

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis previa a la obtención del título de INGENIERO MECÁNICO

**TEMA:
AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO
LÍQUIDO DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DE LA CARRERA
DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTOR:
PABLO RUBÉN CHICAIZA CONCHAMBAY**

**DIRECTOR:
LUIS ANIBAL ANDRANGO**

Quito, Marzo del 2014

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **“AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO LÍQUIDO DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA”**, fue realizado en su totalidad por Pablo Rubén Chicaiza Conchambay, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Luis Andrango

Director de Tesis

Quito, Marzo del 2014

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Pablo Rubén Chicaiza Conchambay autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Pablo Rubén Chicaiza Conchambay

CC: 1712780350

DEDICATORIA

A Dios por que sin Él no estaría aquí y nada fuera posible, gracias por darme la vida, por tenderme la mano cuando más la necesite, por ser mi fuerza y mi refugio.

A mis padres José Alejandro y María Dolores, por ser el pilar fundamental en este camino, por su constancia, por su lucha y esfuerzo diario, por sus constantes palabras de aliento, por los momentos de alegría y tristeza que hemos pasado en estos años, por ser mi soporte y nunca dejarme caer, por ser mi ejemplo, por brindarme todo su amor y cariño.

A Patty y May que con paciencia, amor y alegría me acompañan cada día, no dejen de soñar y continúen con sus metas y objetivos, ustedes son las mejores.

A Daniela, Camila y José, que son unos ángeles aquí en la tierra y que me acompañan en este caminar.

A Anita Lucía, por estar conmigo en aquellos momentos en que el estudio y el trabajo ocuparon mi tiempo y esfuerzo. Gracias por tu ayuda.

Como testimonio de eterno reconocimiento, aun sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo.

Con cariño, admiración y respeto.

Pablo Rubén

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Luis Andrango por asumir este reto y brindarme sus valiosos conocimientos ayudándome a cumplir este objetivo.

A la Universidad Politécnica Salesiana y a todos sus profesores por brindarme su apoyo y compartir sus conocimientos en campos desconocidos, a todos ellos que sin tener un vínculo familiar me trataron como si lo fuera, gracias por su paciencia.

A todas las personas que me apoyaron en todo momento especialmente en los de dificultad, gracias por estar ahí, por darme el ánimo y fuerza para continuar adelante con este proyecto.

Mi agradecimiento con respeto y orgullo a ustedes.

Pablo Rubén

JUSTIFICACIÓN

La Carrera de Ingeniería Mecánica dispone de un equipo para realizar prácticas de laboratorio en intercambiadores de calor tipo tubo - coraza, el mismo que trabaja con control manual, por lo que se ve la necesidad de automatizar el equipo didáctico para que el estudiante pueda complementar y fortalecer el aprendizaje de las cátedras de Transferencia de Calor y Termodinámica.

Por eso es importante trabajar en los equipos desarrollados en la Universidad ya que estos pueden ser renovados y actualizados con tecnología de última generación, dada la necesidad y avance de la tecnología es necesario tener contacto con las ventajas que la automatización de una máquina nos puede brindar.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el laboratorio de Termodinámica de la Universidad Politécnica Salesiana existe el intercambiador de calor de flujo líquido – líquido en el que se realizan las prácticas de análisis de eficiencia y la transferencia de calor.

Este ha venido operando desde hace algún tiempo, y no se ha realizado ningún avance al sistema, la consecuencia es que el equipo debido al desarrollo tecnológico quedaría obsoleto, para mejorar esta situación, se planteó la opción de rediseñar el equipo mediante la automatización del mismo para brindar un mejor servicio hacia los estudiantes de la comunidad salesiana, especialmente a los alumnos de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

OBJETIVO GENERAL

Automatizar el intercambiador de calor de flujo líquido-líquido del laboratorio de Termodinámica de la carrera de Ingeniería Mecánica.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los requerimientos necesarios para el proceso de automatización del banco de pruebas.
- Diseñar el programa de obtención de datos con la ayuda de los programas LABVIEW, EXCEL y ARDUINO para la programación del equipo.
- Analizar el trabajo del banco de pruebas posterior a la automatización del mismo.
- Determinar el balance energético (balance de calor) y cálculo de eficiencias de acuerdo a los cambios de caudal y temperatura en las corrientes de fluido caliente y frío.
- Elaborar guías para práctica de laboratorio de fácil concepción y ejecución, para que los estudiantes usuarios, puedan desarrollarlas correctamente.
- Desarrollar hojas electrónicas, para que los usuarios puedan variar parámetros tales como líquidos de enfriamiento, líquidos calientes, materiales que constituyen el intercambiador, etc.

HIPÓTESIS

La Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana dispondrá de un equipo de laboratorio automatizado para la realización de prácticas con un rango de precisión de las lecturas que superara en un 20 % las actuales y servirá adecuadamente para complementar y reforzar los conocimientos adquiridos en la materia de Transferencia de calor.

El diseño brindará seguridad y facilidad de manejo para los estudiantes en sus prácticas, ya que dispondrán de la instrumentación necesaria con una adecuada ubicación de los dispositivos para medir temperaturas y caudales de los fluidos caliente y frío brindando así la suficiente versatilidad para variar parámetros de temperaturas y caudales, así como de los elementos que son parte del intercambiador, y que los usuarios puedan comprobar los efectos que estos cambios producen en los coeficientes de transferencia de calor.

ALCANCE

El objetivo de la automatización del intercambiador de Calor, es el de actualizar el equipo existente en el Laboratorio, logrando de esta manera trabajar con un equipo que de las mismas facilidades de uso y aprendizaje.

- Para esto se ha planteado la automatización del intercambiador de calor, el mismo que permitirá realizar los análisis correspondientes a curvas de datos, simulaciones, resultados, elaboración de manuales y guías de prácticas; entre otras ventajas que se obtienen al momento de tener la facilidad de automatizar el banco de pruebas.
- El estudio del sistema de control, tratará sobre la etapa electrónica para la realización de la automatización del intercambiador de calor, y de esta manera obtener un equipo completamente automático, temas de importancia como el software utilizado para la programación, aplicaciones, diseño del programa, programación, conexiones realizadas, tarjetas de acondicionamiento de señal.
- La importancia de esta parte del trabajo se basa principalmente en el uso y la puesta en práctica de los conocimientos adquiridos, así como también visualizar el funcionamiento por medio de la interfaz elemento electrónico – computadora y a su vez computadora – ser humano. El programa desarrollado debe satisfacer todas las opciones para controlar todos los elementos.

RESUMEN

El presente proyecto hace énfasis en la automatización de máquinas industriales por medio de dispositivos de control como son los microcontroladores, mediante los cuales se puede operar un sistema o proceso con la mínima intervención del ser humano.

El trabajo comprende el diseño del HMI, programación, implementación, montaje y pruebas de funcionamiento de la automatización de un intercambiador de calor de tubos y coraza didáctico.

Para conseguir este objetivo se requiere de un análisis del comportamiento y condiciones de operación del equipo, obteniéndose los criterios necesarios en base a los cuales se seleccionan los elementos a ser reemplazados.

Se construyen los sistemas de medición necesarios en el software para evaluar el funcionamiento real del intercambiador de calor, de esta forma se hace un análisis experimental que confirma la validez del estudio teórico correspondiente.

Las pruebas realizadas evidencian que los nuevos elementos están trabajando correctamente.

Con el trabajo de automatización el laboratorio brindará una mejor ayuda didáctica en el estudio de la materia de transferencia de calor. Además los estudiantes tendrán una visión más amplia de los conceptos básicos de la automatización y de los procesos que se pueden controlar en la industria.

ABSTRACT

This project emphasizes the automation of industrial machinery through control devices such as microcontrollers, through which you can operate a system or process with minimal human intervention.

The work includes the design of HMI, programming, implementation, installation and performance testing of the automation of a heat exchanger tube and shell teaching.

To achieve this goal requires an analysis of the behavior and operating conditions of the equipment, obtaining the necessary criteria on which the elements are selected to be replaced.

Measurement systems required in the software are constructed to evaluate the actual performance of the heat exchanger, thus an experimental analysis confirms the validity of the corresponding theoretical study is done.

Tests show that the new features are working properly.

In the laboratory automation work will provide a better teaching aid in the study of the transfer of heat. In addition students will have a broader basic automation concepts and processes that can be controlled in the vision industry.

SIMBOLOGÍA

T_{hi}, T_{ho}	Temperatura de ingreso y salida del fluido caliente.
T_{ci}, T_{co}	Temperatura de ingreso y salida del fluido frío.
\dot{m}_h	Flujo másico del fluido caliente
\dot{m}_c	Flujo másico del fluido frío
C_h	Capacidad calorífica del fluido caliente.
C_c	Capacidad calorífica del fluido frío.
\dot{Q}	Coefficiente de transferencia de calor
U	Coefficiente de transferencia de calor total
A	Área de transferencia de calor del intercambiador
ΔT_m	Diferencia de temperatura media a través del intercambiador de calor.
\dot{W}	Trabajo
\dot{m}	Flujo másico
Δh	Variación de la entalpía del fluido
ΔE_c	Variación de la energía cinética
ΔE_p	Variación de la energía potencial
F_T	Factor de Corrección
P	Factor de corrección del lado de los tubos
R	Factor de corrección del lado de la coraza
ε	Efectividad de transferencia de calor
LMTD	Diferencia Temperatura media logarítmica

GLOSARIO

Térmico.- Del calor o de la temperatura o relacionado con ellos.

Mecanismo.- Conjunto de piezas o elementos que ajustados entre sí y empleando energía mecánica hacen un trabajo o cumplen una función.

Densidad.- Es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia.

Flujo Laminar.- Se llama flujo laminar o corriente laminar, al movimiento de un fluido cuando éste es ordenado, estratificado, suave.

Flujo Turbulento.- Se llama flujo turbulento o corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos.

Iterativo.- Que se repite o se ha repetido muchas veces.

Automatización.- Aplicación de máquinas o de procedimientos automáticos en la realización de un proceso o en una industria.

Actuador.- Dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.

Perturbación.- Alteración o trastorno que se produce en el orden o en las características permanentes que conforman una cosa o en el desarrollo normal de un proceso.

Histéresis.- Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

Repetibilidad.- Aptitud de un instrumento de medición para dar indicaciones muy cercanas entre sí durante la aplicación repetida al mismo mensurando en las mismas condiciones de medición.

Polarización.- Es el proceso por el cual en un conjunto originariamente indiferenciado se establecen características que determinan la aparición en él de dos o más zonas mutuamente cargadas.

Sistema embebido.- Es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real.

PIC.- Peripheral Interface Controller (controlador de interfaz periférico).

Módulo de Relés.- Dispositivo electromecánico, funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

Índice

JUSTIFICACIÓN	V
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	V
OBJETIVO GENERAL	VI
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	VI
HIPÓTESIS.....	VII
ALCANCE.....	VIII
RESUMEN.....	IX
SIMBOLOGÍA	XI
GLOSARIO	XII
CAPITULO I.....	1
1 INTERCAMBIADORES DE CALOR	1
1.1 Generalidades.....	2
1.2 Fundamentos de la Transferencia de Calor.....	3
1.2.1 Conducción.....	3
1.2.2 Convección.....	5

1.3	Comportamiento del Flujo de los Líquidos en el Intercambiador	6
1.4	Mecanismo de Transferencia de Energía y Flujo de Fluidos	7
1.5	Análisis del Intercambiador de Calor.....	7
1.5.1	Balance de energía.....	7
1.5.2	Análisis termodinámico de calor.	10
1.5.3	Método de la diferencia media logarítmica de temperatura.	11
1.5.4	Eficiencia Térmica.	14
1.6	Automatización Industrial.....	15
1.7	Definición de automatización industrial.	16
1.8	Pirámide de Automatización	17
1.8.1	Nivel de campo.....	17
1.8.2	Nivel de célula.....	18
1.8.3	Nivel de supervisión.	19
1.8.4	Nivel de gestión.....	20
CAPITULO II		21
2	AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	21
2.1	Descripción del Intercambiador de Calor	22
2.2	Datos Técnicos del Equipo.....	23
2.3	Esquema anterior del Intercambiador de Calor.....	24
2.4	Instrumentación.....	24
2.5	Instrumentación Industrial del Equipo.....	25
2.5.1	Controladores de temperatura.	25
2.5.2	Termocuplas.	26
2.5.3	Relés térmicos.	27

2.5.4	Contactores.....	28
2.5.5	Medidor de caudal.....	29
2.5.5.1	Contadores de chorro único.....	29
2.5.6	Bomba de agua.....	30
2.5.7	Termostato.....	31
2.5.8	Resistencia Eléctrica.....	32
2.6	Conclusión.....	33
2.7	Elementos y Accesorios para la Automatización.....	33
2.7.1	Etapas de agua.....	34
2.7.1.1	Sensores de temperatura.....	34
2.7.1.1.1	LM-35.....	36
2.7.1.2	Válvula proporcional.....	37
2.7.1.2.1	Válvula proporcional con motor DC.....	38
2.7.1.2.2	Parámetros de selección general de las válvulas.....	39
2.7.1.3	Caudalímetro.....	40
2.7.1.3.1	Parámetros de selección.....	41
2.7.1.3.2	Caudalímetro YF-S201.....	42
2.7.1.3.3	Sensores de presión.....	43
2.7.1.3.4	Sensor de presión DWYER 628.....	44
2.7.2	Etapas de adquisición de datos.....	45
2.7.2.1	Control y Adquisición de Datos.....	46
2.7.2.1.1	PLC con SCADA.....	48
2.7.2.1.2	Tarjeta de control y adquisición de datos.....	49
2.7.2.1.3	Sistemas embebidos basados en μ C.....	50
2.7.2.1.3.1	Arduino.....	51
2.7.2.1.3.2	Microcontrolador PIC16F873.....	52
2.7.2.1.3.3	Módulo de Relés.....	53
CAPITULO III.....		55

3	DISEÑO DEL PROGRAMA	55
3.1	LabVIEW	56
3.1.1	Iniciación en LabVIEW	57
3.2	Programación en LabVIEW	59
3.2.1	Estructuras LabVIEW	59
3.2.1.1	Case Structure	60
3.2.1.2	Stacked Sequence Structure	60
3.2.1.3	While Loop.....	61
3.2.1.4	Formule Node	61
3.3	Funciones Arduino	62
3.3.1	Init	62
3.3.2	Set Digital Pin Mode	63
3.3.3	Digital Write Pin	63
3.3.4	Analog Read Pin.....	63
3.3.5	Close.....	64
3.4	Prueba de adquisición de señales y control de actuadores	64
3.4.1	Configuración de la placa Arduino como tarjeta de adquisición	65
3.4.2	Adquisición de señales de temperatura.	66
3.4.3	Adquisición de señales de presión.....	67
3.4.4	Adquisición de señales de caudal	69
3.4.5	Control de la circulación de agua.	74
3.4.6	Manejo de la Resistencia Eléctrica.....	80
	CAPITULO 4.....	82
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
4.1	Descripción del equipo de laboratorio	82
4.2	Resultados experimentales	85

4.3	Análisis de los resultados obtenidos en el intercambiador de calor.....	99
CAPITULO 5.....		101
5	COSTOS.....	101
5.1	Evaluación Económica.....	101
5.2	Costo de Materiales Directos	101
5.3	Costo de Materiales Indirectos.....	102
5.4	Costo Total del proyecto	102
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES.....		105
BIBLIOGRAFÍA		107

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Intercambiador de calor de tubo y carcasa	2
Figura 1.2 Proceso de transferencia de calor por Conducción.....	4
Figura 1.3 Proceso de transferencia de calor por Convección	5
Figura 1.4 Proceso de transferencia de calor	6
Figura 1.5 Balance de energía en un intercambiador de calor	8
Figura 1.6 Temperaturas de entrada y salida del intercambiador	12
Figura 1.7 Pirámide de automatización.....	17

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Diagrama del intercambiador de calor.....	24
Figura 2.2 Controlador de temperatura Camsco Tc-96N	25
Figura 2.3 Termocuplas	26
Figura 2.4 Relé térmico.....	27
Figura 2.5 Contactor.....	28
Figura 2.6 Medidor de flujo	29
Figura 2.7 Bomba centrífuga.....	30
Figura 2.8 Termostato	31
Figura 2.9 Resistencia Eléctrica	32
Figura 2.10 Sensor de temperatura LM35.....	36
Figura 2.11 Válvula tipo compuerta.....	38
Figura 2.12 Motor DC.....	39
Figura 2.13 Válvula proporcional con motor DC	39
Figura 2.14 Caudalímetro.....	40
Figura 2.15 Caudalímetro YF-S201	42
Figura 2.16 Transmisor de presión serie-628	45
Figura 2.17 Proceso de adquisición de datos	46
Figura 2.18 PLC con SCADA.....	48
Figura 2.19 Tarjeta de adquisición de datos	49
Figura 2.20 Arduino modelo ATMEGA-2560	51
Figura 2.21 Distribución de pines del PIC16F873.....	53

Figura 2.22 Módulo de Relés	53
-----------------------------------	----

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Software LabVIEW	56
Figura 3.2 Diagrama de Flujo de LabVIEW.....	58
Figura 3.3 Estructuras de LabVIEW	59
Figura 3.4 Estructura Case	60
Figura 3.5 Estructura Secuence	61
Figura 3.6 Estructura While Loop	61
Figura 3.7 Estructura Formule Node	62
Figura 3.8 Función INIT	62
Figura 3.9 Función Set Digital Pin Mode	63
Figura 3.10 Función Digital Write Pin	63
Figura 3.11 Función Analog Read Pin.....	64
Figura 3.12 Función Close	64
Figura 3.13 Conexiones de elementos	65
Figura 3.14 Configuración de Tarjeta de Adquisición	65
Figura 3.15 Programación de Adquisición de señales de temperatura	66
Figura 3.16 Diagrama de Flujo de Adquisición de Señales de Temperatura	67
Figura 3.17 Conexión de salida de corriente.....	68
Figura 3.18 Programación de Adquisición de señales de Presión	68
Figura 3.19 Diagrama de Flujo de Adquisición de Señales de Presión	69
Figura 3.20 Tarjeta de Acondicionamiento de Señal.....	70
Figura 3.21 Diagrama PWM.....	70
Figura 3.22 Diagrama de Acondicionador de Sensores de Caudal.....	71
Figura 3.23 Programación de Adquisición de señales de Caudal	71
Figura 3.24 Diagrama de Flujo de Acondicionamiento de señal de pulsos	72
Figura 3.25 Diagrama de Flujo de Adquisición de Señales de Caudal.....	73
Figura 3.26 Activación de la Bomba.....	74
Figura 3.27 Apagado de la bomba	74
Figura 3.28 Diagrama de Flujo para la circulación de Agua	75
Figura 3.29 Estructura de un Puente H	76

Figura 3.30 Los dos estados básicos del circuito	77
Figura 3.31 Programación de apertura de la válvula proporcional	78
Figura 3.32 Programación de Cierre de la válvula proporcional	78
Figura 3.33 Funcionamiento de la válvula proporcional	79
Figura 3.34 Programación encendido y apagado de la resistencia eléctrica	80
Figura 3.35 Adquisición de señales de la resistencia eléctrica	81
CAPÍTULO 4	
Figura 4.1 HMI del Intercambiador de calor	82
Figura 4.2 Evolución de temperaturas en el HMI	84
Figura 4.3 Barra de selección de datos	84
Figura 4.4 Datos transportados a Excel	85
Figura 4.5 Calor generado en el EAA	86
Figura 4.6 Calor recibido en el EAA	87
Figura 4.7 Pérdidas de calor en el EAA	87
Figura 4.8 Eficiencia del EAA	87
Figura 4.9 Comparación de resultados del LMTD en el EAA	88
Figura 4.10 Comparación de resultados del U en el EAA	88
Figura 4.11 Evolución de las temperaturas del agua caliente en el EAA	88
Figura 4.12 Evolución de las temperaturas del agua fría en el EAA	89
Figura 4.13 Esquema del intercambiador de calor	90
Figura 4.14 Calor generado en el EDA.....	93
Figura 4.15 Calor recibido en el EDA	93
Figura 4.16 Perdidas de calor en el EDA	93
Figura 4.17 Eficiencia en el EDA	95
Figura 4.18 Resultados del LMTD en el EDA.....	96
Figura 4.19 Comparación de resultados del U en el EDA	97
Figura 4.20 Evolución de las temperaturas de agua caliente en el EDA	97
Figura 4.21 Evolución de las temperaturas de agua fría en el EDA	98
Figura 4.22 Resultados de la Presión en el Sistema	98

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Datos del intercambiador de calor	23
Tabla 2.2 Características de los sensores de temperatura	35
Tabla 2.3 Tipos de Sensores de Presión.....	44
Tabla 4.1 Datos del equipo antes de la automatización (EAA)	86
Tabla 4.2 Datos del equipo después de la automatización (EDA).....	91
Tabla 4.3 Cálculo de resultados	92
Tabla 4.4 Datos de cálculo para la eficiencia.....	95
Tabla 5.1 Costos de Materiales Directos	101
Tabla 5.2 Costos de Materiales Indirectos	102
Tabla 5.3 Total de Costos de Materiales.....	102

Índice de Anexos

Anexo 1 Sensor de Temperatura LM-35
Anexo 2 Selección de Válvulas
Anexo 3 Criterio de Selección de Caudalímetros
Anexo 4 Sensor de Presión
Anexo 5 Micro controlador PIC 6F873A
Anexo 6 Programación del PIC 6F873A
Anexo 7 Referencias del lenguaje Arduino
Anexo 8 Diagrama de instalación
Anexo 9 Diagrama Programación General
Anexo 10 Diagrama de programación Excel
Anexo 11 Diagrama Unifilar
Anexo 12 Guías de Laboratorio
Anexo 13 Manual de Operación

CAPITULO I

1 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Introducción

Los intercambiadores de calor 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. En un intercambiador la transferencia de Calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa.

En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total U que toma en cuenta la contribución de todos estos efectos sobre dicha transferencia. La razón de transferencia de calor entre los dos fluidos en un lugar dado a un intercambiador depende de la magnitud de la diferencia de temperatura local, la cual varía a lo largo de dicho intercambiador.

También suele ser conveniente trabajar con la diferencia de temperatura media logarítmica $LMTD$ (siglas en inglés) la cual es una diferencia media equivalente de temperatura entre los dos fluidos para todo el intercambiador.

En los intercambiadores de calor se toma el factor de corrección F para tomar en cuenta la desviación de la diferencia de temperatura media logarítmica.

Para algunas configuraciones complejas se considera el método de efectividad NTU , lo cual permite analizar los intercambiadores cuando no se conocen las temperaturas de los fluidos.

1.1 Generalidades

Los Intercambiadores de Calor (fig. 1.1) 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. Los intercambiadores de calor difieren de las cámaras de mezclado en el sentido de que no permiten que se combinen los dos fluidos que intervienen.

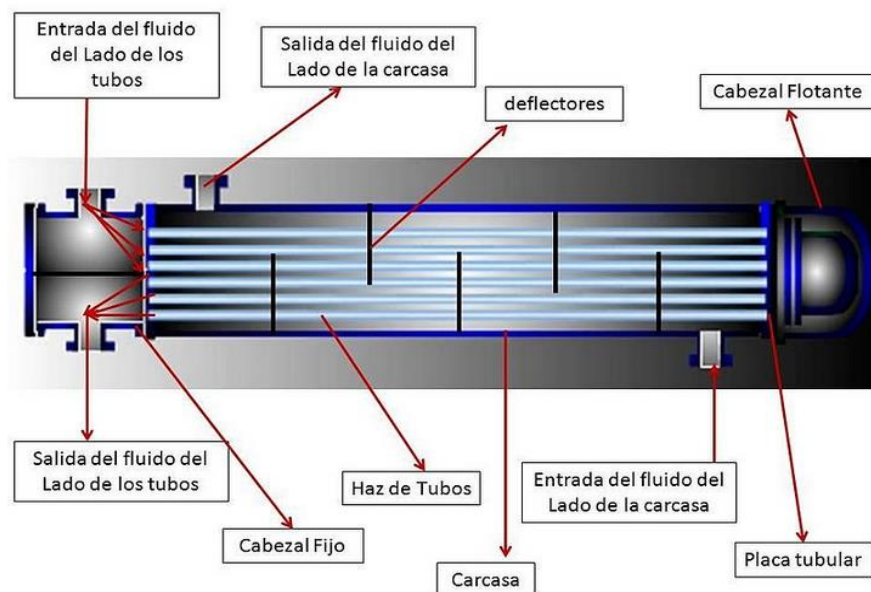


Figura 1.1 Intercambiador de calor de tubo y carcasa (UPC, 2009)

La función de estos equipos es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor sólo se transfiere en una sola dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura.

Los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan. Son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones, desde los sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento del aire hasta los procesos químicos y la producción de energías en grandes plantas industriales.

1.2 Fundamentos de la Transferencia de Calor

Un intercambiador de calor está relacionado con dos fluidos que fluyen separados por una pared sólida. En primer lugar, el calor se transfiere del fluido caliente hacia la pared por *convección*, después a través de la pared por *conducción*, y por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por *convección*. Cualesquiera efectos de la radiación suelen incluirse en los coeficientes de transferencia de calor por convección **(Cengel & Boles, 2007)**

1.2.1 Conducción.

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. **(Inzunza, 2006)**

Para un volumen de espesor Δx como se muestra en la figura (1.2), con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con $T_2 > T_1$ se encuentra que el calor ΔQ transferido en un tiempo Δt fluye del extremo caliente al frío.

Si se llama H (en Watts) al calor transferido por unidad de tiempo, la rapidez de transferencia de calor $H = \Delta Q/\Delta t$, está dada por la ley de la conducción de calor de Fourier.

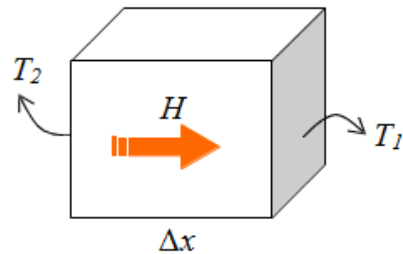


Figura 1.2 Proceso de transferencia de calor por Conducción

(Inzunza, 2006, pág. 409)

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k.A \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde k (en $W/m^{\circ}K$) se llama conductividad térmica del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y dT/dx es el gradiente de temperatura.

1.2.2 Convección.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. (Inzunza, 2006)

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:

$$H = h A (T_A - T) \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W / (m^2K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se puede apreciar en el esquema de la figura (1.3).

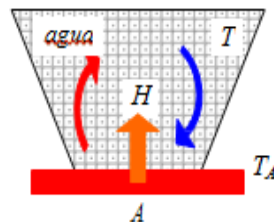


Figura 1.3 Proceso de transferencia de calor por Convección

(Inzunza, 2006, pág. 413)

1.3 Comportamiento del Flujo de los Líquidos en el Intercambiador

Los estudios de transferencia de calor en equipos intercambiadores de calor, se dirigen a la búsqueda de un incremento en el porcentaje de transferencia de calor, evitando caídas de presión demasiado altas para estos equipos. En la mayoría de los intercambiadores de calor, el mecanismo de transferencia de calor es la convección de calor. La convección de calor se provoca entre una superficie sólida y un fluido en movimiento adyacente a ésta; por ejemplo, un fluido frío adyacente a una superficie caliente recibe calor, el cual es transferido al resto del fluido frío mezclándose entre sí.

En los intercambiadores de calor tipo tubos y coraza, el calor se transfiere entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas, los mismos que están separados por un área de superficie (banco de tubos), que separa a los dos fluidos en el intercambiador y a través de la cual se produce la transferencia de calor. La figura (1.4) muestra cómo van las temperaturas a lo largo del intercambiador de calor, la corriente del lado de la carcasa y la corriente del lado de los tubos.

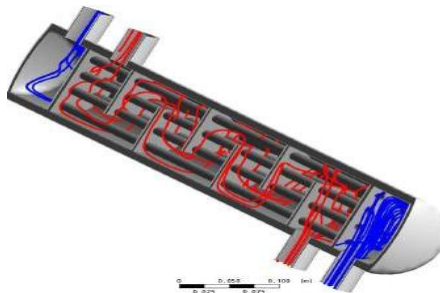


Figura 1.4 Proceso de transferencia de calor (DSC, 2009)

1.4 Mecanismo de Transferencia de Energía y Flujo de Fluidos

El mecanismo de transferencia de calor entre un fluido y una superficie sólida, es una combinación de conducción y transporte de masa, es decir, que si el sólido tiene mayor temperatura que el fluido, el calor fluirá primero por conducción desde la superficie sólida hacia el fluido adyacente a las paredes, incrementando la energía interna del fluido y el movimiento de éste; si las partículas calientes del fluido llegan a una zona de temperatura menor, el calor se transfiere de nuevo por conducción desde el fluido más caliente al más frío.

1.5 Análisis del Intercambiador de Calor

Los intercambiadores de calor son de uso común y un ingeniero se encuentra a menudo en la posición de seleccionar un intercambiador de calor que logre un cambio de temperatura específica de una corriente de fluido de gasto conocido, o bien, de predecir las temperaturas de salida de las corrientes de fluido caliente y del frío en un intercambiador de calor específico.

1.5.1 Balance de energía.

Los intercambiadores de calor suelen operar durante largos periodos sin cambios en sus condiciones de operación, por lo tanto se pueden considerar como aparatos de flujo estacionario de trabajo.

El gasto de masa de cada fluido permanece constante y las propiedades de los fluidos, como la temperatura y la velocidad, en la entrada o la salida, siguen siendo las mismas.

Las corrientes de fluido experimentan poco o ningún cambio en sus velocidades y, como consecuencia, los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables.

La superficie exterior del intercambiador de calor está aislada, de modo que no se tiene pérdida de calor al medio y por lo tanto cualquier transferencia de calor solo ocurre entre los fluidos (fig. 1.5).



Figura 1.5 Balance de energía en un intercambiador de calor

(Pillajo A., 2009)

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica se requiere que la velocidad de la transferencia de calor desde el fluido caliente sea igual a la transferencia de calor hacia el frío; es decir,

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C p_c (T c_o - T c_i) \quad (\text{Ec. 1.5})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C p_h (T h_i - T h_o) \quad (\text{Ec. 1.6})$$

De donde:

T_{hi}, T_{ho} : Temperatura de ingreso y salida del fluido caliente [$^{\circ}\text{C}$].

C_{ph} : Calor específico del fluido caliente [$\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$].

\dot{m}_h : Flujo másico del fluido caliente [kg/s]

T_{ci}, T_{co} : Temperatura de ingreso y salida del fluido frío [$^{\circ}\text{C}$].

C_{pc} : Calor específico del fluido frío [$\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$].

\dot{m}_c : Flujo másico del fluido frío [kg/s]

Nótese que la razón de transferencia de calor \dot{Q} se toma como una cantidad positiva y se sobre-entiende que su dirección va del fluido caliente hacia el frío, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Debido a que las propiedades de los fluidos pueden cambiar con la temperatura, y aunque estas variaciones son insignificantes, es recomendable encontrar un valor de estas temperaturas medias de los fluidos.

La relación entre el calor transferido y la diferencias de temperaturas se desarrolla en función del coeficiente de transferencia de calor total U y el área de transferencia A .

Como ΔT varía con la posición en el intercambiador, se utiliza la siguiente ecuación.

$$\dot{Q} = U A \Delta T_m \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Dónde:

\dot{Q} = Coeficiente de transferencia de calor [KW= KJ/s]

U = Coeficiente de transferencia de calor total [W/m² °k]

A = Área de transferencia de calor del intercambiador [m²]

ΔT_m = Diferencia de temperatura media adecuada a través del intercambiador [°K].

1.5.2 Análisis termodinámico de calor.

Debido a que los intercambiadores de calor se consideran como dispositivos de flujo permanente, se puede utilizar la ecuación de la conservación de la energía para el cálculo de calor:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta Ec + \Delta Ep) \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Dónde:

\dot{Q} = Relación de transferencia de calor [J/s]

\dot{W} = Trabajo [J/s]

\dot{m} = Flujo másico [Kg/s]

Δh = Variación de la entalpía del fluido [J/s]

$\Delta E_c =$ Variación de la energía cinética [J/s]

$\Delta E_p =$ Variación de la energía potencial [J/s]

Para dispositivos de flujo permanente, el volumen de control es el mismo por lo que no existe trabajo en la frontera escogida para el análisis, tampoco existe algún elemento que transmita potencia al volumen de control, por lo que $\dot{W} = 0$.

Los valores de entalpía que se manejan en la práctica, son sumamente mayores a 1J/s, que es el valor que corresponde a la energía cinética de una velocidad de 45 m/s, por lo que para velocidades bajas la energía cinética se pueden omitir.

La energía potencial en estos dispositivos, también pueden omitirse, debido a que la diferencia en la entrada y la salida de los fluidos no es muy grande.

Los valores de la entalpía se encuentran a través de tablas de acuerdo con la temperatura y el tipo de fluido. De acuerdo con lo anterior la ecuación de la transferencia de calor quedaría así:

$$\dot{Q} = \dot{m} (\Delta h) \quad (\text{Ec. 1.9})$$

1.5.3 Método de la diferencia media logarítmica de temperatura.

Para diseñar el rendimiento de un intercambiador de calor, es esencial relacionar la

transferencia total de calor con cantidades tales como las temperaturas de entrada y salida del fluido (fig. 1.6), el coeficiente global de transferencia de calor, y el área superficial total para la transferencia de calor.

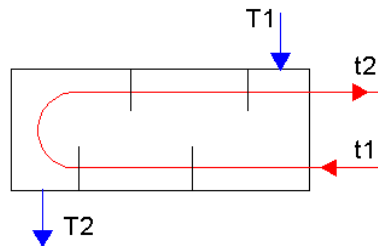


Figura 1.6 Temperaturas de entrada y salida del intercambiador

(Quinchimba & Robayo , 2009)

Dichas relaciones se pueden obtener fácilmente al realizar un balance de energía a los fluidos frío y caliente, pero tomando en cuenta las siguientes restricciones:

- 1) El análisis se realiza en el estado estable.
- 2) Los calores específicos de los fluidos se mantienen constantes.
- 3) Los intercambiadores de calor son adiabáticos, esto significa que el intercambio de calor es entre los fluidos.
- 4) El coeficiente global de Transferencia de Calor es uniforme a lo largo del intercambiador de calor.
- 5) Los cambios de energía cinética y potencial son despreciables.

Por lo general, en un intercambiador de calor las temperaturas de los fluidos no son constantes y varían de un punto a otro según el calor que pasa del fluido más caliente al

más frío. La diferencia de temperaturas media efectiva es la diferencia de temperaturas media logarítmica **MLDT**, ver ecuación 1.10.

$$MLDT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(Th_i - Tc_o) - (Th_o - Tc_i)}{\ln\left[\frac{(Th_i - Tc_o)}{(Th_o - Tc_i)}\right]} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

La **MLDT** utilizada en intercambiadores de calor de tipo tubos y coraza es la de un intercambiador de contraflujo.

El uso de la media logarítmica de temperatura es solo una aproximación, ya que por lo general en la práctica, el coeficiente de transferencia de calor total **U** no es constante, por lo que usualmente se modifica la media logarítmica de temperaturas por medio del factor de corrección **F_T**. Para encontrar el valor del factor **F_T** de acuerdo a las diferentes configuraciones de intercambiadores, se utilizan los parámetros **P** y **R**.

Estos parámetros se obtienen de la siguiente manera, para la configuración de un intercambiador de un paso por la coraza y 2, 4, 6, cualquier múltiplo de dos pasos por los tubos.

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

(Ec. 1.11)

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

(Ec. 1.12)

Dónde:

P: Factor de corrección del lado de los tubos [adimensional]

R: Factor de corrección del lado de la coraza [adimensional]

***T*₁**: Temperatura de entrada del lado de la coraza [°K]

***T*₂**: Temperatura de salida del lado de la coraza [°K]

***t*₁**: Temperatura de entrada del lado de los tubos [°K]

***t*₂**: Temperatura de salida del lado de los tubos [°K]

No existe diferencia en que el fluido caliente o el frío fluyan por la coraza o el tubo, la determinación del factor de corrección ***F_T*** requiere que se disponga de las temperaturas de entrada y salida, tanto para el fluido frío como para el caliente.

Para obtener la temperatura media efectiva, la ***MLDT*** calculada para contraflujo, debe multiplicarse por el factor de corrección.

$$\Delta T_{media\ efectiva} = MLDT \cdot F_T \quad (Ec. 1.13)$$

1.5.4 Eficiencia Térmica.

Es más sencillo utilizar el método de la diferencia media logarítmica de temperaturas para analizar un intercambiador de calor, cuando se conocen las temperaturas de entrada de los fluidos y las temperaturas de salida, se especifican o se determinan con facilidad a partir de las expresiones de balance de energía. La eficiencia de un intercambiador es un parámetro de desempeño del intercambiador en funcionamiento.

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_h} = \frac{\text{Calor Ganado}}{\text{Calor Generado}} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

La eficiencia de un intercambiador de calor es el cociente entre la energía capturada efectivamente por el fluido receptor y la energía que coloca a su disposición el fluido que cede.

$$\frac{Q_c}{Q_h} = \frac{m_c C_{p,c} T_2 - T_1}{m_h C_{p,h} t_1 - t_2} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

En donde $C_c = \dot{m}_c C_{p,c}$ y $C_h = \dot{m}_h C_{p,h}$ son las razones de capacidad calorífica de los fluidos frío y caliente respectivamente.

1.6 Automatización Industrial

Por siglos el hombre ha construido máquinas que imitan las partes del cuerpo humano, estas creaciones mecánicas deben considerarse como invenciones aisladas que reflejan

el genio de los hombres que se anticiparon a su época. El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranajes y la tecnología en sensores ha contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. En un contexto industrial se puede definir la automatización como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos eléctricos basados en computadoras para la operación y control de la producción.

1.7 Definición de automatización industrial.

La automatización como una disciplina de la ingeniería, abarca la instrumentación industrial, que incluye los sensores, los transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar, controlar las operaciones de plantas o procesos industriales.

La automatización Industrial es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar maquinarias y/o procesos industriales sustituyendo a operadores humanos.

1.8 Pirámide de Automatización

El empleo de computadores y autómatas programables, como herramienta esencial para un control efectivo y mejor nivel de tratamiento de la información, es habitual en las plantas industriales modernas, así como la implantación de redes de comunicación internas, cumpliendo la llamada pirámide de automatización como se muestra en la figura (1.7).

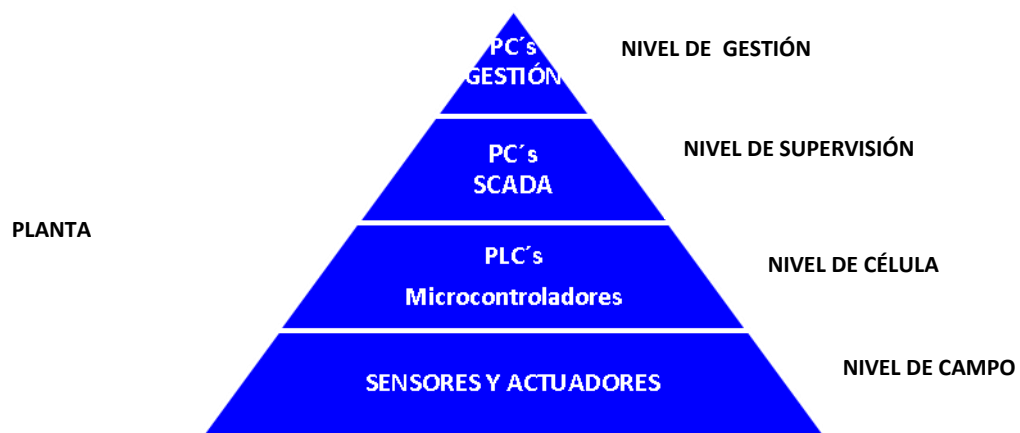


Figura 1.7 Pirámide de automatización (Aguinaga, 2011)

1.8.1 Nivel de campo.

En la parte inferior de la pirámide de automatización se encuentra la planta o el proceso industrial controlado con los respectivos sensores que detectan y miden los parámetros operativos, este nivel se lo conoce como Nivel de Campo, también llamado nivel de

instrumentación, está formado por los elementos de medida (sensores) y mando (actuadores) distribuidos en una línea de producción. Son los elementos más directamente relacionados con el proceso productivo ya que los actuadores son los encargados de ejecutar las órdenes de los elementos de control para modificar el proceso productivo, y los sensores miden variables en el proceso de producción, como por ejemplo: nivel de líquidos, caudal, temperatura, presión, posición.

1.8.2 Nivel de célula.

El nivel superior es el que le corresponde a los controladores, estos componentes son los que efectúan directamente la función de controlar el proceso.

Un PLC por ejemplo tiene un programa que partiendo de la lectura de las entradas, procesa la información y escribe los resultados del programa en las salidas que están conectadas a los actuadores, este se lo conoce como Nivel de Célula, en este nivel se sitúan los elementos capaces de gestionar los actuadores y sensores del nivel anterior tales como autómatas programables o equipos de aplicación específica basados en microprocesador como robots, máquinas herramienta o controladores de motor.

Estos dispositivos son programables y permiten que los actuadores y sensores funcionen de forma conjunta para ser capaces de realizar el proceso industrial deseado.

Los dispositivos de este nivel de control junto con los del nivel inferior de acción/sensado poseen entidad suficiente como para realizar procesos productivos por sí

mismos. En este nivel se encuentran los controladores lógicos programables, tarjetas basadas en microprocesador, microcontroladores y tarjetas especiales para el control industrial.

1.8.3 Nivel de supervisión.

El siguiente nivel superior, llamado Nivel de Supervisión, en el cuál están computadoras personales los llamados SCADA, que son sistemas de supervisión y adquisición de datos, supervisan a los controladores y efectúan un control indirecto enviando las consignas o referencias a los controladores para que estos puedan efectuar su función y, adicionalmente reciben los datos de los diferentes sensores del proceso, sensores que están detectando y transmitiendo los valores de las salidas del proceso.

Con esta información es posible realizar una serie de análisis o estudios con los que se pueden obtener valiosos indicadores que permitan una retroalimentación sobre un operador o sobre el propio proceso.

Es importante recalcar que en el Nivel de Supervisión se usan PC's, lo que permite en este nivel la utilización de potente software de modelación y simulación, bases de datos industriales, programas de operación y mantenimiento, entre otros.

En este nivel es posible visualizar cómo se están llevando a cabo los procesos de planta, y a través de entornos SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) poseer una "imagen virtual de la planta" de modo de que ésta se puede recorrer de manera

detallada, o bien mediante pantallas de resumen capaces de disponer de un “panel virtual” donde se muestren las posibles alarmas, fallos o alteraciones en cualquiera de los procesos que se llevan a cabo.

1.8.4 Nivel de gestión.

El Nivel de Gestión, está en la cúspide de la pirámide, con el uso de PC's comunicadas por red con el SCADA, posibilita dotar de la información necesaria para que los Directivos y alta gerencia de una industria puedan tomar adecuadamente sus decisiones. Esta información técnica además se entrega de tal manera y utilizando las interfaces amigables, para que un directivo que desconoce del área técnica pueda interpretar y comprender estos datos para utilizarlos en la gestión.

CAPITULO II

2 AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Introducción

Uno de los principales retos de la automatización y control es la selección adecuada de la tecnología a utilizar para la elaboración del proyecto.

El presente capítulo describe las características de todos los elementos con los que cuenta el intercambiador de calor y que van a ser reemplazados además de algunas de las tecnologías más comunes utilizadas actualmente, para la resolución de problemas de automatización y la justificación para utilizar cada una de ellas para el diseño del control del intercambiador de calor didáctico.

Es importante elegir desde un principio la tecnología que se utilizará para resolver un problema de control.

Además se muestra las soluciones a los problemas y dificultades presentadas en el proceso de automatización, entre otros aspectos importantes que permitieron el uso de la computadora para controlar finalmente el intercambiador de calor.

2.1 Descripción del Intercambiador de Calor

El intercambiador de calor consiste en un banco de 32 tubos de cobre, que están colocados paralelamente y equidistantes, por el cual circula el fluido caliente. El banco de tubos está acoplado dentro de una coraza de acero, por la cual recorre el fluido frío.

La unidad de agua caliente se encuentra en un tanque de 100 litros de capacidad. La temperatura es controlada automáticamente por los termostatos, que no permiten que la temperatura exceda los 70 °C. El líquido circula en circuito cerrado.

La unidad de agua fría tiene un tanque de 100 litros de capacidad, y es mantenida por la red de agua potable, la cual llena el tanque y no re-circula, sino que a la salida del intercambiador se produce un bypass y esa agua se dirige al desagüe, es decir que el agua fría circula en circuito abierto. La temperatura que llega de la red de agua fluctúa entre 15 y 20 °C.

Los caudales mínimos de agua son de 10 lt/min para el agua caliente, y 15 lt/min para el agua fría, para la configuración del intercambiador, (dos pasos por los tubos y uno por la coraza), con estos caudales mínimos, se asegura la formación de flujos turbulentos para una mejor eficiencia del equipo. **(Quinchimba & Robayo , 2009)**

2.2 Datos Técnicos del Equipo

A continuación se presentan los datos técnicos del intercambiador de calor. (Ver tabla 2.1)

Área de Transferencia	0.64m ²
Distancia entre deflectores	0.065m
Número de deflectores	5
Diámetro interno de la coraza	6 pulgadas - cédula 40
Tubos internos de Cobre	Conductividad 401 W/ m °K
Diámetro nominal tubos internos	3/8 plg - tipo k
Diámetro exterior tubos internos	0.0127 m
Diámetro interior tubos internos	0.01022 m
Longitud de los tubos internos	0.49 m
Número de tubos internos	32
Paso entre tubos internos	0.0175 m
Claro entre tubos	3/16 '' = 4.8 x 10 ⁻³ m
Arreglo del banco de tubos	Cuadrado
Número de pasos por los tubos	2
Número de pasos por la coraza	1
Presión mínima	125 psi
Flujo por los tubos internos	Agua Caliente
Flujo por la coraza	Agua Fría

Tabla 2.1 Datos del intercambiador de calor (Quinchimba & Robayo , 2009)

2.3 Esquema anterior del Intercambiador de Calor

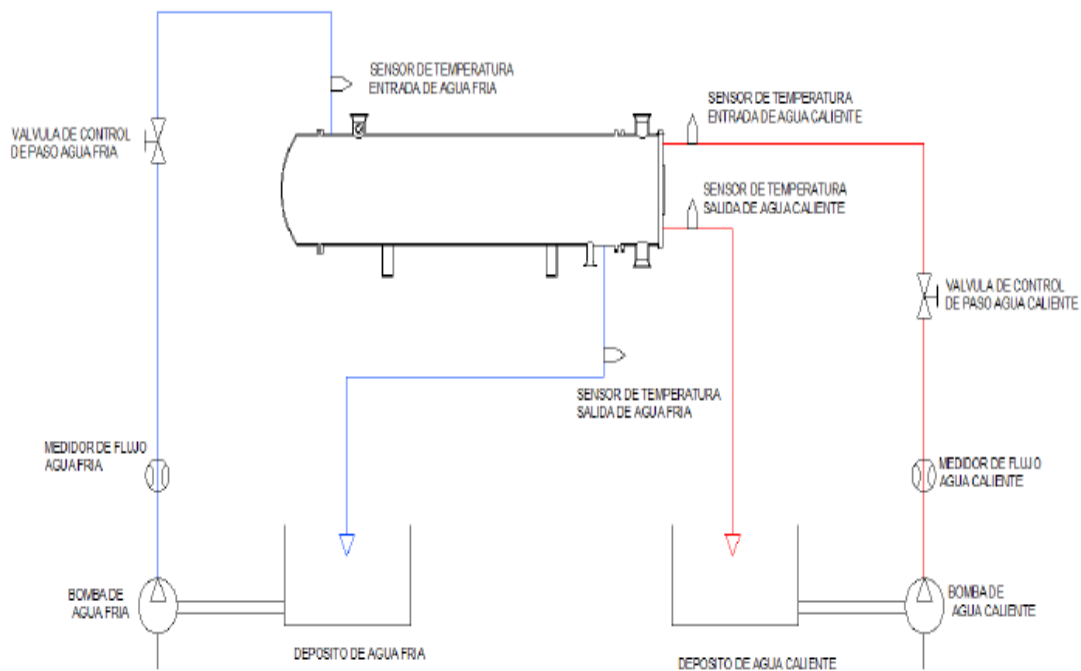


Figura 2.1 Diagrama del intercambiador de calor
(Quinchimba & Robayo , 2009)

2.4 Instrumentación

El equipo se encuentra en el nivel de instrumentación, ya que está formado por los elementos de medida (sensores) y mando (actuadores) estos son los elementos más directamente relacionados con el proceso productivo, los actuadores son los encargados de ejecutar las órdenes de los elementos de control para modificar el proceso productivo, y los sensores miden variables en el proceso de producción, como por ejemplo: nivel de líquidos, caudal, temperatura, presión, posición.

2.5 Instrumentación Industrial del Equipo

La instrumentación del equipo (fig. 2.1), incluye medidores de caudal y controladores de temperatura, conectados a termocuplas, además de una bomba centrífuga que impulsa el agua en los circuitos caliente y frío respectivamente, esto asegura caudales de agua constantes, los cuales son regulados por válvulas de control de flujo para cada fluido.

2.5.1 Controladores de temperatura.

Los controladores de temperatura (fig. 2.2) son instrumentos que forman parte de un sistema de trabajo, este es un medidor que tiene la posibilidad de fijar un “set” (temperatura deseada), y un circuito que compara la diferencia entre la temperatura real y la temperatura deseada.



Figura 2.2 Controlador de temperatura Camsco Tc-96N (Autor, 2013)

2.5.2 Termocuplas.

Las termocuplas es el sensor de temperatura más común utilizado en la industria. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (fig. 2.3). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los mili-volts el cual aumenta con la temperatura.



Figura 2.3 Termocuplas (ElectroSalgado, 2006)

La selección de las termocuplas va de acuerdo al requerimiento de los distintos sistemas de operación a los cuales van a estar expuestos.

De acuerdo a las características a la que está expuesto el equipo la termocupla tipo K ha sido la más recomendable para su utilización ya que trabaja en forma continua en atmósferas oxidantes, como es el caso en el cual el fluido a utilizar es agua y por su capacidad de resistir mayores temperaturas.

2.5.3 Relés térmicos.

Son elementos de protección contra sobrecargas, cuyo principio de funcionamiento se basa en la deformación de ciertos elementos (bimetales) bajo el efecto del calor, para accionar, cuando este alcanza ciertos valores, unos contactos auxiliares que desenergicen todo el circuito y energicen al mismo tiempo un elemento de señalización (fig. 2.4).



Figura 2.4 Relé térmico (SUDEL, 2009)

Datos técnicos:

Voltaje	110V
Frecuencia	60Hz

2.5.4 Contactores.

El contactor (fig. 2.5) es un elemento conductor que tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente, ya sea en el circuito de potencia o en el circuito de mando, tan pronto se energice la bobina.



Figura 2.5 Contactor (SOLEC, 2011)

Datos técnicos:

Voltaje	110V
Frecuencia	60Hz

2.5.5 Medidor de caudal.

Es un instrumento de medición utilizada con frecuencia para tomar medidas de los distintos fluidos.

2.5.5.1 Contadores de chorro único.

Su funcionamiento se basa en la incidencia directa de un único chorro sobre una turbina, alojada en el interior del cuerpo del instrumento de medida, habitualmente de latón o bronce (fig. 2.6).

La velocidad de giro de la turbina depende de la velocidad de impacto del chorro de agua o lo que es lo mismo, del caudal circulante en cada momento.



Figura 2.6 Medidor de flujo (B-METERS, 2011)

2.5.6 Bomba de agua.

Una bomba centrífuga (fig. 2.7), es un dispositivo constituido por un conjunto de paletas rotatorias perfectamente encajadas dentro de una cubierta metálica, de manera que son capaces de impulsar al líquido que esté contenido dentro de la cubierta, gracias a la fuerza centrífuga que se genera cuando giran las paletas.



Figura 2.7 Bomba centrífuga (CodeSolar, 2010)

Datos técnicos:

Q máx.	40 lt/min.
Potencia	0,50 Hp
Amperaje	2,5 A
Voltaje	110 V
Frecuencia	60 Hz
H máx.	40 m

2.5.7 Termostato.

Un termostato (fig. 2.8) es el componente de un sistema de control simple, que abre o cierra un circuito eléctrico en función de la temperatura. Los más utilizados son los termostatos bimetalicos. Este tipo de termostato consiste en dos láminas de metal unidas, con diferente coeficiente de dilatación térmico.



Figura 2.8 Termostato (Wikipedia, 2013)

Cuando la temperatura cambia, la lámina cambia de forma, actuando sobre unos contactos que cierran un circuito eléctrico. Pueden ser normalmente abiertos o normalmente cerrados, cambiando su estado cuando la temperatura alcanza el nivel para los cuales son preparados.

Datos técnicos:

Temp. Máx.	70 °C
Voltaje	110 V

2.5.8 Resistencia Eléctrica.

Las resistencias calentadoras convierten energía eléctrica en calor, al hacer circular corriente eléctrica a través de un conductor se libera calor por encontrar resistencia (fig. 2.9).

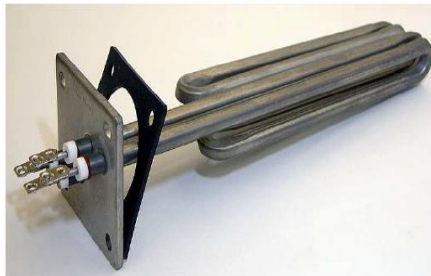


Figura 2.9 Resistencia Eléctrica (Wikipedia, 2013)

El calentador tradicional tiene un depósito donde se acumula el agua y la calienta poco a poco y cuando alcanza la temperatura establecida el termostato la apaga. Este proceso puede durar unos minutos. Las ventajas que tienen las resistencias eléctricas es su reducido tamaño, sin necesidad de bombonas o tubo de suministro de gas.

Datos técnicos:

Potencia: 1500 W

Voltaje 110V

2.6 Conclusión

El Intercambiador de Calor del laboratorio de Termodinámica es un equipo que realiza prácticas, analizando la eficiencia y la transferencia de calor.

Este equipo ha venido operando desde hace algún tiempo atrás, y no se ha realizado ninguna modificación, teniendo en cuenta las consideraciones técnicas descritas, se planteó la solución de automatizar el equipo para mejorar las condiciones del mismo ya que dada la necesidad y avance de la tecnología es necesario tener contacto con las ventajas que la automatización de una máquina nos puede brindar.

2.7 Elementos y Accesorios para la Automatización

A continuación se realiza una breve explicación de los elementos utilizados en el proceso de automatización del equipo, se presenta además las características principales para tener una idea más clara del uso de los distintos componentes utilizados. Se podrá conocer además la compatibilidad entre ellos luego de identificar y conocer cada elemento individualmente y sobre todo en cual etapa van a ser utilizados y las razones de su elección.

Cada elemento se selecciona teniendo en cuenta los parámetros necesarios para el uso de los mismos con respecto a los datos del equipo. Las etapas en las que se divide el proceso de automatización industrial se detallan con sus elementos principales.

2.7.1 Etapa de agua.

Para la selección de los sensores en la etapa de agua se analiza el proceso al momento que fluye el agua por el intercambiador de calor.

El agua pasa por elementos de medición manuales que se reemplazaron por actuadores y sensores que complementan la automatización del Intercambiador de Calor.

2.7.1.1 Sensores de temperatura.

Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en señales eléctricas que son procesadas por equipos eléctricos o electrónicos, se dispone de una gran variedad de sensores para realizar las mediciones de la temperatura a fin de seleccionar el mejor para cada aplicación, se deben tener en cuenta varios factores:

- Temperatura Máxima
- Rango de Temperatura a medir
- Exactitud
- Velocidad de respuesta
- Costo
- Requerimiento de mantenimiento

Estos factores son analizados en relación con los sensores de uso más frecuente, en las industrias de procesos, a continuación se describen algunos sensores de temperatura con sus características (ver tabla 2.2).

Características	Sensor				
	RTD de platino de película	RTD de platino bobinada	Termocupla	Termistor	Silicio
Costo del sensor	Moderado a bajo	Moderado	Bajo	Bajo a moderado	Bajo
Campo de medida	-200 a 750°C (560°C máx.tip.)	-200 a 850 (600°C máx.tip.)	-270 a 1800 °C	-100 a 500 (125°C máx.tip)	-40 a 125°C
Intercambiabilidad	±0.1%. ±0.3°C	±0.06%. ±0.2°C	±0.5%. ±0.2°C	±10%. ±0.2°C	±1%. ±0.3°C
Estabilidad	Excelente	Excelente	Pobre	Moderada	Moderada
Sensibilidad	±0.39%/°C	±0.39%/°C	±40µV/°C	-4%/°C	10mV/°C
Sensibilidad relativa	Moderada	Moderada	Baja	Muy elevada	Moderada
Linealidad	Excelente	Excelente	Moderada	No es lineal	Moderada
Pendiente	Positiva	Positiva	Positiva	Negativa	Positiva
Susceptibilidad a ruido	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja

Tabla 2.2 Características de los sensores de temperatura
(Bonilla R. & Cordero L., 2010)

La temperatura es un factor muy variable que a menudo lo consideramos un simple número, pero la exactitud y repetitividad de los instrumentos que se utilizan para su control pueden verse afectados por la masa térmica, el tiempo de medida, el ruido eléctrico y los algoritmos de medida. En base a los criterios expuestos el sensor de temperatura usado es el LM-35 el cual pertenece a la familia de los circuitos integrados y cumple con los requerimientos del sistema y cuyas especificaciones se encuentran en el anexo 1.

2.7.1.1.1 LM-35

En la medición de temperatura, el sensor es el elemento que mide una señal física, en este caso la temperatura, para obtener una señal eléctrica.

Dentro de los sensores de temperatura se encuentran los sensores de estado sólido, el sensor de temperatura escogido es el LM-35 debido al rango que se requiere medir en el equipo. La serie LM35 (fig. 2.10) son sensores de temperatura integrados, el voltaje de salida es lineal y proporcional a la temperatura en grados centígrados, este sensor no requiere de calibración externa ya que el sensor está calibrado internamente en grados centígrados. Su no linealidad es típicamente de $\pm 1/4$ °C a temperatura ambiente y de $\pm 3/4$ °C cuando se utiliza en la máxima escala de funcionamiento (-55°C hasta 150°C). Además de ello, son del tipo lineal; es decir, que no es necesario forzar al usuario a realizar conversiones debido a que otros sensores están basados en grados Kelvin.

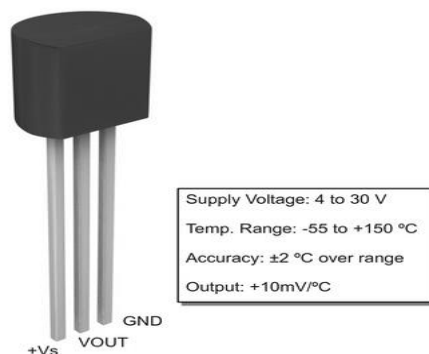


Figura 2.10 Sensor de temperatura LM35 (Instruments, 2011)

Sus características más importantes se describen a continuación:

- Configurado para ser leído en grados Celsius
- Factor de escala lineal de +10 mV / °C
- Rango de trabajo entre -55 °C hasta 150 °C
- Apropriado para aplicaciones remotas
- Bajo costo
- Voltaje de operación de 4 V hasta 30 V
- Corriente de drenaje menor de 60 uA
- Baja impedancia de salida, 0.1 Ω , para una corriente de carga de 1 mA

Por lo tanto, esta clase de sensores son los más usados en la práctica debido a su reducido costo y escasas opciones de mantenimiento, lo que hace un elemento viable en la mayoría de sus aplicaciones.

2.7.1.2 Válvula proporcional.

Se entiende por válvula proporcional aquélla en la que una magnitud física del fluido (caudal o presión) a la salida de la válvula es proporcional a una señal eléctrica analógica de entrada.

2.7.1.2.1 *Válvula proporcional con motor DC.*

La válvula proporcional es elemento necesario para tener un control automatizado de la perturbación cuando se realiza control de nivel o caudal, esta válvula proporcional con motor DC consta de tres elementos principales que son: la válvula tipo compuerta, un actuador que en este caso es un motor DC y un acoplamiento, la válvula tiene terminales para conexión de tuberías de ½ pulgada como se muestra en la figura (fig. 2.11).



Figura 2.11 Válvula tipo compuerta (Provindus, 1983)

El actuador es un motor DC (Direct Current) o también llamados CC (Corriente Continua) (fig. 2.12) de los usados generalmente en robótica, los hay de distintos tamaños, formas y potencias, pero todos se basan en el mismo principio de funcionamiento.

Accionar un motor DC es muy simple y solo es necesario aplicar la tensión de alimentación entre sus bornes. Para invertir el sentido de giro basta con invertir la alimentación y el motor comenzará a girar en sentido opuesto.



Figura 2.12 Motor DC (MagnetLab, 2009)

El acoplamiento tiene la función de transmitir movimiento rotacional del rotor del motor DC hacia el eje de la válvula compuerta para lograr la apertura y cierre de la misma (fig. 2.13). La apertura y cierre de la válvula se lo realizara aplicando un puente H.



Figura 2.13 Válvula proporcional con motor DC (Autor, 2013)

2.7.1.2.2 Parámetros de selección general de las válvulas.

Las válvulas son una solución sencilla, segura y económica para infinidad de sistemas de control o seguridad, pero acotada en presión, temperatura, viscosidad, caudal, grados de corrosión y suciedad del fluido.

Para establecer el caudal de un fluido que pasa a través de una válvula a determinadas condiciones de presión diferencial, temperatura del fluido, estado de agregación, densidad, viscosidad, etc. existen fórmulas, gráficos y tablas que se basan en el factor de flujo de la válvula (ver anexo 2).

2.7.1.3 Caudalímetro.

Un caudalímetro es un instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico. **(Omega, 2013)**

El principio de funcionamiento se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday, según esta ley, un conductor que pasa por un campo magnético produce un voltaje proporcional a la velocidad relativa entre el campo magnético y el líquido conductor (fig. 2.14).

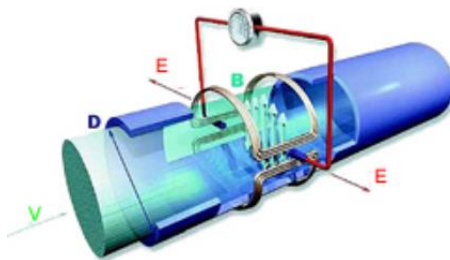


Figura 2.14 Caudalímetro (Simef, 2013)

2.7.1.3.1 *Parámetros de selección.*

El caudal es una de las variables de proceso que más frecuentemente se mide, la elección debe satisfacer los requerimientos de la aplicación, performance y costo.

- **Requerimientos de Aplicación.** Las necesidades de una aplicación específica constituyen el primer conjunto de criterios a examinar. El tipo de líquido y la viscosidad son parámetros más que obvios. Para descartar las alternativas que no satisfacen los requerimientos de aplicación se puede emplear la Tabla B. (Anexo 3)
- **Requerimientos de rendimiento.** Los requerimientos de rendimiento son relativamente sencillos y reflejan la calidad de la medición y las necesidades para el control del sistema.
- **Requerimientos de costo.** Las evaluaciones de costo pueden ser subjetivas y tienden a concentrarse en los costos iniciales de compra, despreciándose los gastos a largo plazo.

Para la realización del proyecto se escogió un sensor de turbina, ya que se necesitaba que el método de medida sea invasivo y su precio es mucho más bajo.

2.7.1.3.2 Caudalímetro YF-S201.

El caudalímetro de Turbina (fig. 2.15) va provisto de una hélice que gira cuando la corriente de líquido incide sobre ella. La velocidad de giro es proporcional al caudal, y para determinarla, se emplea un captador que genera pulsos cuando gira la hélice.

Este captador genera 1 pulso cada vez que un aspa de la hélice pasa frente a él, en caso de los caudalímetros de turbina, de esta forma se obtiene un tren de pulsos cuya frecuencia permite determinar el caudal.



Figura 2.15 Caudalímetro YF-S201 (León, 2010)

Se fabrican en diferentes tipos de materiales dependiendo de la aplicación a la que se va a dedicar, pudiendo ser de acero inoxidable, de diferentes plásticos, e incluso de latón.

Especificaciones

- Tensión de trabajo: 5V – 24V
- Máxima corriente de operación: 15mA (DC 5V)

- Capacidad de carga: $\leq 10\text{mA}$ (DC 5V)
- Rango de temperatura: $\leq 80^\circ\text{C}$
- Humedad: 35%-90% RH
- Temperatura de almacenamiento: -25°C a $+80^\circ\text{C}$
- Humedad de almacenamiento: 25% - 95% RH
- Flujo de Control: 1-30 L / min

2.7.1.3.3 Sensores de presión.

Para medir la presión se utilizan sensores que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite.

(Monge G., 2008) “Es importante tener en cuenta la presión que se mide, ya que pueden distinguirse los siguientes grupos:

Presión Absoluta: presión comparada con el valor cero del vacío absoluto $P_{abs} = 0$

Presión Diferencial: presión que representa la diferencia entre dos presiones absolutas $(p_1 - p_2)$.

Sobrepresión: presión en función de la presión atmosférica, considerándose como valor cero”.

En la tabla 2.3 se puede apreciar los distintos tipos de sensores de presión con los que se cuenta en el mercado. Por las ventajas que ofrece, se ha escogido el sensor de presión tipo piezoeléctrico.

Este tipo de sensor está diseñado para poder realizar la lectura de presión de gas, vapores y líquidos, por lo que sirve para la medición de la presión del equipo.

	Margen en bar	Precisión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobrecarga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones	
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta	
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓	
Magnéticos	↓	Inductancia variable	0,5	Media	150 %	0-5 V	2 kΩ	0,9-2,3 %	Continua	↓	
		Reluctancia variable	1	Media	150 %	0-5 V	2 kΩ	0,6-2,4 %	↓		
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 kΩ	0,5-1,9 %	↓	Media	
Galgas extensométricas	↓	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta
		Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓
		Silicio difundido	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓
Piezoeléctricos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 MΩ	1-4,8 %	1/5000	Baja	

Tabla 2.3 Tipos de Sensores de Presión (Bonilla R. & Cordero L., 2010)

2.7.1.3.4 Sensor de presión DWYER 628.

Los transmisores de presión serie 628 (fig. 2.16), tienen un sensor piezoeléctrico de alta precisión del 1% de la escala completa (incluye linealidad, histéresis y repetibilidad), en un compacto y robusto gabinete de propósito general de acero inoxidable NEMA 4X. (Dwyer, 2013)

Las piezas mojadas de acero inoxidable 316-L resistente a la corrosión y permiten a los transmisores de las series 628 medir la presión en una variedad de procesos, desde aceites hidráulicos hasta sustancias químicas, están disponibles en diversas opciones de salidas, conexiones de proceso y terminaciones eléctricas (Ver anexo 4).



Figura 2.16 Transmisor de presión serie-628 (Dwyer, Dwyer Engineering, 2010)

2.7.2 Etapa de adquisición de datos.

La etapa de adquisición de datos del proyecto es un punto esencial, ya que es el paso final para el proceso de automatización. En esta etapa se logran interpretar de manera electrónica los datos que se logran censar en el intercambiador de calor.

Las tarjetas de adquisición de datos nos permiten el funcionamiento de los actuadores anteriormente detallados, para de esta manera manejar todo el proceso por medio del programa en el computador.

La adquisición de datos basada en PC utiliza una combinación de hardware modular, software de aplicación y una PC para realizar medidas (fig. 2.17). Mientras cada sistema

de adquisición de datos se define por sus requerimientos de aplicación, cada sistema comparte una meta en común de adquirir, analizar y presentar información.



Figura 2.17 Proceso de adquisición de datos (Alava, 2010)

2.7.2.1 Control y Adquisición de Datos.

Es importante elegir desde un principio la tecnología que se va a utilizar para resolver un problema de control, muchas veces no solamente se requiere el control del sistema, sino también se requiere monitorear y visualizar el proceso en una pantalla, en esta pantalla se debe mostrar el esquema del proceso del intercambiador de calor de manera gráfica y que se pueda seguir a detalle la operación del sistema.

Para la elaboración del proyecto de control y adquisición de datos del intercambiador de calor, se analiza tres alternativas para seleccionar la tecnología adecuada para el sistema.

El software juega un rol importante en el control de la máquina de pruebas ya que será la encargada de adquirir, analizar los datos y desplegar los resultados en la pantalla.

“Un sistema de control que cumpla con todas estas características se puede implementar con cualquiera de los siguientes métodos:

- PLC, con interface de comunicación y visualización con Sistema de Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés).
- Tarjeta DAQ de National Instruments con software de programación gráfica LabVIEW.
- Micro-controlador, con interface de comunicación con software de Programación Visual, como LabVIEW, Java, Mitla, Visual, etc.

Cualquiera de los tres métodos podría resolver el problema del control y adquisición de datos para el equipo, la diferencia de uno a otro radicará en el tiempo, facilidad, flexibilidad y costo de la implementación”. (Chulin Carballo, 2011)

Para ello se realiza el análisis de cada uno; se decidirá cuál es el más adecuado para la resolución del proyecto.

2.7.2.1.1 PLC con SCADA

El PLC es un dispositivo de control electrónico, muy utilizado en la industria, gracias a su flexibilidad, facilidad de programación y resistencia a condiciones de trabajo exigentes (fig. 2.18).

Su capacidad de comunicación con otros dispositivos permite ampliar el sistema e implementar la visualización y monitoreo del proceso, desde la pantalla de una computadora personal hasta en Interfaces Humano – Máquina (HMI).

Esto permite no tener una computadora destinada a supervisar el funcionamiento del sistema, pues se puede implementar una pantalla y un teclado o bien una pantalla táctil para ejecutar las pruebas.



Figura 2.18 PLC con SCADA (Miteco, 2011)

Desventajas:

- El precio de la implementación es muy elevado.
- Se tienen que adquirir módulos de entradas analógicas para las lecturas de los sensores.
- Se requiere un software para programar el PLC y otro para programar el SCADA.

Ventaja:

- Su aplicación es factible en la automatización completa de procesos de producción.

2.7.2.1.2 Tarjeta de control y adquisición de datos.

Otra opción para el funcionamiento del equipo, es un sistema basado en tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) de la National Instruments NI USB-6008, como la que se presenta en la siguiente imagen (fig. 2.19).



Figura 2.19 Tarjeta de adquisición de datos (National, 2011)

Los sistemas de adquisición de datos incorporan señales, sensores, actuadores, acondicionamiento de señales, dispositivos de adquisición de datos y software de aplicación.

Las características de la Tarjeta de Adquisición de Datos son:

- Adquisición de Datos Multifunción por USB de 12 bits
- 8 Canales de entrada analógica de 12 bits, 12 líneas DIO, 2 salidas analógicas, 1 contador.
- Alimentación de energía por el bus para mayor comodidad y portabilidad.
- Software controlador para Windows, Mac OS X, Linux, Pocket PC.
- Software de NI – DAQmx y software interactivo NI LabVIEW Signal Express para registro de datos.

2.7.2.1.3 Sistemas embebidos basados en μC .

Actualmente, existen en el mercado varios equipos de control y tarjetas para controlar dispositivos basados en microcontroladores tales como el PIC y ATMEL, los cuales son tarjetas electrónicas que ya vienen implementados con el μC y sus componentes necesarios para el funcionamiento como reguladores de tensión, botón de Reset, LED indicadores e interface para comunicación directa con la computadora, etc. (**Chulin Carballo, 2011**)

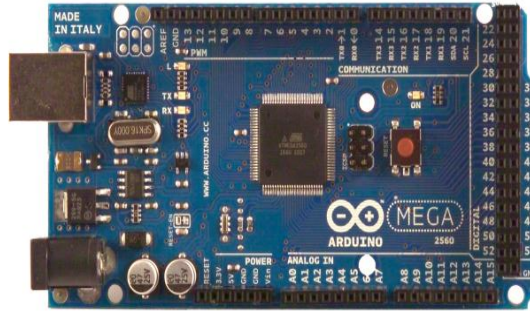


Figura 2.20 Arduino modelo ATMEGA-2560 (Arduino, 2013)

2.7.2.1.3.1 *Arduino.*

Para la aplicación de este proyecto se determinó utilizar una tarjeta de adquisición de datos marca ARDUINO, ATMEGA 2560 (fig. 2.20).

Esta tarjeta cumple con las necesidades de entradas analógicas y digitales necesarias para el equipo, este elemento posteriormente se conecta a la computadora para que funcione por medio del programa realizado para el uso y control del intercambiador de calor.

“Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.” (Arduino, 2013)

Entre las ventajas de utilizar el Arduino están:

- Funciona bajo varias plataformas como Windows, Macintosh OSX y Linux.
- El entorno de programación es fácil y directo.

- Software ampliable y de código abierto, el cual puede modificarse para trabajar con librerías de C++ lo cual potenciaría aún más la aplicación.
- Hardware ampliable y de código abierto, lo que permite que el módulo pueda extenderse y optimizarse.

Arduino tienen la posibilidad de comunicarse con diferentes tipos de software como Flash, Processing, Max MSP, LabVIEW, etc. En ellos se puede realizar la interface visual para el ambiente de programación del equipo. Las tarjetas tienen disponibles pines de entrada para una amplia gama de sensores y pines de salida para conectar los actuadores necesarios implementando únicamente su etapa de potencia.

2.7.2.1.3.2 Microcontrolador PIC16F873

El PIC16F873 es un microcontrolador con memoria de programa tipo FLASH, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje, por lo que el PIC es muy útil para el desarrollo de diferentes aplicaciones de control y procesamiento de señales. Los PICs tienen la característica de que sus pines pueden ser configurados de acuerdo a la necesidad de la aplicación, es decir que los pines de un mismo puerto pueden ser usados unos como entradas y otros como salidas.

El microcontrolador se encuentra en un encapsulado de 28 pines (fig. 2.21), la descripción de cada pin se muestra en el anexo 5.

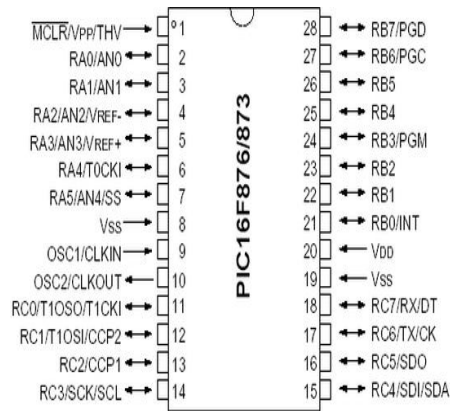


Figura 2.21 Distribución de pines del PIC16F873 (Tecnotec, 2010)

2.7.2.1.3.3 Módulo de Relés

El relé es un dispositivo electromecánico que funciona como interruptor controlado por un circuito electrónico, en el que por medio de un electroimán se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

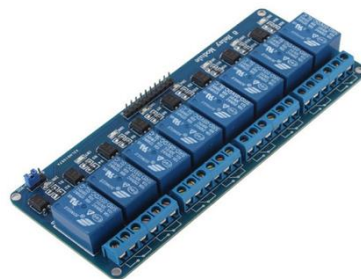


Figura 2.22 Módulo de Relés (SainSmart, 2010)

El módulo de relés (fig.2.22) de 5V consta de 8 canales, capaz de controlar varias aplicaciones, puede ser controlada directamente por un micro-controlador.

Características:

- 5V 8-Channel Relay tarjeta de interfaz, y cada uno necesita 15-20mA del controlador
- Equipado del relay de gran intensidad, AC250V 10A; DC30V 10A
- Interfaz estándar que puede ser controlado directamente por el microcontrolador (Arduino, 8051, AVR, PIC, DSP, ARM, ARM, MSP430, de la TTL)
- Indicación del LED para el estado de las salidas de relé.

CAPITULO III

3 DISEÑO DEL PROGRAMA

Introducción

El presente capítulo trata sobre la etapa electrónica para finalizar con la automatización del intercambiador de calor, y de esta manera obtener un equipo completamente automático. Se tratan temas de importancia como el software utilizado para la programación, aplicaciones, diseño del programa, programación, conexiones realizadas, tarjeta de acondicionamiento de señal etc.

La importancia de este capítulo se basa principalmente en el uso y la puesta en práctica de los conocimientos adquiridos, así como también visualizar el funcionamiento por medio de la interfaz elemento electrónico – computadora y a su vez computadora – ser humano. El programa desarrollado debe satisfacer todas las opciones para controlar todos los elementos descritos en el capítulo anterior.

Se requiere el control del sistema para monitorear y visualizar el proceso en una pantalla o HMI, en esta se debe mostrar el esquema del proceso o equipo de manera gráfica y se pueda seguir a detalle la operación del sistema.

3.1 LabVIEW

LabVIEW es una plataforma estándar en la industria de pruebas y medidas, para el desarrollo de sistemas de prueba y control de instrumentación.

En el campo de la automatización industrial se usa para la adquisición de datos, análisis, monitorización y registro, así como para el control y monitorización de procesos, permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software, tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (fig. 3.1).

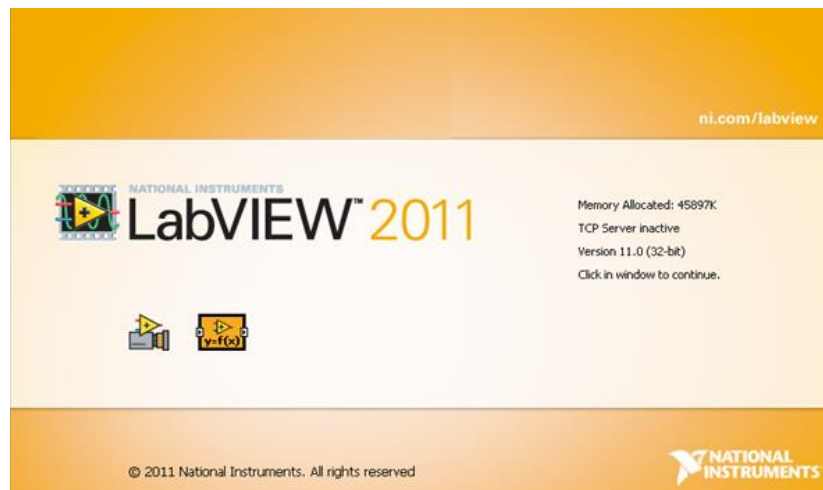


Figura 3.1 Software LabVIEW (National, 2011)

Las razones por las cuales se utilizará el paquete de LabVIEW (Laboratory Virtual Engineering workbench), son varias y se las describe las más principales:

- Es muy simple de manejar, debido a que está basado en un sistema de programación gráfica, llamada lenguaje G.
- Es un programa enfocado hacia la instrumentación virtual, por lo que cuenta con numerosas herramientas de presentación en gráficas, botones, indicadores y controles, los cuales son muy esquemáticos y de gran elegancia.
- Es un programa de mucho poder donde se cuentan con librerías especializadas para manejos de DAQ, Redes, Comunicaciones, Análisis Estadísticos, Comunicación con Bases de datos útil para una automatización de una empresa a nivel total.

3.1.1 Iniciación en LabVIEW

Originalmente este programa estaba orientado a aplicaciones de control de instrumentos electrónicos usadas en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoce como instrumentación virtual. En el diagrama de flujo (fig.3.2) se presenta los conceptos requeridos para la construcción del sistema básico con LabVIEW, en el que constan las herramientas y las estructuras necesarias para usar y navegar en el entorno que se necesita para la aplicación del equipo.

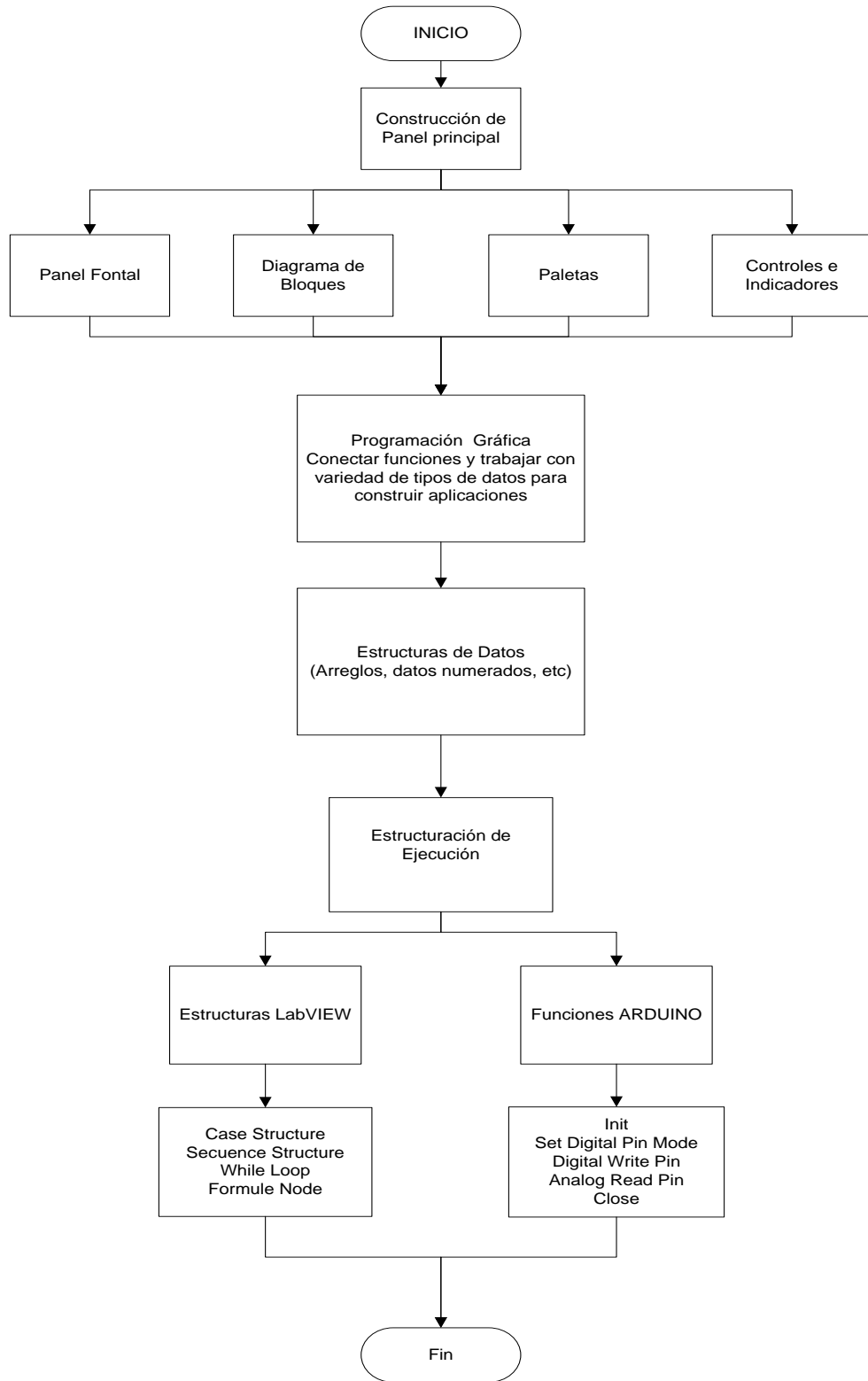


Figura 3.2 Diagrama de Flujo de LabVIEW

3.2 Programación en LabVIEW

Se debe empezar a programar en LabVIEW por medio del panel frontal. Como primer paso se debe definir y seleccionar todos los controles (entradas que dará el usuario) y los indicadores (salidas que presentará en pantalla el **VI**), que se emplearán para introducir los datos por parte del usuario y presentar en pantalla los resultados, una vez colocados todos los elementos en el panel frontal, se procede a la programación propiamente dicha con la ayuda del Diagrama de Bloques. En esta ventana se deben situar las funciones, estructuras, arreglos, conexiones que se requieran para el desarrollo del programa.

3.2.1 Estructuras LabVIEW

Las estructuras (fig. 3.3), controlan el flujo del programa, bien sea mediante la secuenciación de acciones, ejecución de bucles, etc.

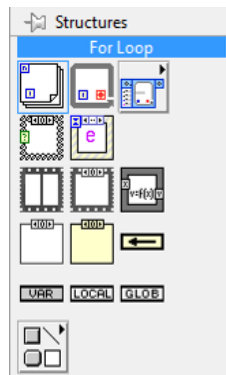


Figura 3.3 Estructuras de LabVIEW (NI, 2011)

3.2.1.1 Case Structure

Esta estructura (fig. 3.4), posee varios sub-diagramas, en la parte superior del sub-diagrama aparece el identificador del que se está representando en pantalla.

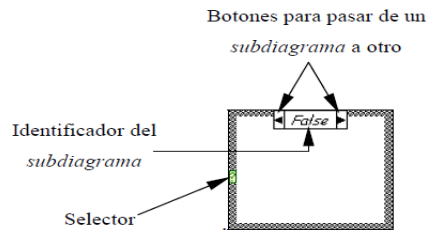


Figura 3.4 Estructura Case (NI, 2011)

La estructura *Case* tiene al menos dos sub-diagramas (*True* y *False*). Únicamente se ejecutará el contenido de uno de ellos, dependiendo del valor de lo que se conecte al selector.

3.2.1.2 Stacked Sequence Structure

Este tipo de estructuras (fig. 3.5) presenta varios sub-diagramas, de modo que únicamente se puede visualizar una en pantalla.

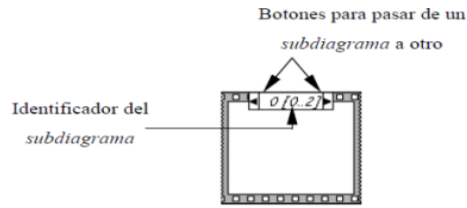


Figura 3.5 Estructura Secuence (NI, 2011)

3.2.1.3 While Loop

Es el equivalente al bucle *while* (fig. 3.6), empleado en los lenguajes convencionales de programación.

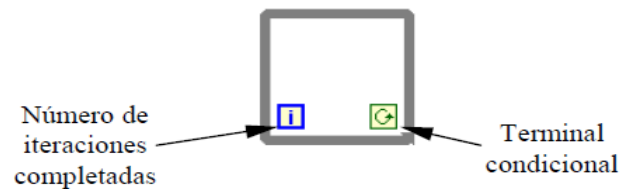


Figura 3.6 Estructura While Loop (NI, 2011)

3.2.1.4 Formule Node

La estructura denominada *Formula Node* (fig. 3.7), se emplea para introducir en el diagrama de bloques fórmulas de un modo directo.

Los operadores y funciones matemáticas que se pueden emplear son varias.

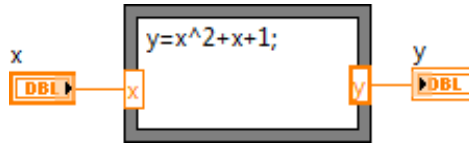


Figura 3.7 Estructura Formule Node (NI, 2011)

3.3 Funciones Arduino

Dentro de las funciones (ver anexo 6) más importantes que vamos a utilizar para nuestro proyecto están:

3.3.1 Init

Inicializa una conexión a Arduino que ejecuta la Interfaz de LabVIEW para Arduino.

(fig. 3.8)

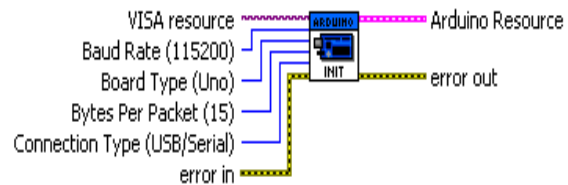


Figura 3.8 Función INIT (Arduino, 2013)

3.3.2 Set Digital Pin Mode

Configura el pin especificado para comportarse como una entrada o una salida. (fig. 3.9)

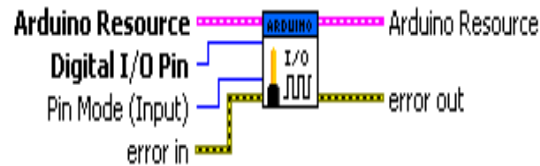


Figura 3.9 Función Set Digital Pin Mode (Arduino, 2013)

3.3.3 Digital Write Pin

Escribe el valor especificado en el pin de salida digital seleccionada. (fig. 3.10)

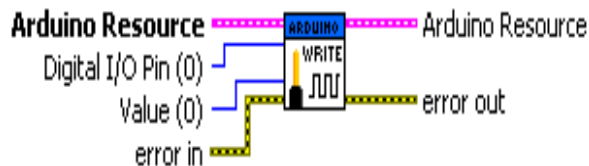


Figura 3.10 Función Digital Write Pin (Arduino, 2013)

3.3.4 Analog Read Pin

Lee el valor de tensión en el pin analógico especificado. (fig. 3.11)

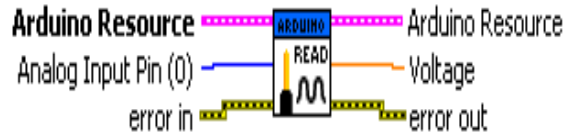


Figura 3.11 Función Analog Read Pin (Arduino, 2013)

3.3.5 Close

Finalmente, ya fuera del bucle colocamos el bloque de cierre del canal “Close” y el bloque de tratamiento de error (fig. 3.12), que nos permita mostrar en la pantalla una ventana con información sobre los posibles errores que se produzcan.



Figura 3.12 Función Close (Arduino, 2013)

3.4 Prueba de adquisición de señales y control de actuadores

La programación de cada uno de los sensores y actuadores se realiza por separado, de esta manera, una vez programado todos los elementos, se pueden unir en una sola tarjeta de conexiones, las conexiones previas se realizaron en un Protoboard (fig. 3.13).

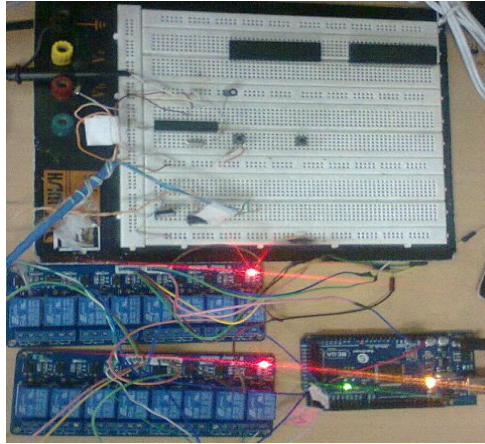


Figura 3.13 Conexiones de elementos (Autor, 2013)

3.4.1 Configuración de la placa Arduino como tarjeta de adquisición

Para empezar debemos configurar Arduino (fig. 3.14), lo hacemos poniendo el bloque *Init* al que le asignamos los siguientes parámetros:

1. Puerto de comunicación
2. Velocidad de transmisión
3. Numero de bits de los paquetes de comunicación
4. Tipo de puerto de comunicación.

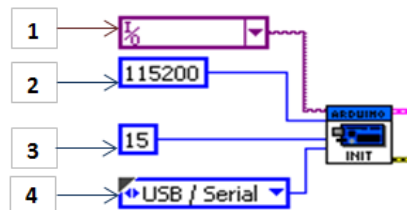


Figura 3.14 Configuración de Tarjeta de Adquisición (Arduino, 2013)

3.4.2 Adquisición de señales de temperatura.

La adquisición de señales de temperatura se realiza mediante la utilización de sensores de temperatura LM-35, previo a su polarización la señal de salida analógica del sensor es enviada directamente a la placa Arduino, por programación en el entorno LabVIEW se realiza los escalados necesarios para obtener una señal equivalente en temperatura (fig. 3.15).

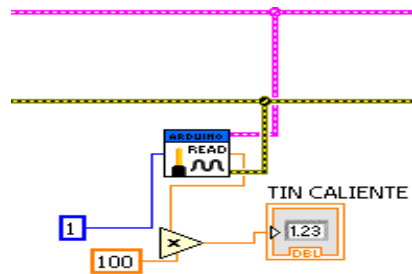


Figura 3.15 Programación de Adquisición de señales de temperatura

(Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.16) nos representa la secuencia de programación de la adquisición de señales de temperatura.

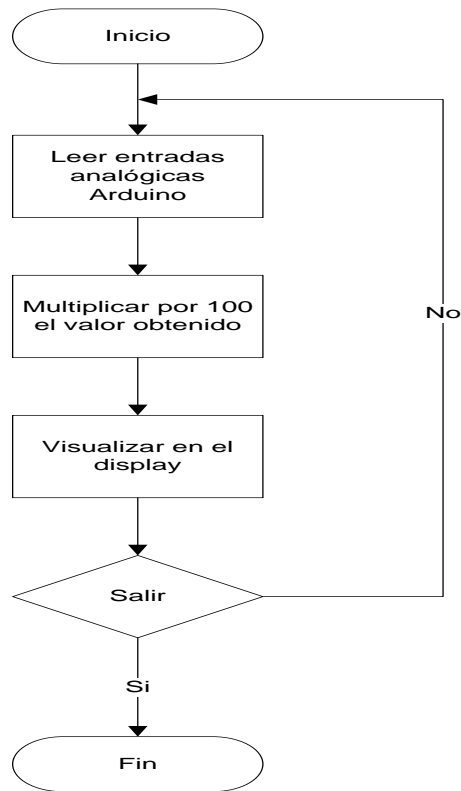


Figura 3.16 Diagrama de Flujo de Adquisición de Señales de Temperatura
(Autor, 2013)

3.4.3 Adquisición de señales de presión.

La adquisición de señal de presión se realiza mediante la utilización de un transmisor de presión Dwyer 628, este sensor nos entrega una señal de corriente que varía de 4 a 20 mA. Debido a que las entradas analógicas del módulo Arduino leen valores de 0 a 5 V se hace necesario la utilización de una resistencia (fig. 3.17), cuyo valor estándar es de 250 Ω .

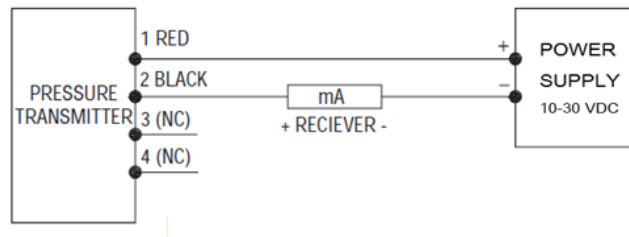


Figura 3.17 Conexión de salida de corriente (Dwyer, 2010)

Esta señal es ingresada por una señal analógica del módulo Arduino para su posterior acondicionamiento y luego ser visualizado el valor de presión (fig. 3.18).

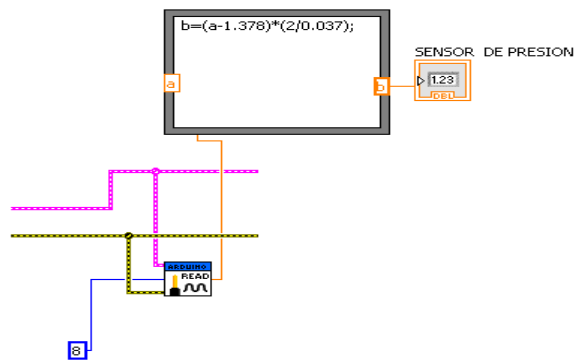


Figura 3.18 Programación de Adquisición de señales de Presión (Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.19) nos representa la secuencia de programación de la adquisición de señales de presión.

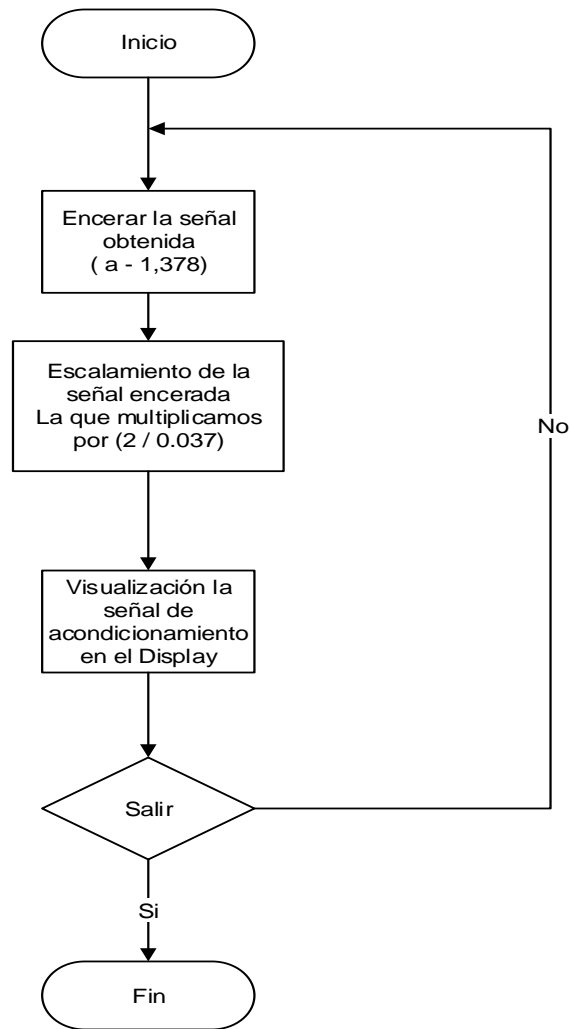


Figura 3.19 Diagrama de Flujo de Adquisición de Señales de Presión
(Autor, 2013)

3.4.4 Adquisición de señales de caudal

El acondicionamiento de la señal de pulsos (fig. 3.20) generado por el sensor YF-S201, se realiza mediante el microcontrolador PIC-16F873, el mismo que entrega una señal

PWM (fig. 3.21), cuyo ancho de pulso varía proporcionalmente con el caudal medido, para luego ser filtrada mediante un filtro RC para su posterior transformación en un voltaje analógico que varía de 0 a 5V.



Figura 3.20 Tarjeta de Acondicionamiento de Señal
(Autor, 2013)

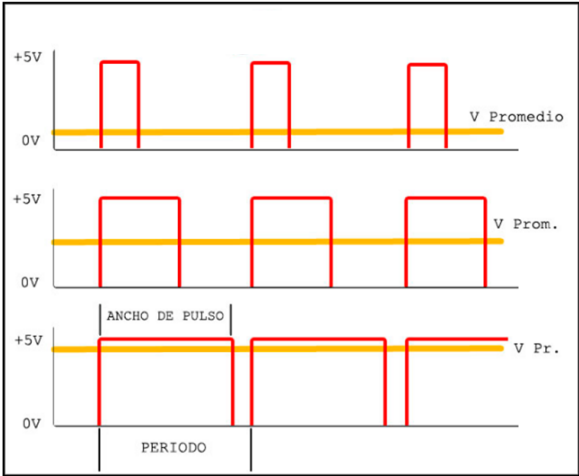


Figura 3.21 Diagrama PWM (Arduino, 2013)

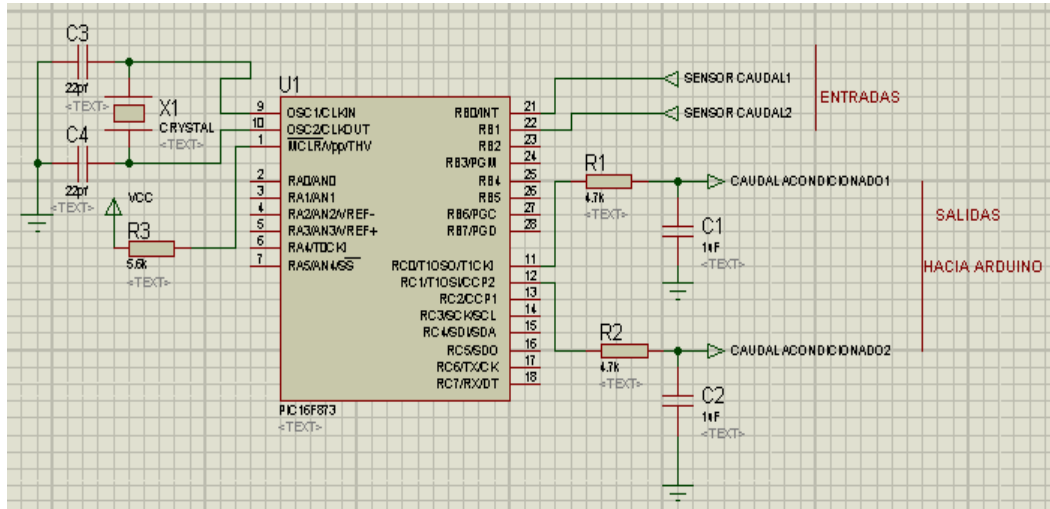


Figura 3.22 Diagrama de Acondicionador de Sensores de Caudal
PIC-16F873A (Autor, 2013)

La señal obtenida desde el acondicionador diseñado ingresa a una entrada analógica de la placa de adquisición Arduino (fig. 3.22), para luego ser escalada mediante una fórmula, ingresada en un nodo de fórmula que luego se visualiza el valor de caudal que fluye por el equipo (fig. 3.23).

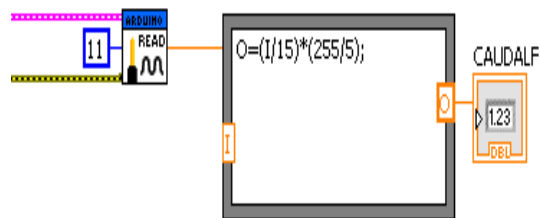


Figura 3.23 Programación de Adquisición de señales de Caudal
(Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.24) nos representa la secuencia de programación para el acondicionamiento de la señal de pulsos.

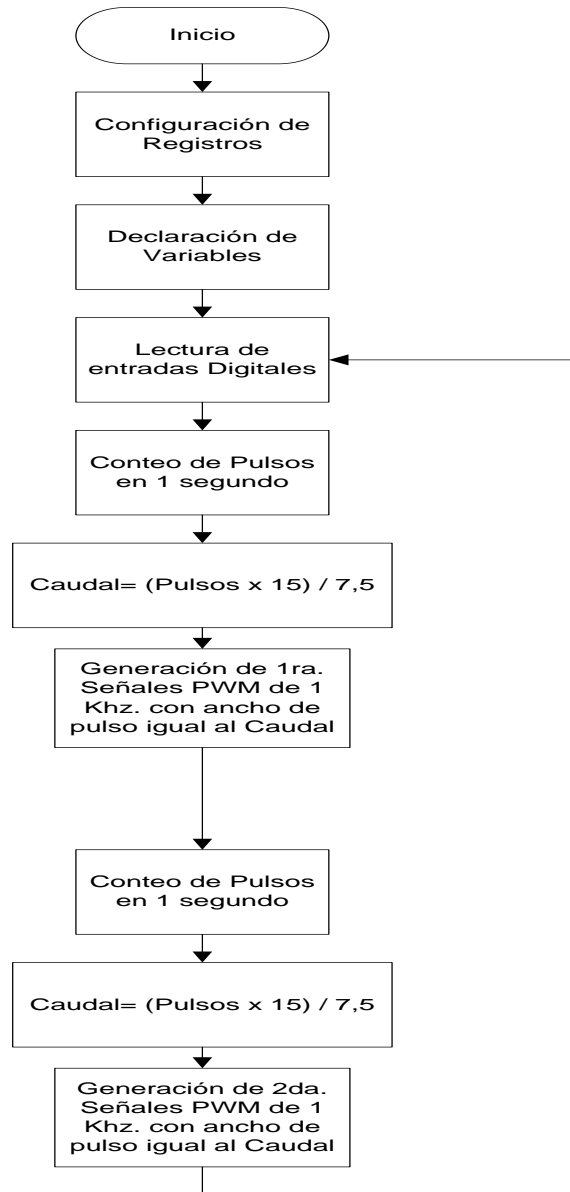


Figura 3.24 Diagrama de Flujo de Acondicionamiento de señal de pulsos

(Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.25) nos representa la secuencia de programación para el para la adquisición de señales de caudal.

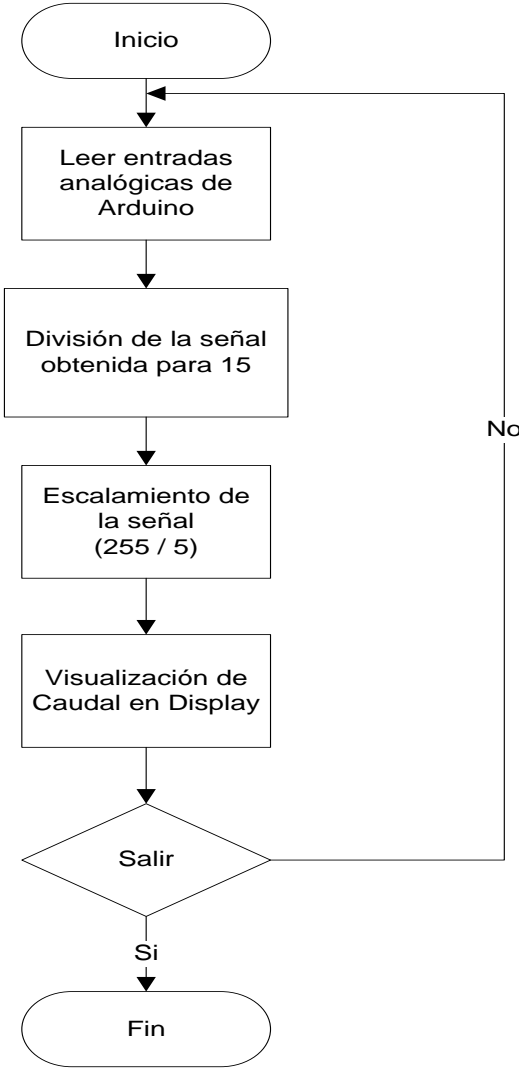


Figura 3.25 Diagrama de Flujo de Adquisición de Señales de Caudal
(Autor, 2013)

3.4.5 Control de la circulación de agua.

Para la circulación de agua se tiene que encender las bombas, todo este control se lo realiza en LabVIEW mediante el uso de una estructura de secuencia (fig.3.26).

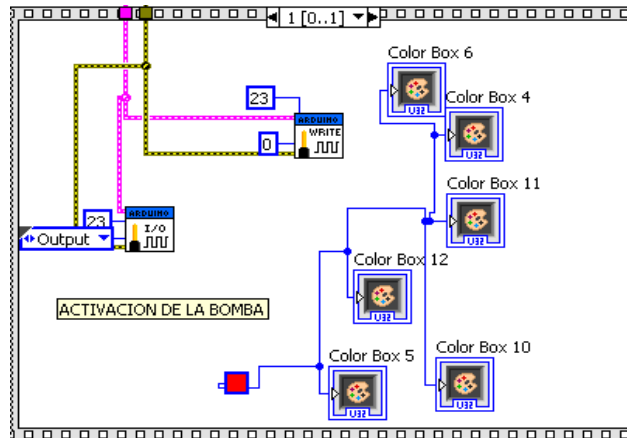


Figura 3.26 Activación de la Bomba (Autor, 2013)

Así mismo para el paro del sistema, se debe apagar la bomba, todo este control se lo realiza en LabVIEW mediante el uso de una estructura de secuencia (fig.3.27).

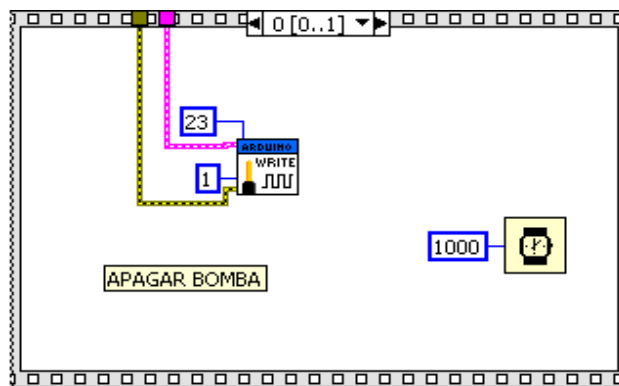


Figura 3.27 Apagado de la bomba (Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.28) nos representa la secuencia de programación para realizar la circulación del fluido que recorre por el equipo.

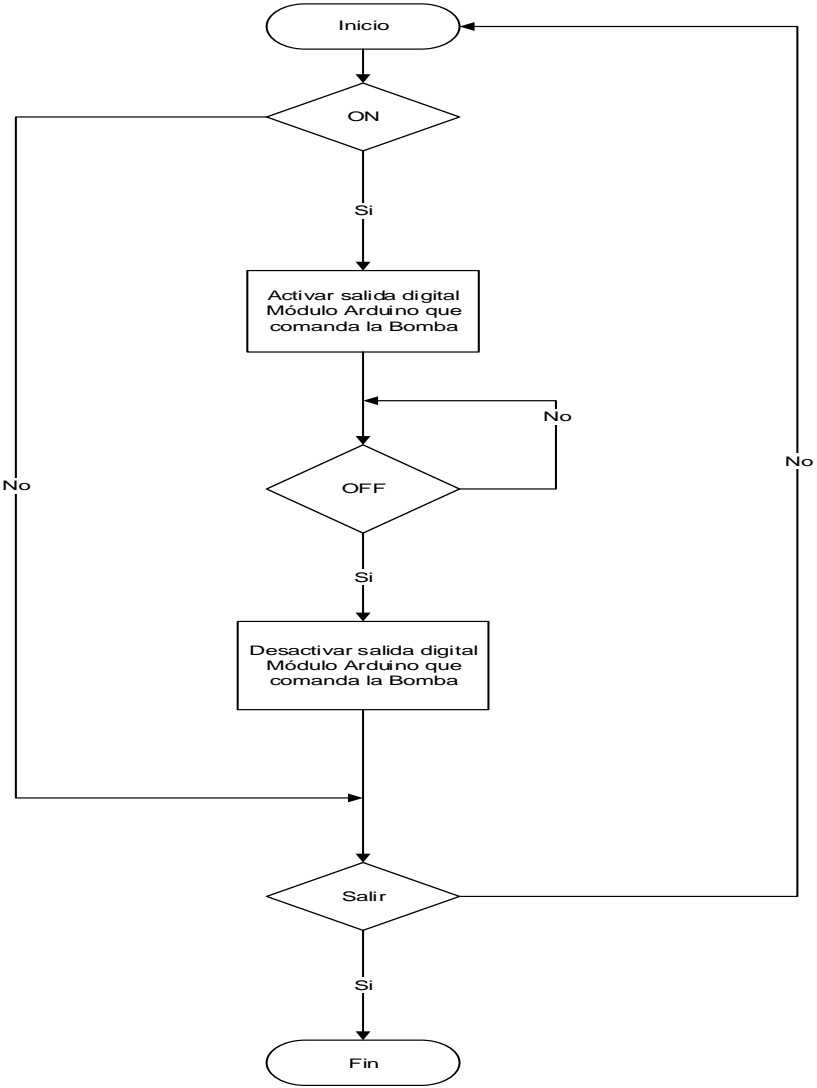


Figura 3.28 Diagrama de Flujo para la circulación de Agua (Autor, 2013)

La señal de salida para la activación de las bombas se las obtiene en los pines digitales de la placa Arduino los mismos que deben ser configurados como salidas, las señales obtenidas son de 0V en estado bajo y de 5V en estado alto, siendo voltajes muy pequeños para encender estos actuadores se hace uso de relés para de este modo poder comandar los voltajes tanto de 12V DC, como de 110 V AC necesarios para el correcto funcionamiento la bombas respectivamente.

Control de la válvula proporcional

Para el control del motor se realiza un puente H mediante el uso de los contactos normalmente abiertos de 4 relés.

El puente H (fig. 3.29), es un circuito electrónico que permite al motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso. El término "puente H" proviene de la típica representación gráfica del circuito, se construye con 4 interruptores mecánicos.

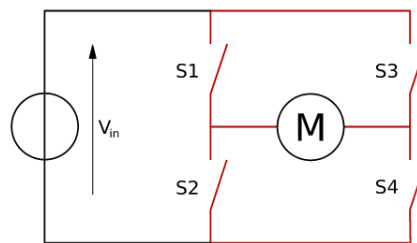


Figura 3.29 Estructura de un Puente H (Commons, Wikimedia, 2011)

Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados y (S2 y S3) abiertos se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (y cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor (fig. 3.30).

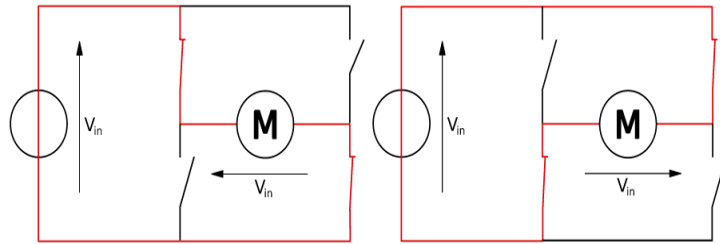


Figura 3.30 Los dos estados básicos del circuito
(Commons, Wikimedia, 2011)

Para comandar el motor mediante el HMI, se hace uso de una estructura Case activando o desactivando un pin de salida de la placa Arduino para comandar los respectivos relés del puente H que permiten obtener un giro horario o anti horario en el motor que se traduce en la apertura y cierre de la válvula proporcional.

Para los límites de apertura y cierre de la válvulas se realiza una comparación del caudal, por ejemplo si la válvula se encuentra abriéndose y el caudal ha llegado a su máximo valor el motor deja de girar provocando de este modo que la válvula deje de abrirse llegando a su tope de apertura (fig. 3.31 y 3.32)

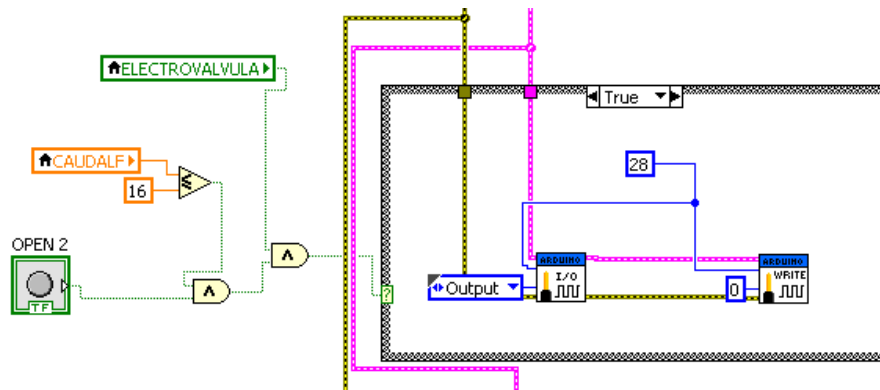


Figura 3.31 Programación de apertura de la válvula proporcional
(Autor, 2013)

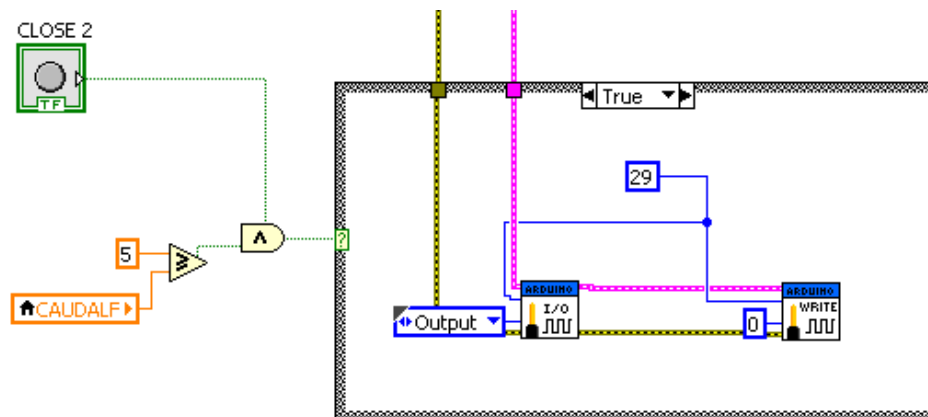


Figura 3.32 Programación de Cierre de la válvula proporcional
(Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.33) representa la secuencia de programación para la apertura y cierre de la válvula proporcional.

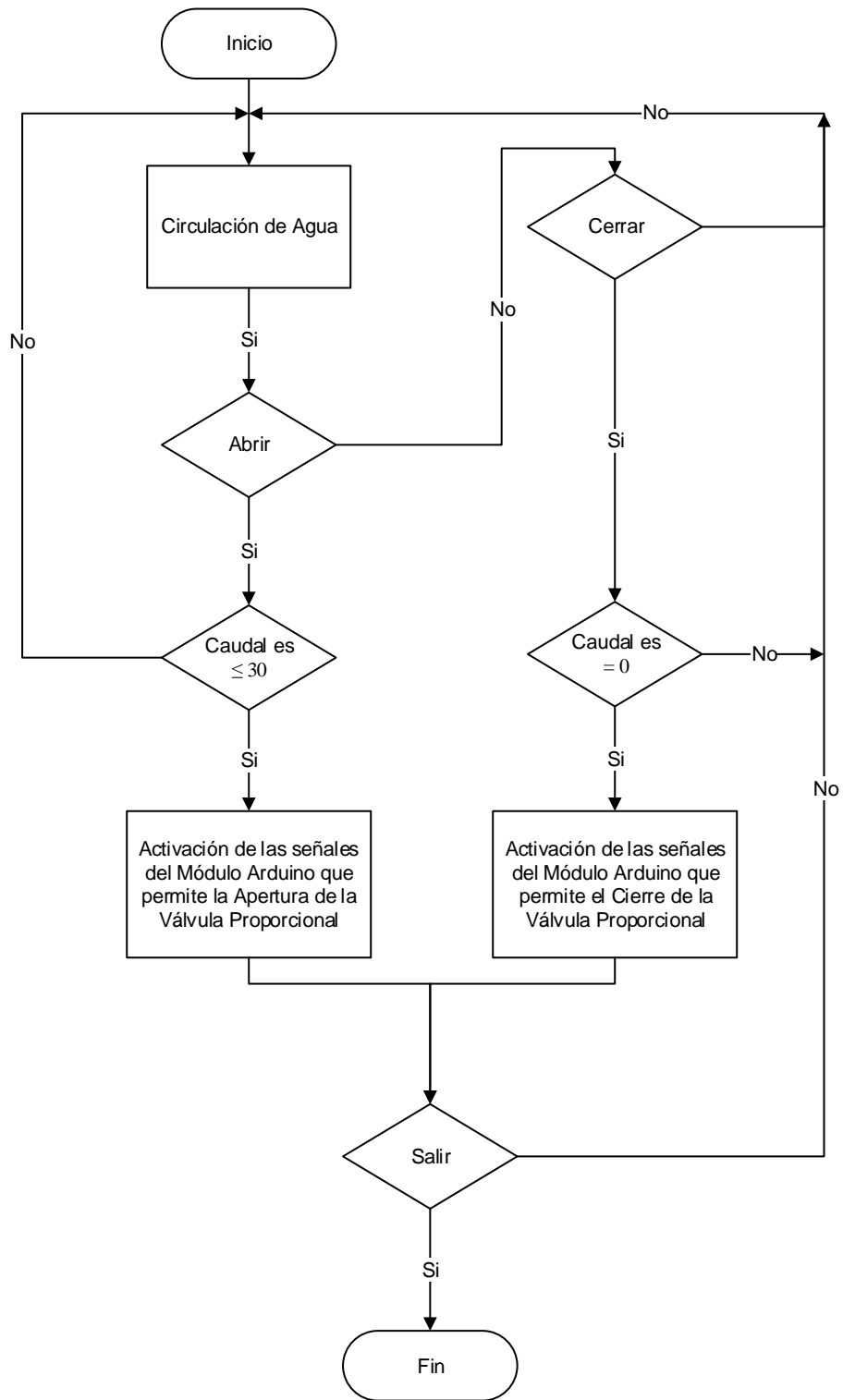


Figura 3.33 Funcionamiento de la válvula proporcional (Autor, 2013)

3.4.6 Manejo de la Resistencia Eléctrica.

Para el control de las resistencias eléctricas se hace uso de una salida digital del módulo Arduino, las mismas que son comandadas mediante dos pulsadores ubicados en el HMI (fig.3.34)

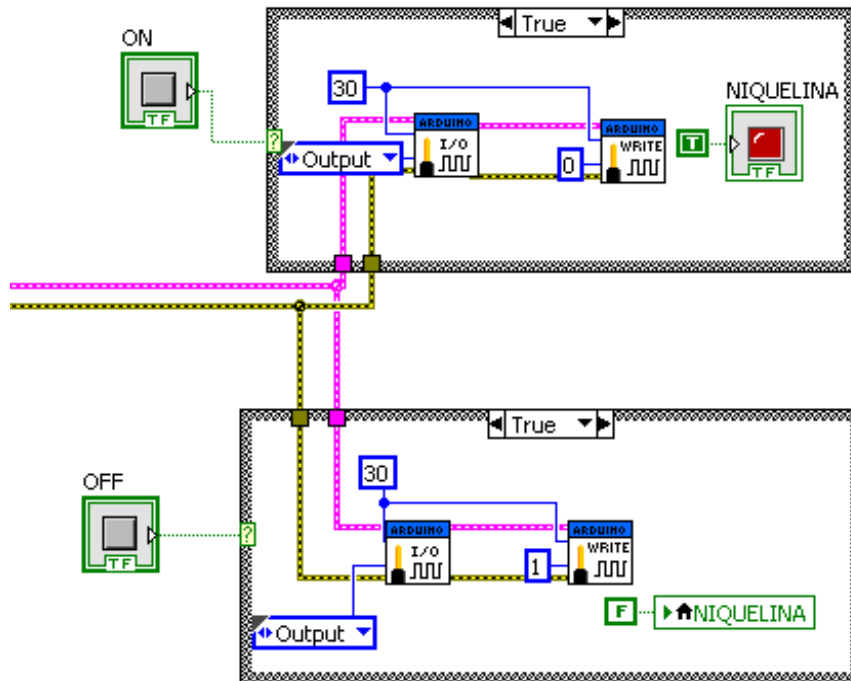


Figura 3.34 Programación encendido y apagado de la resistencia eléctrica

(Autor, 2013)

El diagrama de flujo (fig. 3.35) representa la secuencia de programación para la adquisición de señales de las resistencias eléctricas.

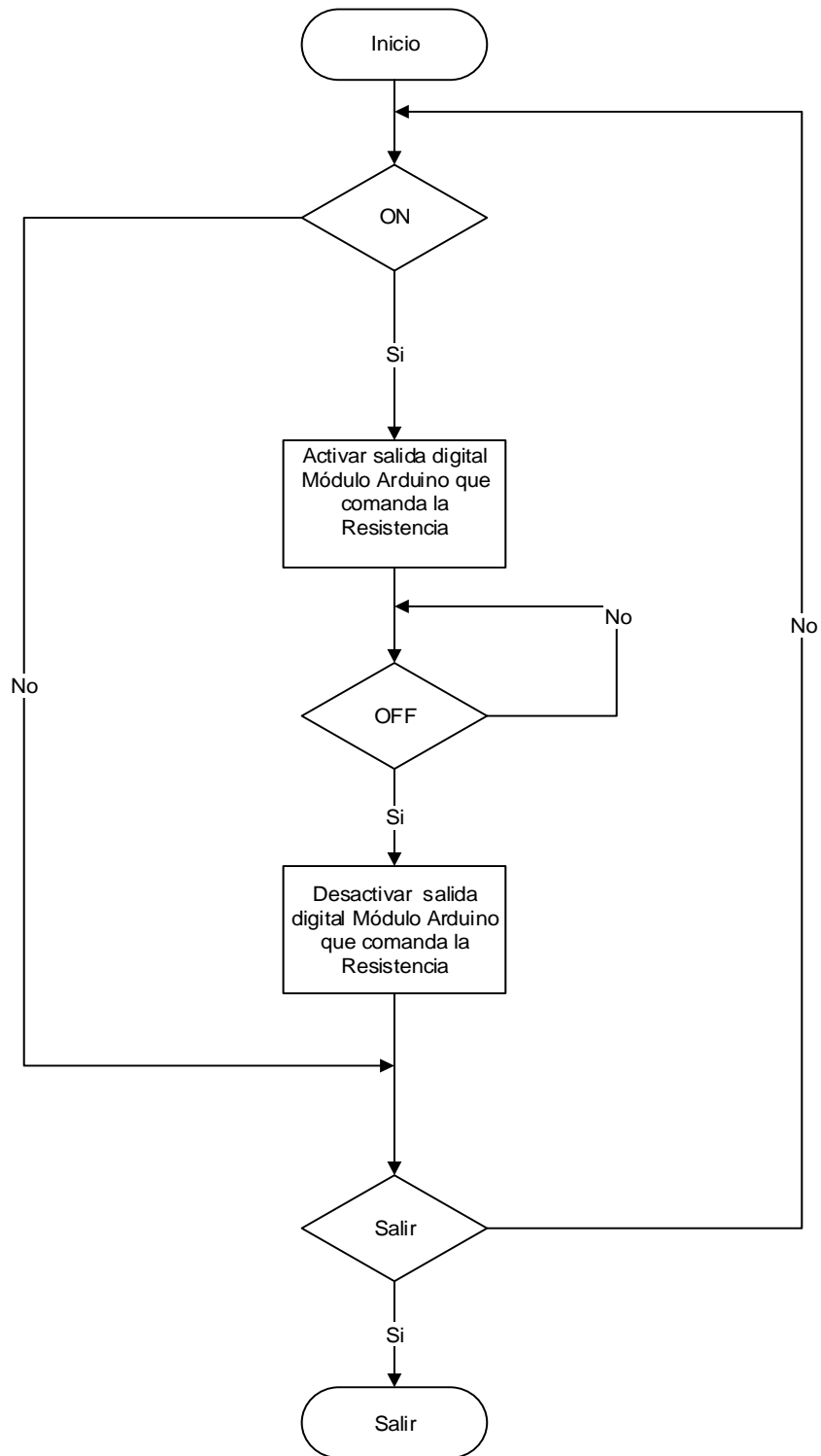


Figura 3.35 Adquisición de señales de la resistencia eléctrica

(Autor, 2013)

CAPITULO 4

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para obtener datos experimentales en el intercambiador de calor, se presenta una breve descripción de las partes principales que constituyen el equipo.

4.1 Descripción del equipo de laboratorio

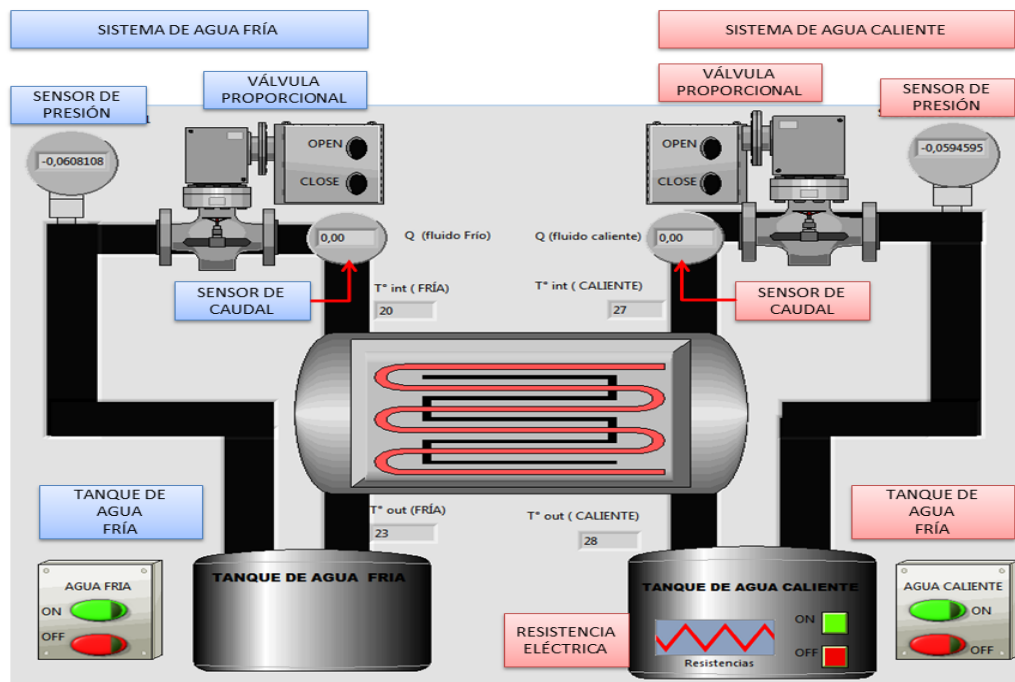


Figura 4.1 HMI del Intercambiador de calor (Autor, 2013)

La unidad de agua caliente radica en un tanque de 100 litros de capacidad con tres calentadores eléctricos de inmersión de 1.5 KW cada uno. La temperatura del agua caliente es controlada automáticamente por los termostatos, que no permiten que la temperatura exceda los 70 °C. El agua caliente circula en circuito cerrado.

La unidad de agua fría tiene un tanque de 100 litros de capacidad y es mantenida por la red de agua potable, la cual llena el tanque y no re-circula, sino que a la salida del intercambiador se produce un by pass y esa agua se dirige al desagüe, es decir que el agua fría circula en circuito abierto. La temperatura que llega de la red de agua fluctúa entre 15 y 20 °C.

Una bomba centrífuga impulsa agua en los circuitos caliente y frío respectivamente esto asegura caudales de agua constantes, los cuales pueden ser regulados por las válvulas proporcionales para cada fluido.

La instrumentación del equipo incluye caudalímetros y sensores de temperatura, con lo cual se asegura una fácil y adecuada toma de lecturas los mismos que son controlados directamente desde el HMI (fig. 4.1) del intercambiador de calor.

También se puede apreciar las gráficas (fig. 4.2) de la evolución de las temperaturas al ingreso y a la salida del sistema del fluido frío como del fluido caliente en el HMI.

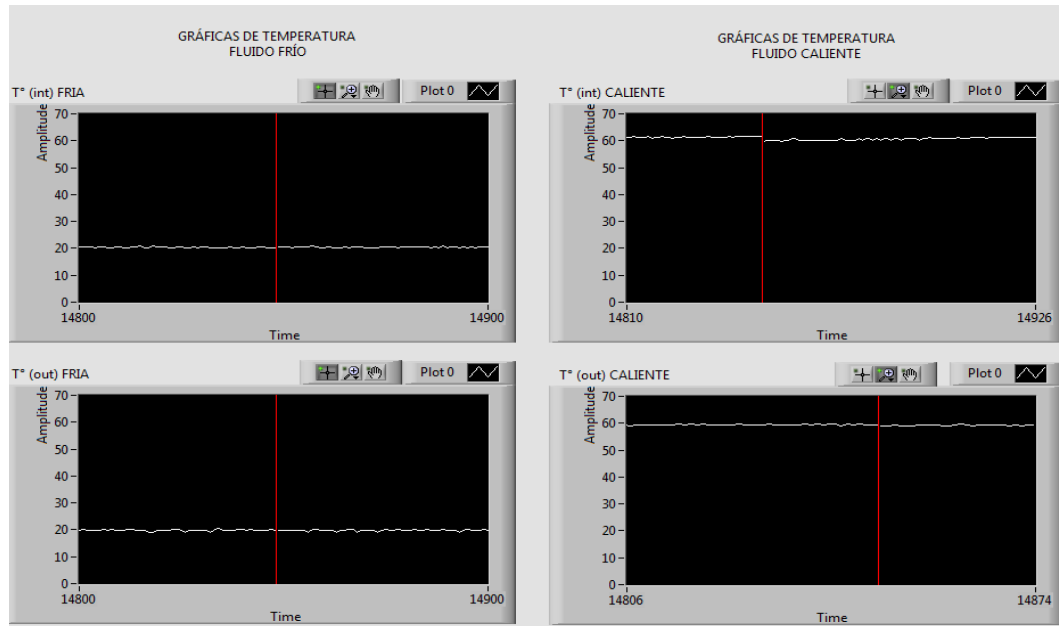


Figura 4.2 Evolución de temperaturas en el HMI (Autor, 2013)

EL HMI cuenta con la barra de selección de datos (fig. 4.3) para las distintas pruebas que se realiza en las prácticas.

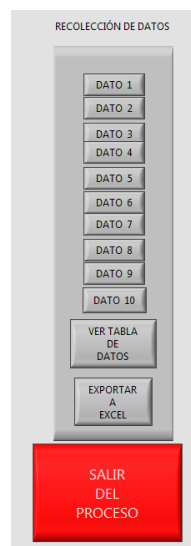


Figura 4.3 Barra de selección de datos (Autor, 2013)

Una vez realizada la práctica y seleccionado los distintos datos estos son transportados a una tabla en Excel (fig. 4.4), para presentar automáticamente las gráficas y resultados.

	Thi	Tho	CAUDAL CALIENTE	Tci	Tco	CAUDAL FRIO	PRESION CALIENTE	PRESION FRIA					
	61,25	54,88	10,16	19,60	47,04	0,97	35,70	53,39					
	60,76	53,90	10,16	18,62	48,02	1,44	35,70	52,20					
	60,27	53,90	9,84	19,11	47,53	1,86	35,70	52,20					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					

Figura 4.4 Datos transportados a Excel (Autor, 2013)

De acuerdo con estas especificaciones del equipo, se procede a la realización de los ensayos los mismos que se han tomado de referencia los practicados en el laboratorio.

4.2 Resultados experimentales

a.- Para una realizar una comparación de los resultados se adjunta los datos de las pruebas realizadas antes de la automatización del equipo (ver tabla 4.1), así mismo las gráficas y los resultados obtenidos. (Ver figura 4.5 a 4.12)

Ensayo	AGUA CALIENTE				AGUA FRÍA			
	Caudal (lt/min)	Flujo Másico (kg/s)	Temperatura de Entrada (°C) T_{hi}	Temperatura de Salida (°C) T_{ho}	Caudal (lt/min)	Flujo Másico (kg/s)	Temperatura de Entrada (°C) T_{ci}	Temperatura de Salida (°C) T_{co}
1	8	0.133	59	44	13	0.217	20	27
2	8	0.133	59	47	7	0.117	20	30
3	13	0.217	58	45	13	0.217	20	30
4	15	0.250	59	47	19	0.317	20	28
5	10	0.167	58	44	15	0.250	20	28
6	13.5	0.225	59	45	19	0.317	20	29
7	10	0.167	58	44	16	0.267	20	28
8	10	0.167	57	44	17	0.283	20	27
9	10	0.167	58	43	23	0.383	20	26
10	11.5	0.192	58	45	16	0.267	20	29
11	10	0.167	58	43	21	0.350	20	27

Tabla 4.1 Datos del equipo antes de la automatización (EAA)

Nomenclatura: (EAA) Equipo antes de la automatización



Figura 4.5 Calor generado en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

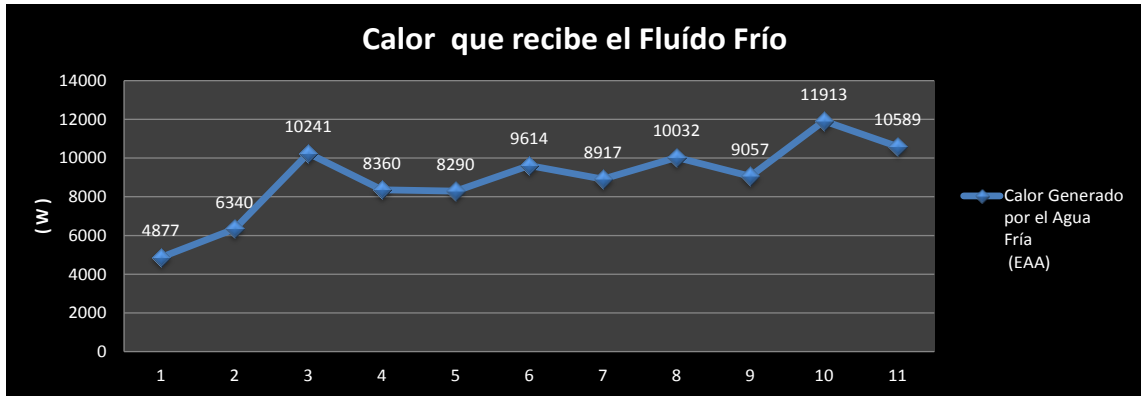


Figura 4.6 Calor recibido en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

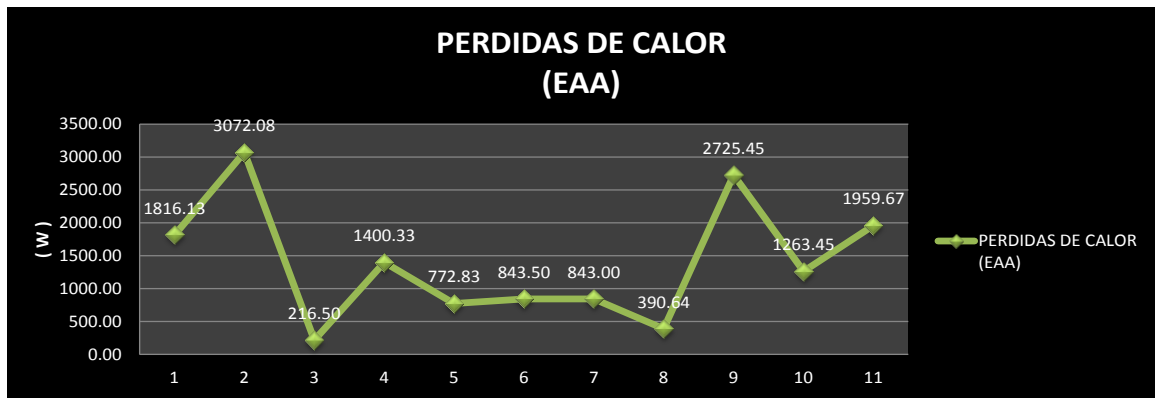


Figura 4.7 Pérdidas de calor en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

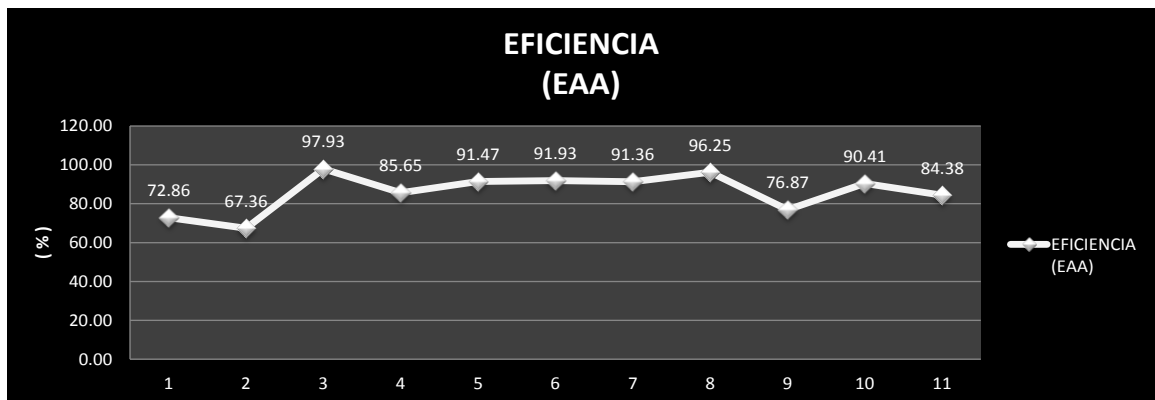


Figura 4.8 Eficiencia del EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

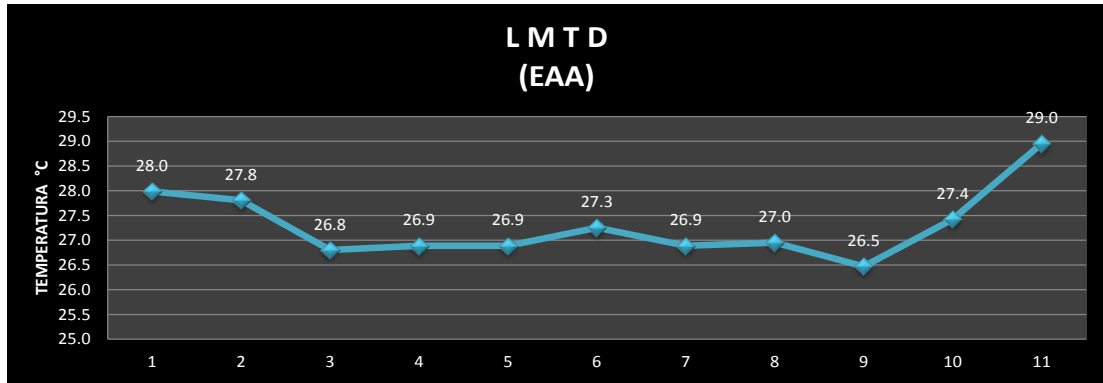


Figura 4.9 Comparación de resultados del LMTD en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

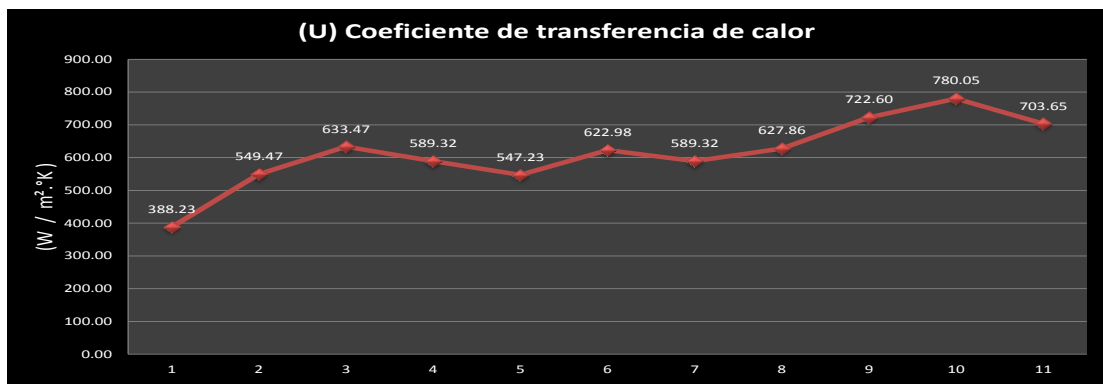


Figura 4.10 Comparación de resultados del U en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

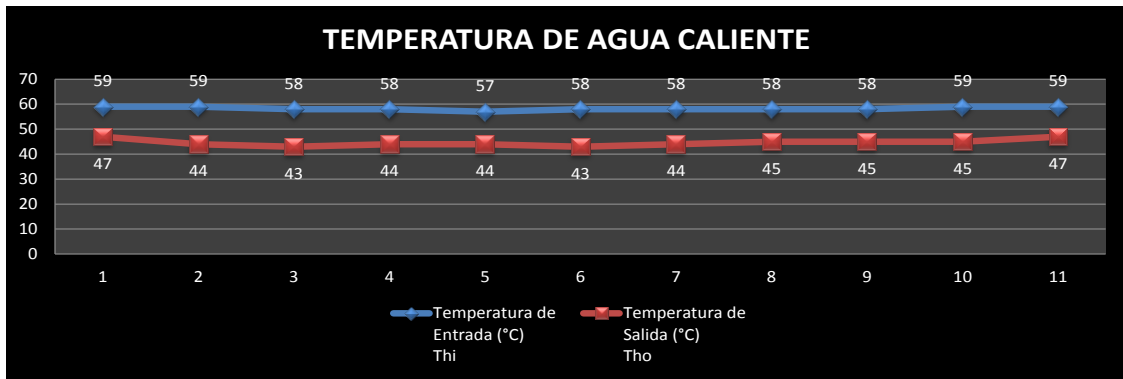


Figura 4.11 Evolución de las temperaturas del agua caliente en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

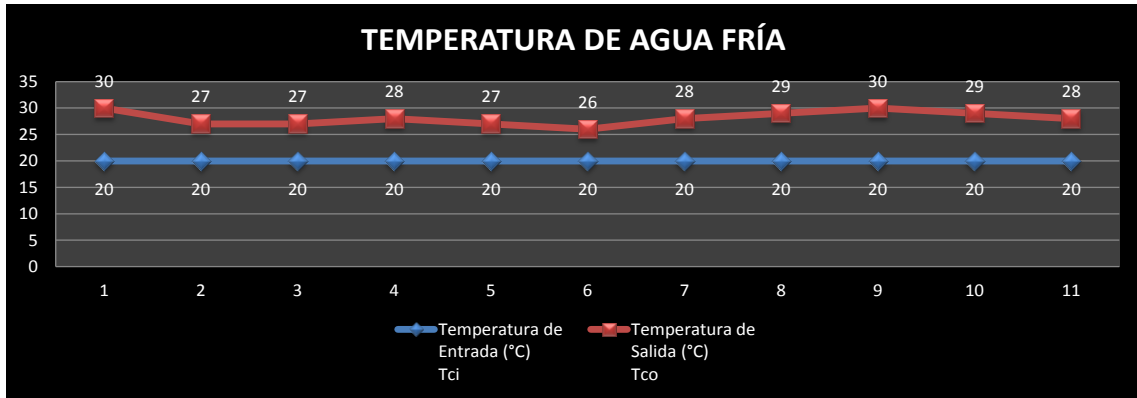


Figura 4.12 Evolución de las temperaturas del agua fría en el EAA (Quinchimba & Robayo , 2009)

b.- Resultados de Equipo Automatizado

Análisis

Debido a que los intercambiadores de calor se consideran como dispositivos de flujo permanente, se puede utilizar la ecuación de la conservación de la energía para el cálculo de calor:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} (\Delta h + \Delta E_c + \Delta E_p)$$

Dónde:

\dot{Q} = Relación de transferencia de calor [J/s]

\dot{W} = Trabajo [J/s]

\dot{m} = Flujo másico [Kg/s]

Δh = Variación de la entalpía del fluido [J/s]

ΔE_c = Variación de la energía cinética [J/s]

ΔE_p = Variación de la energía potencial [J/s]

Para dispositivos de flujo permanente, el volumen de control es el mismo por lo que no existe trabajo en la frontera escogida para el análisis, tampoco existe algún elemento que transmita potencia al volumen de control, por lo que $\dot{W} = 0$. Los valores de entalpía que se manejan en la práctica, son sumamente mayores a 1J/s, que es el valor que corresponde a la energía cinética de una velocidad de 45 m/s, por lo que para velocidades bajas la energía cinética se pueden omitir. La energía potencial en estos dispositivos, también pueden omitirse, debido a que la diferencia en la entrada y la salida de los fluidos no es muy grande. Los valores de la entalpía se encuentran a través de tablas de acuerdo con la temperatura y el tipo de fluido. De acuerdo con lo anterior la ecuación de la transferencia de calor quedaría así:

$$\dot{Q} = \dot{m} (\Delta h)$$

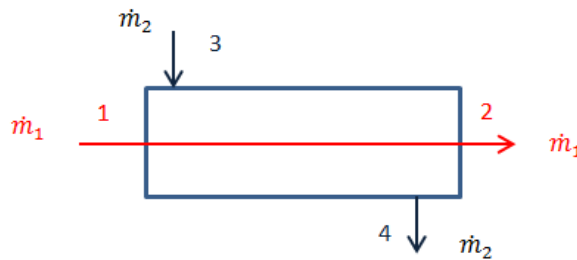


Figura 4.13 Esquema del intercambiador de calor (Autor, 2013)

$$\sum \dot{m}_{int} h_{int} = \sum \dot{m}_{out} h_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_3 = \dot{m}_1 h_2 + \dot{m}_2 h_4$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_3 = \dot{m}_1 h_2 + \dot{m}_2 h_4$$

$$\dot{m}_1 (h_1 - h_2) = \dot{m}_2 (h_4 - h_3)$$

La transferencia de calor relaciona diferentes variables, como temperaturas de entrada y salida de los fluidos, flujos de circulación, coeficiente global de transferencia de calor y el área de intercambio. Un balance de energía en los dos fluidos nos da como resultado:

$$\text{Energía perdida por el fluido caliente} = \text{Energía ganada por el fluido frío}$$

Las energías cedidas o ganadas según el caso por los dos flujos, pueden calcularse de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C p_h (Th_i - Th_o) = \dot{m}_c C p_c (Tc_o - Tc_i)$$

Los subíndices indican:

h : fluido caliente

c : fluido frío

i: entrada al intercambiador

o: salida del intercambiador

Ensayo	AGUA CALIENTE			AGUA FRÍA			PRESIONES	
	Temperatura de Entrada (°C) Thi	Temperatura de Salida (°C) Tho	Caudal (lt/min)	Temperatura de Entrada (°C) Tci	Temperatura de Salida (°C) Tco	Caudal (lt/min)	(Agua Caliente) (PSI)	(Agua Fría) (PSI)
1	54.39	42.14	10.77	14.70	21.56	15.59	35.96	36.76
2	54.39	41.16	10.91	14.21	21.56	15.41	35.43	36.76
3	53.90	41.16	10.86	14.21	21.56	15.41	35.96	37.05
4	52.92	40.67	10.67	14.21	21.07	15.32	35.43	36.46
5	52.92	40.67	10.77	13.72	21.07	15.22	35.43	37.05
6	53.41	40.18	10.72	13.72	21.58	15.41	35.96	36.76
7	52.92	40.18	10.77	13.72	21.07	15.32	35.96	37.05
8	52.43	40.67	10.67	13.72	21.07	15.27	35.70	36.16
9	53.41	41.16	10.81	13.72	21.07	15.36	35.70	36.46
10	53.41	40.67	10.86	13.72	21.07	15.50	35.70	36.76

Tabla 4.2 Datos del equipo después de la automatización (EDA)

Nomenclatura: (EDA) Equipo después de la automatización.

Como podemos apreciar en la tabla 4.2, se realiza varias prácticas considerando el análisis de los resultados obtenidos del intercambiador antes de la automatización en el que requiere de caudales mínimos de agua de 10 lt/min para el agua caliente, y 15 lt/min para el agua fría, para la configuración del intercambiador, con estos caudales mínimos, se asegura la formación de flujos turbulentos para una mejor eficiencia del equipo. Los datos detallados nos arroja el programa ya que una vez que se estabilice el sistema los vamos grabando para luego exportarlos al Excel en donde se tiene realizadas las tablas con las fórmulas para que los resultados sean graficados automáticamente.

Con los datos obtenidos del equipo, se procede a los cálculos y comparaciones respectivas (tabla 4.3), cálculo del calor cedido por el agua caliente, calor ganado por el agua fría y las pérdidas de calor producidas, los mismos están representados en las figuras 4.14; 4.15; 4.16, respectivamente.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T$$

Calor Generado por el Agua Caliente	Calor Generado por el Agua Fría	PERDIDAS DE CALOR
9197.89	7450.67	1747.23
10062.85	7890.69	2172.16
9645.75	7890.69	1755.06
9112.49	7321.63	1790.86
9197.89	7793.40	1404.49
9887.61	8438.21	1449.40
9565.81	7844.61	1721.20
8747.99	7819.00	928.99
9232.06	7865.09	1366.97
9645.75	7936.78	1708.97

Tabla 4.3 Cálculo de resultados (Autor, 2013)

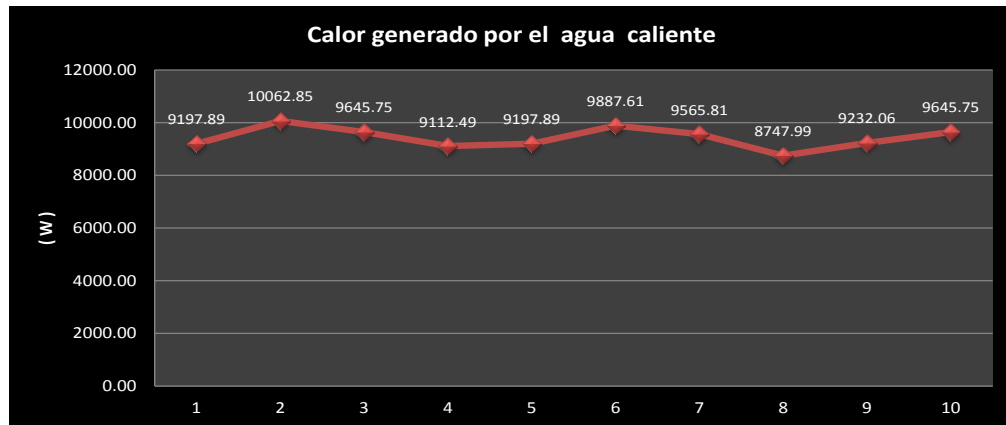


Figura 4.14 Calor generado en el EDA (Autor, 2013)

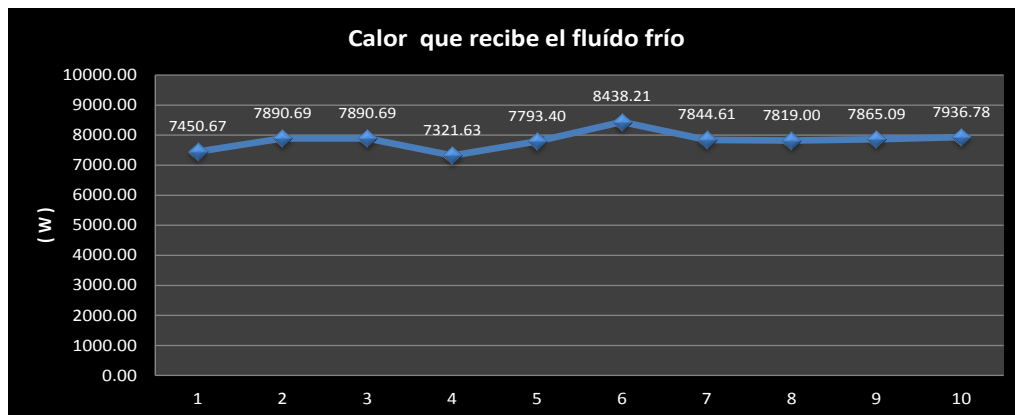


Figura 4.15 Calor recibido en el EDA (Autor, 2013)

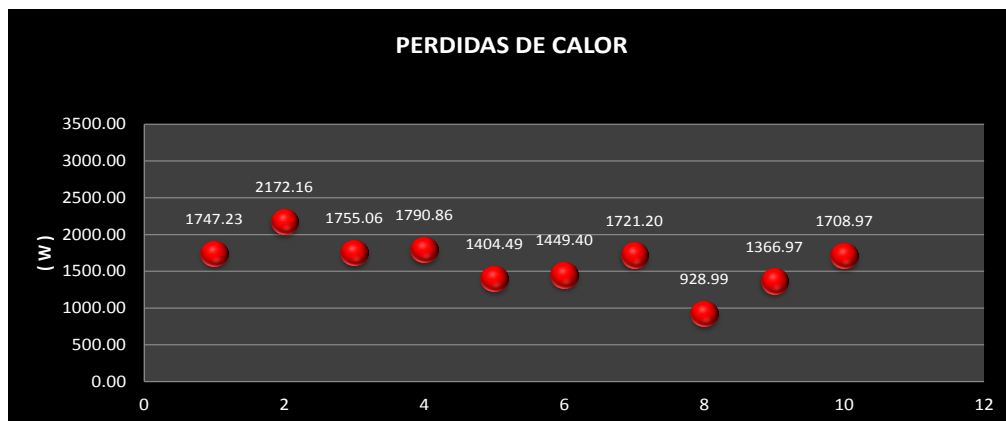


Figura 4.16 Perdidas de calor en el EDA (Autor, 2013)

LA EFICIENCIA

La eficiencia de un intercambiador es un parámetro que mide el desempeño del intercambiador en funcionamiento. Es un cociente entre, la energía capturada efectivamente por el fluido receptor y la energía que coloca a su disposición el fluido que cede (ver tabla 4.4).

$$\eta = \frac{\text{Calor Ganado}}{\text{Calor Generado}} = \frac{Q_c}{Q_h}$$

Dónde:

η = Eficiencia

Q_c = calor ganado por el fluido frio

Q_h = Calor que cede el fluido caliente

Calor generado por el fluido caliente (Qh)	Calor que recibe el fluido frío (Qc)	EFICIENCIA ²
9197.89	7450.67	81.00
10062.85	7890.69	78.41
9645.75	7890.69	81.80
9112.49	7321.63	80.35
9197.89	7793.40	84.73
9887.61	8438.21	85.34
9565.81	7844.61	82.01
8747.99	7819.00	89.38
9232.06	7865.09	85.19
9645.75	7936.78	82.28

Tabla 4.4 Datos de cálculo para la eficiencia (Autor, 2013)

Luego de los cálculos realizados con los datos obtenidos anteriormente, en la figura 4.17, se puede apreciar la gráfica obtenida de la eficiencia.

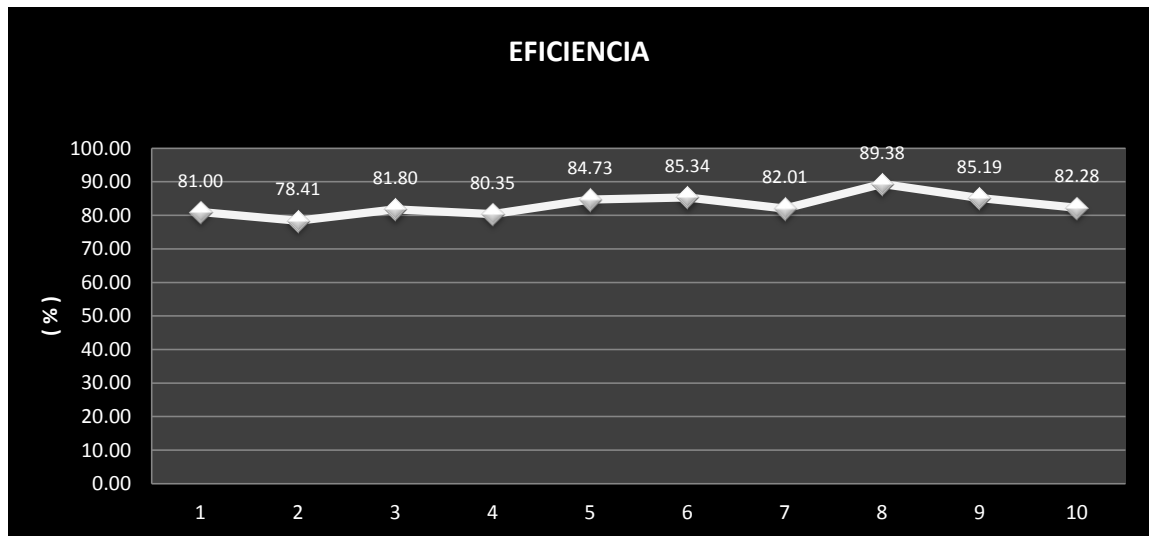


Figura 4.17 Eficiencia en el EDA (Autor, 2013)

TEMPERATURA MEDIA LOGARITMICA

Por lo general, en un intercambiador de calor las temperaturas de los fluidos no son constantes y varían de un punto a otro según el calor pasa del fluido más caliente al más frío. En la figura 4.18 se aprecia los resultados de las prácticas, aplicando la ecuación de la diferencia de temperatura media logarítmica MLDT, calculada de la siguiente manera:

$$MLDT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(Th_i - Tc_o) - (Th_o - Tc_i)}{\ln\left[\frac{(Th_i - Tc_o)}{(Th_o - Tc_i)}\right]}$$

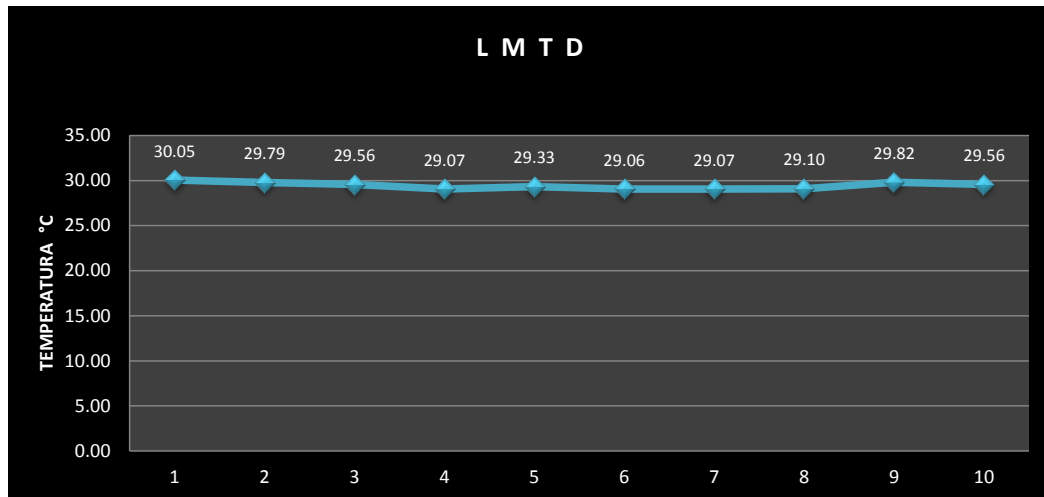


Figura 4.18 Resultados del LMTD en el EDA (Autor, 2013)

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La relación entre el calor transferido y la diferencia de temperaturas se desarrolla en función del coeficiente de transferencia de calor total U y el área de transferencia A . Los resultados se pueden apreciar a continuación. (fig. 4.19)

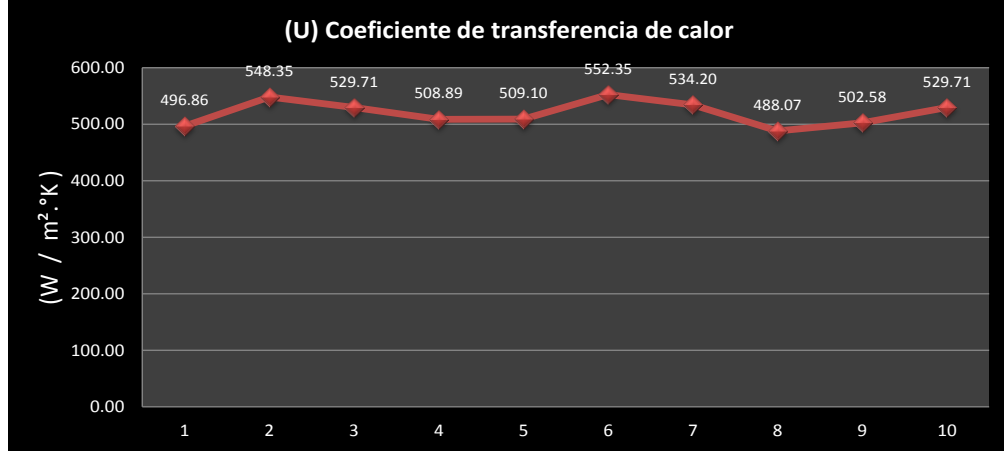


Figura 4.19 Comparación de resultados del U en el EDA (Autor, 2013)

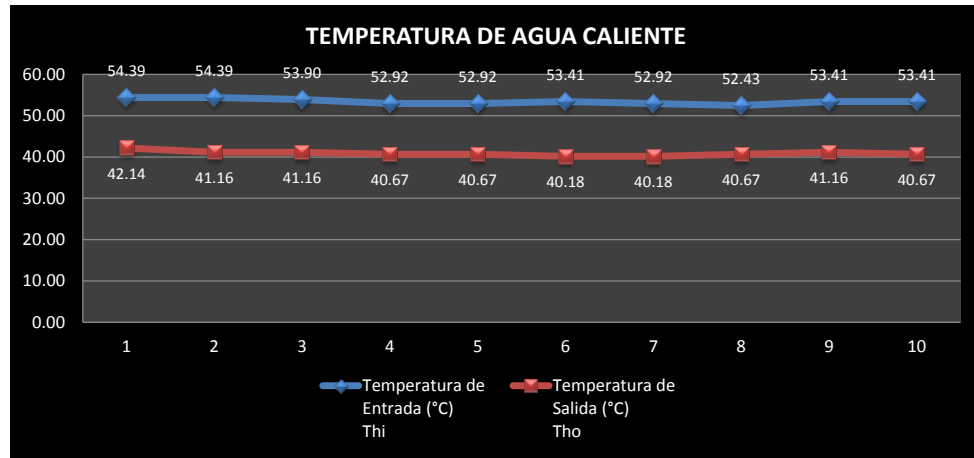


Figura 4.20 Evolución de las temperaturas de agua caliente en el EDA (Autor, 2013)

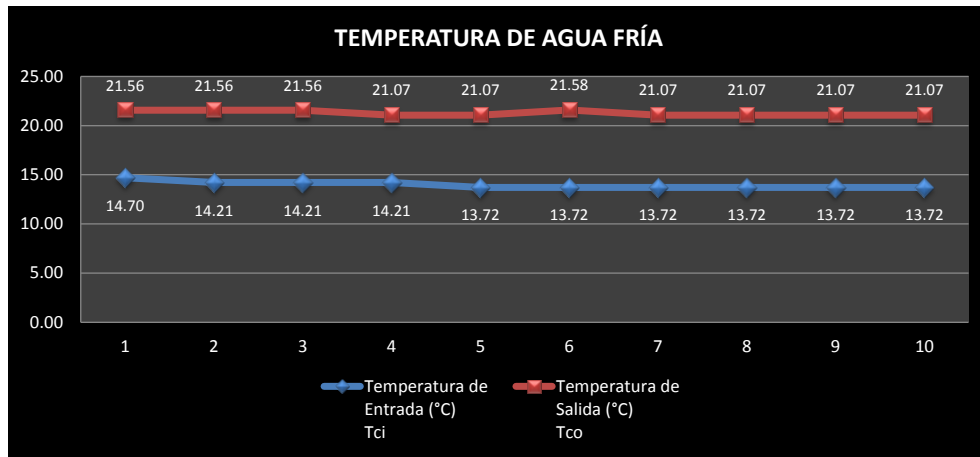


Figura 4.21 Evolución de las temperaturas de agua fría en el EDA
(Autor, 2013)

En las gráficas (fig. 4.20 y 4.21), se pueden apreciar la evolución de las temperaturas al ingreso y a la salida de los dos fluidos, en los resultados obtenidos tenemos además la graficas de la presión, en los dos lados del sistema tanto en el lado del fluido frio como en el del caliente. (fig. 4.22)

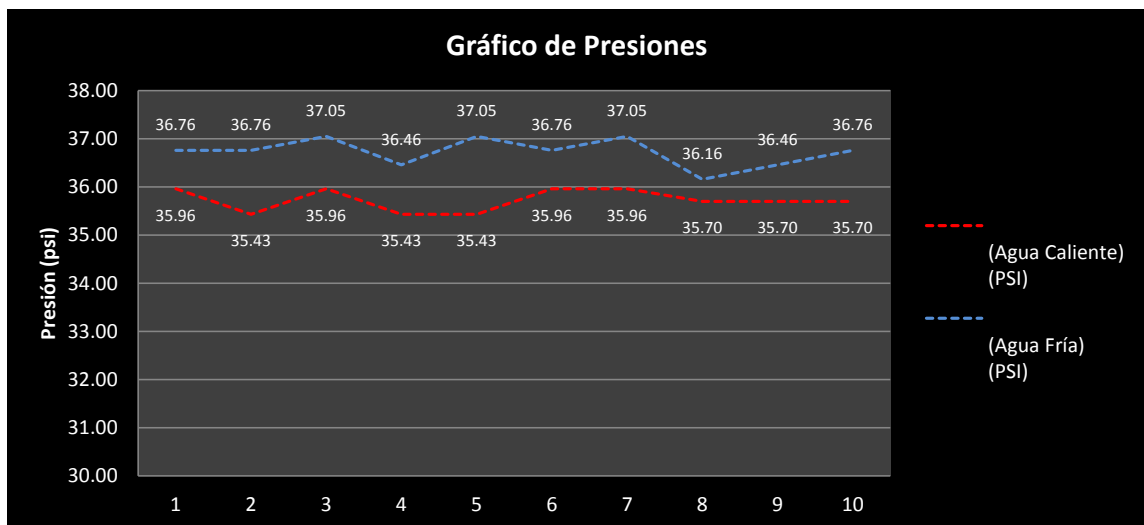


Figura 4.22 Resultados de la Presión en el Sistema (Autor, 2013)

4.3 Análisis de los resultados obtenidos en el intercambiador de calor

- La evolución de las temperaturas que se evidencian en el antiguo controlador de temperatura difieren en aproximadamente 5 °C entre los datos obtenidos desde el HMI por medio de los sensores de temperatura LM-35.
- La evolución de las temperaturas del fluido caliente se mantiene entre los 60°C para la entrada y 42°C para la salida, en promedio.
- Las temperaturas del fluido frío se mantiene entre los 15 y 20 °C para la entrada y 28 °C para la salida, en promedio.
- El rango de trabajo para realizar las prácticas es de una temperatura nominal de 55°C.
- Los valores del calor cedido por el fluido caliente y ganado por el fluido frío, dependen mucho del caudal con que se trabaje, ya que esto generara fluidos laminares o turbulentos.
- Con la puesta en marcha del intercambiador de calor se puede apreciar que todos los elementos implementados trabajan y se desarrollan normalmente desde el computador.

- Los sensores de temperatura, caudal, las válvulas proporcionales y bombas tanto del sistema de agua fría como del caliente son controlados desde el HMI.
- Las practicas ahora se pueden realizar en menor tiempo, ya que ahora contamos con un sensor de caudal que nos emite datos reales del flujo que está circulando por el sistema el cual es proporcionado por la válvula proporcional construida con un motor DC, anteriormente el flujo se medía manualmente, ajustando el mismo abriendo o cerrando válvulas para apreciarlo en el medidor de caudal y mediante la toma de tiempos calcular si el caudal era el apropiado.
- Los datos evaluados antes de la automatización del equipo arroja un promedio de la eficiencia de un 91 % y los datos después de la automatización nos da un promedio del 89 %, esto nos indica que el equipo una vez automatizado sigue cumpliendo satisfactoriamente su función.
- El coeficiente de transferencia de calor, de acuerdo a la gráfica, marca un promedio entre los 520 W/m². °K. Este valor tiene un aproximado al calculado en el diseño.
- Los datos obtenidos en las diferentes prácticas son exportados a Excel, los mismos que son analizados más prácticamente gracias a las bondades que nos brinda el programa.

CAPITULO 5

5 COSTOS

5.1 Evaluación Económica

En la evaluación de costos se indica detalladamente los costos directos e indirectos realizados en la automatización del intercambiador de calor.

5.2 Costo de Materiales Directos

Los costos de materiales directos (tabla 5.1), se detalla a continuación.

Nº.	Elementos	Dimensiones	Cantidad	Costo x Unidad	Costo total USD
1	Tarjeta	---	1	90	90
2	Juego de 8 Relés	---	2	80	160
2	Micro controlador	---	1	8.5	8.5
3	Motor DC	---	2	25.54	51.08
4	Sensores de Flujo	---	2	35	70
5	Sensores de Presión	---	2	180	360
6	Sensores de Temperatura	---	4	29	116
7	Válvula tipo compuerta	½"	2	9.32	18.64
10	Válvula de Flotador	½"	1	9.67	9.67
11	Codo polipropileno	½ x 90°	7	0.38	2.66
19	Tubo Polipropileno	½" x 6m	1	8.23	8.23
20	Placas Metálicas en L	---	2	12.5	25
22	Interruptor	---	1	3	3
23	Manguera	15m	1	1.2	18
24	Caja de control	---	1	25	25
25	Mano de Obra (Instalación)	---	1	150	150
				TOTAL	1115.78

Tabla 5.1 Costos de Materiales Directos (Autor, 2013)

5.3 Costo de Materiales Indirectos

Para el cálculo de materiales indirectos (tabla 5.2), se considera los costos de la asesoría técnica, costo de instalación y el cálculo de los insumos o gastos que se produce de forma obligatoria y corresponde al 12% del costo total de la asesoría técnica, instalación y de los materiales directos.

Denominación	Total
Asesoría Técnica	400.00
12% Insumos (Agua, Luz, Transporte etc.)	181.89
Total	581.89

Tabla 5.2 Costos de Materiales Indirectos (Autor, 2013)

5.4 Costo Total del proyecto

Para el valor total del proyecto (tabla 5.3), se suman los costos de los materiales directos e indirectos.

Costos	Valor
Directos	1115.78
Indirectos	581.89
Total	1697.67

Tabla 5.3 Total de Costos de Materiales (Autor, 2013)

CONCLUSIONES

- El sistema de automatización del intercambiador de calor permite obtener datos en tiempos reales y más precisos que los que se obtenía con los instrumentos que se usaban anteriormente, por lo que las prácticas realizadas en un futuro permitirán a los estudiantes apreciar de mejor manera los efectos de la transferencia de calor.
- Se comprueba el fenómeno del calentamiento–enfriamiento que se produce en el intercambiador de calor, mediante transferencia de calor de un fluido líquido-líquido, separados por una pared sólida.
- Antes de la automatización del equipo la diferencia entre los datos calculados y los obtenidos experimentalmente diferían por razones de pérdidas o errores en las mediciones de caudales, ya que esto dependía mucho de la apreciación del operador, ahora los datos tienen mayor exactitud y pueden ser apreciados al instante en el HMI creado para el efecto.
- Con las pruebas realizadas se comprueba experimentalmente, la transferencia de calor.
- Para el estudio del intercambiador de calor, el laboratorio cuenta ahora con un montaje especial convenientemente instrumentado con sensores de temperaturas

y caudalímetros para la visualización de datos. Para ello, el alumno lleva a cabo la medida de las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos, así como de los correspondientes flujos máscicos en el desarrollo de las prácticas, los mismos que pueden ser exportados a una hoja de Excel para poder apreciar de una forma más rápida mediante gráficos los resultados obtenidos.

- Además del HMI se insertaron graficas los mismos que pueden ser apreciados según cómo va trabajando el equipo en un tiempo real.
- En los datos exportados al Excel se puede ver también el comportamiento de la presión cuando aumentamos o disminuimos el caudal de los fluidos.
- El agua caliente trabaja en un circuito cerrado, es decir que el fluido recircula en el sistema, mientras que el agua fría ingresa al tanque de almacenamiento donde se encuentra ubicado una válvula flotador para impedir que el líquido se desborde y poder trabajar en un circuito abierto.
- Para la realización de las prácticas se comprobaron las lecturas de todos los elementos implementados para evidenciar la correcta funcionalidad de los mismos.
- Se implementaron nuevos manómetros de glicerina, así podemos apreciar las lecturas de presión del elemento versus las que nos indica en el HMI, estos datos también son exportados al Excel.

RECOMENDACIONES

- Para la realización de la medición de caudales, se recomienda empezar primero por el fluido caliente y luego por el fluido frío. El seguimiento de esta recomendación, asegura que los sensores de temperatura del fluido frío no se calienten, y por tanto proporcionen una lectura errónea.
- Las practicas que se pueden realizar son con varias combinaciones, se puede fijar el caudal del fluido caliente e ir modificando con los caudales del fluido frío, siempre y cuando se vaya modificando ascendentemente los caudales o viceversa.
- Es recomendable mantener un periodo corto de espera, aproximadamente de 3 a 5 minutos, para que se produzcan condiciones de estado estable, y así se puedan tomar las lecturas correspondientes. Este tiempo requerido, depende de los caudales utilizados para el intercambiador de calor.
- Para la realización de las practicas es recomendable que el equipo este en una temperatura de trabajo de 50 a 60°C, esto requiere de que al menos 45 minutos antes estén encendidas las resistencias para alcanzar temperatura.
- Es conveniente que el alumno se familiarice con la técnica de medida de temperatura en flujos, y además que adquiera cierta habilidad en analizar la

estructura del intercambiador, de la red de tubos, válvulas y de los nuevos elementos utilizados en la automatización del equipo.

- Tomar las debidas condiciones de seguridad para la realización de los ensayos.
- Programar adecuadamente los periodos para la realización de un mantenimiento externo e interno del intercambiador ya que la acumulación de capas de ensuciamiento en las superficies de transferencia origina o incrementa la resistencia al paso del calor en las paredes internas.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, V. (Julio de 2007). Diseño de un sistema de condensación para la emisión de vapor en el área de cocción de la planta de producción de la Cervecería Andina S.A. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Aguinaga, A. (2011). Autómatas Programables. *Facultad de Ingeniería Mecánica EPN*. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 29 de Junio de 2013, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/>: <http://bibdigital.epn.edu.ec/>
- Alava, G. (2010). *Acerca de nosotros: Grupo Alava Ingenieros*. Obtenido de Grupo Alava Ingenieros: <http://www.alava-ing.es/>
- Altec. (2009). *Acerca de nosotros: Altecdust*. Recuperado el 17 de Octubre de 2013, de Sitio web de Altec: <http://www.altecdust.com/>
- Arduino. (2013). *Acerca de nosotros: Arduino*. Obtenido de Arduino: <http://www.arduino.cl/index.html>
- Autor. (15 de Agosto de 2013). Quito, Pichincha, Ecuador.
- Autor. (2013). *Programación*.
- B-METERS. (2011). *Acerca de nosotros: B METERS Water meters*. Recuperado el 12 de Julio de 2013, de Sitio web de B METERS: <http://www.bmeters.com/>
- Canut, A., Guerra, F., Guzmán, B., & Struck, A. (2008). *Laboratorio de Operaciones Unitarias*. México D.F.: Universidad Iberoamericana.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México: Editorial McGraw Hill.
- Chulin Carballo, L. A. (2011). Selección de la tecnología para el control y adquisición de datos para una máquina de pruebas universales. *Contac Industrial*, 3-8.
- CodeSolar. (2010). *Acerca de nosotros: Codesolar Cía. Ltda*. Recuperado el 27 de Julio de 2013, de Sitio web de Codesolar Compañía Limitada: <http://www.codesolar.com/>
- Commons, W. (12 de Noviembre de 2009). *Acerca de nosotros: Wikimedia*. Recuperado el 21 de Octubre de 2013, de Wikimedia Commons: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:H_bridge.svg
- DSC. (2009). *Dynamic & security computations*. Recuperado el 25 de Junio de 2013, de Dynamic & security computations: <http://www.analisis-dsc.com/>

- Dwyer. (2013). *Acerca de nosotros: DWYER INSTRUMENTS, INC.* Obtenido de DWYER INSTRUMENTS, INC: <http://www.dwyer-inst.com/>
- ElectroSalgado. (2006). *Acerca de nosotros: RES Resistencia Electro Salgado.* Recuperado el 18 de Julio de 2013, de Sitio web de RES Resistencia Electro Salgado: <http://www.electrosalgado.com/>
- Incropera. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor.* México D.F.
- Instruments, T. (2011). *Acerca de nosotros: Texas Instruments Incorporated.* Recuperado el 31 de Octubre de 2013, de Sitio web de Texas Instruments Incorporated: <http://www.ti.com/>
- Inzunza. (2006). *Física, Introducción a la Mecánica.* Chile: Editorial Concepción .
- León, R. (2010). *Acerca de nosotros: G-FLOW.* Obtenido de G-FLOW León Romero: <http://www.g-flow.com/caudalímetros>
- MagnetLab. (2009). *Acerca de nosotros: Magnet Lab.* Obtenido de National High Magnetic Field Laboratory: <http://www.magnet.fsu.edu>
- Mataix, C. (1982). *Mecánica de Fluidos.* México D.F: Harper & Row Latinoamericana.
- Mecatronic. (s.f.). <http://automatizacion2008.blogspot.com/>. Obtenido de <http://automatizacion2008.blogspot.com/>: <http://automatizacion2008.blogspot.com/>
- Miteco. (2011). *Acerca de nosotros: Miteco.* Obtenido de Miteco: <http://www.miteco.com/automation-aplc-and-scada.html>
- Monge G., Y. E. (2008). Diseño de un banco de pruebas para un bloque de electroválvulas usando un PLC. En Y. E. Monge G., *Tesis de Grado* (pág. 42). Mérida.
- NI. (2011). *Acerca de nosotros: National Instruments.* Obtenido de National Instruments: <http://www.ni.com/labview/>
- Omega. (2013). *Acerca de nosotros: Omega.* Recuperado el 30 de Octubre de 2013, de Sitio web de Omega: <http://www.omega.com/>
- Pillajo A., S. D. (2009). Diseño y construcción de un precalentador de combustible para motores Diesel. Quito, Pichincha, Ecuador.

- Provindus. (1983). *Acerca de nosotros: Provindus S.A.* Recuperado el 15 de Septiembre de 2013, de Sitio web Provindus S.A.:
<http://www.provindus.com.py/Empresa.html>
- Quinchimba, H., & Robayo, D. (2009). Diseño y construcción de un intercambiador de calor de tipo tubo y coraza Líquido-Líquido. Quito, Ecuador.
- Rengifo, P. L. (29 de Enero de 2013). Controladores, Valvulas de Control, Controladores en los lazos de control y acciones de control. *Controladores*. Tinaquillo, Tinaquillo, Venezuela: Politécnica de la Fuerza Armada Nacional.
- SainSmart. (25 de Enero de 2010). *Módulo de Relés*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2013, de Sain Smart: <http://www.sainsmart.com>
- Simef. (2013). *Acerca de nosotros: SIMEF*. Obtenido de Sistema de medición de fluidos SIMEF: <http://www.simef.com.ar/>
- SOLEC. (2011). *Acerca de nosotros: Soluciones Eléctricas*. Recuperado el 8 de Julio de 2013, de Sitio web de Soluciones Eléctricas:
<http://www.solec.ws/contactores.html>
- SUDEL. (2009). *Acerca de nosotros: SUDEL*. Recuperado el 02 de Julio de 2013, de Sitio web de SUDEL: <http://www.sudel.com.uy/>
- Tecnotec. (2010). *Acerca de nosotros: Electrónica y Control*. Recuperado el 4 de Junio de 2013, de Electrónica y Control Tecnotec:
http://tecnotec.es/robokit/electrnica_y_control.html
- UPC. (2009). *Acerca de nosotros: Universitat Politècnica de Catalunya*. Recuperado el 22 de Octubre de 2013, de Universitat Politècnica de Catalunya:
<http://www.epsem.upc.edu/~intercanviadorsdecalor/castella/index.html>