

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL
CONTROL Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA TÉRMICO**

**JUAN SEBASTIÁN RODRÍGUEZ MORENO
CARLOS MAURICIO RICARDO FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL
CONTROL Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA TÉRMICO**

**JUAN SEBASTIÁN RODRÍGUEZ MORENO
CARLOS MAURICIO RICARDO FLÓREZ**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO

**DIRECTOR
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
INGENIERO MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

A Dios

Por haberme permitido llegar con fortaleza y salud al logro de este objetivo.

A mis padres, familiares y amigos

Quienes me han dado todo como persona, enseñándome a luchar para alcanzar mis metas. Por su apoyo incondicional y por su motivación constante de seguir adelante.

Gracias

Carlos Mauricio Ricardo Flórez

AGRADECIMIENTOS

A la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander por los conocimientos adquiridos que permitieron nuestro crecimiento profesional a lo largo de nuestra carrera.

Al director de proyecto Ing. Omar Armando Gelvez Arocha por todo el apoyo y asesoría que nos brindó en el desarrollo exitoso de este proyecto.

A nuestros amigos, compañeros y familiares por su apoyo incondicional de nunca dejarnos desfallecer.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. DISEÑO CONCEPTUAL DEL BANCO DE LABORATORIO	25
1.1 MÓDULO DE TRASPORTE	28
1.2 MÓDULO DE REGULACIÓN DE FLUJO	29
1.3 MÓDULO DE CALEFACCIÓN	32
1.4 MÓDULO DE DISIPACIÓN DE CALOR	33
1.5 MÓDULO DE INSTRUMENTACIÓN	35
1.6 MÓDULO ESTRUCTURAL	38
1.7 CONCLUSIÓN	39
2. DISEÑO DE DETALLE DE LOS MÓDULOS	41
2.1 MÓDULO DE TRASPORTE	41
2.1.1 Selección de la tubería	41
2.1.2 Diseño del tanque de almacenamiento	43
2.1.3 Selección de la bomba	45
2.2 MÓDULO DE REGULACIÓN DE FLUJO	48
2.2.1 Selección de la válvula reguladora de caudal	49
2.2.2 Selección motor pasó a paso	50
2.2.3 Rotámetro	53
2.3 MÓDULO DE CALEFACCIÓN	54
2.3.1 Selección del calefactor eléctrico	54
2.4 MÓDULO DE DISIPACIÓN DE CALOR	57
2.4.1 Ventiladores	58
2.4.2 Selección del intercambiador de calor	59

2.5 MÓDULO DE INSTRUMENTACIÓN	65
2.5.1 Panel de control	65
2.5.2 Selección del micro-controlador	66
2.5.3 Termocuplas	68
2.5.4 Selección del Adecuador de señal	69
2.5.5 Regulación de voltaje AC	71
2.5.6 Relé electromecánico	72
2.5.7 Triac	73
3. FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE LABORATORIO	74
3.1 SISTEMA TÉRMICO	75
3.2 INTERFACES PARA LA ADECUACIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS	77
3.2.1 Interface para adquisición de datos	78
3.2.2 Interface para la manipulación de equipos eléctricos del sistema térmico	80
3.2.2.1 Regulación AC por ángulo de fase	82
3.2.2.2 Motor pasó a paso	86
3.3 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO	88
3.3.1 Controlador PID	88
3.3.2 Librería del PID en LabView	91
3.3.3 Sistemas de control aplicados en el banco	93
3.4 PERTURBACIONES	96
3.5 INTERFACE Y ALGORITMO EN LABVIEW	97
3.5.1 Interfaces grafica	98
3.5.2 Algoritmo	100
3.6 CABLEADO ELÉCTRICO	104
4. ANÁLISIS PRÁCTICO Y TEORICO DE LOS DISTINTOS PROCESOS IMPLEMENTADOS EN EL BANCO DE LABORATORIO.	108
4.1 ANÁLISIS EMPÍRICO DE LOS DISTINTOS PROCESOS IMPLEMENTADOS.	109

4.1.1 Control de temperatura por medio del suministro de calor del sistema	110
4.1.1.1 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio de la disipación de calor.	110
4.1.1.2 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio del cambio en el régimen de flujo del fluido de trabajo.	119
4.1.2 Control de temperatura por medio de la disipación de calor al sistema	126
4.1.2.1 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio del suministro de calor.	126
4.1.3 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio del cambio del régimen de flujo del fluido de trabajo.	133
4.2 ANÁLISIS TEÓRICO	138
4.2.1 Modelo matemáticos del sistema térmico	138
4.2.2 Resultados de la simulación	144
4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS TRABAJOS PRÁCTICOS Y TEÓRICO	155
5. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y PLANTEAMIENTO DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO	158
5.1 CONCLUSIONES	158
5.2 OBSERVACIONES	160
5.3 PRÁCTICA DE LABORATORIO	161
ANEXOS	169

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Esquema general banco de laboratorio	26
Figura 2 Banco de laboratorio	27
Figura 3.:Esquema módulo de transporte	29
Figura 4. Esquema componentes módulo de regulación de flujo	31
Figura 5 Esquema módulo de calefacción	33
Figura 6 Esquema módulo de disipación de calor	35
Figura 7 Prototipo banco de laboratorio	40
Figura 8 Tubería y accesorios del módulo de transporte	42
Figura 9 Tanque de almacenamiento	45
Figura 10 Perspectiva de una bomba centrífuga	46
Figura 11 Bomba centrífuga del módulo de transporte	47
Figura 12 Válvula de globo	50
Figura 13 Acople válvula – motor	51
Figura 14 Motor paso a paso	52
Figura 15 Rotámetro	53
Figura 16 Calefactor eléctrico de inmersión con racor roscado	56
Figura 17 Ventilador	59
Figura 18 Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado	62
Figura 19 Intercambiador de calor compacto	63
Figura 20 Panel de control	66
Figura 21 Arduino Due	67
Figura 22 Termocupla con bulbo	69
Figura 23 FieldPoint	71
Figura 24 Tarjeta para el control por ángulo de fase	72

Figura 25 Relé electro-mecánico	73
Figura 26 Triac	73
Figura 27 Composición general del banco de laboratorio	75
Figura 28 Sistema térmico	76
Figura 29 Configuración adquisición de datos (NI FP-1601 y NI FP-TC-120)	80
Figura 30 Interface para la actuación de los elementos eléctricos	82
Figura 31 Algoritmo montado en arruino	82
Figura 32 Regulación por ángulo de fase	83
Figura 33 Circuito para la regulación por ángulo de fase en el calefactor eléctrico y en los ventiladores	85
Figura 34 Secuencia del motor paso a paso	87
Figura 35 Puente H L6203	87
Figura 36 Cableado	87
Figura 37 Controlador proporcional, integral y derivativo	89
Figura 38 Librería PID	91
Figura 39 Funcionamiento de la librería de PID	93
Figura 40 Control por suministro de calor del sistema	94
Figura 41. Control por disipación de calor	95
Figura 42 Interfaces	98
Figura 43 Algoritmo	101
Figura 44 Adquisición de datos	102
Figura 45 Manipulación de componentes del sistema térmico	103
Figura 46 Panel de control	104
Figura 47 Cableado	105
Figura 48 Plano eléctrico	106
Figura 49 Conexiones Arduino	107
Figura 50 Clasificación de los distintos procesos implementados en el banco de laboratorio	109
Figura 51 Procedimiento llevado a cabo en las distintas pruebas	110
Figura 52 Control automático de la prueba 1	111

Figura 53 Señal de control de la prueba 1	112
Figura 54 Temperatura de la prueba 1	112
Figura 55 Calor de entrada y salida de la prueba 1	112
Figura 56 Perturbación por medio del cambio de voltaje en los ventiladores de la prueba 1	113
Figura 57 Caudal del fluido de trabajo del sistema de la prueba 1	113
Figura 58 Control automático de la prueba 2	116
Figura 59 Señal de control de la prueba 2	116
Figura 60 Temperatura de la prueba 2	117
Figura 61 Calor de entrada y salida de la prueba 2	117
Figura 62 Perturbación por medio del cambio de voltaje en los ventiladores de la prueba 2	117
Figura 63 Caudal del fluido de trabajo del sistema de la prueba 2	118
Figura 64 Control automático de la prueba 3	120
Figura 65 Señal de control de la prueba 3	120
Figura 66 Temperaturas de la prueba 3	121
Figura 67 Calor de entrada y salida de la prueba 3	121
Figura 68 Perturbación por medio del cambio en el caudal de la prueba 3	121
Figura 69 Voltaje en los ventiladores de la prueba 3	122
Figura 70 Control automático de la prueba 4	123
Figura 71 Señal de control de la prueba 4	124
Figura 72 Temperatura de la prueba 4	124
Figura 73 Calor de entrada y salida de la prueba 4	124
Figura 74 Perturbación por el cambio en el régimen del caudal de la prueba 4	125
Figura 75 Voltaje en los ventiladores de la prueba 4	125
Figura 76 Control automático de la prueba 5	127
Figura 77 Señal de control de la prueba 5	127
Figura 78 Temperatura de la prueba 5	128
Figura 79 Calores de entrada y salida de la prueba 5	128
Figura 80 Perturbación por medio del suministro de calor en la prueba 5	128

Figura 81 Régimen de caudal en la prueba 5	129
Figura 82 Control de temperatura de la prueba 6	131
Figura 83 Señal de control de la prueba 6	131
Figura 84 Temperatura de la prueba 6	131
Figura 85 Calores de entrada y salida de la prueba 6	132
Figura 86 Perturbación por medio del suministro de calor en la prueba 6	132
Figura 87 Régimen de caudal del fluido de trabajo en la prueba 6	132
Figura 88 Control de temperatura de la prueba 7	134
Figura 89 Señal de control de la prueba 7	134
Figura 90 Temperatura de la prueba 7	134
Figura 91 Calor de entrada y salida de la prueba 7	135
Figura 92 Perturbación por medio del cambio de caudal en la prueba 7	135
Figura 93 Voltaje de los ventiladores en la prueba 7	135
Figura 94 Control automático de la prueba 8	136
Figura 95 Señal de control de la prueba 8	136
Figura 96 Temperaturas de la prueba 8	136
Figura 97 Calores de entrada y salida en la prueba 8	137
Figura 98 Perturbación por medio del cambio del caudal en la prueba 8	137
Figura 99 Voltaje del calefactor eléctrico en la prueba 8	137
Figura 100 Variables del sistema térmico	139
Figura 101 Volumen de control del intercambiador de calor	139
Figura 102 Volumen de control del calefactor eléctrico	142
Figura 103 Volumen de control del tanque	143
Figura 104 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 1	144
Figura 105 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 1	144
Figura 106 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 1	145
Figura 107 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 2	145

Figura 108 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 2	146
Figura 109 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 2	146
Figura 110 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 3	147
Figura 111 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 3	147
Figura 112 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 3	148
Figura 113 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 4	148
Figura 114 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 4	149
Figura 115 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 4	149
Figura 116 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 5	150
Figura 117 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 5	150
Figura 118 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 5	151
Figura 119 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 6	151
Figura 120 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 6	152
Figura 121 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 6	152
Figura 122 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 7	153
Figura 123 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 7	153
Figura 124 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 7	154
Figura 125 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 8	154

Figura 126 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 8	155
Figura 127 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 8	155
Figura 128 Análisis comparativo del comportamiento térmico del punto T2	157

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requerimientos para el módulo de transporte	28
Tabla 2 Componentes del módulo de transporte	29
Tabla 3 Requerimientos para el módulo de regulación de flujo	30
Tabla 4 Componentes del módulo de regulación de flujo	31
Tabla 5 Requerimientos para el módulo de calefacción	32
Tabla 6 Componentes del módulo de calefacción	33
Tabla 7 Requerimientos para el módulo de disipación de calor	34
Tabla 8 Componentes del módulo de disipación de calor	35
Tabla 9 Requerimientos para el módulo de instrumentación	37
Tabla 10 Componentes del módulo de instrumentación	38
Tabla 11 Componentes del módulo de transporte	39
Tabla 12 Especificaciones bomba Pedrollo PKm 60	48
Tabla 13 Especificaciones válvula de globo	50
Tabla 14 Secuencia de paralización de las bobinas de un motor pasó a paso.	51
Tabla 15 Especificaciones motor paso a paso	53
Tabla 16 Especificaciones calefactor eléctrico	57
Tabla 17 Especificaciones ventilador	59
Tabla 18 Especificaciones intercambiador de calor compacto	64
Tabla 19 Descripción Arduino DUE	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. BOMBA PEDROLLO	170
ANEXO B. MOTOR PASO A PASO	173
ANEXO C. VENTILADORES ELCO	174
ANEXO D. FIELDPOINT	175

RESUMEN

TITULO DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL CONTROL Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA TÉRMICO*

AUTORES Juan Sebastián Rodríguez Moreno
Carlos Mauricio Ricardo Flórez**

PALABRAS CLAVES Sistema térmico, control PID, comportamiento.

DESCRIPCIÓN

El objetivo principal de este trabajo de grado es diseñar y construir un dispositivo experimental y didáctico para el laboratorio de sistemas térmicos, en donde los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica tengan la oportunidad de entender el funcionamiento básico de un sistema térmico.

Se diseñó y construyó un banco de laboratorio que está conformado por un sistema térmico, en el cual serán aplicados una serie de procesos tales como; controles PID, adquisición de datos de la variable temperatura y una manipulación directa de las diferentes variables que se involucran en el sistema. Para lograr esto, el sistema térmico cuenta con una serie de elementos con los cuales se puede controlar el calor de suministro, el calor disipado y el caudal de un flujo de agua que estará constantemente pasando por los diferentes módulos del sistema. La unión de estos módulos en el sistema térmico, conformaran un circuito hidráulico cerrado de agua, dentro del cual se encuentra una motobomba centrífuga que garantizará un flujo constante de agua al sistema.

Por medio de la manipulación de los elementos del sistema térmico, se podrá controlar tanto el calor que entra como el que sale, esto con el fin aplicar una serie controles PID de temperatura que puedan estabilizar el sistema. Además después de que dicho sistema se encuentre en estado estable, este podrá ser perturbado por medio de la manipulación de otras variables del sistema. De acuerdo a ello se generaran diferentes escenarios de análisis, dentro de los cuales habrá procesos estables y transitorios que manipularan el comportamiento térmico del sistema, lo que permitirá el desarrollo de un análisis teórico y experimental de dichos comportamientos.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing Omar Armando Gelvez Arocha

ABSTRACT

TITLE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A LABORATORY BENCH FOR CONTROL AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A THERMAL SYSTEM*

AUTHORS Juan Sebastián Rodríguez Moreno
Carlos Mauricio Ricardo Flórez**

KEYWORDS Thermal system, PID Control, Performance.

DESCRIPTION

The main objective of this degree work is to design and construct an experimental and educational device for the thermal systems lab, where students of the mechanical engineering school have the opportunity to understand the basic operation of a thermal system.

It was designed and constructed lab bench that consists of a thermal system, which will apply a series of processes such as: PID control, data acquisition of a temperature variable and direct manipulation of the different variables involved in the system. To achieve this, the thermal system includes some elements which can control the heat supply, the heat dissipation and the rate of water flow, which is constantly passing through each of the system modules. The union of these modules in the thermal system will form a closed hydraulic water circuit, however inside the circuit there is a centrifugal pump which will ensure a steady flow of water to the system.

Through the manipulation of elements of the thermal system, is able to control the input and output heat, this in order to apply or not PID temperature controls that can stabilize the system. Also after the system reaches a steady state, this may be disrupted by the manipulation of other variables of the system. According to this, different scenarios to analysis will be generated, in which there will be stable and transient processes that manipulate the thermal behavior of the system, allowing the development of a theoretical and experimental analysis of such behaviors.

* Degree Work

** Physics and Mechanics Faculty. Mechanical Engineering School. Ing. Omar Armando Gelvez Arocha

INTRODUCCIÓN

En la ardua labor de aprendizaje por parte del estudiantado, quienes están constantemente en la búsqueda de nuevos conocimientos en el transcurso de su vida académica, se hace evidente la necesidad de tener a disposición herramientas que faciliten el entendimiento de las temáticas impartidas por parte de los docentes en las aulas de clases. Hoy en día estas herramientas, tienden a estar enfocadas a complementar los conceptos teóricos, de manera que se pueda visualizar y analizar lo aprendido en clase, para esto los estudiantes cuentan con espacios donde se pueden acceder a ellas para lograr así afianzar sus conocimientos. En estos espacios conocidos como laboratorios, existen las condiciones apropiadas para la realización de prácticas, ensayos y experimentos, lo cual permite llevar al mundo real y físico todo el conocimiento que se adquirió tanto en los textos como en recintos de clase.

La Universidad Industrial De Santander cuyo propósito es la formación de personas de alta calidad ética, política y profesional, tiene también como misión la generación y adecuación de conocimiento, para ello cuenta con aulas de laboratorio que están dotadas con equipos de aplicación tecnológica, brindando así un servicio de calidad a la comunidad universitaria. Una de las tantas aulas de laboratorio con las cuales cuenta la UIS, es el laboratorio de Máquinas Térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en donde están a disposición diferentes tipos de bancos que abordan e integran muchas de las temáticas impartidas en la aulas, permitiendo que los estudiantes complementen su formación y adquieran destrezas y habilidades prácticas en diversos campos de la materia de sistemas térmicos, transferencia de calor, refrigeración, aire acondicionado y plantas térmicas. Para ello los equipos disponibles han sido acondicionados con las últimas tecnologías para el monitoreo y control de las diferentes pruebas

permitiendo así un aumento de la fiabilidad de las mediciones y que el estudiante pueda hacer un mejor análisis de los resultados. Cabe resaltar que esto ha sido posible gracias al arduo trabajo de los estudiantes de ingeniería mecánica y del docente ING. OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA a través de todos estos años.

Según lo anterior y con el fin de seguir tanto la misión de la Universidad Industrial De Santander, como el trabajo realizado por los estudiantes y docentes en el laboratorio de Máquinas Térmicas de la Escuela de Ingeniería de Mecánica, se planteó un proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL CONTROL Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA TÉRMICO” que tiene como:

Objetivo general

- Aportar a la misión de la Universidad Industrial de Santander, con trabajo de técnica aplicada que refleje la labor en Ingeniería Mecánica tanto por los estudiantes como por los docentes, en la multiplicación del conocimiento mediante el diseño y construcción de un banco para el control y análisis de sistemas térmicos, e implementación de varias prácticas de laboratorio para la materia de sistemas térmicos.

Objetivos específicos

- Diseño y construcción de una herramienta didáctica de laboratorio para el control y análisis del comportamiento en estado transitorio y estable de un sistema térmico básico, producto de la introducción de perturbaciones que afectan:
 - a) El suministro de calor al sistema
 - b) El régimen de flujo del fluido de trabajo
 - c) El mecanismo de disipación de calor del sistema

- Analizar tanto teórica como empíricamente los procesos transitorios generados en el sistema, producto de las perturbaciones implementadas y bajo las siguientes condiciones de control:
 - a) Control PID
 - b) Sin ningún tipo de control

- Documentar las siguientes prácticas de laboratorio para la materia de sistemas térmicos, donde se implementen conceptos teóricos de transferencia de calor para el análisis del comportamiento tanto estable como dinámico del sistema térmico del banco, en el cual los estudiantes tendrán la oportunidad de comprender y analizar los fenómenos observados.
 - a) Respuestas del sistema a las perturbaciones por medio de la disipación de calor o cambio del régimen de flujo del fluido de trabajo cuando se está aplicando un control por medio del suministro de calor.
 - b) Respuestas del sistema a las perturbaciones por medio del cambio en el régimen del flujo del fluido de trabajo o suministro de calor cuando se está aplicando un control por medio de la disipación de calor.

En este documento se presenta de forma organizada el trabajo que se llevó a cabo, para la culminación de este proyecto. En el primer capítulo se encuentra el diseño conceptual del sistema térmico. En el segundo capítulo se hace la selección y descripción detallada de los módulos que conformarán el banco. En el tercer capítulo se explica el funcionamiento del banco de laboratorio. En el cuarto capítulo se exponen los resultados de las pruebas realizadas y por último, en el quinto capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo de grado.

1. DISEÑO CONCEPTUAL DEL BANCO DE LABORATORIO

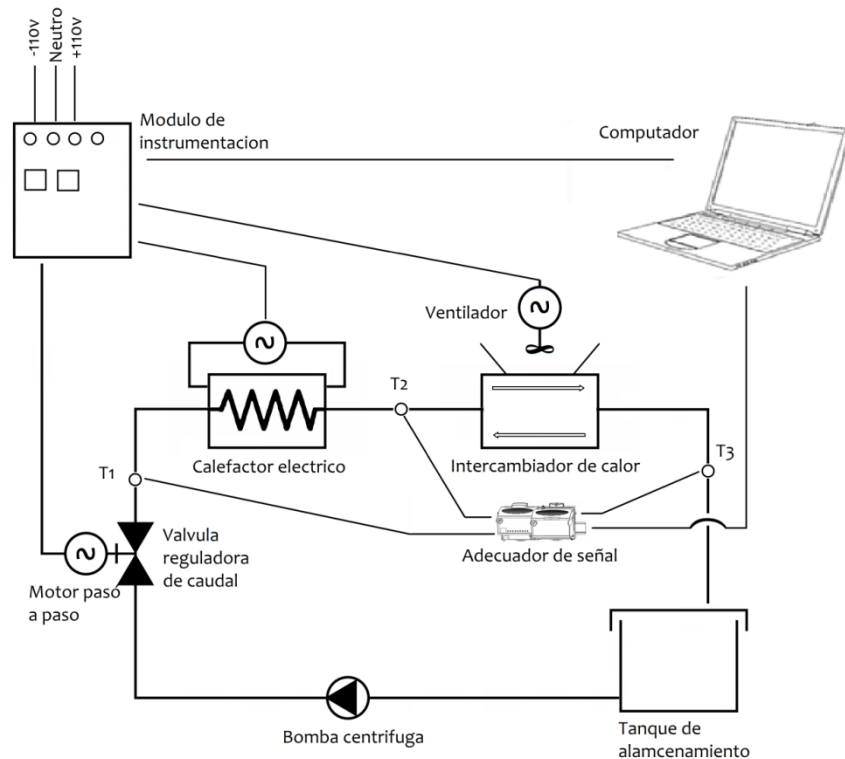
Una de las asignaturas que se imparten en la carrera de Ingeniería Mecánica es la materia de sistemas térmicos. Esta es de vital importancia para los estudiantes ya que con el estudio de esta materia, en donde se aplican los conceptos de termodinámica y transferencia de calor se puede conocer, seleccionar y construir infinidad de máquinas y artefactos térmicos que no son solo de uso industrial sino que también podemos encontrar en nuestra vida diaria.

Por otra parte uno de los aspectos que debemos tener en cuenta es que el estudio de un sistema térmico no se debe limitar solo al aspecto teórico sino que se también se debe complementar con un trabajo empírico donde los estudiantes tengan la oportunidad de interactuar con un sistema real al cual se le pueda manipular y controlar las distintas variables que se puedan involucrar, siendo las más comunes el calor a suministrar (Q_{in}), el calor disipado (Q_{out}) y el régimen del flujo del fluido de trabajo, esto con el fin de realizar un análisis en el cual se pueda reflejar el comportamiento térmico del sistema.

Según lo anterior se requiere entonces de un banco de laboratorio conformado por un sistema térmico que esté compuesto por elementos de suministro y disipación de calor a un fluido de trabajo, y que también cuente con dispositivos propios de instrumentación y de control digital eléctrico, capaces de poder manipular y controlar los elementos del sistema térmico. Acorde a ello entonces, el banco estará organizado teniendo en cuenta los requerimientos y parámetros del proyecto que permitan comprobar el comportamiento de un sistema térmico cuando se encuentra bajo la influencia de perturbaciones debidas en su mayor parte a un sistema de suministro de calor que utiliza como elemento principal un calefactor eléctrico, un sistema de disipación de calor que utiliza como elemento

principal un intercambiador de calor enfriado por aire y un sistema de regulación de flujo que utiliza como elemento principal una válvula reguladora de caudal. Cabe mencionar que estos sistemas a su vez estarán acompañados de otros elementos tales como los de transporte, que se encargarán de mover el fluido de trabajo por cada uno de los diferentes módulos; los estructurales, en donde se montarán todos los componentes del banco de laboratorio y finalmente los de instrumentación, quienes complementarán el sistema térmico con sensores, un micro-controlador y diferentes dispositivos electrónicos con la finalidad de adecuar el banco de laboratorio para que esté en la capacidad de utilizar elementos de control tales como el de suministro de calor y el de disipación de calor que permitirán comprobar también el comportamiento del sistema térmico cuando se encuentre en un estado estable y transitorio.

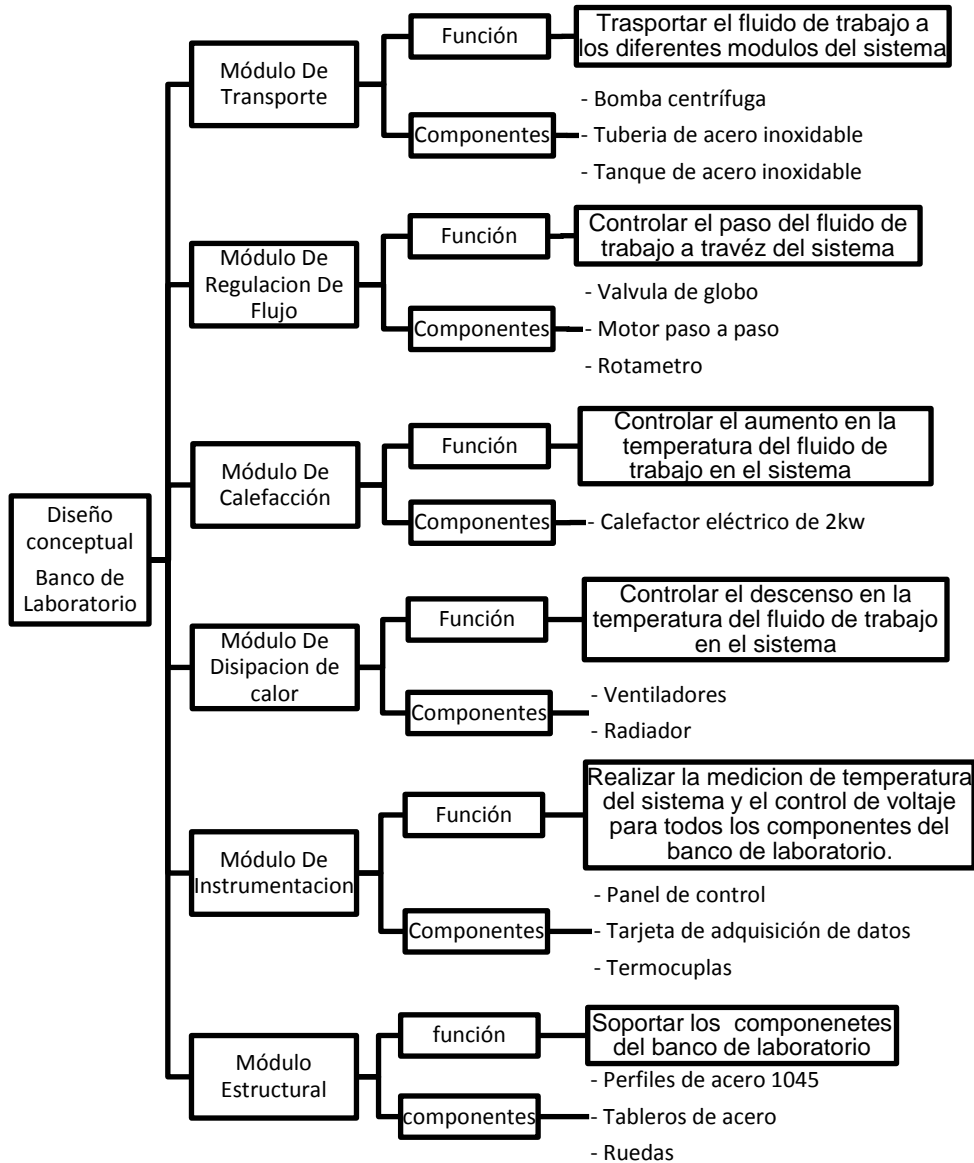
Figura 1. Esquema general banco de laboratorio



Fuente: autores del proyecto

El banco de laboratorio contará con los siguientes módulos como lo indica la figura 2.

Figura 2. Banco de laboratorio



Fuente: Autores del proyecto

A pesar de que los módulos de suministro y de disipación de calor juegan los papeles más importantes en el banco de laboratorio, se optó por comenzar por el módulo de transporte, puesto que no tenemos un sistema que tenga como objetivo

un requerimiento específico de entrada o salida de calor. De acuerdo a ello no es de vital importancia que el banco de laboratorio se diseñe en función de ellos. Ahora sabiendo que el banco de laboratorio ocupará es espacio reducido dentro del aula, se empezó a diseñar de manera que lograra ocupar el menor espacio posible, para ello se necesitaría conocer el tamaño del elemento que almacenará el fluido de trabajo y sobre todo el elemento roto dinámico que lo impulsará a través de todos los módulos subsiguientes pues este se empezará a considerar a partir del costo y la capacidad de flujo de los que se encuentren en el mercado.

1.1 MÓDULO DE TRASPORTE

Función

Transportar el fluido de trabajo (agua) a través de todos los módulos del banco de laboratorio, manteniendo un flujo constante sobre todos los componentes físicos por los cuales pasa la masa de control del sistema térmico.

Requerimientos

En la tabla 1. Se presentan los requerimientos mínimos para el funcionamiento del módulo de transporte

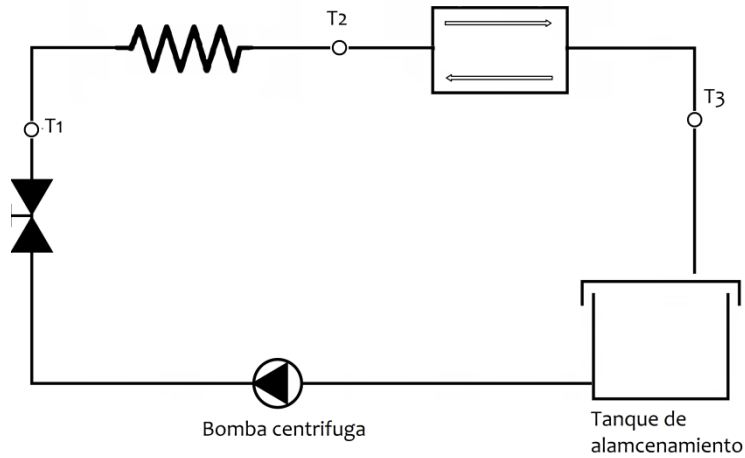
Tabla 1. Requerimientos para el módulo de transporte

Requerimientos	Especificaciones
Material a utilizar para el transporte de fluidos	Tubos - Mangueras
Rango de caudales	0 a 60 L/min
Tensión de alimentación	AC 110 - 220 V

Componentes

Teniendo en cuenta los requerimientos mencionados, los componentes que conforman este módulo se observan en la tabla 2.

Figura 3. Esquema módulo de transporte



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 2. Componentes del módulo de transporte

Componente	Descripción	Especificaciones
Bomba	Tipo	Centrífuga
	Caudal	5 – 40 L/Min
	Diámetro (In – Out)	1"
Tanque	Material	Acero inoxidable
	Dimensiones	28 – 22 – 27 Cm
	Capacidad	16.5 L
Tubería	Material	Acero Inoxidable (Sanitario)
	Diámetro	1" – 1.5"

1.2 MÓDULO DE REGULACIÓN DE FLUJO

Función

Controlar mediante un actuador electromecánico proporcional el paso del fluido de trabajo a través de todos los módulos del banco de laboratorio, manteniendo un flujo constante y regulado sobre todos los componentes físicos por los cuales pasa la masa de control del sistema térmico, esto con la finalidad de poder analizar la

respuesta del sistema con respecto a las perturbaciones causadas en el caudal del fluido de trabajo.

Requerimientos

En la tabla 3. Se presentan los requerimientos mínimos para el funcionamiento del módulo de regulación de flujo.

Tabla 3 Requerimientos para el módulo de regulación de flujo

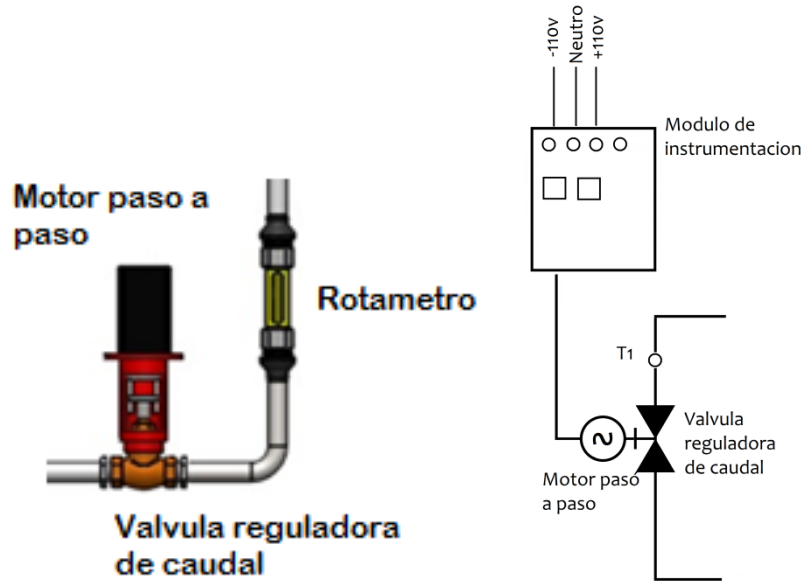
Requerimientos	Especificaciones
Regulación de flujo	Válvulas
Actuador electromecánico	Alto torque
Frecuencia	60 Hz
Tensión de alimentación	AC 110/220 V
	DC 5 - 24 V

Componentes

La regulación de flujo se realizará por medio de una válvula reguladora de caudal manual comandada por un dispositivo electromecánico giratorio. Este dispositivo el cual debe estar alimentado por una fuente de corriente continua de 12V – 5A y conectado a un circuito puente H para el giro en ambos sentidos (módulo de instrumentación, sección 2.5), no es más que un motor paso a paso bipolar.

En la tabla 4. Se encuentran los componentes y sus respectivas especificaciones que harán parte del módulo de regulación de flujo.

Figura 4. Esquema componentes módulo de regulación de flujo



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 4. Componentes del módulo de regulación de flujo

Componente	Descripción	Especificaciones
Motor	Tipo	Paso a Paso Bipolar
	Tensión	DC 12 V
	Corriente	DC 5 A
	Torque	4 N-m
Válvula reguladora de caudal	Tipo	Globo
	Material	Bronce
	Diámetro (In – Out)	1”
Rotámetro	Rango de Caudales	1 - 16 Gal/min
	Diámetro (In – Out)	1”

1.3 MÓDULO DE CALEFACCIÓN

Función

Aportar el calor necesario para lograr un aumento en la temperatura del fluido de trabajo (agua) con la finalidad de analizar la respuesta del sistema con respecto a las perturbaciones de suministro de calor generadas a la masa de control del sistema térmico.

Requerimientos

Para conocer el comportamiento de un sistema térmico bajo diferentes condiciones de temperatura y suministro de calor, se proyectó el diseño del módulo de calefacción con los requerimientos mostrados en la tabla 5, estos están basados en análisis previos (módulo de calefacción, sección 2.3) que permiten observar cambios significativos en las variables del sistema generadas por las perturbaciones en el suministro de calor en tiempos relativamente cortos, permitiéndole al usuario una toma de datos rápida y cómoda.

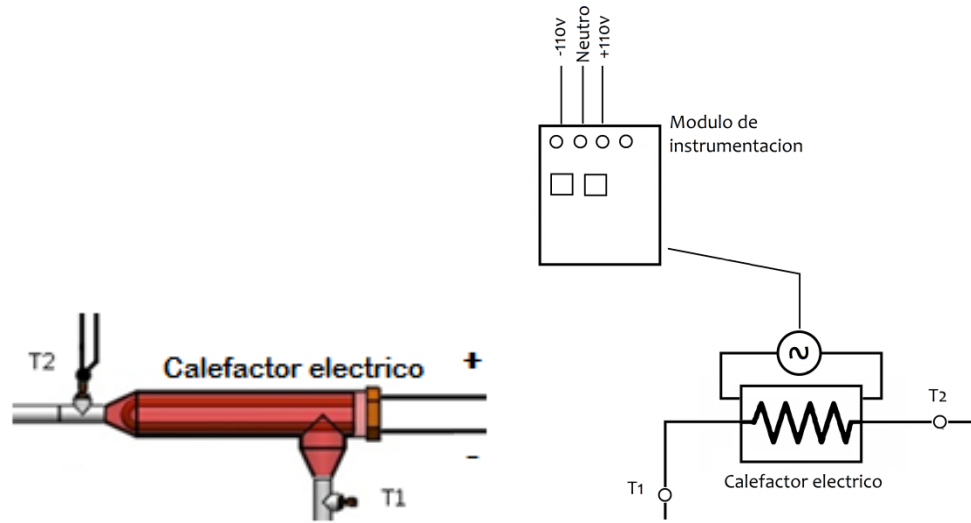
Tabla 5. Requerimientos para el módulo de calefacción

Requerimientos	Especificaciones
Tensión de alimentación	AC 110 - 220 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia	2 – 4 Kw

Componentes

Teniendo en cuenta los requerimientos mencionados, los componentes que conforman este módulo se observan en la tabla 6.

Figura 5. Esquema módulo de calefacción



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 6. Componentes del módulo de calefacción

Componente	Descripción	Especificaciones
Calefactor Eléctrico	Tipo	Resistivo
	Diámetro	1.5"
	Longitud	35 Cm
	Tensión	AC 220 V
	Potencia	2 Kw

1.4 MÓDULO DE DISIPACIÓN DE CALOR

Función

Disipar el calor necesario para lograr un descenso en la temperatura del fluido de trabajo (agua) con la finalidad de analizar la respuesta del sistema con respecto a las perturbaciones de disipación de calor generadas a la masa de control del sistema térmico.

Requerimientos

Para conocer el comportamiento de un sistema térmico bajo diferentes condiciones de temperatura y disipación de calor, se proyectó el diseño del módulo de disipación de calor con los requerimientos mostrados en la tabla 7, estos están basados en análisis previos (módulo de disipación de calor, sección 2.4) que permiten observar cambios significativos en las variables del sistema generadas por las perturbaciones en la disminución de calor por efecto del control en el caudal de aire direccionado hacia el intercambiador, produciendo así un aumento en la transferencia de calor hacia el ambiente por medio de la convección forzada, esto en tiempos relativamente cortos que permiten al usuario una toma de datos rápida y cómoda.

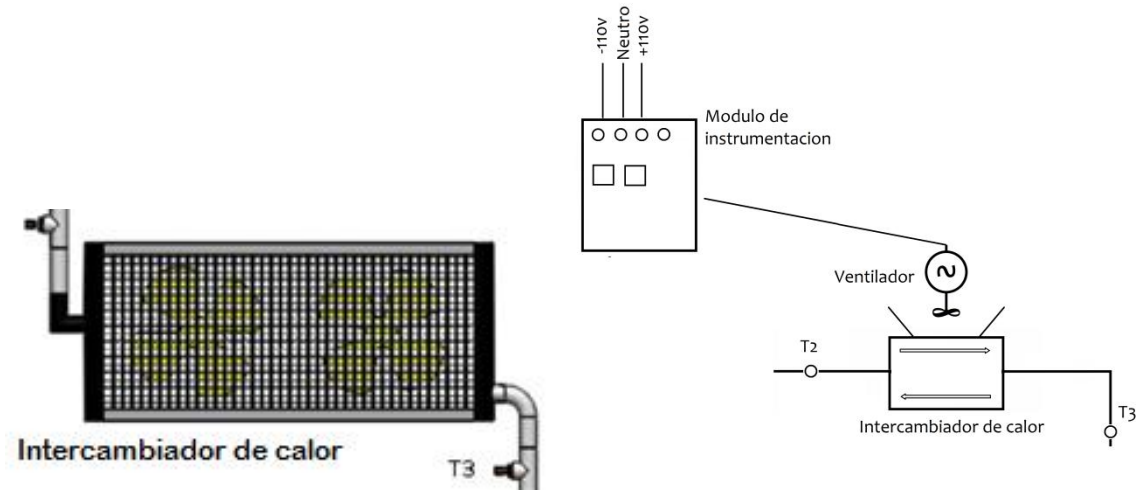
Tabla 7. Requerimientos para el módulo de disipación de calor

Requerimientos	Especificaciones
Tensión de alimentación	AC 110 V
Frecuencia	60 Hz
Coefficiente total de transferencia de calor	1.5 – 2 Kw/m².°C
Razón de transferencia de calor entre los fluidos	1000 - 2000 Kj

Componentes

Teniendo en cuenta los requerimientos mencionados, los componentes que conforman este módulo se observan en la tabla 8.

Figura 6. Esquema módulo de disipación de calor



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Componentes del módulo de disipación de calor

Componente	Descripción	Especificaciones
Intercambiador de calor	Compacto	De flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado.
	Coefficiente de transferencia	$U = 1.7 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Ventiladores	ELCO	N 18-30 / 1268
	Tensión	AC 110V
	Velocidad	1500 RPM
	Potencia	1/40 HP

1.5 MÓDULO DE INSTRUMENTACIÓN

Función

Realizar la medición de temperatura en cuatro puntos ubicados a la entrada y salida de los módulos de calefacción y disipación de calor en todo momento. Proporcionar la corriente eléctrica necesaria a los instrumentos de medición para

su correcto funcionamiento. Tener una interpretación, procesamiento de datos y comunicación con el usuario con una velocidad de adquisición suficiente, una facilidad de conexión y operación durante las prácticas.

Requerimientos

Para la aplicación de los distintos mecanismos de control que comandarán el banco de laboratorio, en donde se incluirán también la generación de perturbaciones al sistema, se necesitará de un dispositivo electrónico el cual será la unidad central de procesamiento del banco de laboratorio y que estará preparado para actuar de manera programada al recibir las señales digitales y analógicas de los instrumentos presentes en cada uno de los módulos del banco, con lo cual el usuario manipulará a su disposición las características más relevantes del sistema térmico.

Otro de los requerimientos principales del módulo de instrumentación es el uso imprescindible de un control de voltaje que pueda lograr una buena regulación de corriente alterna para la alimentación de los módulos encargados de la generación de perturbaciones por medio del suministro o disipación de calor, y que a su vez pueda ser integrado en un control PID el cual será comandado por medio de un ordenador.

Se requerirá también, para la representación precisa de la temperatura en cada uno de los cuatro puntos antes mencionados, un componente electrónico capaz de adecuar las señales eléctricas continuas en el tiempo que reciben los sensores de temperatura.

En la tabla 9. Se presentan los requerimientos mínimos para el funcionamiento del módulo de instrumentación.

Tabla 9. Requerimientos para el módulo de instrumentación

Requerimientos	Especificaciones
Sensores	Temperatura
Procesador de datos	Micro-controlador
Tensión de alimentación	AC 110 - 220 V
Frecuencia	60 Hz

Componentes

La medición de temperatura en el sistema se efectuará por medio de termocuplas, las cuales estarán conectadas a un módulo acondicionador de señales diseñado para termopares más conocido como FieldPoint quien proporcionará una señal de salida analógica acondicionada. Esta señal se llevará por medio de un cable de red al puerto serial de un computador que luego a través de las plataformas de desarrollo ARDUINO y LabView darán un tratamiento especial que permita determinar la temperatura del sistema en cualquier momento.

De igual manera se implementará el control de voltaje del sistema, siendo el acondicionador de señal una tarjeta de circuito impreso (módulo de instrumentación, sección 2.5) que recibirá directamente el flujo de corriente alterna, la cual al estar acompañada de un dispositivo semiconductor bidireccional capaz de conmutar la corriente alterna (Triac) y un micro-controlador integrado a una tarjeta de adquisición de datos comandada a través de los entornos de desarrollo, ejecutarán un método preciso para la regulación de voltaje AC por medio de ángulo de fase.

Teniendo en cuenta los requerimientos mencionados, los componentes que conforman este módulo se observan en la tabla 10.

Tabla 10. Componentes del módulo de instrumentación

Componente	Descripción	Especificaciones
Tarjeta de adquisición de datos	ARDUINO Micro-controlador Voltaje de operación	Due AT91SAM3X8E 3.3 V
Sensores de temperatura Adecuador de señal	Termocuplas Field Point	Tipo J NI FP-1601 NI FP-TC-120
Circuito impreso (PCB)	Regulador de AC Control de giro	Por ángulo de fase Puente H
Fuente de alimentación DC	Tensión In Tensión Out	AC 110 V DC 3.3 – 12 V
Panel de Control	Pulsadores Voltímetros Relé	Módulos On – Off Análogos Electro Mecánico

1.6 MÓDULO ESTRUCTURAL

Función

Soportar todos los componentes del banco de laboratorio, disminuir las vibraciones producidas por los componentes mecánicos, que permita la precisión y facilidad en la toma de datos durante las prácticas.

Requerimientos

El peso total de los componentes del banco de laboratorio, incluido el peso propio de la estructura es aproximado de 120 Kg.

Componentes

La estructura final del banco de laboratorio tendrá una altura máxima de 140 centímetros, una anchura de 60 centímetros y una profundidad de 40 centímetros

de longitud, volviéndolo una estructura fácil de ubicar y transportar dentro de las instalaciones del laboratorio.

Los componentes que conforman este módulo se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Componentes del módulo de transporte

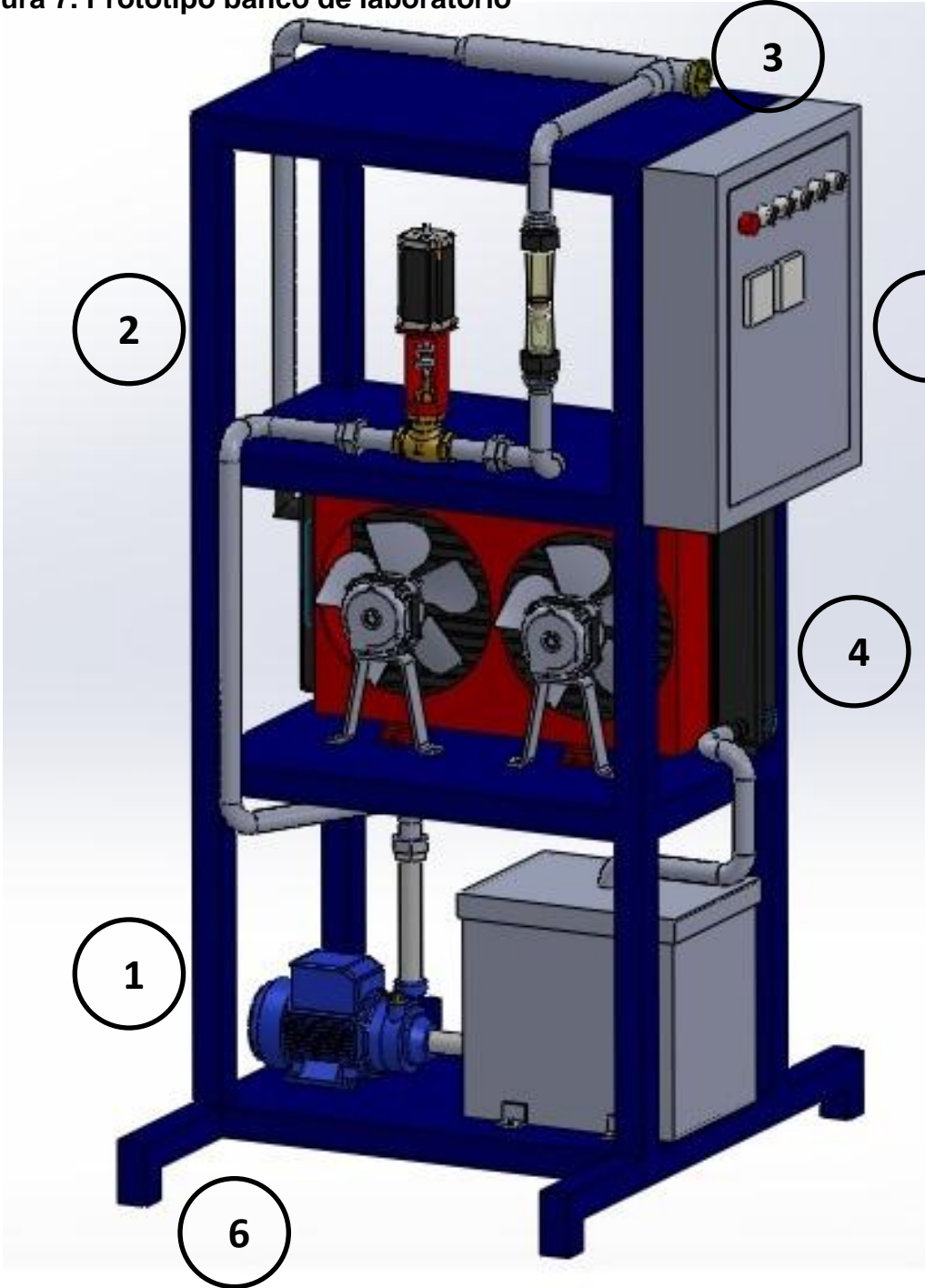
Componente	Descripción	Especificaciones
Perfiles	Acero	ANSI 1045
	Dimensiones	1.5 * 1.5 in²
Tableros	Acero	ANSI 1045
	Dimensiones	Calibre ¼"
Ruedas	Material	Caucho

1.7 CONCLUSIÓN

Una vez realizado el análisis conceptual se plantea el siguiente prototipo de un banco de laboratorio con sus respectivos componentes que conforman cada módulo tal como se muestra en la figura 7 donde se enumerarán de la siguiente manera:

1. Módulo de transporte
2. Módulo de regulación de flujo
3. Módulo de calefacción
4. Módulo de disipación de calor
5. Módulo de instrumentación
6. Módulo estructural

Figura 7. Prototipo banco de laboratorio



Fuente: autores del proyecto

2. DISEÑO DE DETALLE DE LOS MÓDULOS

En este capítulo se parte de la selección de algunos componentes que se realizó en el diseño conceptual, ahora se debe abordar el diseño y cálculo en detalle de cada uno de los componentes del banco por módulo: el módulo de transporte, el módulo de regulación de flujo, el módulo de calefacción, el módulo de disipación de calor, el módulo instrumental y el módulo estructural. El diseño de cada uno de estos módulos tendrá en cuenta las distintas interacciones con los demás módulos junto con las restricciones que cada uno de ellos impone.

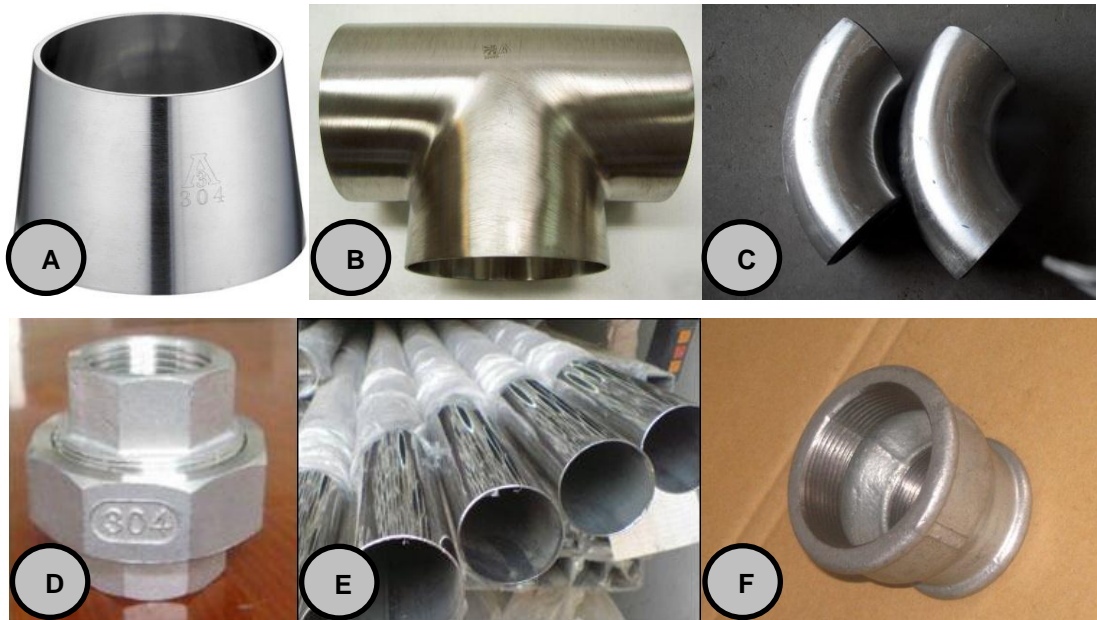
2.1 MÓDULO DE TRANSPORTE

En este módulo se realiza la selección de la tubería que transportará el fluido de trabajo a los componentes del banco de laboratorio, se decidirá las dimensiones y capacidad del tanque de almacenamiento y se escogerá el tipo de bomba centrífuga a utilizar en el banco de laboratorio.

2.1.1 Selección de la tubería La selección del diámetro de la tubería se hizo teniendo en cuenta la facilidad en la adquisición de muchos de los elementos y accesorios que compondrán a cada uno de los módulos del banco de laboratorio que manejan igual diámetro en el mercado local. Se tuvo en cuenta también la necesidad que utilizar un tipo especial de tubería la cual no permitiera la contaminación del fluido de trabajo debido a la oxidación con el tiempo de la misma, logrando así un fácil manejo del fluido, una mayor exactitud en la toma de datos del sistema térmico y un buen comportamiento dinámico del sistema. De

acuerdo a ello se optó por trabajar con una tubería sanitaria de acero inoxidable 304 de grado A3¹ de 1 pulgada de diámetro.

Figura 8. Tubería y accesorios del módulo de transporte



Fuente: Autores del proyecto

Por otra parte, algunos de los accesorios de la tubería a utilizar tuvieron que ser de materiales diferentes al seleccionado acero sanitario A3 debido a que ellos poseían gran tamaño, manejaban ciertos tipos de incompatibilidad con el resto de los componentes del banco de laboratorio, eran de difícil localización en el mercado y tenían un elevado costo. Por lo que se optó por utilizar elementos de materiales inoxidables no sanitarios, los cuales son de buena calidad y presentan características operacionales similares, a excepción del impecable acabado superficial exterior e interior de los elementos sanitarios, tal como es el caso de las uniones universales roscadas, (figura 8 E) que son necesarias para lograr un fácil

¹ Tubería sanitaria de acero inoxidable 304 de grado A3: Este tipo de tubería contiene altos niveles de Níquel y Molibdeno, para aumentar la durabilidad y la resistencia a la corrosión. Se caracteriza por estar pulida por dentro y por fuera, además de tener la apariencia de no tener costura. Mayor información ir al sitio web: http://www.diisa.net/tuberia_sanitaria_de_acero_inoxidable.html <http://www.aceroinoxidablesanitario.com.mx/pdf/Tuberia%20Sanitaria%20A270%20Esp.pdf>

montaje y desmontaje de la tubería en caso de cambios, reparaciones o mantenimientos; y de las reductoras de diámetro roscadas, (figura 8 F) que son utilizadas para ajustar en la tubería el instrumento de medición de caudal.

2.1.2 Diseño del tanque de almacenamiento Para un diseño acertado del tanque de almacenamiento, primero es necesario conocer el volumen de fluido de trabajo que se acumulará en cada uno de los antes mencionados accesorios y componentes de los módulos del banco de laboratorio. Se analizará por separado el intercambiador de calor y la parte superior del banco en donde se encuentra ubicado el calefactor eléctrico del resto de la tubería, puesto que ellos poseen una configuración geométrica diferente.

Tomando como referencia el prototipo expuesto en la figura 7 se tiene tubería de 42 centímetros de longitud y diámetro 1.5 pulgadas en el lugar donde se alojará el calefactor eléctrico, y tubería de 400 centímetros de longitud y diámetro 1 pulgada para el resto del sistema de transporte, dentro de los cuales se incluyó la longitud de los componentes y accesorios del banco que poseían igual diámetro. Para el intercambiador de calor compacto se tienen 32 tubos de 48 centímetros de longitud y diámetro 0.25 pulgadas los cuales se encuentran acompañados de dos cámaras rectangulares de base cuadrada en los extremos laterales que determinan la altura total del mismo.

- Tubería y accesorios

$$V = L * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$V = \left[400 \text{ cm} * \pi * \left(\frac{1 \text{ in}}{2} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}}\right)^2 \right] + \left[42 \text{ cm} * \pi * \left(\frac{1.5 \text{ in}}{2} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}}\right)^2 \right]$$

$$V = 2500 \text{ cm}^3 \cong 2.5 \text{ litros}$$

- Intercambiador de calor compacto

$$V = L * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 ; V = h * b^2$$

$$V = 32 * \left[48 \text{ cm} * \pi * \left(\frac{0.25 \text{ in}}{2} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}}\right)^2 \right] + 2 * [30 \text{ cm} * (4.3 \text{ cm})^2]$$

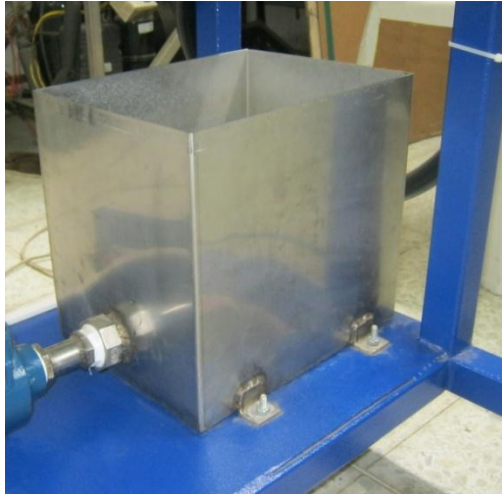
$$V = 1600 \text{ cm}^3 \cong 1.6 \text{ litros}$$

De acuerdo a los anteriores cálculos en todo el sistema se almacenarán aproximadamente 4.1 litros de fluido de trabajo. Teniendo en cuenta que el tanque de almacenamiento nunca podrá estar vacío pues eso significaría que la bomba centrífuga no tendría un volumen de fluido a transportar lo que en corto tiempo llevaría a un daño inmediato de la misma, se decidió duplicar la capacidad de almacenamiento hasta 8.2 litros. Considerando que el tanque también puede actuar como amortiguador de temperatura al mantener constante en el tiempo cierto rango de temperatura a la entrada del sistema, se decidió volver a duplicar su capacidad hasta los 16.5 litros. Finalmente se utilizará cuatro veces la cantidad de fluido que se puede mantener dentro del sistema para obtener un buen comportamiento dinámico en las prácticas de laboratorio.

En definitiva el tanque de almacenamiento se construirá de material inoxidable, luego para evitar que permanezca a capacidad máxima, que no ocurran derrames de fluido y que pueda tener una fácil instalación en la estructura del banco de laboratorio, se aumentarán y manipularán sus dimensiones a conveniencia de la siguiente manera.

$$V = 23 \text{ cm ancho} * 28 \text{ cm alto} * 27 \text{ cm profundo} = 17,4 \text{ L}$$

Figura 9. Tanque de almacenamiento



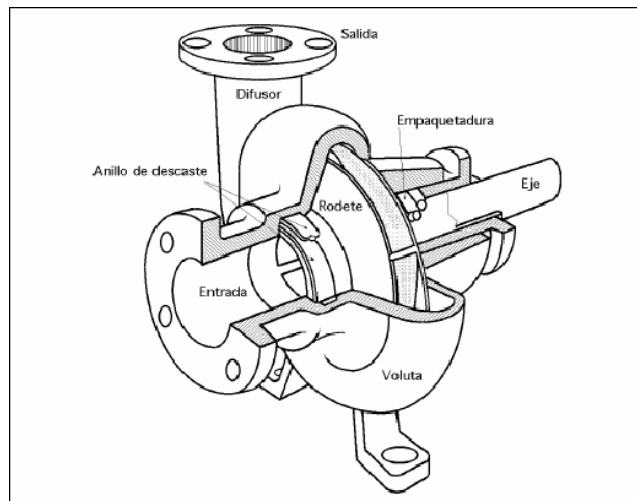
Fuente: autores del proyecto

2.1.3 Selección de la bomba La bomba centrífuga o también llamada rotodinámica, será el componente mecánico utilizado para generar el desplazamiento del fluido de trabajo a través de la tubería del sistema térmico. Se optó por este tipo de bomba en especial debido a que son recomendadas para el manejo de fluidos limpios y livianos, de baja densidad relativa y baja viscosidad que no contenga partículas abrasivas y/o líquidos químicamente agresivos para los materiales que constituyen la bomba, lo que la hace perfecta para su implementación en el banco de laboratorio.

Las bombas rotodinámicas son máquinas hidráulicas que se encargan de transformar la energía mecánica en energía cinética (caudal), y luego en energía de presión (altura de elevación) mediante un principio de funcionamiento que consiste en que el fluido de trabajo entre por la tubería de aspiración de la bomba axialmente hacia el centro de un elemento móvil denominado rodete o impulsor, el cual está girando accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba. El rodete dispone de unas canalizaciones denominadas alabes en forma de aspas radiales por las que el fluido de trabajo es canalizado experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando

de axial a radial desde el centro hasta su borde, donde luego es expulsado. Durante este trayecto el fluido es acelerado por la fuerza centrífuga generada por el rodete, saliendo del mismo con presión y velocidad. Cabe resaltar que este movimiento centrífugo provoca, al mismo tiempo, una depresión capaz de aspirar el fluido que se debe bombear; A continuación el fluido entra en una canalización en forma de espiral que rodea al rodete llamada voluta o caracol. El fluido que entra en esta conducción a gran velocidad, es frenado por el progresivo aumento de su sección, tal como establece la ecuación de Bernoulli, incrementando la presión, que tenía a la salida del rodete, hasta un valor concreto en la tubería de impulsión o de salida (ver figura 10).

Figura 10. Perspectiva de una bomba centrífuga



Fuente: www.wikipedia.com

Debido a que el banco de laboratorio no manejará cargas considerables, se necesitará de una bomba de baja potencia que maneje un amplio rango de caudales aptos para un posterior control de los mismos.

Del catálogo Pedrollo se selecciona la bomba de referencia PKm 60 que se muestra en la figura 11 con sus respectivas especificaciones expuestas en la tabla 12. Esta bomba pertenece al conocido grupo de electrobombas periféricas, así

llamadas porque en la periferia del rodete han sido aplicadas numerosas aspas radiales, que se encargan de ceder energía al fluido bombeado. El apropiado perfil de las aspas confiere al fluido en entrada a la bomba un movimiento veloz de recirculación radial entre las aspas del rodete y la doble ranura situada a ambos lados de éste en el cuerpo bomba. Puesto que cada una de las numerosas aspas contribuye a ceder energía, la presión del fluido aumenta gradualmente, durante su recorrido desde la boca de aspiración a la de impulsión, asegurando por otra parte un flujo regular sin ser intermitente y, por otra parte, elevadas presiones y curvas particularmente inclinadas.

Para mayor información se pueden mirar las curvas de funcionamiento de la bomba en el anexo A.

Figura 11. Bomba centrífuga del módulo de transporte



Fuente: <http://www.pedrollo.com>

Tabla 12. Especificaciones bomba Pedrollo PKm 60

Componente	Descripción	Especificaciones
Bomba	Tipo	Centrifuga
	Rodete	Periférico
	Potencia	0.5 HP
	Caudal	5 – 40 L/Min
	Altura (Max – Min)	38 – 5 m
	Diámetro (In – Out)	1”
	Tensión de alimentación	110 V

Fuente: <http://www.pedrollo.com>

2.2 MÓDULO DE REGULACIÓN DE FLUJO

Una de las variables que tiene gran influencia en el comportamiento de un sistema térmico es el caudal, ya que con la regulación de la cantidad de fluido que pasa por cada uno de los módulos del banco de laboratorio se puede aumentar o disminuir la transferencia de calor por convección en los componentes del sistema que trabajan con intercambios de energía térmica. Por tal motivo se hace evidente que el sistema debe contar con un elemento que permita controlar el caudal del fluido de trabajo para la generación de perturbaciones, posibilitando así el desarrollo de un control sobre la variable temperatura en un punto determinado del sistema. Por otra parte una de las características que debe cumplir este elemento es que pueda ser manipulado por medio de un dispositivo electromecánico a través de ya sea; señales digitales o analógicas, enviadas por un micro controlador (módulo de instrumentación, sección 2.5).

De acuerdo a lo anterior en este módulo se seleccionará el elemento que mejor cumple las características antes mencionadas para una regulación de caudal efectiva en el sistema, el cual será una válvula manual, ya que este dispositivo encargado de la estrangulación de flujo permitirá el paso de determinada cantidad

de fluido de trabajo por medio del giro repetido de un vástago. Ahora el elemento electromecánico que accionará dicha válvula tiene que ser un motor eléctrico paso a paso que suministre el suficiente torque para lograr girar el vástago de la válvula y pueda ser capaz de interpretar las señales eléctricas enviadas desde un micro controlador integrado a una tarjeta de adquisición de datos donde está programado el algoritmo del control automático PID.

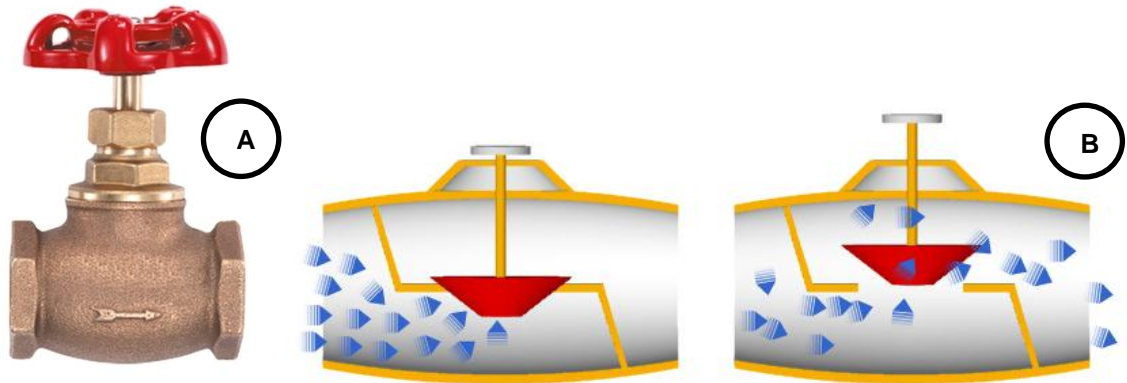
2.2.1 Selección de la válvula reguladora de caudal Su función en este módulo será el control del caudal suministrado por la bomba centrifuga por medio de la estrangulación del fluido de trabajo. La válvula seleccionada es una válvula de globo (figura 12 A) la cual se puede utilizar para el control del caudal y para el control abierto-cerrado (on - off) por lo que permite la regulación de fluidos y dependiendo del tipo de asiento ocasionará un cierre hermético.

En este tipo de válvula, debido a que la vía de circulación es en forma de 'S' (figura 12 B) el fluido entra y sube dentro del cuerpo de la válvula y es estrangulado por el émbolo según la abertura o cierre del tapón, el fluido hace un movimiento de columpio donde choca con el émbolo que regula el paso del fluido, de tal manera que el control del caudal está determinado no por el tamaño de la abertura en el asiento de la válvula, sino por el levantamiento del tapón de la válvula, lo que también causa una caída de presión mayor que el de otros tipos de válvulas.

Debido a que el vástago de la válvula debe ser accionado en numerosas ocasiones con el fin de abrir y cerrar la válvula, hay una tendencia a fugar por la glándula de sello. Además, dado que cerrar la válvula requiere accionar el vástago hasta que el tapón presione firmemente hacia abajo en el asiento, es difícil saber el punto exacto en el que la válvula está totalmente cerrada. De acuerdo a ello se optó por acoplar un motor paso a paso de alto torque que permita el movimiento seguro del vástago de manera automática en la posición que entregue el caudal

deseado por el usuario para realizar las diferentes pruebas del banco de laboratorio.

Figura 12. Válvula de globo



Fuente: <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-valves.html>

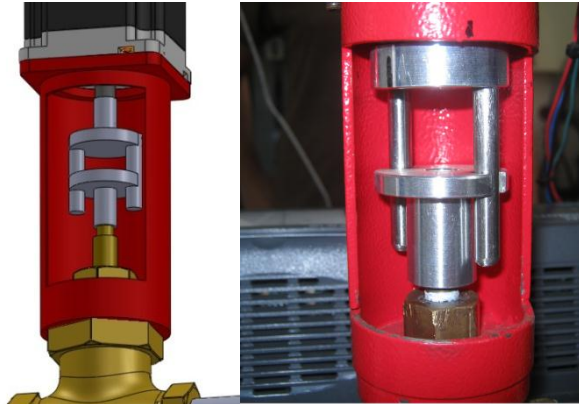
Tabla 13. Especificaciones válvula de globo

Componente	Descripción	Especificaciones
Válvula	Tipo Material Conexión Diámetro (In – Out) Aplicaciones	Globo Bronce Roscada NPT 1 Pulg. Agua

2.2.2 Selección motor pasó a paso A través de un acople de piezas mecanizadas en acero inoxidable de ajuste forzado y asegurado por medio de tornillos (Figura 13), el dispositivo electromecánico que comandará la válvula reguladora de caudal, será un motor paso a paso bipolar, este dispositivo consiste en un motor conformado por dos bobinas y su funcionamiento se basa en convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que tiene la capacidad generar una serie de pasos en grados dependiendo de sus entradas de control. Estos pasos puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8°, es decir, que se necesitan 4 pasos

en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360°.

Figura 13. Acople válvula – motor



Fuente: autores del proyecto

Para controlar el movimiento del motor en dicha serie de pasos, se requiere de un cambio en la dirección del flujo de corriente que circulará a través de las bobinas en una secuencia apropiada. Es decir que por cada inversión en la polaridad, tal como lo muestra la tabla 14 se provocará el movimiento del eje en pasos con igual sentido de giro determinados por la secuencia antes seguida, de forma tal que esto se repetirá determinado número de veces hasta llegar a la posición deseada.

Tabla 14. Secuencia de paralización de las bobinas de un motor paso a paso.

		Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4
Bobina A	Terminal 1	Vcc +		Vcc -	
	Terminal 2	Vcc -		Vcc +	
Bobina B	Terminal 3		Vcc +		Vcc -
	Terminal 4		Vcc -		Vcc +

Fuente: Autores del proyecto

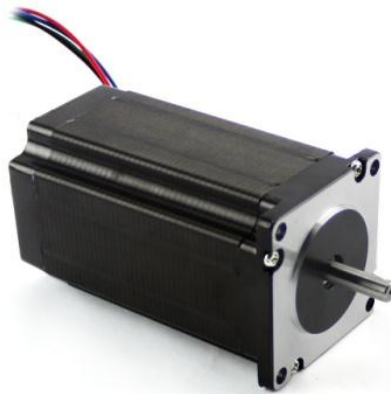
Cabe resaltar que un motor paso a paso se comporta de la misma forma que un convertor digital-analógico que puede ser gobernado por impulsos procedentes de sistemas lógicos.

Por otra parte este tipo de dispositivo tiene la ventaja de tener alta precisión y repetibilidad en cuanto al posicionamiento, ya que al estar en conjunto con un circuito puente H y un micro controlador integrado a una tarjeta de adquisición de datos se logra un giro en ambas direcciones a velocidad variable, haciéndolo un complemento ideal no solo para la abertura y cierre de la válvula reguladora tipo globo, sino que también para el posicionamiento de la válvula en un punto donde se obtendrá el caudal deseado por el usuario.

El motor paso a paso seleccionado es de referencia NEMA23 570oz/in 5A 1/4" Dual Shaft, seleccionado teniendo en cuenta su torque máximo de 4N-m suficiente para hacer mover de manera fácil la válvula reguladora tipo globo.

Para mayor información revisar el anexo B.

Figura 14. Motor paso a paso



Fuente: <http://www.automationtechnologiesinc.com>

Tabla 15. Especificaciones motor paso a paso

Componente	Descripción	Especificaciones
Motor	Tipo	Paso a Paso
		Bipolar
	Tensión	12V DC
	Corriente	5A
	Torque	570 Oz-In (4 N-m)
	Pasos por revolución	1.8° / 200
	Eje	1/4 pulg.

Fuente: <http://www.automationtechnologiesinc.com>

2.2.3 Rotámetro Permite leer las variaciones de caudal de acuerdo a la apertura o cierre de la válvula reguladora de caudal tipo globo la cual es accionada por medio de un motor paso a paso bipolar que a su vez es manipulado por un micro controlador programado por el usuario. Se seleccionó un rotámetro marca Hedland H629-016-R EZ recomendable para uso en sistemas que manejan agua sin sedimentos con un rango de medida de 1 - 16 Gal/Min (4 - 60 L/min), aproximadamente parecido al rango de caudales suministrados por la bomba centrifuga del módulo de transporte. Este elemento tiene una conexión universal de rosca macho NPT de 1 pulgada lo cual lo hace perfecto para su instalación en la tubería del módulo de transporte.

Figura 15. Rotámetro



Fuente: <http://www.hedland.com>

2.3 MÓDULO DE CALEFACCIÓN

Una de las partes fundamentales del sistema térmico es el módulo de calefacción, ya que es la parte del banco de laboratorio encargada de suministrar calor al fluido de trabajo, por consiguiente este calor será manipulado por medio de mecanismos lógicos para la generación de perturbaciones y a su vez para el control mismo de temperatura.

El sistema de calefacción está conformado principalmente por un calefactor eléctrico de inmersión, el cual es un dispositivo diseñado para hacer circular una corriente eléctrica a través de un conductor con la finalidad de liberar calor, el cual es luego transmitido por conducción al fluido de trabajo con quien se encuentra en contacto directo. Cabe resaltar que si se regula la cantidad de corriente que pasa por el calefactor, se podrá controlar el aumento de calor en el dispositivo de manera que le permita al usuario generar un cambio térmico significativo en las condiciones de trabajo del sistema.

2.3.1 Selección del calefactor eléctrico Un calefactor eléctrico es un dispositivo que genera energía calórica a partir de la energía eléctrica. El tipo más común y el empleado en este módulo es el calefactor eléctrico resistivo, el cual produce calor proporcionalmente al cuadrado de la corriente eléctrica que fluye a través de él, esto según la "Ley de Joule".

Los materiales conductores como los metales y aleaciones no son conductores perfectos, ya que tienen cierta resistividad eléctrica al paso de la corriente eléctrica, en muchos casos la resistividad es una desventaja cuando se requiere transportar energía eléctrica, pero es muy oportuna cuando se busca la generación de calor.

Como se ha comprobado, los metales aumentan ligeramente su resistencia al aumentar el calor, pero en cuanto esta resistencia sobrepasa su umbral de temperatura tiende a perder conductividad incrementando altamente la disipación de calor al medio que lo rodea. Como resultado se puede afirmar que los metales se comportan como resistencias y termostatos, ya que permiten el paso de corriente cuando están fríos y dejan de conducirla al calentarse. Para evitar que se funda el metal conductor, hay que transferir el calor generado, es por eso que para mejorar esa transmisión térmica, en general los calefactores tienen un gran área o superficie de contacto con el medio que les rodea.

Para el banco de laboratorio se ha seleccionado un calefactor eléctrico tubular de inmersión con racor roscado de 2KW de potencia y alimentación AC 220V. Este elemento ofrece grandes características térmicas, eléctricas, y mecánicas, está compuesto por una funda o tubo de cobre plegado en U con una masa cerámica eléctricamente aislante y altamente comprimida en la cual está incrustada una resistencia de hilo, que no es más que un alambre conductor de aleación níquel – cromo por donde fluye la corriente y se genera el calor, el cual luego calienta por conducción al cerámico y este posteriormente al metal exterior (cobre) que se encuentra en contacto directo con el agua; finalmente es soldado en un racor roscado de diámetro 1,5 pulgadas preparado de manera especial para su fijación en la tubería del sistema.

Para evitar el daño prematuro del calefactor eléctrico es indispensable que esté se encuentre sumergido total y constantemente en el fluido a calentar, buscando así proteger el calentador del riesgo de recalentamiento y, por consecuencia, de un eventual daño precoz del mismo.

Dado que todo el calor se genera dentro del líquido, se alcanza un rendimiento energético máximo y al no existir elementos distorsionadores, el control de la temperatura de proceso puede ser muy ajustado.

Cabe resaltar que tanto la transferencia de calor por convección como por conducción, son proporcionales a la diferencia de temperatura ΔT entre los medios en los que fluye el calor, por tanto la potencia total disipada en cada instante será:

$$P = I * V = 9A * 220V \approx 2000 \text{ watts} \quad \text{Entonces, sabiendo que } V = I * R \text{ resulta}$$
$$P = I^2 * R \quad \text{"Ley de Joule"}$$

A razón de esto, la energía entregada por el circuito en un lapso de 15 minutos (tiempo aproximado en llegar a la máxima temperatura del sistema) será:

$$W = V * I * t = 220V * 9A * 15min * \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 1782000 \text{ J} \approx 1782 \text{ KJ}$$

Si aplicamos la fórmula para saber la cantidad de calor que se ha trasferido al agua, obtenemos:

$$\Delta Q = m * C_v * \Delta T = 16,5kg * 4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} * (50 - 25)^\circ C = 1726725 \text{ J} \approx 1727 \text{ KJ}$$

Esto quiere decir que no toda la energía eléctrica ha pasado a energía calorífica en el agua y que el rendimiento de la energía entregada al agua respecto a la consumida ha sido del 97%.

Figura 16. Calefactor eléctrico de inmersión con racor roscado



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 16 Especificaciones calefactor eléctrico

Componente	Descripción	Especificaciones
Calefactor eléctrico	Tipo	Resistivo
	Tensión	AC 220V
	Corriente	9A
	Potencia	2000 W
	Longitud	35 Cm
	Material	Cobre

Fuente: Autores del proyecto

2.4 MÓDULO DE DISIPACIÓN DE CALOR

El módulo de disipación de calor es el segundo módulo más importante del banco de laboratorio ya que es el encargado de disipar el calor que suministra el módulo de calefacción al fluido de trabajo, sin él la temperatura tendería a seguir aumentando cada vez más y sería imposible lograr un control preciso sobre ella, por tanto se hace evidente que habrá que manipular diferentes dispositivos por medio de mecanismos lógicos para el control adecuado de dicha disipación, lo que a su vez le permitirá al usuario generar perturbaciones al sistema térmico y el control mismo de la temperatura.

El sistema de disipación de calor está conformado principalmente por un intercambiador de calor compacto, el cual es un dispositivo diseñado para hacer circular el fluido de trabajo a través de una serie de tubos paralelos con la finalidad de facilitar el intercambio y la disipación de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes evitando que se mezclen entre sí. En este caso el fluido de trabajo, calentado por medio de un calefactor eléctrico, intercambiará calor al medio ambiente mediante convección forzada gracias a la acción de dos ventiladores de corriente alterna encargados de suministrar un caudal constante de aire que fluye a través del intercambiador, y a su vez, reduce

la temperatura del fluido que llegará de nuevo al calefactor, evitando así un aumento paulatino en la temperatura.

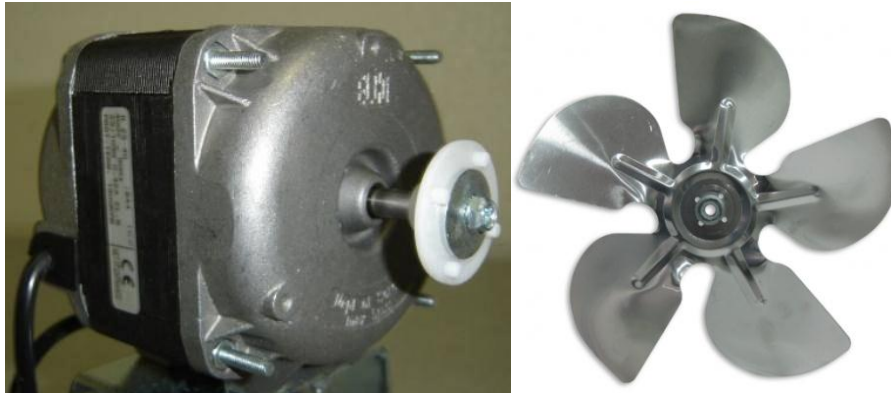
2.4.1 Ventiladores Un ventilador es una máquina de fluido concebida para producir una corriente de aire direccionada, la cual es resultado de una leve diferencia de presiones por el giro repetido de un rodete con aspas que es comandado por la acción de un motor eléctrico de baja potencia. Entre sus aplicaciones se utiliza para asistir mayormente a intercambiadores de calor compactos con la finalidad de aumentar la transferencia de calor entre un fluido y el aire o entre dos fluidos que interactúan, es decir ayudar a incrementar la razón de transferencia de calor entre dos fluidos mediante convección forzada.

Se sabe que el calor se transfiere del radiador hacia el aire circundante más frío y que llega el momento en que el radiador se enfriará por completo. También se sabe que el radiador se enfría más rápido si se pone a funcionar el ventilador a una velocidad más alta. Por lo tanto es por medio de las rpm del motor que se puede manipular qué tanto calor se disipará en el sistema.

De acuerdo a lo anterior, se seleccionó un ventilador que consta de una hélice con cinco aspas echas en acero inoxidable. La hélice es impulsada por un motor eléctrico de inducción marca Elco de referencia N18-30/1268, 1/40 HP de potencia y velocidad 1500 rpm.

Para mayor información revisar el anexo C.

Figura 17. Ventilador



Fuente: www.mcsp.es

Tabla 17. Especificaciones ventilador

Componente	Descripción	Especificaciones
Calefactor eléctrico	ELCO	N 18-30 / 1268
	Tensión	AC 110 – 127 V
	Corriente	1A
	Velocidad	1500 RPM
	Potencia	1/40 HP
	Caudal	0,3 m ³ / seg

2.4.2 Selección del intercambiador de calor 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. El tipo más común y el empleado en este módulo es el intercambiador de calor compacto o radiador, el cual está diseñado específicamente para lograr una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen.

Los intercambiadores compactos permiten lograr razones elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño y son de uso común en aplicaciones con limitaciones estrictas con respecto al peso y el

volumen de esos aparatos, haciéndolo ideal para un implementación en el banco de laboratorio.

La gran área superficial en los intercambiadores compactos se obtiene sujetando placas delgadas o aletas corrugadas con poco espacio entre sí a las paredes que separan los dos fluidos. Los intercambiadores compactos son de uso común en la transferencia de calor de gas hacia líquido o líquido hacia gas, para contrarrestar el bajo coeficiente de transferencia de calor asociado con el flujo de gases mediante una mayor área superficial. Por ejemplo, en el radiador a utilizar es del tipo compacto de agua hacia aire, no causa sorpresa que las aletas se encuentren sujetas en el lado del aire de la superficie del tubo.

En los intercambiadores compactos los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre sí y a esa configuración de flujo se le conoce como flujo cruzado, el cual todavía se clasifica más como flujo no mezclado en virtud de que las aletas de placa fuerzan al fluido a moverse por un espaciado particular entre ellas e impiden su movimiento en la dirección transversal (es decir, paralelo a los tubos).

En un intercambiador de calor compacto 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 la 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.

Para el análisis acertado de un intercambiador de calor, en la práctica nos podemos encontrar en la posición ya sea de seleccionar uno que logre un cambio

de temperatura específica de una corriente de fluido de gasto de masa conocido, o bien, de predecir las temperaturas de salida de las corrientes de fluido caliente y del frío en un intercambiador de calor específico. De acuerdo a ello se exponen los dos métodos usados en el análisis de los intercambiadores de calor. De éstos, el de la diferencia media logarítmica de temperatura (o LMTD) es el más apropiado para la primera tarea y el método de la efectividad-NTU, para la segunda, como se acaban de describir. Pero, en primer lugar, se presentan algunas consideraciones generales. 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. Como tales, el gasto de masa de cada fluido permanece constante y las propiedades de los fluidos, como la temperatura y la velocidad, en cualquier entrada o salida, siguen siendo las mismas. Asimismo, las corrientes de fluido experimentan poco o ningún cambio en sus velocidades y elevaciones y, como consecuencia, los cambios en la energía cinética y en la potencial son despreciables. En general, el calor específico de un fluido cambia con la temperatura; pero, en un intervalo específico de temperaturas, se puede considerar como una constante en algún valor promedio, con poca pérdida en la exactitud. La conducción axial de calor a lo largo del tubo suele ser insignificante y se puede considerar despreciable. Por último, se supone que la superficie exterior del intercambiador de calor está perfectamente aislada, de modo que no se tiene pérdida de calor hacia el medio circundante y cualquier transferencia de calor sólo ocurre entre los dos fluidos.

Con estas suposiciones, la primera ley de la termodinámica 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,

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_{out} - T_{in})$$

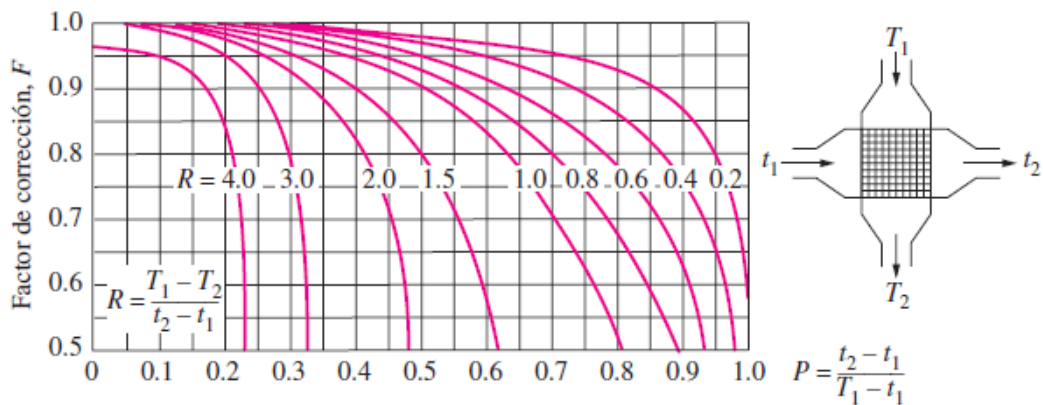
Por otra parte la razón de la transferencia de calor en un intercambiador también se puede expresar de una manera análoga a la ley de Newton del enfriamiento como

$$\dot{Q} = U * A_s * F * \Delta T_m$$

Donde U es el coeficiente total de transferencia de calor, A_s el área superficial de transferencia de calor, F es el factor de corrección, el cual depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes de fluido caliente (h) y frío (c), tal como se muestra en la figura 17.

$$P = \frac{T_{h,out} - T_{h,in}}{T_{c,in} - T_{h,in}} \quad R = \frac{T_{c,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{h,in}}$$

Figura 18 Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado



Fuente: Yunus A. Cengel

Finalmente ΔT_m es la diferencia de temperatura media logarítmica, que es la forma apropiada de la diferencia de temperatura promedio que debe usarse en el análisis de los intercambiadores de calor.

$$\Delta T_{ml,cf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{Ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

En donde:

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

De acuerdo a lo anterior y siguiendo el método de la LMTD se seleccionó un radiador estándar para aplicaciones automotrices marca KAITEN, que se muestra en la figura 19, con especificaciones técnicas expuestas en la tabla 2.7, y que según el cálculo a continuación es capaz de disipar una cantidad de calor similar a la entregada por el calefactor eléctrico de inmersión - 1782 KJ (sección 2.4).

Figura 19 Intercambiador de calor compacto



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 18 Especificaciones intercambiador de calor compacto

Componente	Descripción	Especificaciones
Intercambiador de calor	Compacto	De flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado.
	Coefficiente de transferencia	$U = 1.7 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
	Tubos	32 con diámetro 1/4 pulg.
	Dimensiones	50cm x 30cm x 5cm

Fuente: Autores del proyecto

Entonces:

$$\dot{Q} = U * A_s * F * \Delta T_{ml,cf}$$

$$A_s = n * \pi * D * l$$

$$A_s = 32 * \pi * \left(\frac{1}{4} \text{ pulg} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulg}} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) * 0,45 \text{ m} = 0,287 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{T_{h,out} - T_{h,in}}{T_{c,in} - T_{h,in}} = \frac{25^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}} = \frac{5}{6} = 0,833$$

$$\rightarrow F = 0,615 \quad (\text{figura 2.11})$$

$$R = \frac{T_{c,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{h,in}} = \frac{20^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}{25^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}} = \frac{4}{5} = 0,8$$

$$\Delta T_{ml,cf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\text{Ln} \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\text{Ln} \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right)}$$

$$\Delta T_{ml,cf} = \frac{(50^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) - (25^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{\text{Ln} \left(\frac{50^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}{25^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}} \right)} = \frac{5^\circ\text{C}}{\text{Ln}(2)} = 7,21^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = \left(1,7 \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) * (0,287 \text{ m}^2) * (0,615) * (7,21^\circ\text{C}) = 2,16 \text{ Kw}$$

$$Q = \dot{Q} * t = (2,16 \text{ Kw}) * \left(15 \text{ min} * \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \right) = 1947 \text{ KJ}$$

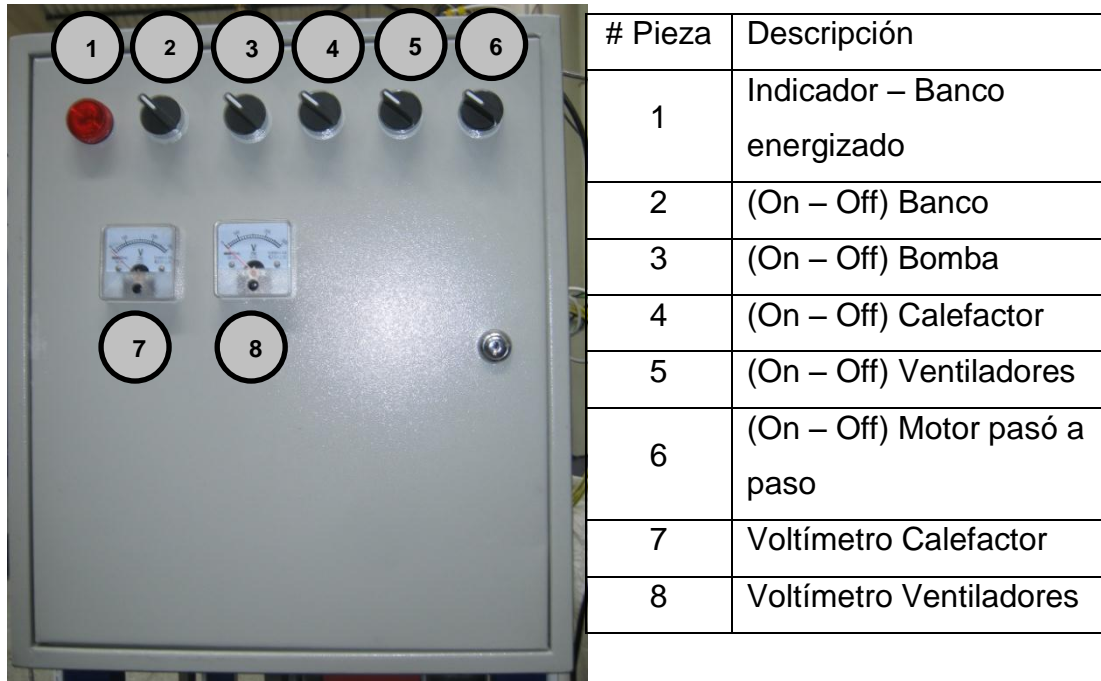
2.5 MÓDULO DE INSTRUMENTACIÓN

En este módulo estarán ubicados tanto los componentes encargados de realizar todos los tipos de controles para la generación de perturbaciones, toma de datos y temperatura del banco de laboratorio, como las adecuaciones eléctricas para el suministro y regulación de corriente a los diferentes elementos que componen cada uno de los módulos. Entre ellos están cables, relés electromecánicos, interruptores, tarjetas de circuito impreso, elementos electrónicos de control, adecuadores de señales, fuentes de alimentación y un potente micro controlador integrado a una tarjeta de adquisición de datos. Todos estos componentes estarán interconectados, de manera que formen un solo circuito general que a su vez estará montado en un gabinete eléctrico totalmente aislado de la estructura, garantizando así la seguridad del usuario.

2.5.1 Panel de control Este panel es el encargado de la manipulación del banco de laboratorio, ya que permite la energización del sistema a 110V y 220V gracias a una conexión eléctrica bifásica trifilar y con ello la puesta en marcha de cada uno de los elementos que componen a los módulos del banco, tal como la bomba centrífuga, el calefactor eléctrico, los ventiladores y el motor paso a paso.

En la figura 20 se presenta la distribución de los pulsadores de energización y accionamiento del sistema, se muestra también la ubicación de dos indicadores análogos de voltaje, uno para el calefactor eléctrico y otro para los ventiladores de radiador, esto debido a que dichos elementos son muy influyentes para el cambio en las variables del sistema térmico, por lo que se encuentran sometidos a una constante regulación de voltaje, es por ello que necesitan ser monitoreados en todo momento para una predicción adecuada del comportamiento del sistema. Por otra parte estos elementos manejan voltajes elevados de operación y por precaución es necesario conocer sus valores para así evitar todo tipo de accidentes eléctricos.

Figura 20. Panel de control



Fuente: Autores del proyecto

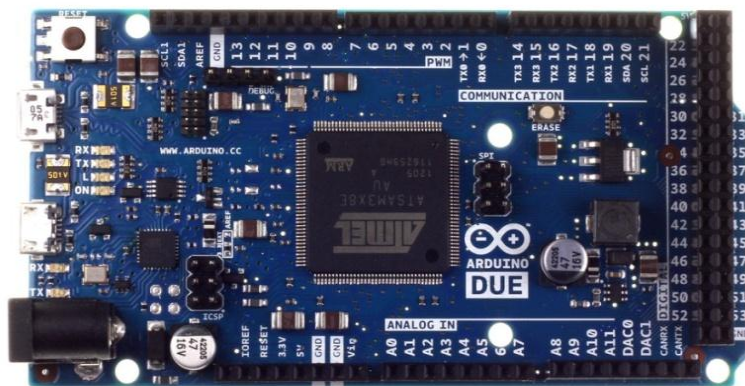
2.5.2 Selección del micro-controlador Un micro-controlador es un circuito integrado programable con la capacidad de ejecutar algoritmos grabados en su memoria, y de esta forma ejecutar una serie órdenes tales como procesar datos, encender o apagar elementos electrónicos, leer, interpretar y suministrar señales eléctricas, digitales o analógicas, entre otras cosas. Por tal motivo este componente es fundamental tanto para el control eléctrico de muchos componentes del banco de laboratorio, como para la aplicación de un control automático PID.

De acuerdo a ello el micro-controlador que se escogió fue un AT91SAM3X8E integrado en una tarjeta de adquisición de datos Arduino DUE. Esta consiste en una placa de circuito impreso diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios ya que se programa de manera simple con un lenguaje de programación ARDUINO basado en Wiring y maneja un entorno de

desarrollo ARDUINO basado en Processing. Posee varios puertos de entrada y salida de datos por medio de los cuales puede tomar información de su entorno a través de toda una gama de sensores, además puede también afectar aquello que lo rodea mediante el control de motores o actuadores. Por último hay que añadir que Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar, además tiene una gran ventaja sobre otros controladores de interfaz periféricos, ya que tanto el software y hardware son de uso libre y no requieren de algún tipo de licencia para su uso. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos.

La placa Arduino DUE se muestra en la figura 21.

Figura 21. Arduino Due



Fuente: <http://arduino.cc/>

Tabla 19. Descripción Arduino DUE

Componente	Descripción	Especificaciones
Tarjeta de adquisición de datos	ARDUINO	Due
	Micro-controlador	AT91SAM3X8E
	Voltaje de operación	3.3 V
	Voltaje de entrada	7 – 12 V
	Entradas y salidas pins	54 (12 de salida PWM)
	Entradas analógicas	12
	Salidas analógicas	2 (DAC)
	Memoria Flash	512 KB
	Rapidez de reloj	84 HZ

2.5.3 Termocuplas Entre los distintos tipos de sensores existentes para medir temperatura, el que mejor se adaptó a las condiciones de trabajo del banco de laboratorio fueron las termocuplas ya que son capaces de medir un amplio rango de temperatura, son de fácil adquisición, económicas, intercambiables y poseen una amplia gama de conectores estándar, sin embargo su principal limitación yace en la exactitud de su medida, ya para medir valores menores a un grado Celsius presenta errores.

En sí, un termopar o termocupla es un dispositivo de estado sólido que se utiliza para convertir la energía en voltaje, está formado por la unión en uno de sus extremos de dos conductores de metales o aleaciones de metales distintos que producen un voltaje, el cual es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro anoterno "punto frío" o unión fría o de referencia.

El tipo de material del cual se fabrica el termopar define el tipo de termocupla, así que para el banco de laboratorio escogió una termocupla tipo J (Hierro / Constantán) la cual tiene un rango de utilización de -270/+1200°C. Debido a sus características es recomendada para su uso en atmósferas inertes, reductoras o

en vacío, su uso continuado a 800°C no presenta problemas, su principal inconveniente es la rápida oxidación que sufre el hierro por encima de 550°C y por debajo de 0°C, es necesario tomar precauciones a causa de la condensación de vapor de agua sobre el hierro.

Para su implementación en el banco de laboratorio, el punto caliente de la termocupla fue empaquetada en un bulbo que le permitirá un acople estable a la tubería por medio de un conjunto bushin – racor. ver figura 22.

Figura 22. Termocupla con bulbo



Fuente: Autores del proyecto

2.5.4 Selección del Adecuador de señal El funcionamiento básico de una termocupla consiste en enviar una señal de voltaje que representa el valor de temperatura medido en ese instante. Dicha señal de voltaje es difícil de analizar debido a que es relativamente baja puesto que oscila en el orden de los mili voltios, y difícil de manipular ya que cualquier tipo de interferencia o ruido eléctrico por parte cualquier otro componente podría arruinar la medida. De acuerdo a ello las plataformas de desarrollo Arduino o LabView serían incapaces de interpretar tales señales lo que se hace necesario contar un componente electrónico que amplifique y adecue la señal de la termocupla, además que funcione como interface entre el instrumento de medición y el micro controlador.

El adecuador de señal que se escogió fue un FieldPoint de National instruments que consta de un módulo de interfaz para Ethernet de referencia NI FP-1601 encargado de gestionar la comunicación entre el ordenador y los módulos I/O mediante un canal local de transferencia de datos de alta velocidad que también proporciona funciones de diagnóstico y configuración automática para simplificar su instalación, uso y mantenimiento; y un módulo I/O para conexión de termopares de 8 canales de referencia NI FP-TC-120, que es un dispositivo versátil de entrada de temperatura usado para medir, linealizar y filtrar los bajos niveles de voltaje (mili voltios) entregados por las termocuplas con el fin de entregar valores amplificados, escalados y calibrados al control o al software de monitoreo en las diferentes plataformas de desarrollo. Cabe resaltar que los módulos I/O vienen con calibración trazable NIST certificados, garantizando medidas analógicas exactas y fiables.

El conjunto FieldPoint está diseñado para un funcionamiento óptimo con todo tipo de termocuplas, así que para aumentar su exactitud y rechazo al ruido eléctrico, los módulos utilizan un 16-bit delta-sigma ADC con un filtro de paso bajo integrado en cada canal, que está configurado para un rechazo de 50 y 60 Hz. También proporcionan una compensación de junta fría que evita que se generen voltajes paracitos en la unión con la termocupla utilizando un termistor embebido en la base terminal o bloque conector, un micro controlador a bordo compensa y linealiza la lectura hecha por el termopar con un estándar NIST-90, utilizando una avanzada rutina de linealización para una máxima precisión.

Para mayor información revisar el anexo D.

Figura 23. FieldPoint



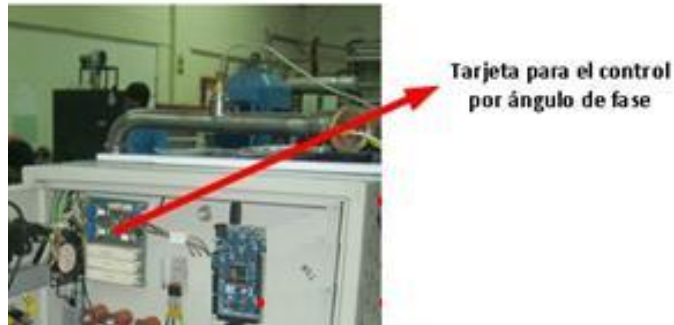
Fuente: <http://www.ni.com/products/esa>

2.5.5 Regulación de voltaje AC La regulación del voltaje AC juega un papel muy importante en el banco, ya que con esto se puede regular tanto el calor que entra como el que sale del sistema, y por ende se puede aplicar un control PID y generar perturbaciones para el análisis del comportamiento del sistema.

La regulación de voltaje AC se hizo con base a una técnica conocida como control de potencia por cambio de fase. Esta consiste en cortar, con la ayuda de un triac, la onda sinusoidal de corriente justo después de que esta pasa por cero, en un lapso de tiempo que puede variar entre 0 y 8000 micro segundos. Entre más este tiempo se acerque a los 8000 micro segundos, el voltaje entregado se va a acercar a los 0 voltios, y entre más el tiempo se acerque a los 0 segundos, el voltaje entregado se acercara al máximo que se puede entregar.

El control por cambio de fase se logró implementado el circuito eléctrico mostrado en la figura 24 complementándolo con la tarjeta Arduino, el cual detecta el cruce por cero de la onda, disparar el Triac en momento indicado y logrando así controlar el voltaje que llega tanto al calefactor eléctrico como la los motores del radiador.

Figura 24. Tarjeta para el control por ángulo de fase



Fuente: autores del proyecto

2.5.6 Relé electromecánico El relé es un dispositivo electromecánico que funciona como interruptor que es controlado por una bobina y electroimán, que al ser energizada se cierran unos contactos y permite el paso de corriente para que acciones determinado dispositivo eléctrico.

La función que cumple el relé en el sistema eléctrico es permitir el paso de la corriente al calefactor eléctrico, de tal forma que este se alimente en ciertas condiciones del sistema. Siempre que al calefactor eléctrico le esté llegando corriente, debe existir un flujo de agua que disipe todo el calor expulsado por este, garantizando así que el calefactor no se llegue a recalentar y por ende a averiar. Por tal motivo se hace indispensable que siempre que se vaya encender el calefactor antes se haya encendido la motobomba, para que exista así un flujo de agua en todo el circuito hidráulico.

Para garantizar lo anterior se utiliza un relé electromecánico; este se pondría de tal forma que la bobina estaría en serie con la alimentación eléctrica de la bomba y los contactores en serie con el calefactor, por lo tanto al suminístrale corriente a la bomba se energizará el bobina del relé haciendo que se cierren lo contacto y permitiendo el paso de corriente al calefactor. Si la bomba no se encuentra

encendida tampoco le llegará corriente a la bobina del relé, y por ende si cerramos el interruptor del calefactor a este no le llegará corriente.

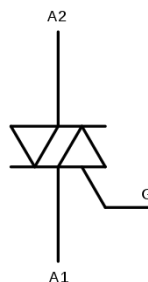
Figura 25. Relé electro-mecánico



Fuente: www.directindustry.es

2.5.7 Triac Este dispositivo semiconductor de la familia de los tiristores, funciona como relé de corriente alterna, con la única diferencia de que este no está compuesto por ningún elemento mecánico, y en vez de eso el Triac es un elemento eléctrico conformado por una combinación de elementos tipo N y P que es el mismo utilizado en los transistores. Los Triac que están conformados por tres electrodos como se ve en la figura 26. Dos de ellos, A1 y A2, son por donde entra y sale la corriente, y una puerta G por donde se dispara el Triac y permite el paso de la corriente. Mientras no exista corriente en puerta el Triac no permitirá el paso de corriente por los electrodos A1 Y A2.

Figura 26 Triac

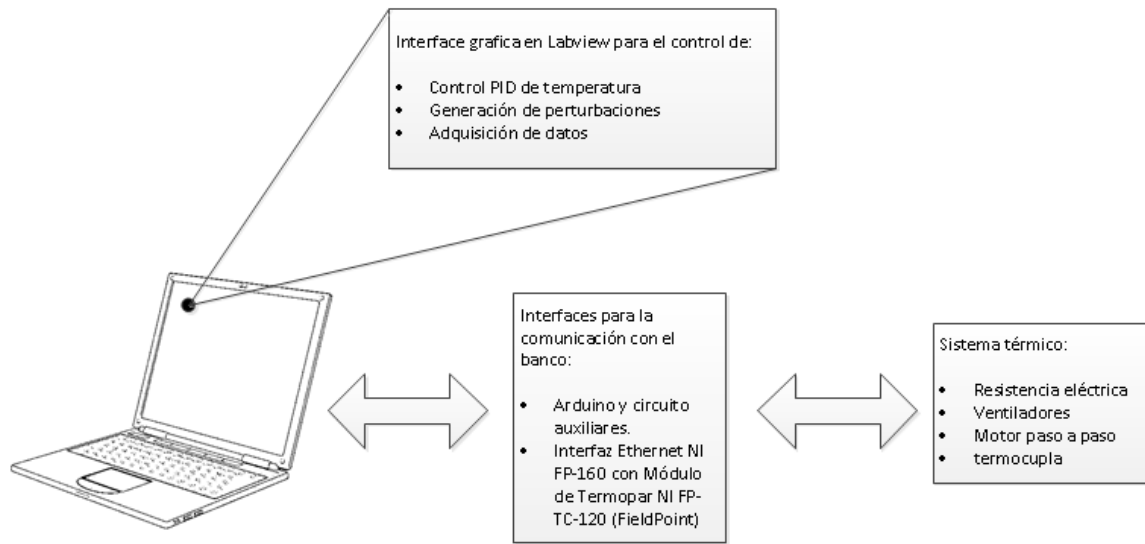


Fuente: *autores del proyecto*

3. FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE LABORATORIO

Este capítulo tiene como objetivo presentar una explicación detallada del funcionamiento del banco de laboratorio. En la figura 27 se puede apreciar una composición general de todos los elementos que influyen en su funcionamiento. Una parte de este es el sistema térmico, el cual está compuesto por una serie de elementos como el calefactor eléctrico, ventiladores, intercambiador de calor, motor paso a paso, termocuplas, entre otros componentes que hacen parte de cada uno de los módulos del banco; quienes luego serán manipulados para realizar la distintas funciones del sistema térmico. Estas funciones se pueden definir principalmente como la aplicación de un control PID, la generación de perturbaciones y la adquisición de datos de la variable temperatura en los diferentes puntos del sistema. Todo esto va ser controlado por medio de las plataformas de desarrollo de Arduino y LabView quienes mandarían las órdenes a las distintas interfaces que son el FieldPoint, los circuitos de regulación de voltaje y el circuito puente H desarrollados en la plataforma Arduino, quienes se encargarán de interpretar las órdenes mandadas por el computador, y dependiendo de estas se accionarán los diferentes elementos del sistema térmico.

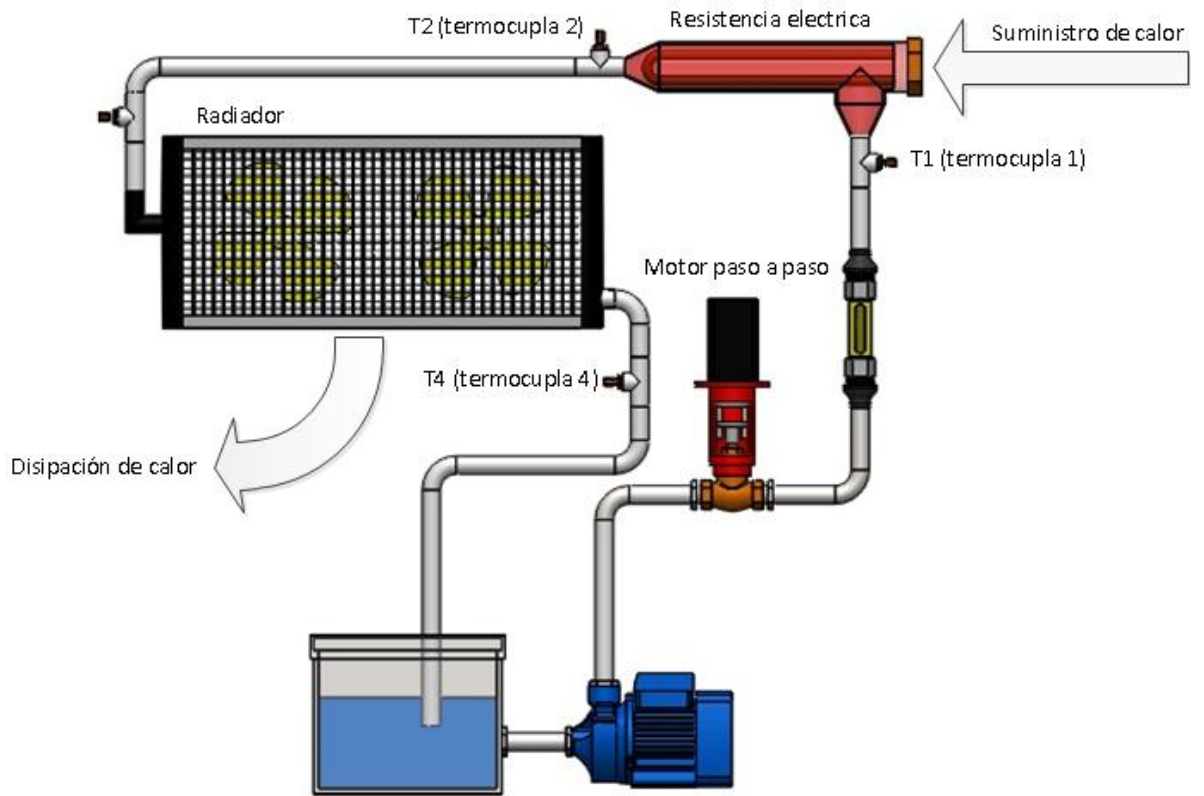
Figura 27. Composición general del banco de laboratorio



3.1 SISTEMA TÉRMICO

El sistema térmico es la parte del banco en el cual se van a generar una serie de procesos para su respectivo análisis. Este está compuesto por, tuberías, mangueras, accesorios, una válvula, una motobomba, un radiador, un tanque, termocuplas, y un calefactor eléctrico. Las características técnicas de todos estos componentes fueron definidas previamente en el capítulo dos de este libro. En la figura 28 se puede apreciar la disposición del sistema.

Figura 28. Sistema térmico



Fuente: autores del proyecto

El funcionamiento básico del sistema térmico, consiste en hacer recircular un flujo de agua por todos los componentes del banco. El flujo de agua experimentará un pequeño incremento de temperatura cuando pasa por el calefactor eléctrico, y que va depender del voltaje que a esta le llega. Posteriormente el flujo se encontrará con el radiador, en este se produce una disminución de temperatura la cual va depender de la velocidad del aire que cruza el radiador y de la temperatura a la cual está el flujo de agua. El hecho de que haya zonas del sistema en que se incrementa y disminuye la temperatura, significa que habrá una entrada y salida de calor del sistema. Se hace evidente entonces, que el calor de entrada va depender del valor del voltaje del calefactor eléctrico, y el calor de salida dependerá tanto de la temperatura del agua como de la velocidad del flujo del

aire. La temperatura de los diferentes puntos del sistema va a aumentar o disminuir dependiendo de la diferencia entre los calores de entrada y salida; si es mayor el calor que entra con respecto al que sale, la temperatura aumentará, y si es mayor el calor que sale con respecto al que entra la temperatura disminuirá.

Se puede plantear una estabilización del sistema con la ayuda de un control automático manipulando los componentes de entrada y de salida de calor. De igual manera se puede generar procesos transitorios por medio de la generación de perturbaciones, cambiando los estados de calor de entrada, calor de salida y el régimen flujo de agua en el sistema. Todo esto con el fin de hacer un análisis de los diferentes procesos generados, por medio de la adquisición de datos de la medición de temperatura hecha con las termocuplas.

3.2 INTERFACES PARA LA ADECUACIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS

Como ya se mencionó anteriormente, el banco utilizará un software de computadora, para el control y realización de las diferentes tareas planteadas por los objetivos de este proyecto.

Cuando un computador interactúa con un sistema físico, este debe manipular los elementos eléctricos del sistema, y recibir información de los estados que tiene el sistema; todo esto por medio de señales eléctricas que entran y salen del computador. Un computador es un sistema digital, y por tal motivo las señales con las que trabaja son de este tipo; a diferencia de las analógicas con las que trabaja los componentes del sistema térmico del banco (corriente DC o AC). Se hace evidente entonces contar con componentes electrónicos que se encarguen de adecuar las señales que entran y salen del computador, para que estas cumplan con sus funciones determinadas. La adecuación de la señal, hecha por estos componentes, se encargará de amplificar, filtrar y convertir de analógico a digital, o

digital a análogo. Además, si los componentes del sistema funcionan con corriente alterna, es necesario utilizar elementos que puedan manipular la corriente AC con corriente DC, que es la de salida de las interface que adecuan las señales del computador.

Para cumplir con todas las funciones del banco se requirió de la utilización de las siguientes interfaces:

- Ethernet NI FP-1601 con Módulo de Termopar NI FP-TC-120: Adquisición de datos.
- Arduino DUE: Manipulación del calefactor eléctrico, ventiladores y motor paso a paso

3.2.1 Interface para adquisición de datos Para el análisis del comportamiento térmico es necesario de medir y llevar un registro del comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos del sistema. El sensor, que es una termocupla tipo J, se encargará de interpretar el valor de la temperatura por medio de una señal eléctrica continua en el tiempo, es decir una señal analógica. Ahora, la señal mandada por una termocupla presenta el inconveniente de estar en rangos muy bajos de voltaje, no tener una relación lineal con los valores de temperatura medidos, y presentar ruidos que distorsionan la señal. Además, por el hecho de ser una señal analógica requiere ser convertida a digital para poder llevar el valor medido a un computador donde pueda ser interpretado y guardarlo en un registro.

Para adecuar las señales analógicas de una termocupla se utilizaron los módulos Ethernet NI FP-1601 y Termopar NI FP-TC-120 de National Instruments.

NI FP-TC-120

Este es un módulo 16 entradas que conforman 8 canales para tratar señales de termocuplas. Tiene la capacidad de hacer una relación lineal entre el voltaje y la

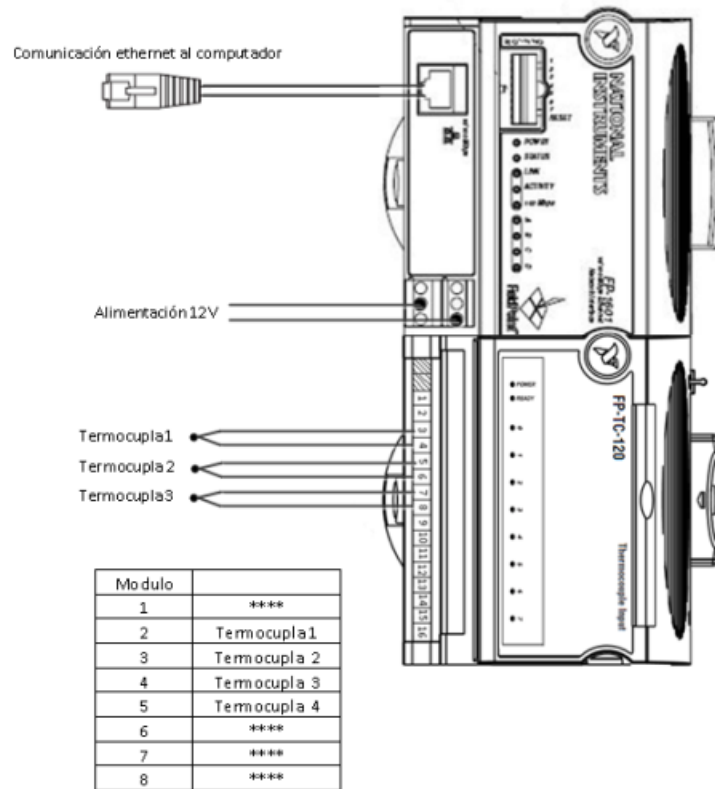
temperatura medida; además, puede hacer una compensación de junta fría para los distintos tipos de termocuplas (J, K, R, S, T, N, E, y B). Posee un filtrado para ruido eléctrico entre 50 y 60 HZ. Por último, este módulo cuenta con un conversor analógico digital que tiene una resolución 16 bits.

NI FP-1601

Esta interface se encarga de la comunicación entre el computador y el módulo de temperatura, por medio de una red de Ethernet, usando un cable RJ-45 para esto. Con una velocidad de 100Mb/seg en la comunicación de datos, se ofrece un alto rendimiento con un fácil uso junto con la computadora, en donde este componente es compatible con el sistema operativo Windows 7. También hay que mencionar que hay disponible librerías del software Labview, las cuales dan la posibilidad de trabajar con interface gráficas para visualizar y registrar los datos enviados por el modulo NI FP-1601.

La configuración de los módulos NI FP-TC-120 y NI FP-1601 con las distintas termocuplas del sistema térmico se muestra en la figura 29. La distribución de las distinta termocuplas se puede apreciar en la figura 28.

Figura 29. Configuración adquisición de datos (NI FP-1601 y NI FP-TC-120)



Fuente: Autores del proyecto

3.2.2 Interface para la manipulación de equipos eléctricos del sistema térmico Para la aplicación de distintos controles PID y la generación de perturbaciones en el sistema, es necesario poder manipular los distintos elementos eléctricos del sistema térmico. Para esto se utilizaron un conjunto de circuitos electrónicos, encargados de recibir e interpretar las órdenes, mandas desde el computador, para accionar los dispositivos eléctricos.

La principal herramienta utilizada para hacer estas interfaces, fue la plataforma de hardware Arduino. Esta es una tarjeta que está basada en un micro controlador y en un entorno de desarrollo, diseñado para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. La tarjeta utilizada fue la Arduino DUE, que consiste

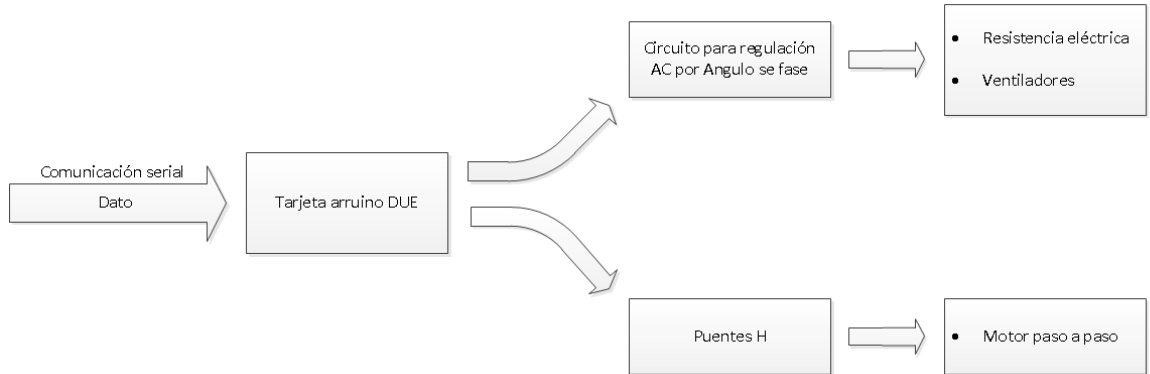
en un micro controlador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU , que posee puertos I/O los cuales ofrecen entradas y salidas digitales, analógica y señales de PWM. Además, este tipo de tarjetas, traen integrado un sistema de comunicación serial, que permite recibir datos ya sea para programar o dar un orden a la tarjeta.

La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el popular lenguaje de programación de alto nivel Processing. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes.

Arduino tiene la característica de trabajar con voltajes pequeños de corriente directa. Esto hace que la tarjeta no pueda interactuar directamente con dispositivos eléctricos que trabajan con un voltaje superior al soportado por Arduino, o con una corriente alterna. Por lo tanto fue necesario diseñar y construir circuitos electrónicos que comande los componentes eléctricos del sistema térmico por medio de las señales eléctricas de salida de la tarjeta Arduino.

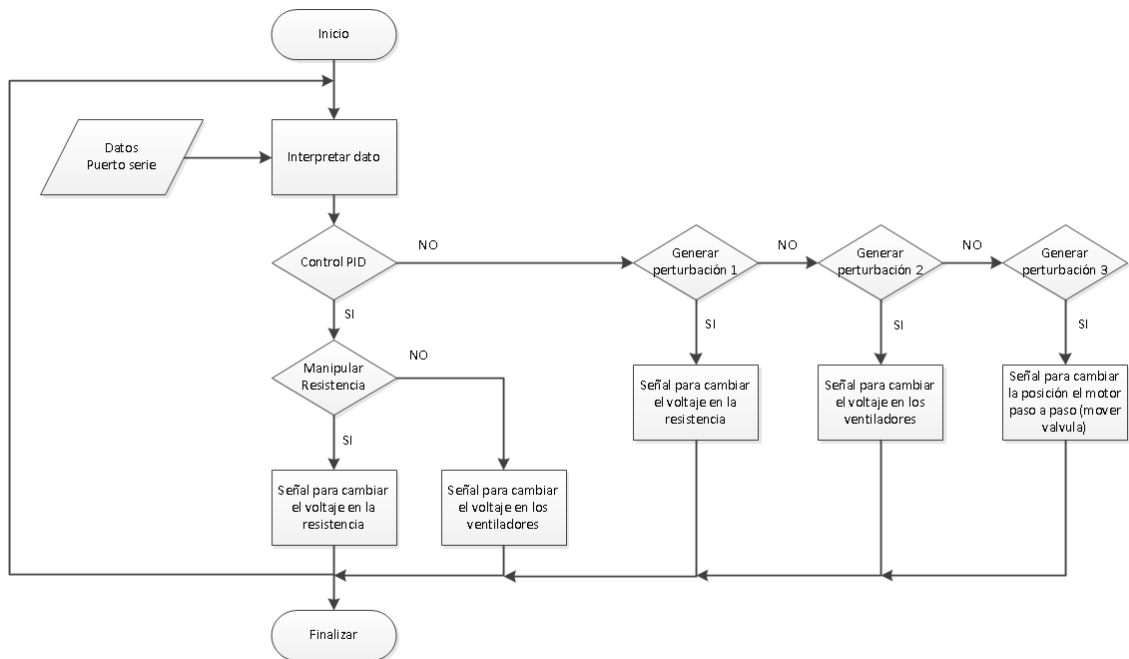
Por tanto, la interfaces para la manipulación de los elementos eléctricos está conformada por una tarjeta Arduino DUE y dos circuitos electrónicos adjuntos (ver figura 30). La tarjeta Arduino se encarga de la comunicación con el computador mediante la recepción de datos. Además, la tarjeta Arduino está programada para actuar por medio de un dato recibido en el puerto serial, escoger qué elemento actuará, y con qué intención lo hará (perturbación o control). La actuación se hace a través de la manipulación AC o DC usando los circuitos electrónicos adjuntos.

Figura 30. Interface para la actuación de los elementos eléctricos



Fuente: Autores del proyecto

Figura 31. Algoritmo montado en arduino



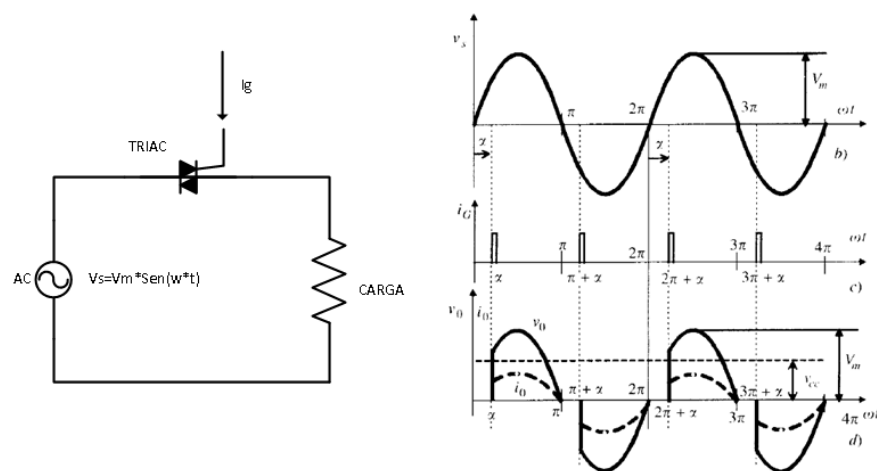
Fuente: autores del proyecto

3.2.2.1 Regulación AC por ángulo de fase Uno de los requisitos fundamentales para el control de temperatura y generación de perturbaciones por medio del

suministro o disipación de calor; es poder lograr una regulación de corriente alterna en los componentes eléctricos del sistema encargados de la entrada y salida de calor. Además de regular el voltaje AC, es necesario que este se controle desde un computador en el cual está implementado un controlador PID, donde se comandan la generación de perturbaciones.

Un método eficaz para regular el voltaje que le está llegando a una carga es cambiar el ángulo de fase de la onda. Esto se hace a partir del paso de corriente a la carga en ciclos parciales; esto quiere decir, que solo se permite el paso de una parte de la onda. Por medio de un triac, como se muestra en la figura 3-6, se puede permitir el paso de corriente a la carga solo cuando hay un impulso de disparo (corriente I_g). Si el triac se logra disparar de una forma sincronizada, cada 180° en un valor de α , se puede controlar la tensión eficaz que recibe la carga al cambiar el ángulo de disparo α . Este valor α estará en un rango de 0° a 180° , en donde, los valores cercanos a los 0° tendrán los máximos voltajes, y los cercanos a los 180° tendrán los voltajes mínimos.

Figura 32. Regulación por ángulo de fase



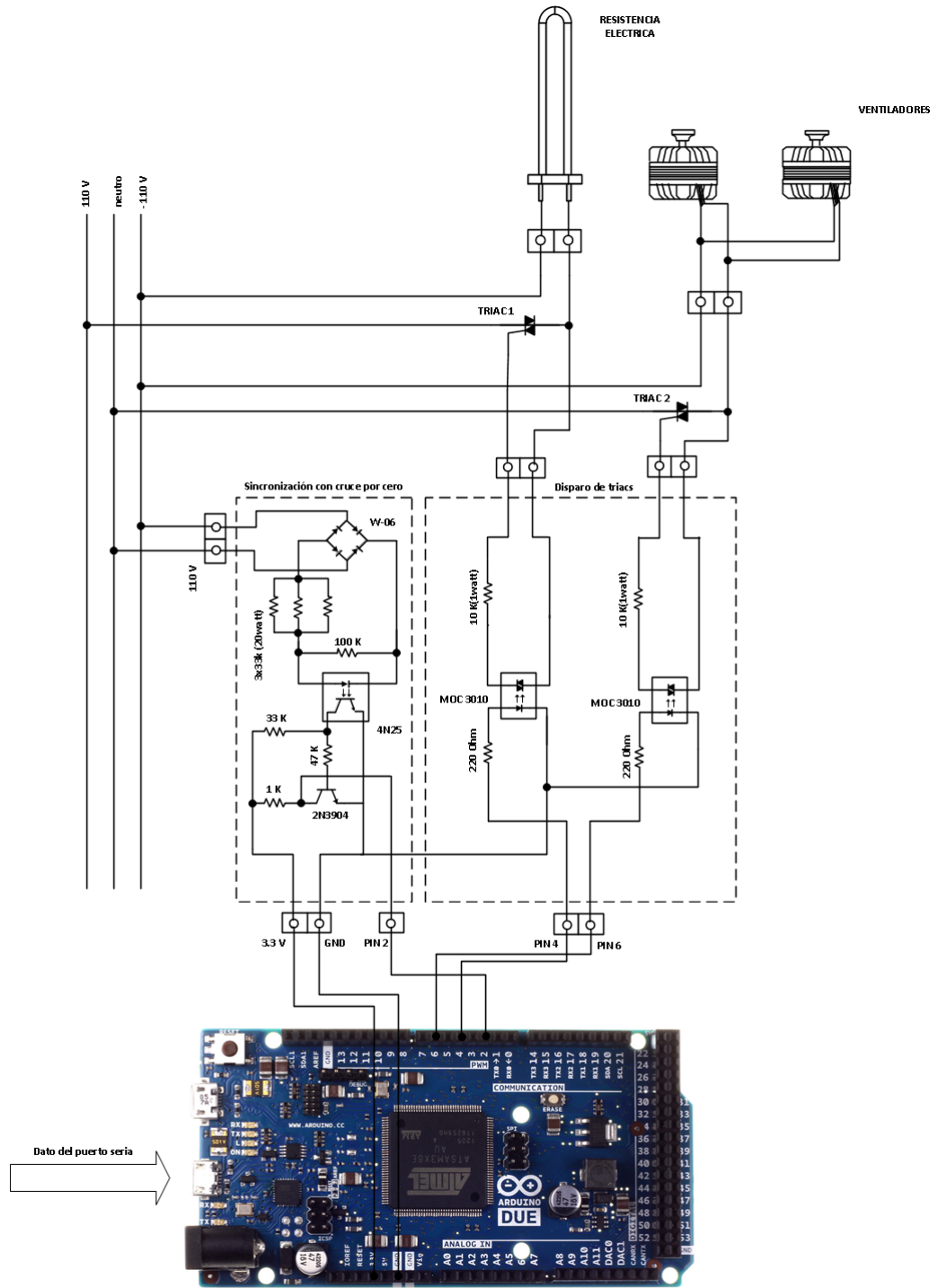
Fuente: autores del proyecto

Es evidente que el Triac por sí solo no cumpliría con la tarea de regulación, es necesario que este cuente con elementos auxiliares que hagan un disparo de forma sincronizada dependiendo del valor del voltaje que sea requerido.

El circuito que se implementó en Arduino para hacer una regulación por ángulo de fase de los voltajes, que le llegan al calefactor eléctrico (220 voltios) y los ventiladores (110 voltios), se muestra en la figura 33. Este circuito se divide en tres partes: la parte de sincronización, la tarjeta Arduino due y la parte que manda la señal para disparar el Triac. Cada una de estas partes se caracteriza por la utilización de optocopladores; estos son elementos integrados que se encarga de separar la parte de corriente alterna de la directa.

La parte de sincronización se encarga de detectar el cruce por cero de la onda sinusoidal. Esta parte del circuito cuenta con una alimentación de 3.3 voltios, una entra de 110 voltios para detectar el cero de la onda, y una señal de salida de corriente directa que llega al pin 2 de la tarjeta Arduino. Cuando el valor del voltaje de corriente AC es cero, se produce una baja en la señal que entra al pin2, esto es interpretado por el algoritmo como un cruce por cero de la señal sinusoidal. Después de detectar el cero el algoritmo procede por medio de unos pulsos de salida en los pines 4 y 6, a disparar los Triac; el disparo se produce cuando los optoacopladores (MOC 3010) reciben las señales de Arduino, debido a las cuales se permite el paso de la corriente en la compuertas g de los Triac. El algoritmo en Arduino enviará la señal, para disparar el Triac, cuando haya transcurrido un pequeño lapso de tiempo (entre 0 y 8000 microsegundos) que empieza a contar justo después de detectar el cero. Este lapso de tiempo es equivalente al ángulo de disparo, y va a variar dependiendo del valor de voltaje requerido, el cual depende a su vez del dato de entrada del puerto serie.

Figura 33. Circuito para la regulación por ángulo de fase en el calefactor eléctrico y en los ventiladores



Fuente: autores del proyecto

3.2.2.2 Motor pasó a paso El medio de actuación de la válvula tipo globo fue un motor paso a paso. Este es un componente electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos.

El motor que se utilizó fue del tipo bipolar conformado por dos bobinas, con alimentación de corriente de 5 amperios por bobina.

El funcionamiento del motor está basado, en girar en un determinado sentido, por medio de pasos angulares de $1,8^\circ$. Para que se den estos pasos se debe repetir una secuencia, en la cual se va cambiando tanto la bobina que se energiza como la polaridad de esta. La secuencia que se debe seguir para que este motor gire se muestra en la figura 34, y se hace repitiendo los pasos del 1 al 4 hasta que el motor llega a la posición deseada. Para comandar la secuencia con la que se energiza las bobinas con su determinada polaridad, se utilizó dos puentes H L6203, uno por cada bobina (ver figura 35). Los puentes H están montados en un circuito impreso juntos con otros componentes que complementan su funcionamiento. Estos integrados se alimentan con una fuente de 12 voltios y 13 amperios, lo cual permitirá alimentar las bobinas con el suficiente amperaje.

Por medio de un pulso eléctrico en las entradas I1, I3, I2 e I4 se dan los pasos 1, 2, 3 y 4, respectivamente en el motor. Los pulsos se repetirán, en el orden ya establecido, hasta que el motor llegue a la posición deseada. El encargado de suministrar la secuencia de pulso es la tarjeta Arduino, en la cual parte del algoritmo que tiene, se encarga de llevar la cuenta de los pasos dados y los que faltan para poner el motor en la posición deseada; la posición depende de la requerida por el valor del dato que llega al puerto serie.

En la figura 36 se especifica el plano electrónico de los puentes H con la tarjeta Arduino DUE.

Figura 34. Secuencia del motor paso a paso

	Terminales	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4
Bobina A	Rojo	Vcc +		Vcc -	
	Azul	Vcc -		Vcc +	
Bobina B	Negro		Vcc +		Vcc -
	Verde		Vcc -		Vcc +

Fuente: autores del proyecto

Figura 35. Puente H L6203

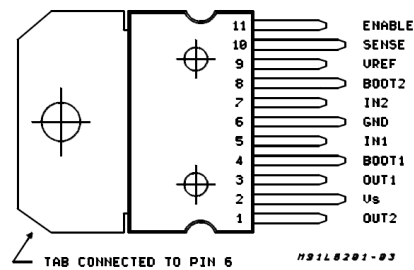
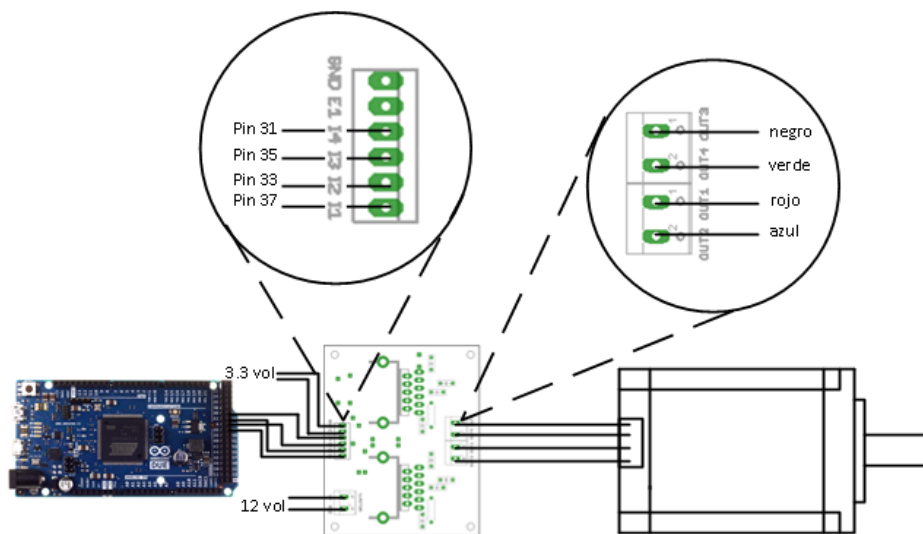


Figura 36. Cableado



Fuente: autores del proyecto

3.3 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Los sistemas de control del banco tienen como función estabilizar el sistema térmico, esto quiere decir que la temperatura de todos los puntos del sistema tiende a mantenerse constantes, sin importar las condiciones en la que se encuentre el mismo sistema o la de sus alrededores.

El tipo de control que se aplicó al banco fue un sistema de control de lazo cerrado. Este tipo de control se caracteriza por retroalimentar la variable que se desea controlar, para compararla con el valor deseado que se conoce como Setpoint. Los sistemas de control de lazo cerrado están conformados básicamente por:

- Controlador
- Sensor
- Sistema

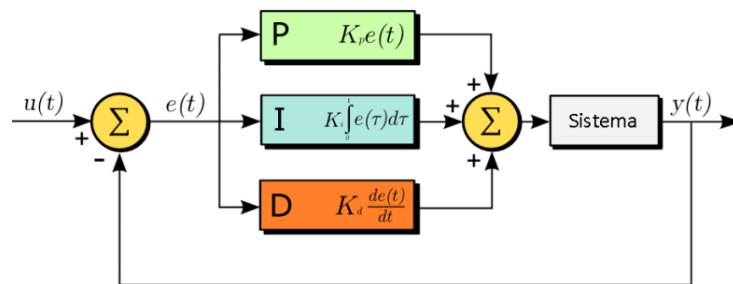
El funcionamiento del control de lazo cerrado comienza cuando se compara el Setpoint con el valor medido por el sensor, en donde este último es el valor retroalimentado. Al hacer la comparación se produce un valor conocido como error, el cual es enviado al controlador. La función del controlador es producir, con base al error, una señal de control que actuará sobre el sistema de tal forma se vaya reduciendo este error a cero. Si el error es cero, se dice que el sistema se estabiliza y tenderá a mantenerse así. Si el sistema es perturbado, este sale de su estado estable y el error dejará de ser cero, por lo tanto el controlador responderá cambiando la señal de control para volver a estabilizar el sistema.

3.3.1 Controlador PID El corazón de un sistema de control es el controlador. Este tiene la función de reducir el error, ya que es el encargado de cambiar la señal de control que le llega a los actuadores, dependiendo siempre del estado actual del error y por ende del sistema.

El tipo de controlador que se utilizó fue un PID, en el cual su algoritmo se basa en una ecuación matemática que esta en función del error, que consiste en la sumar una acción proporcional, integral y derivativa (ver figura3-10).

El funcionamiento del controlador consiste en tomar el error, y por medio de este, generar un valor equivalente a la señal de control. Cuando el controlador recibe el error este es: amplificado por una constante proporcional, integrado con respecto al tiempo transcurrido, y derivado con respecto al tiempo. Los resultados de todas estas operaciones se suman para producir un valor de salida del controlador, que será el que actuará en los elementos del sistema a través de las interfaces. La acción proporcional, integral y derivativa también son multiplicadas cada una por constantes independientes conocidas como proporcional, una integral y una derivativa, respectivamente, las cuales van a definir el peso de influencia de cada una de las acciones en la suma final.

Figura 37. Controlador proporcional, integral y derivativo



Fuente: autores del proyecto

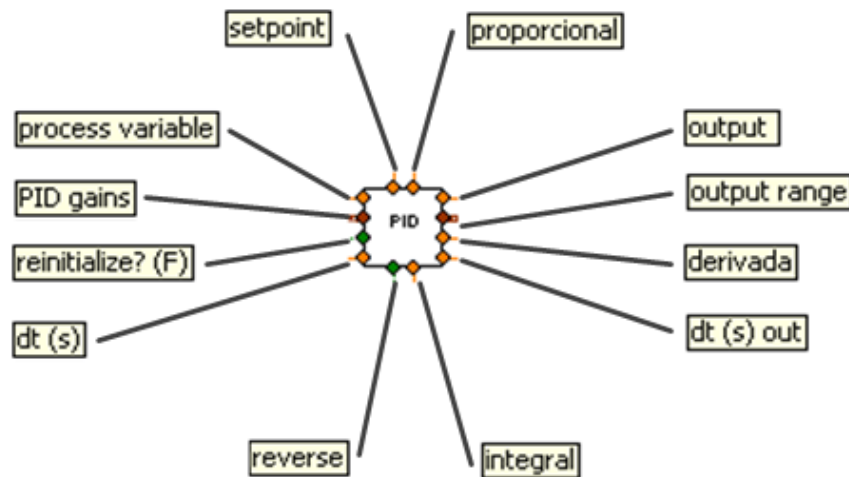
Cada una de las acciones, ya mencionadas, tiene una función determinada en el proceso de control, de manera que se logre un funcionamiento eficiente del controlador. Es decir que se logre estabilizar un sistema en el menor tiempo posible, cuando esta sufre los efectos de las perturbaciones. Cada una de las funciones y acciones de control PID, se describen de la siguiente forma:

- **Acción proporcional:** esta es la parte fundamental para el funcionamiento del control PID. Consiste entre el producto de la constante proporcional y el error, para producir un valor de salida que cambiará los estados del sistema, y por ende la variable controlada. La multiplicación de la parte proporcional hace que el error presente siempre sea proporcional a la señal de control. Ahora, es común encontrar en la parte proporcional, un fenómeno conocido como offset; que es cuando el sistema se estabiliza y el error es diferente a cero. Para corregir este fenómeno es necesario agregarle a la parte proporcional una acción integral o derivativa.
- **Acción integral:** el control integral complementa al proporcional, al adicionarle un valor. Este valor es el resultado de integrar el error con respecto al tiempo transcurrido; esto representara el área bajo la curva error vs tiempo, la cual se vuelve una constante cuando el sistema se estabiliza. Al sumar dicha área con la parte proporcional se corrige la desviación de offset. La acción integral hace, también, que la razón de cambio de la señal de control sea proporcional al error.
- **Acción derivativa:** esta parte del control PID consiste en derivar el error con respecto al tiempo. Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador, aporta un medio para obtener un alta sensibilidad en el. Una ventaja de usar esta acción de control es que responde a la velocidad de cambio del error y produce una corrección significativa antes que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por lo tanto el control derivativo prevé el error, inicia una acción correctiva oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema. Cuando el sistema se estabiliza, la pendiente de la curva de error se vuelve una horizontal, lo que significa que el valor de la pendiente en este punto es cero; esto hace que el control derivativo no afecte el control PID en un estado estable. A pesar de que en el estado estable no haya influencia de la acción derivativa, esta acción añade amortiguamiento al sistema, permitiéndole

el uso de un valor más grande de la ganancia proporcional. Hay que añadir, por último, que el control derivativo nunca puede estar por sí solo, debido a que este opera bajo la velocidad del cambio de error, y no sobre el error mismo; por lo tanto tiene que estar acompañado por la acción proporcional.

3.3.2 Librería del PID en LabView La aplicación del controlador PID se hizo mediante un algoritmo montado en LabView. En la figura 38 se puede apreciar el bloque del PID con sus respectivas entradas y salidas.

Figura 38. Librería PID



Fuente: autores del proyecto

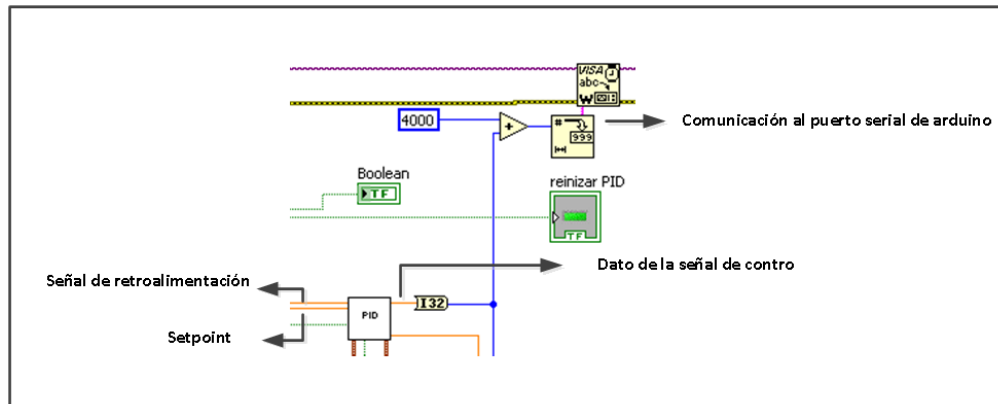
- **Setpoint:** esta es una entrada que corresponde al valor de consigna, es decir el valor en el cual el controlador pondrá la temperatura del sistema.
- **Process variable:** este dato corresponde a la señal de retroalimentación tomada por los sensores.
- **PID gains:** corresponde al valor de las constantes de las acciones proporcional, integral y derivativo.

- **Reinitialize:** esta es una entrada de tipo booleano, en el cual, cuando se pone en verdadero, vuelve cero el tiempo y los valores de sumatoria de la acción integral.
- **dt (s):** especifica el intervalo en segundos en el cual la librería hace los cálculos. Si se pone cero o no se pone ningún valor; se calcula el tiempo transcurrido desde la última llamada, y este será el dt (s) con la que trabajará la librería.
- **Reverse:** este booleano especifica en qué dirección incrementa la señal de control. Verdadero cuando en el sistema se disminuye el error al aumentar la señal de control, y falso cuando el error disminuye al disminuir la señal de control.
- **Integral:** este es un valor de salida el cual corresponde al cálculo hecho por la acción integral.
- **Derivada:** esta salida es el cálculo hecho por la parte derivada.
- **Proporcional:** salida que muestra el cálculo proporcional.
- **Output range:** aquí se puede introducir los valores máximos y mínimos que puede tomar la señal de control.
- **dt (s) out:** el valor del diferencial de tiempo con que se hace los cálculos.
- **Output:** este dato es la salida equivalente a la señal de control para el actuador del sistema de control.

El funcionamiento de esta librería es ejercer las funciones de un controlador PID. Por medio de los sensores se obtiene una señal de retroalimentación; esta es convertida a dato, por medio del FieldPoint, y el dato es enviado al computador para que, a través de las plataformas de desarrollo LabView, se interprete el dato y se introduzca en la entrada process variable (ver figura 39). Con los datos de entrada Setpoint y process variable se calcula el error, para que posteriormente este se amplifique, se integre y se derive, obteniendo el dato equivalente a la señal de control. Este dato se envía, a través de una comunicación serial, a la

tarjeta Arduino; esta procede a realizar la actuación sobre el elemento indicado del sistema térmico, completando así el lazo cerrado del sistema de control.

Figura 39. Funcionamiento de la librería de PID

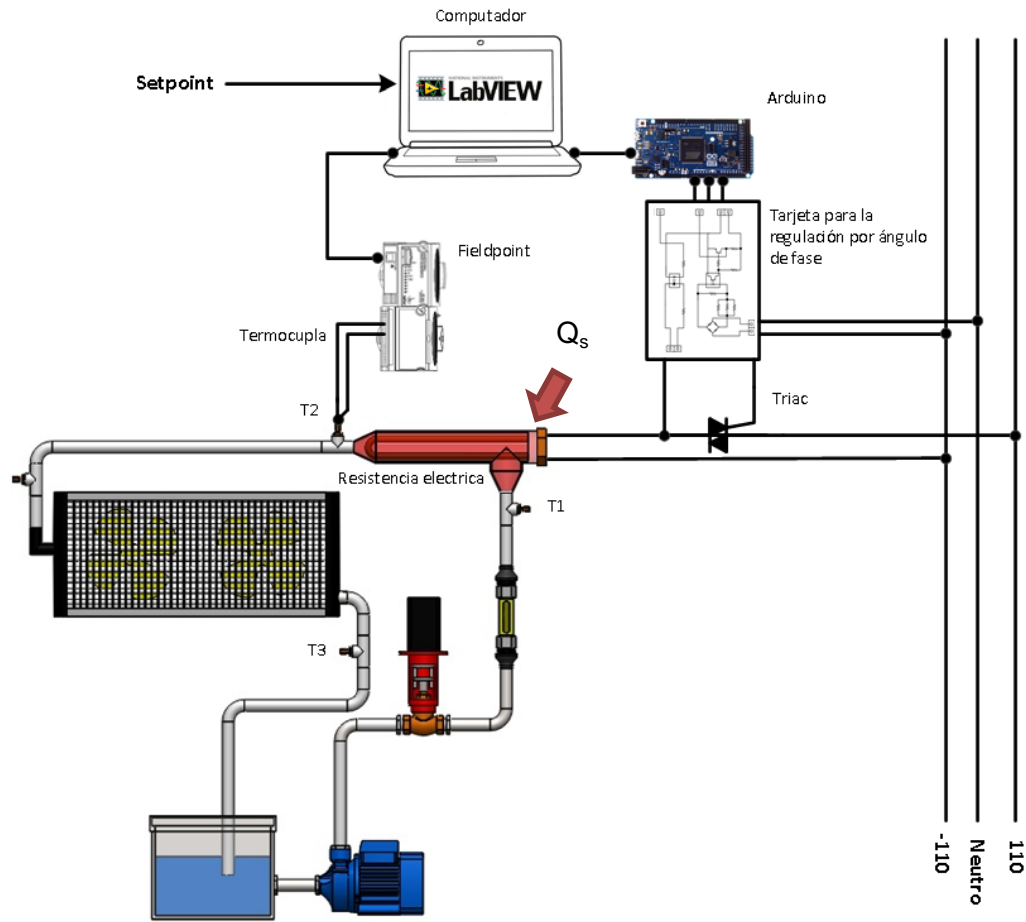


Fuente: autores del proyecto

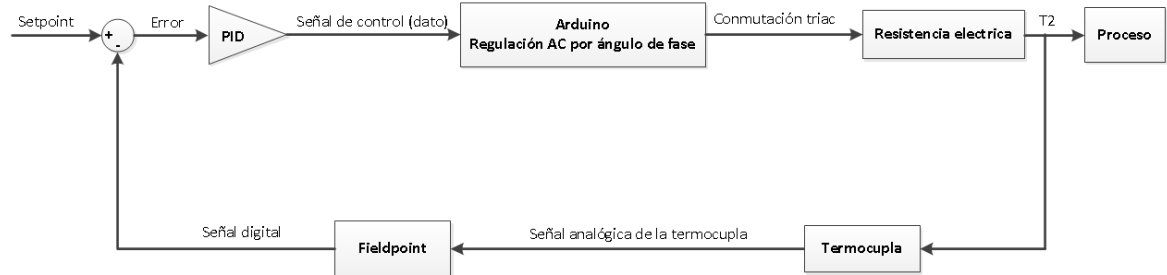
3.3.3 Sistemas de control aplicados en el banco Para la realización de los diferentes procesos planteados en los objetivos de este proyecto, se decidió aplicar dos sistemas de control de temperatura; estos se van a diferenciar uno al otro dependiendo, tanto del punto del sistema térmico donde se controla la temperatura, como el elemento actuador del sistema de control. Por lo tanto los sistemas aplicados fueron:

- **Control de temperatura por medio del suministro de calor:** Este medio para el control de temperatura se basa en regular el voltaje del calefactor eléctrico. Esto quiere decir, que el calor entregado al flujo de trabajo estará en constante cambio hasta lograr una estabilización del sistema. En la figura 40a se puede visualizar el diagrama pictórico del control por suministro de calor y la disposición de todos los componentes, tanto del sistema de control, como del sistema térmico. En la figura 40b se muestra el esquema del control de lazo cerrado, en donde se puede entender mejor como es el funcionamiento del control.

Figura 40. Control por suministro de calor del sistema



(a)

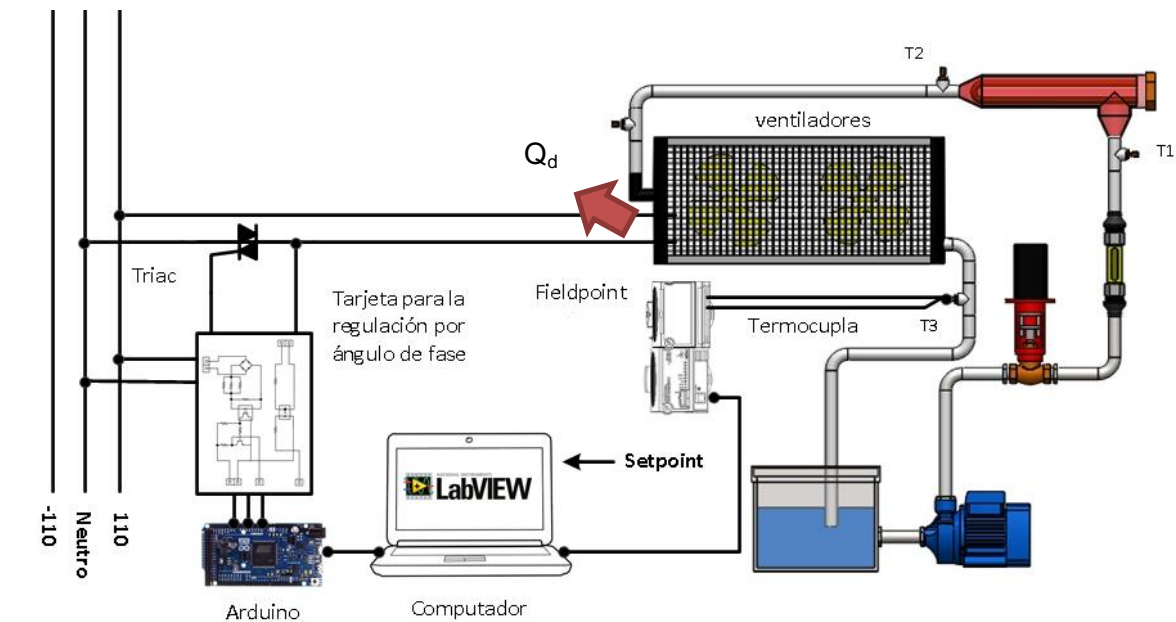


(b)

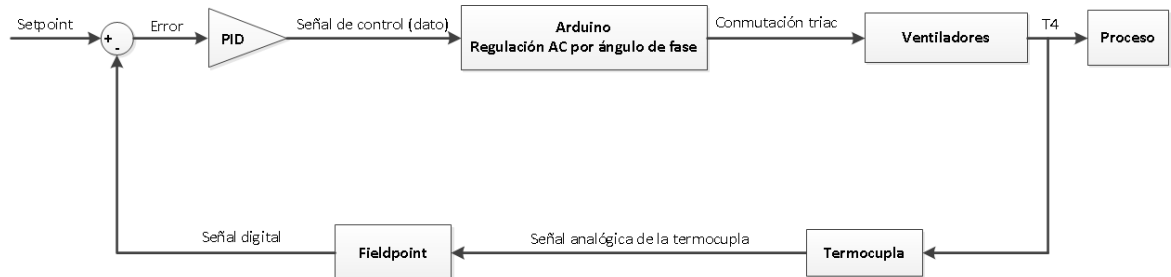
Fuente: autores del proyecto

- Control de temperatura por medio de la disipación de calor:** en este, el controlador PID manipulará la velocidad del flujo de aire en el radiador, por medio de la regulación de la corriente y el voltaje en los ventiladores. Al cambiar la velocidad del aire se cambia el calor disipado por el radiador; el calor cambiará hasta igualarse con el calor de entrada permitiendo estabilizar el sistema. En la figura 41 se muestra la disposición del control de temperatura por medio de la disipación de calor.

Figura 41. Control por disipación de calor



(a)



(b)

Fuente: autores del proyecto

3.4 PERTURBACIONES

Uno de los medios para generar procesos transitorios en el banco de laboratorio, es la introducción de perturbaciones al sistema. Cuando al sistema se le aplica uno de los controles de temperatura antes mencionados, la temperatura tenderá a permanecer constante, y se puede decir entonces que el sistema está en un estado estable. Al cambiar cualquiera de las condiciones del sistema térmico, se dice que este ha sido perturbado y la temperatura tenderá a cambiar. Si la temperatura cambia con respecto al tiempo, el sistema térmico tendrá un comportamiento transitorio, el cual dependerá de una serie de condiciones que rodean al sistema térmico. Estas condiciones están definidas como: capacidad de suministro o disipación de calor, régimen del flujo del fluido de trabajo y la presencia o no del control automático de temperatura después de generar la perturbación.

Las clases de perturbaciones para introducir al sistema son tres: suministro de calor, disipación de calor y caudal del fluido de trabajo. Hay que tener en cuenta que de los tres tipos de perturbaciones, solo se pueden utilizar dos, ya que uno de los componentes para la generación de perturbaciones estará siendo usado como elemento actuador en el control automático de temperatura. Por lo tanto las perturbaciones que se pueden introducir dependerán del tipo de control aplicado. Si el control que se está aplicando es por suministro de calor, se pueden introducir perturbaciones por caudal y disipación de calor, pero no por suministro de calor, ya que el calefactor eléctrico está siendo usado para control. La situación es la misma cuando el tipo de control es por disipación, donde los ventiladores se usan para la regulación de temperatura, y por lo tanto no se puede usar para generar perturbaciones; en este caso las perturbaciones generadas serán por el cambio de posición de la válvula, y el cambio de voltaje en el calefactor eléctrico.

Como ya se mencionó anteriormente el banco va contar con una interface gráfica en LabView en dónde se interpreta y registra las mediciones de temperatura, se configura y manipula los sistemas de control y además se podrá escoger que perturbación generar en el sistema, así como cuál va ser el valor de la variable para la generación de la perturbación. Por ejemplo, si la perturbación es por disipación de calor, desde la interface gráfica se escoge un valor del voltaje para el funcionamiento los ventiladores; esto hará que el algoritmo de LabView envíe el dato a la tarjeta Arduino, en donde la tarjeta interpreta el dato y procederá a disparar el Triac con la secuencia apropiada para producir el voltaje que es escogió desde la interface. La situación es la misma para los otros dos tipos de perturbaciones, con la única diferencia, que en el caso de la perturbación por caudal, Arduino manda una secuencia de pulsos a los puente H que girara el motor paso a paso y por ende la válvula, en una posición en done se regule el caudal al valor escogido desde la interface.

3.5 INTERFACE Y ALGORITMO EN LABVIEW

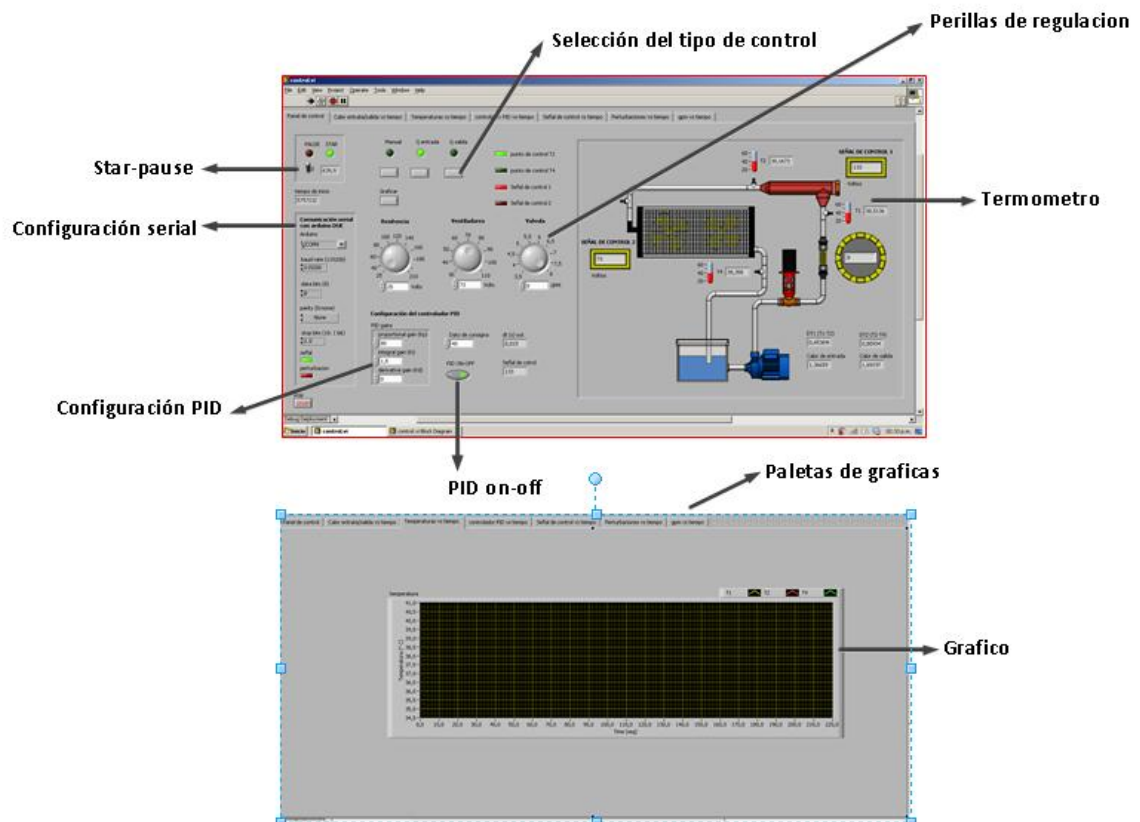
Como ya se mencionó antes, desde un computador se controlarán todos los procesos que se generarán en el banco, también se llevará un registro de los cambios de temperatura, en los distintos puntos del sistema. Estos registros ayudarán a realizar cálculos y gráficas con respecto al comportamiento del banco. Para llevar a cabo esta tarea de control y registro de datos se utilizó el software LabView.

LabView (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad.

3.5.1 Interfaces gráficas Para visualizar y controlar el comportamiento del banco se utiliza un algoritmo en LabView, que es complementado con una interface gráfica. La interface es la parte del programa, que por medio de imágenes y objetos, presenta al usuario información y acciones que están disponibles por medio de un click del mouse. Esto permite una comunicación eficaz entre el usuario y las funciones que tiene el algoritmo del programa.

Para el control del banco se diseñó la siguiente interface gráfica que se muestra en la figura 42.

Figura 42. Interfaces



Fuente: autores del proyecto

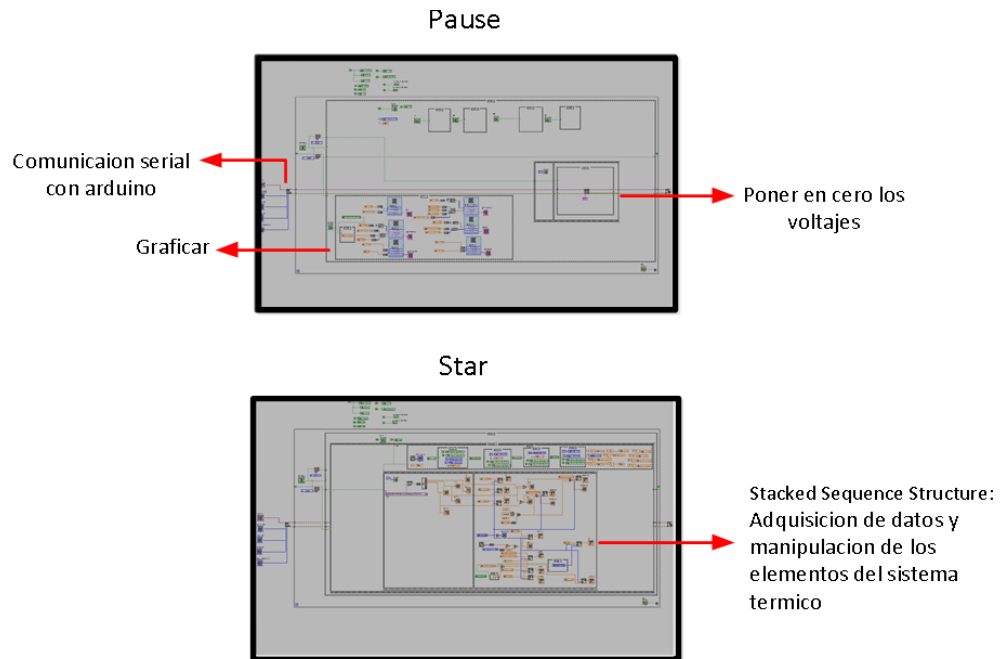
La función que cumple cada una de las partes más importantes del programa se describen a continuación:

- **Star-pause:** este es un objeto en forma de interruptor, con el cual se puede empezar o parar, tanto la adquisición de datos, como el control que se escoja.
- **Selección del tipo de control:** está conformado por tres botones, en donde por medio de un click se escoge el tipo de control con el que se trabajará. Las opciones disponibles son control por calor de entrada, control por calor de salida y manual. Esta última opción ofrece poder manipular los tres componentes del banco (calefactor, ventiladores y válvula) sin que haya presente un control PID. Para poder cambiar el tipo de control hay que poner el interruptor en pause.
- **Perillas de regulación:** por medio de esta perilla se puede manipular los elementos del sistema térmico para la generación de perturbaciones. La perilla correspondiente con el actuador con el que se está haciendo el control de temperatura siempre estará inactiva. Cuando se escoge la opción de manual todas las perillas están activas.
- **Configuración PID:** consta de una serie de cuadros de texto con los cuales se puede configurar el controlador PID. Aquí se tiene que introducir los valores numéricos, tanto de las constantes, como el del setpoint.
- **PID on-off:** este objeto en forma de botón permite activar y desactivar, en cualquier momento, el funcionamiento del controlador PID.
- **Configuración serial:** en esta parte de la interface se configura la comunicación serial con Arduino. La configuración siempre tiene que estar de la siguiente forma; Arduino: COM4; baud rate: 115200; data bits (8): 8; parity (0: none): None; stop bits (10: 1 bit): 1.0.
- **Termómetros:** estos indica la temperatura en los diferentes puntos del sistema.
- **Graficas:** después de cada proceso se puede graficar los registros de temperaturas y calores calculados pulsando el botón graficar. Para poder graficar se tiene que tener el interruptor en pause.

3.5.2 Algoritmo Una de las principales características, del LabView, es la facilidad con que se pueden diseñar algoritmos, sin la necesidad de tener un vasto conocimiento en programación. LabView trabaja con un lenguaje conocido como lenguaje G, donde la G simboliza que es un lenguaje gráfico. Esto quiere decir que los programas no se escriben, si no que se dibujan, en donde por medio de nodos, terminales e hilos se construyen algoritmos para el cumplimiento de una determinada función. Los programas de LabView se llaman instrumentos virtuales (VIs), los cuales, también, pueden estar conformados por subVIs; esto permitirá diseñar programas para aplicaciones complejas, que equivaldrían a millones de líneas de código.

Se diseñó un algoritmo para el control de todas las operaciones realizadas en el banco; en la figura 43 se puede visualizar el VI. Está compuesto principalmente por un case structure, el cual es controlado por el interruptor start-pause. Cuando el interruptor se pone en pause, el case structure ejecuta la condición false, esto hace que se cancelen todas las operaciones del banco, suspendiendo la adquisición de datos y el controlador PID, permitiendo graficar todos los datos de adquisición y datos calculados; además se envía un dato a Arduino para que este ponga los voltajes del calefactor eléctrico y los ventiladores en cero. Si el interruptor se sube a start el case structure cambia a true; en esta parte se ejecuta un Stacked Sequence Structure, lo cual ejecuta en secuencia la operación de adquisición de datos, y posteriormente la manipulación de los diferentes elementos del sistema térmico.

Figura 43. Algoritmo



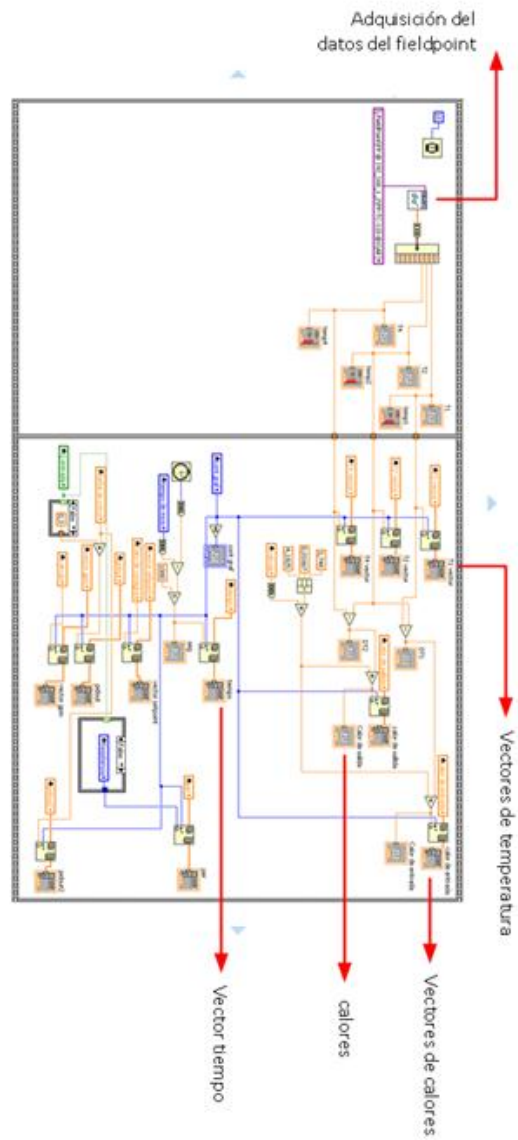
Fuente: autores del proyecto

Como ya se mencionó la adquisición se hizo con los elementos NI FP-1601 y NI FP-TC-120, los cuales envían la información de los valores de temperatura media. Teniendo instalado los drivers de estos componentes, se usa la función FP read (ver figura3-19) para leer todos los valores, de temperatura, de las distintas termocuplas. Posteriormente se envía estos datos a sus respectivos indicadores para que puedan ser visualizados en la interface. Además, los datos de mediciones, son enviados para el cálculo de los respectivos calores de entrada y salida. Toda esta información, temperatura y calores, son guardados en unos vectores, junto con un vector que lleva el registro del tiempo, los cuales se usarán después para graficar los resultados de las distintas pruebas.

Siguiendo la secuencia del Stacked Sequence Structure, después de la adquisición de datos, se continúa a manipular los elementos del sistema térmico, dependiendo de la configuración hecha. En la figura 44 se puede visualizar la parte del algoritmo, que se encarga de establecer la comunicación serial para

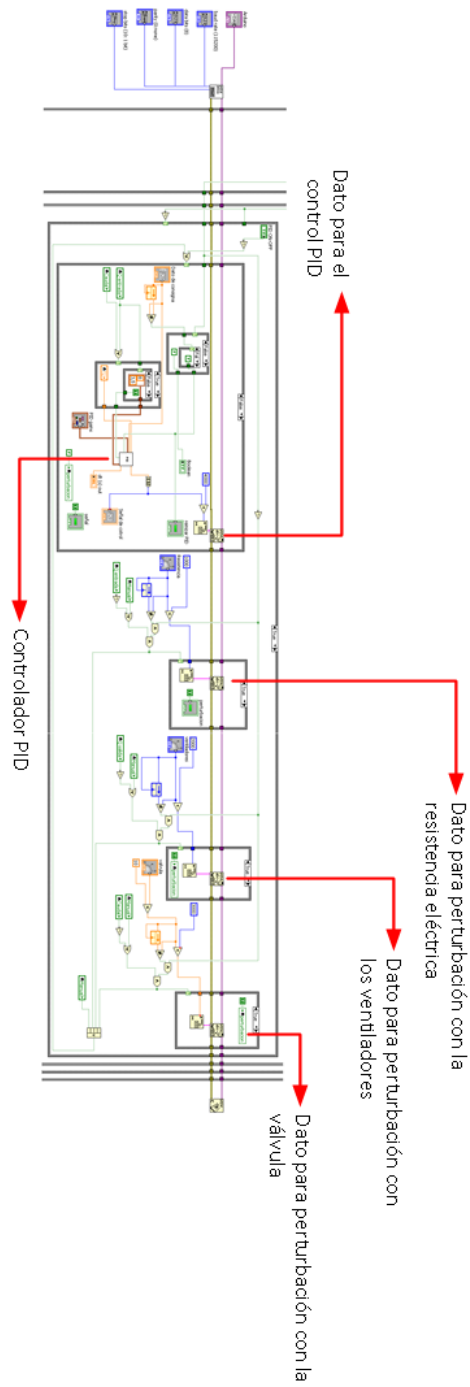
controlar voltaje y mover el motor paso a paso. Mientras no se genere una perturbación y se haya escogido una opción de control diferente a la manual, siempre se estará mandando un dato para completar el control de lazo cerrado; si se da la orden de mandar una perturbación, se deja de mandar el dato para el control PID y se manda el dato para generar la perturbación.

Figura 44. Adquisición de datos



Fuente: autores del proyecto

Figura 45 Manipulación de componentes del sistema térmico



Fuente: autores del proyecto

3.6 CABLEADO ELÉCTRICO

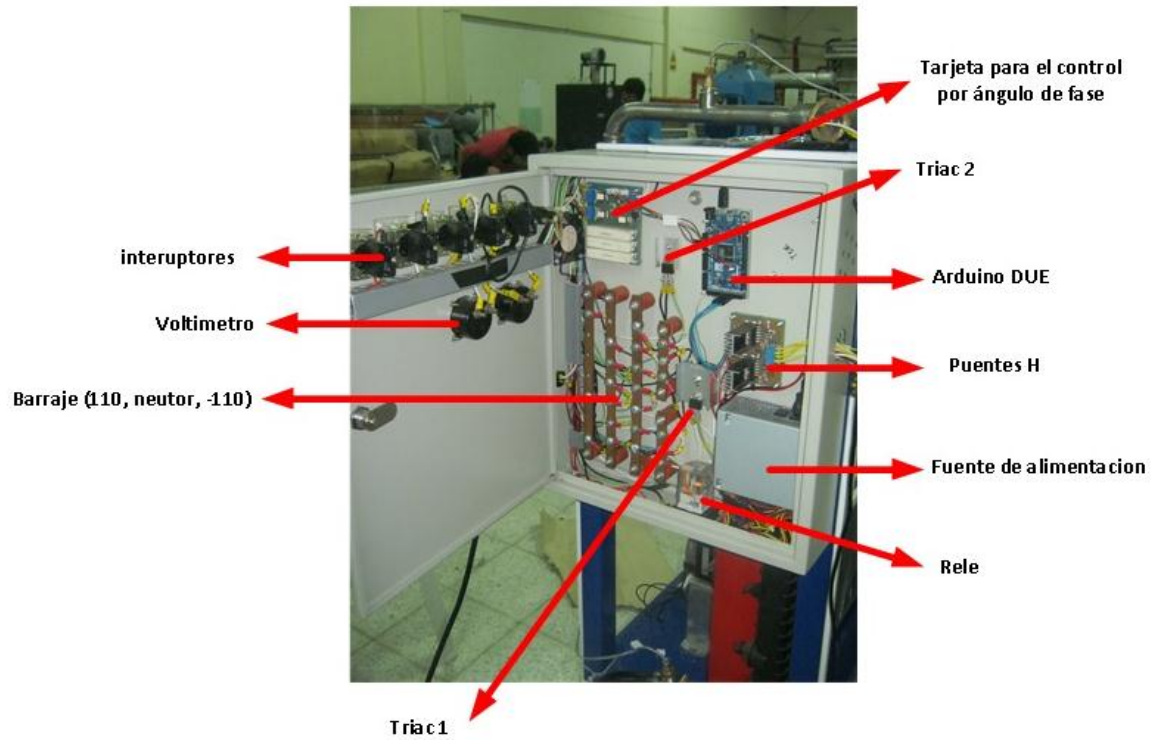
El banco cuenta con un gabinete metálico. En este se montó todo el cableado eléctrico Figura 47, el cual es el encargado de alimentar todos los componentes del banco, por medio de un sistema de barraje de 220V. Además en este gabinete están montados todos los circuitos electrónicos que regularán el voltaje AC y las secuencias de pulsos que moverán el motor paso a paso. El cableado eléctrico se complementa con un panel de control compuesto por bombillos, interruptores y voltímetros. En la figura 48 se muestra el plano del cableado eléctrico. En la figura 46 se muestra la disposición del panel de control.

Figura 46. Panel de control



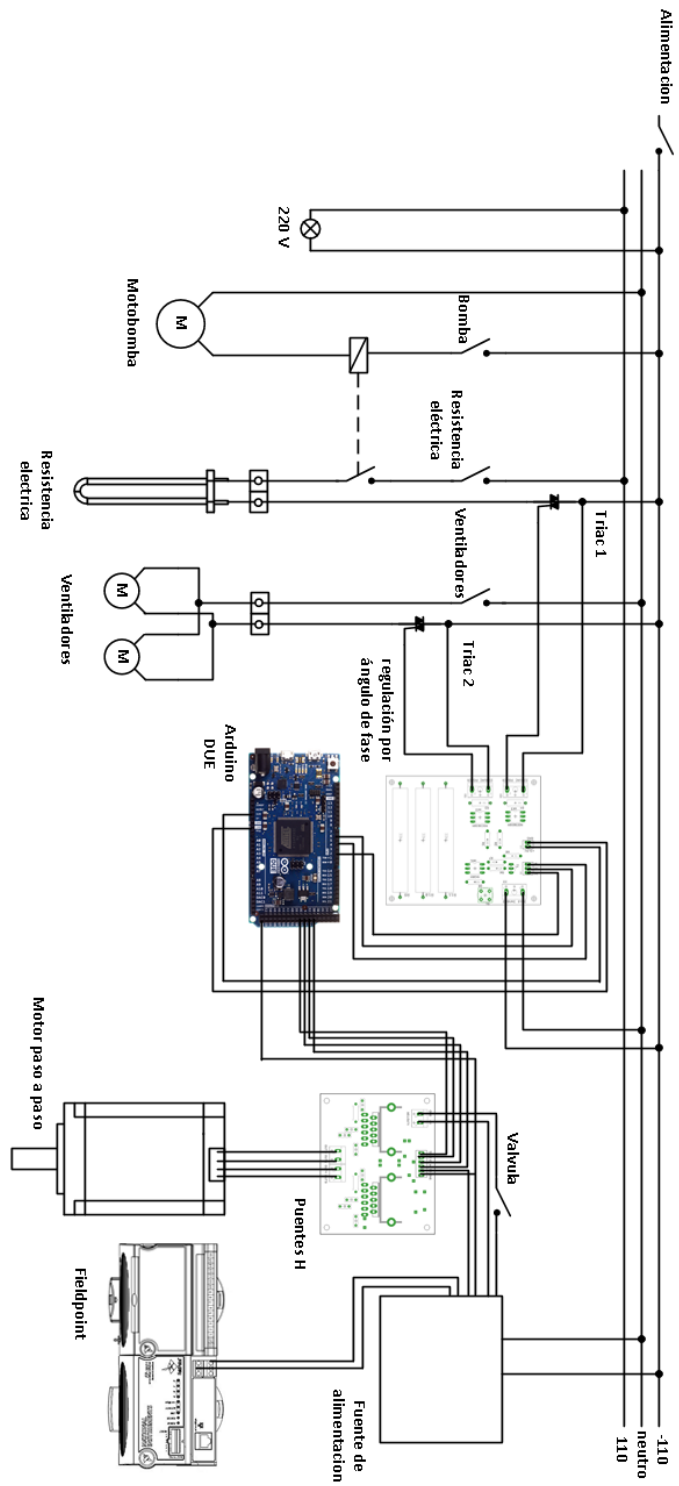
Fuente: autores del proyecto

Figura 47. Cableado



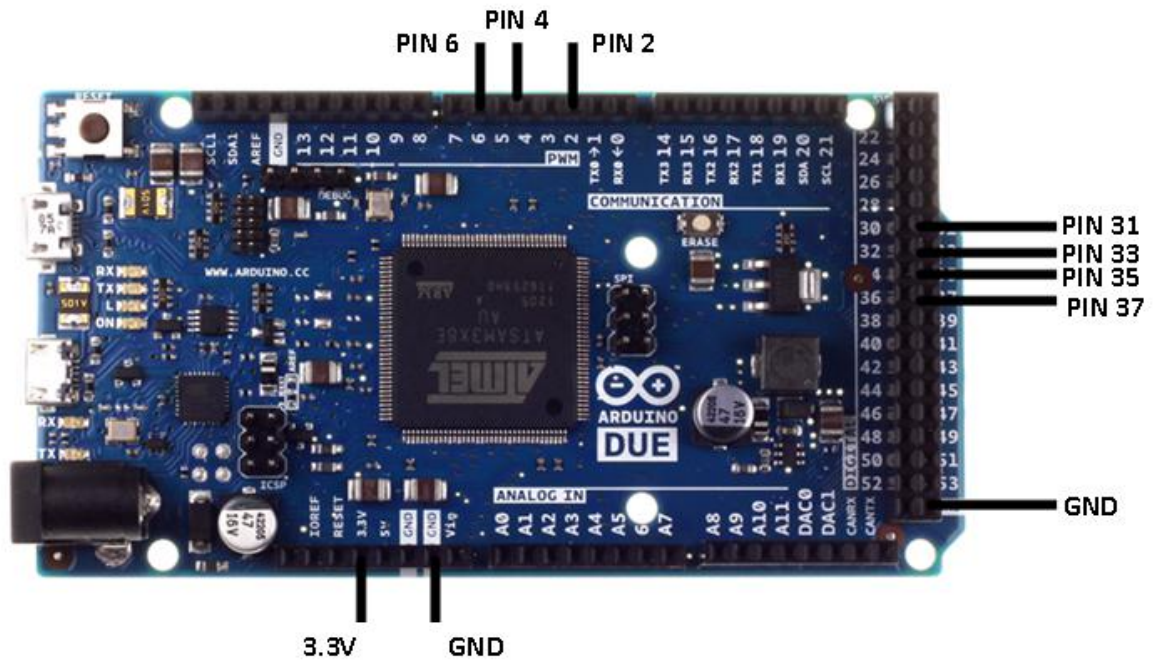
Fuente: autores del proyecto

Figura 48. Plano eléctrico



Fuente: autores del proyecto

Figura 49. Conexiones Arduino



Fuente: autores del proyecto

4. ANÁLISIS PRÁCTICO Y TEÓRICO DE LOS DISTINTOS PROCESOS IMPLEMENTADOS EN EL BANCO DE LABORATORIO.

Después de concluir la etapa de construcción y verificar que cada uno de los componentes del banco funcione correctamente, se procedió a realizar un análisis del comportamiento térmico del sistema tanto en estado estable como transitorio, y con otras condiciones implantadas. Este análisis se llevó a cabo con respecto a una serie de pruebas en el banco y simulaciones por computadora. De esta forma se logró abarcar un trabajo tanto teórico como empírico.

Para la realización de un análisis empírico del comportamiento del sistema térmico, se plantearon una serie de pruebas las cuales abarcan todos los posibles escenarios a los que puede estar sujeto un sistema determinado, tales como: procesos estables, procesos transitorios, introducción de perturbaciones que afecten las variables del sistema, y la aplicación o no de un control PID de temperatura con cualquiera de los actuadores disponibles en el sistema.

Todo trabajo experimental debe ser complementado con uno teórico, en donde se pueda aplicar los conceptos impartidos en clase o encontrados en textos y libros. Por tal motivo, uno de los objetivos de este proyecto es realizar un análisis teórico. Para esto se definió un modelo de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema del banco. Posteriormente, con ayuda del programa simulink del paquete matlab, se simuló el modelo de ecuaciones, ya planteado, imitando los entornos de las pruebas experimentales echas en el banco.

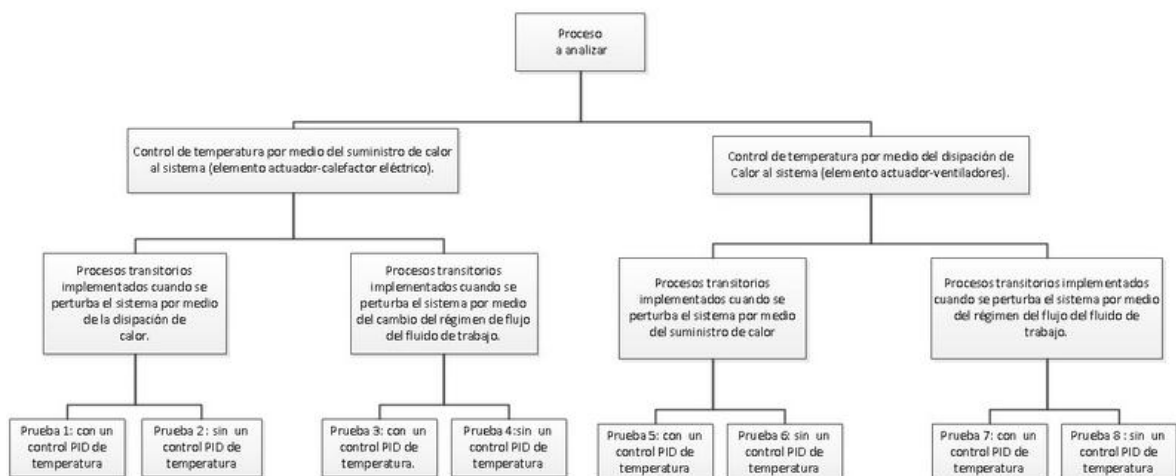
4.1 ANÁLISIS EMPÍRICO DE LOS DISTINTOS PROCESOS IMPLEMENTADOS.

Se realizaron una serie de pruebas las cuales tuvieron la aplicación de diversas condiciones, para generar diferentes tipos de escenarios en el sistema térmico, que se pueden clasificar según: el equipo actuador para el control PID de temperatura, el tipo de perturbación implementada y la aplicación o no de un control PID de temperatura cuando se implementan las perturbaciones.

La clasificación de los diferentes procesos realizados se puede visualizar en la siguiente figura 50.

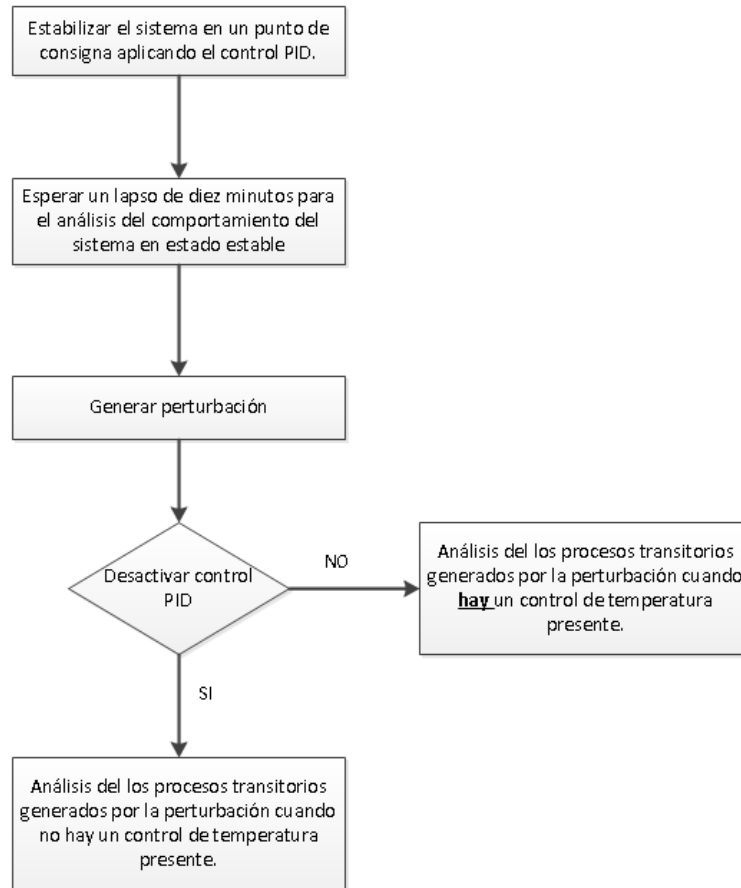
Para la realización de las pruebas se siguió un procedimiento el cual se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 51. Siguiendo este procedimiento se puede generar procesos estables y transitorios del sistema térmico. Además, se tiene la opción de suprimir el control PID cuando se generan los procesos transitorios, lo que permite hacer un análisis de estos cuando hay o no presencia de un control automático de temperatura.

Figura 50. Clasificación de los distintos procesos implementados en el banco de laboratorio



Fuente: autores del proyecto

Figura 51. Procedimiento llevado a cabo en las distintas pruebas



Fuente: autores del proyecto

4.1.1 Control de temperatura por medio del suministro de calor del sistema

Partes de las pruebas que se llevaron a cabo, se hicieron con la aplicación de un control automático que tiene como elemento actuador un calefactor eléctrico. Este corresponde a uno de los dos sistemas de control que se mencionaron en la sección 3.3.3 del capítulo anterior. En este sistema de control estabiliza el sistema térmico regulando el voltaje que recibe el calefactor eléctrico, y por ende regulando también el calor que entra al sistema térmico.

4.1.1.1 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio de la disipación de calor. Después de estabilizar el sistema, con la

aplicación del control por medio del suministro de calor, y esperado un lapso de 10 minutos; se procede a aplicar un perturbación por medio de la disipación de calor en el sistema térmico. Desde la interfaces gráfica se ordena cambiar el voltaje en los ventiladores, esto hace que cambie la velocidad del aire que cruza el radiador y por ende el calor que le es extraído al fluido de trabajo. Al cambiar el calor de salida, se generarán procesos transitorios que dependerán de las distintas condiciones. Una de estas condiciones es la presencia o no de un control PID, el cual tiene la opción de activarse o desactivarse desde la interface gráfica.

Se realizaron dos pruebas para los procesos transitorios generados por perturbaciones por medio de disipaciones de calor; una cuando el control PID siempre está presente en todos los procesos del banco, y otra cuando se suspende el control automático después de implementada la perturbación.

Prueba 1: Con un control PID de temperatura

El comportamiento del sistema térmico para procesos estables, y transitorio generados por perturbaciones de disipación de calor, cuando hay presente un control en todo momento, se muestra en las siguientes figuras:

Figura 52. Control automático de la prueba 1

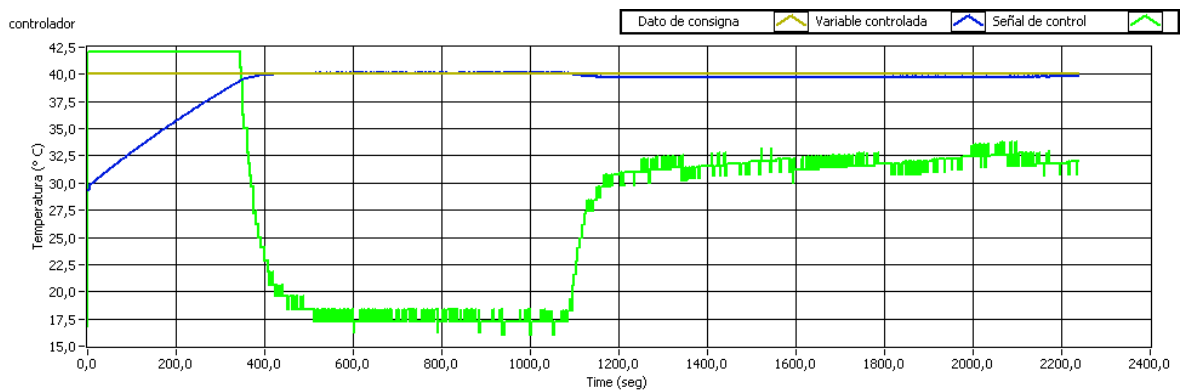


Figura 53. Señal de control de la prueba 1

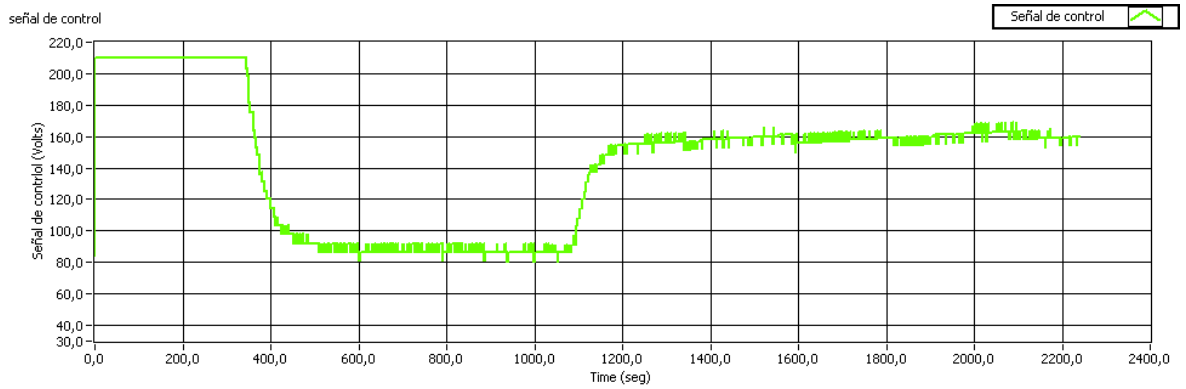


Figura 54. Temperatura de la prueba 1

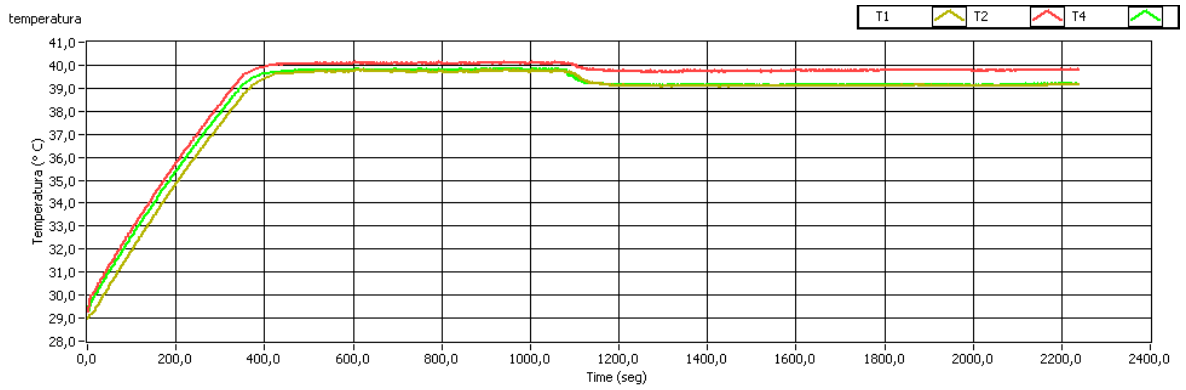


Figura 55. Calor de entrada y salida de la prueba 1

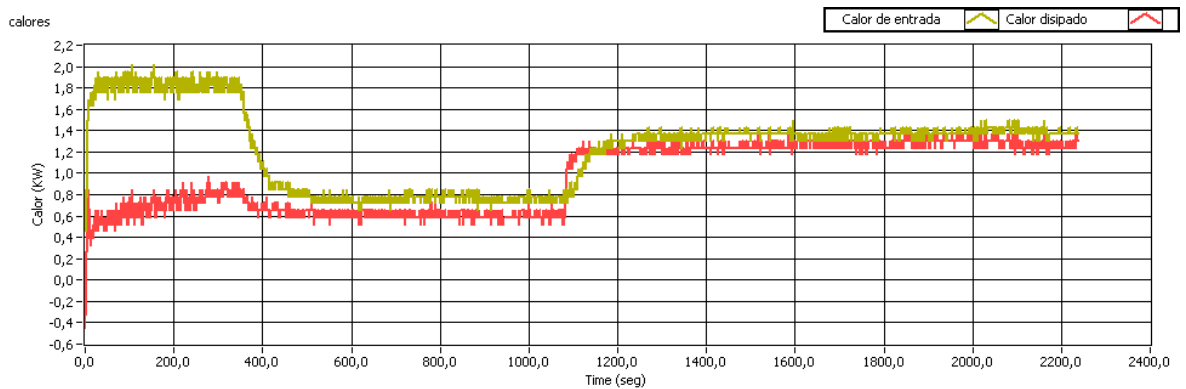


Figura 56. Perturbación por medio del cambio de voltaje en los ventiladores de la prueba 1

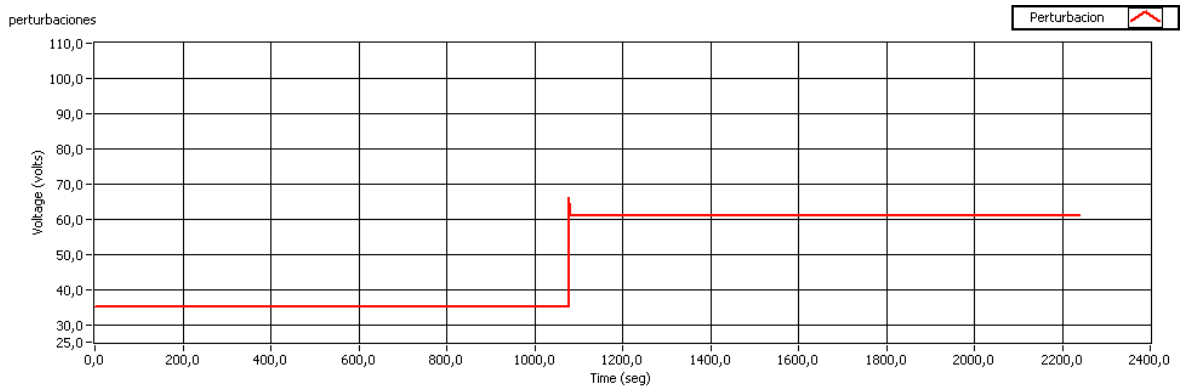
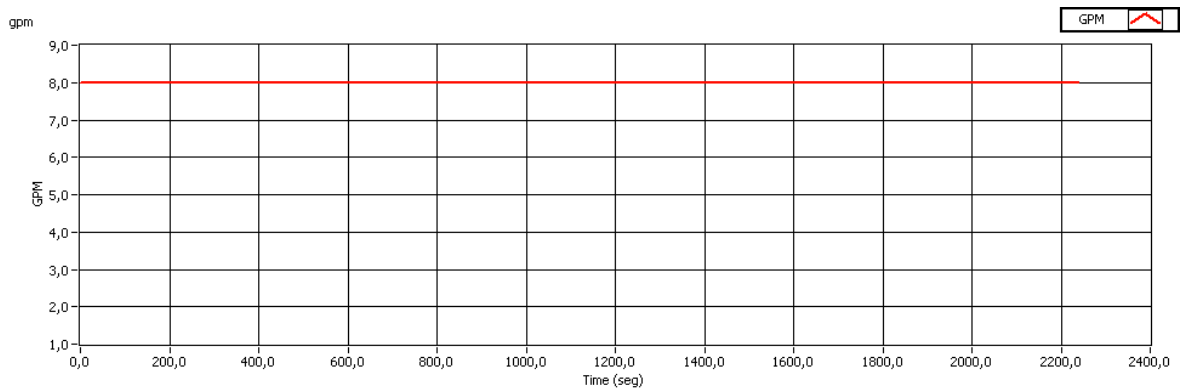


Figura 57. Caudal del fluido de trabajo del sistema de la prueba 1



Al iniciar la prueba, la temperatura en todos los puntos del sistema es la temperatura ambiente. Al poner el interruptor de la interface de LabView en start, y teniendo una configuración de control de temperatura por medio del suministro de calor, con un Setpoint de 40°C, el control PID empieza a actuar enviando un máximo de 210 voltios al calefactor, lo que equivale a un calor de entrada de 1.8 Kw. Los ventiladores inicialmente son alimentados con un voltaje de 35 voltios, lo que hace que la velocidad del flujo del aire a través del radiador sea en promedio de 0.01 m/seg; esto es equivalente a un flujo másico de 0,001811 Kg/seg. Con el voltaje máximo en el calefactor eléctrico y con los ventiladores manteniendo un flujo mínimo de aire, en promedio el sistema tiene una entrada de calor de 1.1 Kw

de potencia. Esta entrada de calor genera un incremento de temperatura en todos los puntos del sistema. A medida que la temperatura va aumentando y acercándose a los 40°C, la acción del control del PID disminuye lentamente el voltaje en el calefactor eléctrico. Con la disminución del voltaje de en el calefactor, disminuye el calor neto que entra al sistema, haciendo que el cambio de temperatura del agua con respecto al tiempo disminuya. El controlador PID logra poner el calefactor en un voltaje promedio de 90 voltios, logrando igualar los calores de entrada con los de salida en un valor de aproximadamente 0.7 Kw. En este punto el sistema se estabiliza y la temperatura del agua permanece constante. Después de transcurrido un lapso de aproximadamente 10 minutos el sistema es perturbado por medio de un cambio en el voltaje de los ventiladores, generándose un proceso transitorio en el sistema térmico. Los ventiladores sufren un aumento de 35 a 60 voltios, esto ocasiona que la velocidad del flujo del aire aumente de 0.01m/seg a 0.5m/seg, lo que equivale a que incremente el flujo másico del aire a 0,07247 Kg/seg. Al aumentar el \dot{m} del aire, el coeficiente total de transferencia de calor del radiador aumenta; esto quiere decir que, en el instante en que se aumenta el voltaje de los ventiladores, aumenta el calor disipado por el sistema de un valor de 0.6 Kw a un valor de 1.2 Kw, superándose el calor que sale al que entra en ese instante. Al ser más el calor disipado por el sistema térmico, la temperatura de este tiende a disminuir, pero gracias a la oportuna acción del controlador la temperatura se mantiene constante. En el instante en que hay un aumento en el error, entre el Setpoint y el valor censado por la termocupla 2, el controlador PID manda la orden para que aumente el voltaje del calefactor de 90 a 160 voltios, de tal forma que se pueda compensar el aumento en la disipación de calor. Con un voltaje de 160 voltios en el calefactor, el sistema ahora tiene una entrada de calor de 1.3 Kw, que es aproximadamente el mismo valor disipado en todo el sistema térmico. Al igualarse los calores del sistema térmico, este vuelve a pasar a un estado estable y esto gracias a la oportuna acción del sistema de control automático.

De los resultados obtenidos de la prueba realizada, por medio de los anteriores gráficos, se puede resaltar las siguientes observaciones:

- Al iniciar la prueba, en la curva de temperatura, la pendiente de esta depende del calor neto de entrada al sistema, que es la diferencia entre el calor de entrada y el calor de salida. Entre más sea el calor neto más rápido se calentará el agua, y por lo tanto mayor va a ser la pendiente de la curva. Al acercarse al punto de consigna, disminuirá el calor neto que entra al sistema y esto se evidencia con el cambio de la pendiente de la curva temperatura.
- El calor de entrada tiende a permanecer constante, al contrario del calor de salida que sufre un pequeño incremento. Este comportamiento es lógico ya que el calor disipado por el radiador depende del diferencial de temperatura de los dos fluidos aire y agua. Al aumentar la temperatura del agua en la entrada del radiador, aumentará entonces el delta de temperatura y por ende el calor disipado por el radiador.
- Cuando el sistema se estabiliza después de la perturbación, los diferenciales de temperatura tanto del calefactor (T_2-T_1) como el del intercambiador de calor (T_2-T_4) aumenta. Esto es lógico ya que el punto donde el sistema se estabiliza, después de los procesos transitorios, los calores de entrada y de salida aumentan.
- En la gráfica donde se muestra los calores de entrada y salida, se hace evidente que las curvas no se igualan completamente cuando el sistema se estabiliza, como era de esperarse. Esto resulta lógico ya que las curvas solo representan los calores que entran y salen en el calefactor eléctrico y en el intercambiador; además del calor expulsado por el intercambiador, hay que tener también en cuenta el calor que se pierde en las tuberías y tanque del sistema térmico. Como hay presente un calor de pérdida por los accesorios, la suma de este con el calor disipado por el intercambiador tiene que ser igual al calor que entra a través del calefactor eléctrico cuando el sistema se estabiliza. Por este motivo el calor de salida en el intercambiador es menor al de entrada cuando el sistema está estabilizado.

Prueba 2: Sin un control PID de temperatura.

El comportamiento del sistema térmico para procesos estables, y transitorio generados por perturbaciones de disipación de calor, cuando no hay presente un control de temperatura, se muestra en las siguientes figuras:

Figura 58 Control automático de la prueba 2

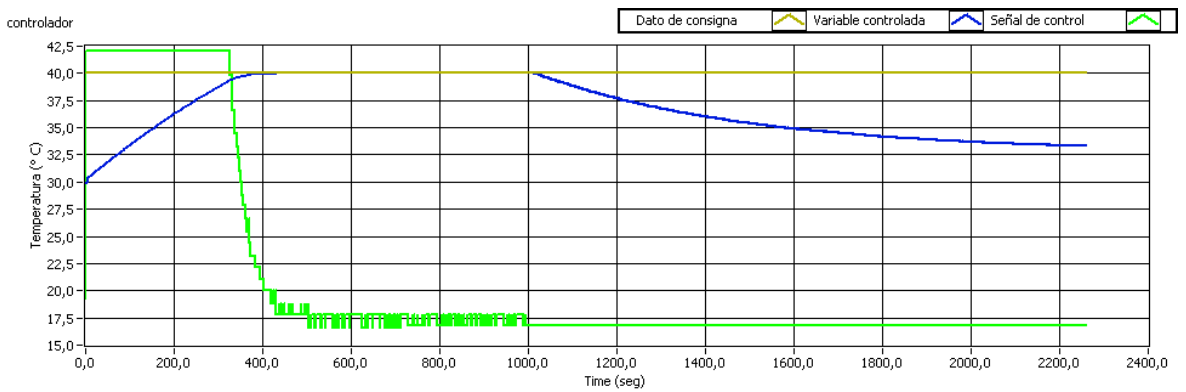


Figura 59 Señal de control de la prueba 2

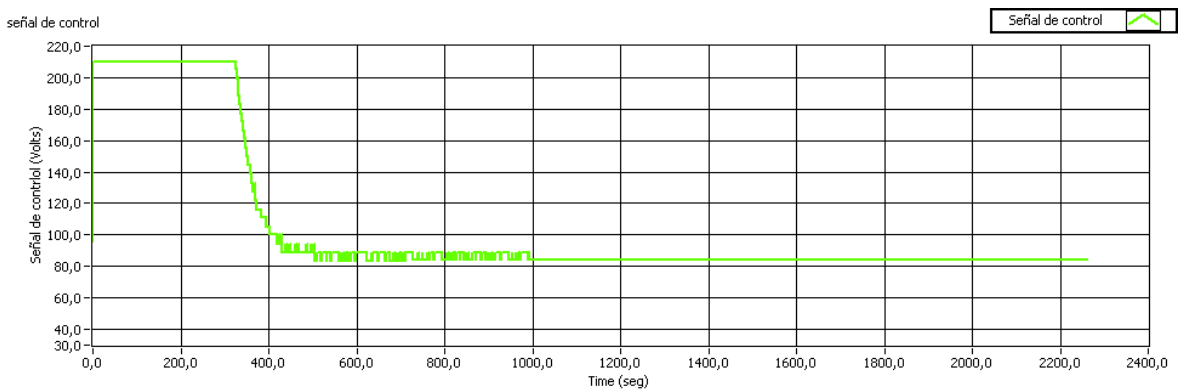


Figura 60 Temperatura de la prueba 2

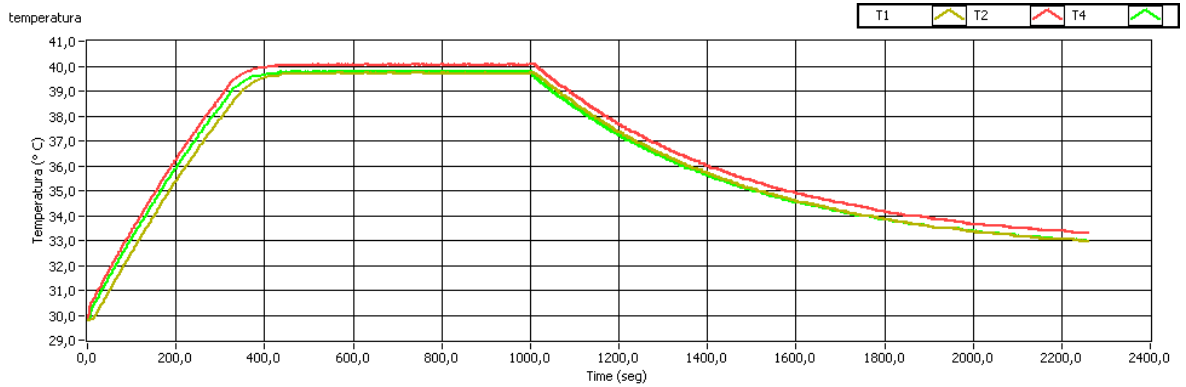


Figura 61 Calor de entrada y salida de la prueba 2

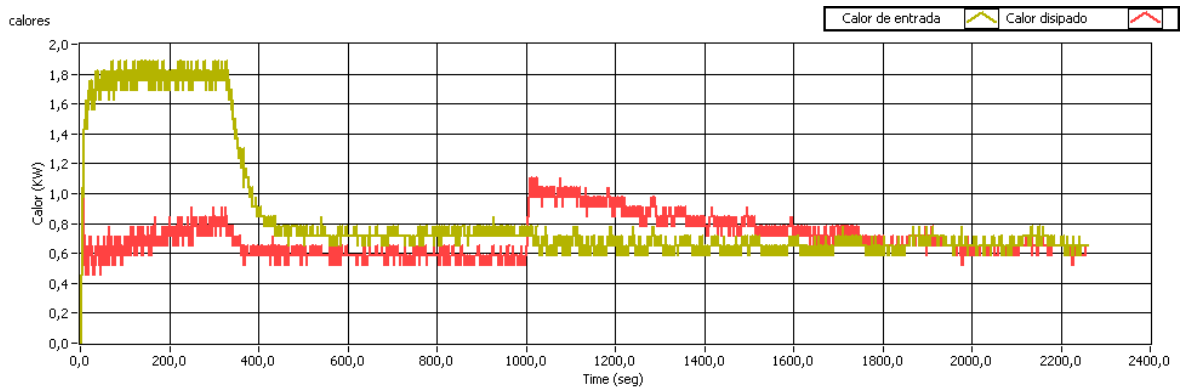


Figura 62 Perturbación por medio del cambio de voltaje en los ventiladores de la prueba 2

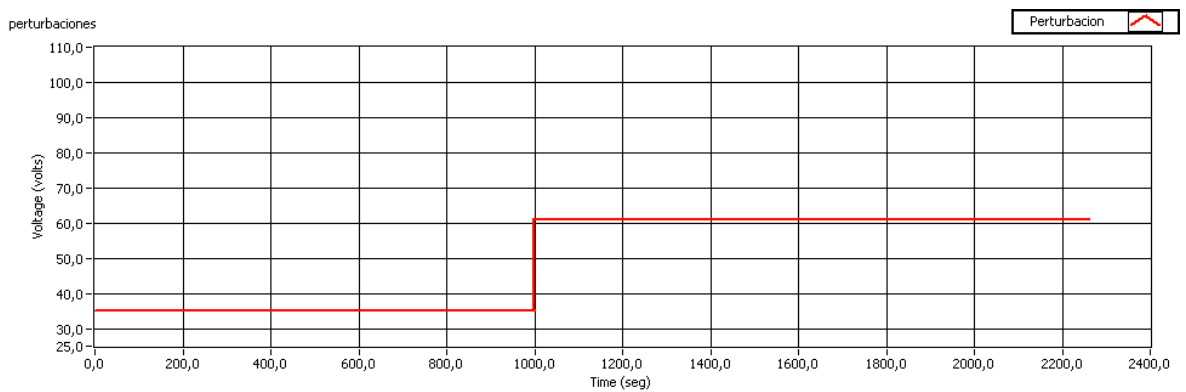
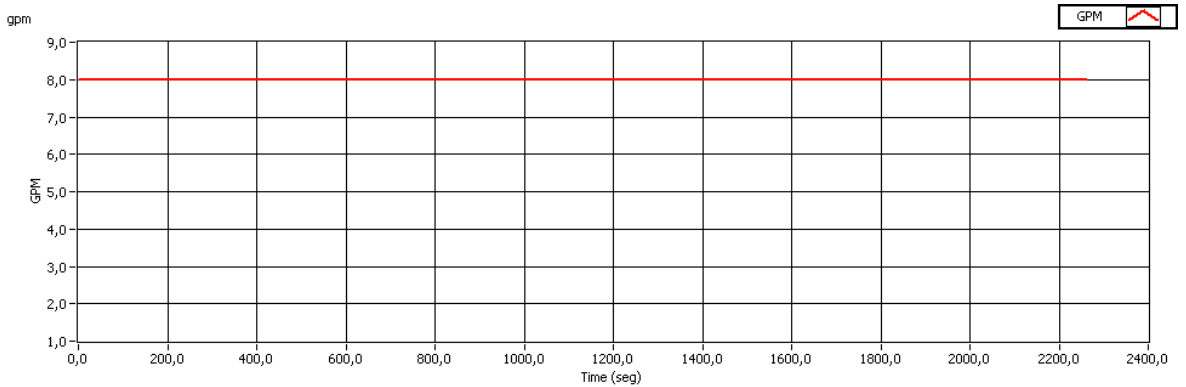


Figura 63 Caudal del fluido de trabajo del sistema de la prueba 2



En esta prueba se tienen las mismas condiciones que en la prueba uno. Los voltajes iniciales que le llegan a los ventiladores son los mismos que en la prueba anterior, al igual que el régimen de flujo en el sistema térmico. La perturbación es la misma, disminuyendo el voltaje de los ventiladores al mismo valor, y aplicándolo en el mismo instante, de la prueba anterior. La única diferencia que hay en esta prueba con respecto a la anterior, es la ausencia de un control automático de temperatura, el cual es suspendido después de perturbar el sistema.

Inicialmente el control está presente, con el cual se estabiliza el sistema en los 40°C. Para hacer un análisis del comportamiento del sistema en un estado transitorio, justo después de implementar la perturbación, el control PID es desactivado desde la interface gráfica.

El comportamiento de la primera parte de la prueba, antes de implementar la perturbación, es el mismo al de la prueba anterior, lo cual era de esperarse. Cuando se produce la perturbación, el sistema se desestabiliza al sobrepasarse el calor de salida con el de entrada, y por lo tanto la temperatura empieza a cambiar, generándose un proceso transitorio en el sistema térmico. Como el controlador PID se desactivó antes de introducir la perturbación en el sistema, el voltaje del calefactor eléctrico se mantuvo en un valor constante de 83 voltios, lo que equivale

a un calor de entrada de 0.7 Kw. Como es más el calor que sale que el que entra, la temperatura del sistema tiende a disminuir. La temperatura continua disminuyendo, y con ella el calor que es disipado en el sistema, hasta un punto en el cual se igualan el calor de entrada con el de salida. Cuando el sistema se estabiliza, la temperatura del sistema disminuye en un promedio de hasta los 33°C, y en donde los calores tanto de entrada como de salida se mantiene en 0.7 Kw.

De esta prueba podemos hacer las siguientes observaciones:

- A pesar de que hay ausencia de un control PID, el sistema tiende a estabilizarse, pero con una gran desviación en la temperatura con respecto al punto de consigna.
- Después de implementada la perturbación, la rapidez con que se disminuye la temperatura depende de la diferencia entre los calores de entrada y salida. A medida que se van igualando los calores; la temperatura empieza a disminuir con más lentitud, por lo cual la pendiente de la curva tiende a ser una horizontal para los valores cercanos a los 33°C.
- La pendiente de la curva temperatura, después de la perturbación, cambia con respecto al tiempo debido a la caída del calor disipado por el radiador; a diferencia del comportamiento casi lineal, de la temperatura al comienzo de la prueba.

4.1.1.2 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio del cambio en el régimen de flujo del fluido de trabajo. En las pruebas anteriores se generaron procesos estables y transitorios con la aplicación de un control automático por medio de la manipulación del calefactor eléctrico, y la implementación de perturbaciones a través del cambio del voltaje en los ventiladores. En esta parte de las pruebas que se realizaron se continúa con el mismo sistema de control, pero se cambia el medio con el cual se implementan las perturbaciones. Las perturbaciones realizadas en este grupo de pruebas se

realizaron por medio del cambio en régimen de caudal del fluido, manteniendo siempre constante el voltaje de los ventiladores. Se registró y analizó el comportamiento de los procesos transitorios, tanto cuando hay un control presente de temperatura, como cuando no lo hay.

Prueba 3: Con un control PID de temperatura.

El comportamiento del sistema térmico para los procesos estables y transitorios, generados a través de una perturbación por el cambio del caudal, cuando en todo momento hay presente un control, se muestra en las siguientes figuras:

Figura 64 Control automático de la prueba 3

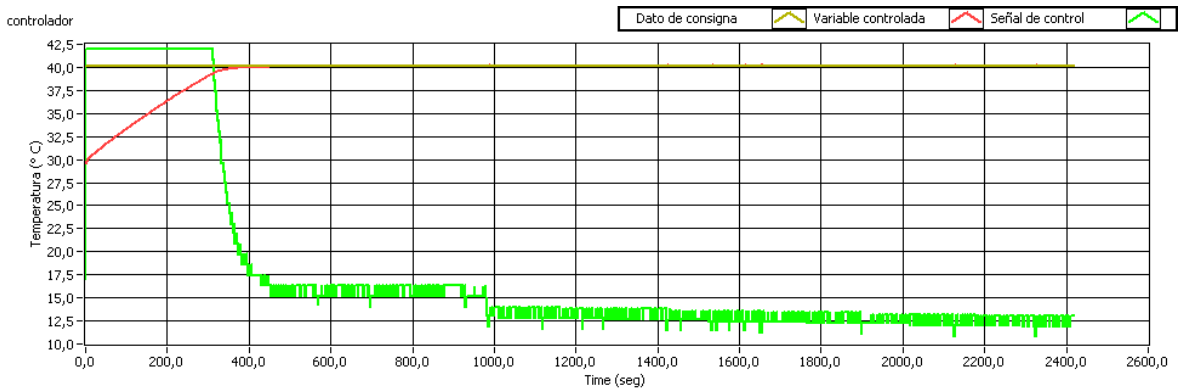


Figura 65 Señal de control de la prueba 3

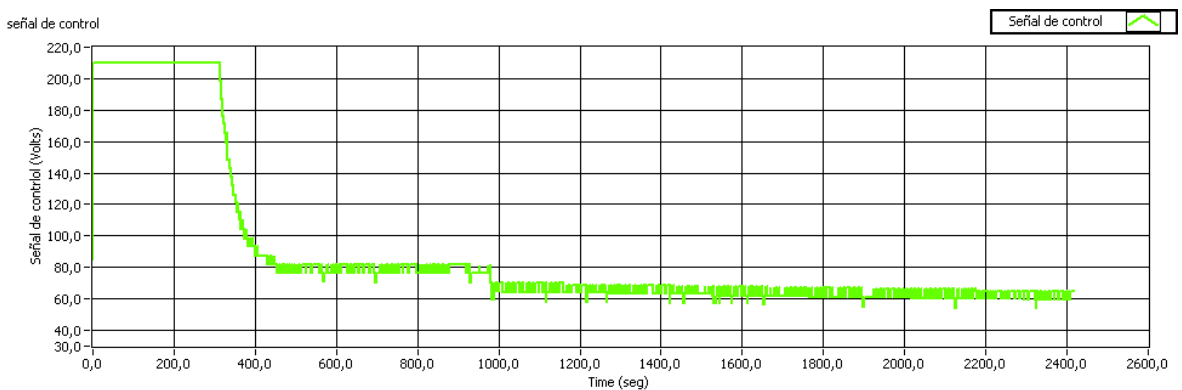


Figura 66 Temperaturas de la prueba 3

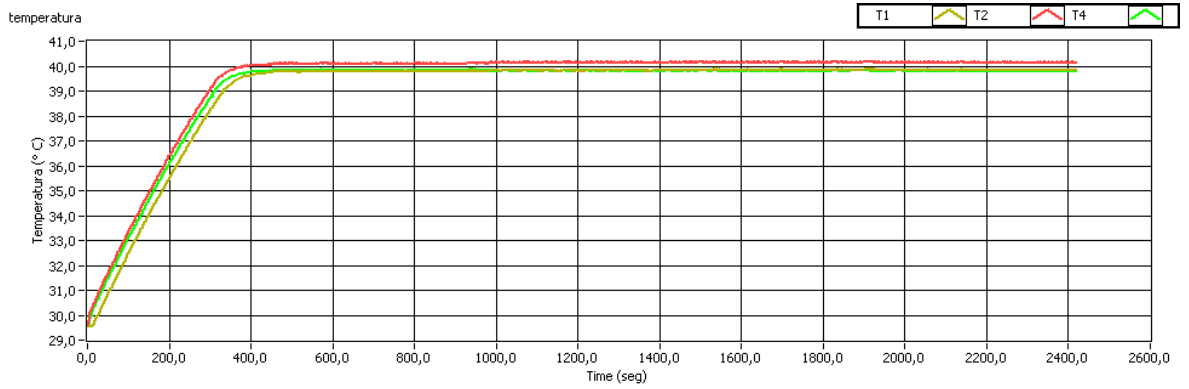


Figura 67 Calor de entrada y salida de la prueba 3

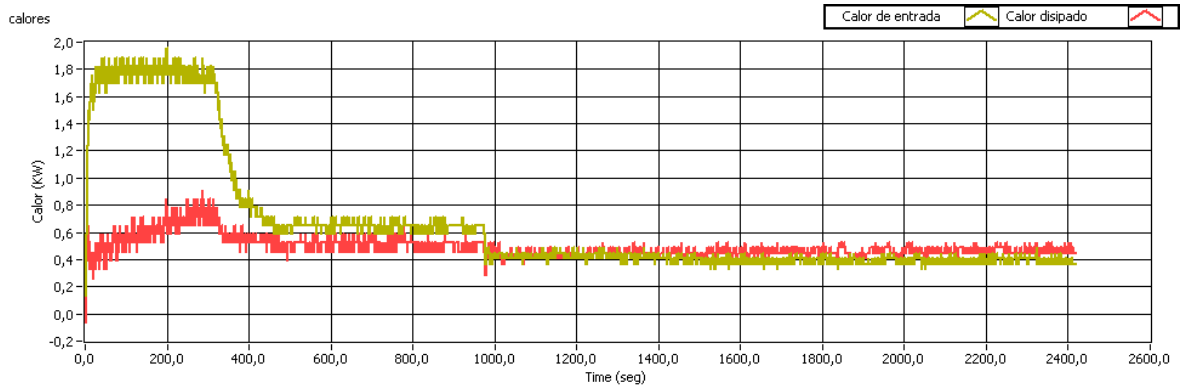


Figura 68 Perturbación por medio del cambio en el caudal de la prueba 3

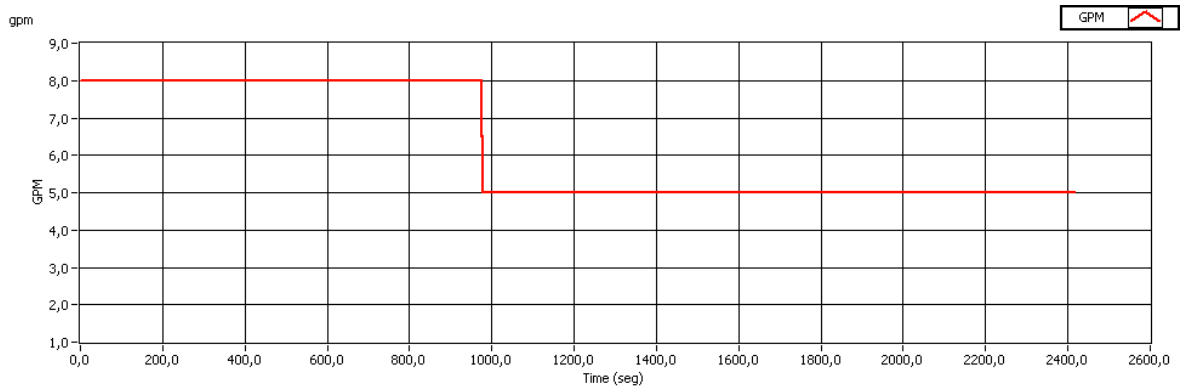
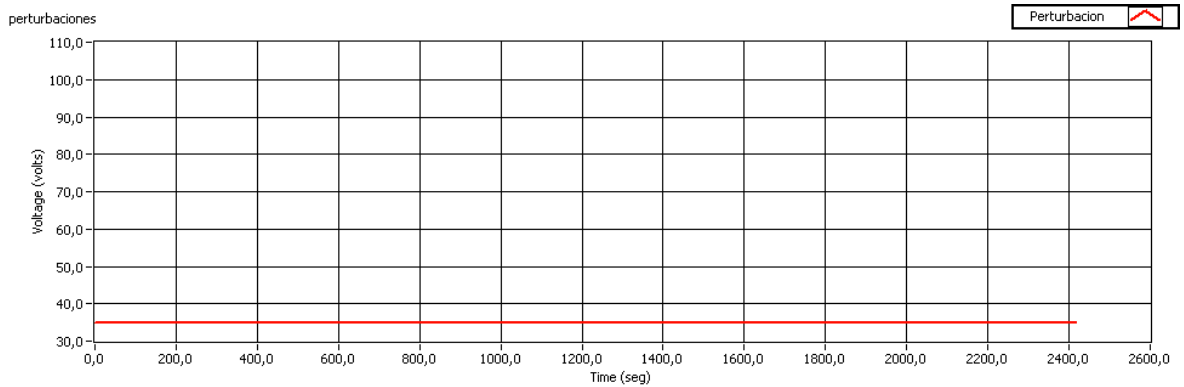


Figura 69 Voltaje en los ventiladores de la prueba 3



Al igual que en las pruebas anteriores, en la primera parte de la prueba, el sistema se estabiliza en los 40° C con la aplicación del control automático. Los voltajes en los ventiladores son de 35 voltios los cuales se mantiene constantes en todo el transcurso de la prueba; esto garantiza un flujo constante de 0,0018 Kg/seg de aire a través del radiador. El régimen del caudal en esta etapa de la prueba se mantiene en un valor de 8GPM. El sistema se estabiliza cuando los calores de entrada y salida tiene un valor aproximado de 0.53 Kw. Posteriormente, con el sistema ya estabilizado, se introduce una perturbación al cambiar el caudal a 5 GPM. Con la perturbación el sistema tiende a disminuir la temperatura, pero esta se mantiene constante con ayuda del control automático. El control PID hace una oportuna acción sobre el voltaje del calefactor, cambiándolo de 80 a 69 voltios. El sistema se estabiliza al igualarse los calores de entrada y salida en un valor de 0.47 Kwatt, el cual es un poco menor a los calores antes de la perturbación.

De los procesos generados en el sistema se puede hacer las siguientes observaciones:

- El cambio del voltaje por parte de la acción de control, para mantener la temperatura constante, es muy pequeño en comparación con las pruebas anteriores.

- Por la acción de control, el voltaje en el calefactor disminuye, lo cual quiere decir que el calor de entrada disminuye. Esto resulta lógico, ya que al disminuir el caudal disminuye el coeficiente total de transferencia de calor y por ende el calor que disipa el radiador; también con un menor caudal, el flujo de agua tendrá más oportunidad de ganar calor cuando este cruza el calefactor eléctrico. Por lo tanto para mantener constante la temperatura es necesario disminuir el voltaje en el calefactor.
- El punto donde se estabiliza el sistema, con respecto a los calores de entrada y salida, después de la perturbación, no cambia mucho, lo cual concuerda con el cambio de voltaje en el calefactor. Esto quiere decir que tanto la temperatura del sistema, como los calores de entrada y salida, no tiene tanta dependencia con el flujo de agua en el sistema térmico.

Prueba 4: Sin un control PID de temperatura.

El comportamiento del sistema térmico para procesos estables y transitorios generados por perturbaciones a través del cambio del caudal, cuando no hay presente un control de temperatura, se muestra en las siguientes figuras:

Figura 70 Control automático de la prueba 4

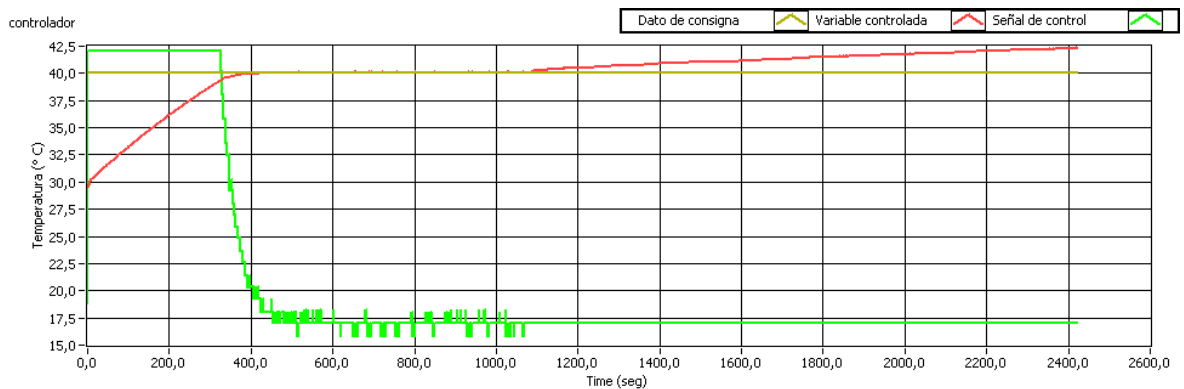


Figura 71 Señal de control de la prueba 4

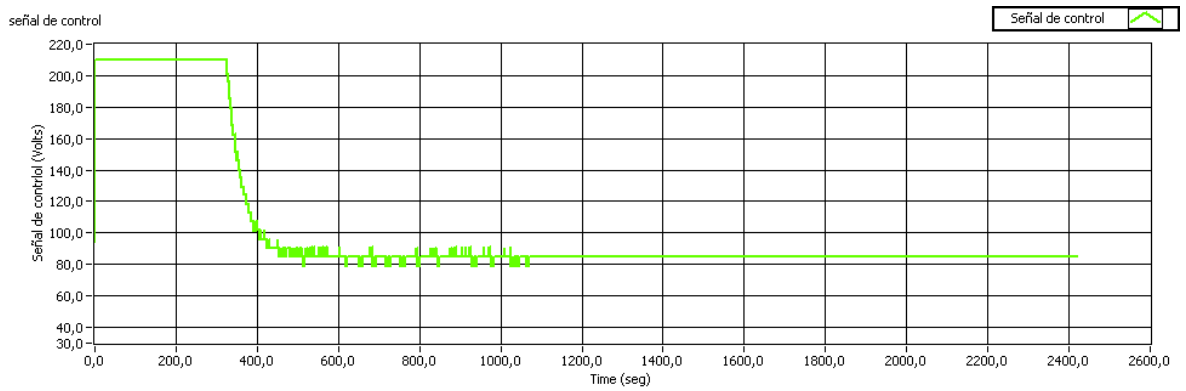


Figura 72 Temperatura de la prueba 4

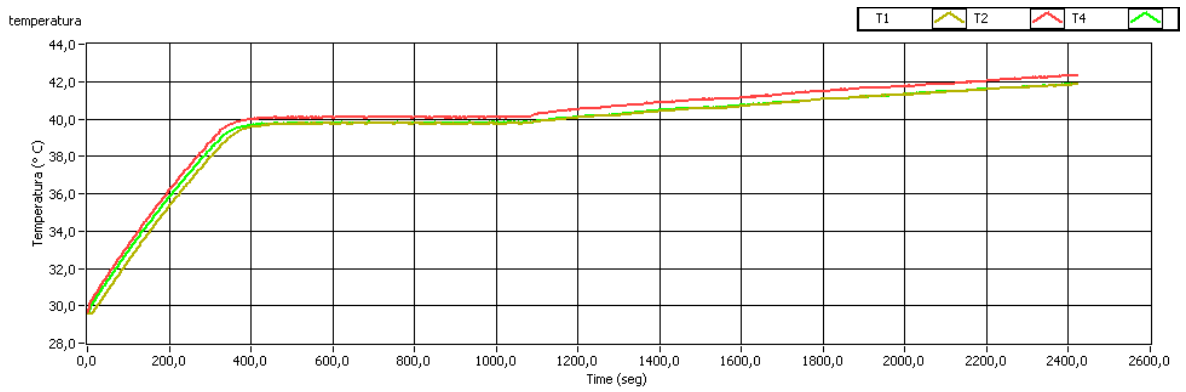


Figura 73 Calor de entrada y salida de la prueba 4

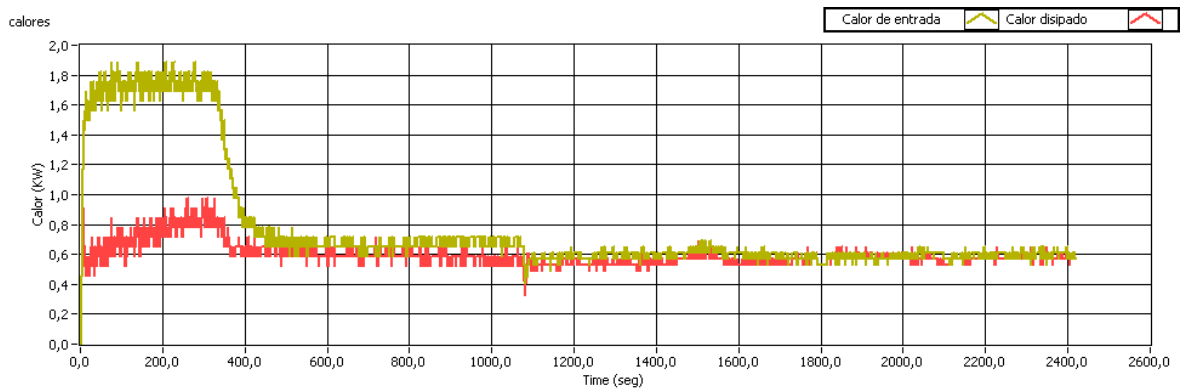


Figura 74 Perturbación por el cambio en el régimen del caudal de la prueba 4

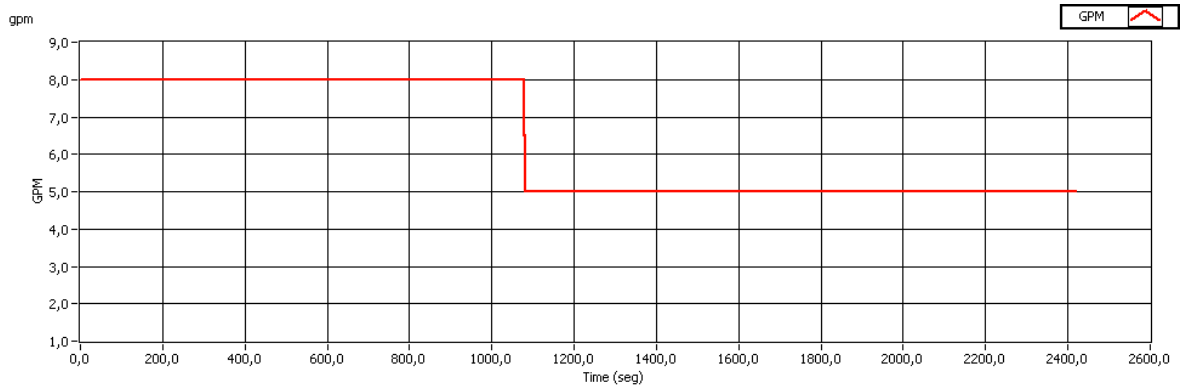
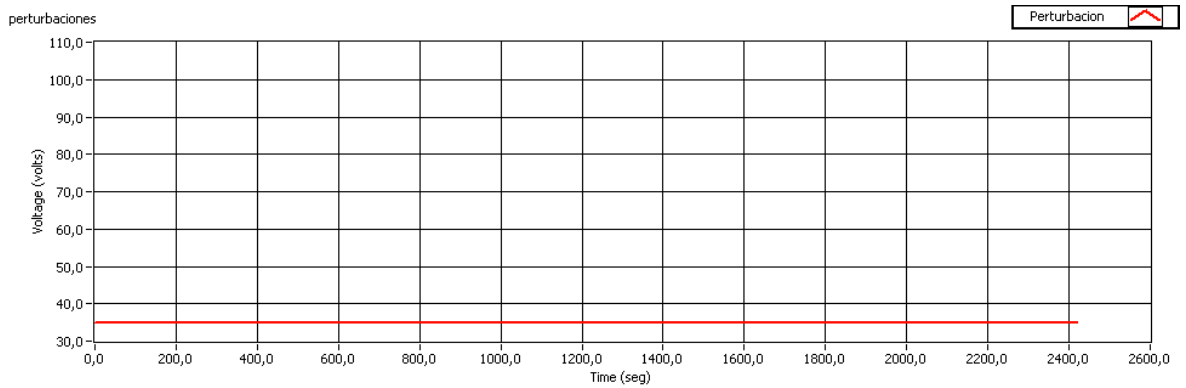


Figura 75 Voltaje en los ventiladores de la prueba 4



Se vuelve a repetir la prueba, manteniendo las mismas condiciones iniciales de la prueba 3. Después de que el sistema está estabilizado, se desactiva el controlador PID para luego perturbar el sistema por medio del cambio del caudal. El caudal se cambia de la misma forma que se hizo en la prueba anterior. Con el cambio de caudal y la ausencia de un control PID, la temperatura tiende a aumentar en el sistema hasta los 42°C, debido a la disminución del coeficiente total de transferencia de calor en el radiador. Los calores de entrada y salida disminuye un poco con respecto a la parte inicial de la prueba.

De esta prueba se puede resaltar resaltar que:

- La desviación en la temperatura cuando se perturba el sistema con el caudal, y no hay presente un control de temperatura, no es muy grande, si lo comparamos con los resultados obtenidos en la prueba 2.
- El comportamiento de la curva temperatura después de la perturbación es aproximadamente lineal. Esto es debido a un comportamiento constante en los calores de entrada y salida.
- Se puede concluir que el cambio de los calores de entrada y salida es nulo después de la perturbación. Esto concuerda con la pequeña velocidad con que cambia la temperatura en el sistema cuando esté es perturbado (aproximadamente 2°C en dos minutos).

4.1.2 Control de temperatura por medio de la disipación de calor al sistema

Los resultados analizados en la sección anterior corresponden a las pruebas realizadas con la aplicación de un control por medio del suministro de calor. En esta sección se analizarán todas las pruebas hechas, cuando se aplicó un sistema de control por medio de la disipación de calor. En este sistema de control el medio actuador para controlar la temperatura son los ventiladores del radiador. Además, el punto donde se controla la temperatura corresponde a la salida del radiador (T4).

4.1.2.1 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio del suministro de calor. Como ya se mencionó el control utilizado para esta prueba utiliza los ventiladores como elemento actuador. Por tal motivo, la forma para perturbar el sistema y generar los procesos transitorios es el cambio del voltaje en el calefactor eléctrico. Se analizaron los comportamientos del sistema térmico cuando hay presente un control de temperatura, y cuando no lo hay.

Prueba 5: Con un control PID de temperatura.

El comportamiento del sistema térmico para procesos estables, y transitorio generados por perturbaciones por medio del suministro de calor, cuando hay presente un control de temperatura, se muestra en las siguientes figuras:

Figura 76 Control automático de la prueba 5

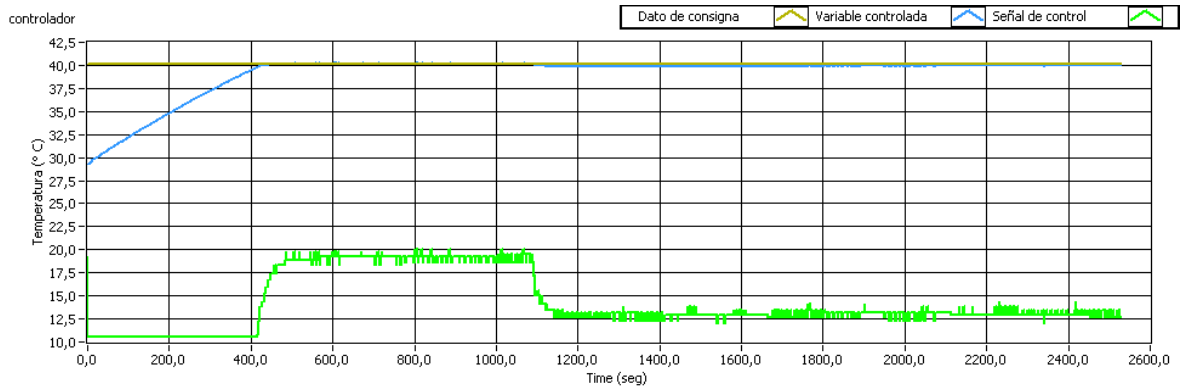


Figura 77 Señal de control de la prueba 5

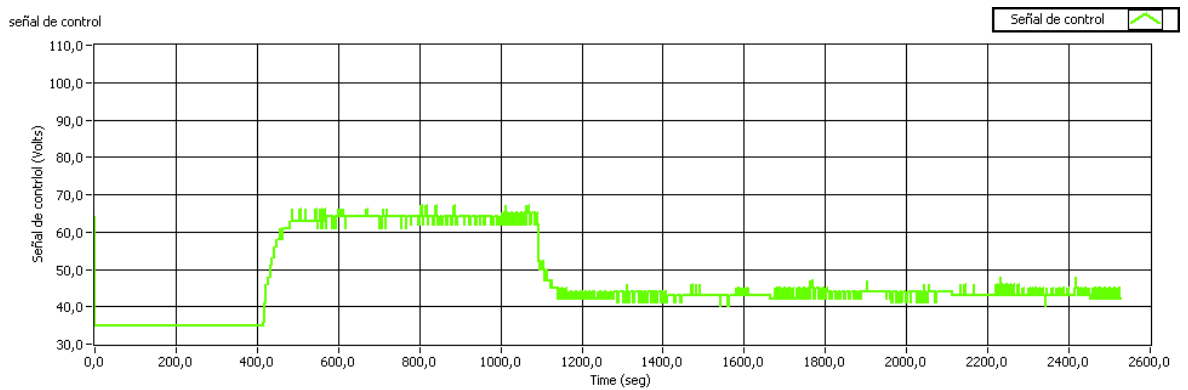


Figura 78 Temperatura de la prueba 5

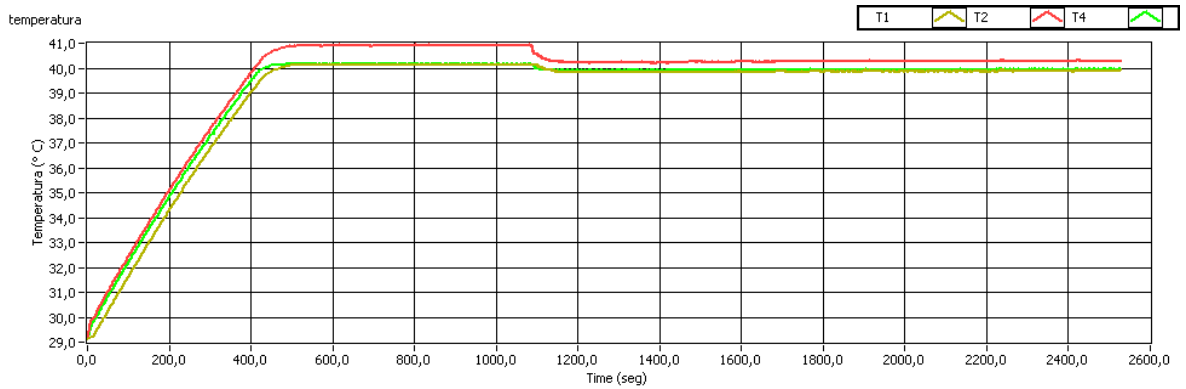


Figura 79 Calores de entrada y salida de la prueba 5

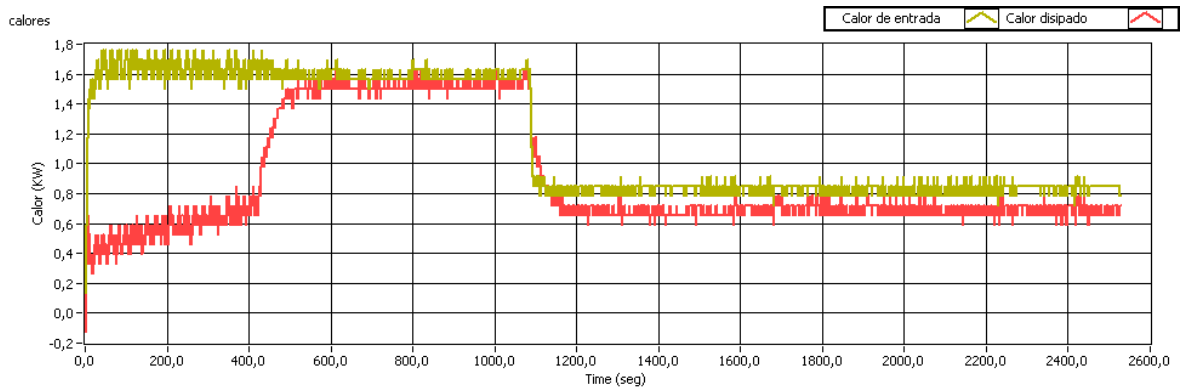


Figura 80 Perturbación por medio del suministro de calor en la prueba 5

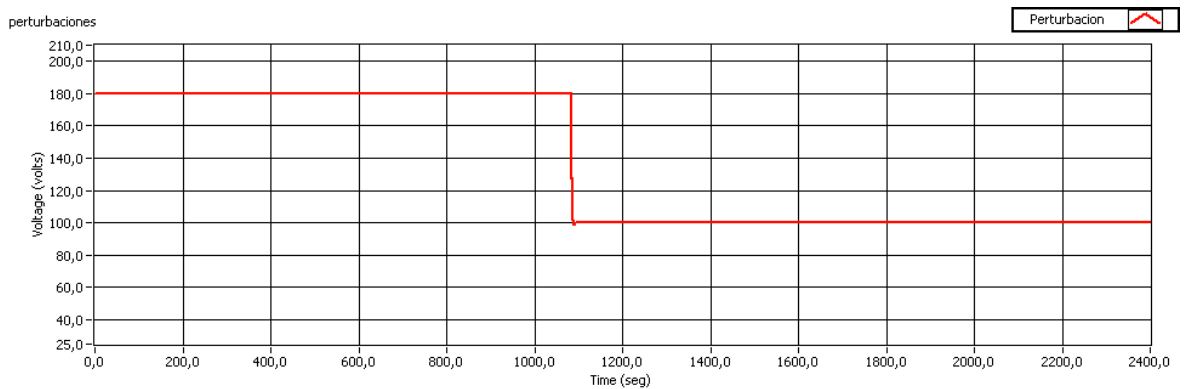
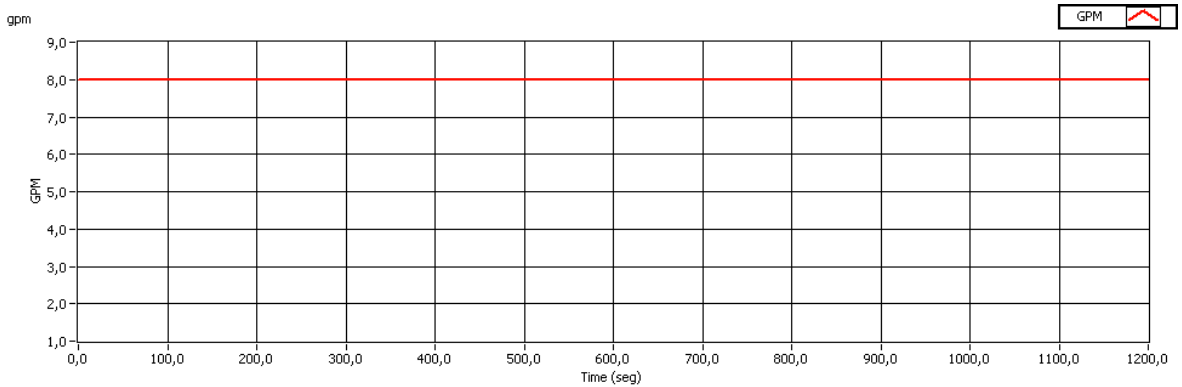


Figura 81 Régimen de caudal en la prueba 5



Al igual que en las otras pruebas, en esta se comienza con estabilizar el sistema térmico en una temperatura de 40°C, con la diferencia que ahora el punto, donde se controla la temperatura, es en la salida de radiador, es decir T4. El voltaje del calefactor, la cual en esta ocasión no está bajo la influencia del control, se ajusta en un valor de 180 voltios. El caudal del flujo de agua está en 8 GPM. Al iniciar la prueba, el control automático dará la orden para que le llegue el mínimo voltaje a los ventiladores (35 voltios), esto ocasionará que la temperatura del agua en el sistema incremente debido a la gran diferencia entre el calor de entrada y salida. Cuando la temperatura se aproxima a los 40°C, el control automático aumenta el voltaje en los ventiladores, ocasionando que los calores de entrada y salida se igualen, estabilizándose el sistema. Cuando el sistema se estabiliza, también el voltaje de los ventiladores lo hace en 65 voltios (esto equivale a un caudal de aire de 0.2 Kg/seg), y los calores de entra y salida se igualan aproximadamente en 1.55Kwatt. Al igual que en las pruebas anteriores los calores de entra y salida no se igualan por completo ya que hay pequeñas perdidas en la tubería y tanque. Después de estabilizar el sistema, y transcurrido el lapso de 10 minutos, el sistema es desestabilizado al cambiar el voltaje inicial de 180 voltios en el calefactor. Luego al calefactor se le disminuye el voltaje hasta los 100 voltios, por lo cual el calor de entrada, por un pequeño instante, disminuye por debajo del calor disipado; esto ocasionara que la temperatura tienda a disminuir. La pronta

acción en los ventiladores del radiador, por parte del control automático, disminuye el voltaje de estos, por lo cual se disminuye la velocidad del aire y por ende el calor que se disipa en el radiador. Al disminuir el calor disipado se compensa la disminución del calor que entra a través del calefactor, igualándose los calores de entrada y salida, lo que logra estabilizar el sistema y mantener la temperatura constante. Los calores de entrada y salida se igualan en un valor promedio de 0.75Kwatt. Para que la temperatura se mantenga constante, el PID mantiene los voltajes de los ventiladores en un valor promedio de 43 voltios, lo que equivale a un flujo másico de aire de 0.00544 Kg/seg.

De esta prueba hay que resaltar los siguientes aspectos:

- El comportamiento del calor de entrada permanece constante cuando hay un cambio en temperatura del sistema. A diferencia del calor de salida que cambia con la temperatura.
- Después de la perturbación se marca más la diferencia entre los calores de entrada y salida, en donde esta es de aproximadamente de 100 watt. En el comienzo de la prueba esta diferencia es un poco menor, de alrededor de los 50 watt.
- La temperatura T2 en esta ocasión sufre un pequeño desvío, que a diferencia de las pruebas anteriores, esta permanece constante, cuando el sistema está bajo la influencia de un control de temperatura.

Prueba 6: Sin un control PID de temperatura.

El comportamiento del sistema térmico para los procesos estables, y transitorios generados por perturbaciones por medio del suministro de calor, cuando no hay presente un control de temperatura, se muestra en las siguientes figuras:

Figura 82 Control de temperatura de la prueba 6

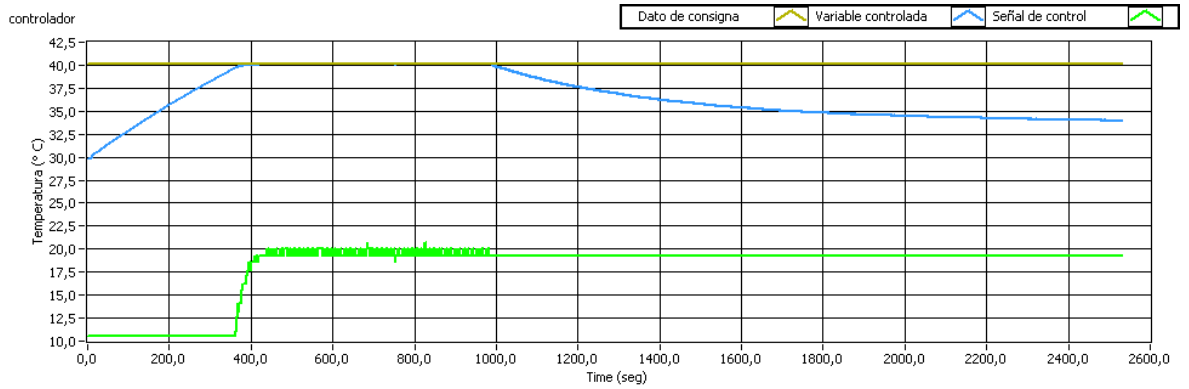


Figura 83 Señal de control de la prueba 6

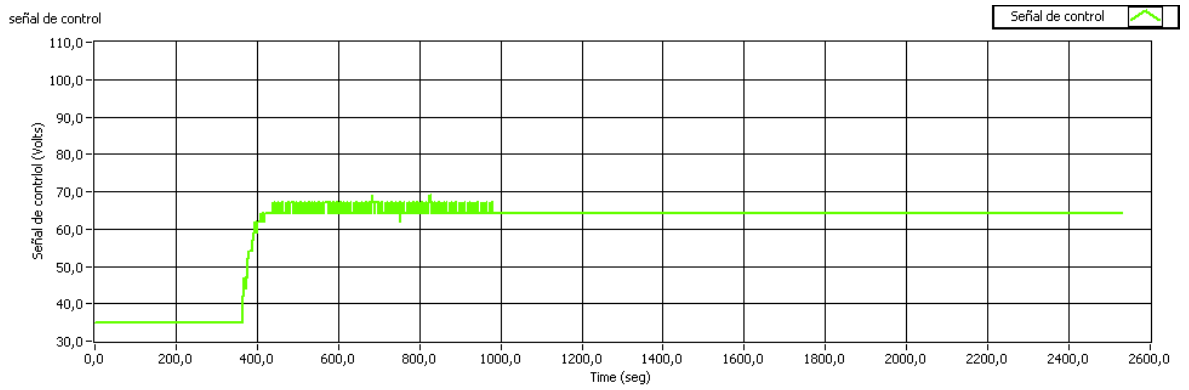


Figura 84 Temperatura de la prueba 6

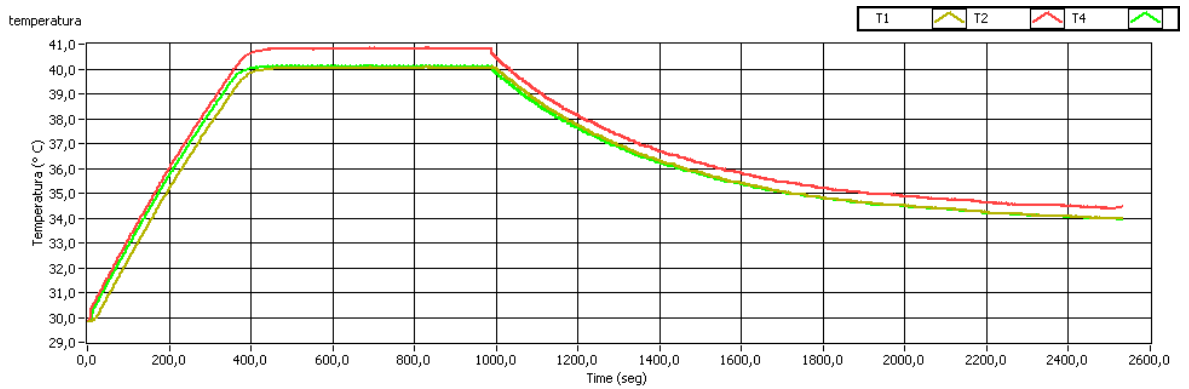


Figura 85 Calores de entrada y salida de la prueba 6

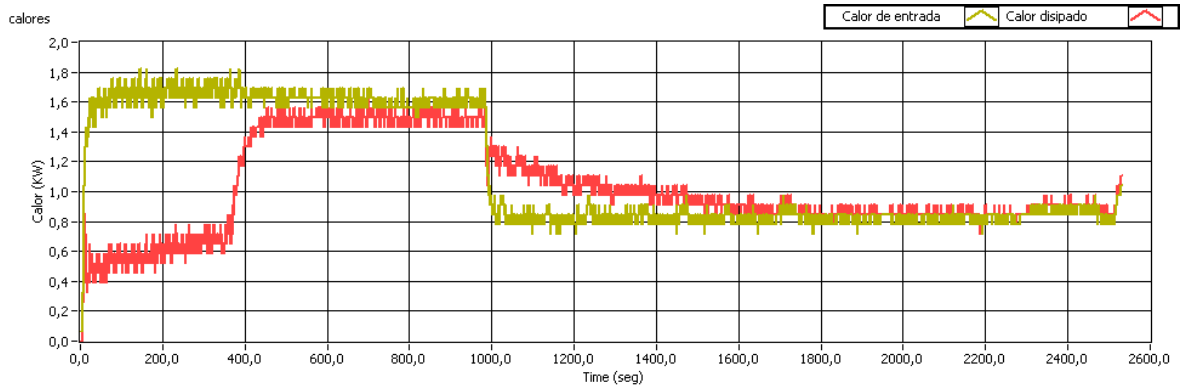


Figura 86 Perturbación por medio del suministro de calor en la prueba 6

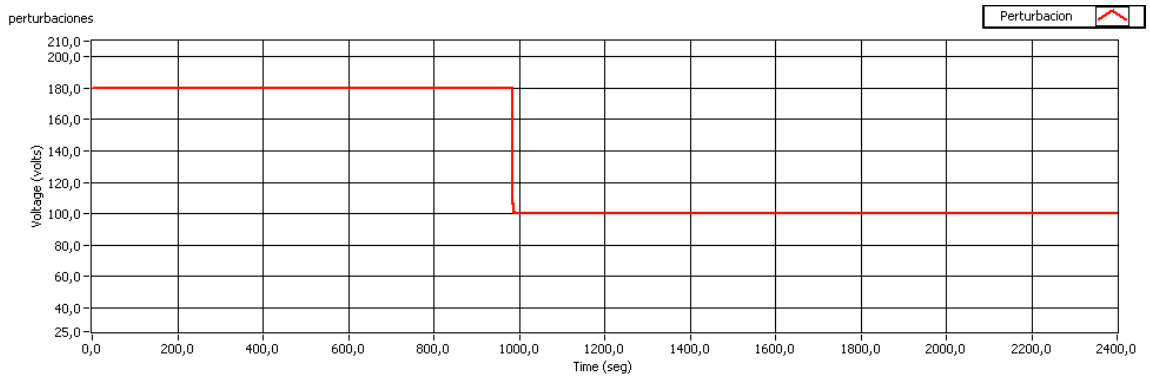
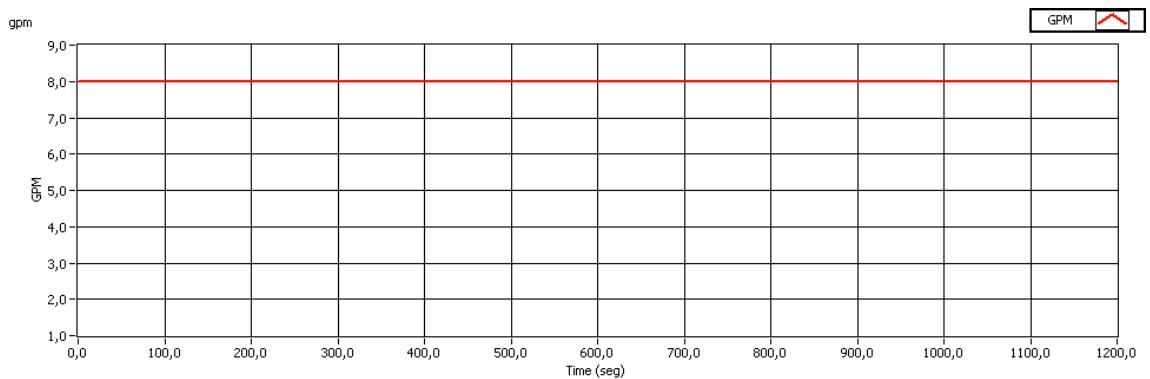


Figura 87 Régimen de caudal del fluido de trabajo en la prueba 6



Configurando el Setpoint en 40°C en el control automático, 180 voltios en el calefactor, y un régimen de caudal del fluido de trabajo en 8 GPM; se repiten las

condiciones de la prueba 5. El sistema se estabiliza después de poner en funcionamiento el controlador PID. En esta parte de la prueba, el comportamiento del sistema térmico es el mismo que se obtuvo en la prueba anterior. Después de que el sistema es estabilizado, se introduce un cambio en el voltaje de el calefactor, de la misma forma que se hizo en la prueba anterior, para perturbar el sistema y generar un proceso transitorio. Debido a la ausencia del control automático, la temperatura del sistema empieza a disminuir. Al reducir el voltaje del calefactor hasta los 100 voltios, el calor de salida supera al que entra, lo que genera un enfriamiento en el agua del sistema térmico. La temperatura del agua sigue disminuyendo hasta que el calor de salida se iguale con el de entrada. La temperatura tiende a estabilizarse en los 34°C.

4.1.3 Procesos transitorios implementados cuando se perturba el sistema por medio del cambio del régimen de flujo del fluido de trabajo. En esta sección se exponen los resultados de las dos últimas pruebas que se realizaron en el banco. En estas pruebas se continuó aplicando el control por medio de la disipación de calor, pero en esta ocasión la perturbación se hizo a través del cambio de caudal del fluido del sistema. Las dos pruebas realizadas corresponden, tanto para un control, como cuando el control es suspendido.

Prueba 7: Con un control PID de temperatura.

Figura 88 Control de temperatura de la prueba 7

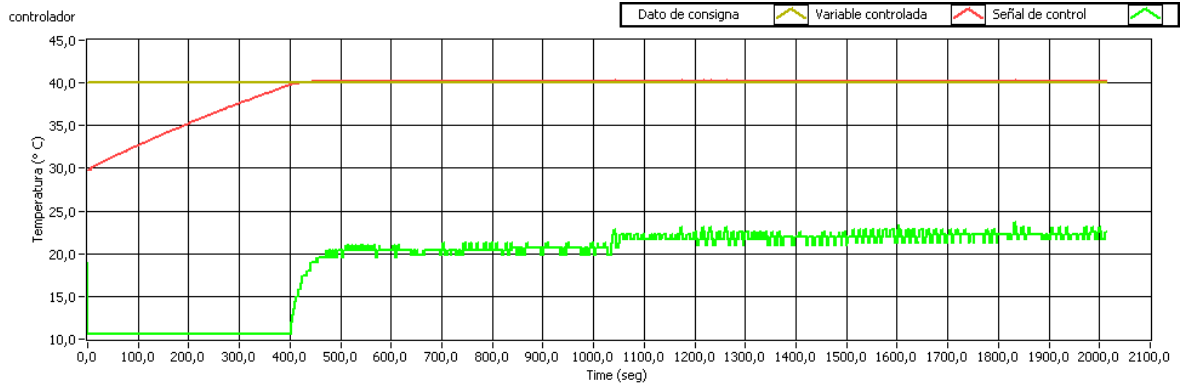


Figura 89 Señal de control de la prueba 7

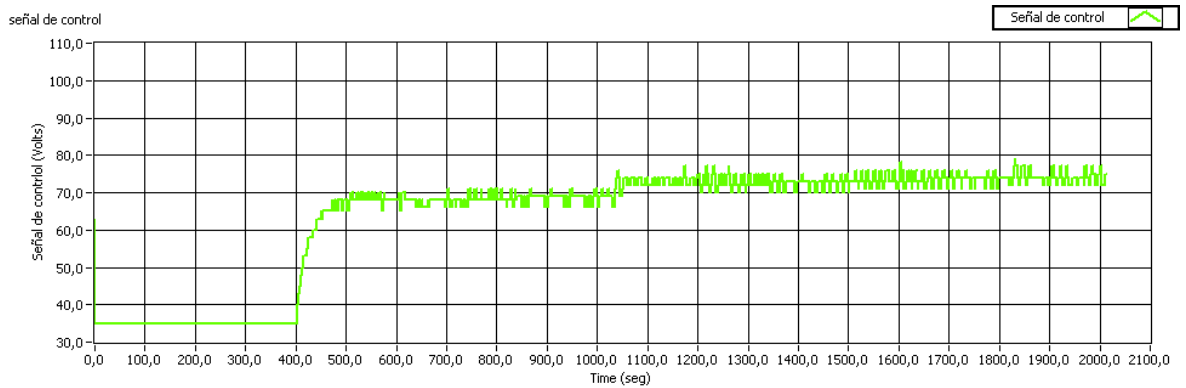


Figura 90 Temperatura de la prueba 7

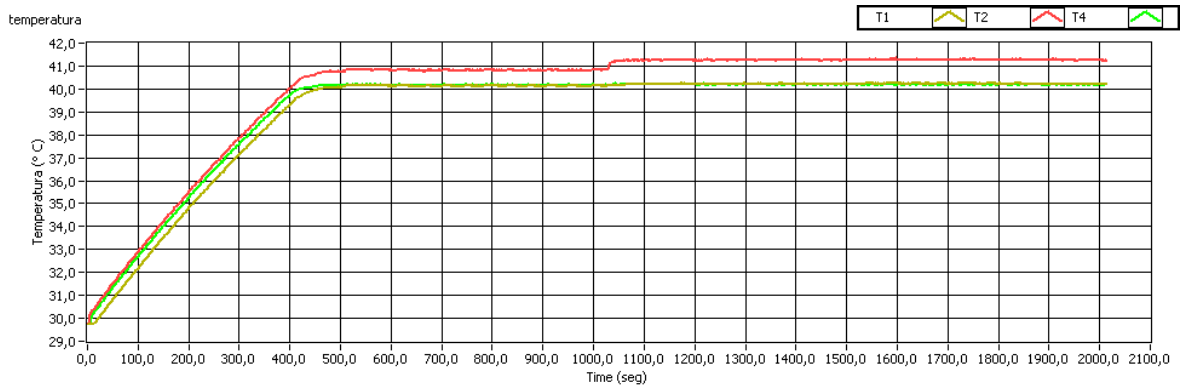


Figura 91 Calor de entrada y salida de la prueba 7

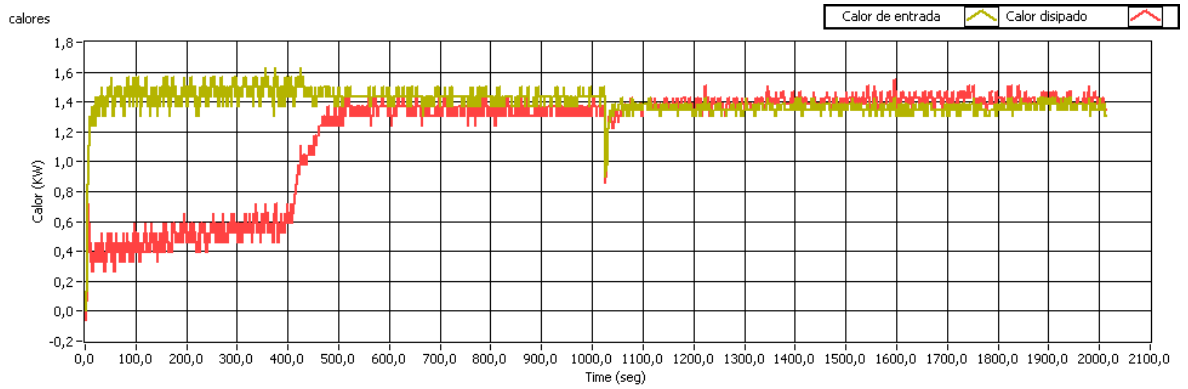


Figura 92 Perturbación por medio del cambio de caudal en la prueba 7

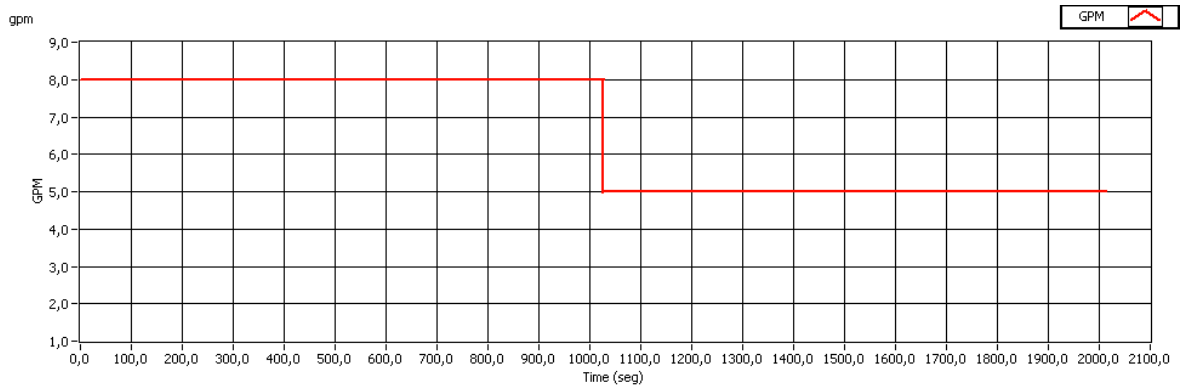
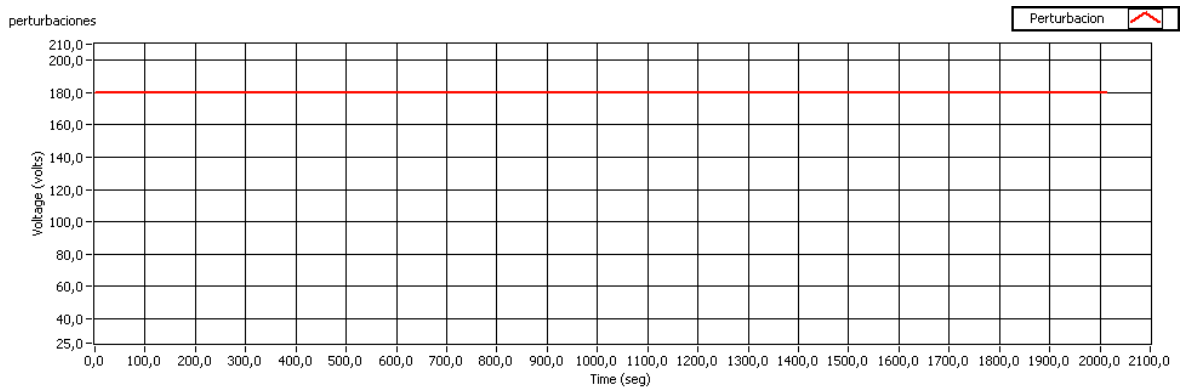


Figura 93 Voltaje de los ventiladores en la prueba 7



Prueba 8: Sin un control PID de temperatura.

Figura 94 Control automático de la prueba 8

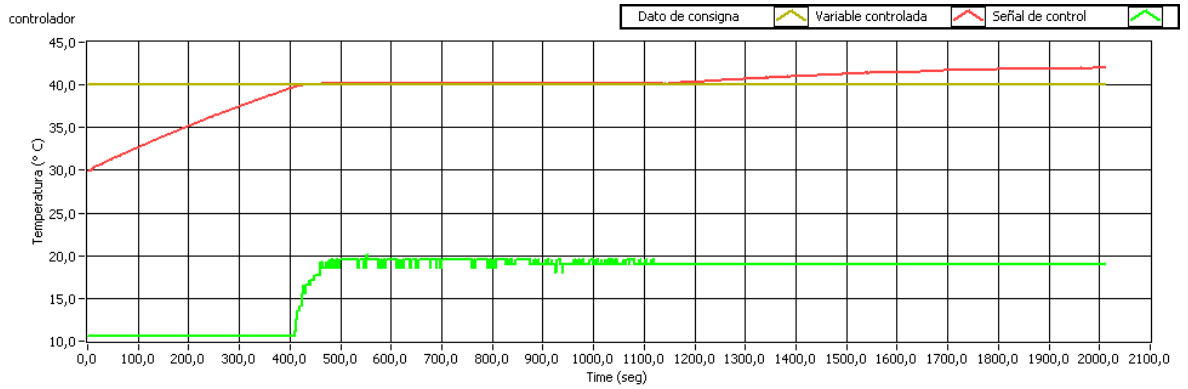


Figura 95 Señal de control de la prueba 8

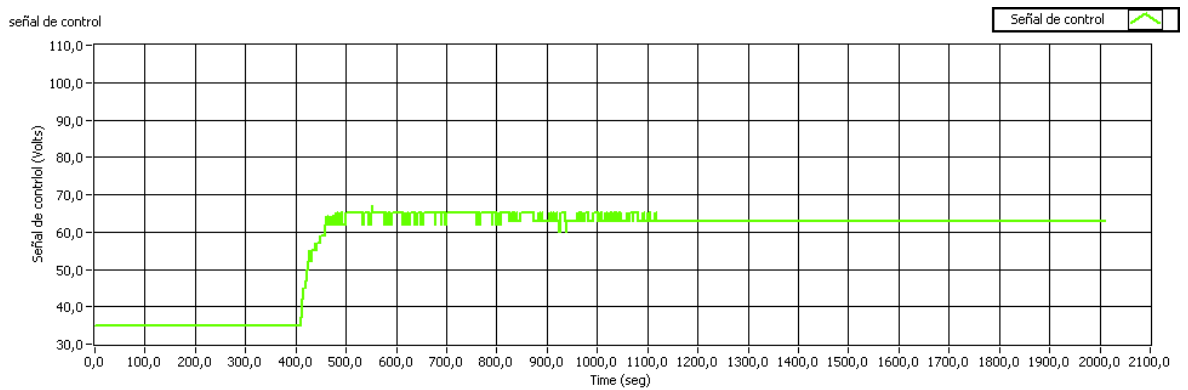


Figura 96 Temperaturas de la prueba 8

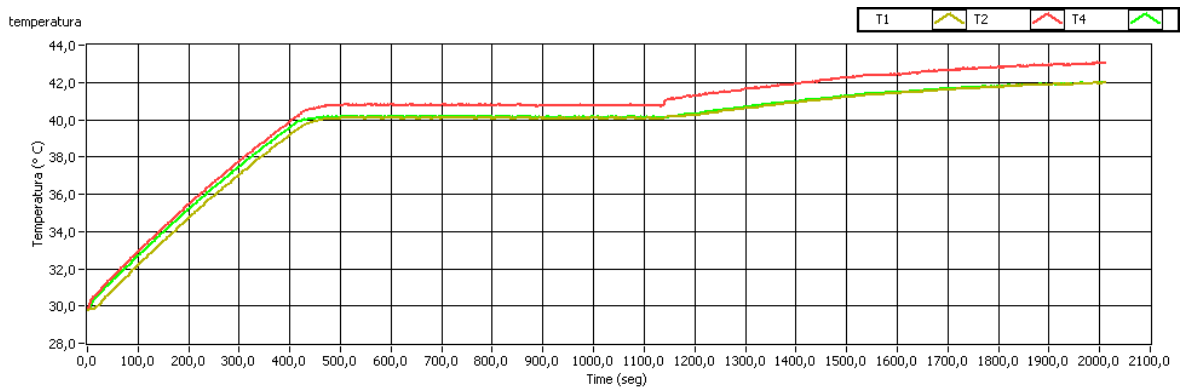


Figura 97 Calores de entrada y salida en la prueba 8

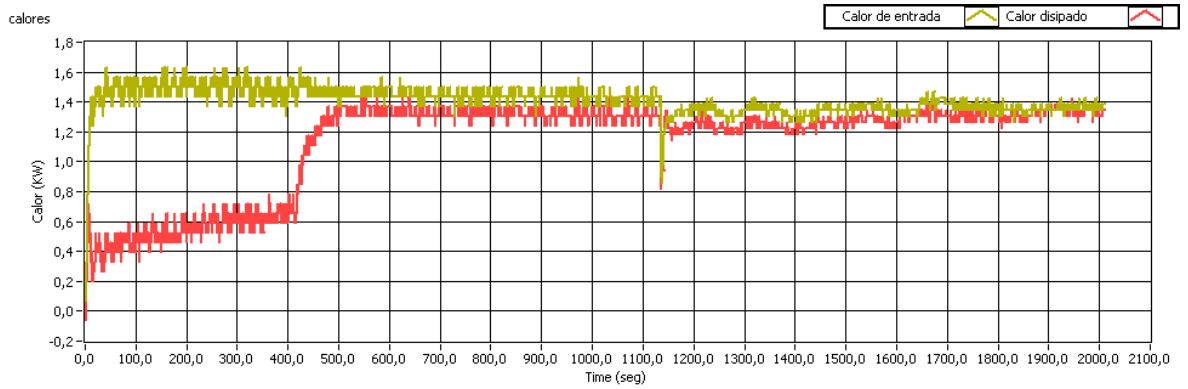


Figura 98 Perturbación por medio del cambio del caudal en la prueba 8

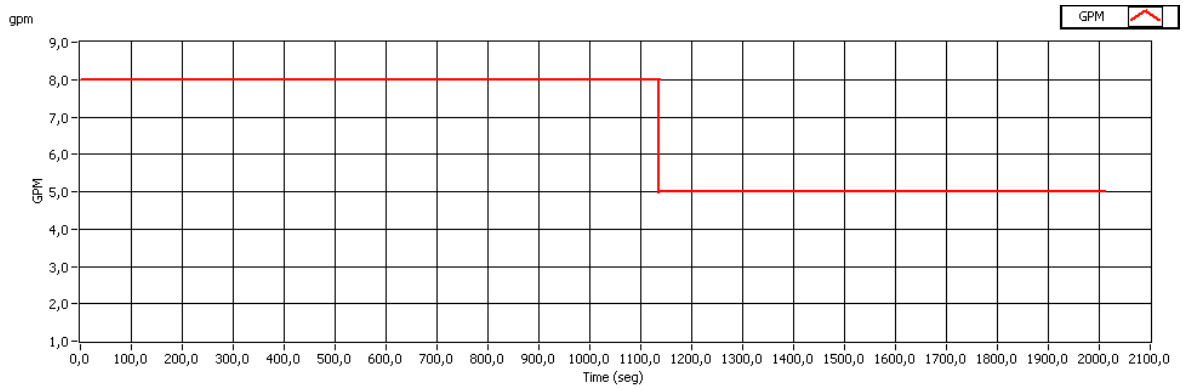
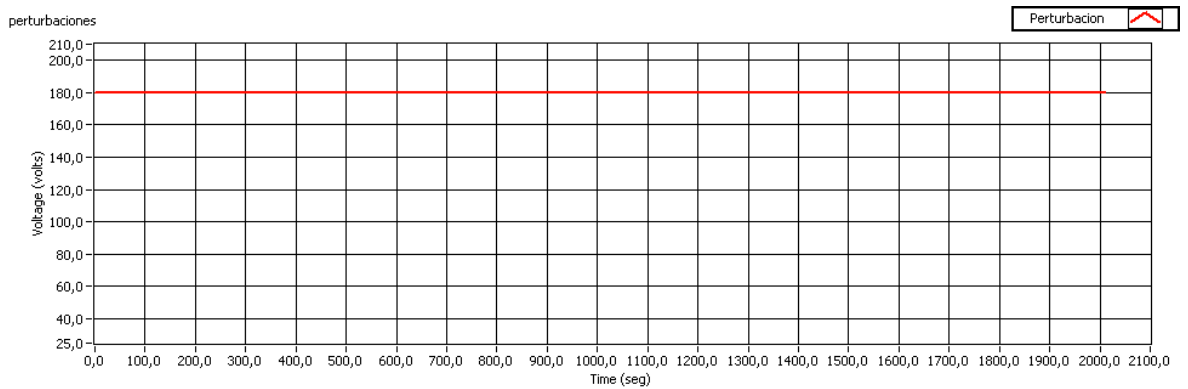


Figura 99 Voltaje del calefactor eléctrico en la prueba 8



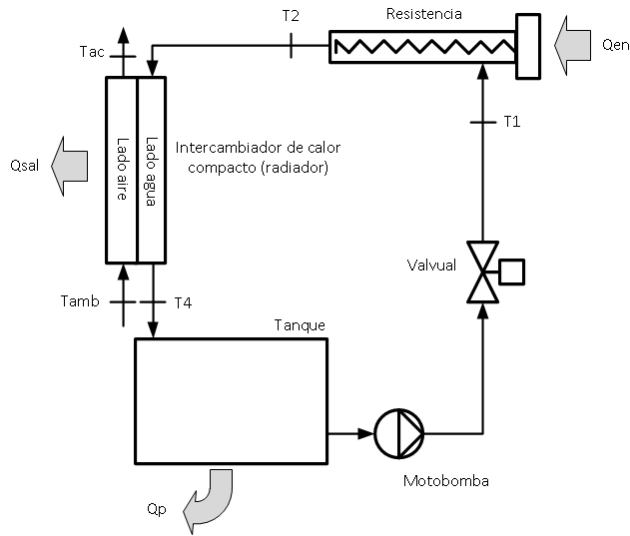
4.2 ANÁLISIS TEÓRICO

Para complementar el análisis del comportamiento de los procesos estables y transitorios implementados en el sistema térmico, se realizó un análisis teórico. Básicamente este análisis consiste en hacer una simulación del comportamiento del sistema térmico del banco. Para esto fue necesario plantear un modelo matemático del sistema térmico, en donde este es resuelto por medio de un software de computadora. Con un conjunto de simulaciones se imitó las distintas pruebas realizadas y las condiciones a las cuales estuvieran sujetas.

4.2.1 Modelo matemáticos del sistema térmico Para estudiar el comportamiento del sistema térmico se utiliza un modelo matemático, que se representa por medio de ecuaciones, las cuales describen el comportamiento del sistema térmico con base a las distintas condiciones presentes. Las bases de este modelo se obtienen de las leyes físicas de transferencias de calor que rigen el comportamiento del sistema. En esta sección se planteó el modelo matemático para la simulación de las distintas pruebas.

Para plantear el modelo matemático, hay que definir cómo es la disposición del sistema térmico con respecto a todas las variables que están involucradas en las ecuaciones matemáticas. En la figura 100 se muestra el sistema térmico con una de sus variables.

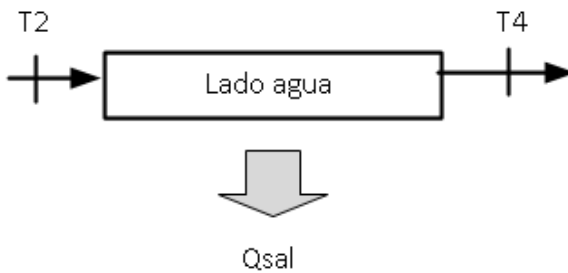
Figura 100 Variables del sistema térmico



Para plantear las ecuaciones, el sistema térmico se subdividió en tres volúmenes de control; radiador, calefactor y tanque. A cada uno de estos volúmenes de control se le aplica la ley de la conservación de la energía.

Intercambiador de calor

Figura 101 Volumen de control del intercambiador de calor



Aplicando la ecuación de la conservación de la energía al lado agua del radiador:

$$\frac{dE_{sist}}{dt} = E_{entreda} - E_{salida} \quad (1)$$

$$\frac{dE_{sist}}{dt} = m * C_v * \frac{dT_p(t)}{dt} \quad \therefore \quad T_p(t) = \frac{T_2(t) + T_1(t)}{2}$$

$$\frac{dE_{sist}}{dt} = \frac{m * C_v}{2} * \frac{dT_2(t)}{dt} + \frac{dT_4(t)}{dt} \quad (2)$$

$$E_{entreda} = \dot{m}_{agua} * h_2 \quad (3)$$

$$E_{salida} = (\dot{m}_{agua} * h_4) + Q_{sal} \quad (4)$$

Al remplazar en la ecuación 1 se obtiene que:

$$\begin{aligned} \frac{m * C_v}{2} * \frac{dT_2(t)}{dt} + \frac{dT_4(t)}{dt} &= (\dot{m}_{agua} * h_2) - (\dot{m}_{agua} * h_4) + Q_{sal} \\ \frac{dT_4(t)}{dt} &= \frac{2}{m * C_v} * [\dot{m}_{agua} * C_p * (h_2 - h_4) + Q_{sal}] - \frac{dT_2(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

De la teoría termodinámica, la entalpia está definida como:

$$h = u + P * \forall$$

$$dh = du + \forall * dP + d\forall * P$$

$$\Delta h = \Delta u + \Delta\forall * P + \forall * \Delta P$$

Como el sistema térmico trabaja con flujo incompresible, en un proceso a presión constante, se tiene que:

$$\Delta P = 0 \quad ; \quad \Delta\forall = 0 \quad ; \quad \Delta h = \Delta u$$

Por definición se obtiene que:

$$\Delta u = C_v * \Delta T$$

$$\Delta h = C_p * \Delta T$$

Por lo tanto según lo anterior, la ecuación se rescribe como:

$$\frac{dT_4(t)}{dt} = \frac{2}{m * C_v} * [\dot{m}_{agua} * C_p * (T_2 - T_4) + Q_{sal}] - \frac{dT_2(t)}{dt} \quad (5)$$

Para calcular el calor de salida (calor disipado por el radiador) se utilizó el método de la efectividad NTU, que es utilizado para el análisis de intercambiadores de calor.

$$C_{frio} = \dot{m}_a * C_{pa} \quad (6) \quad C_{caliente} = \dot{m} * C_p \quad (7)$$

$$C = \frac{C_{minimo}}{C_{maximo}} \quad (8)$$

Ya se comprobó que el C_{min} siempre va ser el del aire ya que este posee un valor de calor específico menor, y el flujo másico del agua no es lo suficientemente pequeño.

$$Q_{maximo} = C_{minimo} * (T_2(t) - T_{amb}) \quad (10)$$

$$NTU = \frac{U * A_s}{C_{minimo}} \quad (11)$$

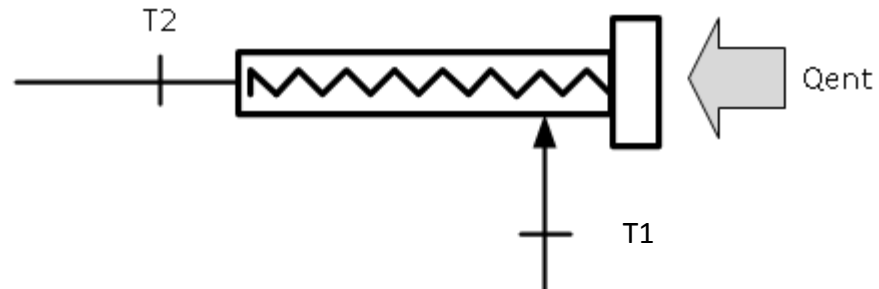
Ecuación para intercambiadores de calor de flujo cruzado no mezclado.

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[\frac{NTU^{0,22}}{c} * [\exp(-c * NTU^{0,78}) - 1]\right] \quad (12)$$

$$Q_s(t) = \varepsilon * Q_{maximo} \quad (13)$$

Calefactor eléctrico

Figura 102 Volumen de control del calefactor eléctrico



Si se aplica el mismo procedimiento, y la ecuación de la conservación de la energía, al volumen del control correspondiente al calefactor eléctrico, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\frac{dT_2(t)}{dt} = \frac{2}{m * C_v} * [\dot{m} * C_p (T_1(t) - T_2(t)) + Q_{ent}(t)] - \frac{dT_1(t)}{dt} \quad (14)$$

El calor de entrada está definido por medio de la ecuación de potencia eléctrica:

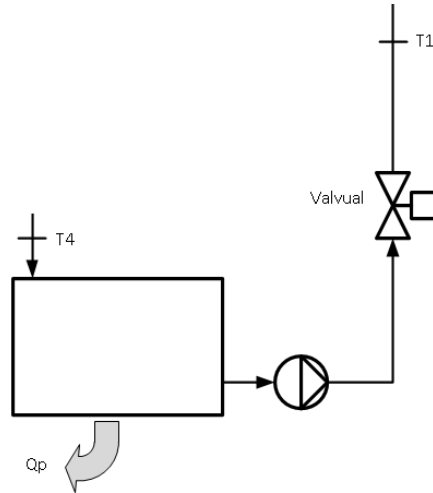
$$Q_{ent} = \text{voltage} * \text{Resistencia} \quad (15)$$

Teniendo la ley de Ohm se tiene que:

$$\text{voltage} = \text{corriente} * \text{resistencia}$$

Tanque

Figura 103 Volumen de control del tanque



La ecuación que se obtiene del volumen de control del tanque es la siguiente:

$$\frac{dT_1(t)}{dt} = \frac{2}{m * C_v} * [\dot{m} * C_p (T_4(t) - T_1(t)) - Q_p(t)] - \frac{dT_4(t)}{dt} \quad (16)$$

Como resultado del anterior análisis al sistema térmico se obtuvo un sistema de ecuaciones diferenciales. Con este modelo matemático se puede predecir cómo será el comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos del sistema. Para la solución de los sistemas de ecuaciones se utilizó el programa simulink de matlab. Simulink es una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Por medio de una programación de tipo gráfica, simulink logra resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, y generar un conjunto de gráficas, que describen el comportamiento de las diferentes variables involucrada en los procesos térmicos, con respecto al tiempo.

4.2.2 Resultados de la simulación Con el modelo matemático ya planteado, y la utilización del simulink del paquete MatLab; se imitó todas las pruebas realizadas en el banco, obteniendo los siguientes resultados:

Prueba 1: control por medio del suministro de calor, con perturbaciones por medio de la disipación de calor cuando hay un control de temperatura presente

Figura 104 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 1

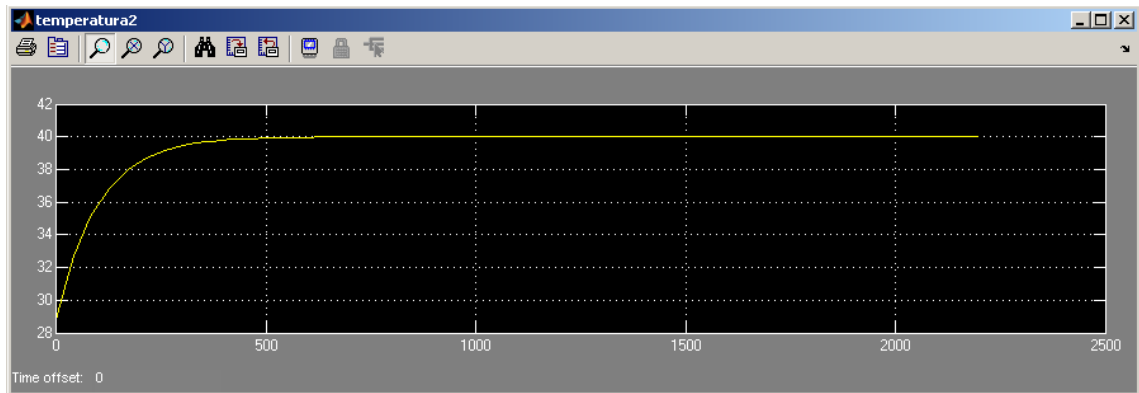


Figura 105 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 1

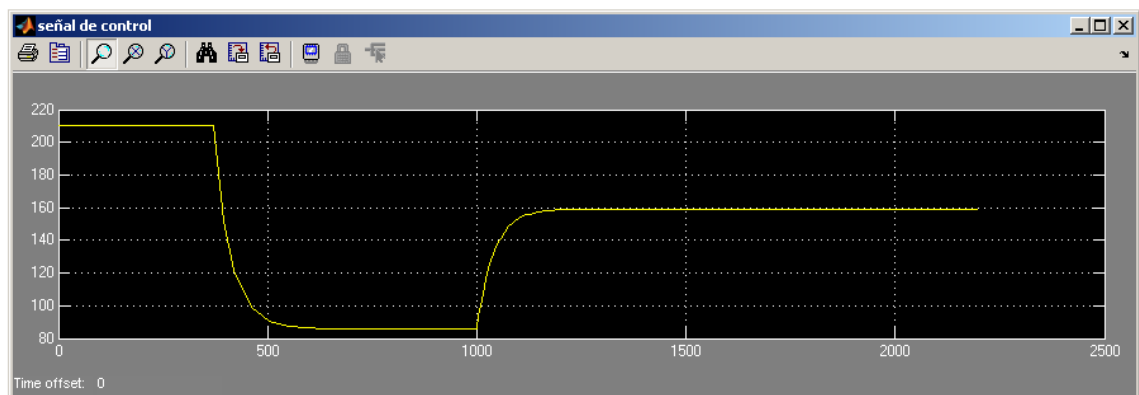
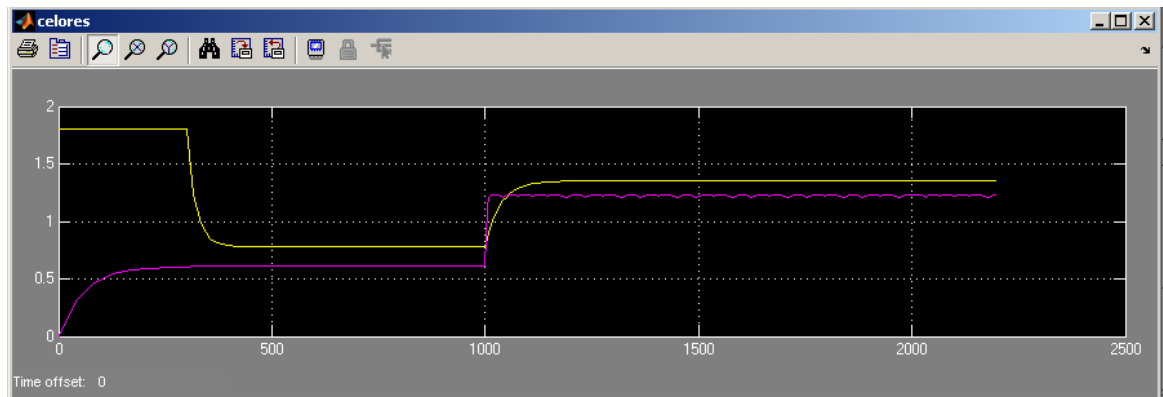


Figura 106 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 1



Prueba 2: control por medio del suministro de calor, con perturbaciones por disipación de calor cuando el control de temperatura está ausente.

Figura 107 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 2

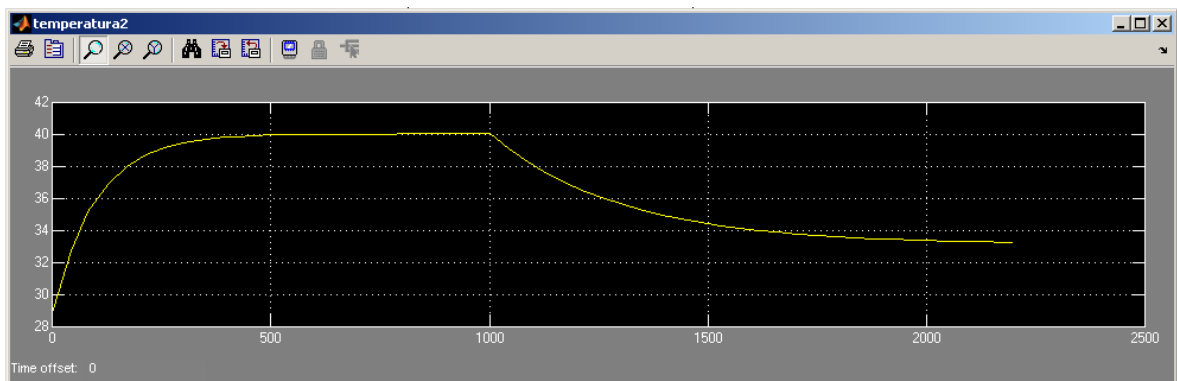


Figura 108 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 2

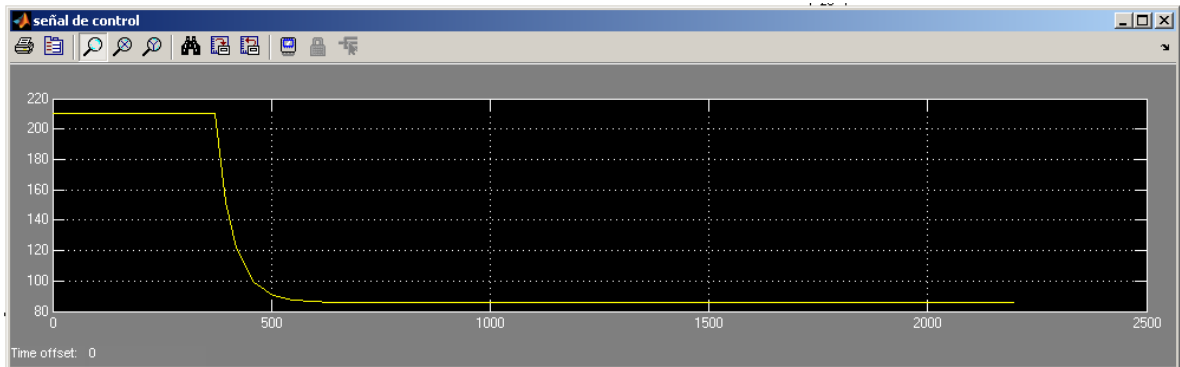
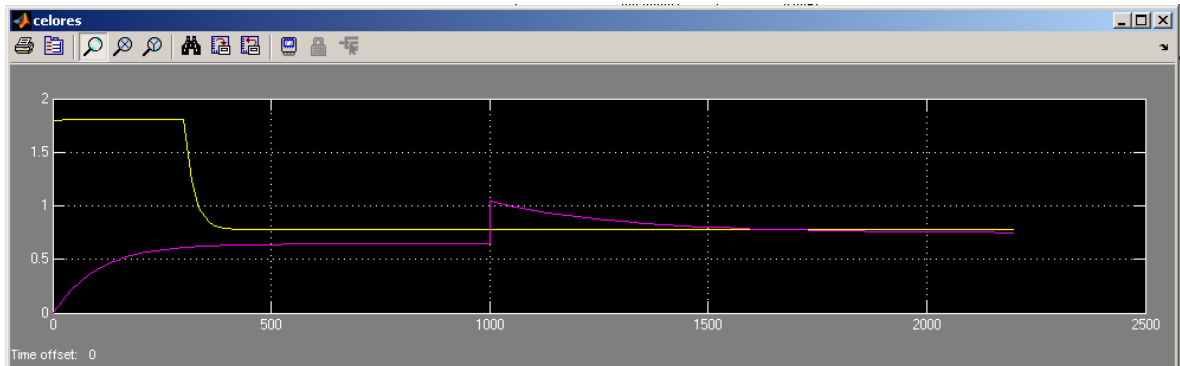


Figura 109 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 2



Prueba 3: control por medio del suministro de calor, con perturbaciones por medio del cambio en el régimen de caudal cuando hay un control de temperatura presente.

Figura 110 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 3

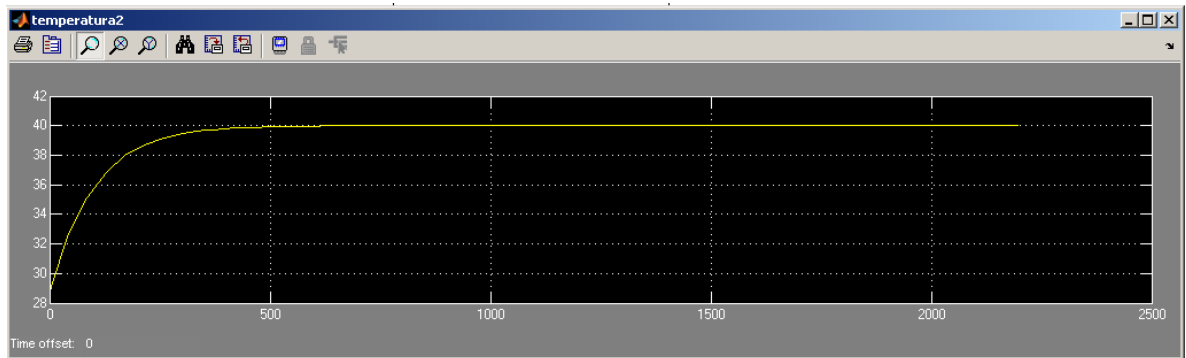


Figura 111 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 3

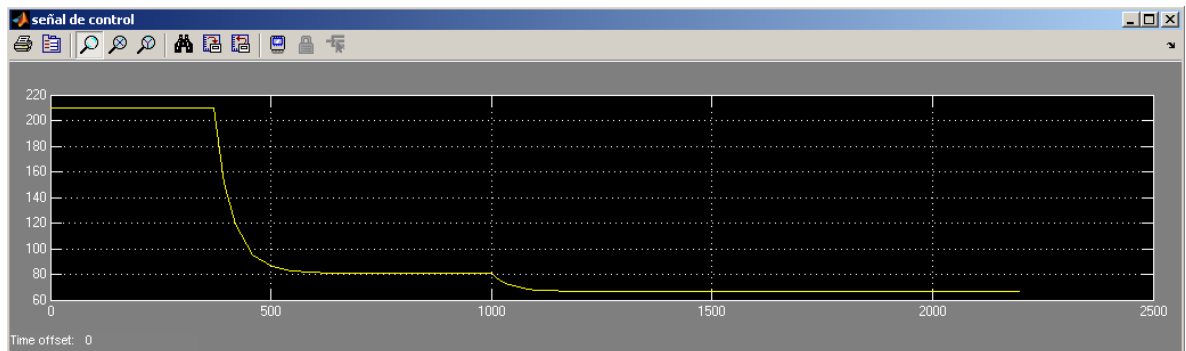
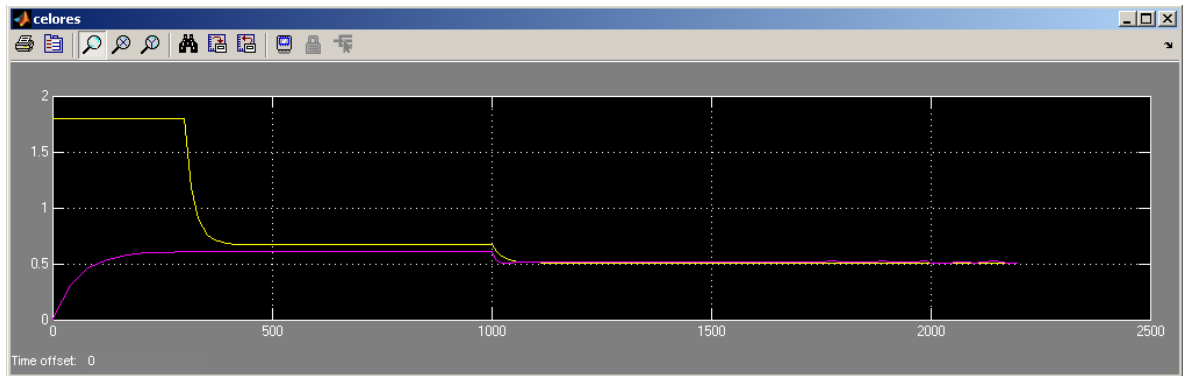


Figura 112 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 3



Prueba 4: control por medio del suministro de calor, con perturbaciones por medio del cambio en el régimen de caudal cuando el control de temperatura está ausente.

Figura 113 Simulación de la temperatura 2 en la prueba 4

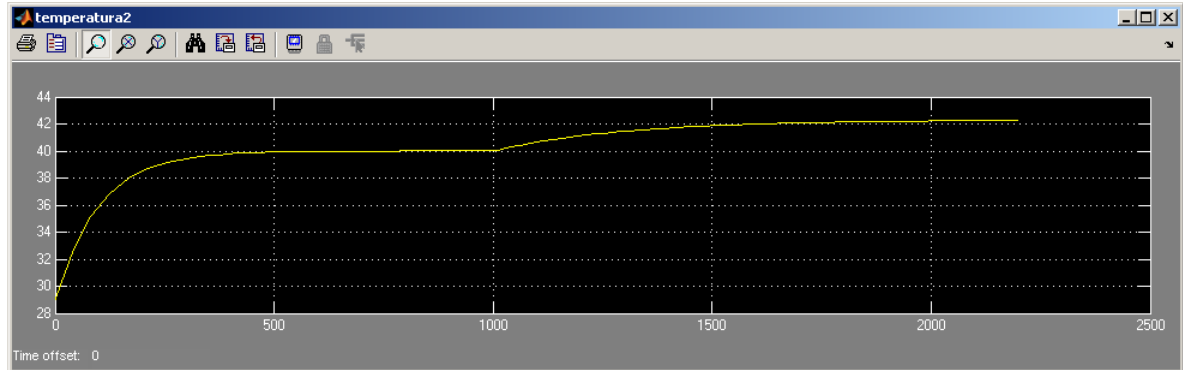


Figura 114 Simulación de la señal de control (voltaje del calefactor) en la prueba 4

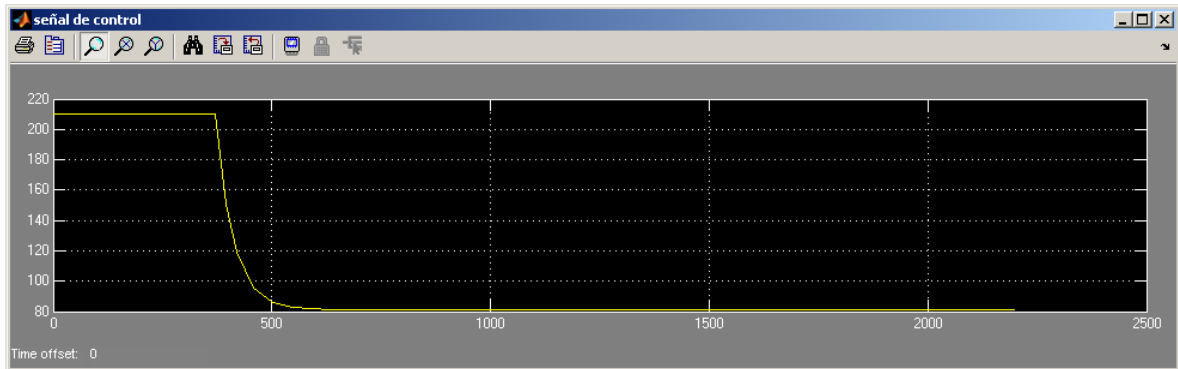
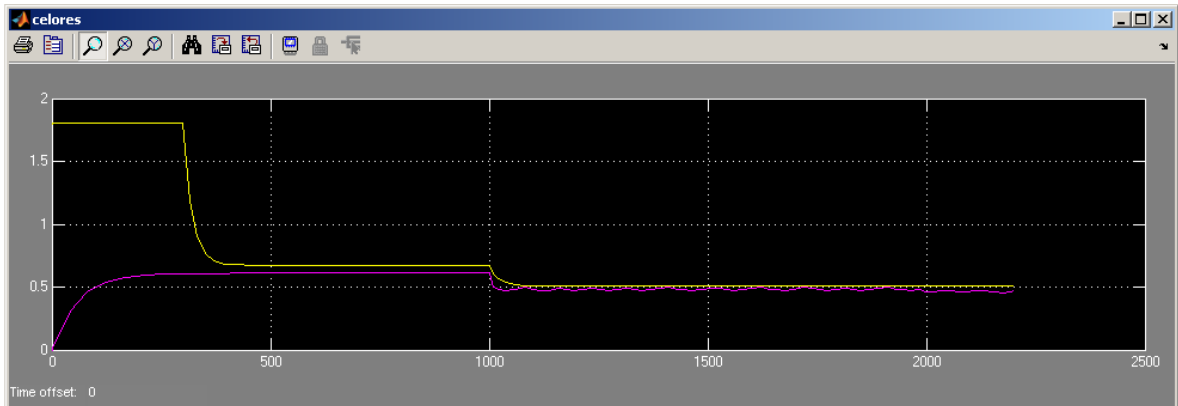


Figura 115 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 4



Prueba 5: control por medio de la disipación de calor, con perturbaciones por medio del suministro de calor cuando hay un control de temperatura presente.

Figura 116 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 5

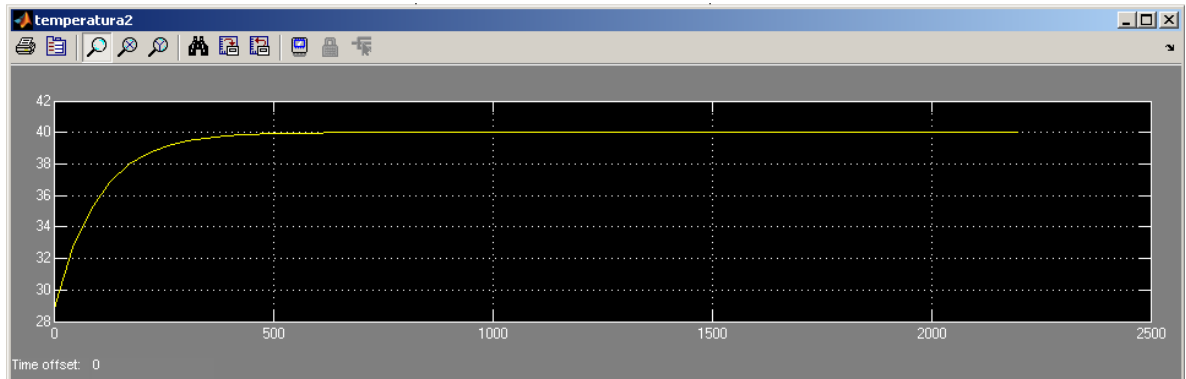


Figura 117 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 5

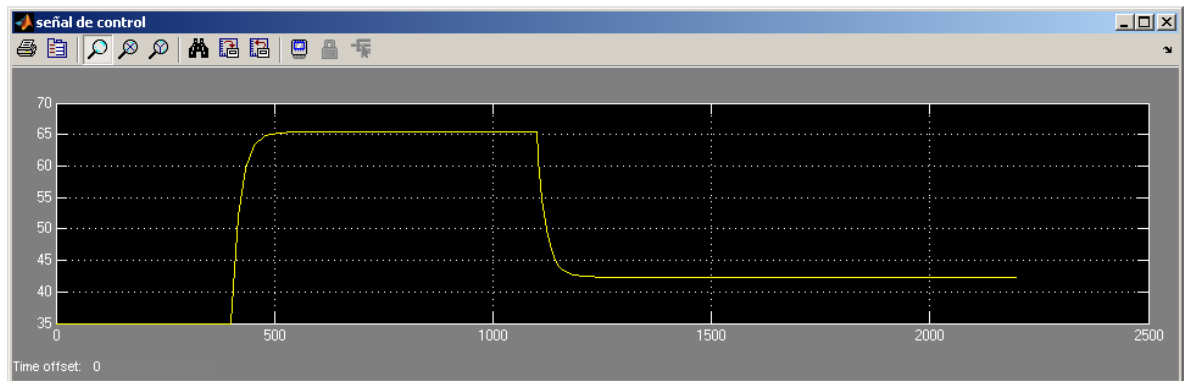
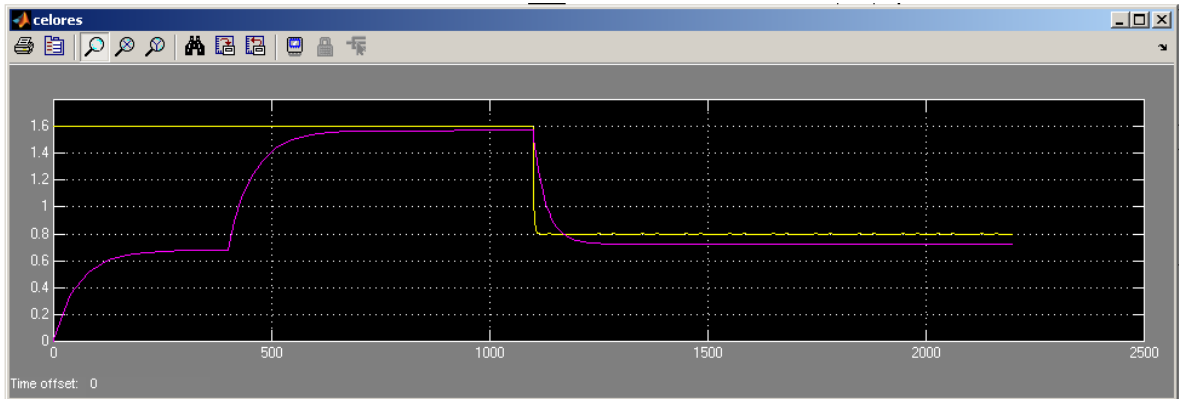


Figura 118 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 5



Prueba 6: control por medio de la disipación de calor, con perturbaciones por medio del suministro de calor cuando el control de temperatura está ausente.

Figura 119 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 6

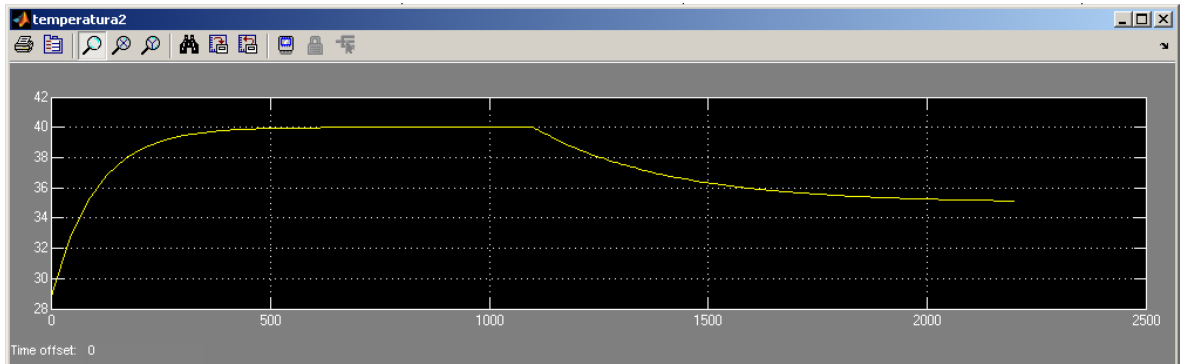


Figura 120 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 6

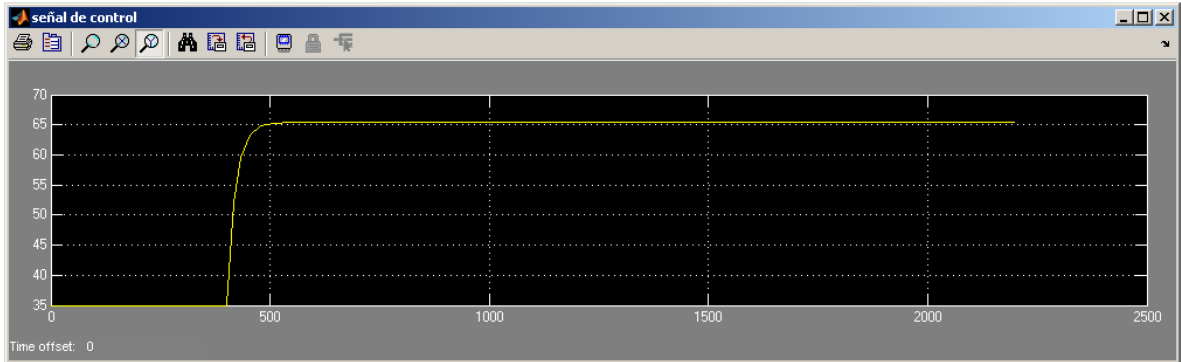
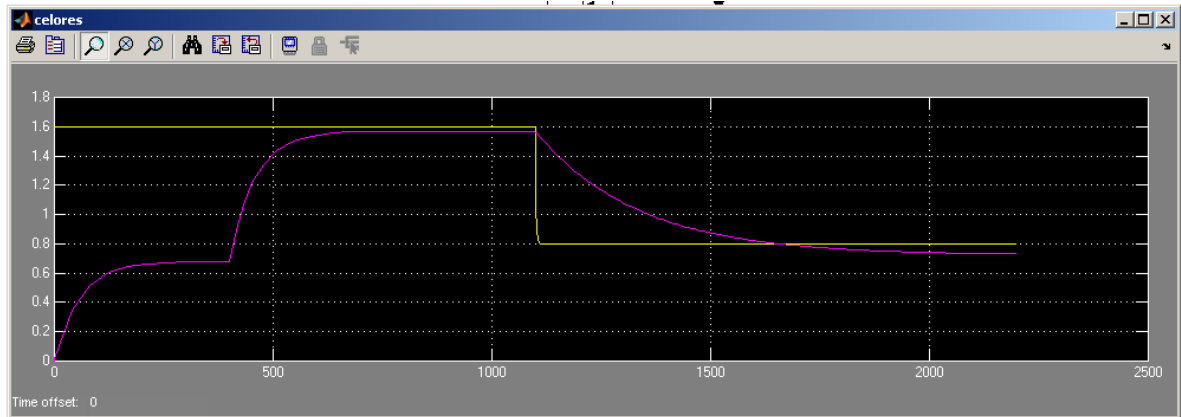


Figura 121 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 6



Prueba 7: control por medio de la disipación de calor, con perturbaciones por medio del cambio en el régimen de caudal cuando hay un control de temperatura presente.

Figura 122 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 7

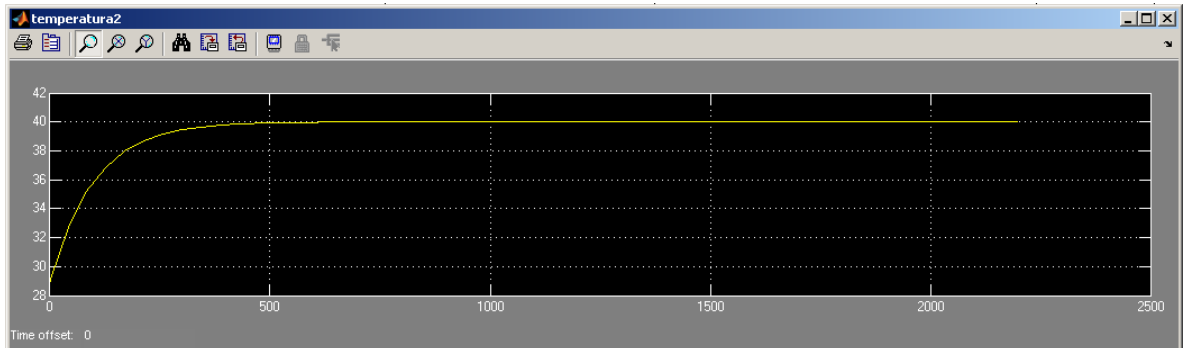


Figura 123 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 7

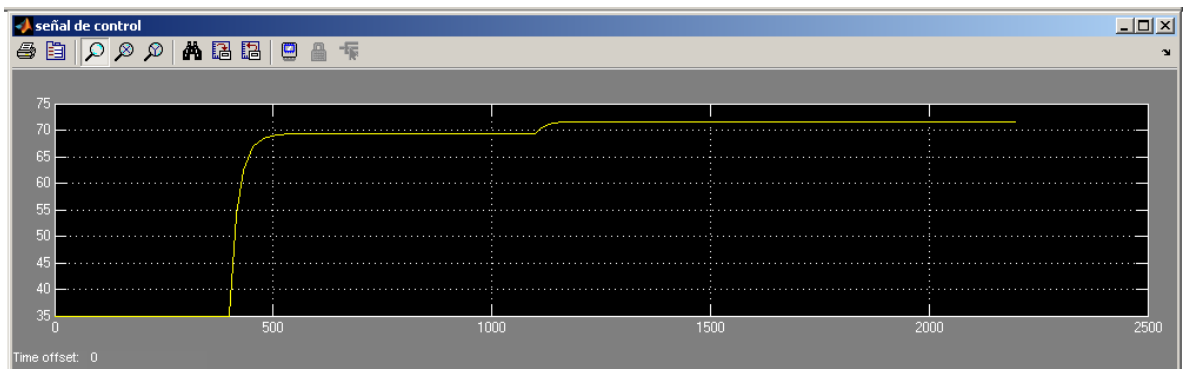
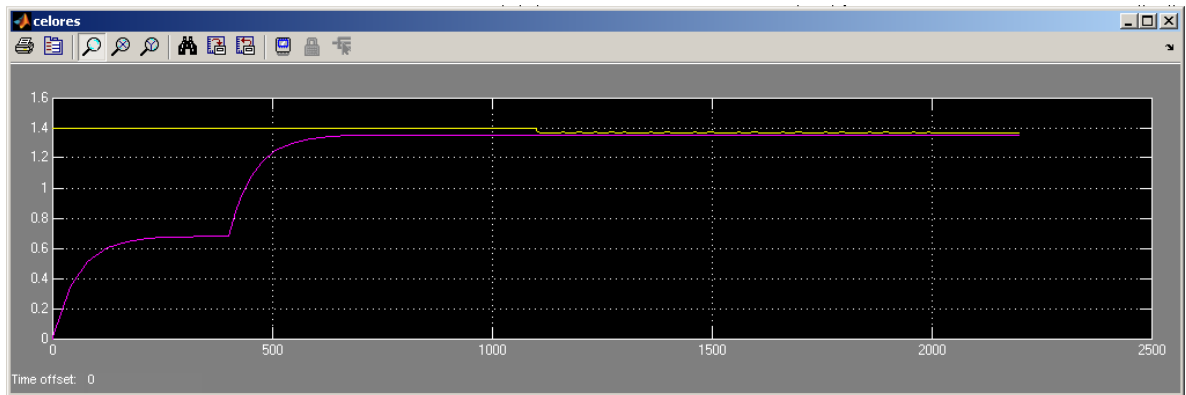


Figura 124 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 7



Prueba 8: control por medio de la disipación de calor, con perturbaciones por medio del cambio en el régimen de caudal cuando el control de temperatura está ausente.

Figura 125 Simulación de la temperatura 4 en la prueba 8

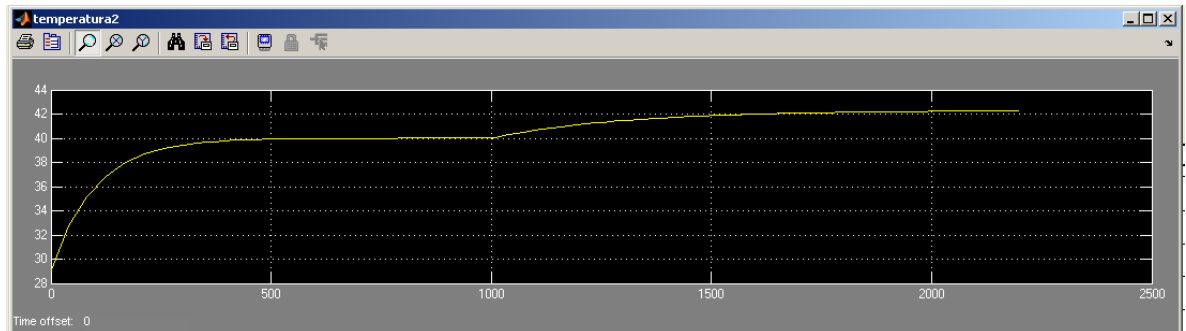


Figura 126 Simulación de la señal de control (voltaje de los ventiladores) en la prueba 8

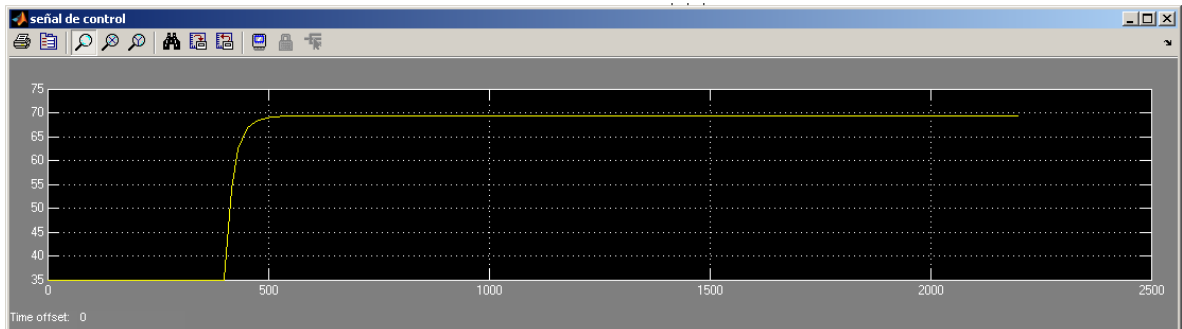
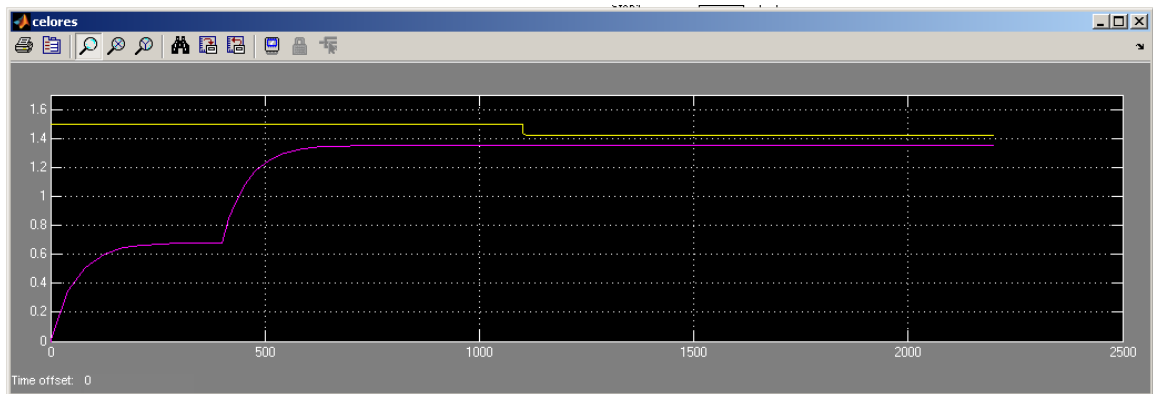


Figura 127 Simulación del calor de entrada (curva amarilla) y el calor de salida (curva fucsia) de la prueba 8



4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS TRABAJOS PRÁCTICOS Y TEÓRICO

Después de realizado los distintitos análisis de los comportamiento térmico del banco, se procedió a hacer un paralelo comparativo entre los resultados prácticos y teóricos.

- Al generar las perturbaciones por medio de la disminución de las RPM de los ventiladores, hay que tener en cuenta que el cambio de estas no va a ser

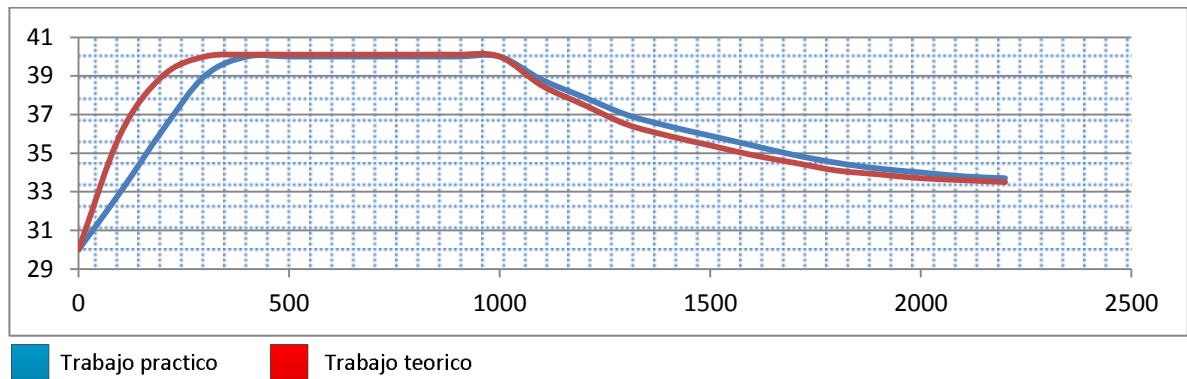
inmediato debido a la inercia de las aspas. En la simulación esta inercia no se tiene en cuenta y el cambio del flujo de aire es inmediato. Por lo tanto es lógico que el cambio de temperatura se dé más lentamente en los procesos prácticos.

- Al comienzo de todas las prueba la temperatura del agua empieza a subir, para que esta sea estabilizada en los 40°C. El comportamiento de la curva, que se obtuvo del trabajo práctico, se caracteriza por presenta una forma casi lineal, a diferencia de la curva del análisis teórico la cual presenta una curva mucho más pronunciada. Esta diferencia entre las curvas se da debido a la inercia de la resistencia eléctrica, la cual genera un retraso en los cambios de temperatura tanto de la superficie de la resistencia así como del flujo de agua que pasa por esta. Debido que en simulación no se tiene en cuenta la inercia, los cambios de temperatura se produce de forma inmediata con respecto los cambios de voltaje.

- Debido a la limitación en la precisión de la medición de la variable temperatura en los distintos puntos del sistema térmico, las curvas de calores de entrada y salida hecha por medio de la adquisición de datos se presenta de forma distorsionada. A diferencia de la curvas de simulink que se presentan de forma más continua, debido a que los diferenciales de temperatura, para el cálculos de los calores de entrada y salida, son calculados y no tomados de una adquisición de datos.

Análisis comparativo de los trabajos prácticos y teóricos realizados en la prueba 2.

Figura 128 Análisis comparativo del comportamiento térmico del punto T2



Del anterior gráfico se hicieron las siguientes observaciones:

- Al comienzo de la prueba la temperatura del agua empieza a subir, para que esta sea estabilizada en los 40°C. El comportamiento de la curva, que se obtuvo del trabajo práctico, se caracteriza por presentar una forma casi lineal, a diferencia de la curva del análisis teórico la cual presenta una curva mucho más pronunciada. Esta diferencia entre las curvas se da debido a la inercia de la resistencia eléctrica, la cual genera un retraso en los cambios de temperatura tanto de la superficie de la resistencia así como del flujo de agua que pasa por esta. Debido que en simulación no se tiene en cuenta la inercia, los cambios de temperatura se producen de forma inmediata con respecto a los cambios de voltaje.
- Al generar las perturbaciones por medio de la disminución de las RPM de los ventiladores, hay que tener en cuenta que el cambio de estas no va a ser inmediato debido a la inercia de las aspas. En la simulación esta inercia no se tiene en cuenta y el cambio del flujo de aire es inmediato. Por lo tanto es lógico que el cambio de temperatura se dé más lentamente en los procesos prácticos.

5. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y PLANTEAMIENTO DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

5.1 CONCLUSIONES

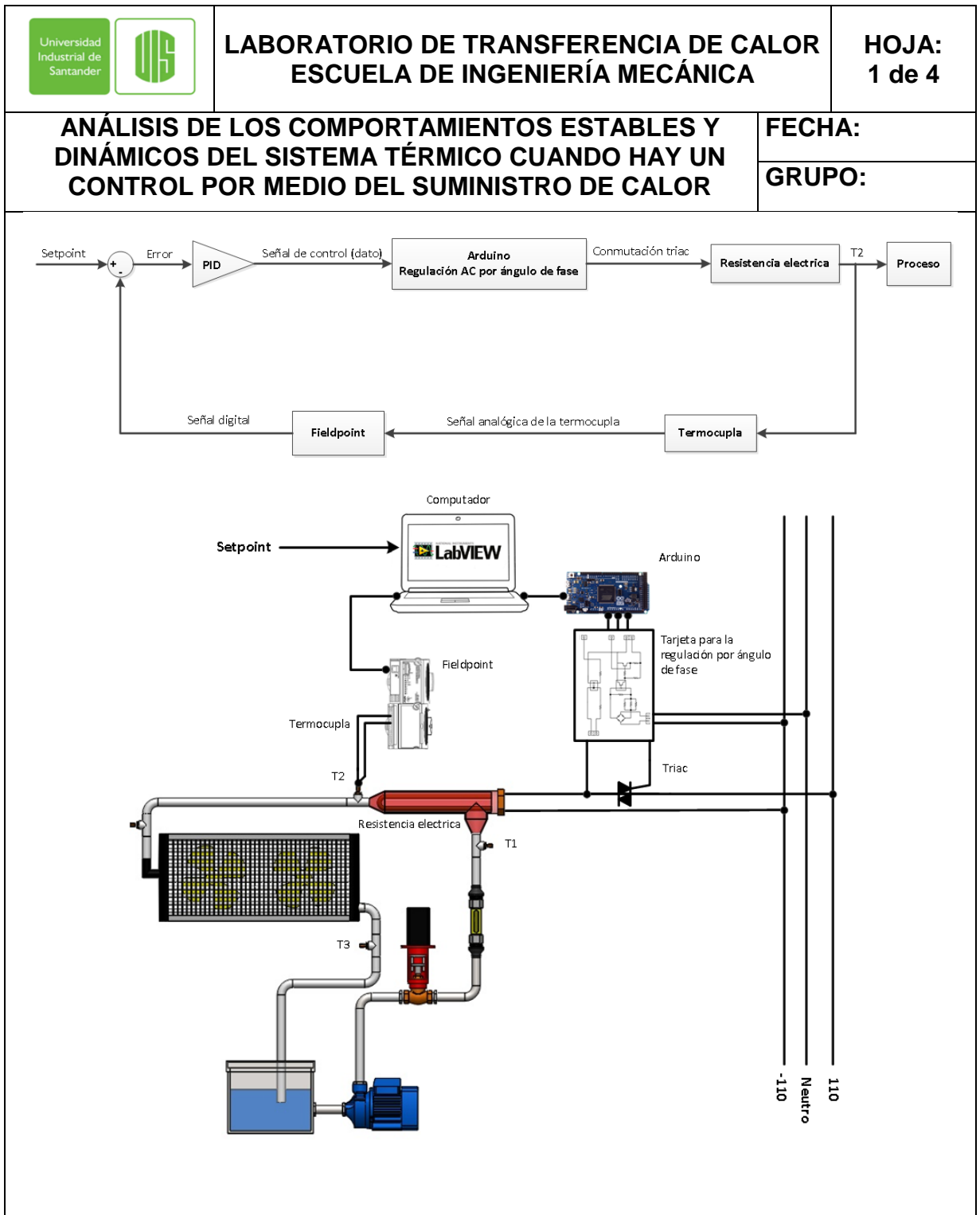
- Se diseñó y construyó un banco de laboratorio para la aplicación de un control automático de temperatura por medio del suministro o disipación de calor a un sistema térmico.
- Se diseñó y construyó un banco de laboratorio conformado por un sistema térmico, en el cual se pueden generar procesos transitorios por medio de la implementación de perturbaciones que afectan: el suministro de calor del sistema, el régimen de flujo del fluido de trabajo y la disipación de calor del sistema.
- Se diseñó un algoritmo en la plataforma de desarrollo LabView, con el cual se implementa un control de temperatura proporcional, integral y derivativo para controlar las distintas perturbaciones que se pueden introducir en el sistema térmico.
- Se realizó una adquisición de datos de la medición de temperatura hecha con las termocuplas en los distintos puntos del sistema térmico, por medio del programa Labview, el cual guarda los datos en un registro, para posteriormente obtener una gráfica de los comportamientos térmicos del banco.
- Se implementó un método de regulación AC por cambio del ángulo de fase, para aplicar un control PID de temperatura, y la implementación de perturbaciones en el sistema térmico.

- Se realizaron una serie de pruebas para analizar los comportamientos estables y transitorios de un sistema térmico, implementando diferentes tipos de perturbaciones cuando, hay o no, presencia de un control automático PID.
- Se realizó un análisis teórico por medio de un planteamiento matemático del sistema térmico en el programa simulink, donde se imitan las distintas condiciones de las pruebas realizadas en el banco de laboratorio dando como resultado Q_{in} y Q_{out} constantes en tiempos iguales comprobando la bidireccionalidad del sistema.
- Al realizar un análisis comparativo entre las simulaciones teóricas y las pruebas realizadas en el banco de laboratorio para analizar el comportamiento de los procesos estables y transitorios en un sistema térmico bajo el suministro o la disipación de calor, podemos concluir que hay grandes similitudes en los resultados obtenidos, sin embargo, existen varias diferencias debido a factores como el caudal de aire y del fluido de trabajo, la tensión y la corriente de los elementos eléctricos, pues para el caso en particular del voltaje, en las simulaciones se utiliza un valor constante de 220V y en las pruebas al medir con un multímetro obtenemos valores que oscilan entre 210 – 219V. De igual forma se repite este comportamiento para la mayoría de las variables involucradas.
- Se planteó una práctica de laboratorio, donde los estudiantes tendrán la oportunidad de hacer un control de temperatura por medio del suministro de calor y la disipación de calor, para posteriormente implementar perturbaciones (calor de entrada, calor de salida, caudal), y analizar los comportamientos térmicos por medio de la adquisición de datos y la aplicación de ecuaciones matemáticas.

5.2 OBSERVACIONES

- El delta de temperatura entre los puntos de salida y entrada, tanto del calefactor eléctrico como del intercambiador de calor, son pequeños. Esto es debido a un gran flujo de caudal que hay en el sistema térmico.
- La medición de temperatura con las termocuplas se distorsiona para rangos menores a un grado Celsius.
- Debido a los pequeños diferenciales de temperatura entre los puntos de entrada y salida de los elementos del sistema térmico, y el error presente en la medición de temperatura con las termocuplas; el cálculo de los calores de entrada y salida por medio de la adquisición de datos genera un pequeño grado de error. Esto se evidencia en la forma distorsionada en que se grafican los comportamiento de los calores de entrada y salida.
- Debido a los pequeños diferenciales de temperatura obtenidos al realizar pruebas con diferentes regímenes de flujo de fluido de trabajo, se advierte que el caudal no tiene gran influencia en los comportamientos térmicos del sistema, lo cual no hace posible hacer un control de temperatura por medio del caudal (elemento actuador válvula).
- La velocidad con que cambia la temperatura en el sistema térmico es lenta. Esto es debido en su mayor parte al pequeño calor neto suministrado en comparación con la gran cantidad de fluido de trabajo que entra al sistema. Se propone una disminución en el volumen total del fluido de trabajo circulante en el sistema y un descenso en el caudal suministrado por el elemento roto dinámico que no cambie presión del sistema; también propone la implementación de un control fuzzy.

5.3 PRÁCTICA DE LABORATORIO





ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DEL SUMINISTRO DE CALOR

FECHA:

GRUPO:

1. Objetivos:

- Aplicar un control PID de temperatura al sistema térmico, donde se utiliza como elemento actuador el calefactor eléctrico (suministro de calor al sistema).
 - Implementar perturbaciones al sistema térmico, cuando este se encuentra en un estado estable, por medio del cambio del voltaje de los ventiladores del radiador y el régimen del caudal del sistema.
 - Analizar el comportamiento de las temperaturas de los distintos puntos del sistema térmico, cuando este se encuentra en un estado estable y transitorio.
 - Analizar los comportamientos de los calores de entrada y salida del sistema térmico, cuando esta se encuentra en un estado estable y transitorio.
 - Calcular los calores de entrada y salida del sistema térmico.
 - Calcular el tiempo que le toma al sistema estabilizarse.



2. Materiales:



- Banco de laboratorio.
- Computador.
- Anemómetro.
- Pinza amperimétrica
- Voltímetro.

3. Configuración del banco:

Para la realización de las pruebas el banco tiene que estar de la siguiente manera:

Tipo de control	Q entrada	Caudal	8 GPM	Voltaje en los ventiladores	45 voltios				
Configuración del controlador PID									
Dato de consigna	40 °C	Proportional gain (Kp)	80	Integral gain	1,5	Derivative gain	0,1		
Configuración de la comunicación serial con arduino									
Arduino	COM 4	Baud rate	115200	Data bits	8	Parity	None	Stop bits (10: 1 bit)	1

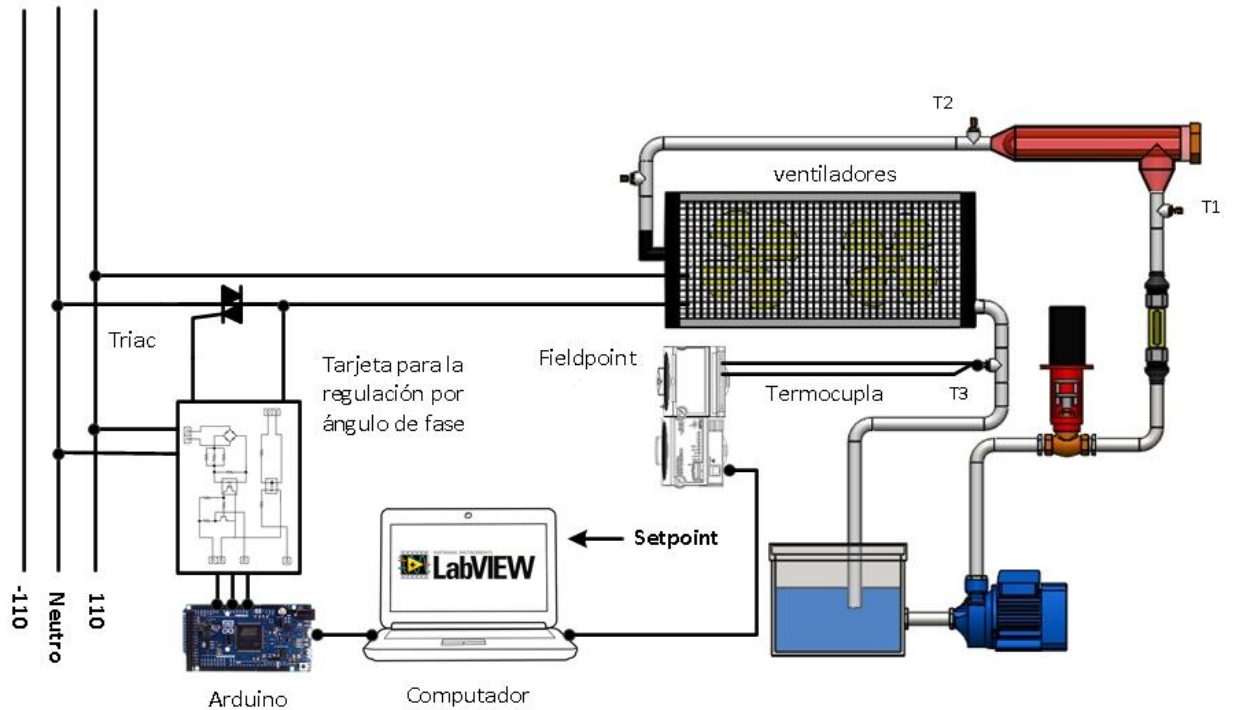
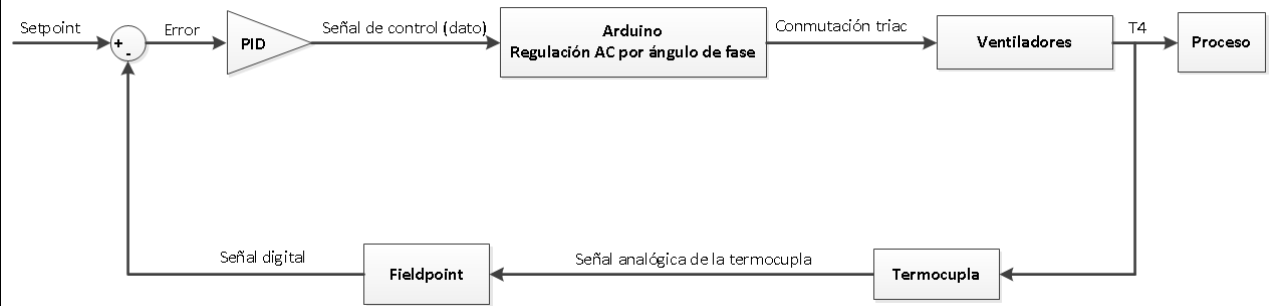
		LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	HOJA: 3 de 4
ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DEL SUMINISTRO DE CALOR		FECHA:	GRUPO:
<p>4. Procedimiento</p> <p>Para la realización de las pruebas se debe seguir el siguiente procedimiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar que el banco es alimentado con 220 voltios. • Verificar que la válvula está en la posición correspondiente a los 8 GMP (ubicarse con la franja amarilla). • Verificar que la configuración a la interface de LabView este correcta. • Verificar la comunicación de Ethernet entre el FieldPoint y el computador. • Verificar si hay una comunicación serial entre la tarjeta Arduino y el computador. • Cerrar todos los interruptores del panel de control, para alimentar eléctricamente al calefactor, ventiladores, bomba y motor paso a paso. • Poner el vertical toggle switch en start para iniciar con el control PID de temperatura por medio del suministro de calor. • Después de que el sistema se estabiliza se mide la velocidad del viento a la salida del radiador, así como también la temperatura de este, con anemómetro. • Se mide el voltaje y la corriente que le llega al calefactor eléctrico con el voltímetro y la pinza amperimétrica respectivamente. • Generar una perturbación cambiando el voltaje de los ventiladores a 70 voltios. • Después de que el sistema se vuelva estabilizar, se repiten las mediciones anteriores: velocidad y temperatura a la salida del radiador, corriente y voltaje del calefactor eléctrico. • Por último se pone el vertical toggle switch en pause de la interface gráfica de LabView, para posteriormente oprimir el botón de graficar y obtener los gráficos de los comportamientos térmicos. • Calcular los calores de entrada y salida en los estados estables del proceso. • Calcular el tiempo que le toma al sistema estabilizarse al comienzo de la prueba. • Cambiar a un control manual y enfriar el agua hasta la temperatura ambiente. • Repetir el procedimiento anterior pero con una perturbación generada por el cambio en el régimen de caudal a 5 GPM. 			

		LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	HOJA: 4 de 4
ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DEL SUMINISTRO DE CALOR		FECHA:	GRUPO:
5. Ecuaciones utilizada			
<p>Calculo del calor de entrada $Q_{ent} = voltage * Resitencia$</p>			
<p>Calculo del calor de salida $Q_{ent} = \dot{m}_{aire} * C_{aire} * (T_{ac} - T_{amb})$</p>			
<p>Calculo del tiempo que le toma el sistema estabilizase $\Delta t = m * C * (T_{promedio} - T_{inicial})$ $T_{prom} = \frac{T_1 + T_2 + T_4}{3}$</p>			
6. Conclusiones			
<ul style="list-style-type: none"> • Comparando los resultados calculados con los obtenidos de la adquisición de datos; a que conclusiones se pueden llegar. • De los gráficos obtenidos del comportamiento térmico del sistema que observaciones se pueden hacer. 			



ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DE LA DISIPACIÓN DE CALOR

FECHA:

GRUPO:



		LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	HOJA: 2 de 4						
ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DE LA DISIPACIÓN DE CALOR		FECHA:	GRUPO:						
<p>1. Objetivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar un control PID de temperatura al sistema térmico, donde se utiliza como elemento actuador los ventiladores del radiador (suministro de calor al sistema). <ul style="list-style-type: none"> • Implementar perturbaciones al sistema térmico, cuando este se encuentra en un estado estable, por medio del cambio de voltaje de los ventiladores del radiador y el régimen del caudal del sistema. • Analizar el comportamiento de las temperaturas de los distintos puntos del sistema térmico, cuando este se encuentra en un estado estable y transitorio. • Analizar los comportamientos de los calores de entrada y salida del sistema térmico, cuando esta se encuentra en un estado estable y transitorio. • Calcular los calores de entrada y salida del sistema térmico. • Calcular el tiempo que le toma al sistema estabilizarse. <p>2. Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Banco de laboratorio. • Computador. • Anemómetro. • Pinza amperimétrica. • Voltímetro. <p>3. Configuración del banco:</p> <p>Para la realización de las pruebas el banco tiene que estar de la siguiente manera:</p>									
Tipo de control	Q salida	Caudal	8 GPM	Voltaje del calefactor	180 voltios				
Configuración del controlador PID									
Dato de consigna	40 °C	Proportional gain (Kp)	80	Integral gain	1,5	Derivative gain	0,1		
Configuración de la comunicación serial con arduino									
Arduino	COM 4	Baud rate	115200	Data bits	8	Parity	None	Stop bits (10: 1 bit)	1

		LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	HOJA: 3 de 4
ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DE LA DISIPACION DE CALOR		FECHA:	GRUPO:
<p>4. Procedimiento</p> <p>Para la realización de las pruebas se debe seguir el siguiente procedimiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar que el banco es alimentado con 220 voltios. • Verificar que la válvula está en la posición correspondiente a los 8 GMP (ubicarse con la franja amarilla). • Verificar que la configuración a la interface de LabView este correcta. • Verificar la comunicación de Ethernet entre el FieldPoint y el computador. • Verificar si hay una comunicación serial entre la tarjeta Arduino y el computador. • Cerrar todos los interruptores del panel de control, para alimentar eléctricamente al calefactor, ventiladores, bomba y motor paso a paso. • Poner el vertical toggle switch en start para iniciar con el control PID de temperatura por medio del suministro de calor. • Después de que el sistema se estabiliza se mide la velocidad del viento a la salida del radiador, y luego su temperatura con ayuda del anemómetro. • Se mide el voltaje y la corriente que le llega al calefactor eléctrico con el voltímetro y la pinza amperimétrica respectivamente. • Generar una perturbación cambiando el voltaje del calefactor a 100 voltios. • Después de que el sistema se vuelva estabilizar, se repiten las mediciones anteriores: velocidad y temperatura a la salida del radiador, corriente y voltaje del calefactor eléctrico. • Por último se pone el vertical toggle switch en pause de la interface gráfica de LabView, para posteriormente oprimir el botón de graficar y obtener los gráficos de los comportamientos térmicos. • Calcular los calores de entrada y salida en los estados estables del proceso. • Calcular el tiempo que le toma al sistema estabilizarse al comienzo de la prueba. • Cambiar a un control manual y enfriar el agua hasta la temperatura ambiente. • Repetir el procedimiento anterior pero con una perturbación generada por el cambio en el régimen de caudal a 5 GPM. 			



ANÁLISIS DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTABLES Y DINÁMICOS DEL SISTEMA TÉRMICO CUANDO HAY UN CONTROL POR MEDIO DE LA DISIPACION DE CALOR

FECHA:

GRUPO:

5. Ecuaciones utilizada

Calculo del calor de entrada

$$Q_{ent} = \text{voltage} * \text{Resistencia}$$

Calculo del calor de salida

$$Q_{ent} = \dot{m}_{aire} * C_{aire} * (T_{ac} - T_{amb})$$

Calculo del tiempo que le toma el sistema estabilizarse

$$\Delta t = \frac{m * C * (T_{promedio} - T_{inicial})}{Q_{neto}}$$

$$T_{prom} = \frac{T_1 + T_2 + T_4}{3}$$

6. Conclusiones

- Comparando los resultados calculados con los obtenidos por la adquisición de datos; a que conclusiones se pueden llegar.
- De los gráficos obtenidos del comportamiento térmico del sistema que observaciones se pueden hacer.

ANEXOS

ANEXO A. BOMBA PEDROLLO

Pumps with peripheral impeller



PERFORMANCE RANGE

- Flow rate up to **40 l/min** (2.4 m³/h)
- Head up to **40 m**

APPLICATION LIMITS

- Manometric suction lift up to **8 m**
- Liquid temperature between **-10 °C** and **+60 °C**
- Ambient temperature up to **+45 °C**
- Max. working pressure: **6.5 bar**
- Continuous service **S1**

CONSTRUCTION AND SAFETY STANDARDS

EN 60335-1 EN 60335-2-41 EN 60034-1
 IEC 60335-1 IEC 60335-2-41 IEC 60034-1
 CEI 61-150 CEI 61-69 CEI 2-3



CERTIFICATIONS



INSTALLATION AND USE

Suitable for use with clean water that does not contain abrasive particles and liquids that are not chemically aggressive towards the materials from which the pump is made. Thanks to their reliability, the fact that they are easy to use and are economical, they are ideal for domestic use and in particular for distributing water in combination with small pressure sets and for the irrigation of gardens and allotments. The pump should be installed in an enclosed environment, or at least sheltered from inclement weather.

PATENTS - TRADE MARKS - MODELS

- Registered trade mark **PKm60** n° 009875394
- Patent Pending
- Motor bracket: patent n° IT1243605 (reduces the risk of the impeller locking after long periods of inactivity)
- Registered EC model n° 001894478

OPTIONALS AVAILABLE ON REQUEST

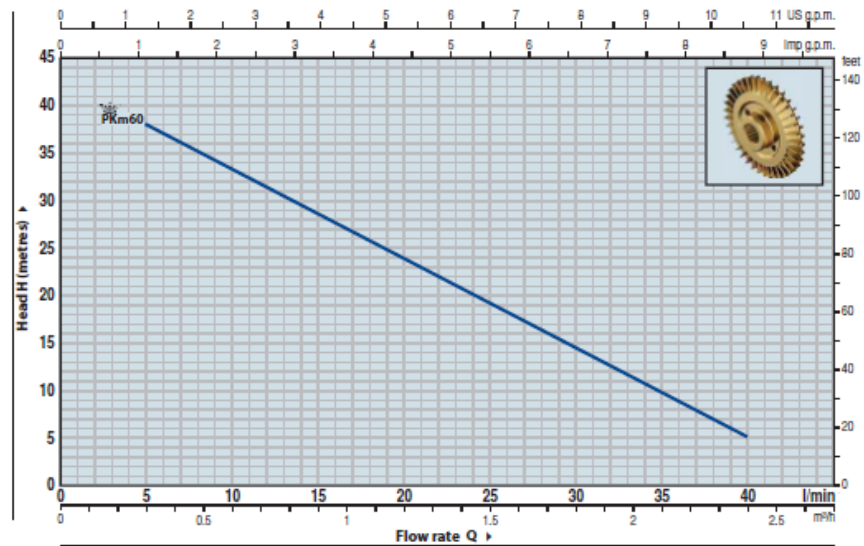
- Special mechanical seal
- Other voltages or 60 Hz frequency

GUARANTEE

1 year subject to our terms and conditions

CHARACTERISTIC CURVES AND PERFORMANCE DATA

50 Hz n= 2900 1/min HS= 0 m



MODEL		POWER		Q	Flow rate									
Single-phase	Three-phase	kW	HP		m ³ /h	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
				l/min	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
				H metres	40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5	

Q = Flow rate H = Total manometric head HS = Suction height

Tolerance of characteristic curves in compliance with EN ISO 9906 App. A.

POS. COMPONENT CONSTRUCTION CHARACTERISTICS

1 PUMP BODY	Cast iron, complete with threaded ports in compliance with ISO 228/1		
2 MOTOR BRACKET	Aluminium with brass insert (patented), reduces the risk of impeller seizure		
3 IMPELLER	Brass, with peripheral radial vanes		
4 MOTOR SHAFT	Stainless steel EN 10088-3 - 1.4104		
5 MECHANICAL SEAL	<i>Seal Model</i>	<i>Shaft Diameter</i>	
	AR-12	Ø 12 mm	
	<i>Materials</i>		
	<i>Stationary ring</i>	<i>Rotational ring</i>	<i>Elastomer</i>
	Ceramic	Graphite	NBR
6 BEARINGS	<i>Model: 2 x 6201 ZZ</i>		
7 CAPACITOR	<i>Capacitance</i>		
	<i>(230 V or 240 V)</i>	<i>(110 V)</i>	
	10 µF 450 VL	25 µF 250 VL	
8 ELECTRIC MOTOR	PKm: single-phase 230 V - 50 Hz with thermal overload protector built-in to the winding. PK: three-phase 230/400 V - 50 Hz. - Insulation: F class. - Protection: IPX4.		

INNOVATIONS



IMPROVED ANTI-SEIZURE SYSTEM

Freedom from seizure is guaranteed by:

- Motor bracket in aluminium incorporating patented brass insert
- Pump body electrostatically powder coated internally and externally with epoxy powder and polymerization at high temperature for increased resistance to rust.



IMPROVED IMPELLER LOCATION

New patented splined coupling system for locating the impeller on the shaft giving quieter operation and improved durability

IMPROVED EFFICIENCY MOTOR

A new concept in electric motors with reduced operating temperature (-20°C) that improves the operating life, and better efficiency for reduced energy consumption.

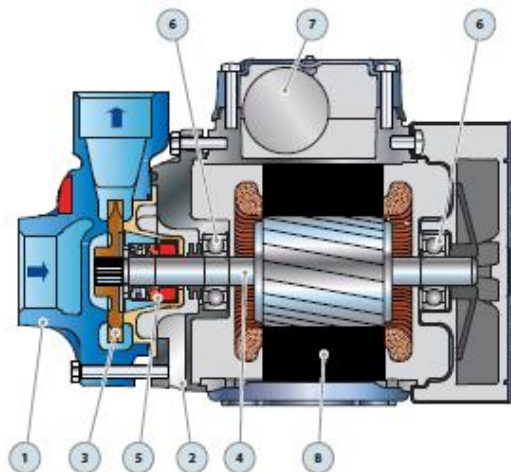


MORE COMPACT DESIGN

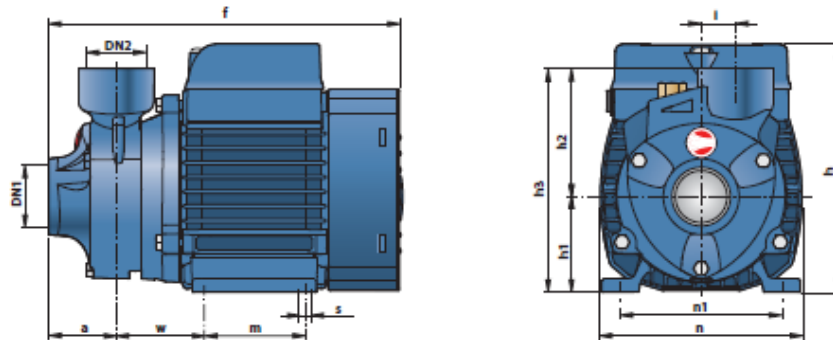
- More compact but with the same performance and connections as the previous model
- Allows more pumps to be packed per shipping container

IMPROVED PAINT PROTECTION

New paint process with resistance to aggressive environments four times better than previously



DIMENSIONS AND WEIGHT



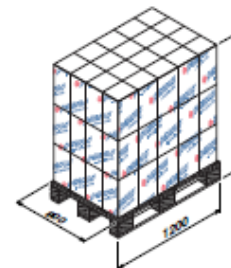
MODEL		PORTS		DIMENSIONS mm													kg	
Single-phase	Three-phase	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	h3	i	m	n	n1	w	s	1~	3~	
PKm 60 [®]	PK 60 [®]	1"	1"	39	207	145	56	75	131	20	55	118	96	53	7	5.2	5.2	

ABSORPTION

MODEL	VOLTAGE (single-phase)			MODEL	VOLTAGE (three-phase)			
	230 V	240 V	110 V		230 V	400 V	240 V	415 V
PKm 60 [®]	2.5 A	2.4 A	5.5 A	PK 60 [®]	2.0 A	1.15 A	1.9 A	1.1 A

PALLETIZATION

MODEL		GROUPAGE				CONTAINER			
Single-phase	Three-phase	n° pumps	H (mm)	1~	kg 3~	n° pumps	H (mm)	1~	kg 3~
PKm 60 [®]	PK 60 [®]	231	1240	1230	1230	363	1870	1905	1905



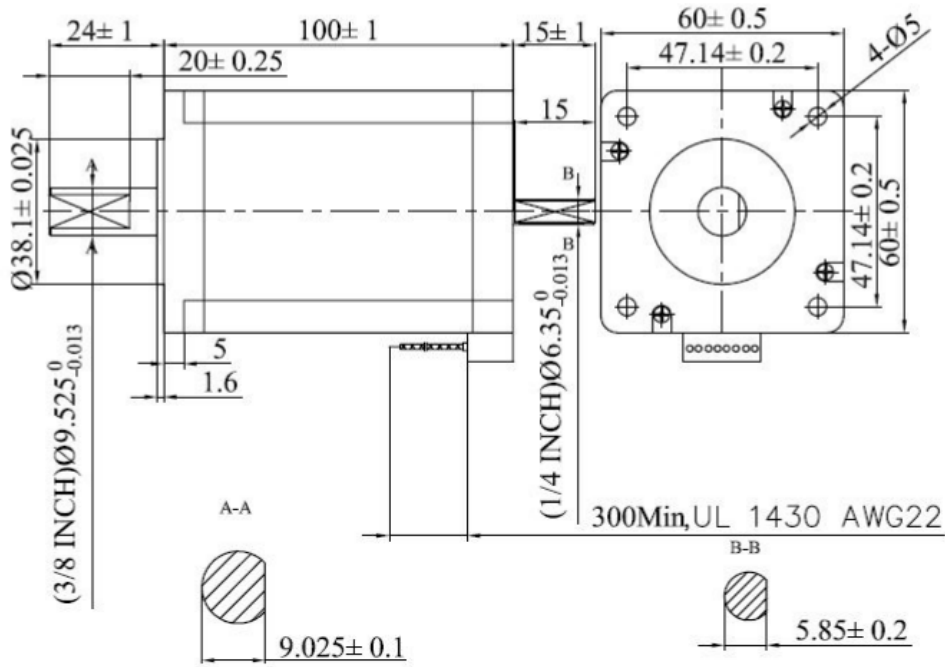
Pedrollo Distribution Ltd, Crossfield Fort, Crossfield Ind Est, Lichfield, WS13 6 RJ
tel: 01543 415200 – fax: 01543 415900 – sales@pedrollo.co.uk – www.pedrollo.co.uk

The features and specifications listed herein are subject to change without notice. This is not a contract. For more information, please contact your local distributor.

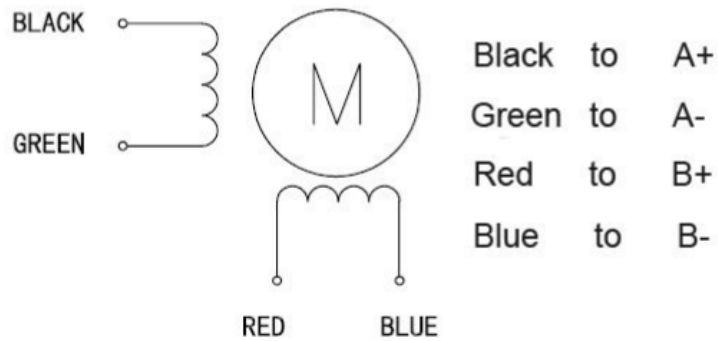
Cat. 15.02.2017

ANEXO B. MOTOR PASO A PASO

Dimension:



MODEL	PHASE	STEP ANGLE DEG /STEP	RATED VOLTAGE V	CURRENT /PHASE A	RESISTANCE /PHASE ohms	INDUCTANCE /PHASE mH	HOLDING TORQUE OZ-IN	ROTOR INERTIA g·cm ²	WEIGHT Kg
	2	1.8	3.0	5.0	0.6	2.5	570		



1430-AWG18#LENGTH310mm

ANEXO C. VENTILADORES ELCO



Inicio

Grupo ELCO

Productos

Contáctenos

Viernes Noviembre 08, 2013.

Serie N > T5

T1 T2 T3 T4 T5 T6 T9 Mixer

Motores
Eléctricos

Motores De
Rotor Externo

Ventiladores

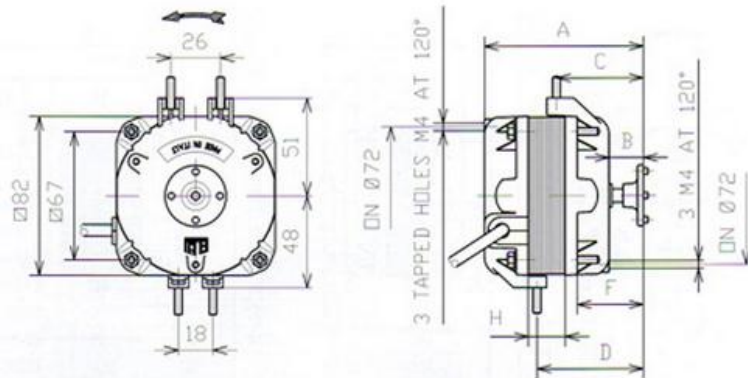
Accesorios

Aplicaciones
Especiales

Novedades

Motor universal con cinco tipos de fijación:

- Orificios de 72mm a 120° para tornillo 3 x M4 sin cabeza
- Orificios de 72mm a 120° para tornillo 3 x M4 con cabeza
- Tornillos salientes M4 para anillo / rejilla con cabeza
- Tornillos en la parte inferior 2 x M4 para montaje, espaciados 26 mm
- Tornillos en la parte inferior 2 x M4 para montaje, espaciados 18 mm



Características

Part Number	V	W Out	W In	Amp	RPM	Cable mm	Imballo Packing
NET5T05ZVN001	230/240	5	32	0,20	1.300/1.550	500	20 Pcs
NET5T10ZVN001	230/240	10	38	0,23	1.300/1.550	500	20 Pcs
NET5T16PVN001	230/240	16	65	0,45	1.300/1.550	500	15 Pcs
NET5T25PVN001	230/240	25	95	0,68	1.300/1.550	500	10 Pcs
NET5T34PVN001	230/240	34	120	0,87	1.300/1.500	500	10 Pcs

Dimensiones

Part Number	H	A	B	C	D	E	F
NET5T05ZVN001	13	80	21	48	52	-	38
NET5T10ZVN001	20	87	22	49	59	-	38
NET5T16PVN001	25	92	21	48	64	-	38
NET5T25PVN001	40	112	26	53	84	-	42
NET5T34PVN001	45	119	28	56	92	-	45

ELCO México

© 2005. Todos los derechos reservados.

jose.zambrano@elco.com.mx

ANEXO D. FIELDPOINT

Thermocouple and RTD Modules for Compact FieldPoint and FieldPoint

Thermocouple and RTD Modules

NI [c]FP-TC-120, NI [c]FP-RTD-122, NI [c]FP-RTD-124

NEW

- 8 temperature inputs
 - Thermocouple or millivolt
 - 2, 3, or 4-wire RTD inputs
- Built-in signal conditioning
 - 50 and 60 Hz noise rejection
 - 16-bit resolution
- Input ranges software configurable per channel
- 2,300 V_{rm} bank isolation for transient overvoltage protection
- Hot-swappable with autoconfiguration
- -40 to 70 °C operating range



Module	Input Channels	Resolution	Input Type	Input Ranges (Software Configurable per Channel)	50/60 Hz Noise Filter	All-Channel Update Rate
[c]FP-TC-120	8	16 bits	Thermocouple Millivolt	J, K, T, N, R, S, W, B ±25 mV, ±50 mV, ±100 mV, -20 to 80 mV	✓	0.88 Hz
[c]FP-TC-122	8	16 bits	2, 3-wire RTD Resistance	Pt 100, Pt 1,000 0 to 400, 0 to 4,000 Ω	✓	0.93 Hz
[c]FP-TC-124	8	16 bits	2, 4-wire RTD Resistance	Pt 100 0 to 400 Ω	✓	0.93 Hz

Overview

The National Instruments [c]FP-TC-120 and [c]FP-RTD-12x devices are versatile temperature input modules for Compact FieldPoint and FieldPoint that can be used to measure thermocouples, millivolt level voltages, and 2, 3, and 4-wire RTDs in applications like temperature chamber control, device testing, and process control. Thermocouple sensors are low cost and flexible temperature devices. RTD sensors are used in applications where you need to acquire temperatures with high accuracy. Two and 3-wire RTDs work well for applications with short signal wires and low noise levels, 4-wire RTDs are well suited for applications with long signal wires or high noise levels. All these I/O modules include overranging and onboard diagnostics to ensure trouble-free installation and maintenance. The modules will both measure and linearize signals on-board to return scaled values to your control or monitoring software. NI TC-120 and RTD-12x modules come with NIST-traceable calibration certificates, ensuring accurate and reliable analog measurements.

Compact FieldPoint and FieldPoint

These modules are available for both FieldPoint and Compact FieldPoint, with identical measurement specifications, functionality, and accuracy. Compact FieldPoint is designed for industrial control applications that perform advanced embedded control, data logging, headless operation, and Ethernet connectivity. Compact FieldPoint, our most rugged and reliable platform, is designed for industrial and mobile

environments with high shock, vibration, and temperature extremes. FieldPoint is a lower-cost distributed I/O system with a variety of communication options in addition to Ethernet. It is designed to be mounted on DIN rails in static applications where the FieldPoint bank is connected to a PC for data collection, analysis, display, and storage.

Smart I/O Modules

With Compact FieldPoint and FieldPoint temperature input modules, you can connect directly to industrial sensors or units under test and get high-accuracy measurements. The modules filter, calibrate, and scale raw sensor signals to engineering units, as well as performing self-diagnostics to look for problems with the module or the wiring such as open thermocouples. With the temperature input modules, your software application reads a linearized, calibrated, and scaled value from the I/O module, eliminating the error-prone step of converting binary values to temperature. For increased accuracy and noise rejection, the temperature modules use a 16-bit delta-sigma ADC with an integrated lowpass filter on each channel, which is configured for 50 and 60 Hz rejection. With high-accuracy 16-bit delta-sigma ADCs on the I/O modules, you also get instrument-quality measurements on an industrially rugged, distributed, embedded system.

The temperature input family of modules offers a variety of different update rates to fit your application, ranging from 0.88 to 0.93 Hz. Overall data throughput depends on software loop speeds and network speeds.

Industrial Control and Distributed I/O

Thermocouple and RTD Modules for Compact FieldPoint and FieldPoint

[c]FP-TC-120

The [c]FP-TC-120 includes eight differential inputs for thermocouples. It also provides cold-junction compensation using a thermistor embedded in the terminal base or connector block. An onboard microcontroller compensates and linearizes the thermocouple reading to the NIST-90 standard, using an advanced linearization routine for maximum accuracy.

[c]FP-RTD-122

The [c]FP-RTD-122 includes eight inputs for 2 and 3-wire RTDs. The module uses a stable current source for sensor excitation and an onboard microcontroller that linearizes and scales the measurements to temperature units. You can configure each channel of the modules to return data scaled to temperature (°C, °F, or °K) or resistance. The 3-wire configuration used with the [c]FP-RTD-122 eliminates errors caused by lead wire resistance but will not reduce errors caused by noise. If your application involves high signal noise or long wires, you should use a 4-wire RTD with the RTD-124 module.

[c]FP-RTD-124

The [c]FP-RTD-124 includes eight inputs for 2 and 4-wire RTDs. The module uses a stable current source for sensor excitation and an onboard microcontroller that linearizes and scales the measurements to temperature units. You can configure each channel of the modules to return data scaled to temperature (°C, °F, or °K) or resistance. If your application involves long signal wires or high signal noise, you should use a 4-wire RTD with the RTD-124 module. The 4-wire configuration used with the [c]FP-RTD-124 eliminates voltage drop due to lead wire resistance and reduces errors caused by noise.

Isolation

The TC-120 and RTD-12x modules feature optical bank isolation with 2,300 V_{rms} of breakdown isolation. In addition, the [c]FP-TC-120 and [c]FP-RTD-122 provide double insulation for up to 250 V_{rms} of operational isolation. Compact FieldPoint can safely be used in applications where hazardous voltages are present with the cFP-CB-1 or cFP-CB-3 connector block. FieldPoint can safely be used in applications where hazardous voltages are present with the FP-TB-x terminal base. These Compact FieldPoint and FieldPoint modules do not have channel-to-channel isolation.

Isothermal Connectivity for the [c]FP-TC-120

For maximum accuracy, we recommend using an isothermal connector block or terminal base with the [c]FP-TC-120.

Compact FieldPoint – The cFP-CB-3 isothermal connector block minimizes the temperature gradient across wiring connections, improving the accuracy of the cold-junction measurement, and therefore, the thermocouple measurement.

FieldPoint – The FP-TB-3 isothermal terminal base minimizes the temperature gradient across the wiring connections, improving

the accuracy of the cold-junction measurement, and therefore, the thermocouple measurement.

Field I/O Connections

Compact FieldPoint and FieldPoint modules include a built-in power distribution bus that provides multiple power connections on the module. A field-wired power supply connected to the voltage (V) and common (C) terminals is internally connected to a power distribution bus that provides additional breakout terminals for voltage supply (V_{SLIP}) and common (COM). These terminals provide a convenient way to distribute power to field devices that require external power.

Each input channel on the TC-120 has two terminals for differential input:

1. Thermocouple positive Input (IN+)
2. Thermocouple negative Input (IN-)

Each input channel on the RTD-122 has three terminals:

1. Excitation output (EXCITE)
2. Sensing Input (SENSE)
3. Common Input (COM)

Each input channel on the RTD-124 has four terminals:

1. Excitation output (EXCITE)
2. Positive sensing input (SENSE+)
3. Negative sensing input (SENSE-)
4. Common Input (COM)

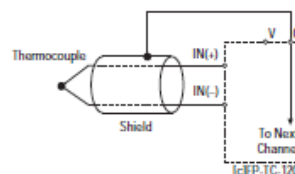
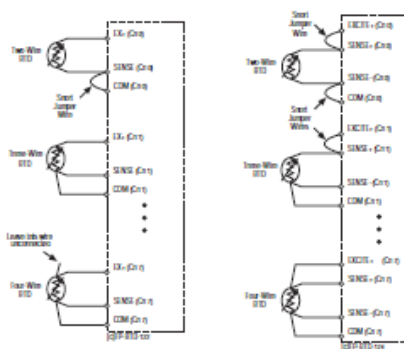


Figure 1. Wiring Schematic for RTD and TC Module

Thermocouple and RTD Modules for Compact FieldPoint and FieldPoint

Ordering Information

Compact FieldPoint		FieldPoint	
NI cFP-TC-120.....	777318-120	NI FP-TC-120.....	777518-120
NI cFP-RTD-122.....	777318-122	NI FP-RTD-122.....	777518-122
NI cFP-RTD-124.....	777318-124	NI FP-RTD-124.....	777518-124
Recommended Compact FieldPoint System Products		Recommended FieldPoint System Products	
NI cFP-2020.....	777317-2020	NI FP-1601.....	777792-01
NI cFP-BP-4.....	778617-04	NI FP-TB-1.....	777519-01
NI cFP-CB-1.....	778618-01	NI FP-TB-3.....	777519-03
NI cFP-CB-3.....	778618-03	NI PS-4 Power Supply.....	778586-90
NI PS-5 Power Supply.....	778805-90	NI Developer Suite Control Edition.....	777905-03
NI Developer Suite Professional Control Edition.....	777906-03		

BUY ONLINE!

Visit ni.com/info and enter *cfptc120*, *cfprt122*, *cfprt124*, *fptc120*, *fprt122*, and/or *fprt124*.

Specifications

Typical for -40 to 70 °C unless otherwise noted.

Input Characteristics

Number of inputs.....	8
ADC resolution.....	16 bits, 1 in 65,536
Type of ADC.....	Delta-sigma
Filters.....	50/60 Hz rejection
Excitation current	
[c]FP-RTD-122.....	0.25 mA
[c]FP-RTD-124.....	2 mA
Data scaling options	
[c]FP-TC-120.....	Temperature (°C, °F, °K) or mV
[c]FP-RTD-122/124.....	Temperature (°C, °F, °K) or resistance (Ω)
Update period, all channels	
[c]FP-TC-120.....	1.13 s
[c]FP-RTD-122/124.....	1.08 s
Signal input bandwidth.....	3 Hz
Gold-junction accuracy (c]FP-TC-120 with FP-TB-3 terminal base or c]FP-CB-3 connector block)	±0.25 °C typ, 0.5 °C max
Input impedance (c]FP-TC-120).....	20 MΩ
Input current (c]FP-TC-120).....	35 nA typ, 140 nA max
Input noise.....	±1 LSB _{FS}
Overvoltage protection (c]FP-TC-120 only).....	±40 V
Common-mode voltage referenced to isolated ground	
[c]FP-TC-120.....	1 V
[c]FP-RTD-122/124.....	2 V

Isolation Voltage

Maximum isolation voltage.....	250 V _{max} , Installation Category II (c]FP-TC-120 only)
Channel-to-channel isolation.....	No isolation between channels
Transient overvoltage.....	2,300 V _{max}

Physical Characteristics

LED indicators	
POWER (green).....	Power on and self-test passed
READY (green).....	Module configured and ready
OPEN TC -dL, -L, -pod (c]FP-TC-120 only).....	Open or broken thermocouple on channel
Dimensions	
(including FP-TB-x terminal base).....	10.7 by 10.9 by 9.1 cm (4.2 by 4.3 by 3.6 in.)
Weight.....	140 g (4.8 oz)

Power Requirement

Power from network module.....	350 mW
--------------------------------	--------

Environmental

FieldPoint modules are intended for indoor use only. For outdoor use, they must be mounted inside a sealed enclosure.

Operating temperature.....	-40 to 60 °C
Storage temperature.....	-55 to 85 °C
Relative humidity.....	10 to 90%, noncondensing
Maximum altitude.....	2,000 m; at higher altitudes the isolation voltage ratings must be lowered.
Pollution degree.....	2

Shock and Vibration

These specifications apply only to Compact FieldPoint. NI recommends Compact FieldPoint if your application is subject to shock and vibration.

Operating vibration, random (IEC 60068-2-64).....	10 to 500 Hz, 5 g _{rms}
Operating vibration, sinusoidal (IEC 60068-2-6).....	10 to 500 Hz, 5 g
Operating shock (IEC 60068-2-27).....	50 g, 3 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations; 30 g, 11 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 3121-1, UL 61010C-1
- CAN/CSA C22.2 No. 1010.1

For UL, hazardous location, and other safety certifications, refer to the product label or to ni.com

Electromagnetic Compatibility

CE, C-Tick, and FCC Part 15 (Class A) Compliant	
Emissions.....	EN 55011 Class A at 10 m
FCC Part 15A above 1 GHz.....	EN 61326:1997, A2:2001, Table 1
Immunity.....	EN 61326:1997, A2:2001, Table 1

For EMC compliance, you must operate this device with shielded cabling.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE Marking, as follows:

Low-Voltage Directive (safety).....	73/23/EEC
Electromagnetic Compatibility Directive (EMC).....	89/336/EEC

Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/handraf.nsf and search by model number or product line.

Ethernet Network Interface for FieldPoint

NI FP-1601

- PC-based distributed I/O Ethernet network interface
- High-performance networking
 - 10BaseT/100BaseTX
 - Event-driven communications and configurable deadbanding
- Secure Ethernet access with IP filtering and password protection
- Industrial-grade reliability
 - Automatic self-diagnostics
 - Redundant power supply inputs
 - Isolated communication bus to I/O modules
 - Network watchdog timer
 - Configurable I/O powerup states

Operating Systems

- Windows 2000/NT/XP

Recommended Software

- LabVIEW
- LabVIEW Datalogging and Supervisory Control Module

Other Compatible Software

- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- Lookout
- VI Logger

Driver Software (included)

- Measurement & Automation Explorer
- OPC server (2.0 compliant)



Module	Ethernet Ports	Event Driven Protocol	10/100 BaseTX
FP-1601	1	✓	✓

Overview and Applications

The National Instruments FP-1601 network interface connects up to nine FieldPoint I/O modules to a high-speed Ethernet network. With up to 100 Mb/s data communication rates and event-driven communications, the NI FP-1601 delivers a high-performance network connection for FieldPoint that is easy to interface with a PC and easy to use.

The FP-1601 manages communications between the host PC and the I/O modules over a local high-speed bus formed by FieldPoint terminal bases. The network interface module also provides diagnostic and autoconfiguration features to simplify installation, use, and maintenance.

Applications can easily communicate with the FP-1601 interface to exchange data. The FP-1601 interface can communicate with a [c]FP-20xx embedded controller or with a Windows computer running LabVIEW, LabWindows/CVI, Measurement Studio, Lookout, or your choice of OPC client application software. Using the FP-1601, you can rapidly build flexible, modular distributed measurement and automation systems.

Network Communications Interface

The NI FP-1601 connects directly to Ethernet networks, autonegotiating on the network for 10 Mb/s or 100 Mb/s communication rates. It includes an RJ-45 connector for connection to 10BaseT and 100BaseTX networks and uses a protocol based on standard TCP/IP to maintain full compatibility with existing networks.

FieldPoint builds on standard TCP/IP network protocols and adds a number of key enhancements, including event-driven communications and publisher-subscriber networking. In a publisher-subscriber architecture one or more client PCs subscribe to I/O data from FieldPoint banks. The network interface monitors connected I/O modules and publishes I/O data only when the value changes. Analog signals can change value within selectable ranges, called dead bands, without causing the system to report data. This event-driven method, along with data compression, helps you avoid unnecessary Ethernet traffic and maximizes communications efficiency.

Ethernet Network Interface for FieldPoint

System Configurations

A single FP-1601 interface manages a bank of up to nine FieldPoint bases and attached I/O modules. The network interface module and terminal bases snap together and mount as a unit on a DIN rail. The network interface module and terminal bases form a high-speed data bus for communication between the network module and the I/O modules. With modular terminal bases, it is easy to expand your FieldPoint system to meet changing application needs.

For more details on configuring a FieldPoint system, see page 532.

Decrease Network Traffic with Event-Driven Communication

Using an event-driven communication protocol, the FieldPoint Ethernet network interface transmits data via Ethernet only when data values change. This eliminates unnecessary network traffic, resulting in more efficient communication. The data values can consist of individual I/O module channels or user-defined variables in the embedded LabVIEW program.

Network Watchdog Timers

The FP-1601 can detect and respond to network failures. If you enable the watchdog timer and the Ethernet link becomes inactive or is lost, the FP-1601 can automatically set the output channels to configured output states.

Power Supply Backup and Regulation

An 11 to 30 VDC supply powers the FP-1601. An extra set of screw terminals is available for a backup UPS or battery. The network interface filters and regulates the power input, redistributing power to all I/O modules in the node through the backplane bus in the terminal bases.

For external power supply options, see FieldPoint Accessories on page 550.

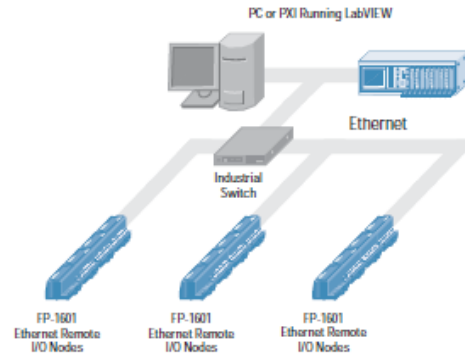


Figure 1. Ethernet provides an open, high-performance network for FieldPoint Distributed I/O

Configurable Output States with Snapshot

With the Snapshot feature, you can easily define the default output states and I/O configurations for the entire FieldPoint node after system power-up. The Snapshot command instructs the Ethernet network interface to memorize the current settings of the I/O modules in the node, storing the information in nonvolatile storage on the FP-1601. After power-up, the FP-1601 will initialize the I/O modules to the configurable output states you defined with Snapshot.

Security

The FP-1601 offers advanced security features so that only authorized clients can access the FieldPoint system. Authorized clients are Ethernet nodes with IP addresses that match user-defined patterns. You can also further qualify the list of clients by their access rights – none, read only, and read/write (with access to configuration). Initially, the network module grants all clients full access. The user then can select an IP pattern that corresponds to the required list of clients. In addition, you can set a password that any user can enter for full access rights to the FieldPoint System.

Ethernet Network Interface for FieldPoint

Easy Configuration Software

National Instruments Measurement & Automation Explorer (MAX) configuration software, included with your FieldPoint hardware, simplifies the use and integration of FieldPoint systems. With MAX, you configure the entire system, including network parameters, module and I/O settings, and named-channel items. MAX will search your Ethernet network and return configuration settings on all your FieldPoint nodes. MAX will also automatically detect the I/O modules on each bank so you can easily configure I/O parameters, such as input ranges, power-up output states, and watchdog states, using intuitive dialog windows. To get your system up and running quickly, from MAX you can also interactively test I/O modules and channels, viewing input data values and setting output values, without writing any software code.

In addition to configuring hardware parameters, MAX also configures and manages named-channel items used in your higher-level programming software. From your application software package, such as LabVIEW, LabWindows/CVI, Measurement Studio, or Lookout, you simply address a named-channel item to access the I/O values.

For more details on configuring a FieldPoint system, see page 532.

Ordering Information

NI FP-1601777792-01

Recommended Compact FieldPoint System Products

NI FP-TB-1777519-01
 NI PS-4 Power Supply778586-90
 NI Developer Suite Standard Control Edition777905-03

BUY ONLINE!

Visit ni.com/info and enter *fp1601*.

Specifications

Network

Network interface	10BaseT and 100BaseTX Ethernet
Compatibility	IEEE 802.3
Communications rate	10 Mb/s, 100 Mb/s, auto negotiated
Maximum cabling distance	100 m/segment
Maximum number of I/O modules per bank	9 terminal bases
Maximum power supplied to terminal bases	9 W
Maximum number of banks	Determined by network topology

Power Requirements

Power supply range	11-30 VDC
Recommended power supply	
FP-1601 with up to 5 modules	15 W (FP-PS-4 or equivalent)
FP-1601 with 6 to 9 modules	20 W
Power consumption	4.5 W + 1.1 (I/O module power requirements)

Physical Characteristics

LED indicators	
POWER (green)	Valid power to module
STATUS (red)	Failure condition
LINK (green)	Valid network connection
SPEED (yellow)	100 Mb/s (10 Mb/s when unit)
ACTIVE (green)	Ethernet activity
Tx (green)	Transmit activity
Rx (green)	Receive activity
User-defined	3 bi-color, 1 green
Screw-terminal wiring	16-26 AWG copper conductor wire with 7 mm (0.28 in.) of insulation stripped from the end
Torque for screw terminals	0.5-0.6 N·m (4.4-5.3 lb·in.)
Weight	235 g (8.3 oz)

Environmental

FieldPoint modules are intended for indoor use only. For outdoor use, they must be installed in a suitable sealed enclosure.

Operating temperature	-25 to 55 °C
Storage temperature	-55 to 85 °C
Relative Humidity	10 to 90%, noncondensing
Maximum altitude	2,000 m
Pollution Degree	2

Safety

The FP-1601 is designed to meet the requirements of the following standards for safety and electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61010-1, IEC 61010-1
 - UL 3121-1, UL 61010C-1
 - CAN/CSA C22.2 No. 1010.1
- For UL and other safety certifications, refer to the product label or to ni.com

Electromagnetic Compatibility

CE, C-Tick and FCC Part 15 (Class A) Compliant	
Emissions	EN 55011 Class A at 10 m FCC Part 15A above 1 GHz
Immunity	EN 61326: 1997/A2:2001, Table 1

For EMC compliance, operate this device with shielded cabling.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE Marking, as follows:

Low Voltage Directive (safety)	73/23/EEC
Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)	89/336/EEC

Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/handraf.nsl and search by model number or product line.