



UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PÁEZ

**DISEÑO DE UNA MEJORA PARA EL SISTEMA DE CONTROL
AUTOMÁTICO DEL LAZO DE TEMPERATURA T-700 DE LA PLANTA
PILOTO DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

Autora: Granadillo Carmen.

C. I.: V-17.840.448

**Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394**



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DE UNA MEJORA PARA EL SISTEMA DE CONTROL
AUTOMÁTICO DEL LAZO DE TEMPERATURA T-700 DE LA PLANTA
PILOTO DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Electrónico**

Autora: Granadillo Carmen
C. I.: V-17.840.448
Tutor: MSc. Luis G. De Sousa P.
C. I.: V-17.191.975

San Diego, Noviembre de 2017



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, **LUIS G. DE SOUSA P.** portador de la cédula de identidad N° V-17.191.975, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por la ciudadana, GRANADILLO MELÉNDEZ CARMEN JULIA portadora de la cédula de identidad N° V-17.840.448, titulado: “**DISEÑO DE UNA MEJORA PARA EL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DEL LAZO DE TEMPERATURA T-700 DE LA PLANTA PILOTO DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**”, presentado como requisito parcial para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO, acepta la tutoría del mencionado proyecto durante su etapa de desarrollo hasta su elaboración y evaluación según las condiciones de la Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad José Antonio Páez y sus correspondientes reglamentos.

En San Diego, a los 7 días del mes de noviembre del año dos mil diecisiete.

Luis G. De Sousa P.
CI.: V-17.191.975

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Objetivos de la Investigación	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación de la Investigación.....	5
1.5 Alcance	5
1.6 Limitaciones	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	7
1.7 Antecedentes.....	7
1.8 Bases Teóricas	8
2.2.1 Sistemas de control	9
2.3 Intercambiador de calor	11
2.3.1 Tipos de intercambiador de calor.....	11
2.4 Definición de Términos Básicos.....	14
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	16
3.1 Tipo de Investigación	16
3.2 Diseño de la Investigación.....	16
3.3 Nivel de la investigación	17
3.4 Población y Muestra	17
3.5 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	17
3.6 Fases Metodológicas.....	18
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	19

4.1 Fase I: Diagnóstico de la situación actual del lazo de control de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez	19
4.2 Fase II: Determinación de las variables involucradas que permitan automatizar el proceso de control de temperatura con el intercambiador de calor.	24
4.2.1 Balance de energía en la coraza del IQ-1.....	29
4.2.2 Balance de energía en las tuberías del refrigerante del IQ-1	31
4.3 Fase III: Determinación la factibilidad de la mejora del sistema de control automático del lazo de temperatura T-700.....	32
4.3.1 Factibilidad técnica	32
4.3.2 Factibilidad operativa.....	33
4.3.3 Factibilidad económica	34
4.4 Fase IV: Diseño de una propuesta para mejorar el control automático del lazo de temperatura T-700.	35
4.4.1 Sintonización de los controladores PI y PID a través del método de las oscilaciones continuas de Ziegler & Nichols	35
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Listado de dispositivos para el control del lazo de temperatura	21
Tabla 2. Características de las bombas B-100 y B-200	22
Tabla 3. Placas orificio FE-300 y FE-900.....	22
Tabla 4. Transmisores e indicadores de flujo FIT-300 y FIT-900.....	22
Tabla 5. Características de las válvulas manuales	23
Tabla 6. Válvulas de control de flujo.....	23
Tabla 7. Transmisor e indicador de temperatura TIT-700	23
Tabla 8. Transmisor e indicador de temperatura TIT-704	24
Tabla 9. Datos del intercambiador de calor IQ-1	25
Tabla 10. Mediciones del IQ-1, realizadas en el laboratorio	25
Tabla 11. Dimensiones físicas del IQ-1	26
Tabla 12. Ensayos de transferencia de calor con el IQ-1	27
Tabla 13. Especificaciones técnicas de la válvula de control recomendada.....	32
Tabla 14. Especificaciones técnicas del actuador recomendado.....	33
Tabla 15. Especificaciones técnicas del elemento primario de flujo recomendado....	33
Tabla 16. Especificaciones técnicas del transmisor de presión diferencial recomendado	33
Tabla 17. Modelo y costo de la instrumentación recomendada	34
Tabla 18. Cuota por período para mantenimiento y actualización de UJAP	34
Tabla 19. Regla de sintonía basada en K_{cr} y P_{cr}	37
Tabla 20. Parámetros del controlador interno	38
Tabla 21. Parámetros del controlador externo	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de control en lazo abierto.	9
Figura 2. Esquema de control en lazo cerrado.	10
Figura 3. Esquema de control en lazo cerrado.	11
Figura 4. Intercambiador de calor de flujo paralelo y el perfil de temperatura asociado.	12
Figura 5. Intercambiador de calor de contraflujo y el perfil de temperatura asociado.	13
Figura 6. Intercambiador de calor de tubos y coraza.	14
Figura 7. P&ID de lazo de temperatura T-700.....	20
Figura 8. Diagrama de bloques del control automático del IQ-1.....	35
Figura 9. Respuesta del sistema ante un escalón unitario	36
Figura 10. Oscilaciones continuas con período P_{cr}	36
Figura 11. Diagrama de bloques del lazo interno.	37
Figura 12. Respuesta oscilante del lazo interno con K_{cr}	38
Figura 13. Respuesta del lazo interno sincronizado.....	39
Figura 14. Respuesta del lazo interno optimizado.	39
Figura 15. Respuesta del lazo interno con ajuste manual.	40
Figura 16. Diagrama de bloques del control en cascada para el intercambiador de calor IQ-1.	40
Figura 17. Respuesta oscilante del sistema.	41
Figura 18. Respuesta del sistema con controlador PID sincronizado	42
Figura 19. Respuesta del sistema con parámetros modificados.....	42



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DE UNA MEJORA PARA EL SISTEMA DE CONTROL
AUTOMÁTICO DEL LAZO DE TEMPERATURA T-700 DE LA PLANTA
PILOTO DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

Autora: Granadillo Meléndez, Carmen Julia.

Tutor: MSc. Luis G. De Sousa Páez.

Fecha: Noviembre, 2017

RESUMEN

El trabajo de investigación tiene como objetivo general proponer una mejora para el sistema de control automático del lazo de temperatura T-700 de la planta piloto ubicada en el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad José Antonio Páez (UJAP). En principio, se realizó una investigación descriptiva en torno a la situación actual de la planta piloto, a partir de la misma, se plantea un control automático en aras de satisfacer la necesidad de hacer del lazo de control de temperatura, un proceso estable, con niveles de temperatura y tiempos de operación acordes a las jornadas académicas. Esta mejora se basa en controlar la dinámica del fluido refrigerante del intercambiador de calor, partiendo de la diferencia de temperatura entre la entrada del fluido de proceso y la referencia de entrada al tanque de almacenamiento, empleando instrumentación que permita monitorear, transmitir y controlar los cambios de flujo del fluido refrigerante dentro del intercambiador.

Descriptores: Control automático, intercambiador de calor, laboratorio de control de procesos, lazo de temperatura, planta piloto.

INTRODUCCIÓN

Es de saber, que los procesos industriales evolucionan constantemente en función de la obtención de productos de excelente calidad, en menor tiempo y al menor costo. Para lograr esta optimización en la producción, se requiere de equipos especializados que mantengan la materia prima en condiciones de trabajo adecuadas durante sus diferentes fases de transformación a lo largo del proceso. En este orden de ideas, uno de los equipos utilizados para acondicionar la temperatura de fluidos en los procesos industriales, es el intercambiador de calor.

Los intercambiadores de calor son dispositivos que modifican la temperatura de dos fluidos, manipulando la temperatura de un fluido proveniente de algún proceso previo; esto lo hace mediante el contacto entre la superficie que separa el fluido de proceso con el fluido refrigerante.

Ahora bien, en los procesos industriales, para obtener la temperatura deseada en el tiempo justo, se necesita establecer un riguroso sistema de control que responda ante las variaciones de flujo y temperatura de los elementos involucrados. En tal sentido, el presente proyecto se basa en la propuesta de una mejora en el sistema de control del lazo de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez.

Es importante mencionar que, la presente investigación está estructurada en cuatro capítulos; el primer capítulo, corresponde al problema, que engloba el planteamiento del problema, formulación, objetivos, justificación de la investigación, alcance y las limitaciones presentadas durante el desarrollo de la misma.

Por su parte, el segundo capítulo aborda el marco teórico, donde se mencionan los antecedentes y se describen los conceptos básicos manejados en toda la investigación. Seguidamente, el tercer capítulo, se refiere al marco metodológico, en el cual se explica desde el punto de vista teórico la metodología empleada para el

desarrollo de la investigación, se identifica el tipo de investigación y se especifican las técnicas empleadas para la recolección de los datos.

En el cuarto capítulo, se describen los recursos empleados para alcanzar los resultados y cumplir con los objetivos propuestos al inicio del estudio. Finalmente, se incluye la bibliografía consultada para recabar la información necesaria durante el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Por lo general, las industrias que requieren cambios de temperatura en los fluidos de proceso necesitan emplear intercambiadores de calor, por lo que son un elemento común y poseen un principio de funcionamiento muy intuitivo. Sin embargo, su diseño depende de la situación particular en la que será empleado, pues se requiere conocer las características tanto del material al cual desea cambiar la temperatura, como el material que ayudará a realizar la transferencia calor, el volumen de las masas, las condiciones ambientales, entre otros factores.

Debido a que es un proceso frecuente en la industria, la Universidad José Antonio Páez ha dispuesto un espacio para la realización de prácticas de laboratorio con el objeto de recrear distintas fases de la actividad industrial, específicamente donde se puedan desarrollar y aplicar las teorías de control de procesos. Tal espacio es el laboratorio de control de procesos, un auxiliar didáctico preparado para realizar prácticas de las técnicas de control automático que se dictan en las materias de la universidad.

Dicho laboratorio se encuentra constituido básicamente por cinco tanques y un conjunto de tuberías que los interconecta. Los tanques de proceso son: un tanque de entrada, un tanque atmosférico, un tanque hidroneumático, un calentador de agua y el intercambiador de calor, con un conjunto de tuberías que permiten interconectar estos dispositivos para mover los fluidos involucrados. La idea es movilizar el agua a través de circuitos de flujo controlado hacia los tres tanques fundamentales, entre ellos el tanque de calentamiento por lo que luego se tiene un intercambiador de calor para que el agua pueda regresar al tanque de reserva con una temperatura más baja y garantizar la continuidad del proceso de calentamiento.

Inicialmente, el agua que proviene del tanque de reserva sale a temperatura ambiente y es llevada hasta el calentador que eleva su temperatura entre 42° y 45° C, luego pasa por el intercambiador de calor para bajarla entre 35° y 37° C y devolverla al tanque de reserva. Para realizar esta acción el intercambiador utiliza como refrigerante agua templada suministrada por el sistema de enfriadores de la universidad, la temperatura del refrigerante no es constante, porque depende de la carga que esté conectada en el momento.

Si el intercambiador de calor no cumple automática y continuamente su función, el agua retornaría al tanque de reserva con temperatura cercana a la que sale del calentador y progresivamente irá calentando el agua en el tanque. Al cabo de un tiempo el agua que circula en el lazo estaría a una temperatura por encima de los límites de trabajo y el proceso de calentamiento debe detenerse, o caso contrario, si el refrigerante está por debajo de la temperatura normal, el fluido de proceso bajaría su temperatura bruscamente, lo que implica variaciones significativas en los tiempos de calentamiento, situaciones que implican una demora a la hora de llevar a cabo las prácticas en el laboratorio.

1.2 Formulación del Problema

Según lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente interrogante: ¿De qué manera se podrá mantener el lazo de temperatura de la planta piloto funcionando de forma continua y automática durante el desarrollo de las prácticas?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una mejora para el sistema de control automático del lazo de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diagnosticar la situación actual del sistema de control del lazo de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez.
2. Determinar las variables involucradas que permitan automatizar el proceso de control de temperatura con el intercambiador de calor.
3. Determinar la factibilidad de la mejora del sistema de control automático del lazo de temperatura T-700.
4. Diseñar una propuesta de mejora del lazo de control automático del lazo de temperatura T-700.

1.4 Justificación de la Investigación

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar y proponer una mejora en el sistema de control automático del lazo de temperatura del laboratorio de control de procesos implementado actualmente, con la finalidad de optimizar los tiempos de operación del intercambiador de calor y así agilizar la realización de las prácticas que en él se llevan a cabo, sacando el máximo provecho a los equipos con los que cuenta el laboratorio, beneficiando a los profesores que imparten conocimientos en este espacio ya que cuentan con una herramienta didáctica, a los estudiantes que hacen vida en el laboratorio, al trabajar y manipular procesos de control real al nivel de los encontrados en el ámbito industrial, elevando su aprendizaje como futuros profesionales.

1.5 Alcance

Este trabajo incluye el diseño de una mejora en el lazo de temperatura del laboratorio de control de procesos a través de la manipulación del flujo del refrigerante que entra al intercambiador de calor basándose en la temperatura del fluido de proceso que sale del intercambiador de calor, para lo cual se propondrá la instalación adicional de una electroválvula, placa orificio y transmisor de presión diferencial.

1.6 Limitaciones

De acuerdo con Ávila (2012), “una limitación consiste en que se deja de estudiar un aspecto del problema debido a alguna razón”. En este sentido, una de las limitaciones presentadas durante el desarrollo de la investigación es la inoperatividad de ciertos equipos del laboratorio, situación que reduce la familiarización con el mismo y la obtención de datos que permitan describir plenamente la dinámica de los procesos, aunado a la falta de documentación sobre ciertos los equipos que forman parte del laboratorio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1.7 Antecedentes

Álvarez, G. y Rojas, C., (2016) desarrollaron un trabajo titulado **“Desarrollo de material didáctico para el laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez utilizando el software Delta V”** para optar por el título de Ingeniero Electricista de la Universidad de Carabobo (Venezuela). Los autores realizaron una investigación tipo proyecto factible, cuyo objetivo fue desarrollar material didáctico práctico en el laboratorio de control de procesos utilizando el software Delta V, concluyendo que con el desarrollo de esquemas para identificar las conexiones en el tablero y la planta se facilita la manipulación y análisis del funcionamiento del sistema completo.

La documentación recopilada en este trabajo sirve como base para conocer la instrumentación implementada en el laboratorio, así como también representa una guía en el manejo del software Delta V, necesaria para el desarrollo de la presente investigación.

Vilaña, D. y Maila, V., (2016), en el trabajo titulado **“Diseño y construcción un intercambiador de calor de placas y tubos con flujo cruzado para calefacción de una vivienda tipo rural de 54 m²”** para optar por el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas (Ecuador), desarrolló un proyecto factible en el que se describe el diseño térmico del intercambiador de calor según los datos de temperatura del fluido caliente generado por el caldero y en base al análisis energético para calentar la vivienda, las pruebas realizadas permiten observar el funcionamiento real del intercambiador de calor determinando la eficiencia y validando los datos calculados en el diseño térmico, tomando en cuenta las presiones de temperatura de entrada y salida del fluido caliente y del fluido frío se toma en cuenta la temperatura y humedad relativa interna en la vivienda para brindar una zona de Confort a los

habitantes bajo el estado ácido por la sociedad americana de calefacción refrigeración y aire acondicionado.

El trabajo consultado es una referencia para el diseño e implementación de intercambiadores de calor, técnicas empleadas, materiales y normas que han sido aprobadas y evidencian su funcionamiento.

Paredes, A. y Barros, C., (2016) en su trabajo **“Modelamiento y simulación de un intercambiador de calor”** enfocan su estudio en un proyecto factible acerca del modelamiento matemático y simulación de un intercambiador de tubos y coraza, utilizando diferentes simuladores: MATLAB, SCILAB y MODELICA, de igual manera analizan y resuelven las ecuaciones que modelan el sistema dinámico del intercambiador. En este sentido, el desarrollo de las ecuaciones y simulaciones planteadas en el trabajo citado anteriormente, podrán contrastar procedimientos y resultados obtenidos en esta investigación.

1.8 Bases Teóricas

Para poder cumplir con el objetivo general de este proyecto se debe conocer las labores propias de un sistema de control de temperatura, las funciones de transferencia del intercambiador, acciones de control entre otros puntos de interés. También se presenta un conjunto de definiciones que son necesarias para comprender el alcance de este trabajo.

Al respecto, Cárdenas (2010) expresa lo siguiente sobre las bases teóricas:

Cuando se desarrolla un proyecto que contempla la construcción, ampliación o modificación de una planta, instalación industrial, o cualquier trabajo de importancia como es la adecuación tecnológica de un sistema contra incendios, implica el manejo de diversos recursos: materiales, económicos y humanos. No se debe realizar ningún trabajo de importancia sin antes hacer el proyecto de ingeniería. (p. 80).

2.2.1 Sistemas de control

En los procesos industriales obtener un producto de calidad requiere del cumplimiento riguroso de operaciones controladas, que enlazadas conforman un sistema de control. Esto es un conjunto de componentes conectados entre sí capaces de llevar a cabo funciones de acción y regulación, con la finalidad de mantener dentro de un rango las variables del proceso. Los mecanismos de respuesta deben ser tales, que independientemente de las perturbaciones el sistema de control debe estar programado para responder de manera inmediata ante agentes externos.

Según la forma en la que el sistema toma las decisiones para actuar, se tienen dos tipos de sistemas de control:

Sistemas de control en lazo abierto

En los sistemas de control a lazo abierto, como se observa en la figura 1, la acción de control se calcula conociendo la dinámica del sistema, los valores de consigna y haciendo estimaciones sobre las perturbaciones, es decir, la salida no tiene efecto en la acción de control. Por lo general, este tipo de control es empleado en sistemas que operan en una base de tiempo, en donde se conocen con anticipación las entradas y en los que no hay perturbaciones.

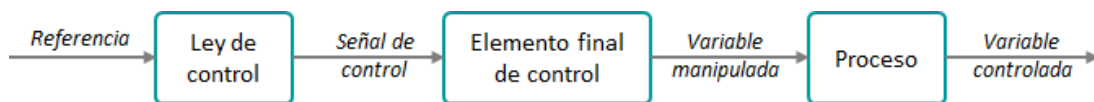


Figura 1. Esquema de control en lazo abierto.

Fuente: Elaboración propia (2017).

Sistemas de control en lazo cerrado

Los sistemas en lazo cerrado (ver figura 2), se llevan a cabo mediante la acción de control calculada en función del error entre la variable controlada y el valor deseado de entrada, esto se debe al uso de la retroalimentación, volviendo la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones

internas de los parámetros. Los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventaja cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema.

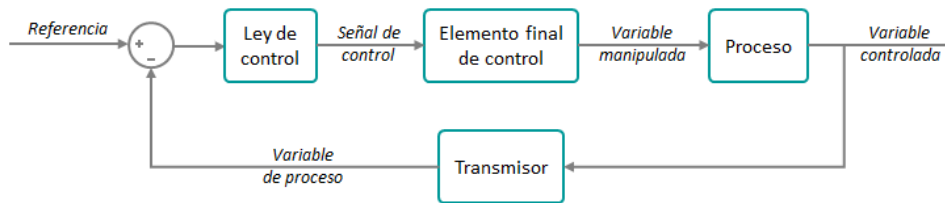


Figura 2. Esquema de control en lazo cerrado.

Fuente: Elaboración propia (2017).

Control en cascada

En la figura 3 se observa el control en cascada, el cual involucra sistemas ordenados de manera tal que la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación, formando tantos lazos de control anidados como sea necesario. Esta configuración permite eliminar el efecto de algunas perturbaciones haciendo la respuesta de regulación del sistema más rápida y estable, mejorando de esta forma la dinámica del lazo de control. La estructura más común de un control en cascada está dada por dos lazos, un lazo primario también llamado maestro y un lazo secundario denominado esclavo, la variable secundaria debe tener una dinámica más rápida que la variable primaria.

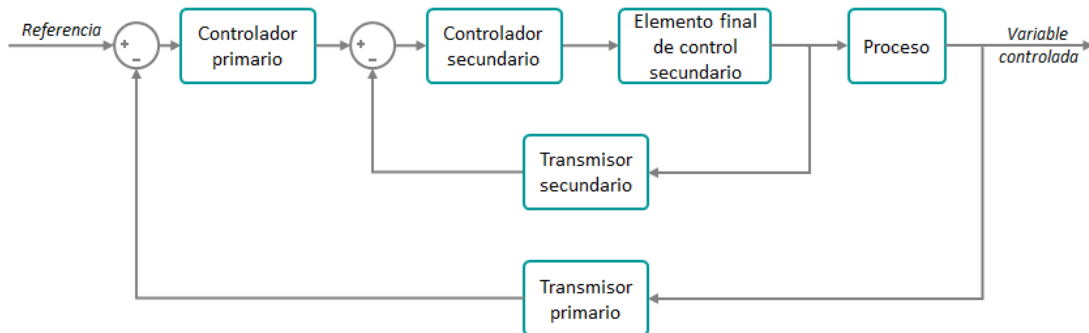


Figura 3. Esquema de control en lazo cerrado.

Fuente: Elaboración propia (2017).

2.3 Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor, según Cengel (2012, p. 629) “son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí”. Pueden clasificarse en función del flujo: Flujo paralelo, cruzado o contraflujo, en base a su construcción: Tubo y coraza o de placas.

Ibídem (2012, p. 630) expone que “Las distintas aplicaciones de la transferencia de calor requieren diferentes tipos de accesorios y configuraciones del equipo para dicha transferencia”. En este sentido, tras el intento de acoplar los accesorios para la transferencia de calor según cada tipo de necesidades, en la actualidad, se han diseñado numerosos tipos de diseños innovadores de intercambiadores de calor.

2.3.1 Tipos de intercambiador de calor

En función del flujo

Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido:

✓ Flujo paralelo

Existe un flujo paralelo, como se observa en la figura 4, cuando el flujo interno, o de los tubos, y el flujo externo, o de la coraza, fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan

una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, las temperaturas de los fluidos se aproximan la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. El fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

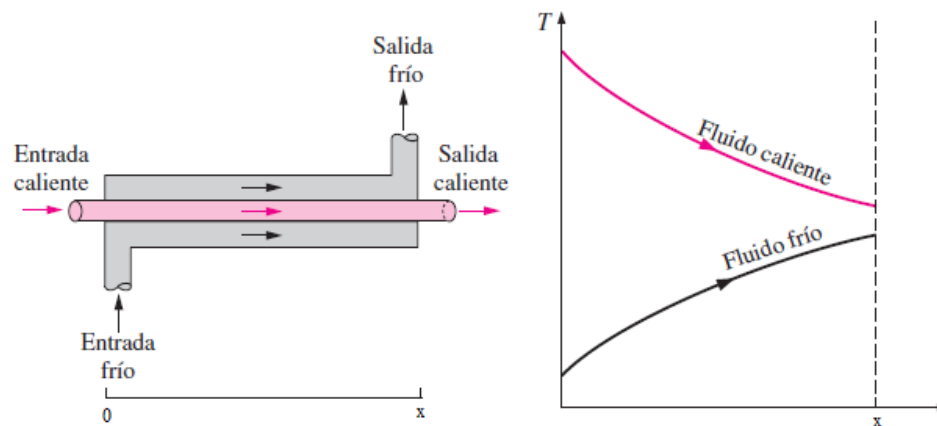


Figura 4. Intercambiador de calor de flujo paralelo y el perfil de temperatura asociado.

Fuente: Transferencia de calor y masa. Çengel (2012)

✓ **Contraflujo**

Se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos, como se puede observar en la figura 5, donde el fluido caliente está representado por el color rosado, mientras que el fluido frío está representado por el color negro. Ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que los otros dos tipos mencionados anteriormente. En contraste con el intercambiador de calor de flujo

paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador.

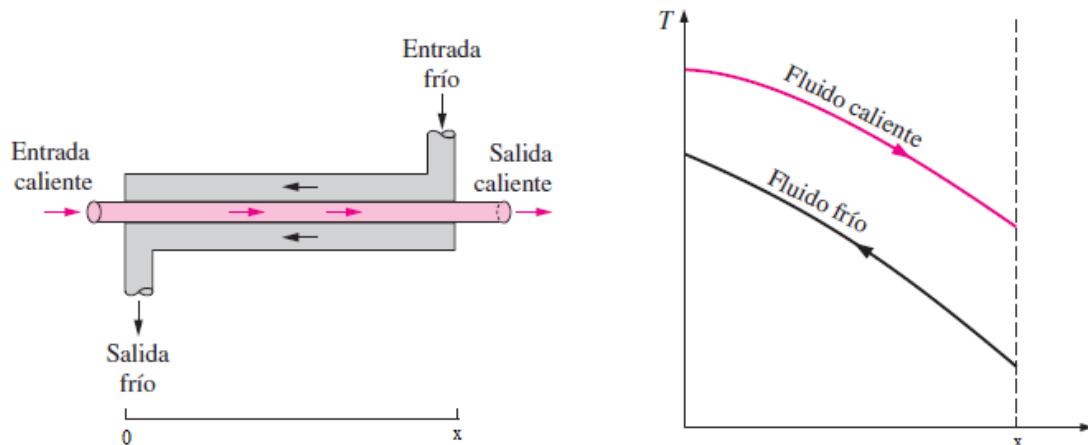


Figura 5. Intercambiador de calor de contraflujo y el perfil de temperatura asociado.

Fuente: Transferencia de calor y masa. Çengel (2012)

Según su construcción

Existe una extensa variedad de formas y tamaños, sin embargo, la construcción de cualquier intercambiador de calor está incluida en dos categorías: De plato o de coraza y tubo.

✓ De platos

El intercambiador de calor de tipo plato consiste en placas que separan los dos fluidos caliente y frío. Los líquidos se alternan entre cada una de las placas y los baffles dirigen el flujo del líquido entre las placas. Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, proveen un área extremadamente grande de transferencia de térmica a cada uno de los líquidos. Por lo tanto, un intercambiador de placa es capaz de transferir mucho más calor con respecto a un intercambiador de coraza y tubos con volumen semejante.

✓ Coraza y tubos

Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado coraza. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo

interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de coraza o fluido externo. Como se muestra en la figura 6, en los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la coraza por las placas del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado. Las placas de soporte también actúan como baffles para dirigir el flujo del líquido dentro de la cáscara hacia adelante y hacia atrás a través de los tubos.

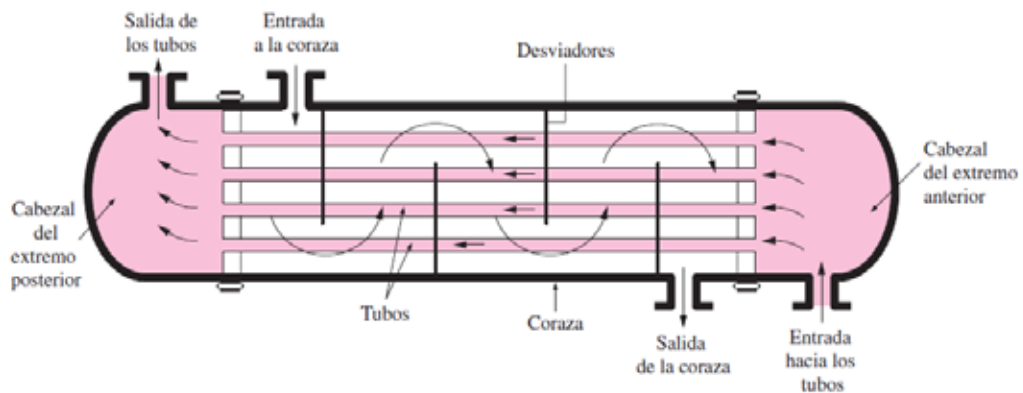


Figura 6. Intercambiador de calor de tubos y coraza.

Fuente: Transferencia de calor y masa. Çengel (Tercera edición)

2.4 Definición de Términos Básicos

Acción de control: Cantidad responsable de activar el sistema para producir la salida que regulará el sistema de control y permita mantener a la variable controlada en el valor deseado.

Baffles: Láminas longitudinales que permiten obtener flujos en contracorriente.

Calor: es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.

Calor específico: energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia.

Conducción: es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre ellas.

Conductividad térmica: medida de la capacidad de un material para conducir calor

Convección: es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido.

Flujo de calor: razón de transferencia de calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia.

Radiación: es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

Razón de transferencia de calor: cantidad de calor transferido por unidad de tiempo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

Sobre el tipo de investigación, Arias (2012, p. 29), define “Que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema práctico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización” y por su parte, Azócar (2015, p. 15) señala que “El proyecto factible, que se hace desde la instrumentalización de la investigación descriptiva, es una modalidad que propone la elaboración de una propuesta viable, destinada a atender necesidades específicas de algo que indagamos, partiendo de un diagnóstico”. Basado en las definiciones citadas, se concluye que la presente investigación se realiza bajo la modalidad de proyecto factible.

3.2 Diseño de la Investigación

Hernández, Fernández y Baptista (2014, p. 30), establecen, “El diseño de investigación es la estrategia con la que se pretende obtener respuesta al problema planteado, con el fin de alcanzar los objetivos del proyecto”.

Por su parte, Prieto (2009) indica que la investigación de campo:

Se realiza en el propio sitio donde se encuentra el objeto de estudio. Ello permite el reconocimiento más a fondo del problema por parte del investigador y puede manejar los datos con más seguridad. Así podrá soportarse en diseños exploratorios, descriptivos experimentales y predictivos. (p. 26).

Por lo tanto, el trabajo de investigación presentado, se maneja bajo el diseño de campo, debido a que se recogerán datos directamente de la planta piloto y se observara de manera directa los hechos en el control del lazo de temperatura T-700 del laboratorio de control de procesos.

3.3 Nivel de la investigación

Arias (2012, p. 21), sostiene que “El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio”. Estos niveles pueden ser: exploratoria, explicativa o descriptiva.

De igual modo, el autor anterior define la investigación descriptiva como “la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento”. En este sentido, el presente trabajo se trata de una investigación descriptiva de tipo correlacional, basado en lo expuesto por Ary, Jacobs y Razavieh, (1989, p. 72) quienes señalan que “Los estudios correlacionales son un tipo de investigación descriptiva que intenta determinar el grado de relación existente entre las variables”, teniendo en cuenta que se busca tomar acciones de control sobre el lazo de temperatura T-700, en relación al cambio de las variables involucradas en el proceso.

3.4 Población y Muestra

En cuanto a la población, Arias (2012, p. 81), manifiesta que “es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación”. Por otra parte, establece que “es un conjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible”.

En la presente investigación, la población está integrada por los instrumentos que componen el lazo de temperatura T-700 del laboratorio de control de procesos. Así mismo, los cinco profesores, que dominan la materia y el funcionamiento del laboratorio y que imparten (o impartieron) la cátedra, representando un 100% de la población.

3.5 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Sabino C., (2012, p. 142) manifiesta que “un instrumento de recolección de datos es en principio cualquier recurso de que pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información”. Tomando en cuenta lo citado

anteriormente, se realizará como técnicas de recolección de datos un levantamiento de la instrumentación involucrada como el objeto de estudio presente en el laboratorio.

3.6 Fases Metodológicas

El desarrollo de la investigación será dividido en fases según el número de objetivos específicos planteados anteriormente.

Fase I: Diagnóstico de la situación actual del lazo de control de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez.

Se llevará a cabo mediante la recopilación de datos sobre el estado de los instrumentos instalados en el T-700 y las leyes de control implementadas.

Fase II: Determinación de las variables involucradas que permitan automatizar el proceso de control de temperatura con el intercambiador de calor.

En el caso del presente trabajo se enfocará en estudiar el comportamiento del flujo del refrigerante que circula en el intercambiador de calor.

Fase III: Determinación la factibilidad de la mejora del sistema de control automático del lazo de temperatura T-700.

Se hará un análisis de los instrumentos necesarios para llevar a cabo la mejora y conjuntamente con presupuestos que permitan estudiar la factibilidad de las propuestas.

Fase IV: Diseño de una propuesta para mejorar el control automático del lazo de temperatura T-700.

Al finalizar con las actividades mencionadas anteriormente se concluirá si las propuestas es una opción viable para implementarse en el laboratorio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en el desarrollo de cada una de las fases planteadas para diseñar una mejora para el sistema de control automático del lazo de temperatura T-700 de la planta piloto.

4.1 Fase I: Diagnóstico de la situación actual del lazo de control de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la Universidad José Antonio Páez

El lazo de temperatura T-700 de la planta piloto del laboratorio de control de procesos lo constituyen un conjunto de tuberías y válvulas, que guían el fluido de proceso desde un tanque contenedor hacia un calentador. A lo largo del recorrido se encuentran una serie de instrumentos, indicadores y de control. En la figura 7 se observa el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) (en inglés: Piping and Instrumentation Diagram, P&ID) del lazo de temperatura de la planta piloto.

El tanque principal TQ-1 contiene el fluido de proceso. El sensor de nivel bajo LEL-101 le indica al controlador si el nivel de líquido está por encima del límite mínimo permitido para llevar a cabo el proceso. El fluido puede ser extraído de TQ-1 y enviado al proceso mediante dos bombas, B-100 y B-200. Las válvulas HV-005 y HV-006 se utilizan para bloquear la salida de TQ-1 en caso de que se requiera mantenimiento.

La placa orificio FE-900 envía la magnitud del caudal medido al transmisor de flujo FIT-900, y éste se comunica con el controlador, que finalmente envía la señal a la válvula FCV-900, ajustando de esta manera, el caudal del líquido de proceso que entra al calentador TQ-3. En la entrada del calentador se dispone el TT-700 encargado de comunicar al controlador, la temperatura del líquido contenido en el calentador, adicionalmente se cuenta con dos indicadores de temperatura, el TI-701 y TI-702 ubicados en la entrada y salida del TQ-3, respectivamente. Al salir de éste, el fluido se hace pasar por el intercambiador de calor IQ-1, en la salida del intercambiador está

ubicado el TT-704 que se comunica con el controlador inalámbricamente, indicando la temperatura de salida del fluido, posteriormente regresa al tanque de almacenamiento TQ-1.

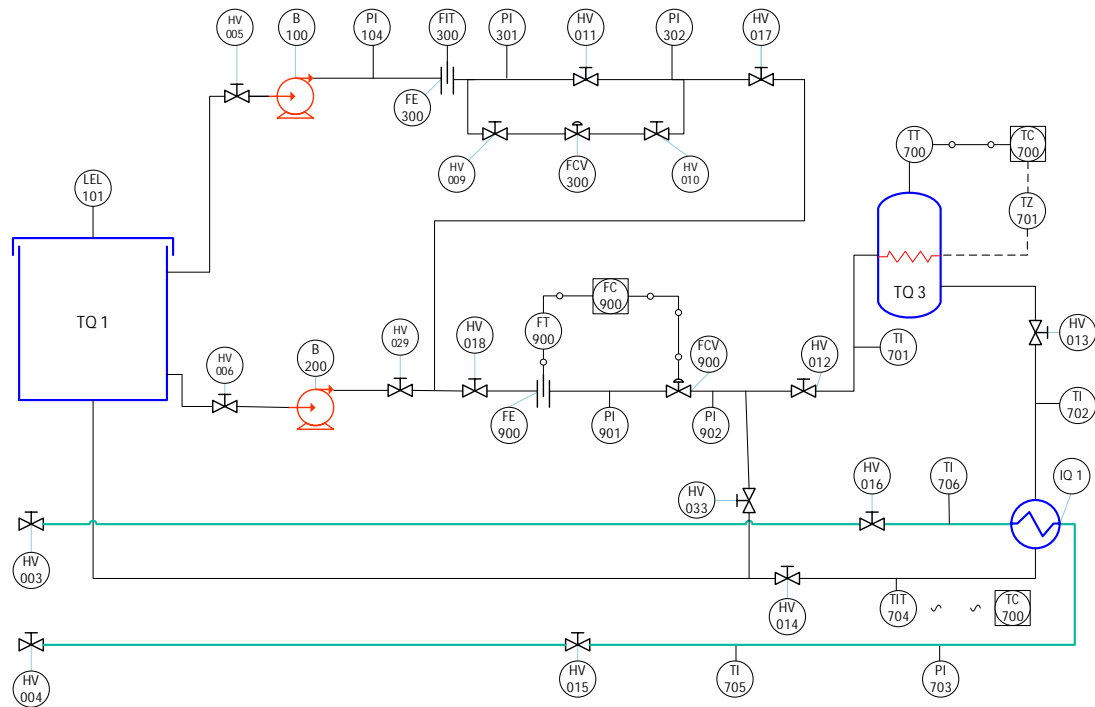


Figura 7. P&ID de lazo de temperatura T-700

Fuente: Elaboración propia (2017).

En la tabla 1 se puede observar la lista con los dispositivos que forman parte del control de proceso del lazo de temperatura T-700 de la planta piloto. En dicha tabla se muestra el número de identificación de cada dispositivo, la función que cumple y su estado de operatividad, en el que se encuentra actualmente. Indicando con:

Tabla 1. Listado de dispositivos para el control del lazo de temperatura

Id.	Función	Estado
B-100 B-200	Succiona el fluido del proceso desde el tanque 1 hasta el calentador.	
HV-XXX	Válvulas de paso.	
FCV-300	Regula el paso del fluido por vía alterna.	
FCV-900	Regula el paso del fluido hacia el calentador TQ-3.	
FE-300	Mide el flujo enviado por la bomba B-100.	
FE-900	Mide el flujo que entra al calentador TQ-3.	
FIT-300	Transmite e indica el flujo medido por el FE-300.	
FIT-900	Transmite e indica el flujo medido por el FE-900.	
LEL-101	Mide el nivel en el tanque TQ-1.	
PI-103	Indica la presión en la salida de la bomba B-200.	
PI-104	Indica la presión en la salida de la bomba B-100.	
PI-301	Indica la presión antes de la válvula HV-011.	
PI-302	Indica la presión después de la válvula HV-011.	
PI-703	Indica la presión en la salida del intercambiador.	
PI-706	Indica la presión en la entrada del intercambiador.	
PI-901	Indica la presión en la salida del FE-900.	
PI-902	Indica la presión en la salida del FCV-900.	
TC-700	Controla la temperatura en el calentador TQ-3.	
TQ-1	Tanque principal del proceso.	
TQ-3	Calentador de fluido de proceso.	
TI-701	Indica la temperatura en la entrada del calentador TQ-3.	
TI-702	Indica la temperatura en la salida del calentador TQ-3.	
TI-705	Indica la temperatura en la salida del intercambiador.	
TI-706	Indica la temperatura en la entrada del intercambiador.	
TIT-700	Transmite e indica la temperatura en la salida del calentador TQ-3.	
TIT-704	Transmite e indica la temperatura del fluido de proceso en la salida del intercambiador.	
TZ-701	Resistencia para el calentamiento de fluido en el TQ-3.	

Fuente: Elaboración propia (2017).

A continuación, se especifican las características de cada uno de los dispositivos que conforman el lazo de control de temperatura T-700. En la Tabla 2 se muestran las características de las bombas B-100 y B-200, conectadas para dar redundancia al sistema.

Tabla 2. Características de las bombas B-100 y B-200

Marca / Modelo	Huber / Pump QB 60
Voltaje	110 @ 60 Hz
Potencia	½ hp
Corriente nominal	5,5 A
Velocidad	3450 rpm
Grado de Protección	IP 44

Fuente: Datos de placa

En la tabla 3 se presentan los datos de placa de los sensores de flujo y en la tabla 4 los datos de los transmisores asociados a los sensores de flujo.

Tabla 3. Placas orificio FE-300 y FE-900

Marca	Instrumatik
Diámetro	½"

Fuente: Datos de etiqueta.

Tabla 4. Transmisores e indicadores de flujo FIT-300 y FIT-900

Marca / Modelo	3051S
Tipo de transmisor	Transmisor de presión escalable
Clase de rendimiento	Classic: Exactitud de 0,035 por ciento del span, rangedown de 150:1, estabilidad durante 15 años
Tipo de conexión	Coplanar
Tipo de medición	Diferencial
Rango de presión	-623 a 623mbar (-250 a 250 in H ₂ O)
Diafragma de aislamiento	Acero inoxidable 316L
Conexión al proceso	Montar en el manifold integrado Rosemount 305
Salida del transmisor	Protocolo fieldbus FOUNDATION
Tipo de carcasa	Carcasa PlantWeb
Tipo de pantalla	Pantalla LCD de PlantWeb

Fuente: Datos de etiqueta.

En la tabla 5 se hace referencia a las características de las válvulas manuales que se encuentran en la planta, utilizadas para conducir el fluido del proceso según sea el lazo a controlar o para aislar los instrumentos al momento de realizar algún mantenimiento. En la tabla 6 los datos de placa de las válvulas automáticas para el control de flujo y en la tabla 7 las especificaciones del TIT-700.

Tabla 5. Características de las válvulas manuales

Tipo / Cuerpo	De bola / Cobre
Diámetro	1/2"

Fuente: Datos del fabricante.

Tabla 6. Válvulas de control de flujo

Marca / Modelo	Fisher / 32.24102
Rango nominal	3 – 15 psi
Diámetro	1/2"
Cuerpo	Bronce

Fuente: Datos de placa.

Tabla 7. Transmisor e indicador de temperatura TIT-700

Modelo	3144P
Tipo de carcasa	Carcasa para montaje en campo, carcasa de compartimento doble.
Material	Aluminio
Entrada de conducto	1/2 NPT
Salida del transmisor	Señal digital FOUNDATION Fieldbus (incluye 3 bloques de funciones AI y el planificador activo de enlace de respaldo)
Configuración de medición	Entrada de un solo sensor
Certificaciones del producto	No
Funcionalidad de control PlantWeb	Bloques de funciones de control avanzado FOUNDATION Fieldbus
Funcionalidad de diagnóstico avanzada PlantWeb	Conjunto de diagnósticos del procesador y sensor FOUNDATION Fieldbus: Diagnóstico de termopar y Seguimiento Mín/Máx
Pantalla	LCD

Fuente: Manual de referencia Rosemount 00809-0100-4021 (2014)

Tabla 8. Transmisor e indicador de temperatura TIT-704

Modelo	648
Tipo de transmisor	Inalámbrico, montaje en campo.
Salida del transmisor	Inalámbrico
Configuración de las medidas	Entrada de un único sensor
Tipo de carcasa	Alojamiento de doble compartimiento
Tamaño de la entrada de cables	1/2 - 14 NPT
Certificaciones del producto	Intrínsecamente seguro, no inflamable y a prueba de polvos combustibles según FM
Tasa de transmisión inalámbrica	Configurable por el usuario
Frecuencia de operación y protocolo	2.4 GHz DSSS, HART
Antena inalámbrica omnidireccional y opciones de SmartPower	Antena externa, adaptador para el Black Power Module (el módulo de alimentación intrínsecamente seguro se vende por separado)
Pantalla	LCD
Opciones de montaje	Sensor especificado por separado y montado en el transmisor

Fuente: Manual de referencia Rosemount 00813-0109-4648 (2011)

4.2 Fase II: Determinación de las variables involucradas que permitan automatizar el proceso de control de temperatura con el intercambiador de calor.

Para la modelación del esquema de control se debe recopilar los datos de diseño de los elementos que intervienen en el sistema. En la tabla 8 se especifican los datos de diseño del IQ-1 suministrados por el fabricante, Fitem C.A.

Tabla 9. Datos del intercambiador de calor IQ-1

Datos del intercambiador de calor IQ-1	
Caudal nominal de la coraza	6 gal/min
Diámetro interno de la coraza	4"
Material de la coraza	Acero al carbón
Número de tubos	94
Longitud del lado recto de los tubos	98 cm
Diámetro externo de los tubos	1/4"
Material de los tubos	Cobre
Número de baffles	11

Fuente: Fitem, C.A. (2017)

En la tabla número 9 se muestran las mediciones realizadas al intercambiador de calor del laboratorio.

Tabla 10. Mediciones del IQ-1, realizadas en el laboratorio

Mediciones del calor IQ-1	
Longitud de la coraza del IQ-1	120 cm
Longitud de tubería del refrigerante del IQ-1	1976 cm
Longitud de tubería del refrigerante hasta la entrada del IQ-1	808 cm

Fuente: Elaboración propia (2017).

A continuación, se muestran las ecuaciones empleadas a partir de los datos suministrados (ver ecuaciones del (1) al (9)).

Área interna de la coraza :

(1) ---

Volumen total de la coraza :

(2) ---

Área por baffle:

(3) ---

Volumen por baffle:

(4)

Volumen total de los baffles:

(5)

Área transversal de tubos:

(6)

Superficie de transferencia:

(7)

Volumen total de los tubos:

(8)

Volumen de la coraza:

(9)

Como resultado de las ecuaciones anteriormente mostradas, se obtuvieron las dimensiones físicas del intercambiador de calor IQ-1, que se especifican en la tabla 10.

Tabla 11. Dimensiones físicas del IQ-1

Variable	Valor	Unidades
Área interna de la coraza	$8,107 \cdot 10^{-3}$	m ²
Volumen total de la coraza	$9,7299 \cdot 10^{-3}$	m ³
Área por baffles	$6,08 \cdot 10^{-3}$	m ²
Volumen por bafle	$12,161 \cdot 10^{-6}$	m ³
Volumen total de los baffles	$133,771 \cdot 10^{-6}$	m ³
Área transversal de los tubos	$11,908 \cdot 10^{-3}$	m ²
Superficie de transferencia	2,757	m ²
Volumen total de los tubos	2,917	m ³
Volumen de la coraza	3,031	m ³

Fuente: Elaboración propia (2017).

Para realizar el balance de energía se realizaron diez ensayos (ver tabla 11), que permitieron calcular las variables de la ecuación, conjuntamente con los datos y las magnitudes calculados anteriormente. Los valores obtenidos en los ensayos fueron promediados y se les calculó la desviación estándar.

Entiéndase que,

Temperatura de entrada de los tubos:

Temperatura de salida de los tubos:

Temperatura de entrada de la coraza:

Temperatura de salida de la coraza:

Tabla 12. Ensayos de transferencia de calor con el IQ-1

Ensayo 1	18	20	41,0850	22,6900
Ensayo 2	18	21	39,9900	21,6300
Ensayo 3	19	21	38,8000	22,6000
Ensayo 4	19	21	41,0200	22,0300
Ensayo 5	18	21	40,3837	23,0629
Ensayo 6	18	20	41,6884	23,8844
Ensayo 7	19	21	41,2427	22,5138
Ensayo 8	18	21	40,9932	23,0500
Ensayo 9	18	20	40,9455	23,8197
Ensayo 10	19	21	40,7181	23,8345
Media aritmética	18,3	20,7	40,6867	22,9115
Desviación estándar	0,4830	0,4830	0,8084	0,7738

Fuente: Elaboración propia (2017).

Los sistemas térmicos son aquellos que implican la transferencia de calor de un material a otro. Puede que estos sistemas no se representen con precisión usando elementos de parámetros concentrados, por lo general, los elementos que los componen están distribuidos en todo el volumen del material. No obstante, para facilitar el análisis, el sistema térmico bajo estudio se representará mediante un modelo de parámetros concentrados.

El calor fluye de un material a otro por conducción, por convección y por radiación. La transferencia de calor por radiación sólo se aprecia si la temperatura del emisor es muy alta en comparación con la del receptor. La mayor parte de los procesos térmicos en los sistemas de control de procesos no involucran transferencia de calor

por radiación, por lo que su efecto no será considerado para los cálculos que se realizarán. Aplicando la primera ley de la termodinámica, conocida como el principio de conservación de la energía (ecuación 10), se tiene:

$$(10)$$

Dado que la energía se puede transferir hacia un sistema, o hacia afuera de éste, por medio de calor, trabajo y flujo de masa, y que la energía total de un sistema simple compresible consta de las energías interna, cinética y potencial, el balance de energía para cualquier sistema, que pasa por cualquier proceso, se puede expresar en forma de razones, como se muestra en la ecuación (11), para el sistema en estudio es la ecuación (12) y donde se representa en la ecuación (13).

$$(11) \quad \text{---}$$

$$(12) \quad \text{---}$$

$$(13)$$

: Razón de transferencia de calor entre los dos fluidos

: Coeficiente de transferencia de calor total —

: Superficie de transferencia

Es importante señalar que existen dos superficies donde ocurre transferencia de calor, al interior y al exterior de los tubos que conducen el fluido refrigerante. Para facilitar aún más el proceso de cálculo y debido a que el espesor de las tuberías internas es de poco más de 3 mm, se considerará una sola superficie de transferencia, la externa. Para determinar la tasa de intercambio de energía a la entrada y salida del IQ-1 se usan las expresiones mostradas en las ecuaciones (14) y (15).

$$(14)$$

$$(15)$$

: Flujo —

— : Calor específico del agua

Para facilidad de los términos se agrupan en una constante como se muestra en la ecuación (16).

$$(16) \quad -$$

— : Densidad del agua

Como estrategia de modelado del IQ-1 se dividirán las interacciones en 2 grupos, del primero se buscará obtener la relación entre la temperatura de salida del fluido de proceso (coraza,) y la temperatura de salida del fluido refrigerante (tuberías internas,); en el segundo, la relación entre el flujo de refrigerante (tuberías internas,) y la temperatura de salida del fluido refrigerante (tuberías internas,). Finalmente, se combinarán ambas relaciones para obtener una que vincule la temperatura del fluido de proceso y el flujo del refrigerante.

Los subíndices s y t denotarán, respectivamente, elementos, procesos o variables relacionadas con la coraza (*shield*) o con las tuberías (*tubes*); mientras que los subíndices i y o denotarán, respectivamente, elementos, procesos o variables relacionadas con entradas (*in*) o salidas (*out*).

4.2.1 Balance de energía en la coraza del IQ-1

La ecuación (12) muestra la forma general del balance de energía, que aplicándose a la región entre la superficie interna de la coraza y la superficie exterior de los tubos, se obtiene la ecuación (17).

$$(17) \quad -$$

Con base en los ensayos realizados, es posible considerar constante a \dots .
 Aplicando esto y expandiendo la expresión anterior, resulta la ecuación (18).

(18) —

Como la ecuación diferencial resulta no lineal, se linealiza el término usando serie de Taylor (ver ecuación (19)).

(19)

Se simplifican términos de signos opuestos (ver ecuación 20).

(20)

El resultado de (20) se sustituye en (18) quedando la ecuación (21).

(21) —

Aplicando variable de desviación a (21) resulta la ecuación (22).

(22)

Restando (21) y (22), y considerando que las variaciones notables de temperatura ocurren en la salida de los tubos y la coraza, y en las entradas de ambas se pueden despreciar, obteniendo la ecuación (23).

(23) —

Aplicando Transformada de Laplace a (23), asumiendo nulos los valores iniciales y reordenando términos semejantes, se obtiene la ecuación (24), (25) y (26).

(24) ——— ————— ———

(25) ———

(26) ———

4.2.2 Balance de energía en las tuberías del refrigerante del IQ-1

El volumen a considerar para el cálculo del coeficiente β , será el contenido por cada tubo, por donde fluye el líquido refrigerante. En esta ocasión se considera constante a β . Como el proceso de síntesis de la expresión buscada es muy similar al de la sección anterior, por lo que será resumido como sigue en la ecuación (27).

$$(27) \quad \dots -$$

Se linealiza el término β y se sustituye en (27), obteniendo la ecuación (28).

$$(28) \quad \dots$$

Sustituyendo (28) en (27), aplicando variable de desviación y considerando que las variaciones notables de temperatura ocurren en la salida de los tubos y la coraza, y en las entradas de ambas se pueden despreciar, en la ecuación (29) se obtiene un resultado similar a (23).

$$(29) \quad \dots -$$

Aplicando la Transformada de Laplace en (29), asumiendo nulos los valores iniciales y reordenando términos semejantes se obtienen las ecuaciones (30), (31) y (32).

$$(30) \quad \dots - \dots - \dots$$

$$(31) \quad \dots - \dots \quad (32) \quad \dots - \dots$$

Teniendo ya ambas expresiones, (24) y (30), en el dominio de la variable compleja s , se procede a obtener la función de transferencia del sistema en estudio según la expresión (33).

$$(33) \quad \dots - \dots - \dots$$

De la **Tabla 9. Datos del intercambiador de calor IQ-1**, **Tabla 9**, **Tabla 10**, **Tabla 11** y **Tabla 12**, de las ecuaciones del (1) al (9) se obtienen los datos que se sustituyen en las ecuaciones (25), (26), (31) y (32) para obtener la ecuación (34), que modela matemáticamente el intercambiador de calor.

(34) _____

Considerando el tiempo de recorrido del refrigerante desde la HV-003 hasta la salida del intercambiador como un retardo del sistema, la función de transferencia resulta como se muestra en la ecuación (35)

(35) _____

4.3 Fase III: Determinación la factibilidad de la mejora del sistema de control automático del lazo de temperatura T-700.

4.3.1 Factibilidad técnica

Se presenta en las tablas, del 12 al 15, las características mínimas requeridas del conjunto válvula, actuador, sensor y transmisor, necesarios para la implementación de la propuesta. Las especificaciones se basan en la instrumentación existente en el laboratorio para garantizar la compatibilidad de los equipos y del conocimiento previo de los operarios.

Tabla 13. Especificaciones técnicas de la válvula de control recomendada

Tipo de válvula	Estándar Europeo (EN)	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME)
Tamaño nominal	Diámetro nominal (DN) 15	Tamaño nominal de la tubería (NPS) 1/2
Conexión terminal	Roscado nacional de tuberías (NPT)	
Índice de presión	400 PSI @ 65 °C / 250 PSI @ 204 °C	
Característica	Lineal	
Rango de temperatura	-29 a 204 °C	

Fuente: Elaboración propia (2017).

Tabla 14. Especificaciones técnicas del actuador recomendado

Tipo de actuador	Neumático
Tipo de falla de aire	Normalmente abierto (Air-to-close / Fail open)

Fuente: Elaboración propia (2017).

Tabla 15. Especificaciones técnicas del elemento primario de flujo recomendado

Placa orificio	Estándar Europeo (EN)	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME)
Tamaño nominal	Diámetro nominal (DN) 15	Tamaño nominal de la tubería (NPS) 1/2
Salida	Presión diferencial	
Protocolo de com.	FOUNDATION™ Fieldbus	

Fuente: Elaboración propia (2017).

Tabla 16. Especificaciones técnicas del transmisor de presión diferencial recomendado

Tipo de transmisor	Transmisor de presión coplanar
Tipo de medición	Diferencial
Salida del transmisor	FOUNDATION™ Fieldbus

Fuente: Elaboración propia (2017).

Por lo anteriormente mencionado, esta propuesta se considera técnicamente factible.

4.3.2 Factibilidad operativa

Los instrumentos que forman parte de esta propuesta cumplen con las características necesarias que conllevan a la resolución del problema, garantizar que el fluido de proceso pueda almacenarse a temperaturas acordes con los requerimientos de las practicas que se desarrollan en el laboratorio de control de procesos. Por otra parte,

estos equipos se empalman con los ya existentes, facilitando al personal su uso y manipulación, sin la necesidad de capacitación adicional. Debido a esto, se considera este trabajo de grado, operativamente factible.

4.3.3 Factibilidad económica

Una vez contrastadas las características requeridas de los instrumentos a implementar, con los existentes en el mercado, se proponen los modelos en la tabla 16, especificando su valor monetario y comparando con los ingresos por período que recibe la universidad (ver tabla 17), con el objetivo de determinar la factibilidad económica de la propuesta.

Tabla 17. Modelo y costo de la instrumentación recomendada

Cantidad	Instrumento	Costo [Bs]
1	Válvula de control + actuador	45.000.000
1	Transmisor de presión diferencial + placa orificio	40.500.000
Total de la propuesta		85.500.000

Fuente: Elaboración propia (2017).

Tabla 18. Cuota por período para mantenimiento y actualización de UJAP

Ingresos por período (Bs)	Reposición y mantenimiento (5%)
300.000.000	15.000.000

Fuente: Departamento de administración de UJAP. (2017)

Luego de evaluar el costo de cada instrumento, destacando que ya se cuenta con el transmisor de flujo, y contrarrestándolo con el ingreso semestral, la inversión sería recuperada en 6 períodos académicos, por lo que se concluye que el proyecto es económicamente factible.

4.4 Fase IV: Diseño de una propuesta para mejorar el control automático del lazo de temperatura T-700.

La propuesta al lazo de temperatura T-700 consiste en regular el flujo de refrigerante a través del intercambiador, en función de la temperatura de salida del fluido de proceso, con la finalidad de devolverlo hasta el tanque de almacenamiento TQ-1, a una temperatura alrededor de los 30 °C. Para tal fin se propuso un esquema de control en cascada, donde la variable del lazo secundario es el flujo del refrigerante y la variable del lazo principal, la temperatura de salida del intercambiador.

En el lazo secundario se propuso un controlador proporcional integral (PI) que envía la señal de control a la válvula neumática. Para realizar la sintonía entre controlador y actuador se recurrió al segundo método de las reglas de sintonía de Ziegler & Nichols, conocido como el método de las oscilaciones continuas, haciendo uso de la herramienta SIMULINK del software Matlab. Ver Figura 8.

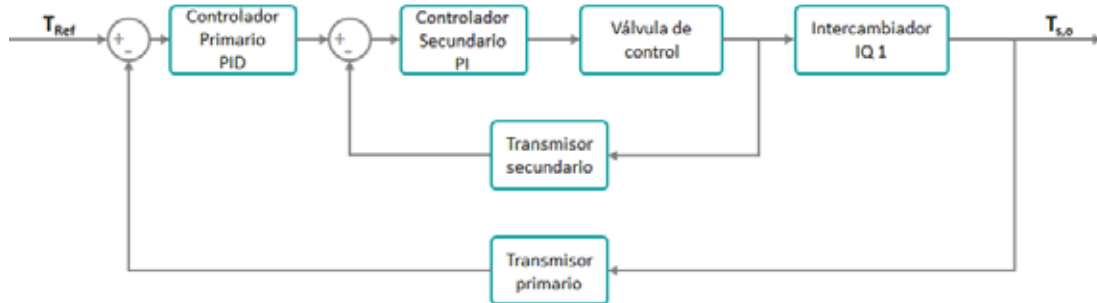


Figura 8. Diagrama de bloques del control automático del IQ-1.

Fuente: Elaboración propia (2017).

4.4.1 Sintonización de los controladores PI y PID a través del método de las oscilaciones continuas de Ziegler & Nichols

Para aplicar este método, conocido como método 2 de Ziegler & Nichols (se hará referencia a él como *método 2* de aquí en adelante), se requiere conocer la respuesta del sistema luego de que es sometido a un cambio brusco en su entrada (escalón

unitario), si la respuesta arroja una gráfica sigmoïdal (ver figura 9), indica que el sistema no contiene integradores ni polos complejos conjugados dominantes, por lo que resulta compatible con este método de sincronía. Luego, se eliminan la acción integral y derivativa del controlador, variando únicamente la acción proporcional desde 0 hasta un valor donde la salida presente oscilaciones sostenidas como se muestra en la figura 10. Este valor de K que hace al sistema oscilatorio se denomina ganancia crítica K_{cr} y el período de la onda resultante es llamado período crítico P_{cr} . Con ambos datos, de acuerdo a las expresiones presentadas en la tabla 21, se calculan los parámetros que conformarán la expresión del controlador , y .

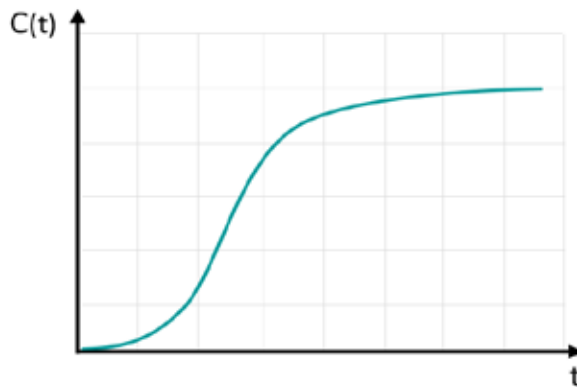


Figura 9. Respuesta del sistema ante un escalón unitario

Fuente: Elaboración propia (2017).

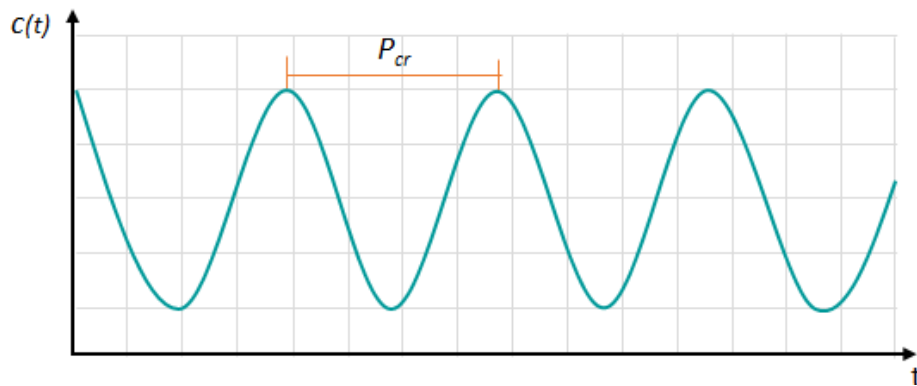


Figura 10. Oscilaciones continuas con período P_{cr}

Fuente: Elaboración propia (2017).

Tabla 19. Regla de sintonía basada en ζ y ω_n .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$(0,5) Kr$		0
PI	$(0,45) Kr$	$(1/1,2) P_{cr}$	0
PID	$(0,6) Kr$	$(0,5) P_{cr}$	$(0,125) P_{cr}$

Fuente: Ingeniería de control moderna. Ogata (2010, p. 571)

Una vez verificado lo expuesto anteriormente, se realiza el diagrama de bloques en SIMULINK del lazo interno (ver figura 11), variando la constante proporcional se llegó al valor $\zeta = 0,4$ y $\omega_n = 0,4$ donde se observaron oscilaciones sostenidas, (ver figura 12).

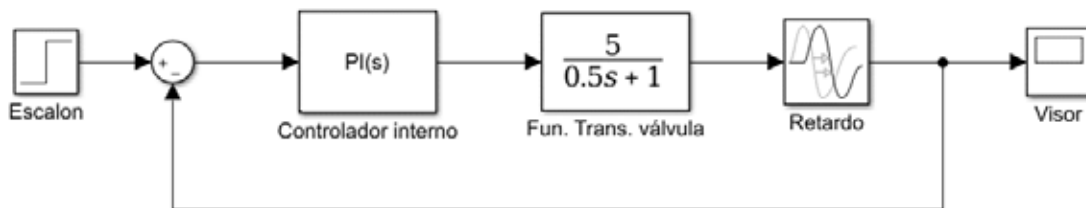


Figura 11. Diagrama de bloques del lazo interno.

Fuente: Elaboración propia (2017).

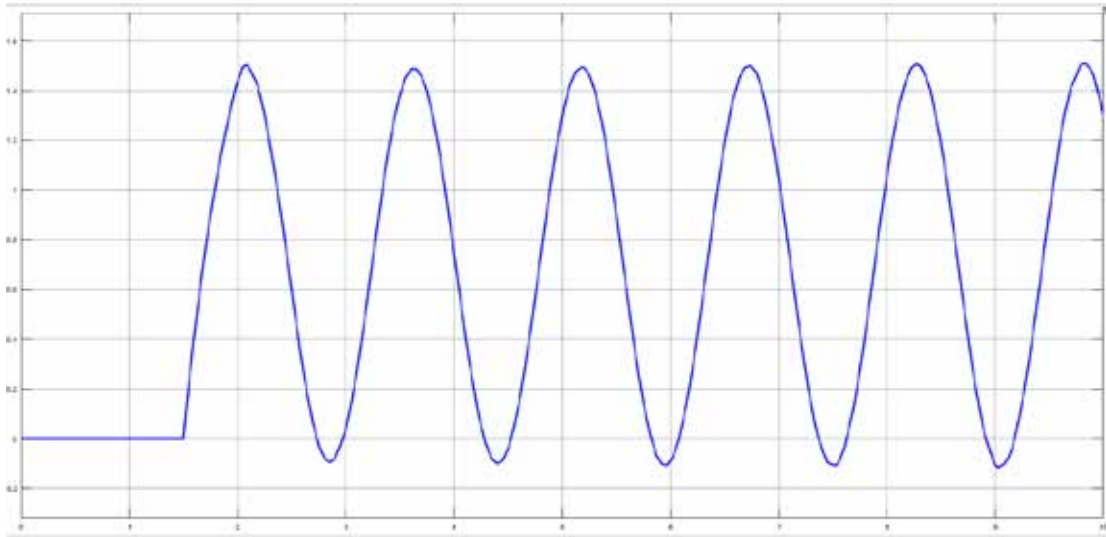


Figura 12. Respuesta oscilante del lazo interno con K_{cr} .

Fuente: Elaboración propia (2017).

En la tabla 22 se reflejan los parámetros del controlador con K_{cr} y τ_{cr} , comparándolos con los valores optimizados por el simulador y con los ajustados manualmente. En la figura 13 se observa la respuesta del lazo interno con el controlador sincronizado, mientras que en las figuras 14 y 15 se aprecia la respuesta del mismo lazo con los parámetros óptimos del controlador y los ajustados de forma manual, respectivamente.

Tabla 20. Parámetros del controlador interno

Parámetros	Método 2	Optimizados	Ajuste manual
P	0.2050	0.1666	0.12371
I	0.1590	0.2401	0.22206

Fuente: Elaboración propia (2017).

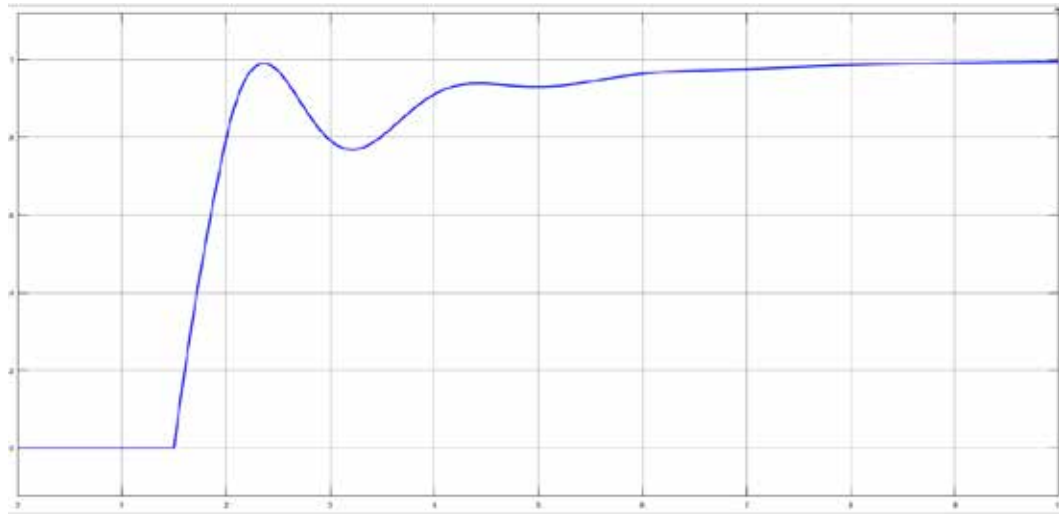


Figura 13. Respuesta del lazo interno sincronizado.

Fuente: Elaboración propia (2017).

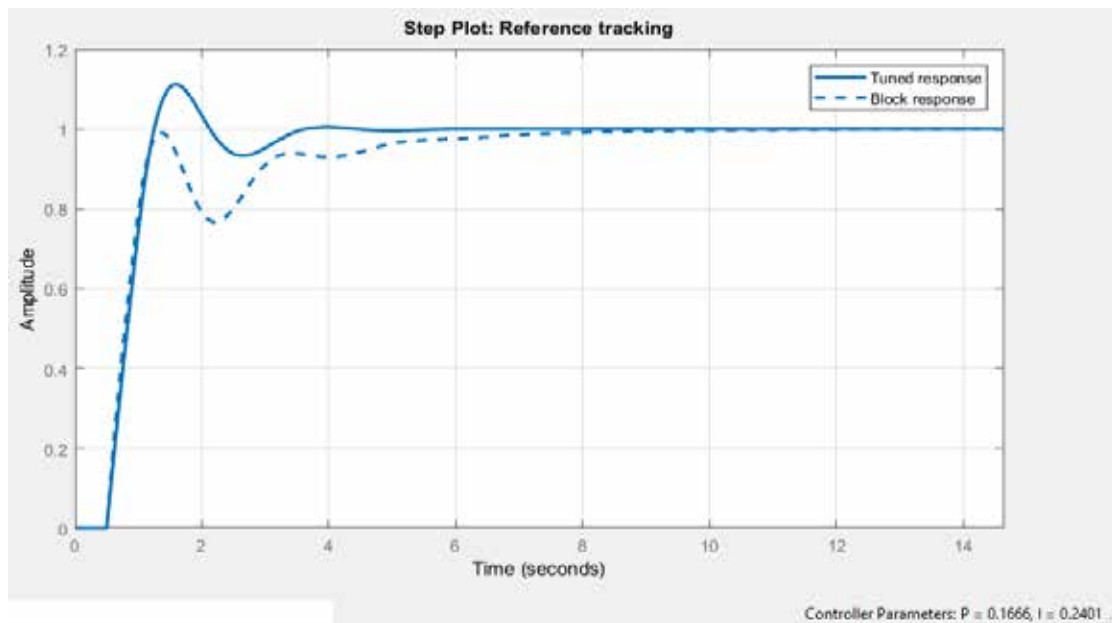


Figura 14. Respuesta del lazo interno optimizado.

Fuente: Elaboración propia (2017).

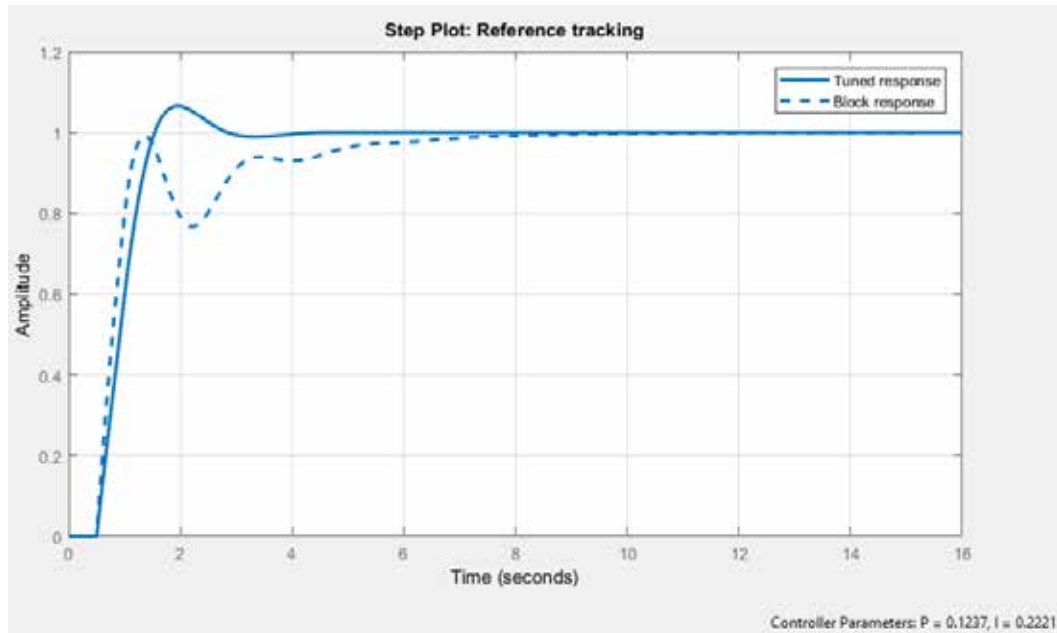


Figura 15. Respuesta del lazo interno con ajuste manual.

Fuente: Elaboración propia (2017).

Posteriormente, volvió a aplicarse el método de las oscilaciones continuas, en esta ocasión al diagrama que se muestra en la figura 16. Luego de variar el parámetro K mediante iteraciones, encontró la ω del sistema, cuyas oscilaciones se observan en la figura 17.

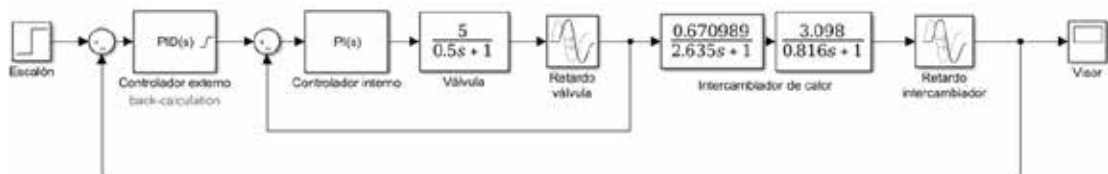


Figura 16. Diagrama de bloques del control en cascada para el intercambiador de calor IQ-1.

Fuente: Elaboración propia (2017).

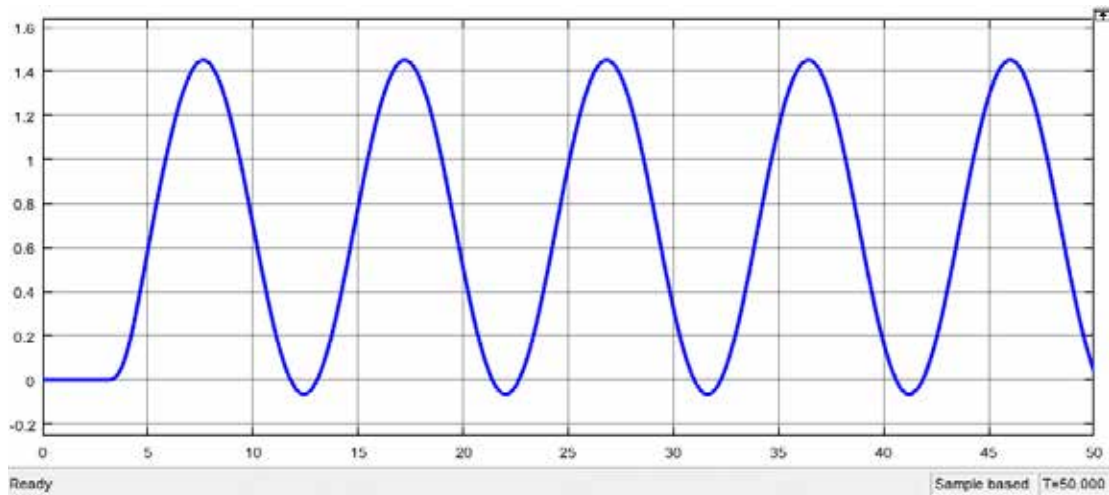


Figura 17. Respuesta oscilante del sistema.

Fuente: Elaboración propia (2017).

Para un sistema de control con un amplio rango de condiciones de operación, puede suceder que la variable de control alcance los límites prefijados del actuador, por lo que el bucle de retroalimentación podría permanecer en su valor límite y al tener acción integrativa, el error continuaría siendo integrado. Para evitar los efectos de saturación, adicionalmente se activó en el simulador un ajuste interno con efecto *anti wind up*.

Una vez calculados los parámetros para el controlador PID del lazo externo, se obtuvo la respuesta del sistema que se muestra en la figura 18. Posteriormente se realizaron ajustes manuales de los parámetros que permitieron atenuar las oscilaciones, a cambio de un pequeño incremento en el tiempo de estabilización (ver figura 19). En la tabla 23 se exponen los valores obtenidos.

Tabla 21. Parámetros del controlador externo

Parámetros	Método 2	Ajuste manual
P	0.6533	0.5553
I	0.1363	0.1158
D	0.7827	0.6653

Fuente: Elaboración propia (2017).

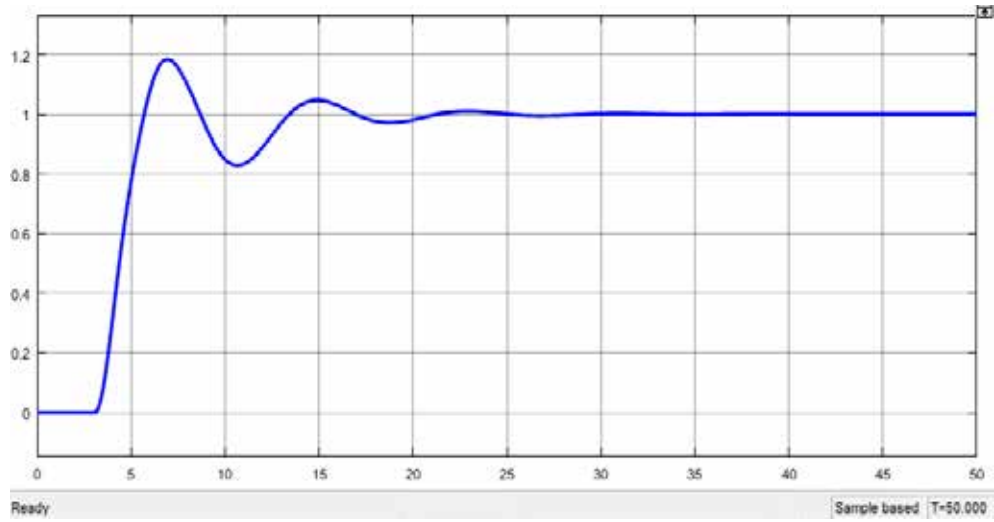


Figura 18. Respuesta del sistema con controlador PID sincronizado

Fuente: Elaboración propia (2017).

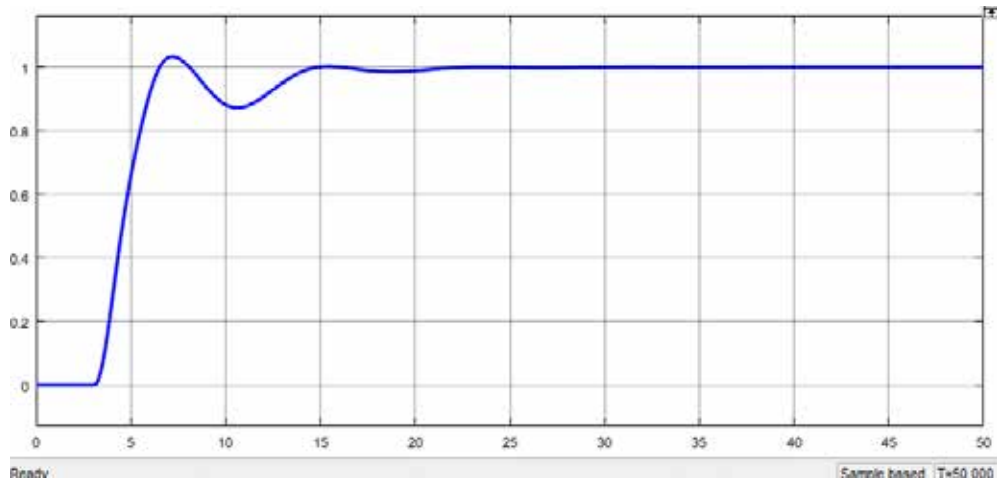


Figura 19. Respuesta del sistema con parámetros modificados.

Fuente: Elaboración propia (2017).

CONCLUSIONES

La elaboración de este trabajo de grado tuvo como finalidad proponer una mejora para el lazo de temperatura de T-700 de la planta piloto de la UJAP, para lo cual se desarrollaron satisfactoriamente cada uno de las fases planteadas. De esta manera se realizó un diagnóstico sobre los equipos que conforman el lazo T-700, indicando que el intercambiador de calor IQ-1 podría ser controlado para mejorar el desempeño de lazo de temperatura.

Las consideraciones aquí tomadas, para la obtención y simplificación del modelo matemático y de la función de transferencia, enfocada interacción entre el flujo de refrigerante y la temperatura del fluido de proceso a la salida del intercambiador de calor, están basadas en las condiciones actuales y particulares de los componentes que conforman el lazo de temperatura de la planta piloto del laboratorio de control de procesos de la UJAP.

Por lo general para un análisis preciso de los intercambiadores de calor debe utilizarse mediante modelos de parámetros distribuidos, debido a que los utilizados a nivel industrial resultan de gran tamaño. Sin embargo, para la realización de este trabajo se tomó en cuenta que el intercambiador en estudio es de dimensiones reducidas por lo que su análisis puede aproximarse como un elemento de parámetros concentrados.

En un intercambiador de calor, la transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. La transferencia de calor por radiación sólo se aprecia si la temperatura del emisor es muy alta en comparación con la del receptor. La mayor parte de los procesos térmicos en los sistemas de control de procesos no involucran transferencia de calor por radiación, por ende, sus contribuciones, efectos y/o perturbaciones no fueron considerados en las ecuaciones de balance de energía.

Luego de obtener el modelo matemático de los elementos del sistema, se realizó un estudio para determinar la factibilidad de los equipos que deben adicionarse a los ya existentes, resultando factible las modificaciones propuestas.

Se decidió aplicar el esquema de control en cascada en virtud a la diferencia de velocidad de respuesta de las variables del proceso, pues ante una variación en el punto de ajuste, el flujo es capaz de seguir dicha variación en un lapso de tiempo mucho menor de lo que le tomaría a la temperatura alcanzar un nuevo nivel. Razón por la cual el lazo interno controla el flujo del refrigerante y el lazo externo la temperatura.

Para el lazo interno se usó un controlador PI porque es conveniente para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden, logrando un error nulo en régimen permanente. A su vez, en el lazo externo se usó un controlador PID por ser adecuado para los procesos con retardos apreciables.

En la sintonización de cada lazo, luego de obtener los parámetros (K_c y T_i para el interno; K_c , T_i y T_d para el externo) que conforman las ecuaciones de los controladores con el método 2 de Ziegler-Nichols, se utilizó la opción Tune de la herramienta Simulink de Matlab para obtener un grupo de valores que son considerados como óptimos por la herramienta, sin embargo, se realizaron ajustes manuales, sacrificando la rapidez del tiempo de estabilización con la finalidad de atenuar las oscilaciones en el periodo transitorio.

RECOMENDACIONES

Los manuales de cada uno de los instrumentos y dispositivos instalados deben permanecer como documentación de consulta en el laboratorio para facilidad de los instructores, técnicos y alumnos.

Para futuros estudios de implementación de mejoras, específicamente para el lazo de temperatura, se recomienda analizar otras configuraciones como el control por prealimentación.

De igual forma, otras estrategias de control que se recomiendan analizar y comparar la respuesta del sistema, el discretizar diferentes configuraciones de control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, G. y Rojas, C. (2016). **Desarrollo de Material Didáctico para el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad José Antonio Páez Utilizando el Software Delta V.** Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Ávila, R. (2001) **Guía para elaborar la tesis: Metodología de la investigación.** Lima: Ediciones R.A.
- Azócar, R. (2015, agosto 25). **Proyecto Factible: Una modalidad de investigación.** [En línea]. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/410> [2017, mayo 5].
- Barros, C. y Paredes, A. (2016). **Modelamiento y simulación de un intercambiador de calor.** Trabajo de grado no publicado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.
- Cengel, Y. (2004). **Transferencia de Calor.** Segunda edición. México: Editorial McGraw Hill.
- Creus, A. (1999). **Instrumentación Industrial.** Colombia: Alfaomega Grupo Editor.
- Arias, F. (2012). **El Proyecto de Investigación.** Introducción a la metodología científica. Venezuela: Editorial Episteme.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P., (1997). **Metodología de la Investigación.** Colombia: Editorial McGraw Hill.
- Ogata, K. (2006). **Ingeniería de Control Moderna.** Cuarta Edición. España: Editorial Pearson.
- Ogata, K. (2010). **Ingeniería de Control Moderna.** Quinta Edición. España: Editorial Pearson.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2007). **Intercambiadores de Calor.** México: Autor. Jaramillo O.

Sabino, C. (1996). **Los Caminos de la Ciencia.** Una Introducción del Método Científico. Venezuela: Editorial Panapo.

Vilaña, D. y Maila, V. (2016). **Diseño y Construcción de un Intercambiador de Calor de Placas y Tubos con un Flujo Cruzado para Calefacción de una Vivienda Tipo Rural de 54 m².** Trabajo de grado no publicado. Universidad de las Fuerzas Armadas. Ecuador.