



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**

Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas  
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



**“DISEÑO DE UNA MINI PLANTA INTERCAMBIADORA DE CALOR  
CONTROLADA POR UN SISTEMA HMI/SCADA, PARA LA CAPACITACIÓN  
DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”**

TESIS PRESENTADA POR:

**BACH. MARCOS PRUDENCIO FLORES SANDOVAL**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO ELECTRONICO

Noviembre del 2016

Lambayeque – Perú

# **UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**

Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**“DISEÑO DE UNA MINI PLANTA INTERCAMBIADORA DE CALOR  
CONTROLADA POR UN SISTEMA HMI/SCADA, PARA LA CAPACITACIÓN  
DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO ELECTRONICO

PRESENTADA POR:

---

BACH. FLORES SANDOVAL MARCOS PRUDENCIO  
AUTOR

---

ING. OBLITAS VERA CARLOS LEONARDO  
ASESOR

Noviembre del 2016  
Lambayeque – Perú

# **UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**

Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**“DISEÑO DE UNA MINI PLANTA INTERCAMBIADORA DE CALOR  
CONTROLADA POR UN SISTEMA HMI/SCADA, PARA LA CAPACITACIÓN  
DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO ELECTRONICO

APROBADA POR EL JURADO:

---

ING. RAMIREZ CASTRO MANUEL JAVIER  
PRESIDENTE

---

ING. CHICLAYO PADILLA HUGO JAVIER  
SECRETARIO

---

ING. CHAMAN CABRERA LUCIA ISABEL  
VOCAL

Noviembre del 2016  
Lambayeque – Perú

## DEDICATORIA

*Esta tesis se la dedico a Dios, quien me dio la vida, la fe, la  
fortaleza, la salud y la esperanza para desarrollar y  
terminar este trabajo. A mi querida esposa y a mi familia  
mis fuentes de amor e inspiración.*

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme la  
vida, salud y sabiduría para alcanzar un objetivo  
más en mi vida.*

*A mi Asesor, Ing. Carlos Oblitas; por su apoyo y  
acertada dirección en el desarrollo de este trabajo  
de investigación.*

*A mi Universidad UNPRG, por brindarme una  
formación académica y profesional. A todos los  
docentes que han impartido y compartido sus  
conocimientos con nosotros los estudiantes, por  
sus sabios consejos, apoyo y sugerencias para ser  
personas de bien y excelentes profesionales.*

*A mi esposa por brindarme día a día todo su amor  
y apoyo para el desarrollo de este proyecto y a mi  
familia, por brindarme todo el apoyo moral y  
económico para salir adelante.*



# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPITULO I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	1
1.1. ASPECTO INFORMATIVO	2
1.1.1. Título	2
1.1.2. Autor	2
1.1.3. Asesor	2
1.1.4. Área de Investigación	2
1.1.5. Lugar de ejecución	2
1.1.6. Duración estimada	2
1.2. ASPECTO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTIFICA	2
1.2.1. Situación Problemática	2
1.2.2. Antecedentes Bibliográficos	3
1.2.3. Formulación del Problema Científico	4
1.2.4. Objetivos	5
1.2.4.1. Objetivo general	5
1.2.4.2. Objetivos específicos	5
1.2.5. Justificación e importancia de la investigación	5
1.2.6. Hipótesis	5
1.2.7. Diseño metodológico	6
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b>	7
2.1. PLANTA DIDÁCTICA (PLANTA PILOTO DIDÁCTICA)	8
2.1.1. Tipos	8
2.1.1.1. Planta para Presión	8
2.1.1.2. Planta para Temperatura	9
2.1.1.3. Planta para Flujo y Nivel	9
2.1.2. Finalidad de una Planta Piloto	10
2.2. CONTROL	11

2.2.1. Sistemas de control.....	11
2.2.1.1. Terminología básica.....	11
2.2.2. Sistema SCADA.....	13
2.2.2.1. Requisitos de un SCADA.....	13
2.2.2.2. Componentes de un sistema SCADA.....	13
2.2.2.3. Estructura del sistema SCADA.....	13
2.2.2.4. Programas para elaborar sistemas SCADA.....	14
2.2.3. Interfaz hombre máquina – HMI.....	16
2.2.3.1. Tipos.....	17
2.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	18
2.3.1. Definición.....	18
2.3.2. Clasificación .....	19
2.3.2.1. De Acuerdo al Proceso de Transferencia.....	19
2.3.2.1.1. De Contacto Directo .....	19
2.3.2.1.2. De Contacto Indirecto .....	20
2.3.2.2. De Acuerdo a los Mecanismos de Transferencia de Calor.....	20
2.3.2.3. De Acuerdo al Número de Fluidos Involucrados .....	20
2.3.2.4. De Acuerdo a la Disposición de los Fluidos.....	21
2.3.2.4.1. Intercambiadores de Calor de Paso Único.....	21
2.3.2.4.2. Intercambiadores de Calor de Pasos Múltiples.....	22
2.3.2.5. De Acuerdo a la Compactación de la Superficie .....	22



2.3.2.6. De Acuerdo al Tipo de Construcción.....	22
2.3.2.6.1. Intercambiador de Doble Tubo .....	22
2.3.2.6.2. Intercambiadores de Tubo y Carcaza ó de Tubo y Coraza.....	23
2.3.2.6.3. Intercambiadores Enfriados por Aire y Radiadores.....	25
2.3.2.6.4. Intercambiadores de Placas Empacas (PHE).....	26
2.4. GUIA PARA LA SELECCION DEL MEJOR TIPO DE INTERCAMBIADOR.....	29
2.4.1. Tabla1: Características de los intercambiadores de calor.....	30
2.4.2. Tabla 2: Intervalos de operación para los intercambiadores más comunes.....	32
2.4.3. Tabla 3: Comparación entre los intercambiadores de calor más comunes.....	33
2.5. METODOLOGIA DE DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBO Y CORAZA SEGÚN KERN.....	35
2.5.1. Procedimiento General de Diseño.....	35
2.5.2. Cálculo Típico de un Intercambiador de Calor de Carcasa y Tubos.....	37
2.6. REGLAS DE ZIEGLER-NICHOLS PARA LA SINTONÍA DE CONTROLADORES PID.....	42
2.6.1. Control PID de plantas.....	42
2.6.2. Reglas de Ziegler - Nichols para sintonizar controladores PID.....	43
2.6.2.1. Primer método.....	43
2.6.2.2. Segundo método.....	45
2.7. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	47

<b>CAPITULO III: DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR.....</b>	<b>49</b>
---	-----------

3.1.	SITUACIÓN DE DISEÑO.....	50
3.2.	CÁLCULOS PARA EL DISEÑO.....	50
3.2.1.	Balance de Calor para encontrar el flujo másico del fluido calefactor (W).....	50
3.2.2.	Calculo de $\Delta$ LMTD: (Diferencia de $^{\circ}$ T Media Logarítmica).....	51
3.2.3.	Calculo de diferencia Real de $\Delta$ LMTD.....	51
3.2.4.	Datos Previos para cálculo de coraza y Tubos.....	52
3.2.5.	Análisis para la Coraza.....	52
3.2.5.1.	Cálculo del Diámetro Equivalente.....	52
3.2.5.2.	Cálculo del Área de flujo.....	52
3.2.5.3.	Cálculo de Velocidad Másica: $G_s$ .....	53
3.2.5.4.	Cálculo del Número de Reynolds.....	53
3.2.5.5.	Cálculo del Número de Prandtl.....	53
3.2.5.6.	Cálculo del coeficiente de Película.....	53
3.2.5.7.	Cálculo de Fracción Calórica. $F_c$ .....	53
3.2.5.8.	Cálculo de la Temperatura de Pared.....	54
3.2.5.9.	Cálculo de la Viscosidad de la Pared.....	55
3.2.5.10.	Coeficiente de Película Corregido por Viscosidad.....	55
3.2.5.11.	Cálculo de Caídas de Presión en Coraza.....	55
2.5.11.1.	Cálculo de Factor de Fricción (f).....	56

2.5.11.2. Cálculo del número de cruces (N+1).....	56
3.2.6. Análisis para los Tubos.....	57
3.2.6.1. Cálculo de Área de Flujo.....	57
3.2.6.2. Cálculo de Velocidad Másica.....	57
3.2.6.3. Cálculo de Número de Reynolds (Di en pies).....	57
3.2.6.4. Cálculo de Número de Prandtl.....	58
3.2.6.5. Cálculo de Coeficiente de Película.....	58
3.2.6.6. Corrección de Coeficiente de Película por Área (hi corregido).....	58
3.2.6.7. Cálculo de coeficiente Limpio total (Uc).....	58
3.2.6.8. Cálculo de área de Transferencia de Calor (A).....	59
3.2.6.9. Coeficiente Global de Diseño (UD).....	59
3.2.6.10. Cálculo de Factor de Obstrucción (RD).....	59
3.2.6.11. Cálculo de Caídas de Presión en Tubos.....	60
2.6.11.1. Cálculo de Factor de Fricción (f).....	60
3.2.6.12. Cálculo de Pérdidas de Presión por Retorno.....	60
3.2.6.13. Cálculo de Caída de Presión Total del Lado de los Tubos.....	61
3.3. DISEÑO ESTRUCTURAL DE INTERCAMBIADOR DE CALOR (PLANOS EN AUTOCAD).....	62
3.3.1. Plano de Carcaza de Intercambiador de Calor.....	62
3.3.2. Plano de Deflectores de Intercambiador de Calor.....	63

<b>CAPITULO IV: DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL.....</b>	<b>64</b>
4.1. Modelo	
Matemático.....	65
4.2. Calculo de masas de los fluido dentro del intercambiador.....	66
4.2.1. Masa de agua caliente en la coraza.....	66
4.2.2. Masa de agua fría en tubos.....	66
4.2.3. Capacidades Caloríficas.....	67
4.3. Calculo de la Función de Transferencia.....	67
4.4. Simulación en MATLAB del sistema y Determinación del PID.....	69
4.5. Simulación en LABVIEW del Sistema.....	74
4.5.1. Panel de Diagrama Gráfico.....	74
4.5.2. Panel de Diagrama de Bloques.....	75
4.6. Selección de Equipos e Instrumentos de Mini Planta.....	76
4.7. Diseño Estructural de Mini Planta (Autocad).....	81
 <b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	 <b>82</b>
5.1. Conclusiones.....	83
5.2. Recomendaciones.....	84
 <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	 <b>86</b>
 <b>ANEXOS.....</b>	 <b>89</b>
A. Definición de Términos y Conceptos.....	89
B. Tablas para el Diseño del Intercambiador de Calor.....	93

C. Programa para Determinar los Parámetros del PID Utilizando el Método de ZIEGLER NICHOLS.....	107
---	-----

## INTRODUCCION

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño de una mini planta intercambiadora de calor, controlada por un sistema HMI/SCADA para el correcto aprendizaje teórico y procedimientos prácticos de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Actualmente la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo está en una etapa de implementación con lo cual se ha logrado obtener equipos e instrumentos para la capacitación de los estudiantes en las distintas áreas de la electrónica como Telecomunicaciones, Teleinformática y Control de Procesos pero que aún es insuficiente dado la cantidad de alumnos con los que contamos y la falta de presupuesto.

Debido a las competencias de los cursos de control y automatización de la carrera es importante conocer el proceso de generación de vapor e intercambio de calor, por lo que se hace necesario contar con una mini planta para este fin.

La representación de los procesos reales en laboratorio constituye un papel muy importante en la capacitación de los estudiantes para poder responder a las expectativas del mercado laboral en el área de control y automatización.

En el Capítulo I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACION; se presentan los hechos preliminares de la tesis tales como la situación problemática, justificación e importancia de la investigación, objetivos, formulación de la hipótesis y el diseño metodológico.

En el Capítulo II: MARCO TEORICO; de acuerdo a la revisión bibliográfica, se define la base teórica que servirá para el desarrollo y sustento de la investigación, definiendo el diseño estructural de la mini planta y el diseño del sistema de control.

En el Capítulo III: DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR; definimos los parámetros de diseño y evaluación del cumplimiento de los mismos, de acuerdo al procedimiento establecido por Donald Q. Kern.

En el Capítulo IV: DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL, se realiza el diseño y simulación del sistema de control, con el software de programación Labview versión 2015 de la empresa National Instruments.

Se realiza la selección de materiales e instrumentos idóneos para el correcto funcionamiento del sistema, de acuerdo a las características del proceso.

En el Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, mostraremos las razones fundamentales por las que, el desarrollo de nuestro proyecto de investigación es viable y correcto; a su vez, daremos a conocer algunas recomendaciones para su futura implementación.

Finalmente se puede concluir que el trabajo de investigación permite capacitar al alumno en el correcto aprendizaje teórico y procedimientos prácticos; tales como, afianzar sus conocimiento en el desarrollo del diseño de una mini planta intercambiadora de calor.

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal el diseño de una mini-planta intercambiadora de calor, controlada por un sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

El trabajo propuesto incluye el diseño del intercambiador de calor, el diseño estructural de la mini-planta, el diseño y simulación del sistema de control mediante el estudio de metodologías de desarrollo de interfaces, utilizando el software de programación Labview V.2015 de la empresa National Instruments, por el cual se podrá visualizar el comportamiento de los principales elementos del sistema de control; requiriendo para su implementación los equipos e instrumentos siguientes: Variador de Velocidad, Transmisor Indicador de Flujo, Válvula de Control con Posicionador, HMI.

Se concluye que el diseño de una mini-planta intercambiador de calor, controlada por un sistema HMI/SCADA, sirve para la capacitación de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

## **ABSTRACT**

The present work of investigation took as a principal aim the design of a mini-plant heat interchanger, controlled by a system HMI/SCADA, for the training of the pupils of the vocational school of Electronic Engineering of the National University Pedro Ruiz Gallo.

The proposed work includes the design of the heat interchanger, the structural design of the mini-plant, the design and simulation of the system of control by means of the study of methodologies of development of interfaces, using the software of programming Labview V.2015 of the company National Instruments, for which it will be possible visualize the behavior of the principal elements of the system of control; needing for his implementation the equipments and following instruments: Variator of Speed, Warning Transmitter of Flow, Valve of Control with Positioned, HMI.

One concludes that the design of a mini-plant heat interchanger, controlled by a system HMI/SCADA, serves for the training of the pupils of the Vocational school of Electronic Engineering of the National University Pedro Ruiz Gallo.



---

# **ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN**

---

## **CAPITULO I**

### 1.1. ASPECTO INFORMATIVO

#### 1.1.1. Título

Diseño de una Mini Planta intercambiadora de calor controlada por un Sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

#### 1.1.2. Autor

Bach. Marcos Prudencio Flores Sandoval

#### 1.1.3. Asesor

Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera

#### 1.1.4. Área de Investigación

Ingeniería Electrónica – Control de Procesos

#### 1.1.5. Lugar de Ejecución

Laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

#### 1.1.6. Duración estimada

06 Meses

### 1.2. ASPECTO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTIFICA

#### 1.2.1. Situación Problemática

Actualmente la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo está en una etapa de implementación con lo cual se ha logrado obtener equipos e instrumentos para la capacitación de los estudiantes en las distintas áreas de la electrónica como Telecomunicaciones, Teleinformática y Control de Procesos pero que aún es insuficiente dado la cantidad de alumnos con los que contamos y la falta de presupuesto.

En el área de control de procesos contamos con dos mini plantas donde los alumnos realizan las prácticas correspondientes. La primera diseñada para emular un proceso de control de presión y la segunda para un proceso de control de nivel. Ambas cuentan con un PLC, un variador de velocidad, la instrumentación adecuada y el software de control proporcionado por el fabricante.

Debido a las competencias de los cursos de control y automatización de la carrera es importante también conocer el proceso de generación de vapor e intercambio de calor, por lo que se hace necesario contar con una Mini Planta para este fin.

La representación de los procesos reales en laboratorio constituye un papel muy importante en la capacitación de los estudiantes para poder responder a las expectativas del mercado laboral en el área de control y automatización.

### 1.2.2. Antecedentes Bibliográficos

- **WILSON JORGE, VALVERDE CHANCAFE (2013)**

DISEÑO Y SIMULACION DE UN SISTEMA SCADA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE PILADO DE ARROZ EN LA INDUSTRIA MOLINERA SAN LUIS COMOLSA , para obtener el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo – Perú.

En esta tesis se utilizó el software SCADA Intouch versión 10.0.0 de la empresa Wonderware y RSlogix 5000 versión 17.01 de la empresa Rockwell respectivamente. Los materiales e instrumentos para la implementación del sistema SCADA fueron: PLC CONTROLLOGIX 1756 L61, Transmisor ultrasónico de nivel continuo PROXIMITY UL200, Actuadores (Válvula FESTO VSVA/PSVA, Cilindro de doble efecto FESTO DSBC, Regulador automático de caudal FLOW BALANCER MZAH-12, variador de frecuencia POWERFLEX 700).

- **BORJAS ALDAZ RONALD – PAREDES COQUE BYRON (2007)**

Diseño y construcción de un módulo didáctico para el control de nivel de líquidos, para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

El presente trabajo tiene la finalidad de dotar al Laboratorio de Instrumentación de un equipo nuevo con el cual los estudiantes puedan realizar sus prácticas de medición, control y monitoreo de la variable Nivel de agua. Dichas acciones se realizan en un tanque principal, siendo el agua llevada desde un tanque reservorio a través de una tubería instalada para el efecto. El equipo permite controlar el nivel de agua en el tanque principal a través de dos actuadores, una bomba que suministra agua desde el tanque reservorio al principal con caudal constante y una

servoválvula que está ubicada en la parte inferior del tanque principal, es decir, a la salida para que el agua sea retornada al tanque reservorio, formando así un circuito cerrado de agua.

- **EMPRES HI – TECH AUTOMATIZACIÓN S.A.**

Mini-Planta de Malta-Cerveza-Soda

Desarrollado para proveer entrenamiento con visión más práctica en el control de procesos industriales a todas las disciplinas de ingeniería, tales como: Electrónica, Eléctrica, Mecánica, Mecatrónica, Control, Automatización, Industrial, Química, Alimentos, Ambiental, Producción y otras disciplinas técnicas.

Permite realizar prácticas de control simple, realimentado, PID, multi-variable, robusto y otros muchos sistemas de control moderno, avanzado y real; esenciales para programas técnicos, pregrado, posgrado, maestría y doctorado.

Es un sistema didáctico pero real. Instrumentado de acuerdo con sus necesidades para producir cerveza/malta/soda en pequeñas cantidades.

El sistema es modular y puede ser ampliado al número de estaciones de trabajo deseado, permitiendo que varios procesos puedan ser realizados simultáneamente, para atender a mayor número de estudiantes. Por ejemplo, tres grupos pueden trabajar simultáneamente la práctica de nivel sin afectarse entre sí.

Permite practicar los conceptos de:

Múltiples sensores para todo el proceso y acceso a través de borneras.

Sistema abierto conectable con cualquier sistema de control sin importar marca.

Control de Nivel discreto y continuo: con censado con y sin contacto.

Control de Flujo: Con manejo de válvulas proporcionales.

Control de Presión: con sistemas re-circulantes y control de bombeo.

Control de Temperatura: Para temperaturas altas (Calentamiento) y bajas (Refrigeración).

Control de PH: Medición en línea con transmisión de señal, entre otros.

### 1.2.3. Formulación del Problema Científico

¿Cómo realizar el diseño de una Mini Planta intercambiadora de calor controlada por un Sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos

de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo?

### 1.2.4. Objetivos

#### 1.2.4.1. Objetivo general

Diseñar una Mini Planta intercambiadora de calor controlada por un Sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

#### 1.2.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar los sistemas intercambiadores de calor.
- Realizar los cálculos de diseño para el Intercambiador de Calor.
- Plantear el diseño estructural de la Mini Planta.
- Plantear el diseño del sistema de supervisión y control de la mini planta.
- Seleccionar los equipos e instrumentos adecuados para el sistema.
- Simular el diseño del sistema SCADA.

### 1.2.5. Justificación e importancia de la investigación

La implementación parcial del laboratorio de Ingeniería Electrónica, crea una limitación en la formación de los estudiantes de la escuela en sus diferentes áreas de formación, y específicamente en el área de control de procesos tenemos la carencia que no tengamos una mini planta intercambiadora de calor para: (1) Conocer el proceso de intercambio de calor utilizado en diferentes plantas de procesamiento. (2) Realizar las prácticas adecuadas para el control de este proceso.

Por lo tanto el diseño de una Mini Planta intercambiadora de calor para su posterior implementación con los debidos recursos económicos, permitirá reducir nuestras limitaciones existentes logrando que los estudiantes adquieran las habilidades y competencias necesarias para su posterior desempeño laboral.

Además, se trata de mostrar que el equipamiento requerido en el laboratorio no solo puede ser adquirido de un proveedor externo, sino que también puede desarrollarse e implementarse dentro de nuestras instalaciones.

### 1.2.6. Hipótesis

El diseño de una Mini planta intercambiadora de calor controlada por un Sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; servirá para el adiestramiento y capacitación los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la UNPRG.

### 1.2.7. Diseño metodológico.

El procedimiento para la realización del proyecto comprende las siguientes fases:

- Estudio de los sistemas intercambiadores de calor.
- Diseño del sistema intercambiador de calor.
- Diseño del sistema de supervisión y control utilizando Labview 2015.
- Selección de equipos e instrumentos.
- Simulación del sistema.

---

# **MARCO TEÓRICO**

---

## **CAPITULO II**

**2.1. PLANTA DIDÁCTICA (PLANTA PILOTO DIDÁCTICA)**

Una planta piloto es una planta de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, que permita determinar si el proceso es técnico y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial.

Una planta piloto debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación o variables de proceso, ya que una planta industrial opera siempre en las mismas condiciones, mientras que una planta piloto, por el hecho de estar destinada a la investigación o estudio de un proceso, debe permitir trabajar en un amplio rango de valores de temperatura, presión, etc., de manera que puedan realizarse experimentos o ensayos con valores bien distintos de las variables de proceso y poder determinar, así, los valores óptimos.

El desarrollo de la planta piloto está relacionado con una propuesta de enseñanza orientada al desarrollo de competencias. Donde competencia se puede definir como la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales [1].

**2.1.1. TIPOS**

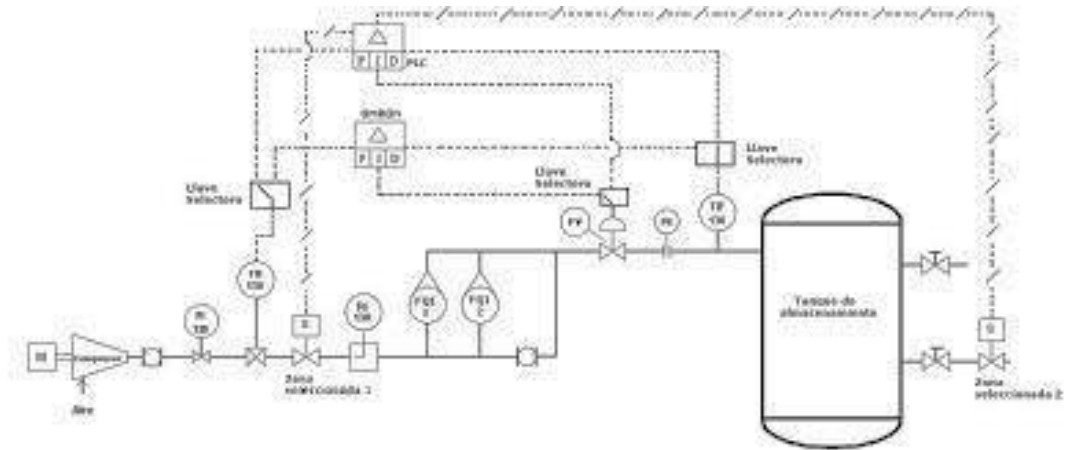
La planta piloto permite el estudio del control de procesos continuos, soliendo ser las variables típicas a medir: presión, temperatura, humedad, flujo, nivel. La planta es fabricada con componentes industriales y comerciales reales, fácilmente identificados por los estudiantes y comúnmente utilizados en plantas industriales.

Las principales áreas que se tratan de refinar mediante la experimentación en planta piloto son relativas a producto, materias primas, reacciones, separación y sistemas auxiliares.

**2.1.1.1. Planta para Presión**

La medición de presión dentro de un proceso es importante ya que nos permite ver cuanta potencia nos puede entregar o que tanto más puede soportar nuestros instrumentos. Un esquema general puede ser el siguiente:



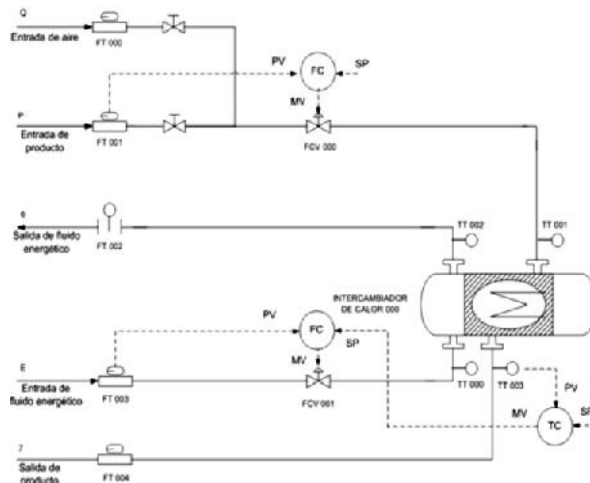


**Figura 1:** Control de Presión de una Caldera

### 2.1.1.2. Planta para Temperatura

Una variable importante en los procesos industriales suele ser la de temperatura, ya que esta puede influir de manera importante en el proceso, causando problemas y hasta accidentes si no se controla de manera adecuada.

Se muestra en la imagen una Mini Planta, que testea la temperatura en el proceso junto a un intercambiador de calor.

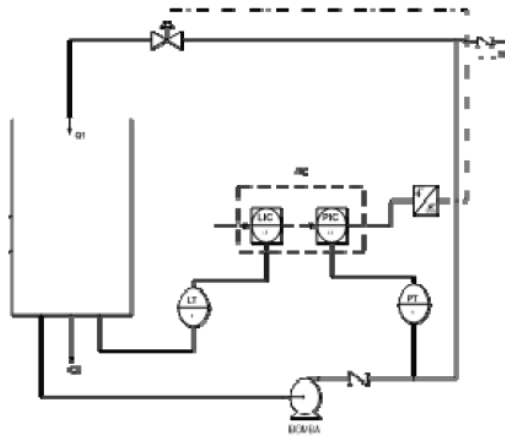


**Figura 2:** Control de Temperatura de Intercambiador de Calor

### 2.1.1.3. Planta para Flujo y Nivel

Es común que cuando se requiera mantener en un nivel determinado algún fluido como por ejemplo el agua, se controle el flujo de agua, tanto de entrada como salida, que pasará al recipiente de almacenaje; es por eso que estas variables suelen medirse juntas.

Un esquema simple de este proceso sería el mostrado a continuación.



**Figura 3:** Control de Nivel por Flujo de un Tanque de Almacenamiento de producto

Las mini plantas pueden combinarse y agregar nuevas variables a medir; ya que pueden emular un proceso industrial, el cual involucra diferentes sistemas dependiendo del proceso.

### 2.1.2. FINALIDAD DE UNA PLANTA PILOTO

En el proceso estudiado, la función principal de la planta piloto será de llevar a cabo la investigación de variables y parámetros físico-químicos que reúnan la información sobre la aplicabilidad de este sistema a nivel industrial; además de que se desarrollarán prácticas de laboratorio de ingeniería química, sobre absorción, adsorción, instrumentación y control, mecánica de fluidos y transferencia de calor, entre otras.

Una vez que se haya concluido el trabajo experimental de planta piloto para el desarrollo del proceso, se desprenderá información sobre:

1. EL diagrama de flujo general del proceso, así como una idea de las áreas donde se podrían presentar dificultades.
2. El grado de eliminación de contaminantes que se espera obtener.
3. Las cantidades de calor que se van a transferir.
4. Los problemas que se presentan en las operaciones de separación.
5. Los materiales de construcción más adecuados.
6. Los costos estimados de construcción y operación de la planta.
7. Parámetros de diseño para discretizar la contaminación de los gases de combustión.
8. Comportamientos de los fenómenos de absorción y adsorción ante los cambios en las condiciones de operación (temperatura, presión, composiciones, flujos).

**2.2. CONTROL****2.2.1. SISTEMAS DE CONTROL**

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ciencia y la ingeniería, resulta esencial su uso en la mayoría de los procesos industriales como control de presión, temperatura, humedad, nivel, etc.

En la actualidad y gracias al avance de la tecnología, se han desarrollado sistemas de control digitales con los cuales se logra un funcionamiento óptimo de los procesos industriales. [2]

**2.2.1.1. Terminología Básica**

- **Señal de salida:** Es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, nivel, etc.). También se denomina variable controlada.
- **Señal de Referencia:** Es el valor que se desea que alcance la señal de salida, también es conocida como punto de ajuste o Set-point.
- **Error:** Es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.
- **Señal de control:** Es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya o se elimine el error.
- **Señal analógica:** Es una señal continua en el tiempo.
- **Señal digital:** Es una señal que solo toma valores de 1 y 0. Un computador solo envía y/o recibe señales digitales.
- **Conversor analógico/digital:** Es un dispositivo que convierte una señal analógica en una señal digital (1 y 0).
- **Conversor digital/analógico:** Es un dispositivo que convierte una señal digital en una señal analógica (corriente o voltaje).
- **Planta:** Es el conjunto de elementos físicos que se desean controlar. Una Planta puede ser: un motor, un horno, un sistema de disparo, un sistema de navegación, un tanque de combustible, etc.
- **Proceso:** Operación que conduce a un resultado determinado.
- **Sistema:** Consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.
- **Sistema de Control en Lazo Cerrado:** Es aquel que utiliza una medida de la señal de salida y una comparación con la salida deseada para generar una señal de error que se aplica al actuador. [2]

Los sistemas de control en lazo cerrado se denominan también sistemas de control realimentados. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

Los sistemas de control realimentados no se limitan a la ingeniería, sino que también se encuentran en diversos campos ajenos a ella. Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema de control realimentado muy avanzado. Tanto la temperatura corporal como la presión sanguínea se conservan constantes mediante una realimentación fisiológica.

- **Sistema de Control en Lazo Abierto (Directo):** Funciona sin retroalimentación y genera directamente la salida en respuesta a una señal de entrada.

En estos sistemas la salida no tiene efecto sobre la acción de control. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Un ejemplo práctico es una lavadora. El remojo, el lavado y el centrifugado en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa.

En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado.

Obsérvese que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo está en lazo abierto. Por ejemplo, el control de tráfico

mediante señales operadas con una base de tiempo es otro ejemplo de control en lazo abierto. [3]

### 2.2.2. SISTEMA SCADA

Un sistema SCADA (Sistema de Control, Supervisión y Adquisición de Datos) es un sistema de control, medición y monitoreo que consiste en una estación maestra (MTU), una o más unidades remotas para control y recolección de datos de campo (RTUs) y un conjunto de paquetes de software usados para monitorear y controlar a los elementos remotamente localizados. Un sistema SCADA provee toda la información que se genera en el proceso productivo a los diversos usuarios.

Un sistema SCADA es usado para controlar y monitorear una planta o equipo, el control puede ser automático o iniciado por comandos del operador. La adquisición de datos es iniciada por las RTUs que hacen un barrido u exploración a alta velocidad de las entradas de campo conectadas a las mismas, posteriormente el MTU hace un barrido de los datos de la RTUs a menor velocidad, de esta manera el dato es procesado.

#### 2.2.2.1. REQUISITOS DE UN SCADA

- Un SCADA debe cumplir con varios objetivos para que su instalación sea perfectamente aprovechada.
- Deben ser sistemas de arquitectura abierta, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes del proceso.
- Debe comunicarse con total facilidad al usuario, con el equipo, y con el resto de la planta (redes locales).
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware y fáciles de utilizar, con interfaces amigables con el usuario.

#### 2.2.2.2. COMPONENTES DE UN SISTEMA SCADA

Básicamente está constituido por los siguientes componentes:

- La estación maestra
- La red de comunicaciones
- Las unidades remotas o PLCs
- La instrumentación de campo

- La interfaz gráfica al operador ( HMI)

### 2.2.2.3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA SCADA

La implantación de un sistema SCADA requiere trabajar a tres niveles dentro del entorno piramidal de automatización integrada, permitiendo el intercambio de información entre los elementos de la propia capa o de niveles inmediatamente superior o inferior.

#### Nivel de supervisión

Aquel que nos permite monitorear el proceso, fijándonos el rendimiento, funcionalidad, entre otros; con lo cual podemos garantizar el correcto funcionamiento.

#### Nivel de control

En este nivel se encuentran todo aquello que controla el proceso como son los PLC, controladores PID, etc.; estos están diseñados para manejar el proceso de manera correcta según convenga.

#### Nivel de Proceso

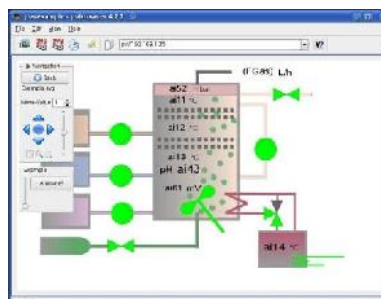
Aquí encontramos a todos los elementos que tienen un contacto directo con el proceso como son los sensores y actuadores, los cuales ejecutan acciones o captan señales que intervienen en el sistema.

### 2.2.2.4. PROGRAMAS PARA ELABORAR SISTEMAS SCADA

Existen diversos programas para elaborar sistemas SCADA, independientes o que vienen asociados a otros programas, algunos son:

#### pvBrowser

Aplicación GPL para monitorización SCADA con interfaz web.



**Figura 4:** Ejemplo de una pantalla en pvBrowser

### FreeSCADA

Aplicación Open source para proyectos SCADA

### Scada Argos

Proyecto de SCADA para Linux

### Scada Factory Talk View SE

Perteneciente a la empresa Rockwell Automation. Tiene arquitectura escalable desde una sola estación HMI a multi-cliente / sistema de multi-servidor. Puede maximizar la disponibilidad del sistema con una función de detección y recuperación de errores en tiempo real y tendencias históricas con conectividad integrada para FactoryTalk Historian



**Figura 5:** Ejemplo de una pantalla en Scada Factory Talk

### Labview

De la empresa National Instruments, es un software con múltiples funcionalidades, que ofrece dos pantallas para trabajar un adonde se realiza la interfaz de usuario y la otra donde enlazamos cada herramienta con otra, definiendo su función.



**Figura 6:** Logo de Labiew

### Wonderware InTouch HMI

Software robusto capaz de realizar monitoreo continuo con gráficos de resolución independiente y símbolos inteligentes.

Sofisticado sistema de scripting para extender y personalizar aplicaciones.



**Figura 7:** Ejemplo de una pantalla en Wonderware InTouch

### Vijeo Designer

De la empresa Schneider Electric, dedicado a la configuración de HMI Magelis, el software Vijeo Designer tiene un rendimiento destacado. Este SCADA es óptimo para el trabajo con los plc de esta empresa como los Modicon.

Innovaciones:

- Visualización de video y función de grabación.
- Vea sus imágenes en tiempo real desde una cámara conectada a Magelis XBT GT/GK y GTW o iPC.
- Codificación/decodificación de sus secuencias con grabación a pedido en formato MPEG en su Magelis XBT GT/GK y GTW, o en formato AVI en su Magelis iPC.



**Figura 8:** Logotipo de Vijeo Designer

### 2.2.3. INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA – HMI

La interfaz principal al operador es el HMI, una pantalla gráfica implementada bajo un determinado software que permite la representación



de la planta o equipo y la visualización de los datos de campo de una manera gráfica, otorgando así un interfaz entre el hombre y la máquina para la interpretación del estado del sistema.

Las características principales con la que debe contar un HMI son:

- Visualización de paneles de alarmas que permitan al operador tener un registro de las acciones que se dan en la planta.
- Históricos de las señales de la planta que puedan ser transferidos para su procesamiento a una hoja de cálculo.
- Ejecución de programas que modifiquen la ley de control o incluso el programa total sobre el autómatas bajo ciertas condiciones. [4]

Dos componentes son necesarios en una interfaz hombre máquina:

- Primero está la entrada, un usuario humano necesita de algún medio para decirle a la máquina que hacer, hacerle peticiones o ajustarla.
- Segundo la interfaz requiere de una salida, que le permita a la máquina mantener al usuario actualizado acerca del progreso de los procesos, o la ejecución de comandos en un espacio físico.

### 2.2.3.1. TIPOS

Interfaz de manipulación directa es el nombre de una clase general de interfaces de usuario, que permiten a los usuarios manipular los objetos que se les presenten, con las acciones que correspondan al menos vagamente con el mundo físico, antiguamente solo consistía en un panel con pulsadores e indicadores analógicos, más actualmente con ayuda de la tecnología, han evolucionado en gran manera.

Los siguientes tipos de interfaz de usuario son los más comunes en la actualidad:

#### **Las interfaces gráficas de usuario (GUI)**

Aceptan la entrada a través de un dispositivo como el teclado de la computadora y el ratón, y proporcionar una salida gráfica en la pantalla del ordenador. Hay por lo menos dos principios diferentes utilizados en el diseño de interfaz gráfica de usuario: Interfaces de usuario orientada a objetos (OOUIs) e Interfaces orientadas a aplicaciones.

### **Interfaces de usuario web (IUF),**

Subclase de interfaces gráficas de usuario que aceptan una entrada y proporcionar una salida mediante las páginas web que se transmiten a través de internet y vistos por el usuario mediante un navegador web.

### **Las pantallas táctiles**

Dispositivos que aceptan una entrada a través del tacto de los dedos o un lápiz. Se utiliza en una amplia cantidad de dispositivos móviles y muchos tipos de punto de venta, procesos industriales y máquinas, máquinas de autoservicio, etc.

### **Las interfaces de línea de comandos**

El usuario proporciona la entrada al escribir una cadena de comando con el teclado del ordenador y el sistema proporciona una salida de impresión de texto en la pantalla del ordenador. Utilizado por los programadores y administradores de sistemas, en los ambientes científicos y de ingeniería, y por los usuarios de computadoras personales de tecnología avanzada.

### **Las interfaces de voz del usuario**

Acepta la entrada y proporcionar una salida mediante la generación de mensajes de voz. La entrada del usuario se realiza pulsando las teclas o botones, o responder verbalmente a la interfaz.

### **Multi-pantalla de interfaces**

Empleo de múltiples pantallas para proporcionar una interacción más flexible. Esto se emplea a menudo en la interacción de juegos de ordenador, tanto en las galerías comerciales y, más recientemente, etc. [5]

## **2.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR [7]**

### **2.3.1. DEFINICIÓN**

Bajo la denominación general de intercambiadores de calor, o simplemente cambiadores de calor, se engloba a todos aquellos dispositivos

utilizados para transferir energía de un medio a otro, sin embargo, en lo que sigue se hará referencia única y exclusivamente a la transferencia de energía entre fluidos por conducción y convección, debido a que el intercambio térmico entre fluidos es uno de los procesos más frecuente e importante en la ingeniería.

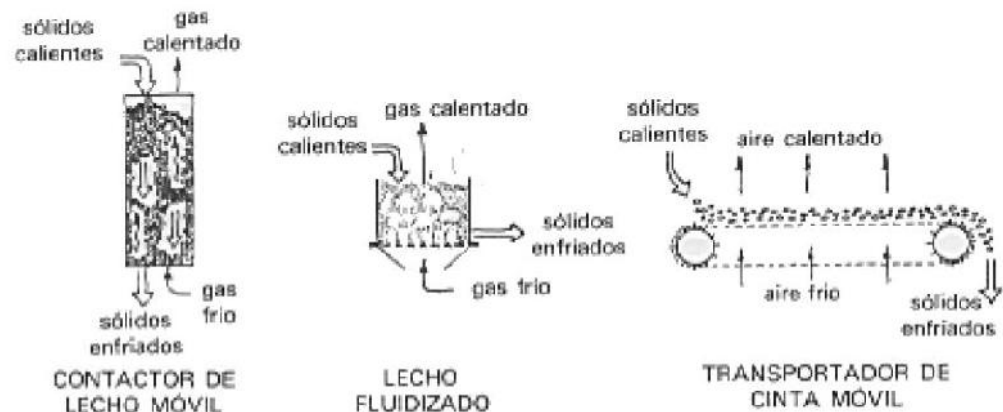
Un intercambiador de calor es un dispositivo que facilita la transferencia de calor de una corriente fluida a otra

## 2.3.2. CLASIFICACIÓN

### 2.3.2.1. De Acuerdo al Proceso de Transferencia

#### 2.3.2.1.1. De Contacto Directo

En este tipo de intercambiador, el calor es transferido por contacto directo entre dos corrientes en distintas fases (generalmente un gas y un líquido de muy baja presión de vapor) fácilmente separables después del proceso de transferencia de energía; como ejemplo se tienen las torres de enfriamiento de agua con flujo de aire. El flujo de aire puede ser forzado o natural.



**Figura 9:** Intercambiadores de contacto directo gas-líquido sin almacenamiento de calor



**Figura 10:** Intercambiadores de contacto directo fluido-fluido sin almacenamiento de calor

### 2.3.2.1.2. De Contacto Indirecto

En los intercambiadores de tipo contacto indirecto, las corrientes permanecen separadas y la transferencia de calor se realiza a través de una pared divisora, o desde el interior hacia el exterior de la pared de una forma no continua. Cuando el flujo de calor es intermitente, es decir, cuando el calor se almacena primero en la superficie del equipo y luego se transmite al fluido frío, se denominan intercambiadores tipo transferencia indirecta, o tipo almacenador o sencillamente regenerador. La intermitencia en el flujo de calor es posible debido a que el paso de las corrientes tanto caliente como fría es alternado; como ejemplo pueden mencionarse algunos precalentadores de aire para hornos. Aquellos equipos en los que existe un flujo continuo de calor desde la corriente caliente hasta la fría, a través de una delgada pared divisora son llamados intercambiadores tipo transferencia directa o simplemente recuperadores; éstos son los más usados a nivel industrial.

### 2.3.2.2. De Acuerdo a los Mecanismos de Transferencia de Calor

Los mecanismos básicos de transferencia de calor entre un fluido y una superficie son:

- Convección en una sola fase, forzada o libre.
- Convección con cambio de fase, forzada o libre: condensación ó ebullición.
- Una combinación de convección y radiación.

Cualquiera de estos mecanismos o una combinación de ellos pueden estar activo a cada lado de la pared del equipo. Por ejemplo, convección en una sola fase se encuentra en radiadores de automóviles, enfriadores, refrigeradores, etc. Convección monofásica de

un lado y bifásica del otro se puede encontrar en evaporadores, generadores de vapor, condensadores, etc. Por su parte la convección acompañada de radiación térmica juega un papel importante en intercambiadores de metales líquidos, hornos, etc.

### 2.3.2.3. De Acuerdo al Número de Fluidos Involucrados

La mayoría de los procesos de disipación o recuperación de energía térmica envuelve la transferencia de calor entre dos fluidos, de aquí que los intercambiadores de dos fluidos sean los más comunes, sin embargo, se encuentran equipos que operan con tres fluidos. Por ejemplo, en procesos criogénicos y en algunos procesos químicos: separación aire-helio, síntesis de amonio, etc.

### 2.3.2.4. De Acuerdo a la Disposición de los Fluidos

La escogencia de una disposición de flujo en particular depende de la eficiencia de intercambio requerida, los esfuerzos térmicos permitidos, los niveles de temperatura de los fluidos, entre otros factores. Algunas de las disposiciones de flujo más comunes son:

#### 2.3.2.4.1. Intercambiadores de Calor de Paso Único

Se distinguen tres tipos básicos:

##### a) Flujo en Paralelo o Cocominente

En este tipo ambos fluidos entran al equipo por el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y salen por el otro extremo. Las variaciones de temperatura son idealizadas como unidimensionales.

Termodinámicamente es una de las disposiciones más pobres, sin embargo, se emplea en los siguientes casos: cuando los materiales son muy sensibles a la temperatura ya que produce una temperatura más uniforme; cuando se desea mantener la misma efectividad del intercambiador sobre un amplio intervalo de flujo y en procesos de ebullición, ya que favorece el inicio de la nucleación.

##### b) Flujo en Contraminente o Contraflujo

En este tipo los fluidos fluyen en direcciones opuestas el uno del otro. Las variaciones de temperatura son idealizadas como

unidimensionales Esta es la disposición de flujo termodinámicamente superior a cualquier otra.

### c) Flujo Cruzado

En este tipo de intercambiador, los flujos son normales uno al otro. Las variaciones de temperatura son idealizadas como bidimensionales.

Termodinámicamente la efectividad de estos equipos es intermedia a las dos anteriores.

#### 2.3.2.4.2. Intercambiadores de Calor de Pasos Múltiples

Una de las ventajas de los pasos múltiples es que mejoran el rendimiento total del intercambiador, con relación al paso único. Pueden encontrarse diferentes clasificaciones de acuerdo a la construcción del equipo: Paralelo-cruzado, contracorriente-paralelo, contracorriente-cruzado y combinaciones de éstos.

#### 2.3.2.5. De Acuerdo a la Compactación de la Superficie

De acuerdo a la relación superficie de transferencia de calor a volumen ocupado, los equipos también pueden ser clasificados como compactos o no compactos. Un intercambiador compacto es aquel cuya relación superficie a volumen es alta, mayor de  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ( $213 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ ) valor que es arbitrario. Las ventajas más resaltantes de un intercambiador compacto son los ahorros de material, espacio ocupado (volumen) y costo, pero tienen como desventajas que los fluidos deben ser limpios, poco corrosivos y uno de ellos, generalmente, en estado gaseoso.

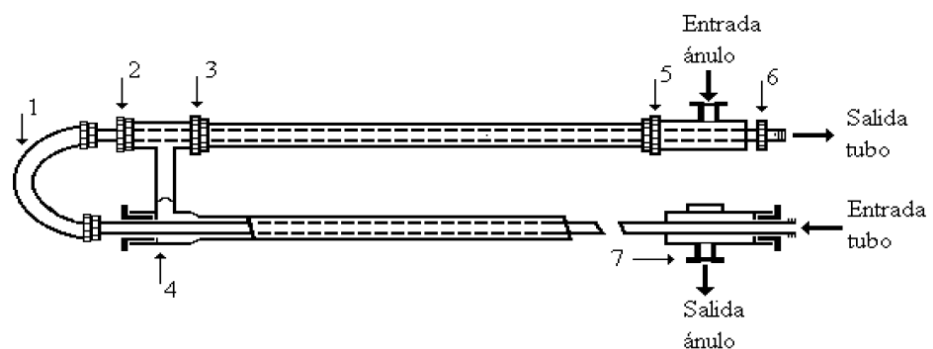
#### 2.3.2.6. De Acuerdo al Tipo de Construcción

De los diversos tipos de intercambiadores de calor, los más importantes y más usados a nivel industrial son:

##### 2.3.2.6.1. Intercambiador de Doble Tubo

Este es uno de los diseños más simples y consiste básicamente de dos tubos concéntricos, en donde una corriente circula por dentro del tubo interior mientras que la otra circula por el ánulo formado entre los tubos. Este es un tipo de intercambiador cuya construcción es fácil y económica, lo que lo hace muy útil.

Las partes principales de este tipo de intercambiador (Figura 11) son dos juegos de tubos concéntricos, dos "T" conectoras [7], un cabezal de retorno [4] y un codo en "U" [1]. La tubería interior se soporta mediante estóperos, y el fluido entra a ella a través de una conexión localizada en la parte externa del intercambiador. Las "T" tienen conexiones que permiten la entrada y salida del fluido que circula por el ánulo y el cruce de una sección a la otra a través de un cabezal de retorno. La tubería interior se conecta mediante una conexión en "U" que generalmente se encuentra expuesta al ambiente y que no proporciona superficie efectiva de transferencia de calor.



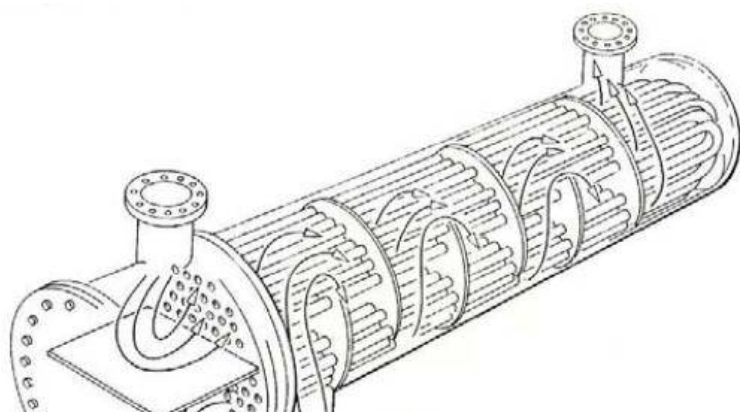
**Figura 11:** Intercambiador de calor de doble tubo

1-Codo. 2, 3, 5, 6-Prensa estopa. 4-Cabezal de retorno. 7-Tee.

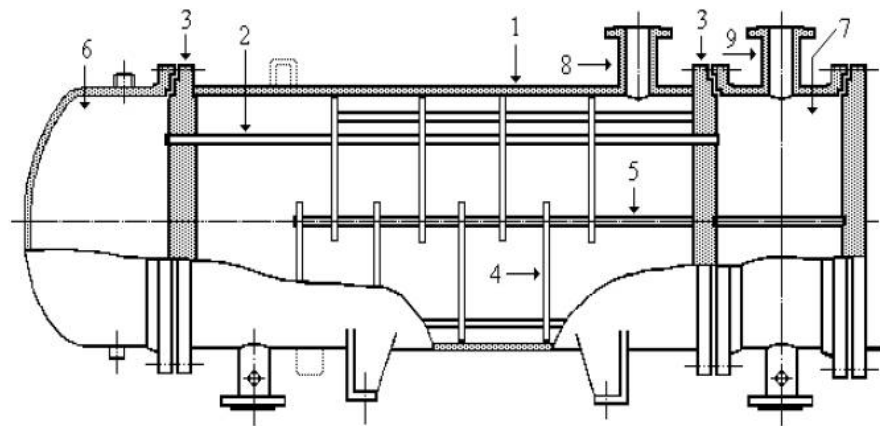
### 2.3.2.6.2. Intercambiadores de Tubo y Carcaza ó de Tubo y Coraza

De los diversos tipos de intercambiadores de calor, éste es el más utilizado en las refinerías y plantas químicas en general debido a que:

- a) Proporciona flujos de calor elevados en relación con su peso y volumen.
- b) Es relativamente fácil de construir en una gran variedad de tamaños.
- c) Es bastante fácil de limpiar y de reparar.
- d) Es versátil y puede ser diseñado para cumplir prácticamente con cualquier aplicación.



**Figura 12:** Intercambiador de calor de coraza y tubos de dos pasos por tubos y un paso por coraza. El primer paso por tubos se efectúa en flujos paralelos y el segundo en flujo a contracorriente



**Figura 13:** Intercambiador de tubo y coraza.

1-Carcasa. 2-Tubos. 3-Placa de tubos. 4-Deflectores. 5-Deflector longitudinal. 6-Cabezal posterior. 7-Cabezal fijo. 8-Boquilla de la coraza. 9-Boquillas para los tubos.

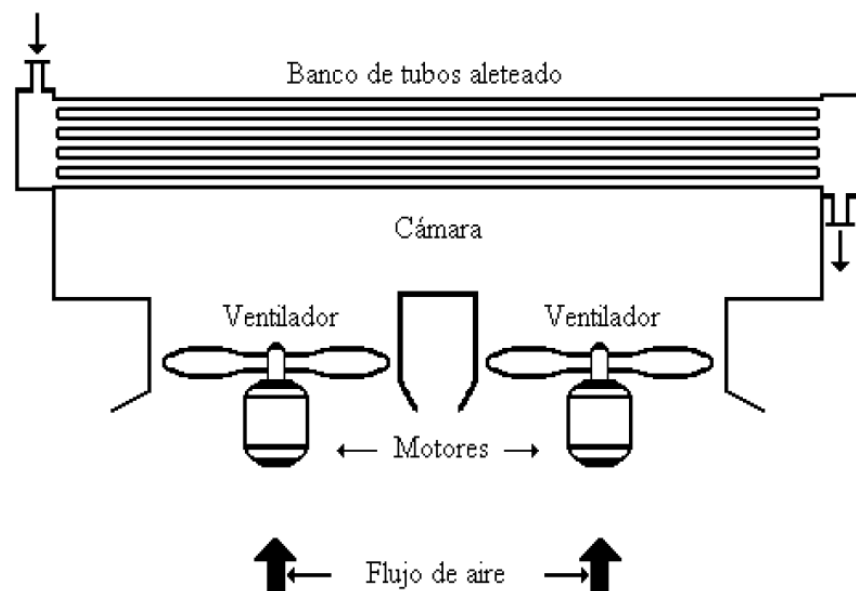
Este tipo de equipo (Figura 13) consiste en una carcasa cilíndrica [1] que contiene un arreglo de tubos [2] paralelo al eje longitudinal de la carcasa. Los tubos pueden o no tener aletas y están sujetos en cada extremo por láminas perforadas [3]. Estos atraviesan a su vez a una serie de láminas denominadas deflectores (baffles) [4] que al ser distribuidas a lo largo de toda la coraza, sirven para soportar los tubos y dirigir el flujo que circula por la misma, de tal forma que la dirección del fluido sea siempre perpendicular a los tubos. El fluido que va por dentro de los tubos es dirigido por unos ductos especiales conocidos como cabezales o canales [6 y 7].



Hay dos tipos básicos de intercambiadores de tubo y carcasa: El de tipo fijo o de tubos estacionario, que tiene los dos extremos de los tubos fijos a la carcasa, y el que tiene un sólo extremo de los tubos sujeto a la coraza. En el primer caso, se requiere de una junta de dilatación debido a la expansión diferencial que sufren los materiales que conforman el equipo. En el segundo caso los problemas originados por la expansión diferencial se pueden eliminar empleando un cabezal de tubos flotantes que se mueve libremente dentro de la coraza o empleando tubos en forma de U en el extremo que no está sujeto.

### 2.3.2.6.3. Intercambiadores Enfriados por Aire y Radiadores

Son equipos de transferencia de calor tubulares en los que el aire ambiente al pasar por fuera de un haz de tubos, actúa como medio refrigerante para condensar y/o enfriar el fluido que va por dentro de los mismos (Figura 14). Comúnmente se le conoce como intercambiadores de flujo cruzado debido a que el aire se hace soplar perpendicularmente al eje de los tubos.



**Figura 14:** Intercambiador de Flujo

Consisten en un arreglo rectangular de tubos, usualmente de pocas filas de profundidad, donde el fluido caliente es condensado y/o enfriado en cada tubo al soplar o succionar aire a través del haz

mediante grandes ventiladores. Debido a que el coeficiente de transferencia de calor del aire es bajo, es usual que los tubos posean aletas para aumentar la superficie de transferencia de calor del lado del aire. Las filas de tubos generalmente se encuentran colocadas en arreglo escalonado de modo de incrementar los coeficientes de transferencia del aire. Una pequeña versión de estos intercambiadores son los radiadores usados en los sistemas de enfriamiento de los vehículos y en las unidades de aire acondicionado.

Los enfriadores de aire ocupan un área relativamente grande por lo que generalmente se ubican encima de equipos de proceso (tambores, intercambiadores, etc.). Como los ventiladores son generalmente muy ruidosos, no pueden instalarse cerca de áreas residenciales. Al diseñar estos equipos se debe tomar en cuenta el efecto de las pérdidas de calor de los equipos circundantes sobre la temperatura del aire de entrada, así como, tener mucho cuidado para que cumplan con los requerimientos de servicio aún en días calurosos y/o que el fluido no se congele dentro de los tubos en invierno.

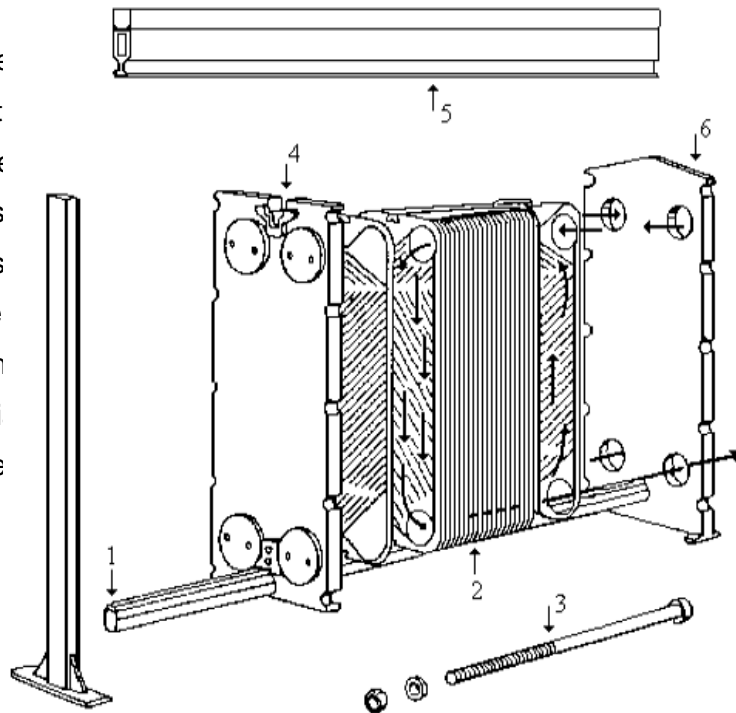
El aire en vez del agua, podría parecer una elección obvia a la hora de seleccionar un refrigerante, ya que se encuentra en el ambiente en cantidades ilimitadas. Desafortunadamente, el aire es un medio de transferencia de calor pobre en comparación con el agua, la que posee una conductividad térmica cerca de 23 veces mayor que el aire a 35 °C; el calor específico del agua es cuatro veces más grande y su densidad, comparada con la del aire a presión y temperatura atmosférica es unas 800 veces mayor. En consecuencia, para una determinada cantidad de calor a transferir, se requiere de una mayor cantidad de aire, aproximadamente 4 veces más en masa y 3200 en volumen. Como conclusión, a menos que el agua sea inasequible, la elección entre agua y aire como refrigerante depende de muchos factores y se debe evaluar cuidadosamente antes de tomar una decisión. Por lo general, este tipo de intercambiadores se emplea en aquellos lugares donde se requiera de una torre de enfriamiento para el agua o se tenga que ampliar el sistema de agua de enfriamiento, donde sean muy estrictas las restricciones ambientales en cuanto a los efluentes de

agua ó donde el medio refrigerante resulte muy corrosivo o provoque taponamientos excesivos.

#### 2.3.2.6.4. Intercambiadores de Placas Empacas (PHE)

A pesar de ser poco conocido, el intercambiador de placas, llamado también PHE por sus siglas en inglés: Plate Heat Exchanger, tiene patentes de finales del siglo XIX, específicamente hacia 1870, pero no fue sino hasta los años 30 que comenzó a ser ampliamente usado en la industria láctea por razones sanitarias. En este tipo de intercambiadores las dos corrientes de fluidos están separadas por placas, que no son más que láminas delgadas, rectangulares, en las que se observa un diseño corrugado, formado por un proceso de prensado de precisión (Figura 15). A un lado de cada

perímetro de estas placas se encuentran los fluidos paralelos en esquinas apropiadas para el canalamiento de su flujo. Los dos fluidos, a los cuales, se les asigna los números 1 y 2, fluyen en direcciones opuestas, lo que se conoce como flujo contracorriente. El diagrama muestra la estructura general del intercambiador, con las placas corrugadas y los canales de entrada y salida. Las etiquetas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 indican componentes y flujos específicos.



**Figura 15:** Intercambiador de placas empacadas (PHE)

1-Barra de soporte. 2-Conjunto de placas y empacaduras. 3-Perno para compresión. 4-Cubierta móvil. 5-Barra de soporte. 6-Cubierta fija.

Las placas son corrugadas en diversas formas, con el fin de aumentar el área superficial efectiva de cada una; provocar turbulencia en el fluido mediante continuos cambios en su dirección y velocidad, lo que a su vez redundaría en la obtención de altos coeficientes de transferencia de calor, aún a bajas velocidades y con moderadas caídas de presión. Las corrugaciones también son esenciales para incrementar la resistencia mecánica de las placas y favorecer su soporte mutuo.

Estos equipos son los más apropiados para trabajar con fluidos de alta viscosidad y tienen como ventaja adicional, el ser fácilmente desmontables para labores de mantenimiento. No obstante, las condiciones de operación se encuentran limitadas por las empacaduras. En los primeros equipos la presión máxima era de 2 bar (0,2 Mpa) y la temperatura alrededor de 60 °C. Pero a pesar de que el diseño básicamente ha permanecido inalterado, los continuos avances en los últimos 60 años han incrementado las presiones y temperaturas de operación hasta los 30 bar (3 Mpa) y 250 °C, respectivamente. Es importante destacar que la elección del material de las empacaduras se vuelve más restringida a altas temperaturas, lo que en consecuencia reduce el número de fluidos que pueden ser manejados por estos equipos bajo esas condiciones; además la vida útil de la unidad depende, en gran medida, del rendimiento de las empacaduras. Inicialmente, este tipo de equipos era usado en el procesamiento de bebidas y comidas, y aunque todavía retienen su uso en el área alimenticia, hoy en día son usados en una amplia gama de procesos industriales, llegando inclusive, a reemplazar a los intercambiadores de tubo y carcasa.

Una variante de los PHE se consigue si las placas son soldadas juntas en los bordes, lo que previene las fugas a la atmósfera y permite el manejo de fluidos peligrosos. Un equipo construido de esta forma, se le conoce como intercambiador de

placas no empacadas, y tienen como desventaja el no poder ser abierto para labores de mantenimiento, por lo que las labores de limpieza deben ser realizadas por métodos químicos. No obstante, las demás ventajas de las unidades de placas se mantienen. El diseño particular de este equipo permite alcanzar las presiones de operación que se manejan en los equipos tubulares convencionales, tales como tubo y carcaza, enfriados por aire y doble tubo. Sin embargo, todavía existe una limitación en cuanto al diseño, en la que la diferencia de presión entre ambos fluidos no debe exceder los 40 bar.

### 2.4. GUIA PARA LA SELECCION DEL MEJOR TIPO DE INTERCAMBIADOR [6]

La mejor guía para la selección del tipo de intercambiador de calor a usar, es la experiencia basándose en equipos similares operando en condiciones semejantes. No obstante, si no se posee experiencia previa, deben ser tomados en cuenta los siguientes factores:

- Si la presión de operación está por debajo de 30 bar y la temperatura de operación por debajo de 200 °C, los intercambiadores de placas deben ser tomados en consideración, particularmente el de placas empacadas.
- A altas temperaturas y presiones, la elección debe estar entre uno de tubo y carcaza, de placas no empacadas y de doble tubo.
- El de doble tubo es particularmente competitivo para aplicaciones que involucran pequeñas capacidades de transferencia de calor y altas presiones.
- En la Tabla 1 se muestra un resumen de los diferentes tipos de intercambiadores de calor tratados en este Tema.
- En la Tabla 2 y en la Tabla 3 se comparan los intercambiadores más comunes, mostrando las ventajas y desventajas de cada uno.

2.4.1. **Tabla1:** Características de los intercambiadores de calor.

Características constructivas	Aplicaciones
Los tubos dentro de una carcasa cilíndrica, con deflectores para generar turbulencia y los tubos. El arreglo de tubos es paralelo al eje longitudinal de la carcasa y puede estar fijo o ser flotante. Tubos internos lisos o aleteados.	Multiuso. Prácticamente se amolda a cualquier servicio, por lo general es el primer intercambiador que se considera en una determinada aplicación
Tubos soportados por una estructura sobre la que se pasa el aire en forma cruzada. Los tubos pueden ser lisos o poseer aletas	Se emplean mucho cuando el costo del agua es elevado o cuando se requiere de una torre de enfriamiento para el agua.
Tubos concéntricos en forma de "U" u horquilla. El tubo interno puede ser liso o poseer aletas	Condensación o enfriamiento de fluidos, sistemas de enfriamiento de vehículos.
Alaminas corrugadas separadas entre sí por tiras.	Se utilizan cuando se requieren áreas de transferencia de calor pequeñas (100 a 200 ft <sup>2</sup> ). Son muy útiles en operaciones a altas presiones.
Alaminas corrugadas separadas entre sí y soldadas en sus bordes.	Muy utilizado en la industria alimenticia, sobre todo con fluidos viscosos. Cuando se requieren condiciones sanitarias extremas.
Alaminas metálicas enrolladas una sobre la otra en forma helicoidal	Manejo de fluidos viscosos y sobre todo peligrosos o a altas presiones.
Alaminas metálicas enrolladas una sobre la otra en forma helicoidal	No presentan problemas de expansión diferencial. Muy empleados en servicios criogénicos y cuando se manejan fluidos muy viscosos, lodos o líquidos con sólidos en suspensión (industria del papel).

Tabla 1: Características de los intercambiadores de calor (continuación).

Características constructivas	Aplicaciones
Intercambio de láminas separadas por aletas corrugadas.	Intercambio gas-gas o gas-líquido. El fluido que va por la parte de las aletas debe ser limpio y poco corrosivo.
Intercambio de tubos concéntricos, provistos de cuchillas raspadoras ubicadas en la pared externa del tubo y las cuales sirven para limpiar la superficie de intercambio de calor.	Muy utilizada cuando se opera con fluidos que se solidifican o cristalizan al enfriarse.
Intercambio de tubos concéntricos. El tubo interno se utiliza para el fluido al ánulo localizado entre el tubo y el interno.	Se emplea, generalmente, cuando hay una diferencia de temperatura entre el fluido de los tubos y el del ánulo, sumamente elevada.
Intercambio de tubos en tubos verticales por dentro de los cuales se hace circular agua en forma de película.	Enfriamientos especiales
Intercambio de tubos metálicos sumergidos en un recipiente que contiene el fluido a enfriar.	Enfriamientos de emergencia
Intercambio de tubos donde se produce el contacto directo entre el fluido a enfriar y el fluido que enfría.	Se emplean cuando no se mezclan el agua y el fluido de proceso a enfriar
Intercambio de tubos a agua sobre una serie de tubos que contienen el fluido a enfriar.	Para enfriar fluidos de proceso muy corrosivos
Intercambio de tubos construidos con grafito.	Se emplean en servicios altamente corrosivos

2.4.2. Tabla 2: Intervalos de operación para los intercambiadores más comunes.

a	Presión máxima de operación (kPa)	Superficie de intercambio de calor (m <sup>2</sup> )	Observaciones
	35.000	5 a 1000	Versátil. Se usa para casi cualquier aplicación, independientemente de la tarea a realizar, temperatura y presión. Limitaciones de tipo metalúrgico.
	3.000	1 a 1.200	Alta eficiencia térmica, flexible, bajo ensuciamiento, compacto, bajo peso, sin vibración, fácil mantenimiento. El material de la empacadura puede limitar el tipo de fluido de trabajo. Usualmente es la unidad más barata para unas condiciones de operación dadas.
	35.000	hasta 10.000	Es una alternativa a los intercambiadores de tubo y coraza y los PHE sin empacaduras, siempre y cuando se pueda realizar una limpieza química sin dificultad. Su uso está limitado por la diferencia de presión entre los dos fluidos (entre 4.000-8.000 kPa, dependiendo del tipo del fluido)
	20	0,5 a 350	Alta eficiencia térmica, bajo ensuciamiento, fácil mantenimiento. Puede manejar suspensiones, barros y líquidos fibrosos.



2.4.3. **Tabla 3:** Comparación entre los intercambiadores de calor más comunes.

Tubo y coraza	PHE	SHE
Altos coeficientes globales de transferencia de calor para $Re > 100$ .	Altos coeficientes globales de transferencia de calor para $Re > 10$ .	
	Baja	Media
	Muy grande	Mediana
	Bajos	Altos
Facil de inspeccionar, carcaza química muy buena y aceptable o por los tubos. Limpieza mecánica prácticamente imposible. Reparaciones fáciles.	Completamente accesible para inspección, limpieza química y manual. Fácil reemplazo de todas sus partes.	La inspección varía de buena a pobre. Limpieza química muy buena. Limpieza mecánica varía de buena a pobre. Reparación pobre.
Requiere de un espacio considerable y además un espacio amplio para mantenimiento.	Ligeras y ocupan poco espacio. No requieren de espacio adicional para mantenimiento.	Ligeras y ocupan menos espacio que tubo y carcaza.
5 °C.	Hasta 1 °C.	No especificado.

Tabla 3: Comparación entre los intercambiadores de calor más comunes (continuación).

Tubo y coraza	PHE	SHE
No tiene restricciones específicas.	32 a 66 °C usando empaaduras de caucho.  -40 a 127 °C usando empaaduras de asbesto comprimido.	No tiene restricciones específicas.
Baja.	Alta (hasta 100 veces mayor que la de tubo y carcasa).	Media.
Dependiendo del diseño.	Generalmente de 0,1 a 1,6 Mpa, pudiendo llegar hasta 2,5 Mpa.	Alrededor de 2 Mpa.
Intercambio de calor líquido-líquido.	Intercambio de calor líquido-líquido. Calentamiento de vapores a baja presión (menores a 450 kPa).	Intercambio de calor en gases a altas temperaturas.
Calentamiento de vapores.		Rehervidores.
Condensación.	Plantas de enfriamiento en corrientes de procesos.	Condensadores.
Rehervidores de baja a media viscosidad y bajo ensuciamiento.	Operación con fluidos muy corrosivos, de cualquier viscosidad o con ensuciamiento medio. Para expansiones programadas.	Bajas presiones (menos de 1.100 kPa).  Opera con fluidos de cualquier viscosidad y fluidos muy sucios.

### 2.5. METODOLOGIA DE DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBO Y CORAZA SEGÚN KERN [6][8]

Conocidas las condiciones de proceso de los fluidos tales como: temperaturas de entrada y salida, flujos másicos, caídas de presión permitidas y factores de ensuciamiento, damos inicio al diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubo. El diseño de un intercambiador de calor consiste en un conjunto sistemático de cálculos de suposiciones y pruebas, mediante comparación con parámetros preestablecidos como lo son el área de intercambio de calor y caída de presión permisibles para cada fluido en el lugar respectivo de circulación. Si la comparación no resulta satisfactoria en base a ciertos criterios que se establecerán en una sección posterior, se debe iniciar una nueva prueba cambiando algunos parámetros supuestos inicialmente como por ejemplo coeficiente de diseño, número de pasos por los tubos, tamaño de carcasa, espaciado entre los deflectores y otros.

En el diseño de un intercambiador de calor, es importante conocer el efecto que producen las variables que intervienen en el, tales como dimensiones, arreglos de tubo, espaciado entre los deflectores, velocidades másicas, las que producen cambios en los coeficientes de transferencia de calor individuales y globales, repercutiendo en forma directa sobre el área de transferencia de calor del equipo.

Conocer los cambios que introducen las variables de diseño sobre este, permite reducir tiempo considerable en el método de prueba y error que será aplicado para estimar el intercambiador necesitado para un servicio en particular. Iniciando los

tanteos en base a recomendaciones de tipo práctico y modificando las variables según criterios a exponer se consigue en pocas pruebas el diseño solicitado.

### 2.5.1. PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO

En el diseño de un intercambiador de calor, las incógnitas existentes son el coeficiente global de transferencia de calor ( $U_o$ ) y el área de transferencia de calor.

Si se supone un valor de  $U_o$  obtenido según valores dados para combinaciones de las sustancias más comunes en experiencias, se puede obtener un primer valor de prueba del área. Combinando el valor del área con una longitud, diámetro interno y arreglo de tubos se puede determinar el tamaño de una carcasa que servirá de prueba en el diseño.

Luego de determinar el lugar de circulación de los fluidos en base a recomendaciones dadas se elige un número de pasos de prueba para los tubos.

Los mayores números de pasos producen mayores coeficientes de transferencia de calor acompañados de mayores caídas de presión en los tubos. Las pruebas del número de pasos en los tubos pueden iniciarse comenzando por los mayores valores tratando de situar la velocidad másica entre 750.000 Lb/h y 1.500.000 Lb/h para fluidos con una caída de presión permisible de 10 Psi. Un número de pasos por los tubos supuesto satisfactoriamente conduce a un valor del coeficiente de transferencia de calor del lado de los tubos  $h_i$  mayor que el valor del  $U_o$  supuesto y la caída de presión no excederá la permitida para el fluido en cuestión.

Si el número de pasos es incorrecto, la caída de presión es mayor que la tolerada y será necesario disminuir el número de pasos al inmediato inferior, seleccionando un nuevo número de tubos y efectuando el cálculo correspondiente una vez más.

Una alternativa que existe cuando para una carcasa dada ninguno de los pasos permite una caída de presión razonable, es disminuir o aumentar el tamaño de la carcasa e iniciar el tanteo con el número de pasos nuevamente. Entendiéndose por caída de presión no razonable aquella demasiado pequeña (inferior a 0,5 psi) o aquella que supere los 10 psi, que es lo considerado económicamente razonable.

Satisfechos los requerimientos de caída de presión para el lado de los tubos el cálculo se desplaza hacia el lado de la carcasa. Se inicia la prueba asumiendo un espaciado entre los deflectores (B) que puede variar en un

amplio rango  $1/5 D_i < B < D_i$  siendo  $D_i$ , el diámetro interno de la carcasa. El cálculo se puede iniciar partiendo del menor de los espaciados  $1/5 D_i$ , que origina mayor turbulencia produciendo mayores coeficientes de transferencia de calor a expensas de mayor caída de presión.

Mientras menor es el corte de los deflectores, mayor es la turbulencia provocada, mayores son los coeficientes de transferencia de calor y mayores son las caídas de presión en la carcasa. La experiencia ha demostrado que cortes de 25% dan coeficientes bastante altos con valores moderados de caídas de presión.

Es recomendable no operar con las condiciones extremas del espaciado de deflectores, ya que distancias muy cortas pueden producir excesivas fugas entre los deflectores y la carcasa, y muy amplias tienden a convertir el flujo en axial en lugar de a través del haz de tubos lo que disminuirá el coeficiente de transferencia de calor.

El espaciado de los deflectores se revisa mediante el cálculo de la caída de presión. Cuando se consigna un espaciado que satisfaga la caída de presión, se procede a estimar el coeficiente de transferencia de calor para la carcasa. Se evalúa el coeficiente de transferencia de calor  $U_o$  requerido por el problema haciendo uso del factor de obstrucción combinado para las dos corrientes de fluido. Se determina el área de transmisión requerida y se procede a compararla con el área disponible de acuerdo al tipo de arreglo seleccionado.

Si el área disponible es superior al área requerida en más del 15% se ha supuesto un coeficiente  $U_o$  muy bajo y debe aumentarse. Puede aumentarse seleccionando el tamaño de carcasa inmediato inferior e ir disminuyéndolo gradualmente o tomar el  $U_o$  requerido por el problema en el último cálculo, disminuirlo entre 5% y 10% e iniciar de nuevo el cálculo.

Si el exceso de área está ubicado entre un 10% y 15% y se requiere bastante proximidad a las temperaturas de proceso se puede variar un poco más los baffles separándolos hasta alcanzar solo un exceso de área inferior al 10%. Al espaciar los deflectores el coeficiente de transferencia de calor por que se aproxima al área disponible.

Si el área requerida por el problema es superior al área disponible se ha supuesto un UD muy alto. Se amplía la carcasa al tamaño inmediato superior o se disminuye el valor del UD obtenido en el problema entre 5% y 10% según la deficiencia del área y se evalúa de nuevo el problema hasta que sea

satisfactoria la condición impuesta al área. Si el área obtenida es solo inferior en 10% a la requerida, el problema está terminado.

Todo el planteamiento hecho para la estimación del intercambiador apropiado al servicio exigido, debe conducir al intercambiador más pequeño posible que cumpla con los requerimientos antes expuestos.

### 2.5.2. CALCULO TIPICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS

El diseño de un intercambiador de calor o asociación de varios de estos en serie, se deben seguir en forma sistemática el orden de cálculo a presentar.

- 1º. Especificar las condiciones de proceso de los fluidos como temperaturas de entrada y de salida, flujos másicos, caídas de presión toleradas a cada fluido y factores de obstrucción.
- 2º. Empleando las condiciones de proceso para cada fluido, se determina el calor específico a la temperatura media de cada uno y se determina el calor a transferir.
- 3º. Se determina la diferencia de temperatura media logarítmica, LMTD.
- 4º. Se determina el factor F de corrección de la LMTD para un arreglo 1-2. Si es menor a 0,75 se determina para arreglos 2-4, 3-6, 4-8, 5-10, y así sucesivamente hasta encontrar el que supere 0,75. De acuerdo al arreglo satisfactorio se determina el arreglo de intercambiador a usar en el diseño.
- 5º. Se determinan las temperaturas de diseño para cada fluido. Se determina la viscosidad de los fluidos a  $T_{ci}$  y  $T_{ho}$  (terminal frio), el rango de enfriamiento o calentamiento de cada uno y la diferencia de temperatura entre los mismos en cada extremo del intercambiador. Si se cumple que:
  - La viscosidad para ambos fluidos es inferior a 1cP
  - El rango de temperatura esta entre 50 y 100°F
  - La diferencia de temperatura en los extremos es inferior a 50°F

Se pueden aproximar las temperaturas de diseño del intercambiador a las temperaturas medias de cada fluido y el factor  $\Phi$  de corrección puede asumirse como la unidad para fluido no viscoso. En caso contrario deben evaluarse las temperaturas calóricas.

- 6º. Si se fijan las características de los tubos o se siguen las recomendaciones dadas por el problema en particular para algún tipo específico de tubos.

Teniendo presente el espacio que puede ocupar el intercambiador, se recomienda el empleo de longitudes grandes de tubos como 16 o 20 pies, así como un arreglo en el cabezal de tubos de tipo triangular.

Si se han de fijar las características del tubo, se recomienda iniciar las pruebas con tubos de diámetros pequeños como  $\frac{3}{4}$ " de diámetro externo y aumentarlo si es necesario, siempre y cuando el fluido no sea muy corrosivo o presente características de ensuciamiento en cuyo caso se recomiendan diámetros externos mayores como 1", 1  $\frac{1}{4}$ " o 1  $\frac{1}{2}$ " para condiciones muy severas en cuanto a deposición de sólidos con formación de incrustaciones.

Estas recomendaciones conducen a obtener altos coeficientes de transferencia de calor, que se traducen en una reducción del área de transferencia y consecuentemente en la economía de costo y mantenimiento del equipo. Si el arreglo supuesto conduce a caídas de presión muy elevadas se procede a aumentar el diámetro o la longitud a cambiar el arreglo por un tipo cuadrado.

- 7º. Se procede a la selección del coeficiente total de transferencia de calor  $U_o$  como primera prueba. Se supone un valor tentativo de  $U_o$  de la Tabla 1, asumiendo el más alto posible para garantizar un área mínima.

En esta tabla aparecen combinaciones para las sustancias más comunes en el intercambio calórico en el lado de los tubos y en la carcasa, basadas en datos experimentales. Para el uso de la tabla los compuestos orgánicos de acuerdo a su viscosidad se clasifican así:

- Livianos:  $\mu < 0.5 \text{ cP}$
- Medios:  $0.5 \text{ cP} < \mu < 1 \text{ cP}$
- Pesados:  $\mu > 1 \text{ cP}$

- 8º. Mediante la ecuación de diseño, se determina el área de transferencia de calor. Con el diámetro externo y la longitud del tubo seleccionada se calcula el número de tubos para iniciar el tanteo por intercambiador.

- 9º. Se determina el sitio de circulación para cada fluido en base a los criterios recomendados.

10°. Debe asumirse un número de pasos por los tubos para cada intercambiador igual para todo arreglo si existe más de un intercambiador.

Puede asumirse el número más alto posible de pasos y chequear en forma rápida que la velocidad másica no exceda 1.500.000 Lb/h.pie<sup>2</sup> fijando el que cumpla esta restricción. Un alto número de pasos conduce a altos coeficientes de transferencia de calor.

11°. Con el número de tubos aproximado calculado anteriormente, el número de pasos supuesto y el arreglo de tubos fijado se determina en las tablas correspondientes el número más cercano de tubos al anterior que puede ser superior o inferior.

Este será el número de tubos supuesto por cada intercambiador asociado al arreglo si existe. De esta forma queda seleccionado un tamaño de carcasa de prueba.

12°. Se determina el área de intercambio calórico por intercambiador en base al número de tubos y longitud de los mismos antes hallada. Se calcula el área total del arreglo si existe o del intercambiador solo, y se evalúa el coeficiente de diseño nuevo o el valor corregido del supuesto inicialmente.

### **Calculo del lado de los tubos:**

13°. Se determina el área de flujo por intercambiador y numero de pasos por los tubos. Se calcula la velocidad másica correspondiente.

14°. Se determinan el calor específico, la viscosidad y la conductividad térmica para el fluido que circula por los tubos a la temperatura calórica o media (según sea el caso). Se determina el número de Reynolds en los tubos.

15°. Se determina el valor del coeficiente de transferencia de calor del lado de los tubos,  $h_i$ , asumiendo inicialmente que el factor de corrección de viscosidades es igual a la unidad lo que luego será comprobado.

El coeficiente obtenido se corrige para el área referida al diámetro exterior.

Si el valor de  $h_{io}$  es relativamente mayor que el valor del  $U_o$  corregido se procede a determinar la caída de presión en los tubos. En caso de ser  $h_{io}$  menor que el  $U_o$  corregido debe aumentarse el área de transferencia supuesta disminuyendo  $U_o$ . Puede aumentarse el área aumentando el tamaño de la carcasa al inmediato superior e iniciar de



nuevo la prueba con la suposición del número de pasos hasta satisfacer esta condición.

### **Calculo del lado de la carcasa:**

- 16°. Se supone un espaciado de deflectores acotado entre  $1/5 \cdot D_i < B < D_i$  el diámetro interno de la carcasa, teniendo en cuenta que los menores espaciados entre deflectores producen mayores coeficientes de transferencia de calor pero también mayores caídas de presión. El cálculo se puede iniciar con  $1/5 \cdot D_i$  e ir aumentándolo hasta que se cumpla con la caída de presión impuesta al fluido en la carcasa.
- 17°. Se evalúa el área de flujo a través del banco de tubos para un intercambiador de un solo paso en la carcasa bien sea uno o varios asociados en serie. Para un intercambiador 2-4 el flujo será la mitad por la presencia del baffle longitudinal. Se evalúa la velocidad másica del fluido.
- 18°. Se determinan el calor específico, la viscosidad y la conductividad térmica para el fluido que circula en la carcasa a la temperatura calórica o media (según sea el caso), y se determina el número de Reynolds para la carcasa.
- 19°. Se calcula la caída de presión en la carcasa. Se asume que el factor de corrección de viscosidades es similar a la unidad para luego corregirse. Para un arreglo del tipo 2-4, el número de cruces ( $N+1$ ) será el doble al estar colocados los baffles arriba y abajo del deflector longitudinal. Para un arreglo en serie el número de cruces será el número de cruces por intercambiador por el número de intercambiadores asociados en serie.  
  
Si la caída de presión es superior al valor impuesto al fluido en la carcasa (10 psi usualmente) se procede a ampliar el espaciado de los baffles hasta que sea satisfactorio. De ser las caídas de presión muy elevadas se puede cambiar el corte de deflectores de 25% a 35% o 45% según sea el caso.
- 20°. Se determina el valor del coeficiente de transferencia de calor del lado de la carcasa,  $h_o$ ; asumiendo inicialmente que el factor de corrección de viscosidades es igual a la unidad, lo que luego será comprobado.
- 21°. Para el primer chequeo del área en exceso sobre la requerida se puede prescindir del cálculo de la temperatura de la pared para evaluar los factores de corrección de viscosidades y corregir los coeficientes. De esta manera se está seguro de que la solución es correcta. Si el área

en exceso cumple los requisitos o se está efectuando la segunda prueba se determinan las temperaturas de la pared correspondientes. Si estas difieren apreciablemente de la temperatura de diseño de los fluidos, media o calórica, se determinan los factores de corrección evaluando la viscosidad de cada fluido a la temperatura de pared correspondiente y se corrigen los coeficientes de transferencia de calor.

Recuerde que esto implica un proceso iterativo hasta que se logre la convergencia en cada una de las temperaturas de pared correspondientes.

22°. Se determina el coeficiente el valor del coeficiente global de transferencia de calor  $U_o$  empleando los factores de obstrucción para cada corriente.

23°. Mediante la ecuación de diseño se evalúa el área requerida por el problema y se compara con el área disponible calculada en base al número de tubos, longitud y diámetros elegidos. Se presentan dos casos:

- a) Si el área requerida es superior a la disponible se ha supuesto un valor de  $U_o$  muy alto y debe disminuir aumentando el tamaño de la carcasa al inmediato superior; o de una forma un poco más rápida disminuyendo el  $U_o$  supuesto anteriormente en un 5% aproximadamente y repitiendo el cálculo.
- b) Si el área disponible es superior a la requerida se tiene que:
  - Si el área en exceso es inferior al 10%, el problema se considera terminado.
  - Si el área en exceso está ubicada entre un 10% y 15% y las condiciones de proceso exigen una buena cercanía de temperaturas de salida pueden espaciarse los baffles para aumentar el área requerida hasta que el exceso del área sea inferior al 10%. Si se requiere mucha aproximación se procede a reducir el tamaño de la carcasa al inmediato inferior calculando de nuevo el intercambiador, en caso contrario se puede dar por terminado el problema.
  - Si el porcentaje de exceso del área es superior al 15% se disminuye el tamaño de la carcasa al inmediato inferior en la tabla correspondiente al arreglo elegido, o se toma el valor de  $U_o$

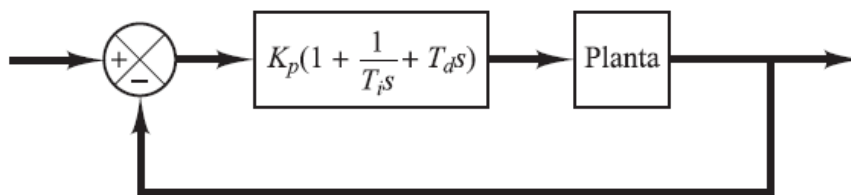
obtenido en la última prueba y se disminuye en un 5% o 10% aproximadamente y se inicia de nuevo el cálculo.

24º. Cumplidos todos estos requisitos el intercambiador diseñado es el apropiado para el servicio deseado.

## 2.6. REGLAS DE ZIEGLER-NICHOLS PARA LA SINTONÍA DE CONTROLADORES PID [3]

### 2.6.1. CONTROL PID DE PLANTAS

En la Figura 16 se muestra un control PID de una planta. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.



**Figura 16:** Control PID de una planta

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador.

Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de  $K_p$  que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, que se presentan a continuación, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. (Por supuesto, estas reglas se pueden aplicar al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos.) Tales reglas sugieren un conjunto de valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que darán una operación estable del sistema. No obstante, el sistema resultante puede presentar una gran sobre elongación en su respuesta escalón de forma que resulte no aceptable. En tales casos se necesitará una serie de ajustes finos hasta que se obtenga el resultado deseado. De hecho, las reglas de sintonía de Ziegler-

Nichols dan una estimación razonable de los parámetros del controlador y proporcionan un punto de partida para una sintonía fina, en lugar de dar los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  en un único intento.

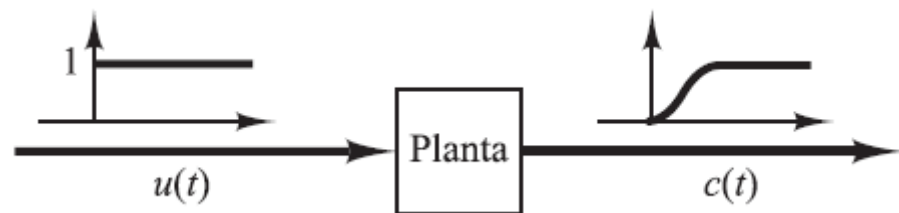
### 2.6.2. REGLAS DE ZIEGLER - NICHOLS PARA SINTONIZAR CONTROLADORES PID

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , del tiempo integral  $T_i$  y del tiempo derivativo  $T_d$ , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols han aparecido numerosas reglas de sintonía de controladores PID. Estas reglas están disponibles tanto en publicaciones técnicas como de los fabricantes de estos controladores.)

Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación se hace una breve presentación de estos dos métodos.

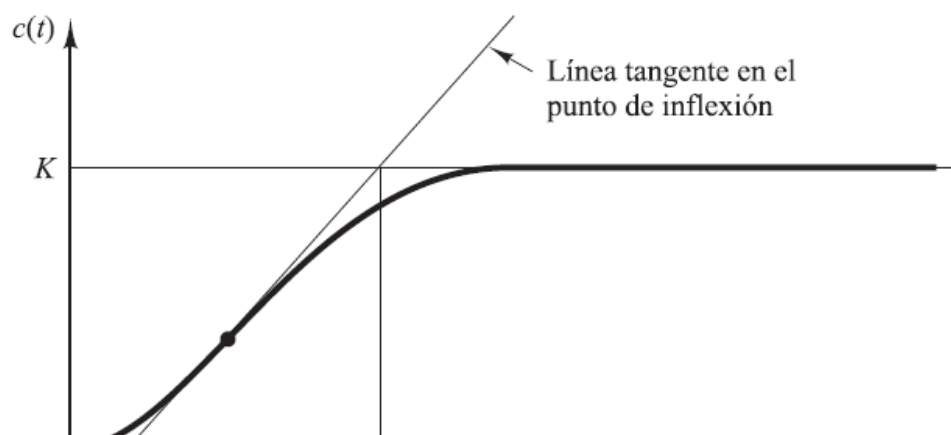
#### 2.6.2.1. PRIMER MÉTODO

En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, tal como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16:** Respuesta a un escalón unitario de una planta

Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la Figura 17.



**Figura 17:** Curva de respuesta en forma de S

Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo  $T$ . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea  $c(t) = K$ , tal como se muestra en la Figura 18. En este caso, la función de transferencia  $C(s)/U(s)$  se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

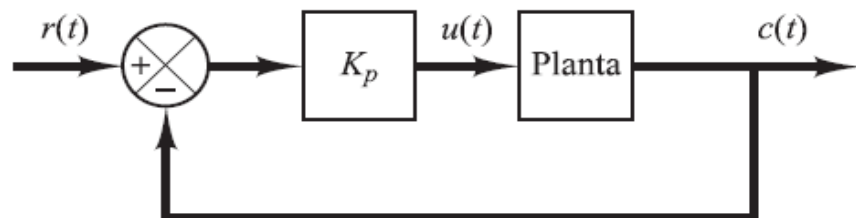
Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= 1.2 \frac{T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\ &= 0.6T \frac{\left( s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \end{aligned}$$

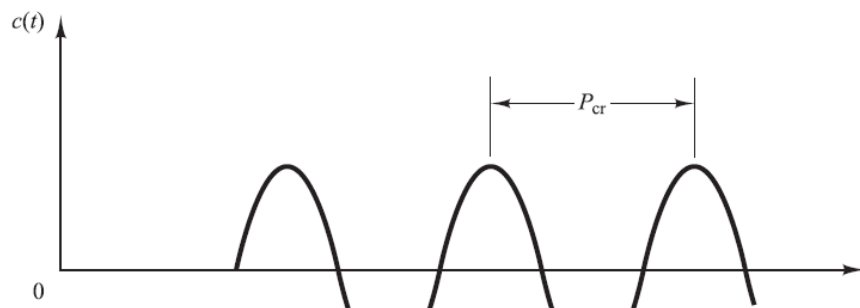
Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en  $s = 1/L$ .

### 2.6.2.2. SEGUNDO MÉTODO

En el segundo método, primero se fija  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . Usando sólo la acción de control proporcional (véase la Figura 19), se incrementa  $K_p$  desde 0 hasta un valor crítico  $K_{cr}$ , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$ , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo  $P_{cr}$  correspondiente se determinan experimentalmente (véase la Figura 19).



**Figura 18:** Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional



**Figura 19:** Oscilación sostenida con periodo  $P_{cr}$  ( $P_{cr}$  en seg.)

Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica  $K_{cr}$  y periodo crítico  $P_{cr}$  (segundo método).

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

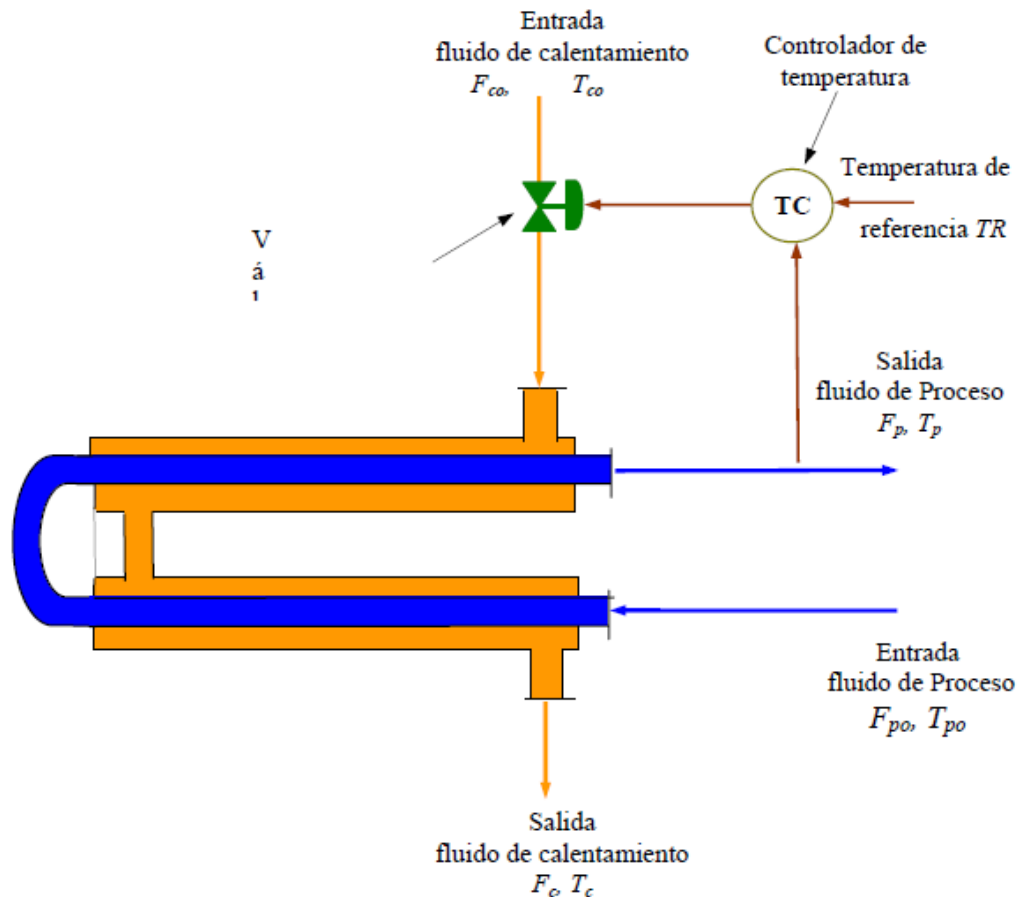
$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right) \\
 &= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left( s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en  $s = -4 / P_{cr}$ .

Conviene darse cuenta de que, si el sistema tiene un modelo matemático conocido (como la función de transferencia), entonces se puede emplear el

método del lugar de las raíces para encontrar la ganancia crítica  $K_{cr}$  y las frecuencias de las oscilaciones sostenidas  $\omega_{cr}$ , donde  $2\pi/\omega_{cr} = P_{cr}$ . Estos valores se pueden determinar a partir de los puntos de cruce de las ramas del lugar de las raíces con el eje  $j\omega$ . (Obviamente, si las ramas del lugar de las raíces no cortan al eje  $j\omega$  este método no se puede aplicar.)

## 2.7. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR [9]



**Figura 20:** Sistema de control de un Intercambiador de Calor

Para ilustrar el modelamiento del proceso, consideraremos el caso de control de temperatura en un intercambiador de calor de doble tubo. En un sistema de intercambio de calor, generalmente se tiene como objetivo calentar (o enfriar) un fluido de proceso hasta una temperatura determinada  $T_p$  (de salida) para ser alimentado a una etapa posterior en el proceso, para cumplir con este objetivo se debe usar una corriente de fluido de calentamiento (o enfriamiento) el cual debe operar en un rango de temperaturas entre la entrada  $T_{co}$  y la salida  $T_c$  y a una velocidad de flujo  $F_c$ , la cual depende de los requerimientos del proceso.

Si el objetivo del proceso de transferencia de calor es el calentamiento (o enfriamiento) de la corriente de proceso, el objetivo del sistema de control es



mantener la temperatura de salida de la corriente de proceso en un valor especificado o en estado estacionario ante cualquier perturbación que pueda alterar el proceso.

Con lo expuesto anteriormente podemos establecer que la variable controlada es la temperatura de salida del fluido de proceso ( $T_p$ ), y la variable manipulada es la velocidad de flujo del fluido de calentamiento ( $F_c$ ). Las perturbaciones pueden presentarse debido a cambios en la temperatura de entrada ( $T_{po}$ ), la velocidad de flujo ( $F_p$ ) del fluido de proceso, variación de temperatura del medio ambiente, resistencias a las incrustaciones, etc.

Para el sistema de control del intercambiador de calor dado en la Figura 20, tenemos:

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

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

donde  $T_c$  = temperatura de salida del fluido caliente  
 $T_{co}$  = temperatura de entrada del fluido caliente  
 $T_p$  = temperatura de salida del fluido de proceso (variable que se va a controlar)  
 $T_{po}$  = temperatura de entrada del fluido de proceso  
 $F_c$  = flujo de masa del fluido caliente (variable que se va a manipular)  
 $F_p$  = flujo de masa del fluido de proceso  
 $U$  = coeficiente total de transferencia de calor  
 $A$  = área de transferencia de calor  
 $\Delta T$  = diferencia verdadera de temperaturas  
 $C_{p_c}$  = capacidad calorífica del fluido caliente  
 $C_{p_p}$  = capacidad calorífica del fluido de proceso  
 $M_c$  = masa del fluido caliente dentro del intercambiador  
 $M_p$  = masa del fluido de proceso dentro del intercambiador  
 $t$  = tiempo

**Nota:** Estos parámetros están calculados en el Capítulo III: Diseño de Intercambiador de Calor.

---

# **DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA**

---

## **CAPITULO III**

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

#### 3.1. SITUACIÓN DE DISEÑO

- Se necesita calentar agua fría proveniente de un proceso simulado a 60 lt/min de 25 ° C a 75 ° C. Utilizando como fluido calefactor también agua cuya temperatura inicial y final será 90 y 50 ° C respectivamente.
- Considerando las dimensiones del laboratorio donde operará dicho equipo. Se asumirán ciertos datos técnicos como dimensiones de tubos y coraza, espesores, diámetros, etc, basados en tablas de diseño de intercambiadores.
- A través de la metodología desarrollada por Donald Q. Kern en su libro Procesos de Transferencia de calor. Demostraremos que las dimensiones asumidas son técnicamente correctas para ofrecer el intercambio de calor deseado en el proceso.

Esto se demuestra cuando calculando las caídas de presión en coraza y tubos estos están dentro del rango permisible.

$$\Delta P_s < 10 \text{ psi}$$

#### 3.2. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO

##### 3.2.1. Balance de Calor para encontrar el flujo másico del fluido calefactor (W).

$$Q = W \cdot Cp \cdot (T_1 - T_2) = w \cdot cp \cdot (t_2 - t_1)$$

$$w = 9900,18 \text{ [lb/h]}$$

Cp, μ, k de Fluido Calefactor para Δt= 70 °C = 158 °F

Cp, μ, k de Fluido a Calentar para Δt= 50 °C = 122 °F

Dónde: ΔT: Promedio de temperaturas inicial y final de fluidos.

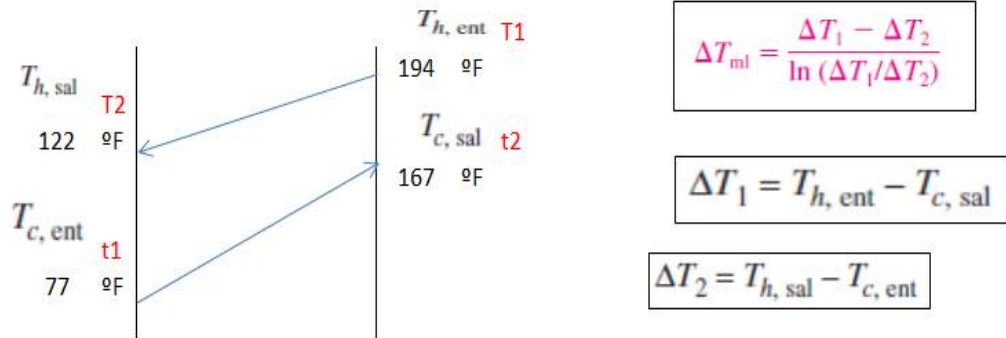
Tabla N°1: Datos de Situación de diseño.

Parámetros	Símbolo	Fluido Calefactor				Fluido a Calentar			
Temperatura Inicial	T1	90	°C	194	°F	25	°C	77	°F
Temperatura final	T2	50	°C	122	°F	75	°C	167	°F
Flujo Másico	W	9900,18		[lb/h]		7936,8		[lb/h]	
Calor Específico	Cp	1,0007		[Btu/lb.h]		0,9986		[Btu/lb.h]	
Viscosidad	μ	0,9770		[lb/pie.h]		1,323		[lb/pie.h]	
Coeficiente de Conductividad	k	0,383		[Btu/h.pie.°F]		0,372		[Btu/h.pie.°F]	

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

- En azul: Datos de situación de diseño y de tablas de características físicas del agua. (Ver Tablas 1,2 y 3 de anexo B)
- En rojo: Resultado del balance de calor.

#### 3.2.2. Cálculo de $\Delta$ LMTD: (Diferencia de ° T Media Logarítmica)



$$\Delta t_h = \Delta T_1 = 27 \text{ °F} \quad \text{Lado Caliente}$$

$$\Delta t_c = \Delta T_2 = 45 \text{ °F} \quad \text{Lado Frio}$$

$$\Delta \text{LMTD} = 35,24 \text{ °F}$$

#### 3.2.3. Cálculo de diferencia Real de $\Delta$ LMTD:

- Cálculo de R:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

$$R = 0,800$$

- Cálculo de S

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$S = 0,769$$

- Del Gráfico N°1 del Anexo B: Factores de Corrección MLDT para intercambiadores 3-6 (Figura 20 de Kern)

$$F_T = 0,895$$

Por lo tanto:

$$\Delta T = F_T \cdot \Delta \text{LMTD}$$

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

$$\Delta T = 31,54$$

#### 3.2.4. Datos Previos (Libro de transferencia de calor de Kern) para cálculo de coraza y Tubos:

- De la Tabla N°4 del Anexo B (Tabla 9 de Libro de Kern) extraemos:
  - Diámetro interno en pulgadas.
  - Nº de Tubos.
  - Tipo de Arreglo.
  - Nº de pasos en los tubos.

	Parámetros	Símbolo	Dimensiones	Pulgadas	Pies	Centímetros
DATOS DE LA CORAZA	Diámetro Interno	Di = DI		15,25	1,27	38,74
	Espacio entre deflectores	B		por determinar		
	Nº de pasos		3			
DATOS DE TUBOS	Longitud			40	3,33	101,60
	Nº de Tubos		68			
	Diámetro Externo	De = Do		1	0,083	2,54
	BWG		13			
	Tipo de Arreglo		Cuadro			
	Nº de pasos		6			

Parámetros	Símbolo	Pulgadas	Pies	Centímetros
Espacio entre tubos	C'	0,250	0,021	0,64
Espacio entre Deflectores	B=Di/5	3,050	0,254	7,75
Distancia entre centro de Tubos	PT	1,250	0,104	3,18

#### 3.2.5. Análisis para la Coraza

##### 3.2.5.1. Cálculo del Diámetro Equivalente

$$De = 4 \cdot \frac{(P_T^2 - \pi \cdot D_o^2 / 4)}{\pi \cdot D_o}$$

$$De = 0,0825 \text{ pie}$$

##### 3.2.5.2. Cálculo del Área de flujo

$$a_s = \frac{DI \cdot C' \cdot B}{P_T}$$

$$a_s = 0,065 \text{ pie}^2$$

#### 3.2.5.3. Cálculo de Velocidad Másica: $G_s$

$$G_s = \frac{W}{a_s}$$

$$G_s = 153251,92 \text{ [lb/pie}^2\text{.h]}$$

#### 3.2.5.4. Cálculo del Número de Reynolds

Para continuar con el análisis el número de Reynolds debe cumplir con la condición de ser mayor a 2100 para asegurar que estamos en un régimen turbulento.

$$Re_s = \frac{D_e \cdot G_s}{\mu}$$

$$Re_s = 12933,56$$

$$\Rightarrow 12933,56 > 2100 \quad \text{REGIMEN TURBULENTO}$$

Por lo tanto continuamos con nuestro análisis.

#### 3.2.5.5. Cálculo del Número de Prandtl

$$Pr = \left( \frac{C_p \cdot \mu}{k} \right)$$

$$Pr = 2,55$$

#### 3.2.5.6. Cálculo del coeficiente de Película

$$h_o = 0,36 \cdot \frac{k}{D_e} \cdot \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)^{0,55} \cdot \left( \frac{C_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3}$$

$$h_o = 417,26 \text{ [Btu/h.pie}^2\text{.}^\circ\text{F]}$$

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

#### 3.2.5.7. Cálculo de Fracción Calórica. Fc

1º Determinamos Kc

$$K_c = \frac{U_2 - U_1}{U_1} = \frac{U_h - U_c}{U_c}$$

$$K_c = [(1/\Delta t_h) - (1/\Delta t_c)] / (1/\Delta t_c)$$

$$K_c = 0,67$$

2º Determinamos  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h}$

$$\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 1,67$$

3º Del Gráfico N° 2 del anexo B. (Figura 17 del Kern)

$$F_c = 0,5$$

#### 3.2.5.8. Cálculo de la Temperatura de Pared

$$t_w = t_c + \frac{h_o}{h_{io} + h_o} \cdot (T_c - t_c)$$

Tc: Temperatura calórica del lado caliente.

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2)$$

$$T_c = 158$$

tc: Temperatura calórica del lado frío.

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1)$$

$$t_c = 122$$

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

$T_1, T_2$ : Temperatura de entrada y salida del fluido caliente.

$t_1, t_2$ : Temperatura de entrada y salida del fluido frío.

Fc: Fracción calórica, adimensional.

hio: proviene de los cálculos en paralelo en los tubos.

$$h_{io} = 291,22$$

Por lo tanto:

La temperatura de pared es:

$$t_w = 143,20 \text{ } ^\circ\text{F}$$

#### 3.2.5.9. Cálculo de la Viscosidad de la Pared

Del Gráfico N° 3 del anexo B. (Figura 14 del Kern)

$$\mu_w = 0,50$$

#### 3.2.5.10. Coeficiente de Película Corregido por Viscosidad

$$h_{o\text{corregido}} = h_o \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

$$h_{o\text{corregido}} = 458,28 \text{ [Btu/h.pie}^2\text{.}^\circ\text{F]}$$

#### 3.2.5.11. Cálculo de Caídas de Presión en Coraza:

Para este cálculo necesitamos realizar algunas operaciones previas:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5.22 \cdot 10^{10} \cdot De \cdot S \cdot (\mu / \mu_w)^{0,14}}$$



Donde:

f: Factor de fricción (de Figura 29 de Kern)

G<sub>s</sub>: Velocidad Másica

D<sub>s</sub>: Diámetro Interno de la Coraza

N+1 Numero de cruces

De: Diámetro Externo de la coraza

p<sub>s</sub>: Gravedad Especifica del Agua

#### 3.2.5.11.1. Cálculo de Factor de Fricción (f)

De acuerdo al valor del N° de Reynolds hallado nos ubicamos en la Figura N° 4 del anexo B (Fig. 29 de Kern).

⇒ Para:

$$Re_s = 12933,56$$

Tenemos:

$$f = 0,0021$$

#### 3.2.5.11.2. Calculo del número de cruces (N+1)

$$N + 1 = \frac{12 \cdot L}{B}$$

Donde:

L: longitud del tubo

B: Espacio entre deflectores

$$N + 1 = 157,38$$

Una vez reunidos los datos previos:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5.22 \cdot 10^{10} \cdot De \cdot S \cdot (\mu / \mu_w)^{0,14}}$$

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

$$\Delta P_s = 5,446 \text{ [lb/plg}^2\text{]} \quad (\text{psi})$$

Valor permisible de diseño:  $\Delta P_s < 10$

$$5,446 < 10 \text{ psi}$$

Por lo tanto: El diseño es correcto

#### 3.2.6. Análisis para los Tubos

De la Tabla N° 7 del anexo B (Tabla 10 del Kern), extraemos los datos para los tubos para un BWG #13:

	Parámetros	Símbolo	Pulgadas <sup>(2)</sup>	Pies <sup>(2)</sup>
DATOS DE TUBOS	Longitud		40	3,33
	Area de flujo por tubo	$a'_t$	0,515	0,00358
	Superficie Exterior del tubo	A		0,26180
	Diámetro Externo	$De = Do$	1	0,083
	Diámetro Interno	$Di$	0,81	0,068

##### 3.2.6.1. Cálculo de Área de Flujo

$$a_t = \frac{N_t \cdot a'_t}{144 \cdot n} = \frac{\text{Número de tubos} \cdot \text{área de flujo por tubo}}{144 \cdot \text{Número de pasos}}$$

$$a_t = 0,0405 \text{ pie}^2$$

##### 3.2.6.2. Cálculo de Velocidad Másica

$$G_t = \frac{W}{a_t}$$

$$G_t = 195813,68 \text{ [lb/pie}^2\text{.h]}$$

##### 3.2.6.3. Cálculo de Número de Reynolds ( $Di$ en pies)

$$Re_t = \frac{D_i \cdot G_t}{\mu}$$

$$Re_t = 9990,49$$

$$\Rightarrow 9990,49 > 2100 \quad \text{REGIMEN TURBULENTO}$$

$$Pr = \left( \frac{C_p \cdot \mu}{k} \right)$$

$$Pr = 3,55$$

### 3.2.6.5. Cálculo de Coeficiente de Película

$$h_i = 0.027 \cdot \frac{k}{D_i} \cdot \left( \frac{D_i \cdot Gt}{\mu} \right)^{0.8} \cdot \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3}$$

$$h_i = 359,54 \quad [\text{Btu/h.pie}^2.\text{°F}]$$

### 3.2.6.6. Corrección de Coeficiente de Película por Área ( $h_{i\text{corregido}}$ )

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{DI}{DE}$$

$$h_{io} = 291,22 \quad [\text{Btu/h.pie}^2.\text{°F}]$$

### 3.2.6.7. Cálculo de coeficiente Limpio total ( $U_c$ )

$$U_c = \frac{h_{io} \cdot h_i}{h_o + h_i}$$

De calculos de carcaza:

$$h_{o\text{corregido}} = 458,28 \quad [\text{Btu/h.pie}^2.\text{°F}]$$

$$U_c = 137,87 \quad [\text{Btu/h.pie}^2.\text{°F}]$$

#### 3.2.6.8. Cálculo de área de Transferencia de Calor (A)

$$A = a'' \cdot L \cdot N_t$$

$$A = 59,34 \text{ pie}^2$$

#### 3.2.6.9. Coeficiente Global de Diseño ( $U_D$ )

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot \Delta t}$$

De cálculos previos:

$$\Delta T = 31,54 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Q = 713311,96 \text{ pie}^2$$

Entonces:

$$U_D = 381,15 \text{ pie}^2$$

#### 3.2.6.10. Cálculo de Factor de Obstrucción ( $R_D$ )

$$R_d = \frac{U_D - U_c}{U_D \cdot U_c}$$

$$R_D = 0,0046$$

De la tabla 12: Factor de Obstrucción del agua sin tratar = 0,003

Por lo tanto  $\rightarrow 0,0046 > 0,003$  continuamos nuestros cálculos.

#### 3.2.6.11. Cálculo de Caídas de Presión en Tubos

Para este cálculo necesitamos realizar algunas operaciones previas:

$$\Delta P_t = \frac{f G_t^2 L n}{5.22 \times 10^{10} D_e s \phi_t} \quad \text{lb/pie}^2$$

Donde:

f: Factor de fricción de tubo

G<sub>t</sub>: Velocidad Másica

L: Longitud del tubo

n: Numero de pasos

D<sub>e</sub>: Diámetro Interno del tubo

s: Gravedad Especifica del Agua

##### 3.2.6.11.1. Cálculo de Factor de Fricción (f)

De acuerdo al valor del N° de Reynolds hallado nos ubicamos en la Gráfica N° 4 del anexo (Fig. 29 de Kern).

⇒ Para:

$$Re_t = 9990,49$$

Tenemos:

$$f = 0,0021$$

Una vez calculado f:

$$\Delta P_t = 0,40 \quad [\text{lb/plg}^2]$$

#### 3.2.6.12. Cálculo de Pérdidas de Presión por Retorno

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} \frac{V^2}{2g'} \quad \text{lb/plg}^2$$

Donde:

n: Numero de pasos

V= velocidad (pie/seg)

g'= aceleración de la gravedad (pie/plg<sup>2</sup>)

s: Gravedad Especifica del Agua

$$\frac{V^2}{2g'}$$

según tabla Nº 27 de Kern: = 0,0052 (Gráfico Nº6)

$$\Delta P_t = 0,12480 \quad [\text{lb/plg}^2]$$

#### 3.2.6.13. Cálculo de Caída de Presión Total del Lado de los Tubos

$$\Delta P_r = \Delta P_t + \Delta P_f \quad \text{lb/plg}^2$$

$$\Delta P_t = 0,52 \quad [\text{lb/plg}^2]$$

Caída de Presión Permisible

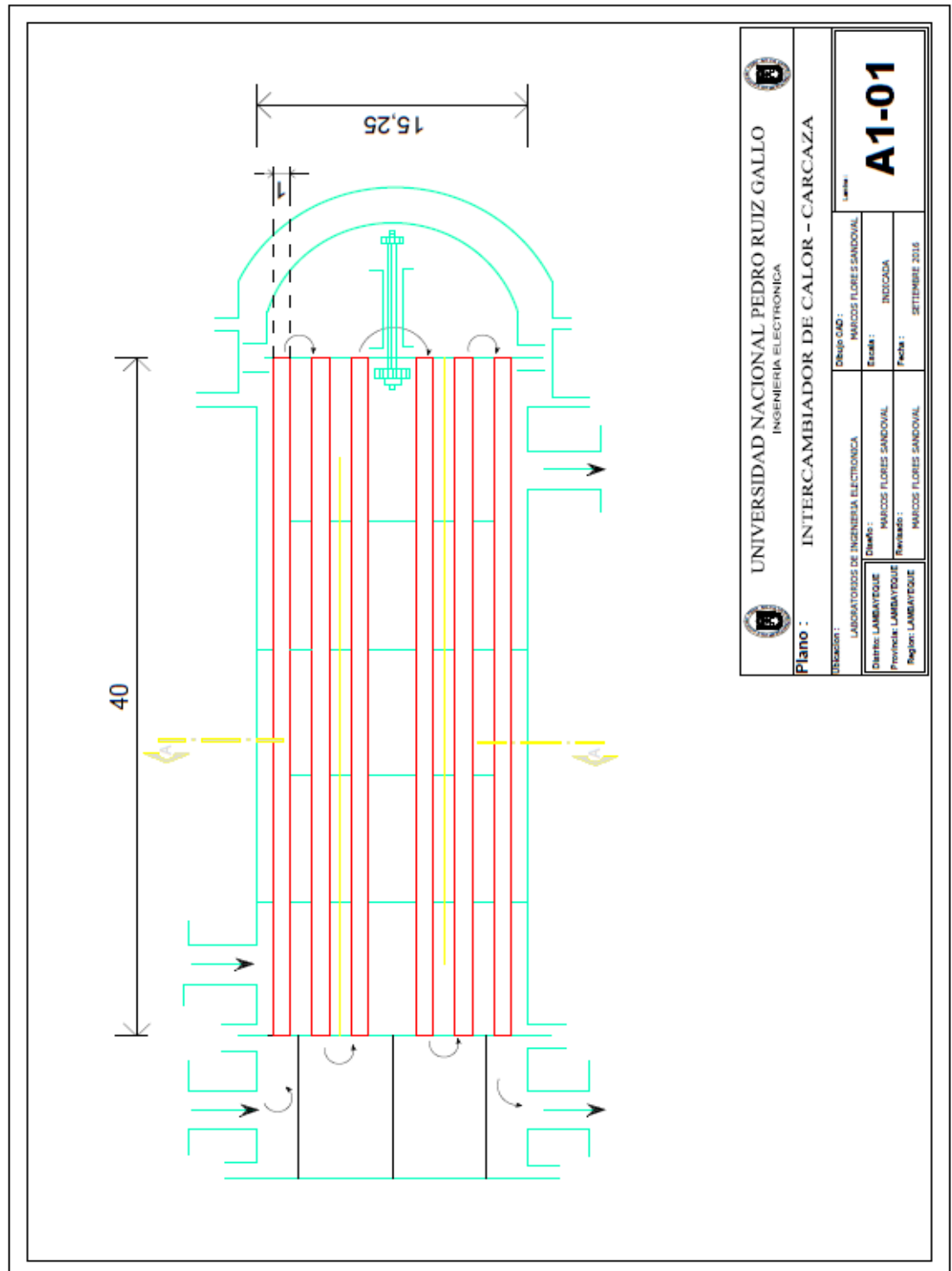
$$0,5 < 0,524 < 10$$

Por lo tanto el diseño es correcto.

#### **3.3. DISEÑO ESTRUCTURAL DE INTERCAMBIADOR DE CALOR (PLANOS AUTOCAD).**

##### **3.3.1. Plano de Carcaza de Intercambiador de Calor.**

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

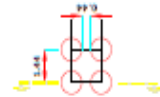
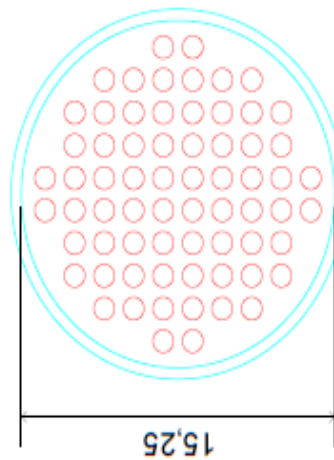


3.3.2. Plano de Deflectores de Intercambiador de Calor.

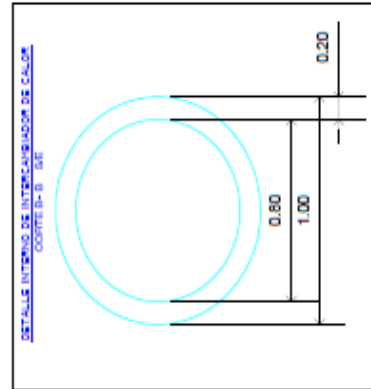




### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA MINIPLANTA

DETALLE INTERNO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR  
CORTE A-A



DETALLE INTERNO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR  
CORTE B-B - SE



 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO</b> INGENIERIA ELECTRONICA			
<b>Plano : INTERCAMBIADOR DE CALOR - DEFLECTOR</b>			
DISEÑO : LABORATORIO DE INGENIERIA ELECTRONICA		DISEÑO CAD : MARCOS FLORES SANDOVAL	
DISEÑO : DIBUJO : PROYECTO : REGION :		ESCALA : INDICADA FECHA : SEPTIEMBRE 2016	
DISEÑO : DIBUJO : PROYECTO : REGION :		<b>A1-02</b>	

---

# **DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**

---

## **CAPITULO IV**

#### 4.1. MODELO MATEMÁTICO

La Ecuación a continuación relaciona la variable de salida  $T_P$  (variable controlada) a la variable regulada  $F_c$  (entrada o carga), donde  $\tau_1$  y  $\tau_2$  son las constantes características de tiempo del proceso. Esta función de transferencia es de segundo orden.

$$G_P = \frac{T_P(s)}{F_c(s)} = \frac{K_P}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} ; \quad \tau_1, \tau_2 > 0$$

Donde:

$$k_1 k_2 = K_P,$$

$$k_1 = \frac{A \cdot \Delta T}{F_p C_{p_p}} \qquad k_2 = \frac{A \cdot \Delta T}{F_c C_{p_c}}$$

$$\tau_1 = \frac{M_p}{2F_p} \qquad \tau_2 = \frac{M_c}{2F_c}$$

y:

M<sub>p</sub>: masa del fluido del proceso dentro del intercambiador  
(Líquido frio)

M<sub>c</sub>: masa del fluido de control dentro del intercambiador (líquido caliente)

A: Área de Transferencia de Calor

F<sub>p</sub>: Flujo de masa del fluido del proceso (líquido frio) =

F<sub>c</sub>: Flujo de masa del fluido de control caliente (líquido caliente) =  
9900.18

C<sub>p<sub>p</sub></sub>: Capacidad calorífica del fluido del proceso

C<sub>p<sub>c</sub></sub>: Capacidad calorífica del fluido de control

**4.2. CALCULO DE MASAS DE LOS FLUIDO DENTRO DEL INTERCAMBIADOR****4.2.1. MASA DE AGUA CALIENTE EN LA CORAZA**

1º Del capítulo II (Diseño de Intercambiador de Calor)

$$\text{Volumen de Coraza} = \pi \left( \frac{Di}{2} \right)^2 \cdot L$$

Donde:

Di: Diámetro Interno de la coraza = 1.27 pies

L: Largo de la coraza = 3.33 pies

$$V = 4.218 \text{ pie}^3$$

2º Densidad del Agua: 999.97 Kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Si } \frac{1Kg}{m^3} = 0,06 \text{ lb/pie}^3$$

$$\Rightarrow \text{Densidad del Agua} = D_{\text{Agua}} = 59.998 \text{ lb/pie}^3$$

3º Masa de Agua en Coraza: (m)

$$m = D \cdot V = 253.07 \text{ lb} = 114 \text{ Kg}$$

**4.2.2. MASA DE AGUA FRIA EN TUBOS**

1º Del capítulo II (Diseño de Intercambiador de Calor)

$$\text{Volumen de Tubos} = \pi \left( \frac{Di}{2} \right)^2 \cdot L$$

Donde:

Di: Diámetro Interno del Tubo = 0.068 pies

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

$$L: \text{Largo de los tubos} = 3.33 \text{ pies}$$

$$V_{(1 \text{ tubo})} = 0.0121 \text{ pie}^3$$

$$V_{(68 \text{ tubo})} = 0.822 \text{ pie}^3$$

$$2^\circ \text{ Densidad del Agua: } 999.97 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Si } \frac{1 \text{ Kg}}{\text{m}^3} = 0.06 \text{ lb/pie}^3$$

$$\Rightarrow \text{Densidad del Agua} = D_{\text{Agua}} = 59.998 \text{ lb/pie}^3$$

$$3^\circ \text{ Masa de Agua en Tubos: (m)}$$

$$m = D \cdot V = 49.32 \text{ lb} = 22 \text{ Kg}$$

#### 4.2.3. CAPACIDADES CALORIFICAS

$$Q_{\text{caliente}} = 71311.9632 \text{ Btu.}^\circ\text{F/h}^2$$

$$Q_{\text{frio}} = 71311.9632 \text{ Btu.}^\circ\text{F/h}^2.$$

$$C_{pp} = Q/\Delta T$$

$$C_{pc} = Q/\Delta T$$

$$C_{pp} = 71311.9632/(194 - 122)$$

$$C_{pp} = 71311.9632/(194 -$$

$$C_{pp} = 7925.69 \text{ Btu.}^\circ\text{F/h}^2$$

$$C_{pc} = 9907.11 \text{ Btu.}^\circ\text{F/h}^2$$

#### 4.3. CALCULO DE LA FUNCIONDE TRANSFERENCIA

Teniendo en cuenta cálculos anteriores:

$$M_c: 253.07 \text{ lb}$$

$$M_p: 49.32 \text{ lb}$$

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

$$A: 59.34 \text{ m}^2$$

$$F_p: 7936.8 \text{ lb/h}$$

$$F_c: 9900.18 \text{ lb/h}$$

$$C_{p_p}: 7925.69 \text{ Btu/h}^2$$

$$C_{p_c}: 9907.11 \text{ Btu/h}^2$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{A \cdot \Delta T}{F_p C_{p_p}} = 29.76 \times 10^{-6} \frac{\text{pie}^2 \text{ } ^\circ \text{F h}^2}{\text{Btu. lb}} \\ &= 385.68 \frac{\text{pie}^2 \text{ } ^\circ \text{F seg}^2}{\text{Btu. lb}} \end{aligned}$$

$$\tau_1 = \frac{M_p}{2F_p} = 3.12 \times 10^{-3} \text{ h} = 11.23 \text{ seg}$$

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{A \cdot \Delta T}{F_c C_{p_c}} = 22.71 \times 10^{-6} \frac{\text{pie}^2 \text{ } ^\circ \text{F h}^2}{\text{Btu. lb}} \\ &= 294.32 \frac{\text{pie}^2 \text{ } ^\circ \text{F seg}^2}{\text{Btu. lb}} \end{aligned}$$

$$\tau_2 = \frac{M_c}{2F_c} = 12.7812 \times 10^{-3} \text{ h} = 46 \text{ seg}$$

$$K_p = k_1 \cdot k_2 = 113513.34 \frac{\text{pie}^2 \text{ } ^\circ \text{F seg}^2}{\text{Btu. lb}}$$

$$G_P = \frac{T_P(s)}{F_c(s)} = \frac{K_P}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} ; \quad \tau_1, \tau_2 > 0$$

→

$$G_P = \frac{219.74}{s^2 + 0.11s + 1.94 \times 10^{-3}}$$

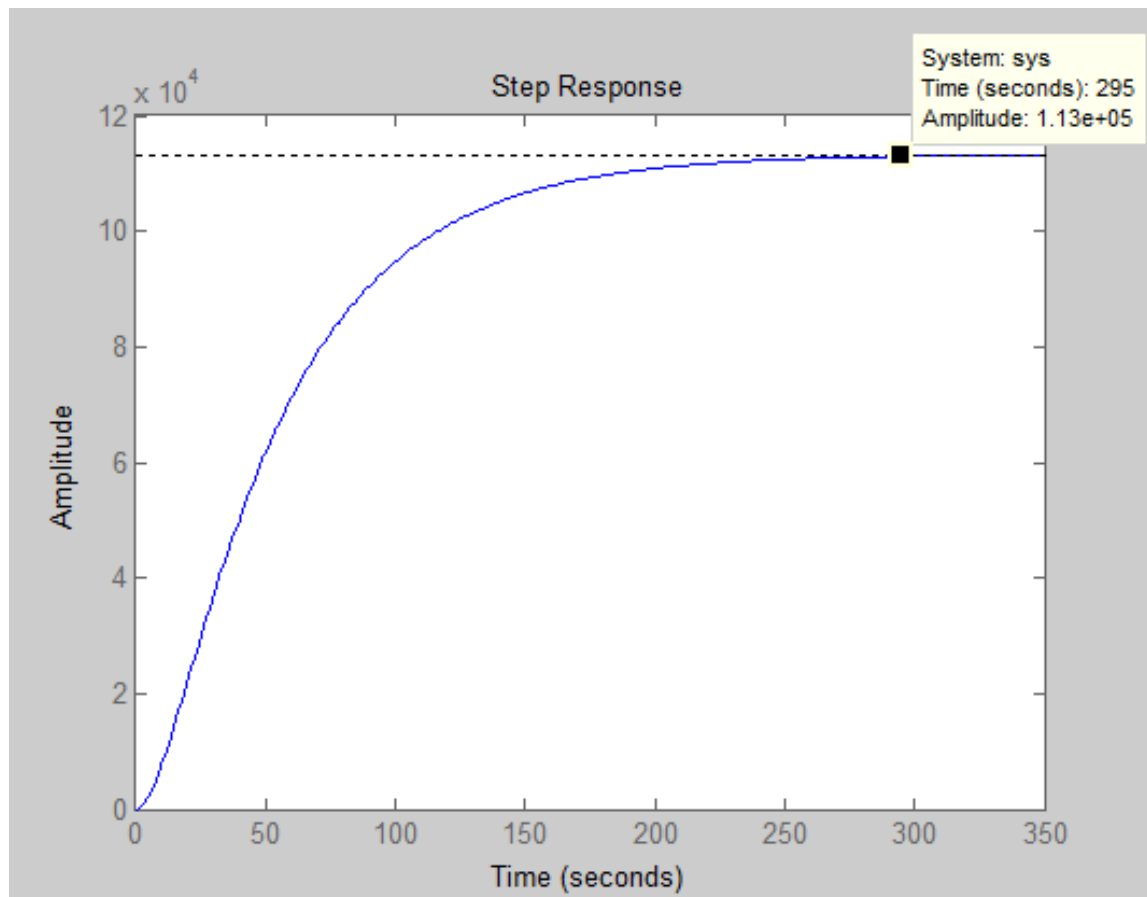
#### 4.4. SIMULACION DEL SISTEMA Y DETERMINACIÓN DEL PID

Se tiene que la función de transferencia del sistema es el siguiente:

$$\frac{219.74}{s^2 + 0.11s + 1.94 \times 10^{-3}}$$

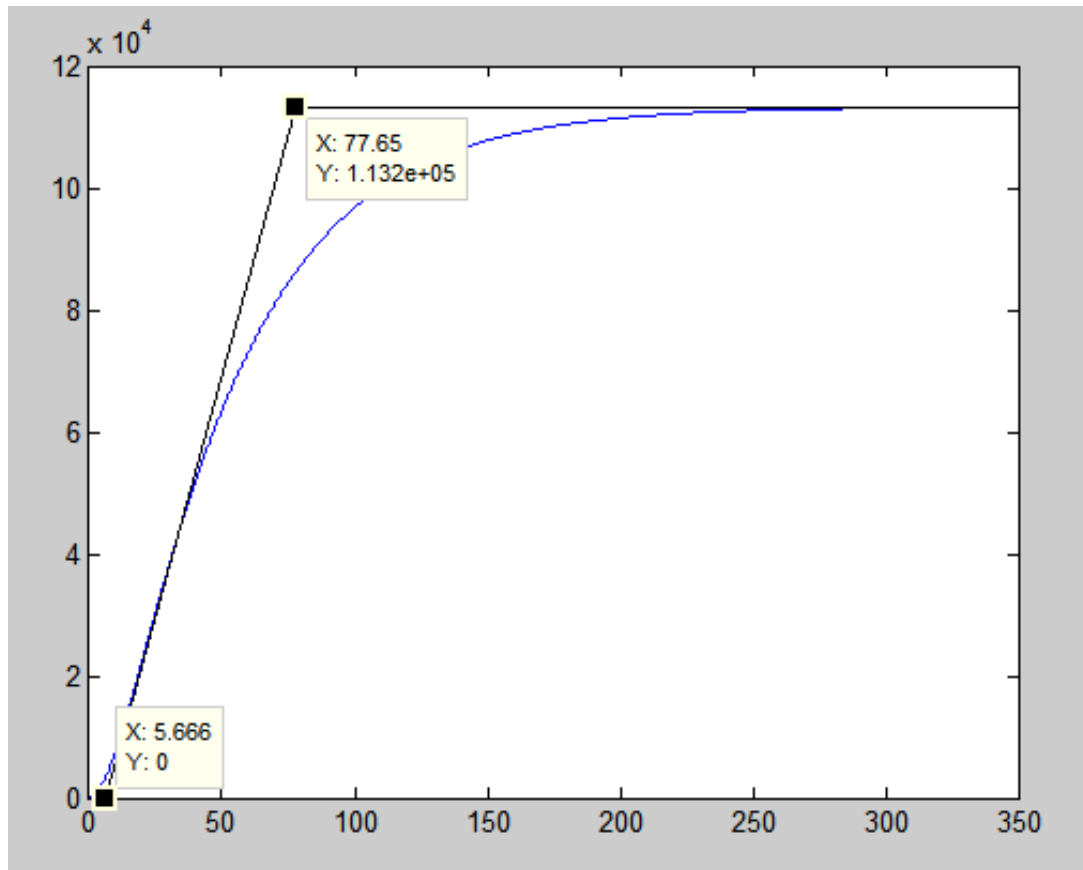
Utilizando MATLAB (Ver Anexo C)

Al aplicarle un escalón para observar su respuesta, se puede ver lo siguiente:



En la gráfica se observa un sistema que tarda demasiado en estabilizarse y posee una amplitud demasiado alta; por lo que se procederá a desarrollar el controlador PID, basándose en el 1º método de Ziegler-Nichols.

1º Hallamos el punto de inflexión y su tangente para ubicar las variables  $L$ ,  $T$



Según la siguiente tabla

Obtenemos los valores para las ganancias del PID

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

$$K_p = 15.2466$$



#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

$$T_i = 11.3311 \rightarrow K_i = 1.3456$$

$$T_d = 2.8328 \rightarrow K_d = 43.1903$$

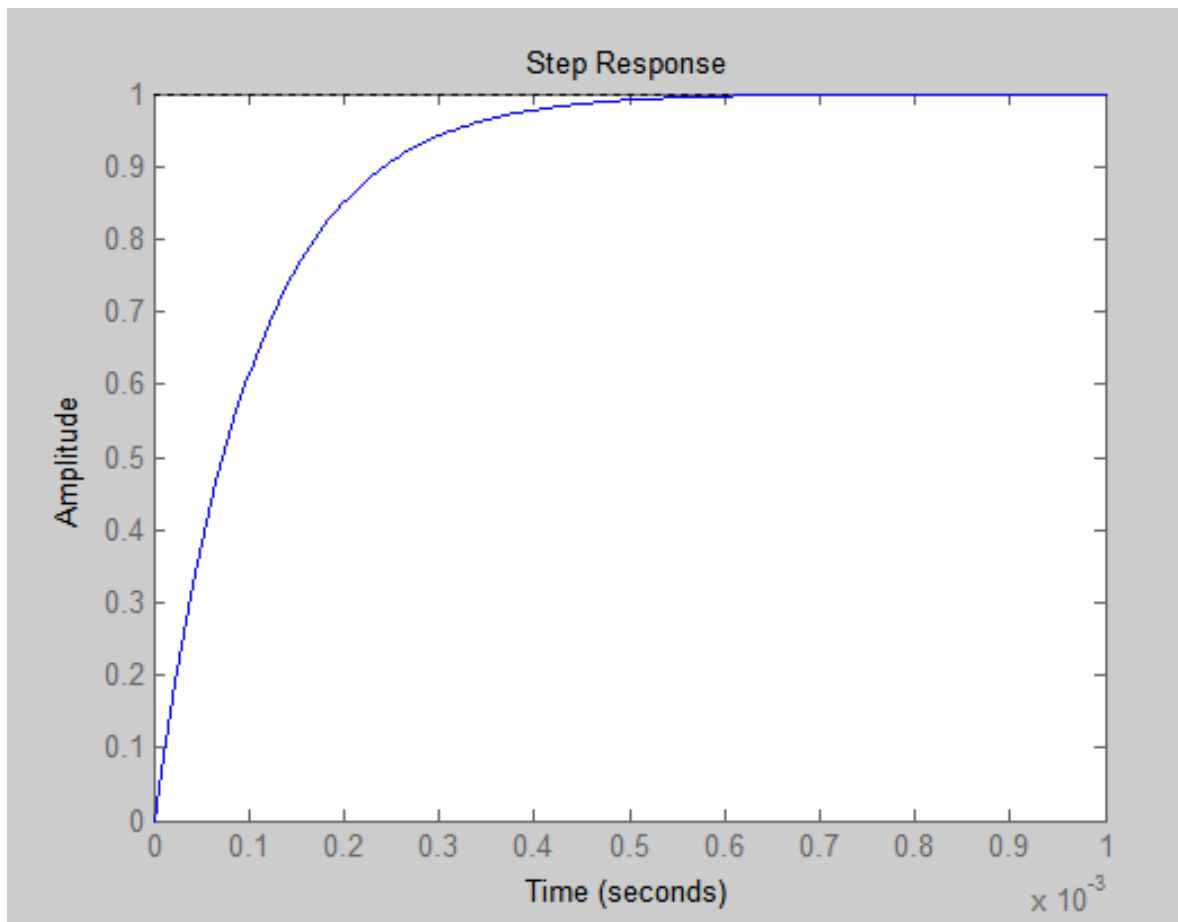
Entonces tenemos la función de transferencia del PID

$$\frac{43.19 s^2 + 15.25 s + 1.346}{s}$$

Y el Sistema en lazo cerrado de todo el proceso quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{9491 s^2 + 3350 s + 295.7}{s^3 + 9491 s^2 + 3350 s + 295.7}$$

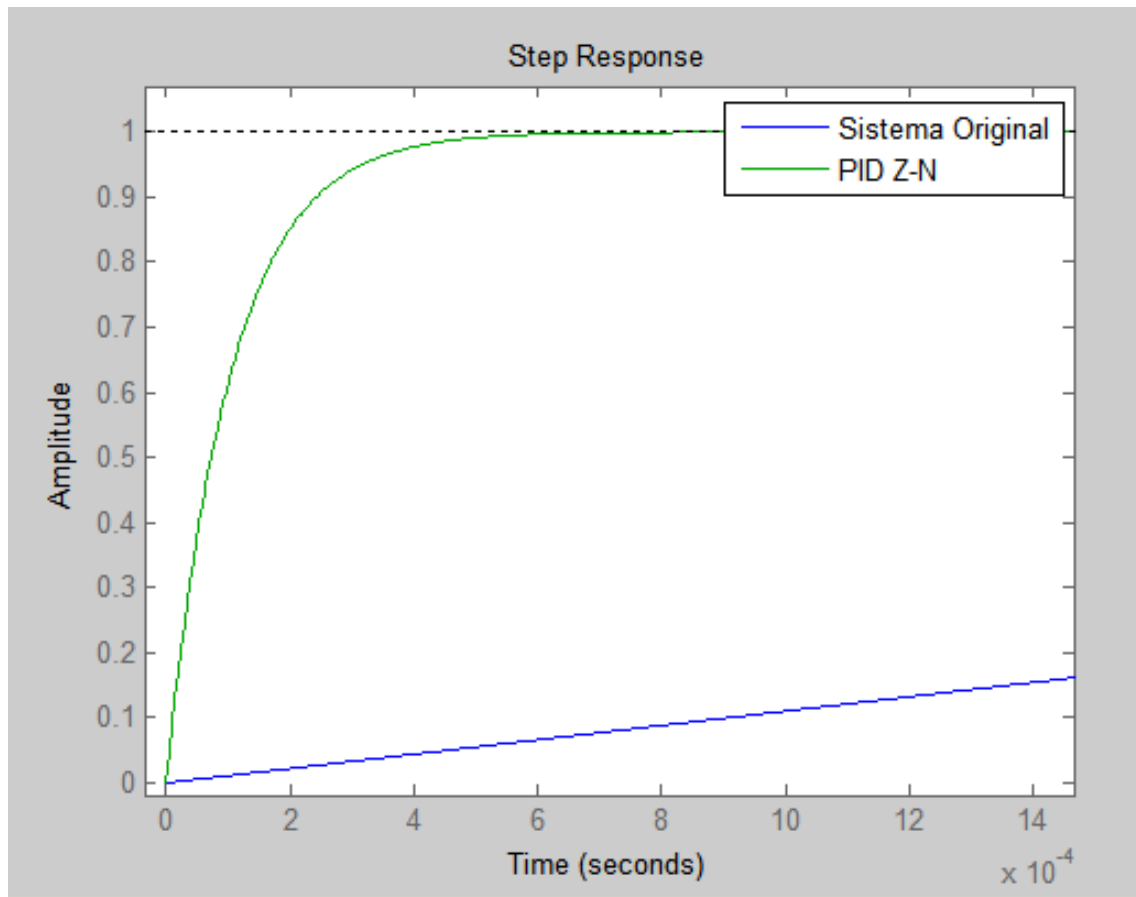
Al aplicar este controlador al Sistema, mostramos la nueva respuesta al escalón:



En esta gráfica nos fijamos que se ha reducido considerablemente el tiempo de respuesta y además el sistema no pasa de una amplitud mayor a la unidad; si

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

deseamos verlo en comparación con el sistema original se puede notar la diferencia.



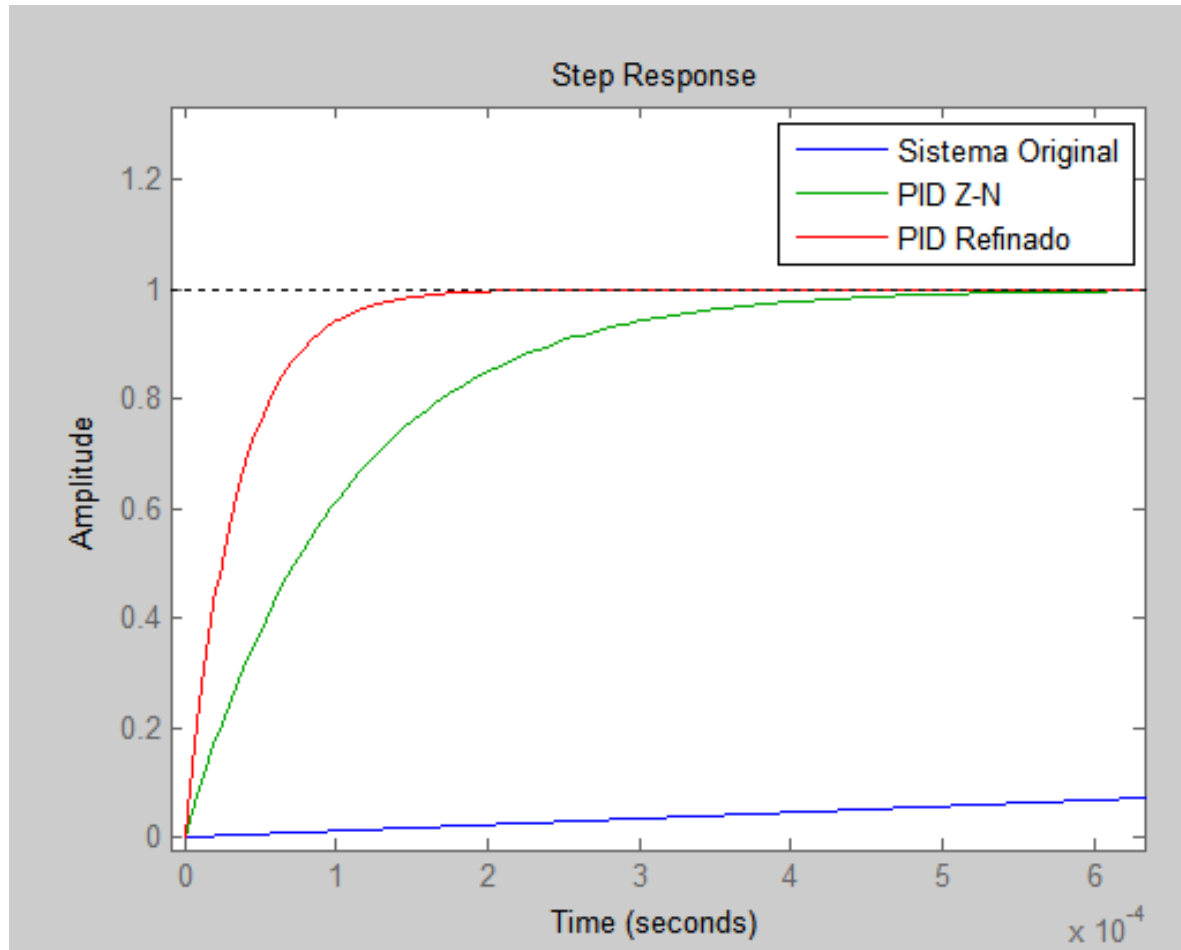
También podemos refinar aún más el sistema cambiando los valores de las ganancias, por ejemplo si hacemos los nuevos valores

$$Kp\_nuevo = 1.5 * Kp;$$

$$Kd\_nuevo = 3 * Kd;$$

$$Ki\_nuevo = 1.0 * Ki;$$

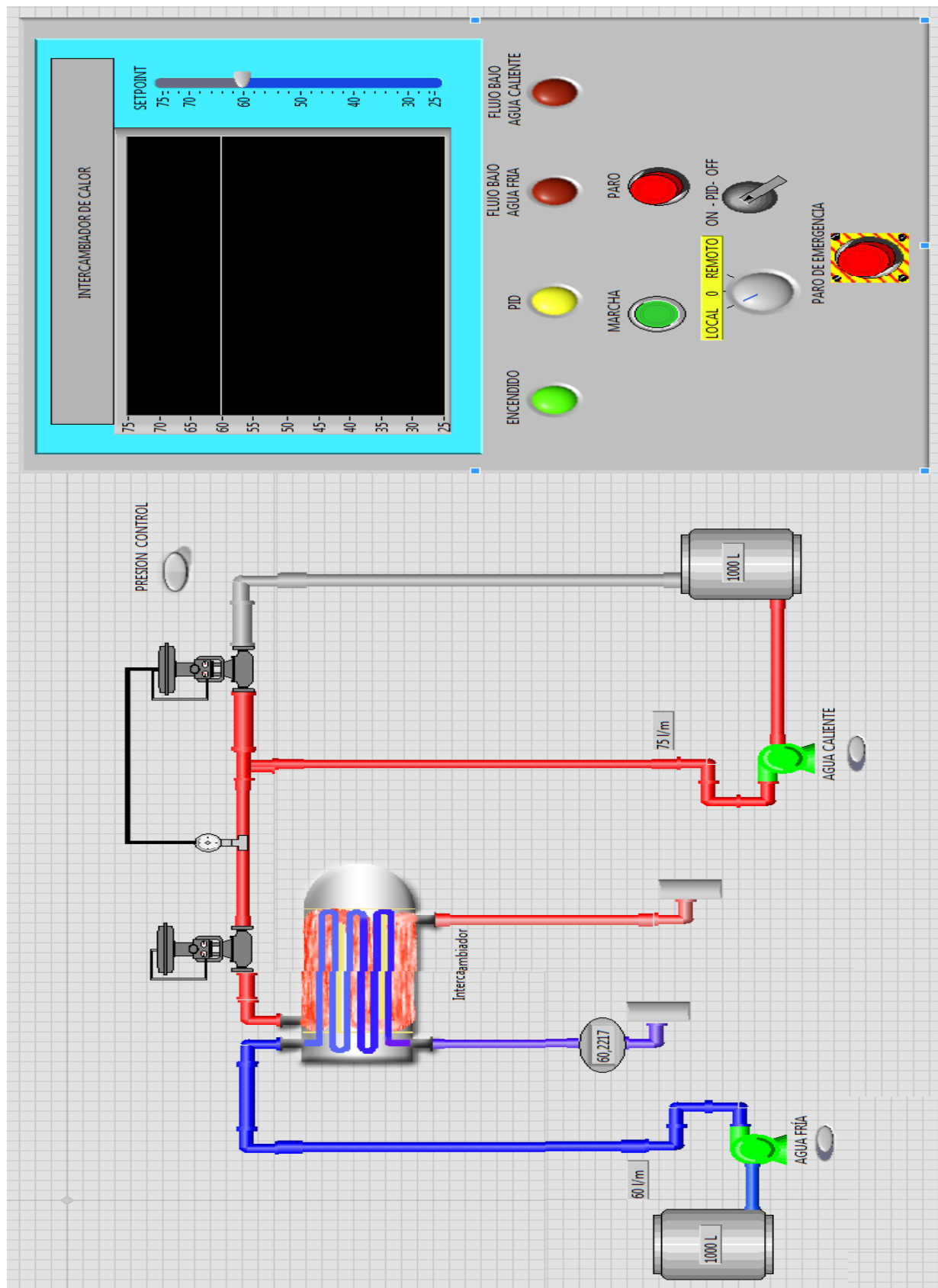
Generamos una respuesta al escalón como la siguiente:



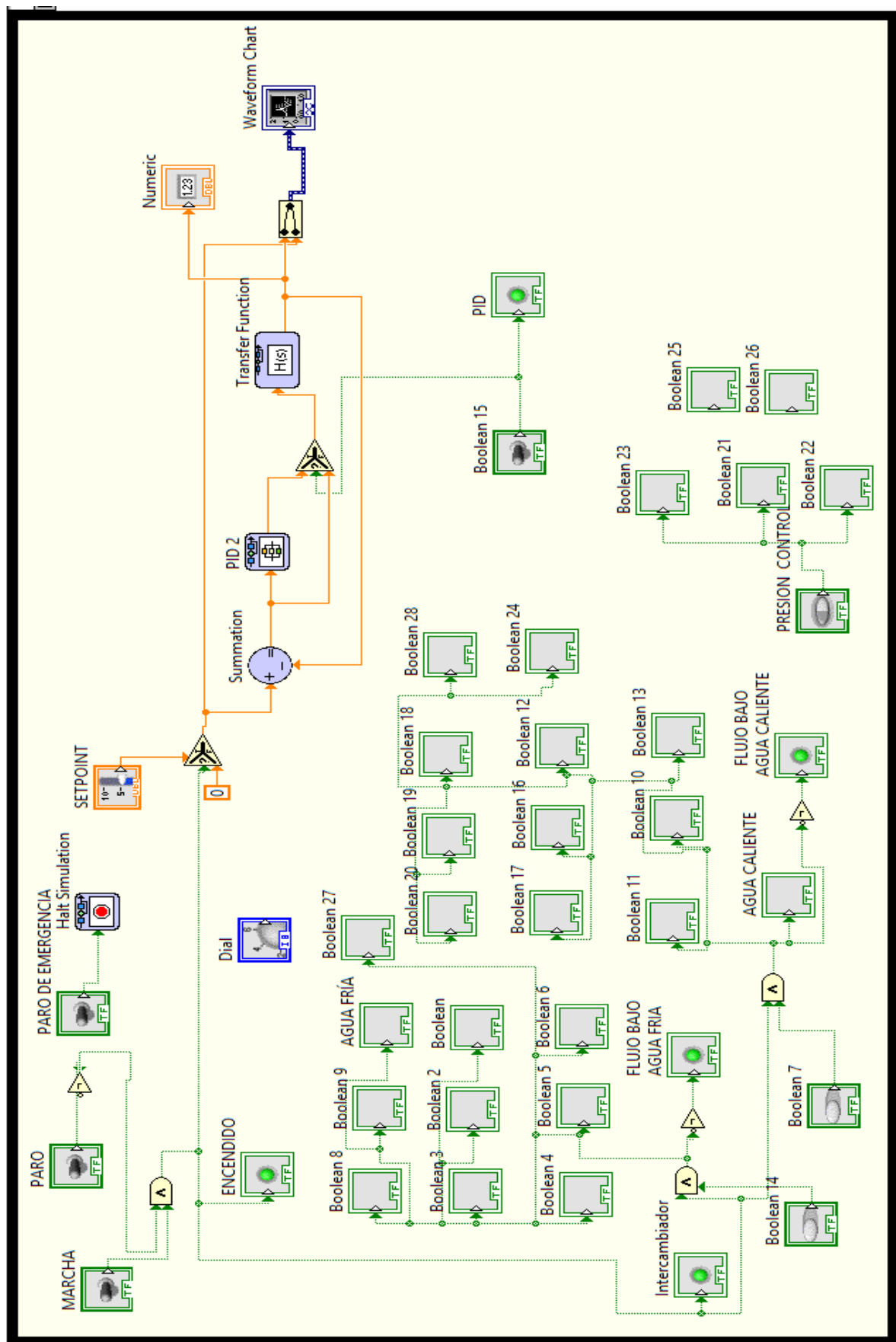
**4.5. SIMULACION EN LAVIEW DEL SISTEMA**

**4.5.1. Panel de Diagrama Gráfico**

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL



#### 4.5.2. Panel de Diagrama de Bloques



4.6. SELECCIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MINI PLANTA

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

Encontrados los parámetros de diseño y datos de proceso como por ejemplo: Flujo y Máxima Temperatura de lado frío: 60 lt/min y 75 °C respectivamente; Flujo y Máxima Temperatura de lado caliente: 74.84 lt/min y 90 °C respectivamente; Máxima presión en las tubería de proceso: 5.5 PSI; material y diámetro de las líneas de proceso de la mini planta: Tubería Galvanizada de 1"; Potencia de las Bombas:1.2 HP; Controlador: PLC; Cantidad E/S y Tipo de Señales: 2 Entradas Analógicas y 2 Salidas Analógicas; Protocolo de Comunicación entre los equipos: Ethernet; Monitoreo del sistema de control (scada): HMI; Datos de Laboratorio: Dimensiones de Mini plantas existentes 1700x1800x500 mm; Alimentación Trifásica: 380 VAC.

Y después de realizar una evaluación de las diferentes propuestas hechas por las empresas de nuestro mercado local se procede a definir la instrumentación adecuada para el correcto funcionamiento de nuestra Mini Planta.

##### INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	CARACTERISTICAS	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
1	Bomba de Agua	Marca: Pentax, Modelo:US-120/3; Caudal: 30...150 l/m; Potencia: 1.2HP; Succión y Descarga: 1"; Máxima Temperatura: 25 °C; Alimentación Trifásica: 380 VAC, 60 Hz.	1130.5	1130.5
1	Bomba de Agua	Marca: Pentax, Modelo:U5S-120/3; Caudal: 30...150 l/m; Potencia: 1.2HP; Succión y Descarga: 1"; Máxima Temperatura: 90 °C; Alimentación Trifásica: 380 VAC, 60 Hz.	1445.5	1445.5
1	Tablero Metálico	Dimensiones: 800x600x250 mm, Grado Protección: IP66, Color: RAL 7035, Robustez según IEC 62262 (IK10). Incluye: Placa Base y Conjunto Fijación Mural.	657.3	657.3
2	Variador de Velocidad	Marca: Schneider, Modelo: ATV312; Potencia Motor: 1.5kW / 2 HP; Tensión Alimentación: 380...500 VAC; Protocolo Comunicación: Modbus; Corriente Cortocircuito: 5 kA; Temperatura Trabajo: -10...60 °C; Dimensiones: 107x143x152 mm.	1359.6	2719.2
	Interruptor	Interruptor Termomagnético Tripolar IC60N Marca: Schneider; Modelo: A9F74310; Número Polos: 3P; Corriente Nominal: 10A; Tipo		

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

1	Termomagnético	Protección: Coordinación Tipo 2.	166	166
2	Guardamotor	Guardamotor Magneto-Térmico Marca: Shneider; Modelo: GV2ME08; Numero de Polos: 3P; Rango Corriente 2,5...4 A, Tipo Protección: Coordinación Tipo 2.	260	520
2	Flujómetro Magnético	Transmisor + Sensor de Flujo Magnético; Marca: Foxboro; Modelos: IMT25 y 9303A; Conexión Proceso: 1"; Cable Interconexión entre FE/FT: 7 mt; Señal de Salida 4- 20 mA.	8250	8250
2	Válvula de Control de Flujo con Posicionador	Válvula de Control Tipo Globo Marca: Spirax Sarco; Modelo: LEA 31 SPIRA- TROL; Conexión Proceso: 1"; Cuerpo: Hierro Fundido. Posicionador Inteligente Marca: ABB; Modelo: TZIDC; Simple Efecto con Salida de señal 4-20 mA.	10565	21130
1	Transmisor Temperatura	Sensor Temperatura PT100, Marca: PR Electronics, 3 Hilos; Rango Funcionamiento: -40...90°C; Bulbo: AISI 316-Ø 6mmx1"; Conexión Proceso: ½" NPT; Cables de Aluminio; Grado Protección: IP65; Con Transmisor señal Salida 4-20 mA.	615	615
1	Transmisor de Presión	Marca: Vega; Modelo: VEGABAR14; Tensión Alimentación: 8...30VDC; Rango Medición: 0...2,5 Bar; Grado Protección: IP65; Conexión Proceso: ½" NPT; Señal de Salida 4-20 mA; Carcasa de Latón Niquelado.	1125	1125
1	Manómetro + Manifold	Manómetro Marca: WIKA; Modelo: 232.36; Rango de Medición: 0...6 Bar; Conexión Proceso: ½" NPT; Material: Acero Inoxidable 316L; Grado Protección: IP66. Manifold Marca: WIKA; Modelo: 910.81; Conexión Proceso: ½" NPT; Material: Acero Inoxidable 316L; Grado Protección: IP66.	1340	1340
1	Intercambiador de Calor	Intercambiador de Tubo y Coraza, 3 pasos por coraza, 6 pasos por tubo.	12000	12000
1	HMI	Marca: National Instruments; Modelo: TPC-2106; Tamaño: 5.7"; Procesador 416MHz; 64 MB SDRAM; Pantalla LCD Touch; Temperatura Trabajo: hasta 50°C; Grado Protección: NEMA4/IP65; Protocolo Comunicación: 1 puerto Ethernet (10/100BaseT), 2 puertos seriales RS232, 1 puerto serial RS485.	2985	2985



#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

1	Licencia LABVIEW	Licencia de Funcionamiento LABVIEW	3785	3785
1	Interruptor Termomagnético	Interruptor Termomagnético Bipolar IC60N Marca: Schneider; Modelo: A9F74206; Número Polos: 2P; Corriente Nominal: 6A; Tipo Protección: Coordinación Tipo 2.	109	109
1	Fuente Alimentación	Fuente de Alimentación Marca: Schneider; Modelo: ABL8MEM24012; Tension Alimentación: 100-240 VAC; Tensión de Salida: 24 VDC; Corriente de Salida: 1,2 A; Temperatura Trabajo: -20...70°C.	279	279
1	PLC	PLC Marca: Schneider; Modelo: TM221CE16R; Tensión Alimentación: 100...240 VAC; 16 E/S Digitales; Tiempo de Respuesta: 100 us Turn-off; 20 operaciones de Conmutación/minuto; Capacidad Memoria: 256 KB RAM; 2 GB Tarjeta SD opcional; Reloj en tiempo real; Velocidad Transmisión: 480 Mbit/s; Protocolo Comunicación: Puerto Ethernet RJ45, Puerto Serial RS485, Puerto USB 2.0 mini B.	1044	1044
1	Módulo E/S Analógicas	Marca: Schneider; Modelo: TM3AM6; Entradas analógicas: 4; Salidas analógicas: 2; Compatibilidad con gama: M221, M241 Y M541; ,	940	940
1	HUB	HUB Marca: Schneider; Modelo: TWDXCAT3RJ; Enlace Serie para PLC Twido; 1 Conector RJ45 cable principal; 2 RJ45 derivación.	140	140
2	Lámpara indicadora	Marca: Schneider; Modelo: XB5AVM5; Color: Amarillo; LED Integrado; Material: Plástico; Diámetro de Montaje: 22 mm; Tensión Alimentación: 220...240 VAC; Temperatura Trabajo: -25...70°C; Grado Protección: IP65.	70	140
2	Lámpara indicadora	Marca: Schneider; Modelo: XB5AVM4; Color: Rojo; LED Integrado; Material: Plástico; Diámetro de Montaje: 22 mm; Tensión Alimentación: 220...240 VAC; Temperatura Trabajo: -25...70°C; Grado Protección: IP65.	70	140
2	Lámpara indicadoras	Marca: Schneider; Modelo: XB5AVM3; Color: Verde; LED Integrado; Material: Plástico; Diámetro de Montaje: 22 mm; Tensión Alimentación: 220...240 VAC; Temperatura Trabajo: -25...70°C;	70	140

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

		Grado Protección: IP65.		
1	Pulsador	Marca: Schneider; Modelo: XB5AA42; Contacto: 1NC; Color: Rojo; LED Integrado; Material: Plástico; Diámetro de Montaje: 22 mm; Tensión Alimentación: 220...240 VAC; Temperatura Trabajo: -25...70°C; Grado Protección: IP65.	40.5	40.5
1	Pulsador	Marca: Schneider; Modelo: XB5AA31; Contacto: 1NA; Color: Verde; LED Integrado; Material: Plástico; Diámetro de Montaje: 22 mm; Tensión Alimentación: 220...240 VAC; Temperatura Trabajo: -25...70°C; Grado Protección: IP65.	40.5	40.5
1	Pulsador de Emergencia	Pulsador de Parada de emergencia Marca: Schneider; Modelo: XB4BS8442; Cabeza tipo hongo rojo; Girar para Desenclavar; Contacto: 1NC; Diámetro de Montaje: 22 mm; Temperatura Trabajo: -25...70°C; Grado Protección: IP66.	100	100
1	Switch Selector	Marca: Schneider; Modelo: XB4BD33; Diámetro de Montaje: 22 mm; 3 posiciones Fijas; Contactos: 2NA; Temperatura Trabajo: -25...70°C; Grado Protección: IP65.	90	90
	Otros	Cables, Conectores Tipo Pin, Borneras, Canaleta Ranurada, Riel Din, Barra Tierra, Placas de Identificación, Pernería, etc.	589.4	589.4
<b>SUB TOTAL</b>				<b>71946.9</b>

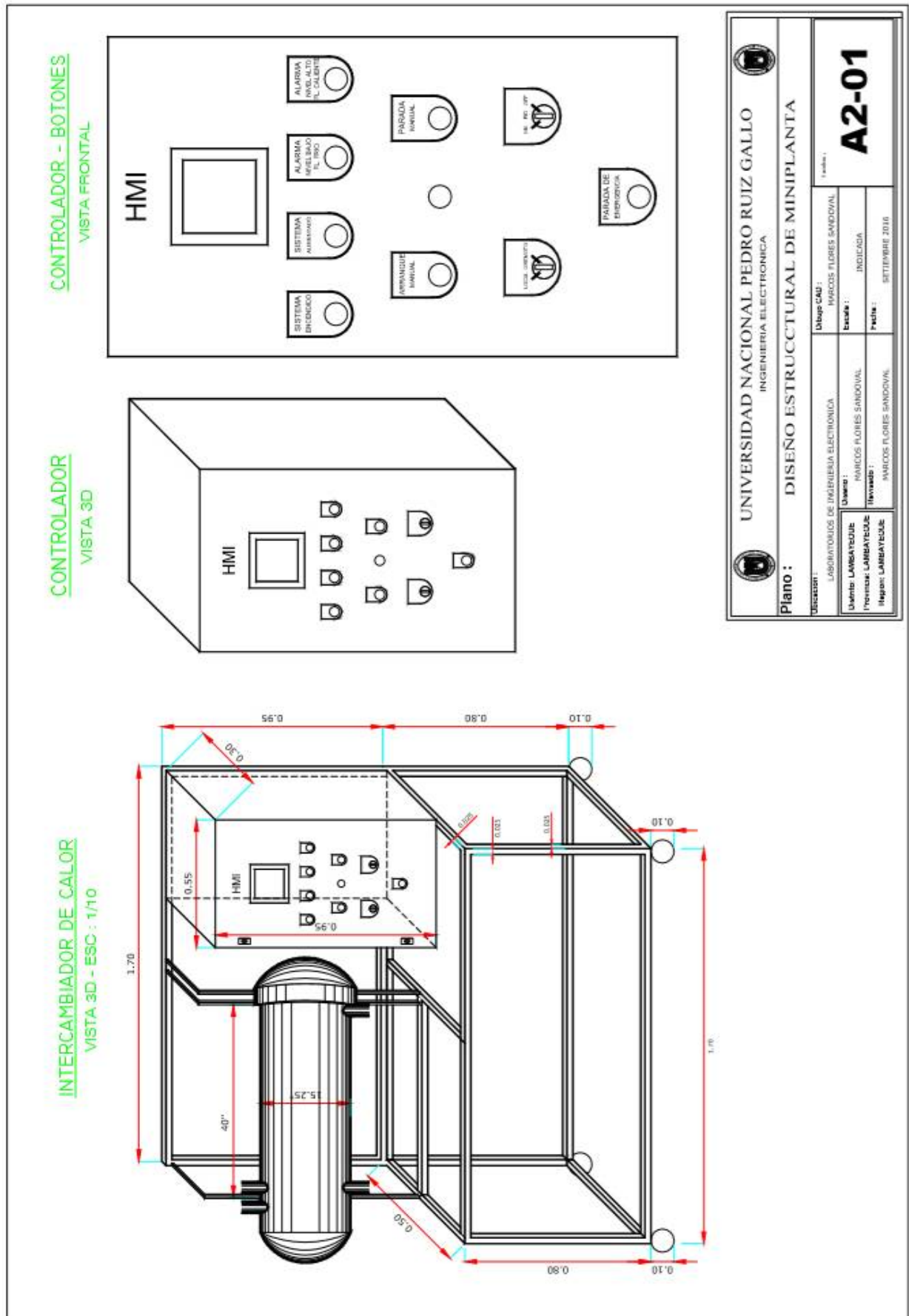
ARMAZON DE SOPORTE, TUBERIAS, TANQUES Y CAJA METALICA

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	CARACTERISTICAS	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO (S/.)
3	Tubo cuadrado	Acero Galvanizado 3/4 " x 6m	75	225
2	Tubo Redondo	Acero Galvanizado 1" x 6m	80	160
8	Codos	Acero Galvanizado 1"	28	224
4	Conector Tipo "T"	Acero Galvanizado 1"	36	144
1	Tanque Cisterna	PVC, 1000 litros.	800	800
1	Tanque Cisterna	Acero Inoxidable, 1000 litros.	3000	3000
1	Tanque Cisterna	Acero al Carbono, 2000 litros.	3000	6000
<b>SUB TOTAL</b>				<b>7553</b>
<b>TOTAL FINAL</b>				<b>79499.90</b>

#### 4.7. DISEÑO ESTRUCTURAL DE MINI PLANTA (AUTOCAD).

#### 4. DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL



---

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

---

## **CAPITULO V**

**5.1. CONCLUSIONES**

1. Se realizó el estudio de los diferentes modelos de intercambiadores de calor aplicados a la industria en general, ante lo cual se logró determinar que el intercambiador de Tubo y Coraza es el adecuado para nuestra implementación, por su fácil acceso para mantenimiento, cero fugas bajo condiciones de operación, por el fluido a utilizar (Agua).
2. Se realizaron los cálculos correspondientes para el diseño del intercambiador, ante lo cual obtuvimos como diseño un Intercambiador de Tubo y Coraza, con 3 pasos en coraza y 6 pasos en tubo, un diámetro interno de coraza de 15.25", una longitud de 40", una cantidad total de 68 tubos de 1" diámetro externo, un espacio entre tubos de 0.25", un espacio entre deflectores de 3.050" y un arreglo cuadrado.
3. Se logra realizar el diseño estructural de la mini-planta intercambiadora de calor, para el proceso de control de temperatura; teniendo en cuentas las consideraciones (estructurales) de las mini-plantas para el control de nivel y presión existentes en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.
4. Se elaboró el diseño del sistema de supervisión y control (SCADA) de la mini-planta intercambiadora de calor, utilizando el software de programación LABVIEW versión 2015 de la empresa National Instruments.
5. Los equipos que de acuerdo al resultado de la investigación y que según las características del proceso aplican mejor para el funcionamiento de este sistema fueron:
  - 5.1 Variador de Velocidad; Marca Schneider, Modelo: Altivar 312, 1.5KW/2HP, 380 VAC.
  - 5.2 Bombas de Agua, Marca: Pentax, Modelos: US120/3 y U5S120/3 (30...150 l/m), 1.2HP.
  - 5.3 Válvula de Control Marca: Spirax Sarco; con Posicionador Marca: ABB, con señal de Transmisión 4-20 mA.

- 5.4 Transmisor de Temperatura PT100, Marca: PR Electronics, Rango: - 40...90 °C, Bulbo 6mm x 1", Conex. Proceso: ½" NPT.
  - 5.5 Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza, con 3 Pasos en Coraza y 6 Pasos en Tubo, de fabricación Nacional.
  - 5.6 PLC M221, Marca: Schneider, Alimentación 110...240 VAC, E/S Digitales, Comunicación Serial, Ethernet.
  - 5.7 HMI National Instruments, Modelo: TPC-2106, 5.7", NEMA4/IP65, Comunicación Ethernet.
6. Se realizó la simulación en MATLAB, utilizando el primer método de Ziegler – Nichols, observando la respuesta de la de la función de transferencia ante un escalon unitario; obteniendo los parámetros PID, los cuales fueron  $K_p=15,2466$ ;  $T_i=11,3311$  y  $T_d=2,8328$ . Luego de aplicar estos parámetros al sistema obtenemos que el tiempo de respuesta para la estabilización del sistema es de 6 Segundos y tiene una Amplitud no mayor a la Unidad.
7. El desarrollo de la Mini Planta intercambiadora de calor permitirá dar un valor agregado muy importante como propuesta de enseñanza orientada al desarrollo de competencias; poniendo a disposición el desarrollo del proceso de control de temperatura en nuestros laboratorios, con el fin de resolver las dudas sobre este proceso a nivel industrial.

Con esto se demuestra que el diseño es el correcto y servirá para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

### 5.2. RECOMENDACIONES.

1. Para la implementación de la Mini Planta, se recomienda utilizar las tuberías, Instrumentación, Equipos y demás, de acuerdo a las consideraciones desarrolladas y presentadas en este proyecto (Grados de Protección IP66, Conexiones a Proceso ½" NPT, Protecciones eléctricas de Coordinación Tipo 2, etc); también se recomienda utilizar Equipos de

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

Protección Personal para cada una de las personas involucradas en dicha implementación (Guantes, lentes, Tapones Auditivos, etc).

2. Hacer efectivas las pruebas de fuga correspondientes antes de iniciar el arranque del sistema de control, ya que estamos utilizando agua a temperatura elevada y cuyo potencial de causar daño es alto si no se tienen las consideraciones pertinentes.
3. Elaborar un procedimiento en donde se indiquen los pasos a seguir para el arranque de la Mini Planta como por ejemplo: Realizar la Verificación de Conexión, verificación de Voltaje de Alimentación, adecuado suministro a las bombas, configuración de parámetros en VFD, etc.
4. De ocurrir la necesidad de modificar los parámetros en los equipos para algún tipo de prueba adicional, revisar el manual de uso de la mini planta, ya que esta, trabaja dentro de rangos estimados y un desperfecto por mala maniobra podría dejar inoperativos los equipos e incluso causar algún accidente fatal.
5. Realizada la implementación del sistema de control, Capacitar a todo el personal involucrado con el desarrollo de las prácticas en la mini planta (A todos los Docentes, principalmente de los cursos de control; Responsables del Laboratorio y a los alumnos en general), con respecto al manejo de los equipos y software de programación; para que puedan realizar el mantenimiento preventivo y sus prácticas con éxito.
6. Adquirir las licencias para los softwares de programación utilizados en los Laboratorios de nuestra escuela profesional y realizar las modificaciones correspondientes de acuerdo a la versión del mismo.



---

## **BIBLIOGRAFIA**

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONFEDI (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería) (2007). Competencias genéricas de ingeniería. Documento final.
- [2] DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. Sistemas de Control Moderno
- [3] OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna.
- [4] BENITEZ CADENA, Víctor Manuel; ZALAMEA BALLADARES, José Mauricio. Construcción De Un Módulo Didáctico De Control De Nivel De Líquidos.
- [5] L. Arenas; A. Castilla; D. Rojas. Interfaz Hombre Maquina
- [6] D. Kern; Procesos de Transferencia de Calor. Editorial CECSA; 1999
- [7] Guía Docente Universidad De Valladolid  
[https://alojamientos.uva.es/guia\\_docente/uploads/2011/447/42501/1/Documento15.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2011/447/42501/1/Documento15.pdf)
- [8] Diseño de un Intercambiador de Calor de Carcasa Y Tubos  
<https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/guia-intercamb-carcasa-y-tubo-mahuli-gonzalez-0.pdf>
- [9] L. Moncada A; Automatización y Control de Procesos. Universidad Nacional de Trujillo. 2005, 2º Edición  
<https://es.scribd.com/doc/134271714/44614510-Libro-de-Control-Clasico-pdf>

## REFERENCIAS DE GRÁFICOS Y TABLAS

- Gráfico N° 1: Factores de Corrección MLDT para intercambiadores 3-6.
- Gráfico N° 2: Factores F de Temperatura Calórica.
- Gráfico N° 3: Viscosidades de Líquidos.
- Gráfico N° 4: Factores de Fricción – Lado de la coraza.
- Gráfico N° 6: Pérdida de Presión por retorno lado de tubos.
- Tabla1: Calor Especifico del Agua entre 0 °C y 100 °C  
[http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/caloresph2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/caloresph2o.pdf)
- Tabla2: Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas  
[http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/viscoh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf)
- Tabla3: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica  
 “Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor” Pag. 12  
 Versión 3.5 (septiembre de 2014)-Universidad de Sevilla.
- Tabla4: Disposición de los Espejos de Tubos (Arreglo en Cuadro).

- Tabla5: Viscosidades de Líquidos.
- Tabla6: Factores de Obstrucción.  
[http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf)
- Tabla7: Datos de Tubos para Intercambiadores de Calor.

**REFERENCIAS DE VIDEOS**

- LINK VIDEO MATLAB Ziegler y Nichols  
<https://www.youtube.com/watch?v=q8d9arKhFQc>
- LINK VIDEO Punto de Inflexión  
[http://www.dervor.com/derivadas/punto\\_inflexion.html](http://www.dervor.com/derivadas/punto_inflexion.html)

---

# **DEFINICION DE TERMINOS Y CONCEPTOS**

---

**ANEXO A**

### A. DEFINICION DE TERMINOS Y CONCEPTOS

- **CONTROL DE PROCESOS:** regulación o manipulación de variables que influye en la conducta de un proceso de tal manera que se pueda obtener un producto de calidad y en la cantidad deseada de manera eficiente.
- **AUTOMATIZACION:** Es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.
- **SCADA:** (Supervisory Control and Data Adquisition) se refiere a sistemas en los que un ordenador central se comunica con múltiples dispositivos a través de una red.
- **HMI:** Human Machine Interface. Interface Hombre Máquina.
- **ESTANDAR:** Son las normas que se establecen con el objetivo de garantizar la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes.
- **ETHERNET:** Es un estándar de transmisión de datos para redes de área local (LAN). También conocido como estándar IEEE 802.3.
- **MONITOREO:** Es el proceso sistemático de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento al progreso de un programa en pos de la consecución de sus objetivos, y para guiar las decisiones de gestión.
- **OPC:** OLE for Process Control. Es un estándar de comunicación, basado en una tecnología Microsoft, que ofrece una interfaz común para comunicación que permite que componentes software individuales interactúen y compartan datos. La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura client-server.

- **TAG:** Es una representación de un objeto dentro de un PLC o HMI. Tiene un nombre único, un tipo de dato y descripción.
- **VÁLVULA DE CONTROL:** Dispositivo motorizado que modifica la razón de flujo del fluido en un Sistema de Control de Proceso. Consta de una válvula conectada a un mecanismo actuador que es capaz de cambiar la posición de un elemento controlador de flujo en la válvula, como respuesta a una señal de controlador del sistema.
- **POSICIONADOR:** Instrumento que posiciona el vástago de una válvula cuando éste no presenta la presión aplicada para su movimiento. Este instrumento es uno de los más usados por las industrias debido a que aproxima a un valor casi exacto la posición del vástago, evitando así pérdidas que no favorecen a las empresas.
- **VARIADOR DE VELOCIDAD:** Dispositivo electrónico empleado para controlar la velocidad giratoria de una maquinaria, especialmente de motores a velocidades constantes o variables pero con valores precisos.
- **CAUDALIMETRO:** Instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse Medidores de Caudal, Medidores de Flujo o Flujómetros.
- **MINI-PLANTA:** Es una planta de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, que permita determinar si el proceso es técnica y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial.

- **INTERCAMBIADOR DE CALOR:** Dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. Son elementos fundamentales en los sistemas de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico, además de en aparatos de la vida cotidiana como calentadores, frigoríficos, calderas, ordenadores.
- **CONTROLADOR PID:** Es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.
- **PID:** consiste de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual. El Integral depende de los errores pasados y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control como la posición de una válvula de control o la potencia suministrada a un calentador.
- **FLUIDO:** Conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía, ante una fuerza aplicada sobre ellos, pues justamente fluyen.
- **EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL (EPP):** cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador o trabajadora para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin.

---

# **TABLAS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR**

---

**ANEXO B**



Grafico N° 1: Factores de Corrección MLTD Para Intercambiadores 3-6.

Grafico N°1 Factores de Corrección MLDT para intercambiadores 3-6

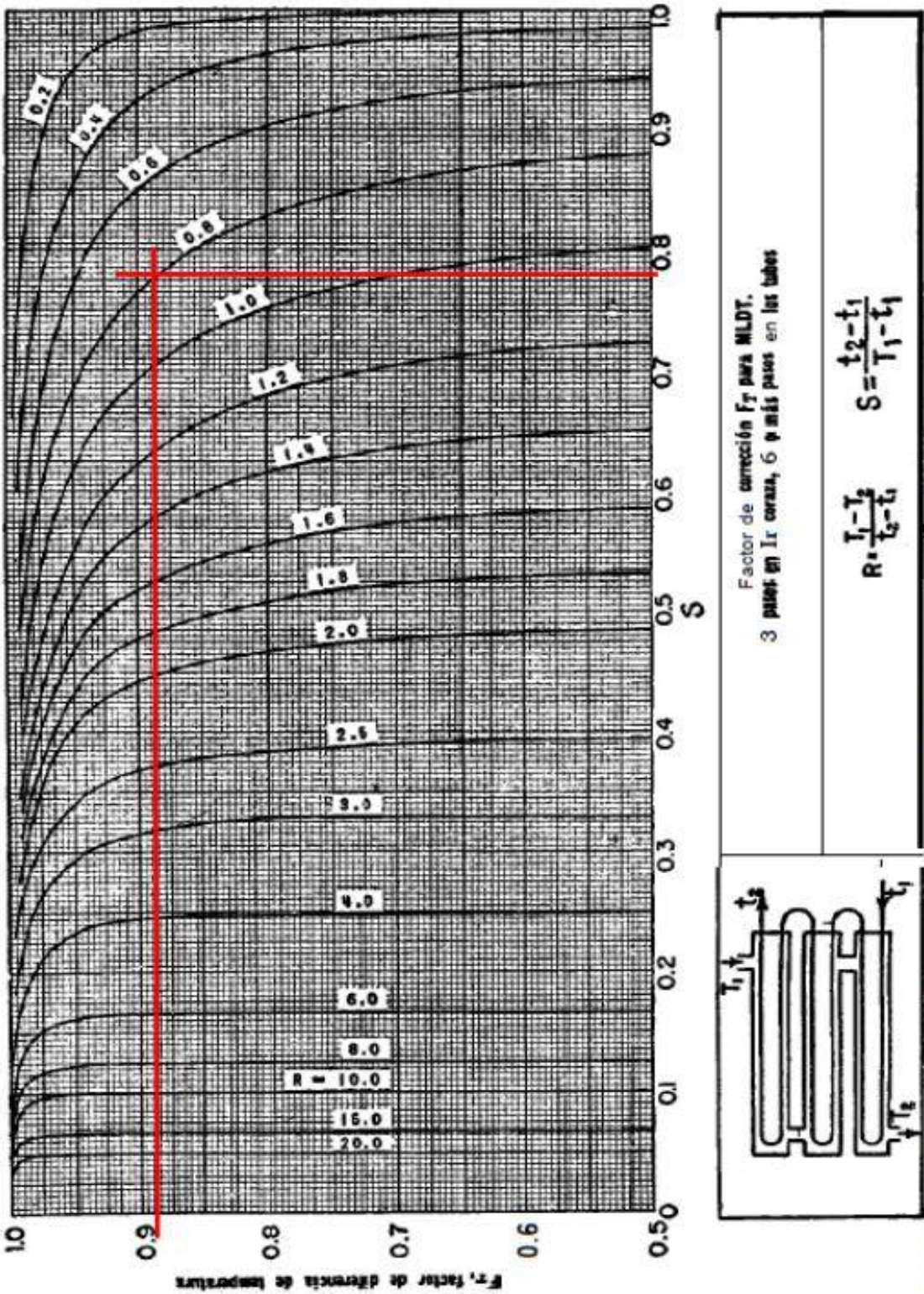
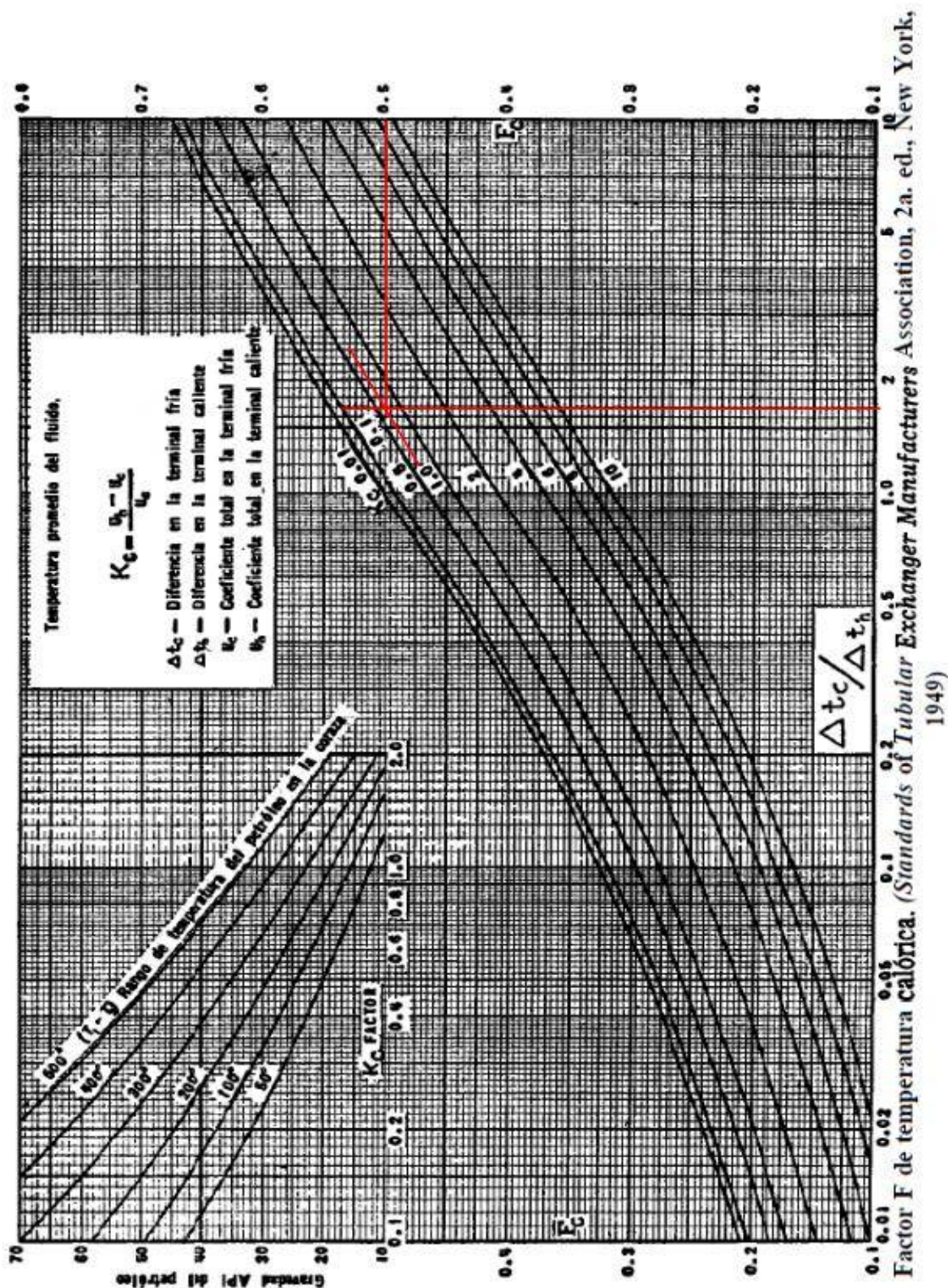


FIG. 20. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 3-6. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2.a. ed., New York 1949)



**Grafico N°2 Factores F de Temperatura Calórica**



**Fig. 17.** Factor F de temperatura calórica. (*Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 2a. ed., New York, 1949)

Grafico N° 3: Viscosidades de Líquidos (Fig. 14 Kern).

Grafico N° 3: Viiscosidades de Líquidos (Fig. 14 Kern)

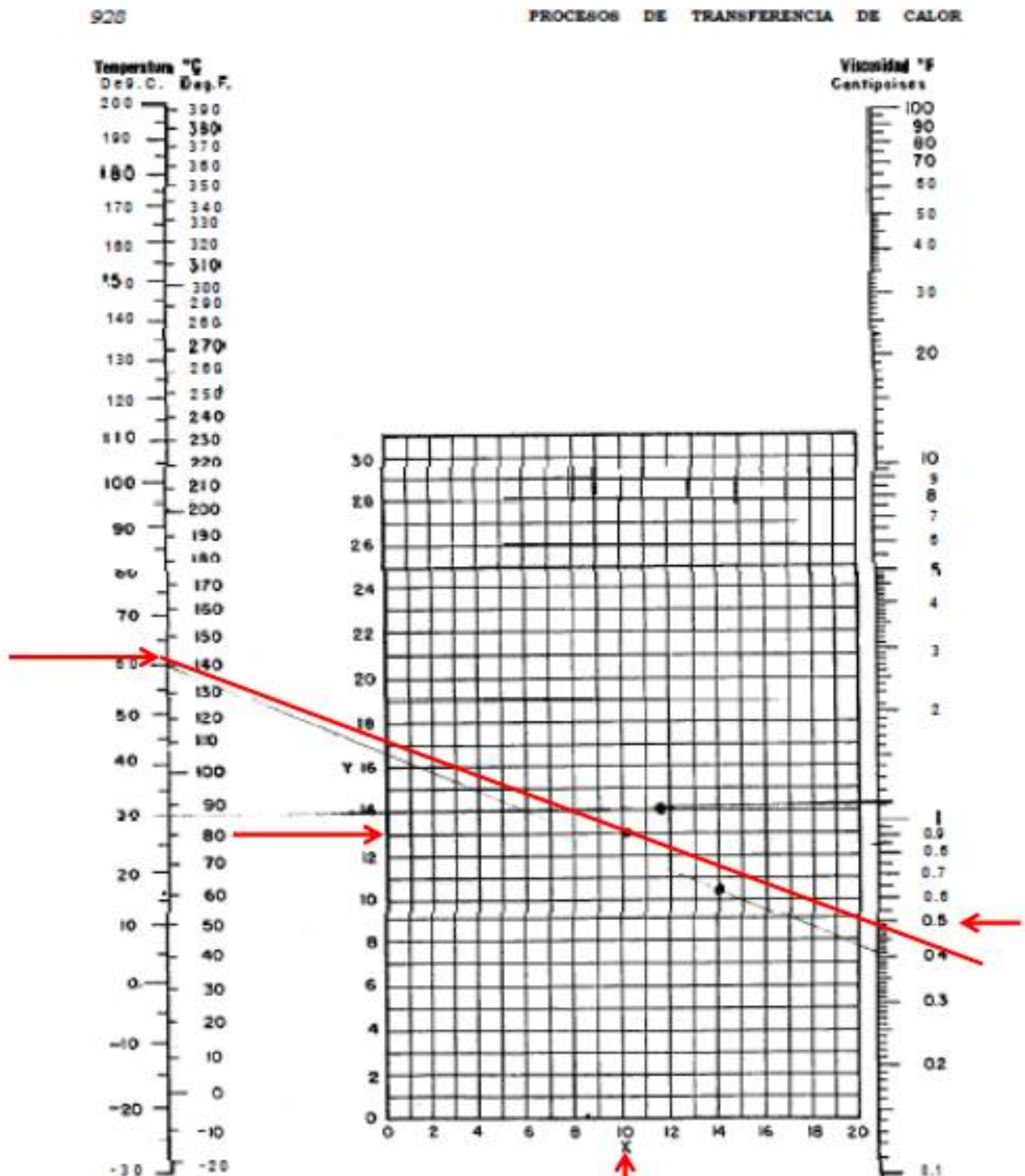


FIG. 14. Viscosidades de líquidos. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950)



Grafico N° 4: Factores de Fricción, Lado de la Coraza.

Gráfico N°4: Factores de Fricción – Lado de la coraza

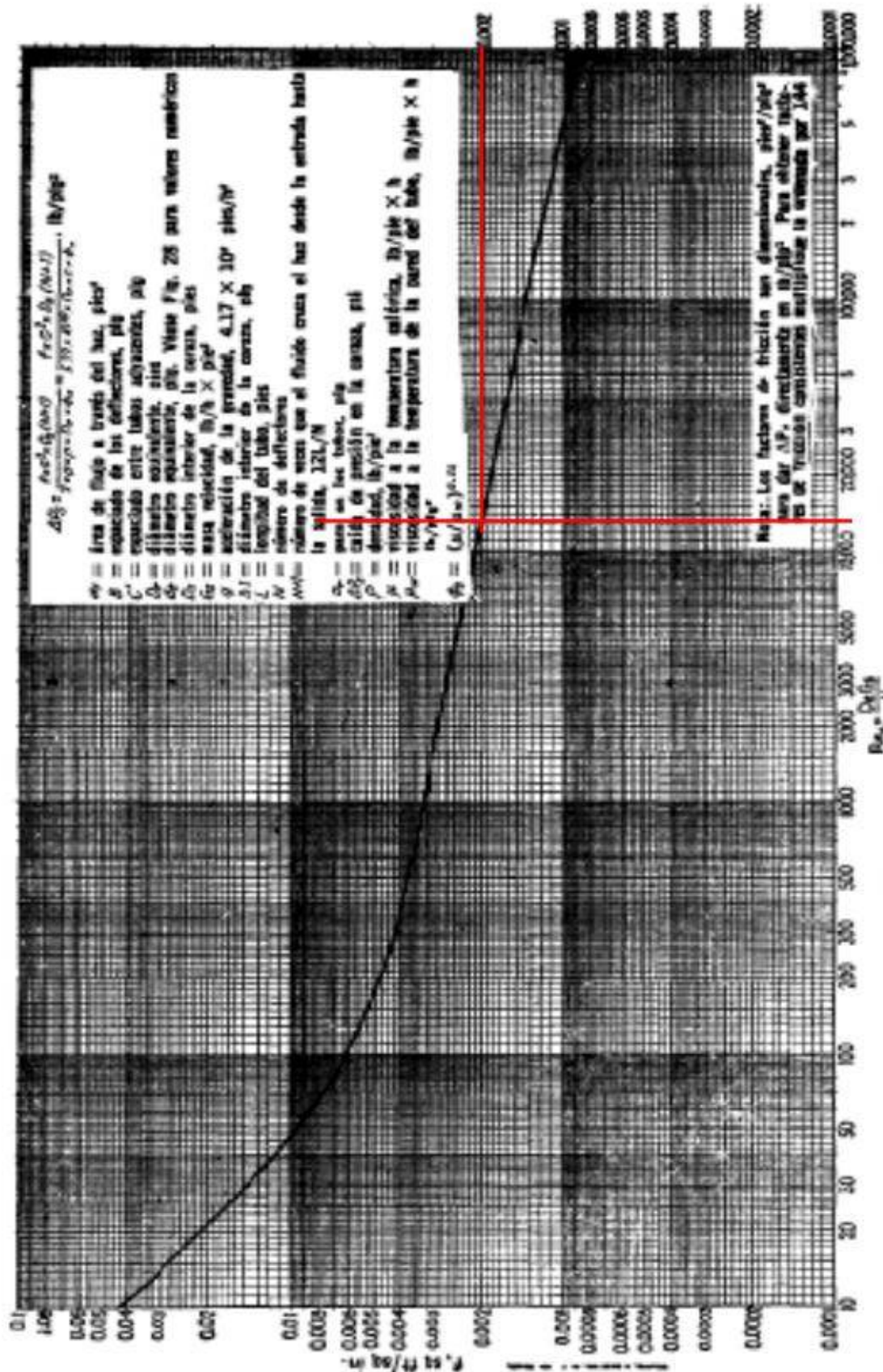


Fig. 29. Factores de fricción lado de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%



Grafico N° 6: Pérdida de Presión por Retorno Lado de Tubos.

Gráfico N°6 Pérdida de Presión por retorno la do de tubos

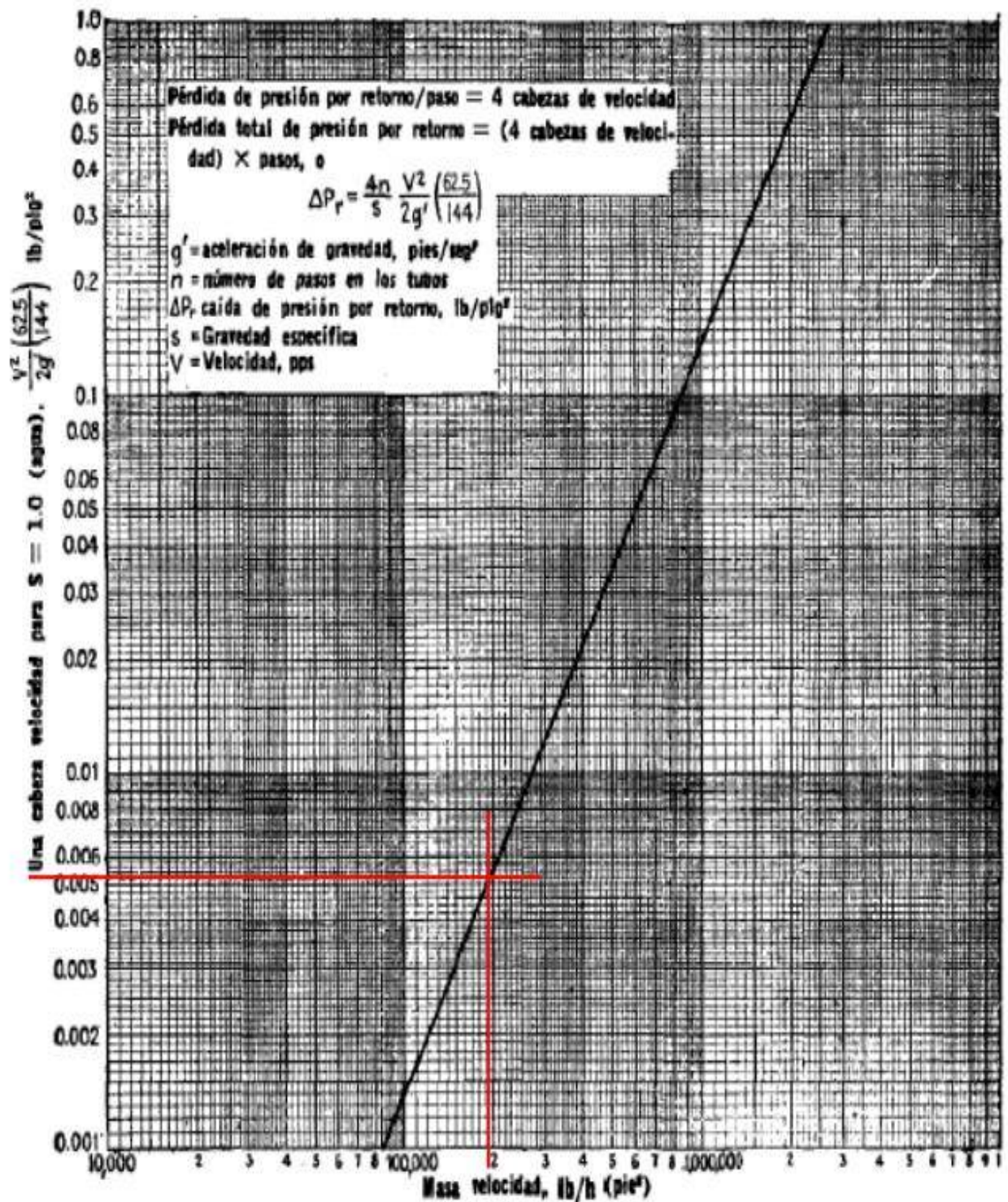


FIG. 27. Pérdida de presión por retorno, lado de tubos

Tabla N° 1: Calor Específico del Agua Entre 0 °C y 100 °C.

**Calor específico del agua entre 0 °C y 100 °C**

[www.vaxasoftware.com](http://www.vaxasoftware.com)

Temp. °C	Calor específico kJ K·kg	kcal K·kg	Temp. °C	Calor específico kJ K·kg	kcal K·kg	Temp. °C	Calor específico kJ K·kg	kcal K·kg
0 (hielo)	1,960	0,468	34	4,178	0,999	68	4,189	1,001
0	4,217	1,008	35	4,178	0,999	69	4,189	1,001
1	4,213	1,007	36	4,178	0,999	70	4,190	1,001
2	4,210	1,006	37	4,178	0,999	71	4,190	1,001
3	4,207	1,005	38	4,178	0,999	72	4,191	1,002
4	4,205	1,005	39	4,179	0,999	73	4,192	1,002
5	4,202	1,004	40	4,179	0,999	74	4,192	1,002
6	4,200	1,004	41	4,179	0,999	75	4,193	1,002
7	4,198	1,003	42	4,179	0,999	76	4,194	1,002
8	4,196	1,003	43	4,179	0,999	77	4,194	1,002
9	4,194	1,002	44	4,179	0,999	78	4,195	1,003
10	4,192	1,002	45	4,180	0,999	79	4,196	1,003
11	4,191	1,002	46	4,180	0,999	80	4,196	1,003
12	4,189	1,001	47	4,180	0,999	81	4,197	1,003
13	4,188	1,001	48	4,180	0,999	82	4,198	1,003
14	4,187	1,001	49	4,181	0,999	83	4,199	1,004
15	4,186	1,000	50	4,181	0,999	84	4,200	1,004
16	4,185	1,000	51	4,181	0,999	85	4,200	1,004
17	4,184	1,000	52	4,182	1,000	86	4,201	1,004
18	4,183	1,000	53	4,182	1,000	87	4,202	1,004
19	4,182	1,000	54	4,182	1,000	88	4,203	1,005
20	4,182	1,000	55	4,183	1,000	89	4,204	1,005
21	4,181	0,999	56	4,183	1,000	90	4,205	1,005
22	4,181	0,999	57	4,183	1,000	91	4,206	1,005
23	4,180	0,999	58	4,184	1,000	92	4,207	1,005
24	4,180	0,999	59	4,184	1,000	93	4,208	1,006
25	4,180	0,999	60	4,185	1,000	94	4,209	1,006
26	4,179	0,999	61	4,185	1,000	95	4,210	1,006
27	4,179	0,999	62	4,186	1,000	96	4,211	1,006
28	4,179	0,999	63	4,186	1,000	97	4,212	1,007
29	4,179	0,999	64	4,187	1,001	98	4,213	1,007
30	4,178	0,999	65	4,187	1,001	99	4,214	1,007
31	4,178	0,999	66	4,188	1,001	100	4,216	1,008
32	4,178	0,999	67	4,188	1,001	100 (gas)	2,080	0,497
33	4,178	0,999						

[www.vaxasoftware.com](http://www.vaxasoftware.com)



Tabla N° 2: Viscosidad Dinámica del Agua Líquida a Varias Temperaturas.

### Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792	34	0,000734	68	0,000416
1	0,001731	35	0,000720	69	0,000410
2	0,001674	36	0,000705	70	0,000404
3	0,001620	37	0,000692	71	0,000399
4	0,001569	38	0,000678	72	0,000394
5	0,001520	39	0,000666	73	0,000388
6	0,001473	40	0,000653	74	0,000383
7	0,001429	41	0,000641	75	0,000378
8	0,001386	42	0,000629	76	0,000373
9	0,001346	43	0,000618	77	0,000369
10	0,001308	44	0,000607	78	0,000364
11	0,001271	45	0,000596	79	0,000359
12	0,001236	46	0,000586	80	0,000355
13	0,001202	47	0,000576	81	0,000351
14	0,001170	48	0,000566	82	0,000346
15	0,001139	49	0,000556	83	0,000342
16	0,001109	50	0,000547	84	0,000338
17	0,001081	51	0,000538	85	0,000334
18	0,001054	52	0,000529	86	0,000330
19	0,001028	53	0,000521	87	0,000326
20	0,001003	54	0,000512	88	0,000322
21	0,000979	55	0,000504	89	0,000319
22	0,000955	56	0,000496	90	0,000315
23	0,000933	57	0,000489	91	0,000311
24	0,000911	58	0,000481	92	0,000308
25	0,000891	59	0,000474	93	0,000304
26	0,000871	60	0,000467	94	0,000301
27	0,000852	61	0,000460	95	0,000298
28	0,000833	62	0,000453	96	0,000295
29	0,000815	63	0,000447	97	0,000291
30	0,000798	64	0,000440	98	0,000288
31	0,000781	65	0,000434	99	0,000285
32	0,000765	66	0,000428	100	0,000282
33	0,000749	67	0,000422		

## TABLAS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla N° 3: Propiedades del Agua Líquida a Presión Atmosférica.

Tabla3: Conductividad Térmica del agua

Tabla 4.5: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica

T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$\beta \cdot 10^3$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.15230	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.20900	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.25940	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.3470	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.7230	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).



# TABLAS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla N° 4: Disposición de los Espejos de Tubos.

Tabla N° 4 \_Disposición de los Espejos deTubos

946

PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

**TABLA 9. DISPOSICION DE LOS ESPEJOS DE TUBOS (CUENTA DE TUBOS). ARREGLO EN CUADRO**

Tubos de $\frac{3}{4}$ " DE, arreglo en cuadro de 1 plg						Tubos de 1" DE, arreglo en cuadro de $1\frac{1}{4}$ plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	32	26	20	20		8	21	16	14		
10	52	52	40	36		10	32	32	26	24	
12	81	76	68	68	60	12	48	45	40	38	36
13 $\frac{1}{4}$	97	90	82	76	70	13 $\frac{1}{4}$	61	56	52	48	44
15 $\frac{1}{4}$	137	124	116	108	108	15 $\frac{1}{4}$	81	76	68	68	64
17 $\frac{1}{4}$	177	166	158	150	142	17 $\frac{1}{4}$	112	112	96	90	82
19 $\frac{1}{4}$	224	220	204	192	188	19 $\frac{1}{4}$	138	132	128	122	116
21 $\frac{1}{4}$	277	270	246	240	234	21 $\frac{1}{4}$	177	166	158	152	148
23 $\frac{1}{4}$	341	324	308	302	292	23 $\frac{1}{4}$	213	208	192	184	184
25	413	394	370	356	346	25	260	252	238	226	222
27	481	460	432	420	408	27	300	288	278	268	260
29	553	526	480	468	456	29	341	326	300	294	286
31	657	640	600	580	560	31	406	398	380	368	358
33	749	718	688	676	648	33	465	460	432	420	414
35	845	824	780	766	748	35	522	518	488	484	472
37	934	914	886	866	838	37	596	574	562	544	532
39	1049	1024	982	968	948	39	665	644	624	612	600

Tubos de $1\frac{1}{4}$ " DE, arreglo en cuadro de $1\frac{1}{16}$ plg						Tubos de $1\frac{1}{2}$ " DE, arreglo en cuadro de $1\frac{7}{8}$ plg					
10	16	12	10			12	16	16	12	12	
12	30	24	22	16	16	13 $\frac{1}{4}$	22	22	16	16	
13 $\frac{1}{4}$	32	30	30	22	22	15 $\frac{1}{4}$	29	29	25	24	22
15 $\frac{1}{4}$	44	40	37	35	31	17 $\frac{1}{4}$	39	39	34	32	29
17 $\frac{1}{4}$	56	53	51	48	44	19 $\frac{1}{4}$	50	48	45	43	39
19 $\frac{1}{4}$	78	73	71	64	56	21 $\frac{1}{4}$	62	60	57	54	50
21 $\frac{1}{4}$	96	90	86	82	78	23 $\frac{1}{4}$	78	74	70	66	62
23 $\frac{1}{4}$	127	112	106	102	96	25	94	90	86	84	78
25	140	135	127	123	115	27	112	108	102	98	94
27	166	160	151	146	140	29	131	127	120	116	112
29	193	188	178	174	166	31	151	146	141	138	131
31	226	220	209	202	193	33	176	170	164	160	151
33	258	252	244	238	226	35	202	196	188	182	176
35	293	287	275	268	258	37	224	220	217	210	202
37	334	322	311	304	293	39	252	246	237	230	224
39	370	362	348	342	336						



Tabla N° 5: Viscosidades de Líquidos.

Tabla N° 5: Viscosidades de Líquidos

A P E N D I C E

927

VISCOSIDADES DE LIQUIDOS\*

Para usarse como Coordenadas con la Fig. 14

Líquido	X	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	90.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.6	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35.0%	7.9	17.0	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butírico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon 12	16.8	5.6
Acido Fórmico	10.7	15.8	Freon 21	15.7	7.5
Acido Isobutírico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8	Freon 113	12.5	11.4
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfúrico 110%	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfúrico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfúrico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alílico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.8
Alcohol Amílico	7.5	18.4	Ioduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butílico	8.6	17.2	Ioduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhídrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutílico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropílico	8.2	16.0	Metiletilcetona	13.9	8.6
Alcohol Octílico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propílico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	116.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26 %	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrido Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Amiscol	12.3	13.5	Oxalato de Dipropilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bióxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bióxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.0
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera CaCl <sub>2</sub> 25%	6.6	15.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera NaCl 25%	10.2	16.6
Bromotolueno	20.0	15.9	Sales	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fósforo	13.8	16.7
Cloroformo	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5
Clorotolueno, orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fósforo	16.2	16.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.4
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfúrico	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9

\* De Perry, J. H., "Chemical Engineers' Handbook 3d. ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.

Tabla N° 6: Factores de Obstrucción.

**Tabla N°6\_Factores de Obstrucción**

**TABLA 12. FACTORES DE OBSTRUCCION \***

Temperatura del medio calefactor .....	Hasta 240°F		240-400°F †	
Temperatura del agua .....	125°F o menos		Más de 125°F	
Agua	Velocidad del agua, pps		Velocidad del agua, pps	
	3 pies o menos	Más de 3 pies	3 pies o menos	Más de 3 pies
Agua de mar .....	0.0005	0.0005	0.001	0.001
<b>Salmuera</b> natural .....	0.002	0.001	0.003	0.002
Torre de enfriamiento y tanque con rocío artificial :				
Agua de compensación tratada .....	0.001	0.001	0.002	0.002
<b>Sin tratar</b> .....	0.003	0.003	0.005	0.004
Agua de la ciudad o de pozo (como Grandes Lagos) .....	0.001	0.001	0.002	0.002
Grandes Lagos .....	0.001	0.001	0.002	0.002
Agua de río:				
Mínimo .....	0.002	0.001	0.003	0.002
Mississippi .....	0.003	0.002	0.004	0.003
Delaware, Schuylkill .....	0.003	0.002	0.004	0.003
East River y New York Bay .....	0.003	0.002	0.004	0.003
Canal sanitario de Chicago .....	0.008	0.006	0.010	0.008
Lodosa o turbia .....	0.003	0.002	0.004	0.003
Dura (más de 15 granos/gal) .....	0.003	0.003	0.005	0.005
Enfriamiento de máquinas .....	0.001	0.001	0.001	0.001
Destilada .....	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Alimentación tratada para calderas .....	0.001	0.0005	0.001	0.001
Purga de calderas .....	0.002	0.002	0.002	0.002

† Las cifras de las últimas dos columnas se basan en una temperatura del medio calefactor de 240 a 400°F. Si la temperatura de este medio es mayor de 400°F, y si se sabe que el medio enfriador forma depósitos, estas cifras deben modificarse convenientemente.



# TABLAS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla N° 7: Datos de Tubos para Intercambiadores de Calor.

**TABLA 10. DATOS DE TUBOS PARA CONDENSADORES  
E INTERCAMBIADORES DE CALOR**

Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lin. pies <sup>2</sup>		Peso por pie lineal, lb, de acero
					Exterior	Interior	
1/4	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
3/4	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	<b>0.455</b>		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	<b>0.479</b>		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
	17	0.058	0.884	0.613		0.2314	0.639
	18	0.049	0.902	0.639		0.2361	0.545
1 1/4	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
	17	0.058	1.13	1.01		0.2969	0.808
	18	0.049	1.15	1.04		0.3015	0.688
1 3/4	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	<b>1.37</b>
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47		0.3587	1.09
	17	0.058	1.38	1.50		0.3623	0.978
	18	0.049	1.40	1.54		0.3670	0.831

**TABLAS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR**

Tabla N° 8: Dimensiones de Tubería de Acero.

**TABLA 11. DIMENSIONES DE TUBERIA DE ACERO (IPS )**

Tamaño nominal del tubo, IPS plg	DE, plg	Cédula No.	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lineal, pies <sup>2</sup> /pie		Peso por pie lineal, lb de acero
					Exterior	Interior	
1/8	0.405	40* 80†	0.269 0.215	0.058 0.036	0.106	0.070 0.056	0.25 0.32
1/4	0.540	40* 80†	0.364 0.302	0.104 0.072	0.141	0.095 0.079	0.43 0.54
3/8	0.675	40* 80†	0.493 0.423	0.192 0.141	0.177	0.129 <b>0.111</b>	0.57 0.74
1/2	0.840	40* 80†	0.622 0.546	0.304 0.235	0.220	0.163 0.143	0.85 1.09
3/4	1.05	40* 80†	0.824 0.742	0.534 0.432	0.275	0.216 0.194	1.13 1.48
1	1.32	40* 80†	1.049 0.957	0.864 0.718	0.344	0.274 0.250	1.68 <b>2.17</b>
1 1/4	1.66	40* 80†	1.380 1.278	1.50 1.28	0.435	0.362 0.335	2.28 <b>3.00</b>
1 1/2	<b>1.90</b>	40* 80†	1.610 1.500	2.04 1.76	0.498	0.422 0.393	2.72 3.64
2	2.38	40* 80†	2.067 1.939	3.35 2.95	0.622	0.542 0.508	3.66 5.03
2 1/4	2.38	40* 80†	2.469 2.323	4.79 4.23	0.753	0.647 0.609	5.80 7.67
3	3.50	40* 80†	3.068 2.900	7.38 6.61	<b>0.917</b>	<b>0.804</b> 0.760	7.58 10.3
4	4.50	40* 80†	4.026 3.826	12.7 11.5	1.178	<b>1.055</b> <b>1.002</b>	<b>10.8</b> <b>15.0</b>
6	6.625	40* 80†	6.065 5.761	28.9 26.1	1.734	1.590 1.510	19.0 28.6
8	8.625	40* 80†	7.981 7.625	50.0 45.7	2.258	2.090 <b>2.000</b>	28.6 43.4
10	10.75	40* 60	10.02 9.75	<b>78.8</b> <b>74.6</b>	2.814	2.62 2.55	40.5 54.8
12	<b>12.75</b>	30	<b>12.09</b>	115	3.338	3.17	43.8
14	<b>14.0</b>	30	<b>13.25</b>	138	3.665	3.47	54.6
16	16.0	30	15.25	183	4.189	4.00	62.6
18	18.0	20†	17.25	234	4.712	4.52	<b>72.7</b>
20	20.0	20	19.25	291	5.236	5.05	<b>78.6</b>
22	22.0	20†	21.25	355	5.747	<b>5.56</b>	<b>84.0</b>
24	24.0	20	23.25	425	6.283	<b>6.09</b>	<b>94.7</b>

---

# **PROGRAMA PARA DETERMINAR PARAMETROS PID**

---

**ANEXO C**

## B. PROGRAMA PARA DETERMINAR LOS PARAMETROS DEL PID UTILIZANDO EL METODO DE ZIEGLER NICHOLS.

```

clc
clear all
close all
num = [219.74];
den = [1 0.11 1.94e-3];
figure();
step(num,den);
figure();
rlocus(num,den);

dt=0.05;
t = 0:dt:350;
H=tf(num,den);
pp=pole(H);
y = step(H,t);
dy=diff(y)/dt;
[m,p]=max(dy);
d2y=diff(dy)/dt;
yi=y(p);
ti=t(p);
L=ti-yi/m;
Tau=(y(end)-yi)/m+ti-L;
figure();
plot(t,y,'b',[0 L L+Tau t(end)],[0 0 y(end) y(end)],'k')

```

**%CONTROL PID CON 1º METODO Z-N**

```

Kp=1.2*Tau/L;
Ti=2*L;
Td=0.5*L;

```

```

Ki=Kp/Ti;
Kd=Kp*Td;

```

```

G=tf([Kd Kp Ki],[1 0]);%CONTROLADOR
%sus zero estan en -1/L

```

%Lazo cerrado

```
HLC=feedback(G*H,1);  
figure();  
step(HLC);  
figure()  
pzmap(HLC)  
grid  
figure()  
rlocus(HLC)  
grid
```

%REFINAMIENTOS

```
Kp1=1.5*Kp;  
Kd1=3*Kd;  
Ki1=1.0*Ki;
```

```
G1=tf([Kd1 Kp1 Ki1],[1 0]);%CONTROLADOR  
HLC1=feedback(G1*H,1);  
figure()  
step(H,HLC,HLC1)  
legend('Sistema Original','PID Z-N','PID Refinado')
```