mantenimiento.

Controlar la temperatura es relativamente simple puesto que es una variable lenta, es decir con inercia y esto hace que a cualquier perturbación no se requiera rapidez en la respuesta del controlador.

Aunque aparentemente el costo de la automatización de procesos es alto, consideramos que con el tiempo son más los beneficios por que no solo se ahorra energía, si no que se le garantiza un servicio de calidad a la comunidad.

9. RECOMENDACIONES

Es conveniente que el hospital evalúe a largo plazo los diseños que se proponen en este trabajo para mejorar el proceso como tal. El condensado del proceso se puede recircular al tanque que alimenta a la caldera y de esta forma se ahorra más energía.

En el hospital identificamos otros procesos que pueden ser automatizados de la misma forma como este. Uno de ellos es el sistema de distribución de aire comprimido y el control de acceso a las áreas restringidas. En el momento en el que haya presupuesto se podía evaluar que otro sistema se puede intervenir para que el servicio a la comunidad sea más eficiente.

Se recomienda experimentar con una válvula de control neumática a la entrada de vapor para aprovechar mejor las características del controlador. De esta forma se podía evaluar algoritmos PI o PID.

Lo ideal es que las instituciones de salud y en general la industria realicen esfuerzos económicos para automatizar sus procesos industriales, pues de esta forma se estará regulando los recursos naturales y se impactará positivamente el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] BUJAK JANUSZ. Heat consumption for preparing domestic hot water in hospitals.

[2] KARA ALI YUSUF. Modeling of central domestic water heater for building.

Revista VIRTUAL PRO. Procesos industriales

OGATA, KATSUHIKO. Ingeniería de control moderna. España. Pearson Prentice Hall, 2003

HERNÁNDEZ M., Jorge E. Control electrónico de la transmisión automática. En: Revista Electrónica y Computadores. Pereira, Cedit, v.36, 1997.p.35-38.

MOTT, ROBERT L, Mecánica de Fluidos Aplicada. Ed. Prentice-Hall Hispanoamérica S.A. 1996*.

EANKPOLIS, CHRITIE J. Procesos de transporte y Operaciones Unitarias. Compañía Editorial Continental. México, 1999.

BROMN, G. Operaciones Básicas de la Ingeniería Química.

CREUS, ANTONIO, Instrumentación Industrial. Ed. Alfaomega. 6ª edición.

GOMIS, A MARCILLA. Introducción a las operaciones de separación- Cálculo por etapas de equilibrio. Publicaciones Universidad de Alicante, Murcia (España)

SHAMES, IRVING H. Mecánica de fluidos. Mc Graw-Hill.

KREITH/BOHN, Principios de transferencia de calor. Thomson-Learning, 6ª edición, México, 2001.

JONES, J.B. Ingeniería Termodinámica. Prentice Hall. Hispanoamericana, S.A., 1ª edición, México 1997.

CIBERGRAFÍA

Catálogos en línea Armstrong", <http://www.armstrong-intl.com/products/traps>.

<http://www.actionio.com/products/category.html>

http://www.intertechnology.com/Tedea_Huntleigh/inde

<http://www.actionio.com/products/category.html>

http://www.tcrsoluciones.com.mx/productos_maxthermo_digital_5438.html

http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termorresistencias.htm

http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3856/2/trampas_de_vapor_1_1.pdf

http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1709/ISAD_Tema7_2.pdf

http://www.tcrsoluciones.com.mx/productos_maxthermo_digital_5438.html

http://www.termaltecservicios.com/sigetes/pdf/mc5x38manual_2.pdf [12]

Software (curso virtual de neumática) VIRTUAL FLUID N, Daniel Rodríguez Agudelo, Carlos A. Sierra Peñuela.

<http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/traps-and-orifices-pt1.html>

<http://www.kmsomerinca.com.ve/dil-m.htm>