REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL” bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

MERINO VILLEGAS LENIN RAMIRO

lenin.merino@yahoo.com

DIRECTOR: ING. ANDRÉS CELA MSc.

andres.cela@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. ÁNGEL PORTILLA AGUILAR MSc.

angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, Julio 2015

DECLARACIÓN

Yo, Merino Villegas Lenin Ramiro, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

Merino Villegas Lenin Ramiro

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Merino Villegas Lenin Ramiro, bajo nuestra supervisión.

_____

Ing. Andrés Cela MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

_____

Ing. Ángel Portilla Aguilar MSc.

CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme cumplir esta meta tan importante en mi vida, sin él nada hubiese sido posible.

A mi madre Gladis, por su abnegado esfuerzo y sacrificio, por su amor incondicional, por su apoyo y comprensión, por ser la mejor madre.

A mi padre José, por sus valores y consejos, por sus palabras y guía en mi camino, por creer en mí, por su cariño, por ser el mejor padre.

A mi hermana Yahaira, por ser parte tan importante en mi vida.

A mi familia, abuelita, tías, tíos, primos y primas, por estar siempre presentes mostrando su apoyo y cariño.

A mis amigos los HDC con los cuales he compartido tantos momentos gratos, por mantener una amistad tan fuerte y sincera después de tantos años.

A mis amigos y amigas que he conocido a lo largo de éste transcurso, por haberme brindado su amistad y apoyo.

Al Ing. Andrés Cela, por su apoyo y guía a lo largo de este proyecto.

Al Ing. Ángel Portilla, por permitirme realizar este proyecto y brindarme las facilidades para hacerlo realidad.

A todos quienes me acompañaron todos estos años y de alguna manera son parte de esta meta cumplida.

Lenin Merino

DEDICATORIA

A mi familia, porque ustedes son una de las razones más importantes de mi vida. Se los dedico a ustedes papitos porque los amo mucho y siempre me han apoyado incondicionalmente.

Esto es para ustedes.

Lenin Merino

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 1
MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES 1
1.1. AUTOMATIZACIÓN 1
1.1.1. SISTEMAS DE CONTROL 1
1.1.1.1. SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO 1
1.1.1.2. SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO 1
1.1.2. COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE CONTROL 2
1.1.2.1. SENSOR 2
1.1.2.2. TRANSMISOR 2
1.1.2.3. CONTROLADOR 3
1.1.2.4. ELEMENTO FINAL DE CONTROL 5
1.1.3. PLATAFORMAS DE DESARROLLO BASADAS EN MICROCONTROLADORES 5
1.1.2.1. ARDUINO 5
1.1.2.2. CHIPKIT 6
1.1.2.3. RASPBERRY PI 7
1.2. TORRES DE ENFRIAMIENTO 8
1.2.1. CLASIFICACIÓN 8
1.2.1.1. TORRES DE CIRCULACIÓN NATURAL 8
1.2.1.1.1. ATMOSFÉRICAS 8
1.2.1.1.2. DE TIRO NATURAL 9
1.2.1.2. TORRES DE TIRO MECÁNICO 10
1.2.1.2.1. TIRO INDUCIDO 10
1.2.1.2.2. TIRO FORZADO 10
1.2.2. COMPONENTES BÁSICOS 11
1.2.2.1. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA 12
1.2.2.2. RELLENO 12
1.2.2.3. ELIMINADOR DE ARRASTRE 13
1.2.2.4 VENTILADORES 13
1.2.2.5. BOMBAS 13
1.2.3. FUNCIONAMIENTO 14
1.3. PROPIEDADES PSICOMÉTRICAS DEL AIRE 15
1.3.1. TEMPERATURA DE BULBO SECO 17
1.3.2. TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO 17

1.3.3. TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO 18
1.3.4. PRESIÓN ATMOSFÉRICA 19
1.3.5. HUMEDAD ABSOLUTA 19
1.3.5.1. HUMEDAD ABSOLUTA DE SATURACIÓN 20
1.3.6. HUMEDAD RELATIVA 21
1.3.7. CALOR ESPECÍFICO 21
1.3.8. VOLUMEN ESPECÍFICO 22
1.3.9. ENTALPÍA 22
1.4. SISTEMA AIRE – VAPOR DE AGUA 23
1.5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO 24
1.5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN 25
1.5.2. NÚMERO DE UNIDADES DE DIFUSIÓN 26
1.6. TRABAJOS AFINES 28
1.6.1. COMISIONAMIENTO Y AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA UBICADA EN EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR 29
1.6.1.1. OBJETIVO 29
1.6.1.2. COMPENDIO 29
1.6.1.3. EQUIPO 30
1.6.1.4 INCONVENIENTES 31
1.6.2. SIMULACIÓN DEL PROCESO EXERGÉTICO Y AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DEL DECEM 32
1.6.2.1. OBJETIVO 32
1.6.2.2. COMPENDIO 32
1.6.2.3. EQUIPO 33
1.6.2.4. INCONVENIENTES 33

CAPÍTULO 2 35
DISEÑO DEL HARDWARE DEL SISTEMA 35
2.1. INTRODUCCIÓN 35
2.2. SISTEMA DE CONTROL 36
2.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN 38
2.3.1. SENSORES 39
2.3.1.1. SENSOR DE TEMPERATURA PARA EL AGUA 39

2.3.1.2. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA PARA EL AIRE 40
2.3.1.3. SENSOR DE CAUDAL 41
2.3.1.4. SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL 42
2.3.1.4.1. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL 43
2.4. DISEÑO DEL ACTUADOR 45
2.4.1. DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA 45
2.4.2. DISEÑO DEL CIRCUITO DE DISPARO 48
2.4.2.1. CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR CERO 48
2.5. INTERFAZ DE CONTROL Y VISUALIZACIÓN 50
2.5.1. PANTALLA TFT TOUCH SCREEN 51
2.6. CONTROL MANUAL EMERGENTE 53
2.7. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA 54
2.8. SISTEMA DE BOMBEO 56
2.9. SISTEMA DE FLUJO DE AIRE 56
2.10. ESTRUCTURA 57
2.10.1. CÁMARA DE AIRE 59
2.10.2. COLUMNA DE EMPAQUETAMIENTO 59
2.10.3. RECOLECTOR DE AGUA FRÍA 60
2.10.4 EMPAQUETAMIENTO O RELLENO 60
2.10.5. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA 60
2.10.6. ELIMINADOR DE ARRASTRE 60
2.11. IMPLEMENTACIÓN 61
2.11.1. IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES 61
2.11.2. ELABORACIÓN DE LA CAJA DE CONTROL 62

CAPÍTULO 3 66
DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA 66
3.1. ALGORITMO DE CONTROL 66
3.1.1. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PULSO DE UN CONTROLADOR PI DIGITAL 66
3.1.2. SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR MEDIANTE ZIEGLER–NICHOLS 67
3.1.3. ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN EN EL MICROCONTROLADOR 70
3.2. DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA LA PLATAFORMA DE CONTROL 71
3.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA 72

3.2.2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA 73
3.2.2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODO DE OPERACIÓN AUTOMÁTICO 74
3.2.2.2. DIAGRAMAS DE FLUJO DE SUBRUTINAS 76
3.2.2.2.1. DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO 76
3.2.2.2.2. PULSO DE DISPARO PARA CONTROLAR EL ACTUADOR 77
3.2.2.2.3. CONTEO DE PULSOS DEL SENSOR DE FLUJO DE AGUA 78
3.2.2.2.4. LECTURA, VISUALIZACIÓN, ALMACENAMIENTO DE DATOS Y EJECUCIÓN DEL ALGORITMO PI 78
3.2.2.2.5. CONTROL MANUAL 81
3.3. INTERFAZ DE CONTROL LOCAL 82
3.4. INTERFAZ DE CONTROL REMOTO 87
3.4.1. DESCRIPCIÓN 89
3.4.2. DIAGRAMA DE FLUJO 90
3.4.3. CREACIÓN DE UN PAQUETE EJCUTABLE EN LABVIEW 93

CAPÍTULO 4 96
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO 96
4.1. PRUEBAS DE LA INTERFAZ GRÁFICA REMOTA 97
4.1.1. PRUEBA DE PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO 97
4.1.2. PRUEBA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE LÍNEAS DE OPERACIÓN DE LA TORRE 98
4.1.2.1. DATOS OBTENIDOS PARA EL SET POINT ESTABLECIDO DE 45ºC 99
4.1.2.2. DATOS OBTENIDOS PARA EL SET POINT ESTABLECIDO DE 42ºC 100
4.1.2.3. DATOS OBTENIDOS PARA EL SET POINT ESTABLECIDO DE 38ºC 101
4.1.2.4. DATOS OBTENIDOS PARA EL SET POINT ESTABLECIDO DE 34ºC 102
4.1.2.5. DATOS OBTENIDOS PARA EL SET POINT ESTABLECIDO DE 30ºC 103
4.1.3. PRUEBA DE REGISTRO GRÁFICO 105
4.2. PRUEBA DE LA INTERFAZ GRÁFICA LOCAL 107
4.2.1. PRUEBA DE PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO 107
4.2.2 PRUEBA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE LÍNEAS DE OPERACIÓN DE LA TORRE 109
4.2.3.PRUEBA DE REGISTRO GRÁFICO 112
4.3. CÁLCULOS REQUERIDOS EN LA PRACTICA DE LABORATORIO 114
4.3.1. CÁLCULO DEL FLUJO DE AIRE PARA CADA LÍNEA DE OPERACIÓN DE LA TORRE OBTENIDA 114

4.3.2. CÁLCULO DEL NÚMERO DE UNIDADES DE DIFUSIÓN, HDU, Y COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA 117

CAPÍTULO 5 120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 120
5.1. CONCLUSIONES 120
5.2. RECOMENDACIONES 122

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 123

Anexos:

Anexo A. HOJA GUÍA PARA LA PRÁCTICA DE LABORATORIO
Anexo B. MANUAL DE USUARIO
Anexo C. TABLA PSICOMÉTRICA PARA CONDICIONES DE SATURACIÓN A LA PRESIÓN DE QUITO
Anexo D. HOJAS DE DATOS
Anexo E. CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO.

RESUMEN

En la actualidad la educación exige conocimientos teóricos y prácticos de alta calidad lo cual conlleva una modernización tecnológica especialmente en cuanto a equipamiento didáctico se refiere.

En el laboratorio de transferencia de calor de la EPN existe un módulo didáctico el cual representa un modelo práctico y demostrativo del proceso de transferencia de calor utilizado en la industria ecuatoriana, por lo cual su aporte en la educación de los estudiantes es muy útil. Sin embargo el equipo en la actualidad presenta un funcionamiento y adquisición de datos manual lo cual lo torna no muy confiable durante una práctica.

El presente proyecto trata la implementación de un sistema de control automatizado para la torre de enfriamiento, el cual abarca: la instrumentación del módulo a través de sensores digitales, el desarrollo de un algoritmo de control para la temperatura de agua, la elaboración de una caja de control y el diseño e implementación de una interfaz gráfica que permita al usuario controlar y monitorear al módulo.

La instrumentación del módulo se logra con la ayuda de sensores digitales que miden la temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y flujo de agua y caída de presión en la torre. Para ello ha sido necesario realizar un adecuamiento físico del lugar donde serán implementados los sensores así como realizar previamente un mantenimiento de la estructura y equipo con lo cual se asegure un buen funcionamiento de la torre.

El control de temperatura de agua a la salida de la torre se lo efectúa mediante el algoritmo de control PI, mismo que va a controlar el flujo de aire suministrado por el ventilador. Esto factibiliza aumentar el rango de variación de la temperatura del agua a la salida lo cual va a permitir al estudiante realizar un análisis de datos en un rango más amplio.

Asimismo se realiza la implementación de una caja de control eléctrico y electrónico donde se va a localizar toda la circuitería necesaria, además de la plataforma de control arduino utilizada.

El desarrollo e implementación de la interfaz gráfica de control y monitoreo se lo realiza teniendo en cuenta las opciones de control local y remoto del equipo. Para la primera se utiliza una pantalla a color TFT táctil de 4.2” compatible con arduino, la cual se adecúa y ubica en la caja de control. Para la segunda se requiere un computador y el software de programación LabView, a través del cual se desarrolla la interfaz para control y monitoreo remoto por parte del usuario.

Las respectivas interfaces permiten al usuario la visualización de los datos adquiridos por los sensores de manera numérica y gráfica a través del tiempo, el encendido y apagado del sistema, termostato, bomba y ventilador, el establecimiento del set point requerido (temperatura del agua a la salida de la torre) y la obtención de las gráficas características de la torre según el momento en que sean requeridas.

La instalación, configuración y puesta en marcha del sistema se realizó respetando las características estéticas y de operación correspondientes. De igual manera todos los objetivos, así como alcances planteados, fueron cumplidos a cabalidad, tal como se muestra a lo largo del proyecto.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto tiene por objeto el diseño de un sistema de control para la torre de enfriamiento a través de la implementación de sensores que permitan adquirir información digital misma que es requerida por el controlador para efectuar su algoritmo programado. Para el monitoreo y control del sistema por parte del usuario se desarrolla las interfaces de control para operar en modo manual o en modo remoto. Para lograr los objetivos planteados se desarrolla el proyecto con los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Describe las generalidades y marco teórico necesario en el desarrollo del presente proyecto.

Capítulo 2. Detalla el hardware, los sensores utilizados así como los circuitos implementados y los diseños correspondientes.

Capítulo 3. Presenta el algoritmo de programación desarrollado así como su implementación digital. Además describe mediante diagramas de flujo el programa implementado en arduino para el controlador, las pantallas programadas en arduino para la interfaz de control local y el programa elaborado en labview para la interfaz de control remoto.

Capítulo 4. Muestra las pruebas de funcionamiento efectuadas tanto para la interfaz de control local, así como para la interfaz de control remoto. De igual manera, se elaboran los cálculos matemáticos correspondientes que se requerirán para la realización de una práctica de laboratorio.

Capítulo 5. Presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES

1.1 AUTOMATIZACIÓN

Es la implementación de un conjunto de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar máquinas y/o procesos industriales sustituyendo a operadores humanos. Se emplea generalmente en procesos repetitivos o de alto riesgo, logrando aumentar la velocidad, calidad y nivel de producción.

1.1.1 SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control son un conjunto de elementos interrelacionados dedicados a obtener la salida deseada de un sistema o proceso.

1.1.1.1 Sistemas de control en lazo abierto

Los sistemas de control en lazo abierto son aquellos en los que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada, como se observa en la Figura 1.1. Son sensibles a perturbaciones y su exactitud depende de su calibración.

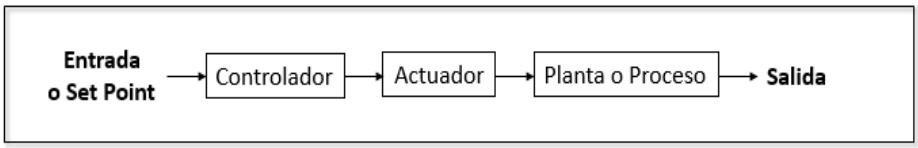


Figura 1.1. Sistema de Control en Lazo Abierto

1.1.1.2 Sistemas de control en lazo cerrado

Este tipo de sistemas se caracterizan porque presentan realimentación, como se muestra en la Figura 1.2, la cual permite comparar la señal de salida con la señal de entrada y calcular el error de manera que la acción de control sea una función

de ambas. Trata de llevar la señal de salida al valor deseado y son menos sensibles a perturbaciones.

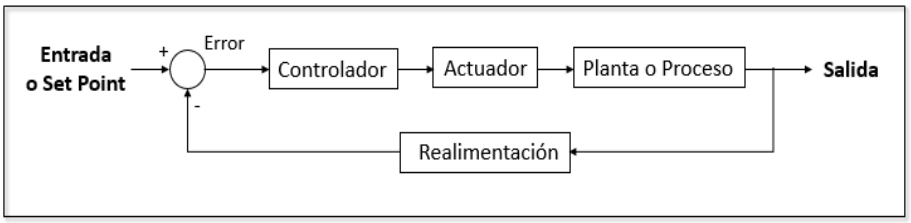


Figura 1.2. Sistema de Control en lazo cerrado

1.1.2 COMPONENTES BÁSICOS EN UN SISTEMA DE CONTROL

Todo sistema de control está formado por cuatro elementos básicos: sensor, transmisor, controlador y elemento final de control. Los dos primeros se encargan de medir la variable controlada y transmitirla al controlador el mismo que decide la acción a tomar para posteriormente ser ejecutada por el elemento final de control.

1.1.2.1 Sensor

Es el elemento primario de medición el cual capta la magnitud de la variable controlada del sistema y proporciona una magnitud física o una señal eléctrica, misma que se utiliza para obtener la información deseada que es la medición.

La señal del sensor puede ser muy pequeña y puede requerir un acondicionador para amplificar este valor.

1.1.2.2 Transmisor

Se conoce como transmisor al conjunto acondicionador de señal que normaliza la salida del sensor para ser utilizada como señal de entrada al controlador. En ocasiones se encuentra integrado al sensor y en otras como un dispositivo independiente conectado al sensor mediante conductores eléctricos, caños, etc.

1.1.2.3 Controlador

Es el encargado de tomar la decisión en el sistema de control mediante una comparación entre el valor de la señal del proceso que llega del sensor-transmisor y el valor del punto de control o set point, ejecutando la acción de control adecuada y enviando la señal apropiada al elemento final de control para que este ejecute la acción.

Según la forma como responden los controladores a las señales de entrada, usualmente se pueden encontrar los siguientes tipos de control:

- **Control Proporcional**

Consiste en amplificar la señal de error antes de aplicarla a la planta o proceso, es decir el error es multiplicado por una constante proporcional y enviada a la salida, entonces la señal de accionamiento es proporcional a la señal del error del sistema.

Su objetivo es reducir la magnitud del error de manera rápida, sin embargo tiene como desventaja que produce un error en estado estacionario conocido como offset, la variable del proceso se estabiliza luego de un período de perturbación.

- **Acción Integral**

Es un reajuste automático que tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, el cual no puede ser eliminado por el modo proporcional. El controlador integral, multiplica una constante por la integral del error a través del tiempo hasta generar una señal de corrección lo suficientemente grande para disminuir a cero el error de estado estacionario y mantenerlo así, su rapidez de cambio en la respuesta del controlador es proporcional al error.

- **Acción derivativa**

La acción derivativa en ocasiones denominada control de velocidad consiste en derivar el error con respecto al tiempo y multiplicarlo por una constante, de esta manera evita que el error se incremente y dota al sistema de cierta capacidad de anticipación ante los cambios bruscos en el proceso. Su propósito es mejorar la

estabilidad de lazo cerrado. Se caracteriza porque opera sobre la velocidad de cambio del error, y no sobre el error mismo.

- **Control Proporcional Integral (PI)**

El control proporcional con acción integral introduce el ajuste automático del cero de un controlador proporcional, de tal manera que la señal de salida varía a una velocidad proporcional a la desviación. Se considera como inconveniente el hecho de que puede conducir a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente lenta.

- **Control Proporcional Derivativo (PD)**

El control proporcional con acción derivativa hace que la señal de salida responda a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por tanto tiende a aumentar la estabilidad del sistema.

La acción derivativa no afecta en forma directa al error en estado estable, añade amortiguamiento al sistema, por tanto, permite el uso de un valor más grande en la ganancia, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

- **Control Proporcional Integral Derivativo (PID)**

Es el más completo al explotar las ventajas de las acciones P, I, D. La acción proporcional con ganancia ajustable para obtener estabilidad, la acción integral o de puesta en cero para eliminar la desviación permanente (offset) y la acción derivativa o de velocidad de cambio la cual produce un esfuerzo para volver rápidamente al valor de ajuste.

- **Control On/Off**

Consiste en activar la señal de salida cuando la variable está por debajo del set point y luego desactivarla cuando la variable se encuentre por arriba.

No es el control más adecuado cuando se desea mantener a la variable del proceso constante y uniforme.

1.1.2.4 Elemento final de control

Es el elemento que ejecuta la acción de control recibida por parte del controlador, generalmente los elementos de control más usuales en los procesos con variables continuas son las válvulas de control y los variadores de frecuencia.

1.1.3 PLATAFORMAS DE DESARROLLO BASADAS EN MICROCONTROLADORES

"Son placas que integran microcontroladores, circuitos y componentes electrónicos que proporcionan diversas capacidades básicas, como alimentación de energía o comunicación. La ventaja de trabajar con plataformas de desarrollo es la facilidad de integración de partes y piezas, ahorro en el tiempo de desarrollo de la aplicación y el costo". [1]

Existe una gran variedad de plataformas con sus propias características, entre las cuales nombraremos a: Arduino, ChipKit y Raspberry.

1.1.3.1 Arduino

Es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. El hardware consiste en una placa con microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida como se observa en la Figura 1.3, a través de los cuales se puede tomar información del entorno de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación *processing/wiring* y el gestor de arranque (*bootloader*) que corre en la placa.

El lenguaje de arduino (basado en *wiring*) está implementado en C/C++, mientras que *processing* está basado en java. *Bootloader* es una porción de código almacenado en una zona especial de la memoria flash del microcontrolador que

permite inicializar todos los recursos del sistema una vez energizado, y cargar el programa al microcontrolador.

Los proyectos de arduino pueden ser autónomos o comunicarse con un programa (software) que se ejecuta en un ordenador (ej. Flash, Processing, MaxMSP), es decir, puede utilizar otros lenguajes gracias a que arduino se comunica mediante transmisión de datos en formato serie, el mismo que es soportado por una gran variedad de lenguajes.

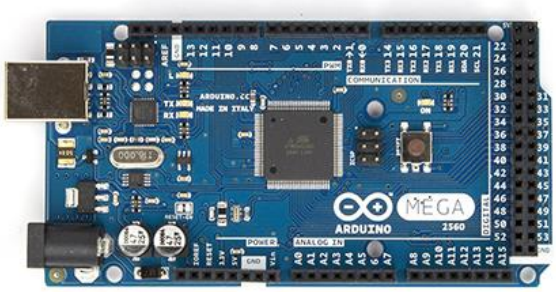


Figura 1.3. Arduino Mega [2]

1.1.3.2 ChipKit

Es una plataforma de desarrollo de código abierto basada en el PIC32, como se observa en la Figura 1.4, compatible con el lenguaje de programación y entorno de desarrollo de Arduino. Apareció como una alternativa a Arduino en la plataforma PIC, adecuada para una gran cantidad de procesamiento debido a su capacidad de 32 bits a 80MHz.

Figura 1.4. ChipKit Uno32 [3]

Porta con fiabilidad las librerías de Arduino e intenta mantenerse a la par con respecto a estas. El entorno de desarrollo que es el mismo que el de arduino es libre, sin embargo algunas librerías siguen siendo propietarias. Fue diseñada en colaboración entre Microchip y Digilent.

1.1.3.3 Raspberry Pi

Es una plataforma con software y hardware libre que posee un tamaño y precio comparables a arduino, como se muestra en la Figura 1.5.

Se encuentra basada en un procesador de la familia ARM11 de 32 bits con un sistema de 700MHz. “Es capaz de ejecutar un sistema operativo real en Linux, puede realizar varias tareas, soportar dos puertos USB y conectarse de forma inalámbrica a internet. En pocas palabras, es lo suficientemente potente como para funcionar como una computadora personal aunque no lo suficientemente potente como para competir con una Mac o PC”. [4]

La Raspberry Pi se beneficia del software de Linux sin embargo no es tan flexible, por ejemplo, la lectura de los sensores analógicos requiere la asistencia de hardware adicional. Trabaja como una mini computadora y resulta adecuada para aplicaciones de video, música, interfaces gráficas o enviar correos electrónicos, es decir, permite desarrollar cosas bastante más complejas de las que desarrollaríamos con Arduino.

Figura 1.5. Raspberry Pi modelo B [4]

1.2 TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento son estructuras de transferencia de calor entre el aire atmosférico y el agua caliente procedente de los procesos industriales, el contacto entre el aire y el agua es directo y se lo realiza con la ayuda de rellenos los cuales mejoran el tiempo de residencia del líquido dentro de la torre logrando una mayor área de contacto entre ambos fluidos. El agua caliente ingresa por la parte superior de la torre y se distribuye uniformemente en el interior mediante el uso de pulverizadores. El contacto directo entre el aire con el agua provoca la evaporación de una porción de agua, la cual requiere calor de cambio de fase que es tomado del agua circundante, logrando su enfriamiento. [5]

"El material del cual se encuentran fabricadas las torres así como los rellenos pueden ser: madera, plástico, acero inoxidable, hierro galvanizado, asbesto, entre otros materiales que eliminen completamente el problema de la corrosión". [6]

"El uso de este tipo de sistemas de enfriamiento se justifica cuando es necesario disipar grandes cantidades de calor a bajo costo y cuando la temperatura de enfriamiento del agua requerida no es muy lejana de la temperatura ambiental". [5]

1.2.1 CLASIFICACIÓN

De acuerdo a su forma de suministro de aire se clasifican en:

- Torres de circulación natural.
- Torres de tiro mecánico.

1.2.1.1 Torres de circulación natural

1.2.1.1.1 Atmosféricas

Como se observa en la Figura 1.6 en las torres de enfriamiento atmosféricas el movimiento del aire depende de los vientos predominantes. Son simples duchas de

agua caliente dentro de caja, sin relleno y sin ventilador, son torres muy voluminosas.

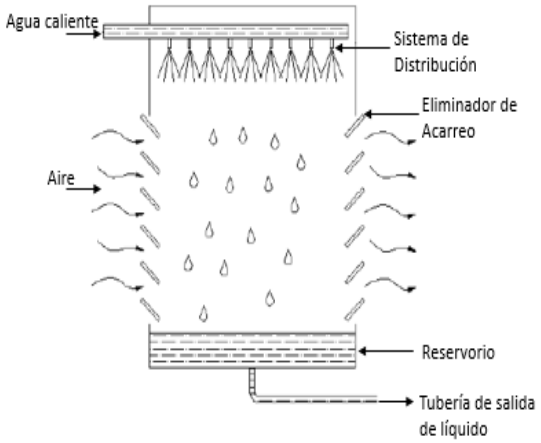


Figura 1.6. Torre Atmosférica [7]

1.2.1.1.2 De tiro natural

También llamadas torres hiperbólicas por su forma, Figura 1.7, el flujo del aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para obtener el tiro deseado y son muy utilizadas para grandes flujos de agua en las centrales térmicas. Tienen rellenos de baja compacidad.

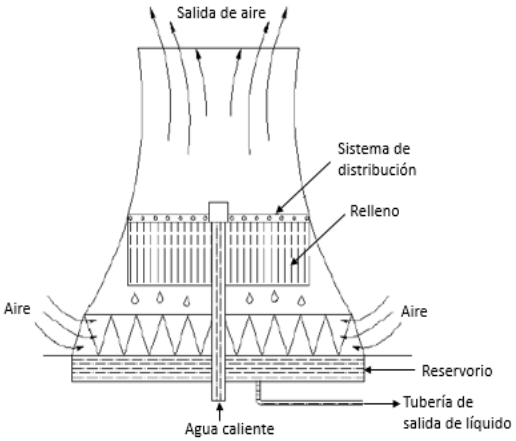


Figura 1.7. Torre de Tiro Natural [7]

1.2.1.2 Torres de tiro mecánico

En las torres de tiro mecánico el agua caliente que llega a la torre es rociada mediante aspersores que dejan pasar hacia abajo el flujo del agua a través de unos orificios. El aire utilizado en el enfriamiento del agua es extraído de la torre de cualquiera de las siguientes maneras:

1.2.1.2.1 Tiro inducido

Como se observa en la Figura 1.8 el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador de tipo axial situado en la parte superior de la torre.

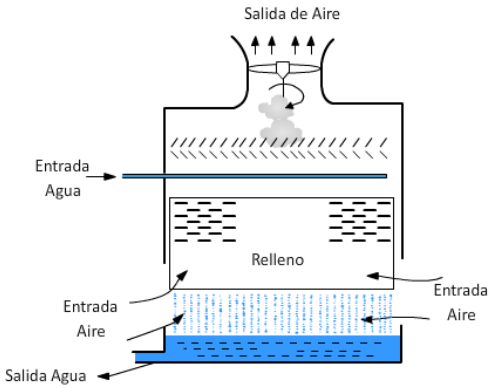


Figura 1.8. Torre de Tiro Inducido [5]

Pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado.

- El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno. Es decir el flujo de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto.
- El flujo cruzado significa que el aire se mueve en dirección perpendicular respecto al agua que desciende.

1.2.1.2.2 Tiro forzado

El aire es forzado por un ventilador situado en la parte inferior de la torre y se descarga por la parte superior, como se observa en la Figura 1.9. Es un diseño común en la industria y el ventilador puede ser axial o centrífugo.

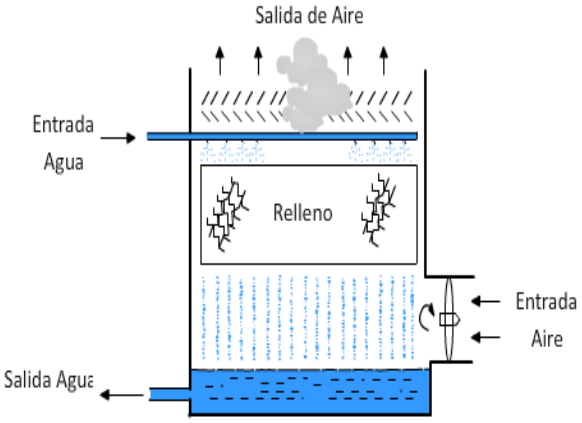


Figura 1.9 Torre de Tiro Forzado [5]

1.2.2 COMPONENTES BÁSICOS

Como se observa en la Figura 1.10 los componentes básicos de una torre de enfriamiento son:

- Sistema de distribución de agua
- Relleno
- Eliminador de arrastre
- Ventilador
- Bomba

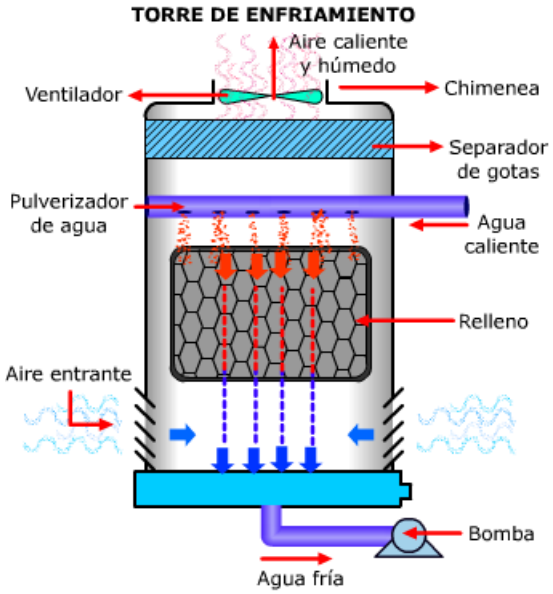


Figura 1.10. Componentes Básicos de una Torre de Enfriamiento [5]

1.2.2.1 Sistema de distribución de agua

Existen dos tipos de sistemas de distribución, uno que opera por gravedad y otro por presión.

El primero se caracteriza por un recipiente con agujeros que distribuyen el agua; tiene bajos costos de operación debido a la poca potencia de bombeo que requiere y es de fácil mantenimiento. Sin embargo no se usa en torres que operen a contraflujo debido a las dificultades que presentan en la distribución uniforme del agua.

El segundo se compone de sistemas de pulverización con toberas orientadas hacia abajo. Brindan mayor rendimiento al sistema pero su mantenimiento es más frecuente, y los consumos energéticos son mayores. [5]

1.2.2.2 Relleno

Es el material empaquetado que tiene la torre en su interior, su finalidad es aumentar la superficie de contacto del aire con el agua, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas a través del aparato.

“El relleno debe cumplir con las siguientes características:

- Alto coeficiente de transferencia de masa y calor.
- Proporcionar un área de interfase grande para el contacto entre el agua y el aire, para lo cual la superficie del relleno por unidad de volumen debe ser grande.
- Permitir el flujo de cantidades considerables de los fluidos sin que existan caídas serias de presión; con este propósito, la fracción de espacio vacío debe ser grande.
- Resistencia a la corrosión.
- Fácil manipulación e instalación.

- Ser liviano y de bajo costo.

De acuerdo a su distribución dentro de la columna existen dos tipos de rellenos: ordenados y desordenados.

- Los ordenados se caracterizan por una baja caída de presión y mayor caudal de los fluidos que en los rellenos desordenados.
- Los desordenados se caracterizan por una mayor superficie interfacial pero la caída de presión es mayor". [6]

1.2.2.3 Eliminador de arrastre

Son paneles ubicados en la parte superior de la zona de empaquetamiento que redireccionan el flujo y separan las gotas del aire, haciéndolas caer de nuevo sobre el relleno reteniendo las gotas de agua arrastradas por el aire que sale de la torre.

"Tienen dos efectos positivos; el primero es reducir la reposición del agua y el segundo evitar la formación de ambientes saturados que puedan afectar las torres adyacentes". [5]

1.2.2.4 Ventiladores

"En las torres de enfriamiento se pueden utilizar dos tipos de ventiladores: Axiales para torres de tiro forzado e inducido y centrífugos para torres de tiro forzado. Los ventiladores axiales son apropiados para mover grandes volúmenes de aire y tienen mayores aplicaciones en equipos industriales grandes. Los ventiladores centrífugos son adecuados para impulsar caudales relativamente pequeños con mayores caídas de presión". [5]

1.2.2.5 Bombas

Las bombas son las encargadas de suministrar el agua que sale del proceso hacia la torre para su enfriamiento.

Consumen una fracción importante de la potencia requerida en todo el sistema.

1.2.3 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de una torre de enfriamiento convencional, es el siguiente:

El agua caliente llega por tuberías a un distribuidor situado en la parte superior de la unidad, luego es distribuido a través del relleno ubicado en forma de mallas o enrejados el cual dispersa la corriente descendente del líquido logrando obtener un área máxima de transferencia con el aire atmosférico, el cual entra por la parte inferior de la torre.

"El enfriamiento se da por la evaporación de una parte de la corriente de agua caliente (calor latente), y en forma secundaria por transferencia de calor del agua caliente al aire que circula (calor sensible); por consiguiente ocurrirá una pérdida continua por evaporación de agua. Finalmente, el agua enfriada por el proceso es recogida en el fondo del equipo estando así lista para ser reciclada". [8]

"El funcionamiento se expresa comúnmente por los valores de la escala y de la aproximación.

- La escala es la reducción de temperatura del agua, es decir la diferencia entre la temperatura del agua a la entrada y a la salida.
- La aproximación es la diferencia entre la temperatura del bulbo húmedo del aire a la entrada y la temperatura del agua a la salida". [6]

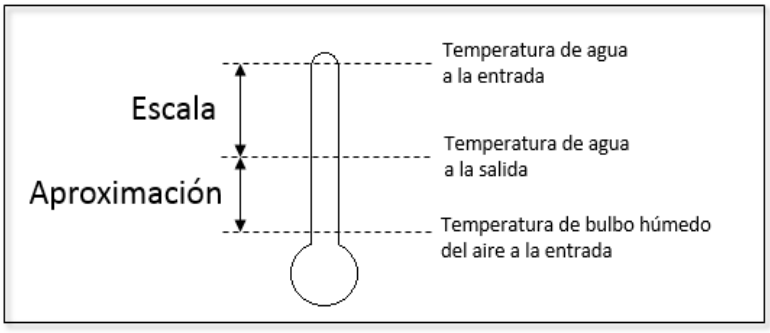


Figura 1.11. Escala y aproximación en una torre de enfriamiento [6]

1.3 PROPIEDADES PSICOMÉTRICAS DEL AIRE

El aire seco consiste en la mezcla de gases con ausencia de vapor de agua. El aire atmosférico que envuelve a la tierra es una mezcla de aire seco y vapor de agua, a la que se llama aire húmedo. La cantidad de vapor de agua en el aire seco varía de un lugar a otro y de acuerdo a las condiciones atmosféricas locales. La variación está entre 1 al 3%, siendo mayor en aquellos lugares cercanos a cuerpos de agua grandes, como: lagos, ríos, y el mar, y menor en regiones áridas.

El aire saturado corresponde a la mezcla con la cantidad máxima de agua que es posible en la fase de vapor. Cuando el aire se encuentra saturado con agua, no es capaz de recibir más agua en forma de vapor y por lo tanto, cualquier intento en ello provocaría la condensación del vapor, generándose la lluvia.

Así la psicometría consiste en el estudio del aire y sus propiedades, particularmente en lo concerniente al aire húmedo.

Tabla 1.1. Gases que componen el aire en la atmósfera [9]

		AIRE SECO	
Nombre	**Símbolo Químico**	**% en Peso**	**% en Volumen**
Nitrógeno	N_2	75.47	78.03
Oxígeno	O_2	23.19	20.99
Dióxido de carbono	CO_2	0.04	0.03
Hidrógeno	H_2	0.00	0.01
Gases raros	---	1.30	0.94

Carta psicométrica:

Como se observa en la Figura 1.12 la carta psicométrica es una gráfica de las propiedades del aire, la cual se utiliza para determinar cómo varían las mismas al cambiar la humedad del aire. Aunque las tablas psicométricas son más precisas, el uso de la carta psicométrica puede ahorrar mucho tiempo y cálculos en la mayoría de los casos donde no se requiera una extremada precisión.

La carta es una gráfica trazada con los valores de las tablas psicométricas. Conociendo dos propiedades cualesquiera del aire, las otras pueden determinarse a partir de la carta.

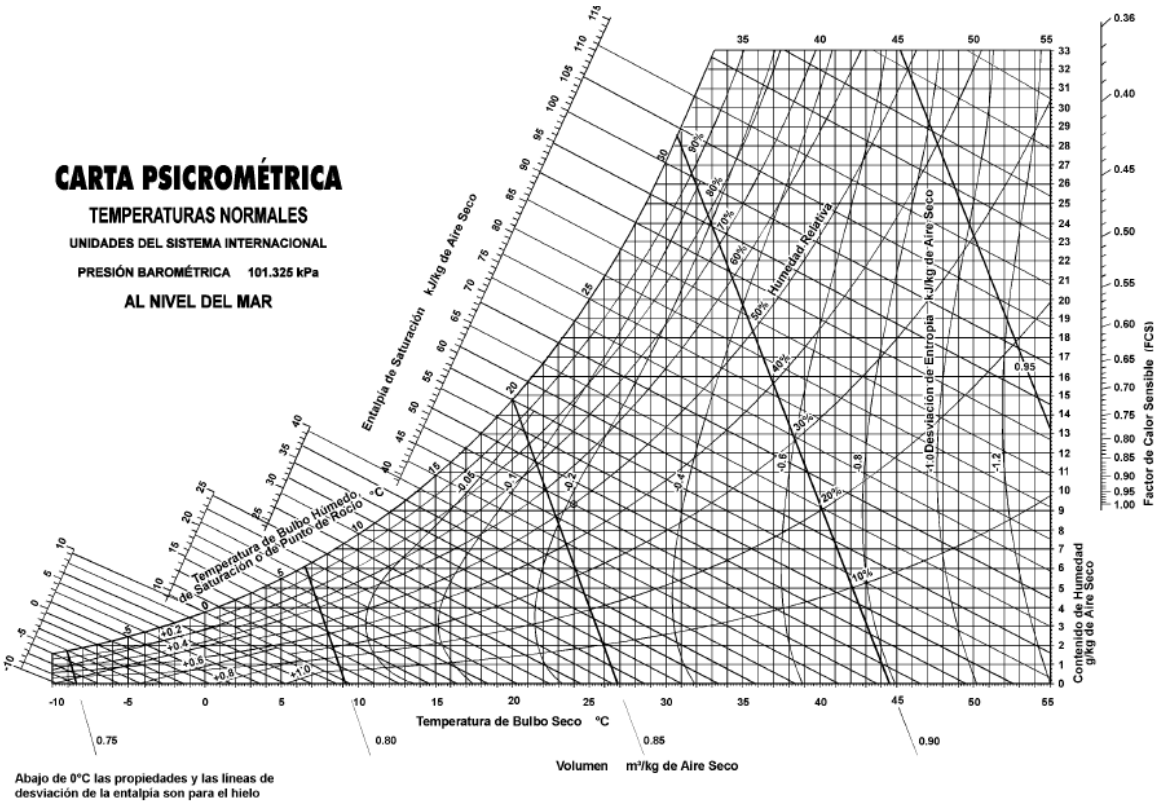


Figura 1.12. Carta Psicométrica a presión barométrica de nivel del mar [9]

Una carta psicométrica muestra las siguientes propiedades termodinámicas del aire húmedo a diferentes presiones atmosféricas:

- Temperatura de bulbo seco.
- Temperatura de bulbo húmedo.
- Temperatura del punto de Rocío (o saturación).
- Humedad absoluta y relativa.
- Calor específico.
- Volumen específico.
- Entalpía.

1.3.1 TEMPERATURA DE BULBO SECO

Es la temperatura tomada con un termómetro ordinario cuyo elemento sensor se encuentra en condición seca. Generalmente se conoce como temperatura ambiente. En la carta psicométrica esta escala es la horizontal localizada en la parte baja de la carta y sus líneas se extienden verticalmente hacia arriba como se observa en la Figura 1.13.

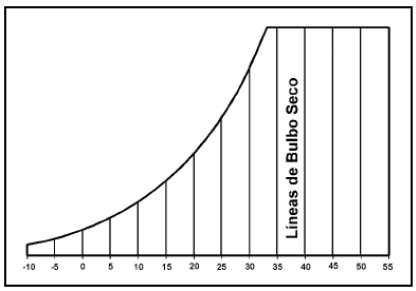


Figura 1.13. Líneas de temperatura de bulbo seco [9]

1.3.2 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

Es la temperatura medida con un termómetro cuyo bulbo o sensor se encuentra cubierto de un material humedecido con agua. El paso del aire provoca la evaporación del agua hasta que se logra la saturación del aire. La temperatura que registra dicho termómetro es inferior a la observada en un termómetro de bulbo seco debido a que la evaporación del agua en el bulbo húmedo requiere calor que se toma del termómetro logrando su enfriamiento.

Si el aire se encuentra saturado (humedad relativa del 100%), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco y del punto de rocío. Sin embargo, la humedad relativa normalmente es menor de 100% y el aire está parcialmente seco, por lo que la temperatura de bulbo húmedo es siempre algo menor que la del bulbo seco y mayor que el punto de rocío. Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha.

En estos sistemas la temperatura más baja a la que puede descender el agua es la que marca el termómetro de bulbo húmedo a la entrada del aire, ésta temperatura de saturación adiabática es la mínima que puede alcanzar el agua en el tiempo infinito de contacto entre el agua y el aire.

La escala correspondiente es la que se encuentra del lado superior izquierdo, en la parte curva de la carta psicométrica, sus líneas corren diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba abajo en un ángulo de aproximadamente 30 grados de la horizontal como lo muestra la Figura 1.14.

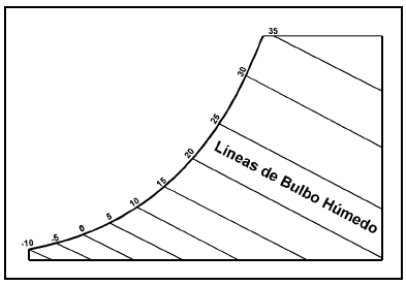


Figura 1.14. Líneas de temperatura de bulbo húmedo [9]

1.3.3 TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO

Es la temperatura que alcanza el aire húmedo cuando se enfría a presión constante hasta saturarse, por debajo de la cual se condensa el vapor de agua persistiendo las condiciones de saturación. La escala correspondiente en la carta psicométrica es la misma que la de temperatura de bulbo húmedo. Sin embargo, las líneas de la temperatura de punto de rocío, corren horizontalmente de izquierda a derecha como se observa en la Figura 1.15.

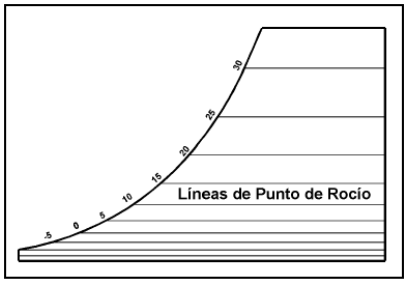


Figura 1.15. Líneas de temperatura de punto de rocío [9]

1.3.4 PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Es la fuerza o peso que ejerce el aire atmosférico sobre la superficie terrestre. La presión atmosférica estándar a nivel del mar es de 101.3 kPa (760 mm Hg) y a la altura de Quito es de 73 kPa (547 mm Hg). El valor de la presión atmosférica disminuye conforme se eleva sobre el nivel del mar. [6]

1.3.5 HUMEDAD ABSOLUTA [6]

La humedad absoluta, w, es el peso real de vapor de agua en el aire. Es la relación entre la masa del vapor y la masa del gas seco.

$$w = \frac{m_v}{m_a} \tag{1.1}$$

Se asume que el vapor y el gas se comportan como gases ideales.
Por tanto:

$$P_v V = n_v RT = \frac{m_v}{M_v} RT \tag{1.2}$$

$$P_a V = n_a RT = \frac{m_a}{M_a} RT \tag{1.3}$$

$$P_t V = n_t RT = \frac{m_t}{M_t} RT \tag{1.4}$$

$$w = \frac{M_v}{M_a} \frac{P_v}{P_a} \tag{1.5}$$

$$w = \frac{M_v}{M_a} \frac{P_v}{(P_t - P_v)} \tag{1.6}$$

Donde:

P_v = presión parcial del vapor, [kPa]

P_a = presión parcial del gas, [kPa]

$P_t = P_v + P_a$ = presión total de la mezcla, [kPa]

V = volumen de la mezcla, [m^3]

n_v = # de moles del vapor, [kg-mol]
n_a = # de moles del gas, [kg-mol]
$n_t = n_v + n_a$ = # de moles de la mezcla, [kg-mol]
m_v = masa del vapor, [kg]
m_a = masa del gas, [kg]
m_t = masa de la mezcla, [kg]
M_v = peso molecular del vapor, [kg/kg-mol]
M_a = peso molecular del gas, [kg/kg-mol]
M_t = peso molecular de la mezcla, [kg/kg-mol]
R = constante universal de los gases, [kg/kg-mol.K]
w = humedad absoluta, [kg vapor de agua/kg aire seco]

Los valores de la humedad absoluta correspondiente se encuentran en la escala vertical al lado derecho de la carta psicométrica, como se muestra en la Figura 1.16. Las líneas corren horizontalmente de derecha a izquierda, son paralelas a las líneas de punto de rocío y coinciden con éstas.

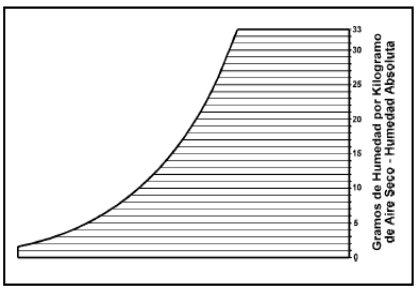


Figura 1.16. Líneas de humedad absoluta [9]

1.3.5.1 Humedad absoluta de saturación [6]

Cuando la presión de vapor alcanza el valor de la presión de saturación a la temperatura de la mezcla, la humedad absoluta de saturación, w_s, es:

$$w_s = \frac{M_v}{M_a}\frac{P_s}{(P_t - P_s)} \tag{1.7}$$

Donde:
P_s = presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla.

1.3.6 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa de la mezcla, φ, es la relación entre la cantidad de vapor de agua en el aire que contiene la mezcla, y la cantidad máxima de vapor de agua que tendría si estuviera completamente saturada a una temperatura dada, expresada en porcentaje.

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} \tag{1.8}$$

Las líneas correspondientes en la carta psicométrica son las curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Expresadas siempre en porcentaje, este valor disminuye al alejarse de la línea de saturación.

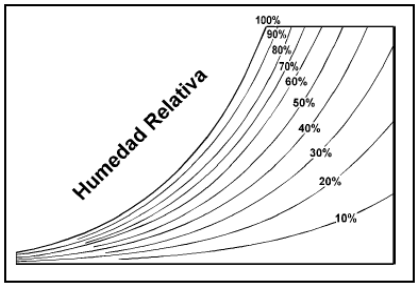


Figura 1.17. Líneas de humedad relativa [9]

1.3.7 CALOR ESPECÍFICO [6]

El calor específico a presión constante, Cp, es el calor necesario para elevar en 1 [ºC] la temperatura de 1 [kg] de gas con el vapor que lo acompaña.

Para una mezcla gas-vapor con una humedad absoluta w, se tiene:

$$Cp = Cp_a + w\ Cp_v \tag{1.9}$$

En la que el Cp está expresado en $[kJ/kg\ de\ gas\ seco.\ ^oC]$

1.3.8 VOLUMEN ESPECÍFICO

El volumen específico o volumen húmedo, V_H, son los metros cúbicos de aire húmedo que corresponden a un kilogramo de aire seco, es el inverso de la densidad.

Aplicando la ley de los gases ideales para una mezcla con humedad absoluta w, a T [ºC] y p_t [kPa], el volumen específico es: [6]

$$V_H = \left(\frac{1}{M_a} + \frac{w}{M_v}\right)\frac{R(t+273)}{p_t} \tag{1.10}$$

Donde:
V_H está expresado en $[m^3/kg\ aire\ seco]$

Las líneas correspondientes en la carta psicométrica se encuentran aproximadamente en un ángulo de 60º con la horizontal, y van aumentando de valor de izquierda a derecha, como lo refleja la Figura 1.18.

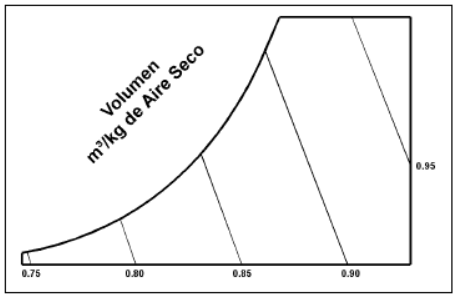


Figura 1.18. Líneas de volumen específico [9]

1.3.9 ENTALPÍA

La entalpía, H, es la magnitud que caracteriza el contenido energético (calor total de la mezcla gas-vapor) total del aire por unidad de masa.

La entalpía de la mezcla es: [6]

$$H = Cp(T - T_o) + w\lambda_o \qquad (1.11)$$

Donde:

T_o = temperatura de referencia, [^{o}C]

λ_o = calor latente de vaporización, [kJ/kg]

La entalpía se expresa en [kJ / kg $_{aire}$].

"Si en la ecuación anterior se sustituye el valor de Cp por su valor apropiado y w por w_s, la entalpía resultante será la entalpía de saturación de la mezcla donde la temperatura T del gas corresponde a la de bulbo húmedo". [6]

Las correspondientes líneas de entalpía en la carta psicométrica son meramente extensiones de las líneas de bulbo húmedo y su escala se encuentra del lado izquierdo lejana a la línea curva.

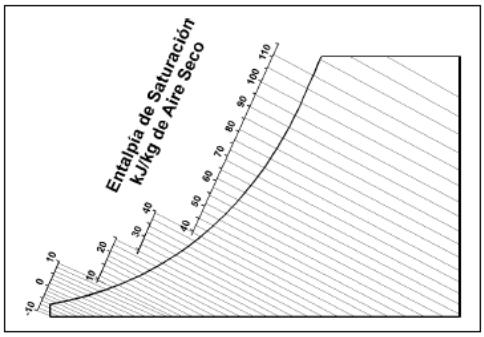


Figura 1.19. Líneas de entalpía [9]

1.4 SISTEMA AIRE-VAPOR DE AGUA [6]

En el sistema el aire y el vapor de agua serán representados con los subíndices *a* y *v* respectivamente. Además las relaciones psicométricas para el sistema se las obtiene a partir de las ecuaciones (1.6) hasta (1.11).

Para realizar los cálculos se debe tener en cuenta las siguientes constantes:

M_v = 18.02 [Kg/Kg-mol] de H_2O

M_a = 28.97 [Kg/Kg-mol] de aire

R = 8.3 [Kg/Kg-mol.^{K}]

C_{pa} = 1.0 [KJ/Kg.^{o}C]

C_{pv} = 1.82 [KJ/Kg.^{o}C]

El estado de referencia para el cálculo de la entalpía es el agua líquida:

T_0 = 0 [^{o}C] , para ese estado, λ_0 = 2501 [kJ/kg].

Entonces:
$$w = 0.622 \frac{\rho_v}{(\rho_t - \rho_v)} \tag{1.12}$$

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} 100\% \tag{1.13}$$

$$Cp = 1 + 1.82w \tag{1.14}$$

$$V_H = (0.03452 + 0.05549w) \frac{8.3(T+273)}{p_t} \tag{1.15}$$

$$H = (1 + 1.82w)T + 2501w \tag{1.16}$$

Donde:

w = humedad absoluta, [kg agua/kg aire seco]

φ = humedad relativa, [adimensional %]

C_p = calor específico de la mezcla, [kJ/kg.^{o}C]

V_H = volumen específico, [m^3/kg aire seco]

H = entalpía de la mezcla, [kJ/kg aire seco]

1.5 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO [6]

En el proceso en cuestión el calor es transferido por convección y por difusión simultáneamente. La diferencia de temperaturas es el potencial para la

transferencia de calor sensible, (convección); y la diferencia de las presiones parciales del vapor hace posible la evaporación o transferencia de calor latente, (difusión). Ambos potenciales sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y transferencia de calor sensible al aire, aumentando así la entalpía del aire.

Entonces, el calor total transferido en una torre de enfriamiento es la suma del calor transferido por difusión más el calor transferido por convección del agua al aire.

La ecuación para el análisis del comportamiento de una torre de enfriamiento de agua es:

$$LC_{P_L}dt = GdH = K_x a(H' - H)dV \quad [6] \qquad (1.17)$$

Donde:

L = flujo másico de agua, [kg/s]
C_{P_L} = calor específico del agua, [kJ/kg.ºC]
G = flujo de aire, [kg/s]
K_x = coeficiente total de transferencia de masa, [kg/s.m^2][kg agua/kg aire seco]
a = superficie de agua por m^3 de la torre, [m^2/m^3]
H' = entalpía del gas saturado, [kJ/kg]
H = entalpía del aire a la salida, [kJ/kg]

1.5.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

En las torres de enfriamiento se realiza el proceso de humidificación y por consiguiente las condiciones de equilibrio y las de operación se expresan en función de la entalpía del aire y de la temperatura del agua a través de la “recta de operación”.

A partir de la ecuación (1.17) se puede escribir: [6]

$$\frac{LC_{P_L}}{G} = \frac{dH}{dt} \tag{1.18}$$

“Ésta es la ecuación de una línea recta en la que las condiciones del agua en la parte inferior de la torre están descritas por el subíndice 1, y en la parte superior de la torre con el subíndice 2. Esta recta es la línea de operación de la torre y tiene una pendiente $m = LC_{P_L}/G$ ”. [6]

$$H_2 = H_1 + \frac{LC_{P_L}}{G}(T_{L2} - T_{L1}) \tag{1.19}$$

La temperatura del agua a la entrada (T_{L2}) y a la salida (T_{L1}) constituyen datos iniciales obtenidos mediante sensores instalados, mientras que el valor de las entalpías del aire a la entrada (H_1) como a la salida (H_2) pueden obtenerse con la ayuda de una carta psicométrica o matemáticamente con la ayuda de la ecuación (1.16) y los datos obtenidos de temperatura de bulbo seco y de humedad relativa, como se muestra al final del capítulo 4. El valor de C_{P_L} correspondiente al agua es 4.1868 [kJ/kg.K].

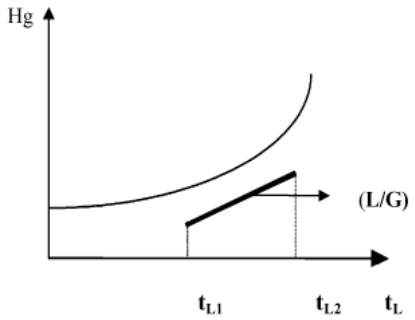


Figura 1.20. Forma de la línea de operación de una Torre de Enfriamiento

1.5.2 NÚMERO DE UNIDADES DE DIFUSIÓN

“El número de unidades de difusión es una medida de la cantidad de difusión requerida (una medida de la cantidad de masa de agua que se quiere transferir al aire). Se necesita cierta cantidad de ellas para reducir la temperatura del agua de entrada al ponerla en contacto con un aire de cierto bulbo húmedo.

El valor del número de unidades de difusión está expresado por la integral mostrada en la ecuación (1.20). La integral está determinada por las condiciones del proceso impuesto en la torre, mas no por el comportamiento propio de la torre, así, cualquier tipo de torre empacada o vacía requerirá de esa cantidad de unidades de difusión. La altura de la torre varía para cada tipo de empaque utilizado y las cantidades de agua y aire suministrados". [6]

Así, la ecuación (1.17) puede ser expresada en la siguiente forma: [6]

$$n_d = C_{P_L} \int_{t_{L1}}^{t_{L2}} \frac{dt}{H' - H} = K_x a \frac{V}{L} \tag{1.20}$$

Donde:
n_d = número de unidades de difusión
T_{L1} = temperatura del agua en la salida de la torre, [°C]
T_{L2} = temperatura del agua en la entrada de la torre, [°C]
V = volumen de la torre, [m^3]
H' = entalpía del gas saturado, [kJ/kg]
H = entalpía del aire a la salida, [kJ/kg]

Para pequeños incrementos de la temperatura del líquido, T_L, la ecuación puede expresarse como: [6]

$$n_d = C_p \sum_{t=t_{L1}}^{t=t_{L2}} \frac{\Delta t}{(H' - H)_{med}} \tag{1.21}$$

Es decir, como la sumatoria de valores finitos, donde la media de las entalpías divide al cambio de temperatura, y el calor específico C_p corresponde al del agua.

La entalpía del gas saturado (H') se la determina a través de la ecuación (1.16) y el Anexo C, usando para su cálculo la temperatura del líquido T_L y la humedad de saturación w_s.

La entalpía del aire a la salida (H), se la determina a partir de la ecuación (1.19), en donde todos los parámetros permanecen constantes y varía solamente la temperatura T_{L2}.

La altura de la torre varía para cada tipo de empaque utilizado y las cantidades de agua y aire suministrados.

Definimos las cantidades L' y G' como los caudales de agua y aire en base a una sección transversal de un m^2, A = 1, donde $L' = L/A$ y $G' = G/A$, entonces el volumen de la torre, $V = Az$, es:

$$V = z \tag{1.22}$$

Donde z es la altura de la torre, en (m); la ecuación (1.20) se transformará en:

$$n_d = \frac{K_x a}{L'} z \tag{1.23}$$

donde:

$$HDU = \frac{z}{n_d} \tag{1.24}$$

En la que el término HDU es la altura de una unidad de difusión: [6]

$$HDU = \frac{L'}{K_x a} = \frac{L}{K_x a * A} \tag{1.25}$$

El coeficiente volumétrico de transferencia de masa ($K_x . a$) depende del tipo de relleno. HDU se obtiene experimentalmente para un tipo particular de relleno a flujos específicos para los fluidos que componen el sistema. [6]

1.6 TRABAJOS AFINES

A nivel nacional e internacional se puede encontrar proyectos enfocados en la automatización de torres de enfriamiento de agua, todo esto gracias a que la automatización de procesos es una herramienta que permite el ahorro económico

de energía, mejoramiento de productividad y cumplimiento de las tareas repetitivas y rutinarias de los equipos utilizados para su funcionamiento, este proceso es muy utilizado a nivel industrial y a continuación se describen dos proyectos afines al trabajo de titulación tratado.

1.6.1 COMISIONAMIENTO Y AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA, UBICADA EN EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

1.6.1.1 Objetivo

Comisionar y automatizar la torre de enfriamiento didáctica, ubicada en el laboratorio de transferencia de calor, a través de la programación de un PLC que permitirá al sistema cumplir con la capacidad de frío de la torre, y servirá como una herramienta académica para la asignatura de transferencia de calor.

1.6.1.2 Compendio

Este proyecto se realizó en la Universidad Pontifica Bolivariana de Bucaramanga-Colombia, y se basa en la verificación del correcto funcionamiento de los distintos instrumentos de medición instalados en la torre, además del desarrollo de un sistema de supervisión y control de las variables involucradas en el proceso.

El control del sistema se lo realiza desde una PC con capacidad de comunicación OPC hasta un PLC, el mismo que comanda el funcionamiento de la torre y que utiliza la red local de la universidad. De esta manera el proyecto brinda al estudiante una herramienta académica que permita supervisar y controlar el proceso de enfriamiento de agua en una torre, permitiendo al usuario manipular, leer y escribir las diferentes variables involucradas en el proceso; también permite al estudiante tener una visión más clara de la aplicación de los conocimientos de la ingeniería en los procesos industriales, ya que una de las principales características del desarrollo tecnológico, es buscar un funcionamiento cada vez más automatizado.

1.6.1.3 Equipo

- El módulo de automatización está compuesto por un PLC Siemens S7-200, una CPU 224 XP, un módulo Ethernet CP 243-1, cuatro módulos de entrada y salida análogas EM 235.
- Una Electroválvula proporcional DANFOSS la cual controla el flujo de agua, dependiendo de las condiciones de operación.
- Dos sensores de temperatura RTD PT100.
- Una válvula on-off marca ASCO utilizada para controlar el nivel de agua del depósito de almacenamiento.
- Un sensor de flujo 2536, el cual está instalado en la tubería y permite determinar el caudal que circula por la línea enviando esta información al sistema de supervisión y control para que tome la acción de control necesaria dependiendo de las condiciones de operación requeridas.
- Dos sensores de presión AUTONICS PSA/PSB SERIES, los cuales producen una señal de salida de 0 a 5 [V] proporcionalmente a un rango de 0 a 100 [kPa].
- Dos sensores de humedad y temperatura HTS-801, el sensor de humedad SA-801 tiene un rango de medición de 0-100% de humedad relativa en una señal de 4 a 20 [mA] respectivamente y un sensor de temperatura TS-801 con rango de -20 a 80 [^{o}C] con una Pt 100, con salida de 4 a 20 [mA].
- Bomba centrífuga PEDROLLO PUMP PKm 60, monofásica de 0.5 H.P. con caudal máximo de 40 [l/min], Hmáx = 40 [m]., la cual hace recircular el agua del depósito, calentada por medio de resistencias y realizar el proceso de enfriamiento mediante la exposición del líquido a la corriente en contraflujo de aire, proveniente del ventilador situado en la base de la torre de enfriamiento.

  Además:

El lenguaje de programación escogido es el lenguaje Ladder, mismo que es ejecutado en el software Step 7 – MicroWin.

La interfaz hombre máquina (HMI) se desarrolla en Excel 2010, la cual se comunica por medio de un módulo Ethernet y un OPC server, que actúan como cliente y servidor respectivamente para permitir la comunicación con Microsoft Excel, dando como resultado un sistema de supervisión y control desde Excel. Por medio del Pc-acces es posible entablar una comunicación entre el software del PLC y Microsoft Excel a través de protocolo Ethernet.

1.6.1.4 Inconvenientes

- Debido a que el PLC S7-200 es un equipo de gama media que no está dirigido al trabajo en redes, la comunicación vía Ethernet resultó un inconveniente el cual se solucionó con la implementación de un módulo de Ethernet CP 243-1 perteneciente a la misma gama Siemens.
- La falta de un laboratorio de metrología o instrumentos calibrados y certificados que sirvan de apoyo, hizo necesario recurrir a la ayuda de entidades y empresas de la región para poder realizar la evaluación del funcionamiento de los instrumentos. Un banco seco para calibración de sensores de temperatura fue suministrado por la Corporación CTD y un higrómetro portátil prestado por la empresa ARM LTDA (Asesoría de Reingeniería de Mantenimiento Industrial Limitada).
- Los instrumentos de medición y control instalados son de tipo industrial, por lo que se hizo necesario limitar su rango de lectura y ajustarlos a las condiciones del proyecto, dejando en evidencia la dificultad para conciliar equipos e instrumentación con fines académicos.
- La falta de información física de los elementos que conforman el equipo, se la pudo solucionar con una intensa búsqueda en las distintas bases de datos de fabricantes y proveedores vía web.
- Dificultades técnicas en la compatibilidad entre protocolos de comunicación para LABVIEW y WIN CC (software a utilizar en primera instancia). Optaron por utilizar la plataforma de Excel, puesto que por un lado existe un OPC, denominado PC Acces, creado por siemens para la comunicación del S7 200 con otras plataformas, y por otro, la Universidad cuenta con Agreement el

cual permite usar Excel en cualquier tipo de laboratorio. Permitiendo la realización del proyecto de una manera relativamente económica. [10]

1.6.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO EXERGÉTICO Y AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DEL DECEM.

1.6.2.1 Objetivo

Realizar la simulación del proceso exergético y automatización del sistema de adquisición de datos de la torre de enfriamiento ubicada en el laboratorio de termodinámica de la ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.

1.6.2.2 Compendio

Este proyecto se lo ha desarrollado en la Escuela Politécnica del Ejército ubicada en Salgolquí-Ecuador, el cual nace de la necesidad de repotenciar el módulo existente en el laboratorio de termodinámica debido a que ya ha cumplido con su tiempo de vida útil, y los errores propios de dicha condición hacen que las prácticas sean cada vez menos confiables.

El proyecto consiste en la creación de la simulación virtual interactiva del funcionamiento de la torre de enfriamiento, con la utilización de software como Autodesk 3Ds Max 9, Autocad 2008, Mathcad, TDB, Dark Basic, Adobe Premier Pro y otros. También se procede a evaluar el estado actual de todo el equipo y dispositivos con el fin de sustituir, reparar o adicionar los elementos faltantes y en mal funcionamiento. Además abarca el diseño, instalación, configuración, y puesta en funcionamiento del sistema automático de adquisición de datos del proceso energético, para lo cual implementa dispositivos sensoriales que permitan adquirir información digital de la variación de energía en el proceso en cada fluido dentro del equipo, logrando de esta manera facilitar información más precisa y detallada en la realización de las prácticas futuras por los estudiantes.

1.6.2.3 Equipo

- Trece sensores de temperatura NATIONAL LM35DZ-ND, mismos que poseen calibración directa en grados Celsius y su factor de escala lineal de +10 [mV/ºC], con un rango de temperatura de 0 a 100 [ºC].
- Siete sensores de humedad HONEYWELL HIH-4030-001s, con relación lineal de voltaje de salida vs porcentaje de humedad relativa mismos que miden de 0 al 100 [%] de humedad relativa y poseen un tiempo de respuesta de 5 segundos.
- Un sensor de Caudal OMEGA FPR204-PC-PS, el cual posee transmisor con salida de pulsos y su medida de presión máxima de 200 PSI con rango de flujo de 0.5 a 10 galones por minuto.
- Un sensor de presión diferencial OMEGA PX139-001D4V, con salida de 0.25 a 4.25 [Vdc] y un rango de medición ±1 [PSI].
- Tarjeta de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENTS USB-6218 donde están conectados todos los sensores, misma que cuenta con 32 entradas y 2 salidas analógicas a 16 bits, 8 entradas y 8 salidas digitales y dos contadores de 32 bits.
- Un Motor trifásico, a 220 voltios y 60 [Hz].

Además el software utilizado para la programación y manejo del DAQ y de la HMI es el que provee la propia NATIONAL INSTRUMENTS el cual es LabView, de tal forma que se garantiza la compatibilidad y correcto funcionamiento del mismo, la interfaz de comunicación entre el DAQ y el PC se la realiza vía USB.

1.6.2.4 Inconvenientes

- En la programación, específicamente con errores en la construcción del HMI, producidos en su mayoría por incompatibilidad entre operaciones internas, por lo se optó por realizar la programación basándose en tareas independientes, en donde las subrutinas no dependen de otras evitando así los errores concatenados.

- Dificultad en conseguir sensores que posean las características correctas y con interfaces de conexión iguales, por lo que se tiene que realizar varias importaciones logrando así simplificar al máximo el sistema electrónico de adquisición y presentación de datos.
- No contar en los laboratorios de la universidad con instrumentos que posean características superiores a los utilizados con el fin de poder calibrar exactamente los datos obtenidos, por lo que para verificar los datos de los sensores se procede a comparar sus valores con otros datos obtenidos a partir de instrumentos comunes de medición manual utilizados en el laboratorio.
- Se encuentra la caja de resistencias colapsada y no se lo logra habilitarla, así que se procede a contratar una empresa para la reparación de la caja de resistencias, en donde las 4 existentes fueron cambiadas. [11]

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL HARDWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se describen los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que componen el sistema de la torre de enfriamiento.

2.1 INTRODUCCIÓN

En la implementación de cualquier sistema automatizado siempre es necesario realizar un análisis previo, con el fin de obtener un resultado acorde a lo esperado.

Del análisis respectivo se decidió implementar el controlador con la ayuda de alguna plataforma electrónica y para la interacción del sistema con el usuario se procede a desarrollar dos interfaces gráficas; una para control remoto a través de computador con la ayuda del programa LabView, y la otra para un control local del sistema a través de una pantalla táctil TFT. Además se implementa un control manual emergente para ser utilizado dado el caso que el control en modo manual y remoto se encuentren obsoletos.

Las funciones del sistema de control son:

- Poner en marcha el equipo y dispositivos que conforman el sistema.
- Adquirir los datos provenientes de los sensores.
- Controlar la temperatura del agua a la salida de la torre, a través del caudal de aire suministrado por el ventilador hacia la torre.
- Transmitir los datos necesarios hacia la interfaz de visualización.
- Guardar los datos necesarios para permitir la visualización de gráficas correspondientes a la variación de temperatura y humedad relativa, además mostrar las distintas líneas de operación de la torre requeridas.

Con estos objetivos se muestra el diagrama de bloques de la Figura 2.1.

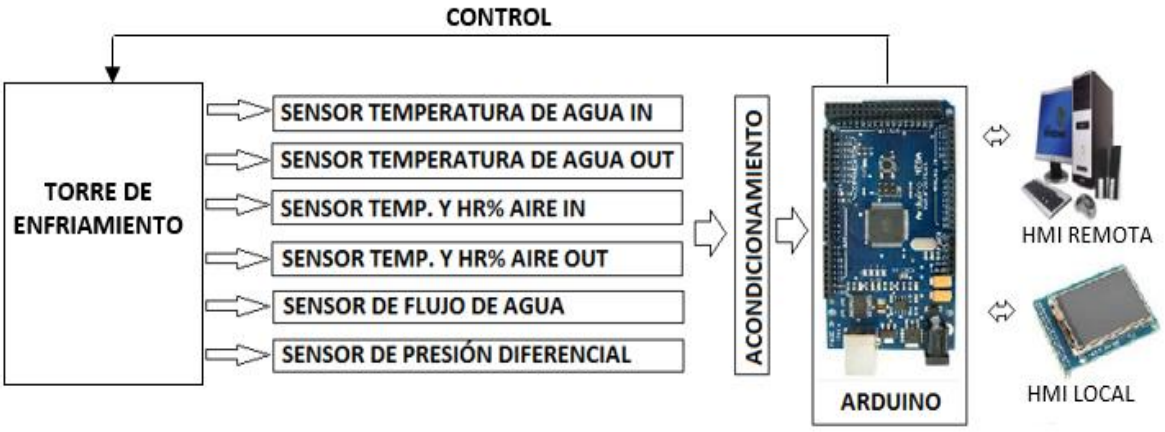


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema

2.2 SISTEMA DE CONTROL

Este módulo se encargará de adquirir los datos provenientes de los diferentes sensores, transmitir los datos y controlar la temperatura del agua, por lo tanto los requisitos mínimos que debe cumplir la plataforma basada en microcontroladores son:

- Poseer una interfaz de comunicación serial.
- Poseer al menos 1 canal de conversión A/D.
  1 para sensor de presión diferencial.
- Poseer la suficiente cantidad de I/O digitales.
  5 para sensores.
  35 para la conexión de la pantalla táctil.
  4 para mandos manuales.
  4 para control de Relés.
- Ser compatible con la pantalla utilizada.

De entre las plataformas disponibles en el mercado se opta por Arduino debido a que es una plataforma de hardware y software libre, además existe gran cantidad de información disponible en la web y una gran cantidad de librerías desarrolladas tanto para sensores como para el tipo de pantalla que se va a utilizar. La siguiente Figura muestra las características de los modelos más estándar de Arduino.

Tabla 2.1. Características de los modelos estándar de arduino [2]

Modelo	Arduino Uno	Arduino Leonardo	Arduino Mega	Arduino Due
Microcontrolador	ATmega328	ATmega32u4	ATmega2560	AT91SAM3X8E
Voltaje de Operación	5V	5V	5V	3.3V
Voltaje de entrada	6-20V	6-20V	6-20V	6-20V
Pines I/O digitales	14	20	54	54
Pines I/O digitales con salida PWM	6	7	15	12
Pines de entrada analógicos	6	12	16	12
Pines de salida analógicos				2 (DAC)
Corriente total de salida DC en todas las líneas I/O	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA	50 mA	50 mA	800 mA
Memoria Flash	32 KB	32 KB	256 KB	512 KB
SRAM	2 KB	2.5 KB	8 KB	96 KB
EEPROM	1 KB	1 KB	4 KB	
Velocidad de reloj	16 MHz	16 MHz	16 MHz	84 MHz
Tipo de USB	Estándar	Mini	Estándar	Mini

Se escoge el Arduino Mega 2560 porque cumple con los requisitos mínimos y a diferencia del modelo DUE no necesita convertidores de voltaje para periféricos y no presenta problemas con la librería UTFT la cual es la encargada del control de la pantalla. La siguiente figura muestra la plataforma Arduino Mega 2560. Para más información ver Anexo D5.

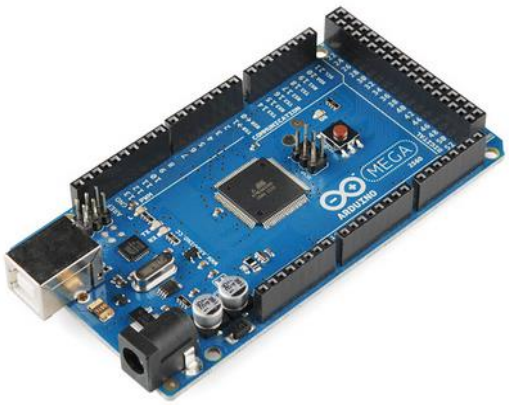


Figura 2.2. Arduino Mega 2560 [2]

Tabla 2.2. Pines de conexión establecidos

NÚMERO DE PIN	IN/OUT	DESCRIPCIÓN
0 al 7 y	IN/OUT	Conexión a la pantalla UTF
22 al 53	IN/OUT	mediante shield de Arduino
8	IN	Bus sensores de temperatura de agua
9	IN	Sensor de temperatura y humedad -ingreso de Aire-
10	IN	Sensor de temperatura y humedad -salida de Aire-
11	IN	Interruptor para activar termostato en modo manual
12	IN	Interruptor para activar bomba en modo manual
13	OUT	Pulso de Disparo para controlar Ventilador
14	IN	Interruptor de operación Manual/Automático
15	OUT	Activa relé del termostato
16	OUT	Activa relé de la bomba
17	OUT	Activa relé del ventilador
18	IN	Sensor de Flujo de Agua
19	OUT	Activa relé del ventilador en modo manual
20	IN	pulso detector de cruce por cero
21	IN	Interruptor para activar Ventilador en modo manual
A0	IN	Sensor de presión diferencial

2.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN

El sistema de adquisición se encuentra constituido por todos los sensores encargados de recolectar los datos de las diferentes variables involucradas.

Este bloque basa su funcionamiento en el bloque de control implementado, el cual controla todo el proceso incluyendo la transmisión de datos para su consecuente visualización a través de las interfaces de control efectuadas.

Entre las variables involucradas en el sistema tenemos:

- Temperatura del agua a la entrada y salida
- Temperatura del aire a la entrada y salida
- Humedad Relativa del aire a la entrada y salida
- Caudal de agua
- Caída de presión del aire en la torre

2.3.1 SENSORES

2.3.1.1 Sensor de temperatura para el agua

Para sensar la temperatura del agua se utiliza el modelo sumergible del sensor de temperatura DS18B20 mostrado en la Figura 2.3. Se trata de un sensor digital de alta precisión y temperatura en grados Celsius, el mismo cuenta con tres pines, los dos de alimentación y el pin "*data*" el cual debe ser conectado por medio de una resistencia *pull up* igual o mayor a 4.7 [kΩ], como se muestra en el esquema de la Figura 2.4.

Figura 2.3. Sensor de temperatura DS18B20

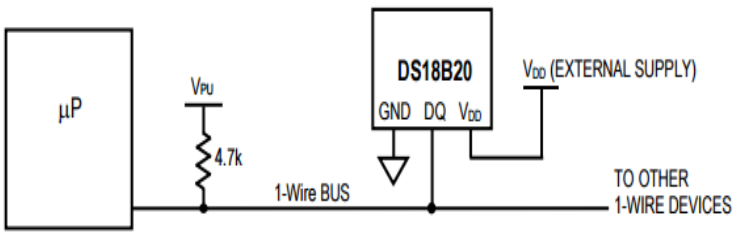


Figura 2.4. Esquema de conexión del DS18B20 [12]

Características:

- Voltaje de alimentación: 3 a 5.5 [V]
- Rango de temperatura: -55 a 125 [ºC]
- Precisión: 0.5 [ºC] de -10 a 85 [ºC]

Comunicación:

La trasmisión de datos es por OneWire, el cual es un protocolo que permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable, además permite utilizar varios sensores de forma simultánea conectados a un mismo pin, realizando la lectura de forma independiente gracias a que cada sensor sale de fábrica con un código identificativo de 64 bits, que lo distingue de forma única de cualquier otro. La resolución puede ser de 9 a 12 bits seleccionable por el usuario mediante programación, y correspondientes a incrementos de 0.5, 0.25, 0.125 y 0.0625 [^{o}C], respectivamente. Para más información ver Anexo D2.

Para la comunicación se requiere utilizar dos librerías, que deben ser instaladas en el compilador de Arduino. Estas son:

- DallasTemperature
- OneWire

2.3.1.2 Sensor de temperatura y humedad relativa para el aire

Se utiliza el sensor DHT21 conocido también como AM2301, como se observa en la Figura 2.5, es un sensor digital de alta sensibilidad que permite medir temperatura y humedad relativa. Éste sensor lleva un pequeño microcontrolador interno que hace el tratamiento de la señal y permite tomar la información respectiva, también posee tres cables dos de alimentación y uno para comunicación.

Figura 2.5. Sensor DHT21

Se componen de un sensor capacitivo para medir la humedad y de un termistor, ambos calibrados en laboratorios presentándonos así una gran fiabilidad, por lo que no es necesario añadir ningún circuito para tratamiento de la señal.

Características:

- Voltaje de alimentación: 3.3 a 5.2 [V_{DC}]
- Rango de temperatura: -40 a 80 [ºC]
- Rango de humedad relativa: 0 a 100 [%]
- Precisión de la medición de temperatura: ±0.3 [ºC]
- Precisión de la medición de humedad: ±3 [%] HR

Comunicación:

Este sensor utiliza el protocolo de comunicación OneWire, con la diferencia que no permite conectar más de un sensor a un pin digital a razón de que no posee un código identificativo. Para más información ver Anexo D1.

2.3.1.3 Sensor de caudal

Se utiliza el sensor de flujo de agua YF-201 mostrado en la Figura 2.6.

Figura 2.6. Sensor de flujo de Agua YF-201 [13]

El sensor de flujo de agua está formado por un cuerpo plástico, un rotor de agua y un sensor de efecto hall. Cuando el agua fluye a través del rotor, el rotor gira. Ésta velocidad cambia según el flujo de agua que atraviesa el sensor. Como señal de

salida se obtiene una señal de pulsos correspondiente al flujo, la cual puede ser conectada directamente a un pin del controlador. Para más información ver Anexo D3.

Características:

- Voltaje de alimentación: 5 a 18 [V_{DC}]
- Corriente de operación: 15 [mA] / [5V]
- Rango de caudal: 1 a 30 [lt/min]
- Pulsos por litro: 450
- Precisión: ±10 [%]

2.3.1.4 Sensor de presión diferencial

Se utiliza el sensor de presión diferencial MPX10DP de Motorola el cual se observa en la Figura 2.7. El MPX10DP es un transductor sin compensación de temperatura con un rango de medición de 0 a 10 [kPa], emplea galgas extensiométricas de silicio con una sensibilidad de 3.5 mV/kPa, el cual proporciona una salida de tensión precisa y lineal, directamente proporcional a la presión aplicada.

Figura 2.7. Sensor MPX10DP [14]

El sensor ha sido diseñado para funcionar con presión diferencial positiva aplicada, P1 > P2. El lado de presión (P1) se puede identificar porque es el correspondiente al lado marcado del sensor. Para más información ver Anexo D4.

Características:

- Voltaje de alimentación: 3 a 6 [V_{DC}]
- Rango de presión diferencial: 0 a 10 [kPa]
- Sensibilidad: 3.5 [mV/kPa]

2.3.1.4.1 Circuito de acondicionamiento del sensor de presión diferencial.

El acondicionamiento de la señal se realiza en tres partes: amplificación, restado y conversión A/D. En este caso se utiliza el conversor A/D del atmega 2560 el cual es el microcontrolador que utiliza la plataforma Arduino Mega, el conversor está configurado para muestrear a 10 bits, por lo que la señal puede adquirir 1024 valores distintos de un voltaje de referencia de 5 voltios lo cual permite realizar una pre amplificación analógica.

En la primera etapa se procede a una amplificación de 100 veces a través del amplificador de instrumentación AD620AN, por lo que la señal resultante aumenta en un rango entre 2 a 7 voltios cuando la diferencia de presión es cero.

A continuación en la segunda etapa se procede a realizar el circuito restador para disminuir el voltaje a 0 voltios cuando la diferencia de presión es cero y obtener 3.5 voltios cuando la diferencia de presión sea máxima. En la etapa final se procede a la conversión A/D mediante programación.

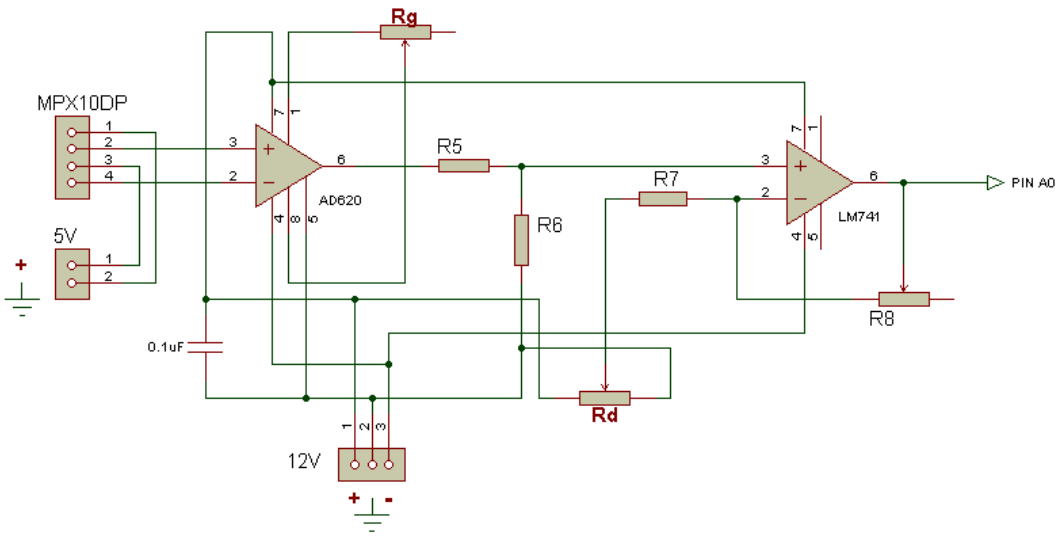


Figura 2.8. Circuito acondicionador del sensor MPX10DP.

Para obtener ganancia de 100 con el amplificador de instrumentación AD620AN se requiere un valor Rg obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$Rg = \frac{49.4\ [k\Omega]}{G-1}\ [15] \tag{2.1}$$

$$Rg = \frac{49.4\ [k\Omega]}{100-1}$$

$$Rg = 499\ [\Omega]$$

Rg se implementa con un potenciómetro de precisión de 1 [kΩ].

Luego para restar el voltaje obtenido a la salida del amplificador de instrumentación y dejar en 0 voltios cuando la diferencia de presión sea 0 pascales, se procede a implementar un amplificador diferencial con la ayuda del integrado LM741.

Teniendo en cuenta que para esta etapa se requiere una ganancia igual a 1, y que R5 = R7 y R6 = R8.

A partir de la ecuación (2.2) que rige un amplificador diferencial:

$$Vout = Ganancia * (V(+) - V(-)) \tag{2.2}$$

$$Ganancia = (\frac{R6}{R5})$$

$$R5 = R6$$

Se toma como valor para R5 = 33 [kΩ].

Como se observa en la ecuación (2.2), $V(-)$ representa el voltaje a restar y se lo obtiene a través de un potenciómetro de precisión Rd = 10 [kΩ] el cual va a funcionar como divisor de voltaje con una alimentación de 12 voltios. Finalmente se procede con la conversión A/D mediante software, teniendo en cuenta que una entrada de 3.5 voltios corresponde a una presión diferencial de 10 [kPa].

2.4 DISEÑO DEL ACTUADOR

Dentro del lazo de control se tiene el actuador, en el presente proyecto va a estar constituido por el circuito de disparo y el circuito de potencia el cual entregará la potencia necesaria a la planta para controlar la temperatura.

2.4.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA

Para el efecto se utiliza la técnica de conversión AC – AC control de fase directo, el cual es muy utilizado especialmente en dispositivos de iluminación.

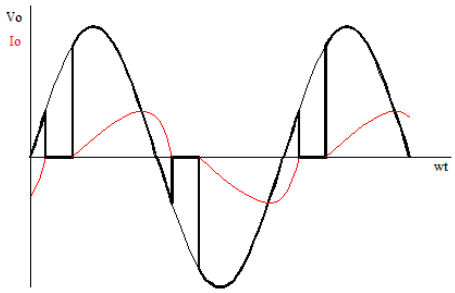


Figura 2.9. Control de fase directo con carga

El elemento de potencia a utilizar es un TRIAC, mismo que se caracteriza por ser robusto, manejo simple y adecuado para altas frecuencias de trabajo. La Figura 2.10 muestra el circuito de potencia implementado.

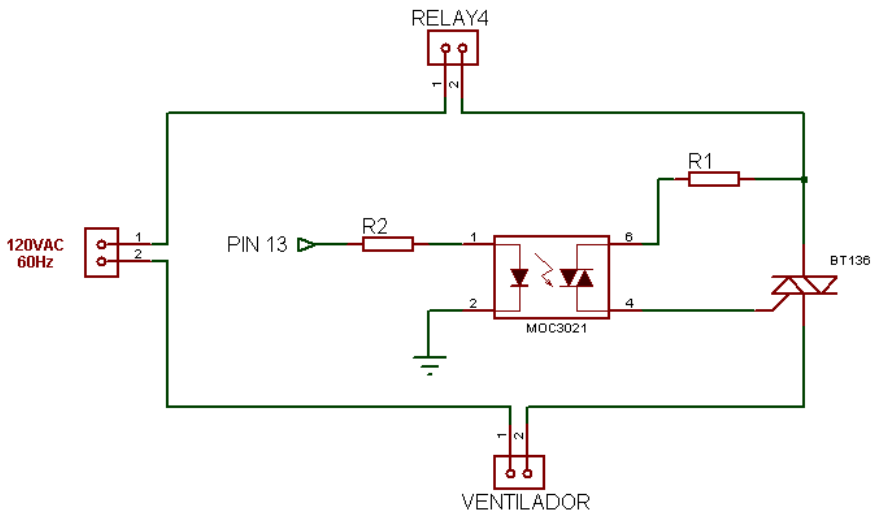


Figura 2.10. Circuito de Potencia.

Para dimensionar el TRIAC se toma en cuenta las características de la carga en este caso del ventilador que es el encargado de suministrar el aire a la planta.

- Voltaje nominal: 120 [V_{AC}].
- Corriente nominal: 3 [A].

El voltaje pico inverso del TRIAC puede ser mayor a 155 [V].

Se escoge el TRIAC BT136, cuyas características son las siguientes:

- Corriente máxima: $I_{TRMS} = 8\ [A]$
- Voltaje pico inverso: $V_{RRM} = 600\ [V]$
- Corriente de compuerta: $I_{GT} = 10\ [mA]$
- Voltaje de compuerta: $V_{GT} = 2.5\ [V]$

Para la selección del optotriac se toma en cuenta la corriente de compuerta necesaria para activar el TRIAC la cual es de $I_{GT} = 10\ [mA]$, con esto se selecciona el optotriac MOC3021 que presenta las siguientes características:

- Voltaje de aislamiento: 7500 [V]
- Corriente máxima de led: 60 [mA]
- Voltaje reverso de led: 3 [V]
- Potencia del optotriac: 330 [mW]

Para dimensionar R1 resistencia limitadora de corriente de compuerta del TRIAC, se toma en cuenta el valor de la corriente de compuerta $I_{GT} = 10\ [mA]$ y el valor del voltaje de la red:

$$R1 = \frac{V_{RMS}}{I_{GT}}$$

$$R1 = \frac{110\ [V]}{10\ [mA]}$$

$$R1 = 11\ [k\Omega]$$

$R1 = 11\ [k\Omega]$; Para asegurar el disparo del TRIAC $R1 = 4.7\ [k\Omega]$

$$I_{GT} = \frac{110\ [V]}{4.7\ [k\Omega]}$$

$$I_{GT} = 23.4\ [mA]$$

Debido a que se trabaja con un valor de voltaje alto se calcula la potencia mínima que debe disipar la resistencia limitadora R1:

$$P_{R1} = \frac{V_{RMS}^2}{R1}$$

$$P_{R1} = \frac{110\ [V^2]}{4.7\ [k\Omega]}$$

$$P_{R1} = 2.57\ [W]$$

Se escoge:

$$R1 = 4.7\ [k\Omega]$$

$$P_{R1} = 5\ [W]$$

La resistencia R2, se dimensiona a partir de la corriente necesaria del led del optotriac, el valor máximo a partir de sus características es de 60 [mA] en corriente; se toma como valor de corriente 30 [mA] y como voltaje se toma el valor de la fuente 5 [V], entonces la resistencia R2 se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R2 = \frac{V(+) - V_{led} - V_{diodo}}{I_F}$$

$$R2 = \frac{5 - 1.5 - 0.7}{30\ [mA]}$$

$$R2 = 93.3\ [\Omega]$$

Entonces el valor de la resistencia R2 es 100 [Ω].

2.4.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE DISPARO

El circuito de disparo es el que permite tener el control del voltaje aplicado a la carga, es el control a partir del cual opera el circuito de potencia.

Existen algunos tipos de circuitos de disparo como rampa lineal, rampa cosenoidal, el uso de UJT o por programación en un microcontrolador entre otros. En este caso se opta por la programación debido a la disponibilidad de Arduino.

El diseño del circuito de disparo comprende la detección del cruce por cero mediante hardware para la posterior obtención mediante software del pulso que controla el circuito de potencia. Este pulso permite controlar el ángulo de disparo, según requiera el sistema.

2.4.2.1 Circuito detector de cruce por cero

Este circuito tiene como objetivo, la sincronización con la red eléctrica, es decir, sirve para detectar el momento exacto cuando la señal de la red eléctrica sea de 0V, tanto para el semiciclo positivo como negativo y de esta manera se genera el pulso de disparo.

La Figura 2.11 muestra el diagrama del circuito detector de cruce por cero mientras que la Figura 2.12 indica la señal obtenida (color rojo) en la sincronización con la red eléctrica, junto con la señal rectificada que ingresa al led del opto transistor 4N25 (color azul).

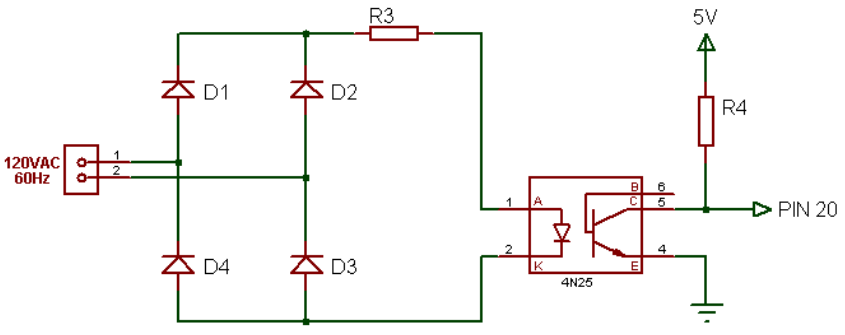


Figura 2.11. Circuito detector de cruce por cero

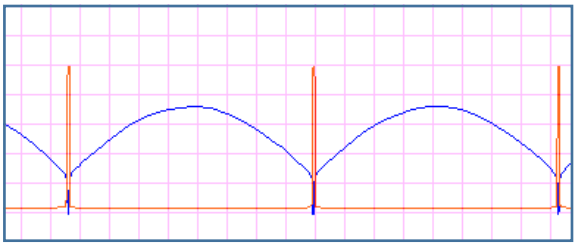


Figura 2.12. Señal obtenida de sincronización con la red eléctrica

Para rectificar el voltaje se realiza un puente formado por diodos de propósito general 1N4007, cuyas características son:

- Corriente media: I = 1 [A]
- Voltaje pico inverso: V = 1000 [V]
- Máximo pico de corriente directa: I_{FSM} = 50 [A]
- Voltaje máximo del diodo en conducción: V_F = 1 [V]

Para acoplar la señal al microcontrolador se utiliza el opto transistor 4N25 cuyas características son las siguientes:

- Voltaje de aislamiento: 7500 [V]
- Corriente máxima del led: 60 [mA]
- Voltaje reverso de led: 3 [V]
- Potencia de disipación del led: 120 [mW]

La resistencia limitadora R3 permite limitar la corriente que circula por los diodos así como la corriente del led del opto transistor 4N25.

R3 se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$R3 = \frac{110 - V_{led} - 2 * V_{diodo}}{I_F}$$

$$R3 = \frac{110 - 1.5 - 2 * 0.7}{20\ [mA]}$$

$$R3 = 5355\ [\Omega]$$

Se escoge R3 = 5.6 [kΩ]

$$I_F = \frac{106.5}{5600} = 19\ [mA]$$

Debido a que se trabaja con un valor de voltaje alto se calcula la potencia mínima que debe disipar la resistencia limitadora R3:

$$P_{R3} = \frac{V_{RMS}^2}{R1}$$
$$P_{R3} = \frac{110\ [V^2]}{5.6\ [k\Omega]}$$
$$P_{R3} = 2.16\ [W]$$

Se escoge:

$$R3 = 5.6\ [k\Omega]$$
$$P_{R3} = 5\ [W]$$

Para calcular R4 se escoge una corriente de colector I_C < 40 [mA], el cual es el valor máximo que maneja el Pin del microcontrolador, entonces R4 se puede calcular a partir de la siguiente ecuación con I_C = 2 [mA]:

$$R4 = \frac{5 - V_{CE(sat)}}{I_C}$$
$$R4 = \frac{5 - 0.15}{2\ [mA]}$$
$$R4 = 2425\ [\Omega]$$

Se escoge R4 = 2.2 [kΩ]

2.5 INTERFAZ DE CONTROL Y VISUALIZACIÓN

Permite visualizar el valor de los datos adquiridos por los sensores, así como controlar el funcionamiento del módulo. Se cuenta con dos sistemas:

- Local: a través de una pantalla táctil ubicada en el panel de control local.

- Remoto: a través de la pantalla de un computador con el respectivo software programado para el efecto.

A continuación se describe la pantalla utilizada en modo de operación local. La pantalla desarrollada para modo de operación remoto se tratará en el siguiente capítulo.

2.5.1 PANTALLA TFT CON TOUCH SCREEN

"El TFT (Thin Film Transistor – Transistor de Película Fina) es un transistor cuya capa activa transmisora de corriente es una fina película, en contraste a los transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), que están hechos de obleas de silicio y utilizan silicio a granel como capa activa. Esto significa que la capa activa (que mueve la electricidad desde la parte superior de la pantalla táctil a la placa madre) del TFT es más liviana y permite una pantalla más delgada, sin comprometer su desempeño.

Cada píxel es respaldado por un pequeño transistor, que es mucho más eficiente que los monitores antiguos. Estas pantallas pueden mostrar texto nítido, colores vívidos, animaciones rápidas y gráficos complejos. Esta tecnología de transistores múltiples también permite un rápido re-trazado de la pantalla de manera que la imagen no parpadee ni haga bandas". [16]

En esta ocasión se trabaja con la pantalla táctil TFT 480x270 de 4.2 pulgadas, la cual se muestra en la Figura 2.13.

Figura 2.13. Pantalla táctil TFT

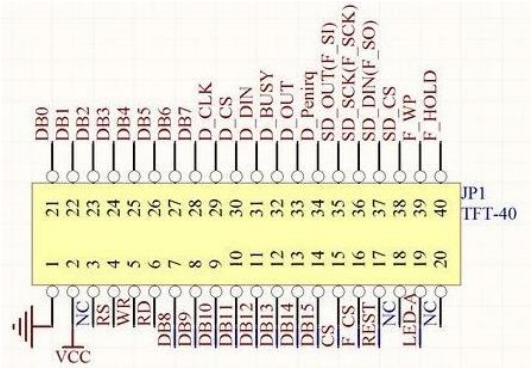


Figura 2.14. Pines de conexión de la pantalla [2]

1. Diplay:
LEDA -> 5V
VCC -> 5V
RD -> 3.3V
GND -> GND
DB0->DB7 to pin D37->D30
DB8->DB15 to pin D22->D29
RS -> D38
WR -> D39
CS(pin6) -> D40
RSET-> D41

2. Touch Screen:
Default pin number in example code:
DCLK->D6
CS(pin30) ->D5
IN ->D4
OUT->D3
IRQ ->D2

3. SD Card:
SCK -> D52
MISO -> D50
MOSI-> D51
CS -> D53

Figura 2.15. Pines de conexión establecidos entre la pantalla y arduino [2]

Las conexiones establecidas en la Figura 2.15 se realizan con la ayuda del shield LCD TFT01 Arduino Mega, el cual se muestra en la Figura 2.16. Este dispositivo permite realizar una conexión directa de la pantalla TFT sobre el shield, y este a su vez de pie sobre la placa Arduino, sin la necesidad de cableado adicional.

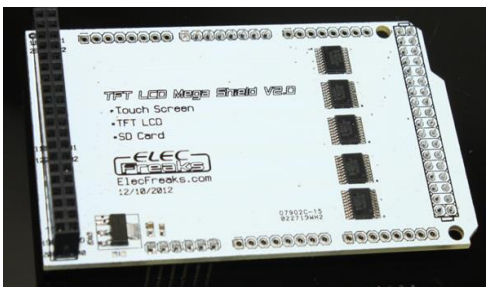


Figura 2.16. Shield LCD TFT01 Arduino Mega

La conexión entre la pantalla TFT y la plataforma Arduino Mega a través del shield se puede apreciar en la Figura 2.17.

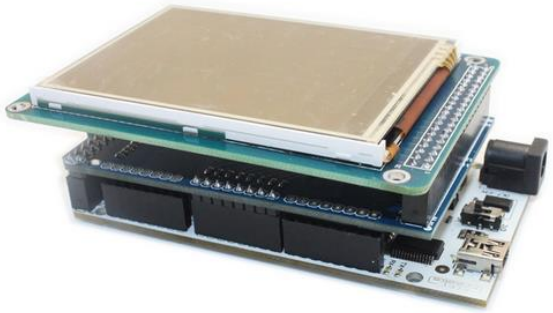


Figura 2.17. Conexión pantalla-shield-arduino

Para implementar el uso de la pantalla TFT existen muchas librerías las cuales difieren desde su propia complejidad hasta la plataforma para la cual son escritas. En esta ocasión se requiere de las siguientes librerías:

- UTFT: permite utilizar los comandos básicos. (configuración de la pantalla, letras, líneas, posición, color, tamaño).
- UTouch: permite trabajar con la detección del touch de la pantalla.
- UTFT_Buttons: permite graficar botones con detección del touch.

La autoría de las librerías pertenece a Henning Karlsen.

2.6 CONTROL MANUAL EMERGENTE

Se implementa un control manual emergente ubicado en el mismo panel de control local, para solventar cualquier imprevisto.

El mismo permite activar mediante interruptores individuales todo el equipo: sistema de calentamiento de agua, bomba, ventilador, además permite encender la pantalla y energizar los sensores para de esta manera observar y tomar información de los datos entregados por los distintos sensores instalados.

Figura 2.18. Caja de control

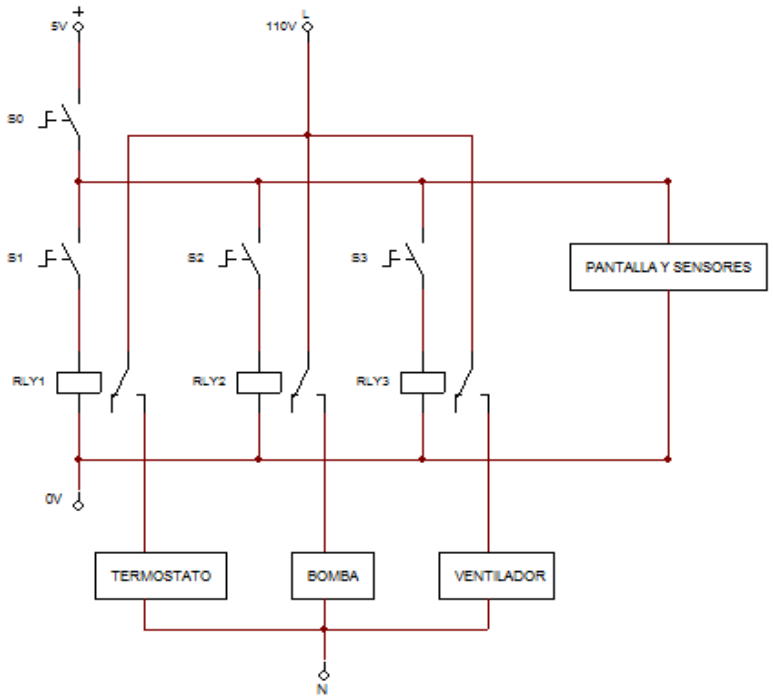


Figura 2.19. Esquema de conexión eléctrica del control manual emergente

2.7 SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA

Para calentar el agua que ingresa a la torre por la parte superior se cuenta con un sistema de calentamiento formado por:

- Un depósito elaborado a base de acrílico transparente de 7 [mm].
- Controlador e indicador de temperatura MT-512Ri LOG.
- Resistencia eléctrica (niquelina) de 1500 [W].

El tanque de calentamiento de agua (depósito) mide 20x20x30 [cm] como se observa en la Figura 2.20. Contiene en su interior una resistencia para el calentamiento de la misma, además de un desagüe para limpieza y una válvula de media vuelta para controlar el bypass. La circulación de agua comienza y termina en este tanque.

Figura 2.20. Tanque de calentamiento de agua

El controlador e indicador de temperatura MT-512Ri LOG mostrado en la Figura 2.21 tiene un sistema inteligente de bloqueo de teclas y permite la desconexión de las funciones de control, además cuenta con tiempo de duración de los procesos de refrigeración y deshielo configurables. Para el presente proyecto se establece la temperatura de control en 50 [^{o}C] con un rango de variación de ±0.1 [^{o}C]. Para más información ver Anexo D11.

Figura 2.21. Controlador MT-512Ri LOG

Debido a la potencia de la resistencia eléctrica (1500W) el cual es un valor que supera al manejable por el controlador MT-512Ri LOG (1HP=746W), se requiere la utilización de un contactor para manejar la carga (niquelina). El contactor instalado es de propósito definido de la marca E.T.N. (Eaton Contactor Relays) correspondiente al catálogo no. C25BNB230, especial para aires acondicionados,

refrigeración y resistencias calefactoras. Se lo conecta y activa mediante los bornes correspondientes a la alimentación de la carga del MT-512Ri.

2.8 SISTEMA DE BOMBEO

El bombeo de agua lo realiza una bomba centrífuga marca Sanlin, la cual se encuentra acoplada a un lado del depósito de agua y se encarga de bombear el agua desde dicho tanque hasta el sistema de distribución de agua localizado en la parte superior de la torre, recorre toda la tubería hasta alcanzar la altura correspondiente a 1.05 [m] pasando por el medidor de flujo y una manguera acoplada a la entrada del sistema de distribución.

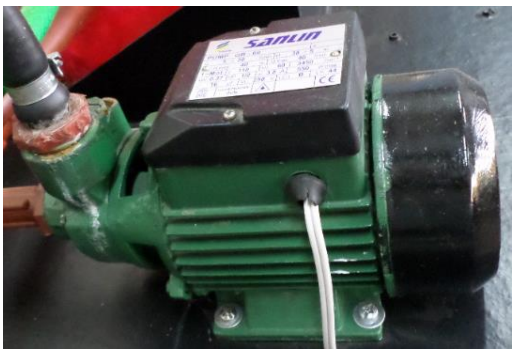


Figura 2.22. Bomba de agua Sanlin

Características:

- Voltaje: 110 [V].
- Potencia: 1/2 [HP].
- Hmáx: 40 [m].
- Qmáx: 40 [lt/min].

2.9 SISTEMA DE FLUJO DE AIRE

El flujo de aire que permite enfriar el agua caliente que entra a la torre por la parte superior, es suministrado por un ventilador acoplado a la cámara de aire por su parte lateral.

Figura 2.23. Ventilador Electric Blower

Características:

- Marca: Electric Blower.
- Diámetro de salida: 2 pulgadas.
- Velocidad angular: 3000/3600 [rpm].
- Voltaje: 110 [V].
- Intensidad: 3 [A].
- Flujo máximo: 1 [kg/s].

2.10 ESTRUCTURA

La torre de enfriamiento de agua presentada en este proyecto es de tiro forzado con flujo de aire en contracorriente y recirculación propia de agua.

La torre se encuentra formada por un tanque de calentamiento de agua en cuyo interior se localiza la niquelina encargada de calentar el agua proveniente del recolector, cámara de aire, columna de empaquetamiento y recolector de agua fría. Todos estos elementos se encuentran construidos en acrílico transparente de 7 [mm] de espesor resistente al impacto y apropiado para temperaturas de hasta 55 [^{o}C].

El relleno está formado por una columna de platos de acrílico ordenados en forma de entablillado hasta alcanzar la altura de 0.50 metros. El agua caliente se distribuye sobre la parte superior a través de un tubo de cobre agujereado mientras que el agua fría se recoge en un recolector ubicado en la parte inferior de la torre.

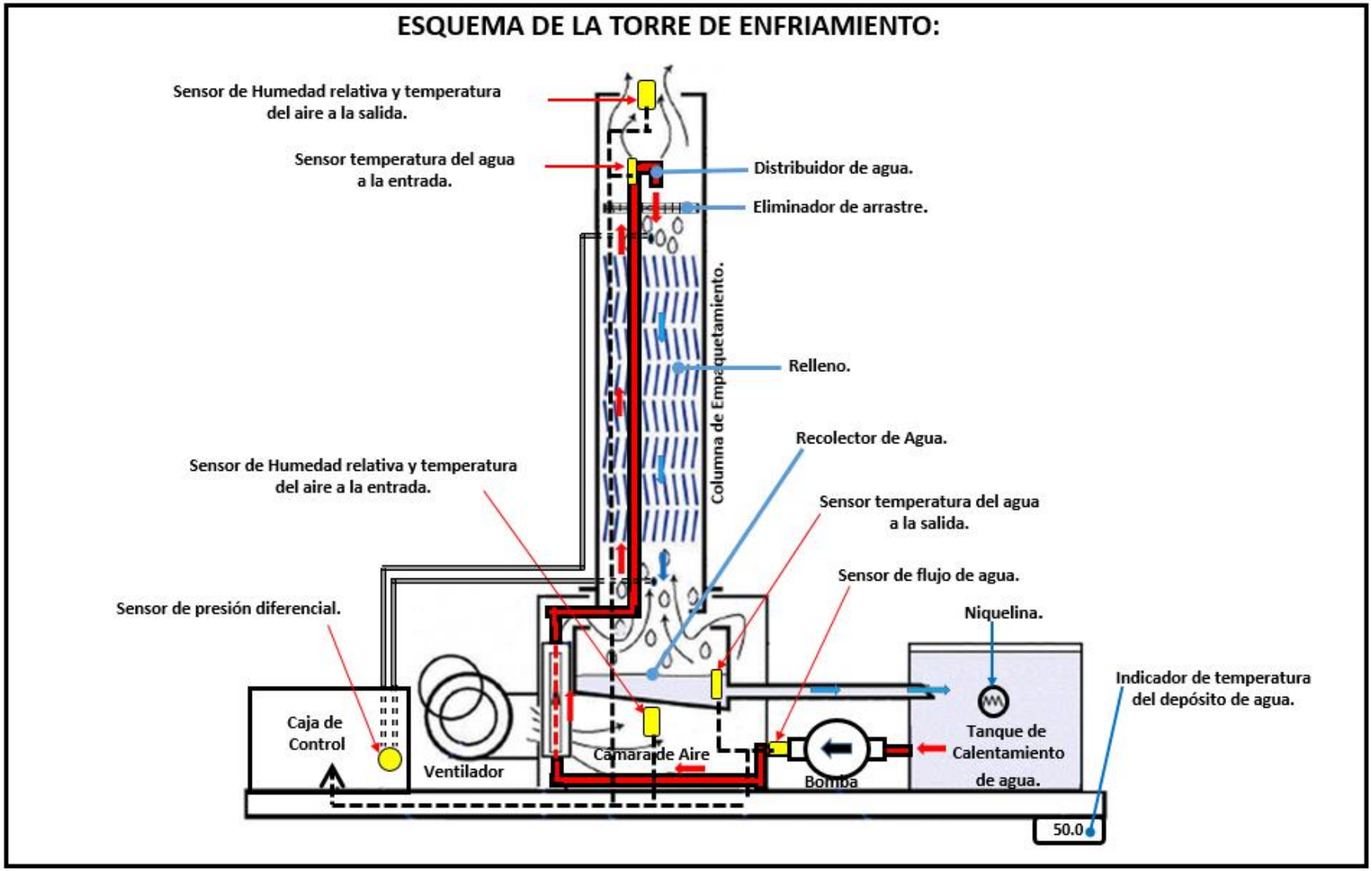


Figura 2.24. Estructura de la Torre de Enfriamiento

El flujo de aire es producido por medio de un ventilador acoplado a la cámara de aire por su parte lateral, mientras que el flujo de agua es producido por medio de una bomba acoplada al tanque de calentamiento.

La Figura 2.24 muestra un esquema de la torre de enfriamiento indicando la respectiva ubicación de los sensores instalados así como las partes que la conforman.

2.10.1 CÁMARA DE AIRE

La cámara de aire mide 40 [cm] x 40 [cm] x 45 [cm] con dos agujeros principales; uno redondo en la cara lateral izquierda de dos pulgadas de diámetro en donde se acopla el ventilador, y el otro rectangular de 15 [cm] x 15 [cm] ubicado en la cara superior en donde se acopla la columna de empaquetamiento con la tapa.

Está unida al tanque de calentamiento por medio de los acoples de salida y entrada, así como también por un bypass. Contiene en su interior parte de la tubería para la circulación del agua, el recolector que está sujeto en la parte superior por medio de tornillos y pasadores, y los sensores correspondientes para temperatura y humedad relativa del aire a la entrada así como para la temperatura del agua a la salida.

2.10.2 COLUMNA DE EMPAQUETAMIENTO

La columna de empaquetamiento de 15 [cm] x 15 [cm] x 60 [cm] se encuentra abierta en la parte superior e inferior para permitir la entrada y salida de agua y aire respectivamente en la parte superior, así como la salida del agua y la entrada de aire en la parte inferior. Contiene en su interior los platos de acrílico y en su cara posterior los acoples para la toma de presiones a la entrada y salida de la columna.

En su parte inferior está acoplada a la cámara de aire por superposición y en la parte superior tiene el sistema de distribución junto con el sensor de temperatura de agua a

la entrada y el sensor para la temperatura de aire y humedad relativa para la salida del aire.

2.10.3 RECOLECTOR DE AGUA FRÍA

Está ubicado dentro de la cámara de aire, se encuentra sujeto por cuatro tornillos y pasadores centrado bajo la columna de empaquetamiento. Consiste en un paralelepípedo rectangular truncado de 20x20x10x5 [cm]; tiene comunicación directa con el tanque de calentamiento a través de una manguera y acoples, además en su interior se encuentra ubicado el sensor de temperatura para la salida del agua.

2.10.4 EMPAQUETAMIENTO O RELLENO

Consisten en platos rectangulares de 5.7 [cm] x 13.8 [cm] y 2 [mm] de espesor, estos platos van sobrepuestos en unos soportes del mismo material con canales o ranuras a una inclinación de 15 grados.

2.10.5 SISTEMA DE DISTIBUCIÓN DE AGUA

Es necesario proporcionar una distribución uniforme del agua sobre el relleno puesto que es un parámetro del cual depende la eficiencia de la torre. Se encuentra ubicado en la parte superior de la torre y consiste en un tubo de cobre con agujeros intercalados de 1 y 2 [mm] de diámetro a manera de ducha, está sostenido por medio de acoples y una T de 3/8 de pulgada, en la cual en su interior se encuentra el sensor para medir la temperatura de entrada del líquido y se conecta la manguera de subida del agua.

2.10.6 ELIMINADOR DE ARRASTRE

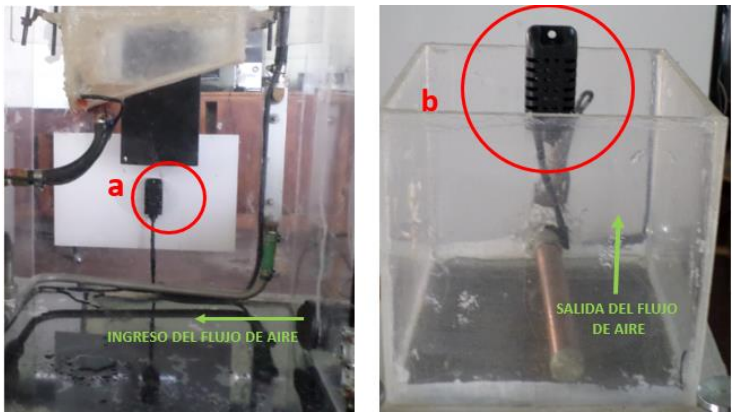
Está ubicado en la parte superior de la torre y sirve para retener en parte las gotas de agua que pueden perderse por evaporación. Consiste en tres pedazos de malla de acero inoxidable superpuestos de diferente espesor.

2.11 IMPLEMENTACIÓN

La implementación consiste en la incorporación física de los sensores que permiten obtener el valor de las variables del sistema (temperatura, humedad relativa, flujo de agua y caída de presión en la torre) en forma digital, además de la elaboración de la caja de control para la operación y monitoreo del sistema en modo local.

2.11.1 IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES

Implementación de los sensores DHT21 para medir la temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y a la salida de la torre.



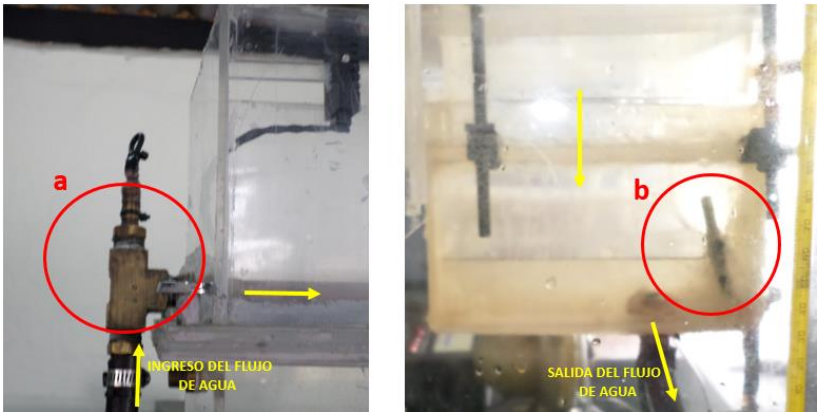
a) Sensor a la entrada b) Sensor a la salida

Figura 2.25. Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21.

Implementación del sensor YF-S201 para medir el flujo de agua, se encuentra acoplado a la tubería plástica de media pulgada del sistema de distribución de agua.

Figura 2.26. Sensor de flujo de agua YF-S201.

Implementación de los sensores DS18B20 para medir la temperatura del agua a la entrada y a la salida de la torre.



a) Sensor a la entrada b) Sensor a la Salida

Figura 2.27. Sensor de temperatura para el agua DS18B20

Implementación del sensor de presión diferencial MPX10DP para medir la caída de presión de aire en la torre, se localiza en el interior de la caja de control junto a su placa de acondicionamiento, como se observa en la Figura 2.28.

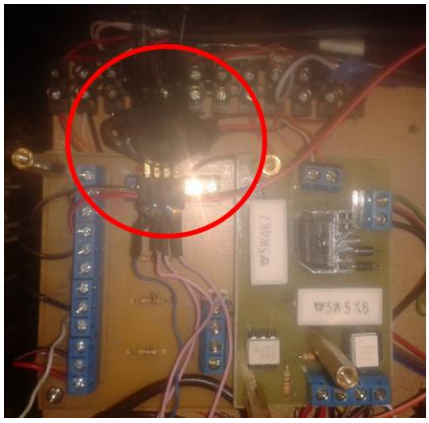


Figura 2.28. Sensor de presión diferencial MPX10DP

2.11.2 ELABORACIÓN DE LA CAJA DE CONTROL

En las siguientes Figuras se puede apreciar el proceso de elaboración e implementación de la caja de control. Dentro de la misma se puede encontrar las

placas electrónicas diseñadas, el módulo de control arduino, módulo de relés, pantalla táctil para el control local y todo el cableado necesario.

A continuación en las Figuras 2.29 y 2.30 se observa la placa electrónica desarrollada para control del actuador tratada en el subcapítulo 2.4 y la placa desarrollada para el acondicionamiento del sensor de presión diferencial MPX10DP tratada en el subcapítulo 2.3.1.4.1, respectivamente.

Figura 2.29. Placa para control del actuador

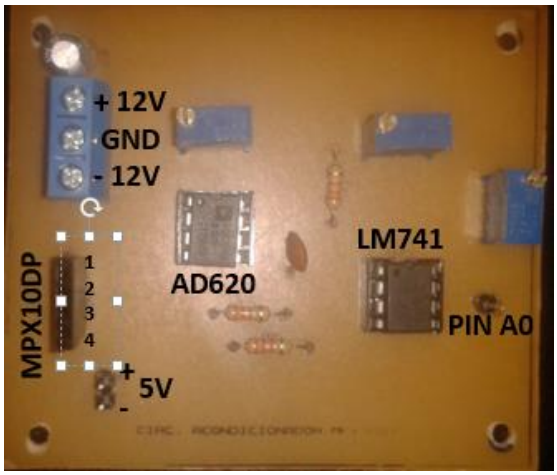


Figura 2.30. Placa para el acondicionamiento del sensor MPX10DP

La Figura 2.31 muestra la placa diseñada para la conexión eléctrica de todos los sensores implementados en la torre.

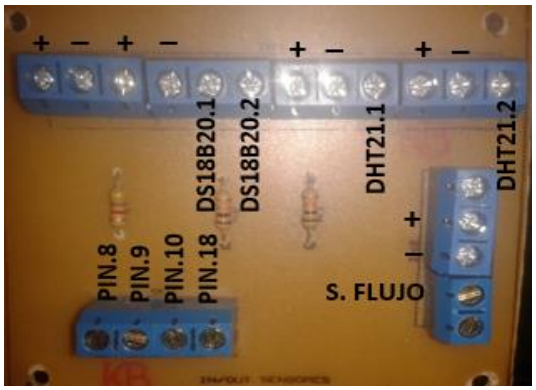


Figura 2.31. Placa para conexión de sensores

Conexión directa entre el módulo de control Arduino con la pantalla táctil a través del Shield LCD TFT01 Arduino Mega.

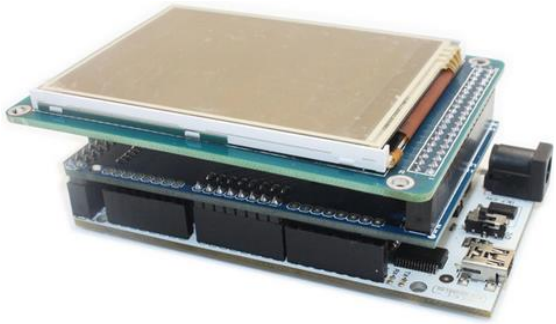


Figura 2.32. Conexión entre el módulo de control Arduino y pantalla

Unión entre las placas y módulos expuestos en las Figuras 2.29 a 2.32 junto con un módulo de relés, sujetos sobre una base de madera con postes metálicos y tornillos.

Figura 2.33. Union de placas y módulos

En la Figura 2.34 se puede observar la vista interna y externa de la caja de control local, junto con todo el cableado requerido. Asimismo en la Figura 2.35 se muestra la torre de enfriamiento una vez finalizada su automatización y lista para entrar en funcionamiento.

a) Vista interna. b) Vista externa

Figura 2.34. Caja de control local

Figura 2.35. Torre de enfriamiento

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se describe el programa desarrollado e implementado en la plataforma Arduino así como la interfaz gráfica para control en modo remoto a través de sus respectivos diagramas de flujo. Previamente se expone el algoritmo de control elaborado para el actuador (ventilador).

3.1 ALGORITMO DE CONTROL

De las acciones de control más utilizadas en el ámbito industrial tratadas en el capítulo uno, y luego de analizar implementaciones similares [17] y [18], y además de previamente realizar pruebas respectivas, se procede a implementar un control tipo PI discretizado, el cual es uno de los algoritmos de regulación más empleados.

3.1.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PULSO DE UN CONTROLADOR PI DIGITAL [19]

El esquema de control PI analógico ha sido usado de manera exitosa en muchos sistemas de control industrial por más de medio siglo. El principio básico del esquema de control es que actúa sobre la variable a ser manipulada a través de una apropiada combinación de las acciones de control: acción de control proporcional (donde la acción de control es proporcional a la señal del error actuante, la cual es la diferencia entre la entrada y la señal de realimentación) y la acción de control integral (donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante).

La acción de control PI en controladores analógicos está dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt \tag{3.1}$$

Donde $e(t)$ es el error de la señal, $u(t)$ es la salida del controlador (la señal manipulada), K_p es la ganancia proporcional y T_i es la constante de tiempo integral.

Para obtener la función de transferencia pulso del controlador digital, se puede discretizar la ecuación (3.1), obteniendo como resultado la ecuación (3.2). [19]

$$U(z) = Kp\left[1 + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})}\right]E(z) \tag{3.2}$$

La función de transferencia discreta (3.2), también puede ser representada como:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = Kp + \frac{Kp*T}{T_i(1-z^{-1})} \tag{3.3}$$

3.1.2 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR MEDIANTE ZIEGLER-NICHOLS

“En lazo abierto, muchos procesos pueden definirse según la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{1+\gamma_0 s}\tau_0 \tag{3.4}$$

Donde los coeficientes K_0, τ_0 y γ_0 se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en y(t) =y_0 para u(t)=u_0. Se aplica una entrada escalón de u_0 a u_1 y se registra la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Este método se conoce como curva de respuesta o curva de reacción”. [18]

Los parámetros se pueden obtener de la respuesta mostrada en la Figura (3.1).

$$\tau_0 = t_1 - t_0 \tag{3.5}$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 \tag{3.6}$$

$$K_0 = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} \tag{3.7}$$

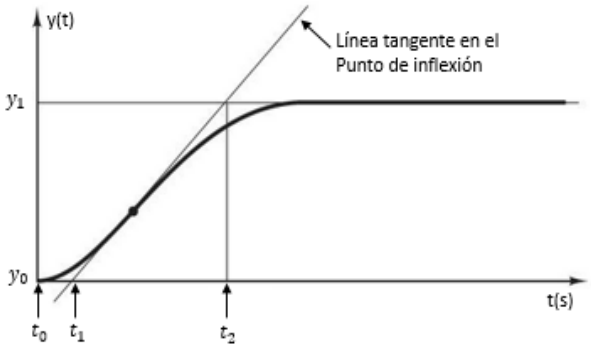


Figura 3.1. Respuesta de salida ante una entrada escalón [18]

Según Ziegler-Nichols, la relación de estos coeficientes con los parámetros del controlador es:

$$K_p = 0.9\frac{\gamma_0}{k_0\tau_0} \tag{3.8}$$

$$T_i = \frac{\tau_0}{0.3} \tag{3.9}$$

Aplicando el procedimiento mencionado en el sistema se obtiene la curva de respuesta mostrada en la Figura 3.2.

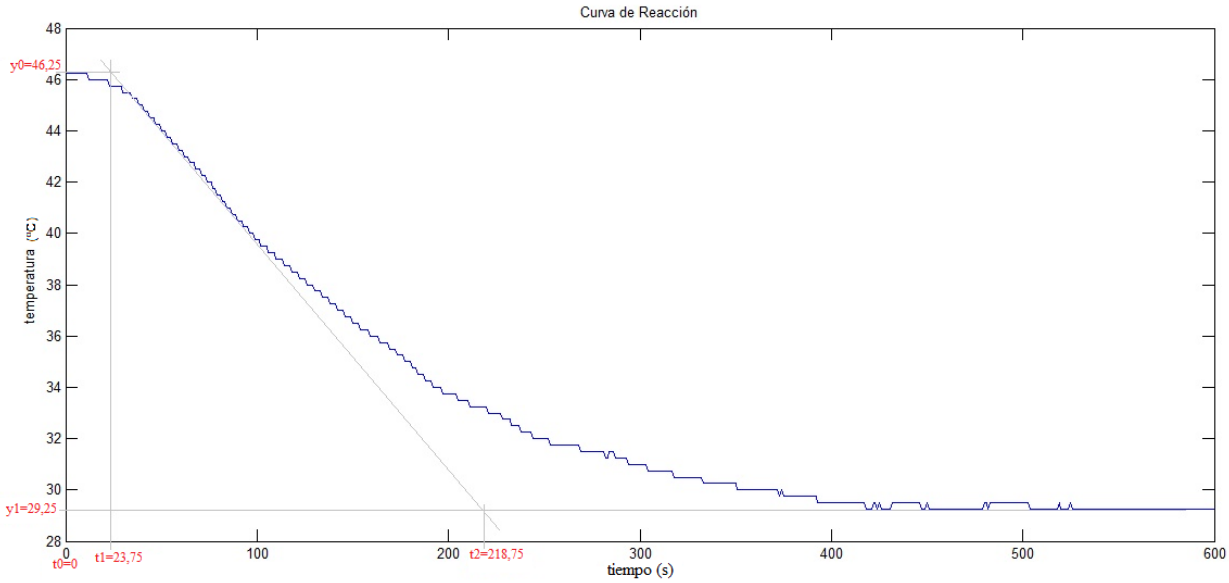


Figura 3.2. Respuesta de salida del sistema ante la entrada escalón

De donde aplicando las ecuaciones (3.5) a la (3.7) se obtiene los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= t_1 - t_0 = 23.75 - 0 = 23.75 \\ \gamma_0 &= t_2 - t_1 = 218.75 - 23.75 = 195 \\ K_0 &= \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} = \frac{29.25 - 46.25}{2200 - 6000} = 0.004474 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Los parámetros $K_p \; y \; T_i$ se calculan según la regla de sintonización de Ziegler-Nichols indicada en las ecuaciones (3.8) y (3.9).

$$K_p = 0.9\frac{\gamma_0}{k_0\tau_0} = 1651.65$$

$$T_i = \frac{\tau_0}{0.3} = 79.17$$

Para escoger el tiempo de muestreo T, se lo hace a partir de la ecuación (3.11). [18]

$$\begin{aligned} T &< \tau_0/4 \\ T &< 5.9 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Por lo que se escoge un tiempo de muestreo:

$$T = 1 \; segundo$$

Reemplazando los parámetros correspondientes en la ecuación (3.3) se obtiene la función de transferencia del controlador PI en tiempo discreto, la cual se muestra en la ecuación (3.12).

$$\frac{U(z)}{E(z)} = 1651.65 + \frac{20.862}{(1 - z^{-1})} \tag{3.12}$$

3.1.3 ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN EN EL MICROCONTROLADOR

El algoritmo utilizado para programar el controlador se muestra en la siguiente figura:

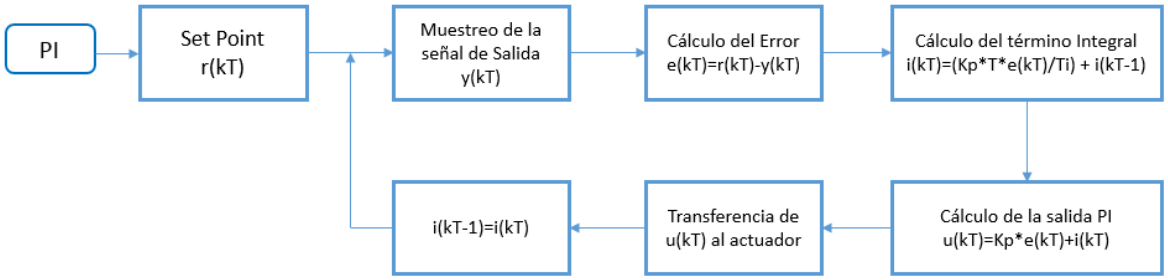


Figura 3.3. Algoritmo de programación PI digital [18]

La Figura 3.3 indica el lazo repetitivo a ejecutarse cada segundo, el cual consiste en:

- Muestrear la señal de salida: consiste en adquirir el dato de la temperatura del agua a la salida de la torre.
- Calcular el error: se obtiene restando la señal muestreada del set point.
- Calcular el término integral: acorde al diseño del controlador PI.
- Calcular la salida del PI: determinar el ángulo de disparo que requiere el actuador (ventilador), el cual luego de un análisis experimental previo se establece en un rango de 6000us a 2200 [us] correspondiente a la velocidad mínima y máxima respectivamente.
- Transferencia de $u(kT)$ al actuador: una vez calculada la salida del PI se la envía al actuador para que se ejecute con ese valor hasta el próximo cálculo.
- Almacenar el término integral para ser utilizados en el siguiente cálculo como valores preliminares correspondientemente.

Por lo tanto el algoritmo de control queda definido como:

$$u(kT) = K_p * e(kT) + \left(K_p * T * \frac{e(kT)}{T_i}\right) + i(kT-1) \qquad (3.13)$$

Donde $e(kT)$ es el error de la señal, $u(kT)$ es la salida del controlador (la señal manipulada), $i(kT-1)$ es el término integral almacenado en el cálculo anterior, K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T es el tiempo de muestreo.

Reemplazando los valores de $K_p, T_i \; y \; T$ en la ecuación (3.13) se tiene la ecuación de diferencias (3.14), la cual va a ser implementada en el microcontrolador.

$$u(k) = 1672.51 * e(k) + i(k-1) \tag{3.14}$$

3.2 DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA LA PLATAFORMA DE CONTROL

Para la implementación del software se utiliza la plataforma Arduino Mega junto con su entorno de desarrollo mostrado en la Figura 3.4.

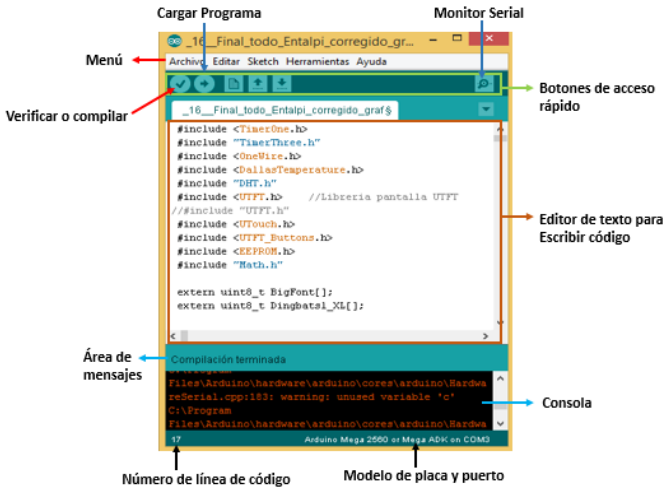


Figura 3.4. Entorno de desarrollo para arduino

Este entorno, contiene un editor de texto para escribir código, un área de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones para las funciones comunes, y una serie de menús. Se conecta al hardware para cargar programas y

comunicarse con ellos. El botón de compilar se utiliza una vez escrito el código para verificar que no hay errores mientras que el botón cargar se utiliza para cargar el programa en Arduino.

En la esquina inferior izquierda aparece un número que indica la línea en la que está situado el cursor. En la esquina inferior derecha aparece el tipo de placa y el puerto serial al que está conectado, esto se configura manualmente seleccionando la opción tarjeta y puerto serial del menú herramientas. [20]

3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa principal inicia realizando la detección en modo automático o manual, el usuario define el modo de trabajo.

En modo automático: Se realiza la detección del dato recibido por parte de la interfaz implementada en computador, posteriormente se realiza una detección de botón presionado en la pantalla táctil, si la detección es afirmativa el programa ejecuta la acción dispuesta para el botón pulsado. Durante la ejecución del programa el periodo de tiempo para la actualización de los datos adquiridos por los sensores así como para el cálculo del controlador PI es de 1 [s]. Esto se cumple independientemente de si los datos adquiridos son visualizados o no en la interfaz respectiva. La comunicación con la interfaz implementada en computador se realiza usando el estándar de comunicación USART a través del puerto USB.

En modo manual: el usuario únicamente puede controlar el encendido y apagado de los dispositivos a través de interruptores localizados en el panel de control local, permitiendo operar la planta como se lo hacía antes de su automatización. La adquisición de datos se realiza visualmente a través de la pantalla implementada.

En el desarrollo del programa se hace uso del Timer 1 para generar el pulso que controla el ángulo de disparo del ventilador. Este Timer se activa cada vez que la

interrupción externa 4 da la señal de cruce por cero permitiendo así la sintonización del pulso de disparo con la red eléctrica.

El Timer 3 a su vez se configura con un periodo de 1 segundo, tiempo en el cual se realiza la actualización de los datos obtenidos por los sensores en la interfaz de visualización correspondiente. Además se hace uso de la interrupción externa 5 para la detección de los pulsos suministrados por el sensor de flujo, dato que permite obtener el flujo de agua correspondiente.

3.2.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA

La siguiente figura muestra el diagrama de flujo del programa principal desarrollado en Arduino.

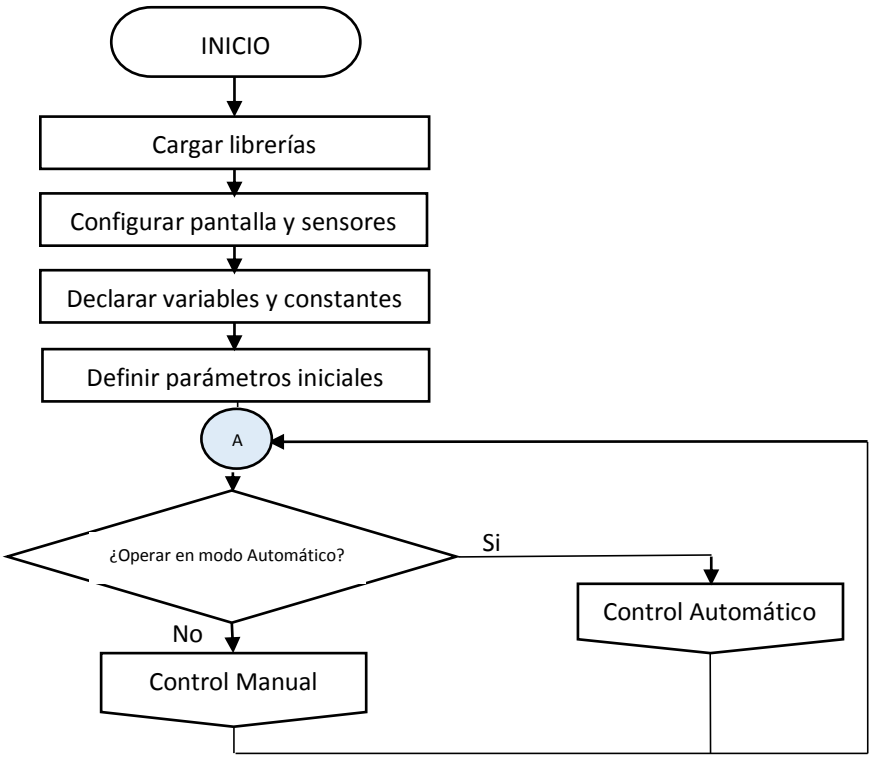


Figura 3.5. Programa principal

La función de cada uno de los bloques del diagrama se describe a continuación:

Cargar librerías.- Declarar todas las librerías utilizadas a lo largo del programa (TimerOne, TimerThree, OneWire, DallasTemperature, DHT, UTFT, UTouch, UTFT_Buttons, EEPROM).

Configurar pantalla y sensores.- Configura el tipo de pantalla (ITDB43) con sus respectivos pines de conexión, tamaño de letra y precisión del *touch.* También se configura el bus, dirección y precisión de los sensores DS18B20, pines de conexión, precisión y tipo de sensor DHT utilizado.

Declarar variables y constantes.- Declarar el tipo y valor inicial de todas las variables y constantes que se utilizan a lo largo del programa.

Definir parámetros iniciales.- Definir pines de entrada y salida, configurar y declarar los botones utilizados con el *touch* de la pantalla, inicializar pantalla, resetear la memoria EEPROM del microcontrolador, inicializar interrupciones y timers, configurar velocidad de comunicación serial.

Control Automático.- Operar en modo automático presenta dos opciones de control; control local y remoto. Para el control local se utiliza como interfaz de comunicación la pantalla TFT, mientras que para control remoto se utiliza la interfaz desarrollada en LabView e implementada en un computador.

Control Manual.- Permite encender y apagar el equipo por medio de interruptores, así como visualizar los datos correspondientes en la pantalla.

3.2.2.1 Diagrama de flujo del modo de operación automático

La Figura 3.6 muestra el diagrama de flujo correspondiente al modo de operación automático, el cual es parte del programa principal desarrollado en Arduino.

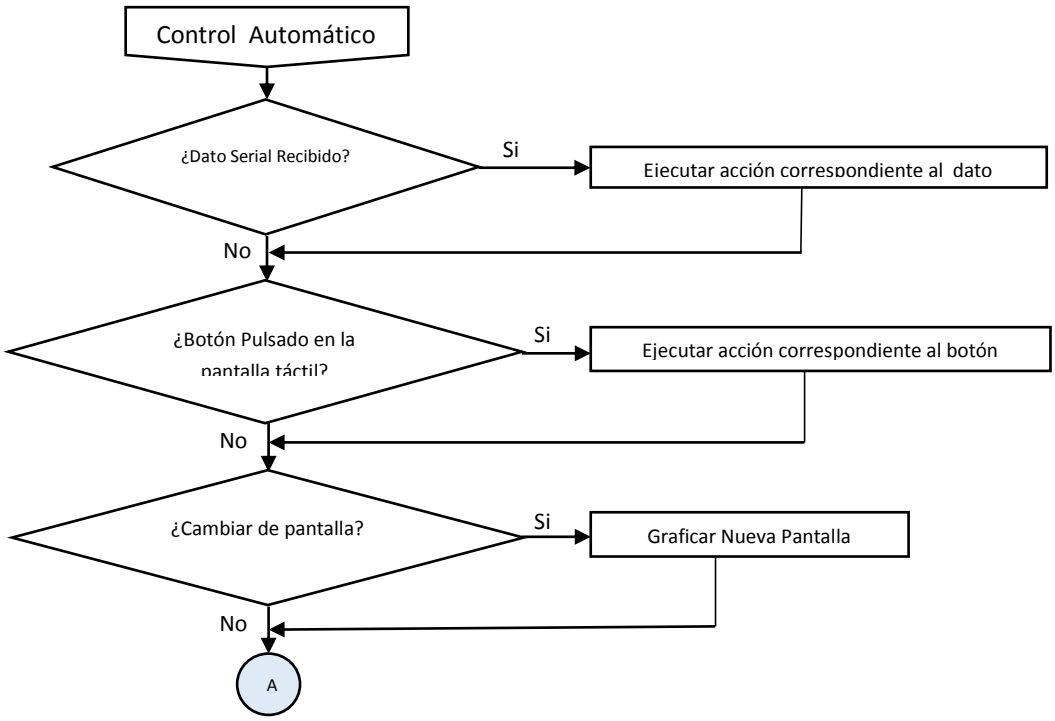


Figura 3.6. Modo de operación automático

La función de cada uno de los bloques del diagrama se describe a continuación:

Ejecutar acción correspondiente al dato.- Si existen datos recibidos a través de comunicación serial quiere decir que se está trabajando en modo remoto, entonces se procede a leer el dato recibido en ASCCI y ejecutar la acción programada en el microcontrolador. Éstas pueden ser:

- Solicitud de transmisión de datos desde el microcontrolador hacia la interfaz del computador.
- Incremento o disminución del set point (temperatura de agua a la salida).
- Resetear datos y gráficos.
- Encender o apagar el equipo.
- Grabar una nueva línea de operación de la torre con los datos obtenidos en ese momento.

Ejecutar acción correspondiente al botón.- Esta acción se presenta cuando se trabaja en modo local. Si se pulsa en la pantalla el área correspondiente a un botón programado y habilitado en ese instante, se procede a ejecutar la acción correspondiente, la misma que puede ser:

- Cambiar la pantalla visualizada.
- Encender o apagar el equipo.
- Aumentar o disminuir el valor del set point.
- Elegir el gráfico que se desea visualizar.
- Grabar una nueva línea de operación de la torre con los datos obtenidos en ese momento.

Graficar pantalla.- Si la acción correspondiente al botón pulsado es un cambio de pantalla visualizada, se procede a borrar la pantalla actual y a continuación se grafica la nueva pantalla. Se dispone de nueve pantallas desarrolladas y programadas indicadas posteriormente.

3.2.2.2 Diagramas de flujo de subrutinas

3.2.2.2.1 Detección de cruce por cero

La Figura 3.7 muestra el diagrama de flujo de la subrutina correspondiente a la interrupción externa en la cual se encuentra configurada el detector de cruce por cero, tratado en el subcapítulo 2.4.1.

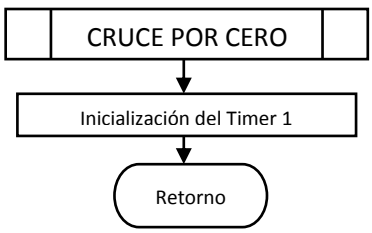


Figura 3.7. Detector de cruce por cero

La función del bloque del diagrama se describe a continuación:

Inicialización del Timer1.- Cuando la interrupción externa 4 detecta el pulso correspondiente a un cruce por cero, se procede a cargar en el timer1 el valor obtenido mediante el algoritmo de control PI desarrollado y visualizado en la ecuación (3.14), una vez cargado el valor se procede a inicializar el Timer1.

3.2.2.2.2 Pulso de disparo para controlar el actuador

La Figura 3.8 muestra el diagrama de flujo de la subrutina correspondiente al timer en el cual se encuentra configurado el pulso de disparo que controla el actuador (ventilador).

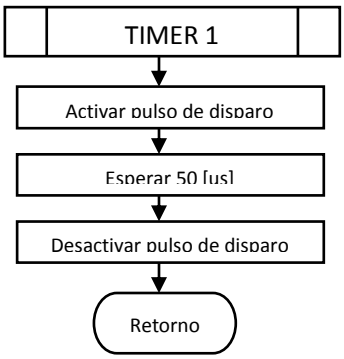


Figura 3.8. Activación del pulso de disparo

La función de cada uno de los bloques del diagrama se describe a continuación:

Activar pulso de disparo.- Cuando el tiempo cargado en el Timer1 finaliza se procede a ejecutar su acción programada, la cual consiste en poner en estado 1 lógico el pin encargado de controlar el ángulo de disparo del ventilador, activando su funcionamiento para el semi-ciclo de voltaje correspondiente.

Desactivar pulso de disparo.- Una vez transcurrido el tiempo necesario indicado en [21] para activar el triac, se coloca en estado 0 lógico el pin correspondiente

encargado del control del ángulo de disparo del ventilador, a la espera de la próxima activación.

3.2.2.2.3 Conteo de pulsos del sensor de flujo de agua

La Figura 3.9 muestra el diagrama de flujo de la subrutina correspondiente a la interrupción externa en la cual se encuentra configurado el conteo de pulsos proporcionado por el sensor de flujo de agua.

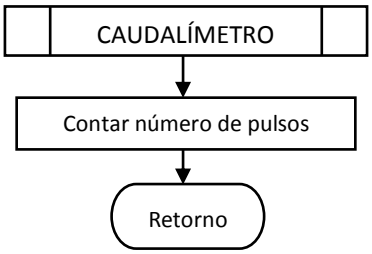


Figura 3.9. Conteo de pulsos correspondientes al flujo de agua

La función del bloque del diagrama se describe a continuación:

Contar número de pulsos.- Se contabilizan los pulsos recibidos por el sensor de flujo a través de la interrupción externa 5. Posteriormente en la actualización de datos se procede al respectivo cálculo de flujo y se resetea la variable que cuenta los pulsos, así queda lista para realizar una nueva medida.

3.2.2.2.4 Lectura, visualización, almacenamiento de datos y ejecución del algoritmo PI

La Figura 3.10 muestra el diagrama de flujo de la subrutina que se ejecuta cada segundo correspondiente al Timer3 en el cual se encuentra configurado la lectura de datos de los sensores, visualización de datos en la pantalla táctil, almacenamiento de datos, y la ejecución del algoritmo de control PI desarrollado en la ecuación (3.14).

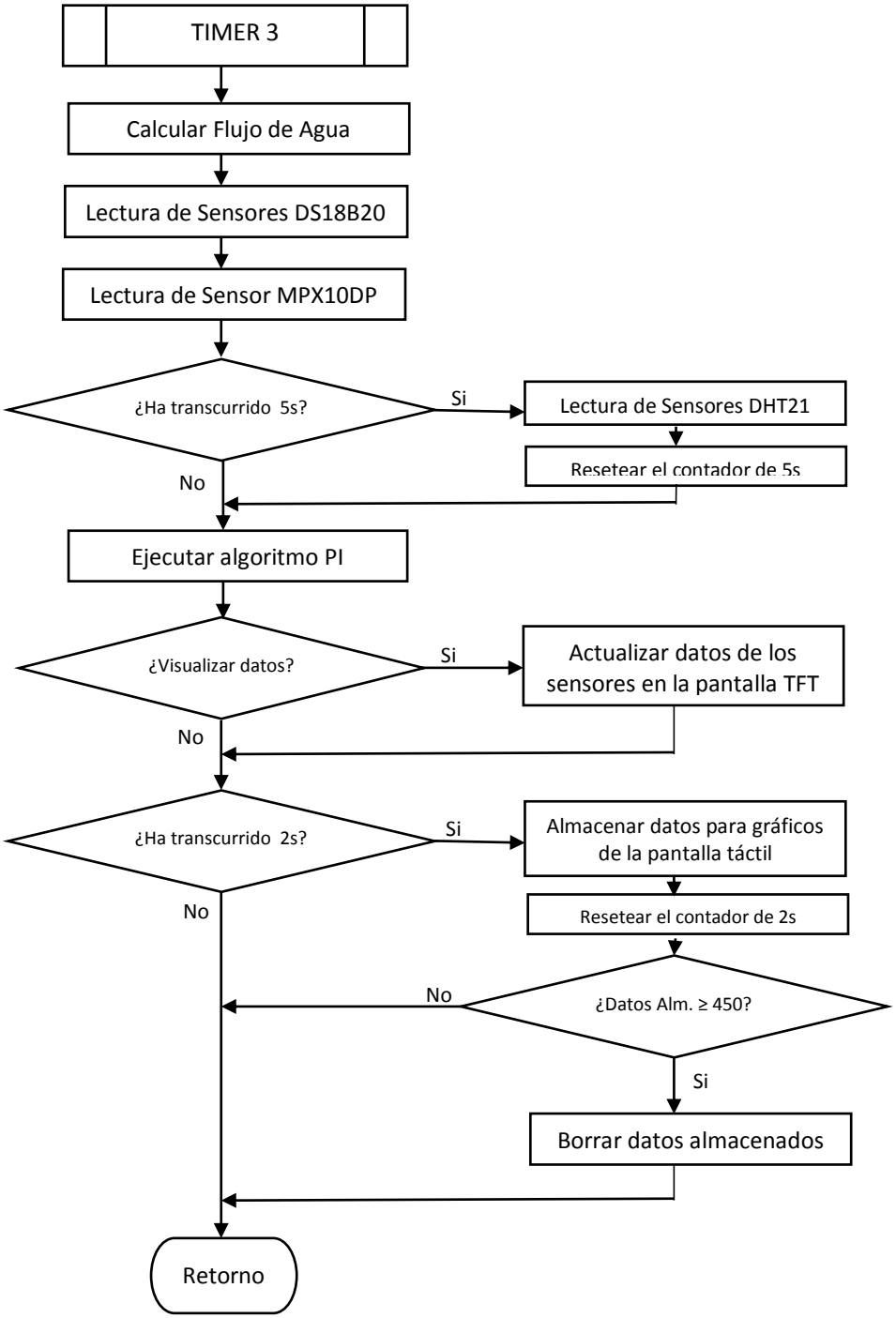


Figura 3.10. Subrutina del Timer3 ejecutada cada segundo

La función de cada uno de los bloques del diagrama se describe a continuación:

Calcular flujo de agua.- Se calcula el flujo de agua en la torre con la ayuda de los pulsos contabilizados y almacenados en la subrutina “caudalímetro”, al final se resetea la variable dejándola lista para una nueva contabilización de pulsos.

Lectura de sensores DS18B20.- Se lee y actualiza el dato recibido por los sensores de temperatura de agua DS18B20 implementados.

Lectura del sensor MPX10DP.- Se lee y actualiza el dato recibido por el sensor de presión diferencial MPX10DP implementado.

Lectura de sensores DHT21.- Si la variable asignada para contabilizar el tiempo de actualización de estos sensores es mayor o igual a 5 segundos, se procede a leer y actualizar los datos recibidos correspondientes a la temperatura y humedad relativa del aire. Se establece este período debido a que el tiempo de actualización requerido por los sensores es de 4,7 segundos. Una vez realizada la lectura la variable se resetea y queda lista para un nuevo conteo.

Ejecutar algoritmo PI.- Se ejecuta el algoritmo de control implementado para obtener el ángulo de disparo del ventilador requerido por el sistema. Este paso se ejecuta siempre que el sistema opere en modo automático ya sea modo local o remoto. La ecuación discreta implementada es la (3.14).

Actualizar datos de los sensores en la pantalla táctil.- Si la variable booleana asignada para el control de la visualización de datos en la pantalla táctil tiene un valor de “verdadero” equivalente a 1 lógico, se procede a realizar la actualización de los datos adquiridos por los sensores y visualizarlos en la pantalla. Esta variable permite que los datos no se visualicen cuando el usuario navega por pantallas distintas a la de adquisición y visualización de datos.

Almacenar datos para gráficos de la pantalla táctil.- Si la variable asignada para contabilizar el tiempo de almacenamiento de datos es mayor o igual a dos segundos,

se procede a grabar los datos correspondientes en la memoria EEPROM del microcontrolador, esto permite visualizar las gráficas de temperatura y humedad en función del tiempo en la pantalla, una vez realizado el almacenamiento la variable se resetea y queda lista para un nuevo conteo de tiempo. Bajo estas condiciones de trabajo el número de pixeles que posee la pantalla permiten visualizar gráficos en intervalos de máximo 15 minutos y una vez almacenado el número de datos máximo permitido el cual es igual a 450, los gráficos se resetean automáticamente junto con sus contadores de datos guardados y se procede a iniciar nuevamente con el almacenamiento desde cero por los próximos 15 minutos y así sucesivamente.

3.2.2.2.5 Control Manual

La Figura 3.11 muestra el diagrama de flujo correspondiente al modo de operación manual del sistema, el cual es parte del programa principal desarrollado en Arduino.

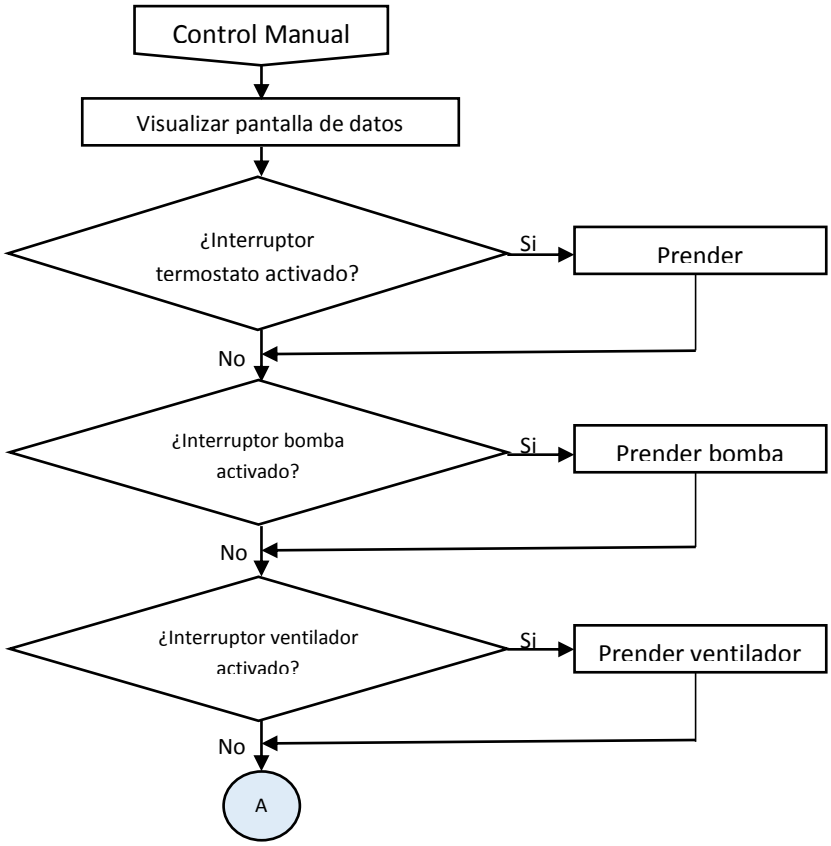


Figura 3.11. Modo de operación manual

La función de cada uno de los bloques del diagrama se describe a continuación:

Visualizar pantalla de datos.- Si el programa no detecta control automático despliega en la pantalla los datos de los sensores. Cualquier otra opción mediante el *touch* o la interface de visualización remota queda deshabilitada, al igual que el algoritmo de control.

Prender termostato.- Si se detecta que el interruptor correspondiente al termostato está en ON, entonces se activa el relé correspondiente para que el termostato se encienda.

Prender bomba.- Si se detecta que el interruptor correspondiente a la bomba está en ON, entonces se activa el relé correspondiente para que la bomba se encienda.

Prender ventilador.- Si se detecta que el interruptor correspondiente al ventilador está en ON, entonces se activa el relé correspondiente para que el ventilador se encienda normalmente sin control de ángulo de disparo.

3.3 INTERFAZ DE CONTROL LOCAL

La interfaz de control y visualización local fue desarrollada para la pantalla táctil TFT ubicada en la caja de control a través de arduino y fue diseñada para:

- Permitir la interacción entre el usuario y el sistema en todo momento.
- Poner en marcha el equipo, es decir, prender y apagar el equipo (ventilador, bomba, termostato).
- Visualizar los datos adquiridos por los sensores.
- Visualizar gráficos en función del tiempo correspondientes a temperatura y humedad relativa.

- Establecer el valor de la temperatura del agua a la salida (set point).Grabar un máximo de 5 líneas de operación de la torre, con datos correspondientes al instante en que se ejecuta la acción.
- Resetear y borrar los gráficos.

A continuación se realiza una explicación de las distintas pantallas desarrolladas que pueden visualizarse en la pantalla táctil TFT implementada cuando se opera en modo local.

Esquema:

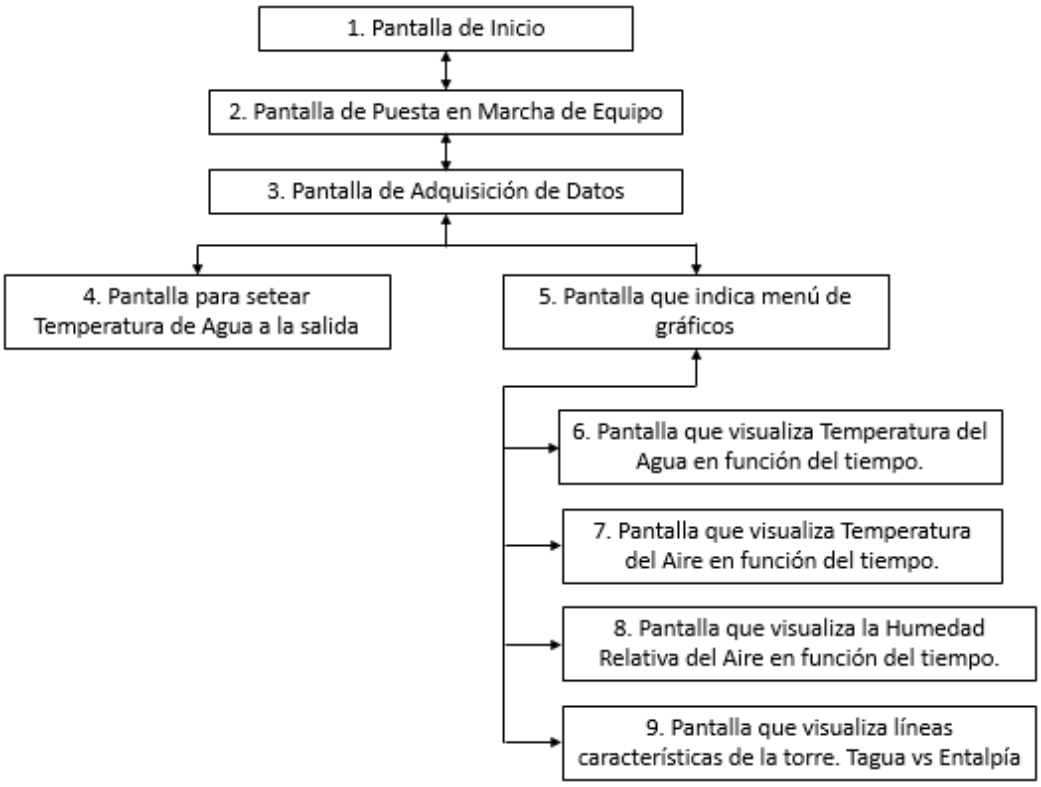


Figura 3.12. Pantallas desarrolladas para la Interfaz de control local

Pantalla 1: La pantalla de inicio como se observa en la Figura 3.13, es la primera pantalla que el usuario observa al encender el sistema.

Figura 3.13. Pantalla de inicio

Pantalla 2: La pantalla de puesta en marcha de equipo como se muestra en la Figura 3.14, es la que permite encender y apagar la resistencia eléctrica (niquelina), bomba y ventilador con solo pulsar el botón correspondiente.

Los botones cambian de color azul a rojo luego de ser pulsados para indicar el estado inactivo o activo del equipo correspondientemente.

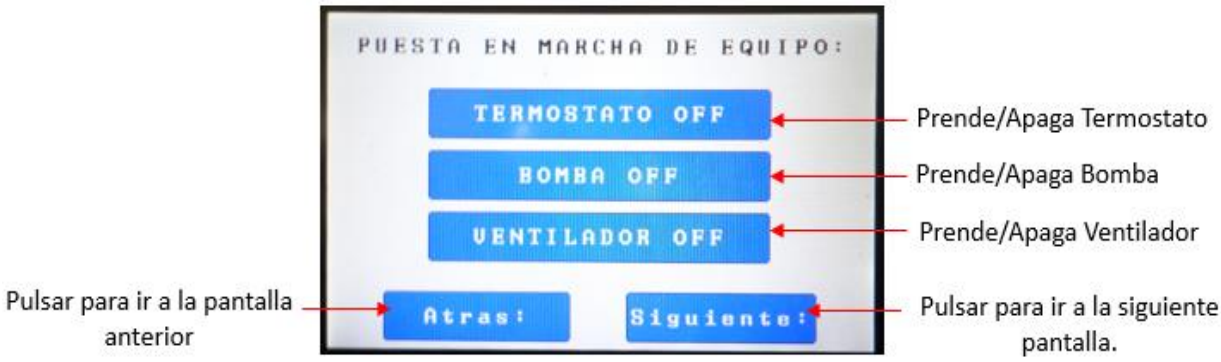


Figura 3.14. Pantalla de Puesta en marcha de equipo

Pantalla 3: Pantalla de adquisición de datos la cual muestra los valores adquiridos por los sensores así como los botones correspondientes que permiten grabar una línea característica de la torre, acceder a la pantalla de establecimiento de set point y a la pantalla que muestra las opciones de los gráficos que se pueden visualizar.

Figura 3.15. Pantalla de adquisición de datos

Pantalla 4: Pantalla para establecer el set point requerido (temperatura de agua a la salida de la torre), en donde basta con pulsar el botón “Incrementar” o “Disminuir” hasta obtener el valor deseado.

Figura 3.16. Pantalla para introducir el set point

Pantalla 5: Pantalla que muestra el menú de posibles gráficos a visualizarse una vez escogido y presionado el botón correspondiente. Entre las opciones se tiene: temperatura de entrada y salida del agua junto con el set point establecido, temperatura del aire a la entrada y a la salida, humedad relativa del aire a la entrada y a la salida, líneas características de la torre.

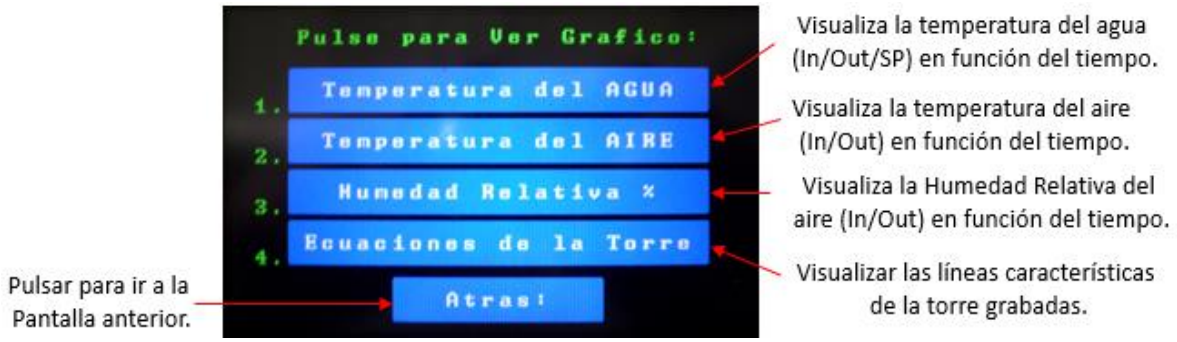


Figura 3.17. Pantalla de menú de gráficos

Pantalla 6: La pantalla de temperatura del agua es la que indica la variación de la temperatura del agua a la entrada y a la salida junto con el set point establecido en función del tiempo.

Figura 3.18. Pantalla de temperatura del agua

Pantalla 7: Pantalla de temperatura del aire la cual indica la variación de la temperatura del aire a la entrada y a la salida de la torre en función del tiempo.

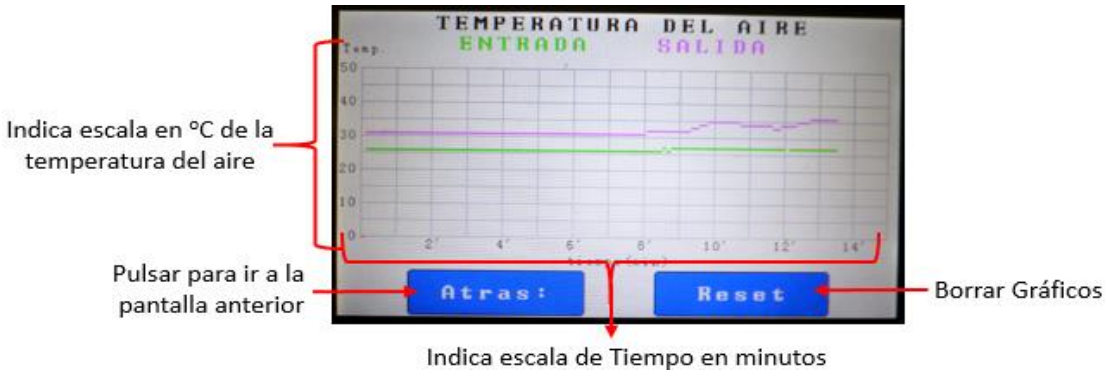


Figura 3.19. Pantalla de temperatura del aire

Pantalla 8: Pantalla de humedad relativa del aire la cual muestra el porcentaje de la variación de humedad a la entrada y a la salida de la torre en función del tiempo.

Figura 3.20. Pantalla de humedad relativa del aire

Pantalla 9: Pantalla que muestra las líneas características de operación de la torre en un instante determinado. Por default se establece un máximo de cinco líneas a ser visualizadas.

Figura 3.21. Pantalla de líneas de operación de la torre

3.4 INTERFAZ DE CONTROL REMOTO

Para el desarrollo de la interfaz de computador se ha utilizado el programa LabView (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) de National Instruments.

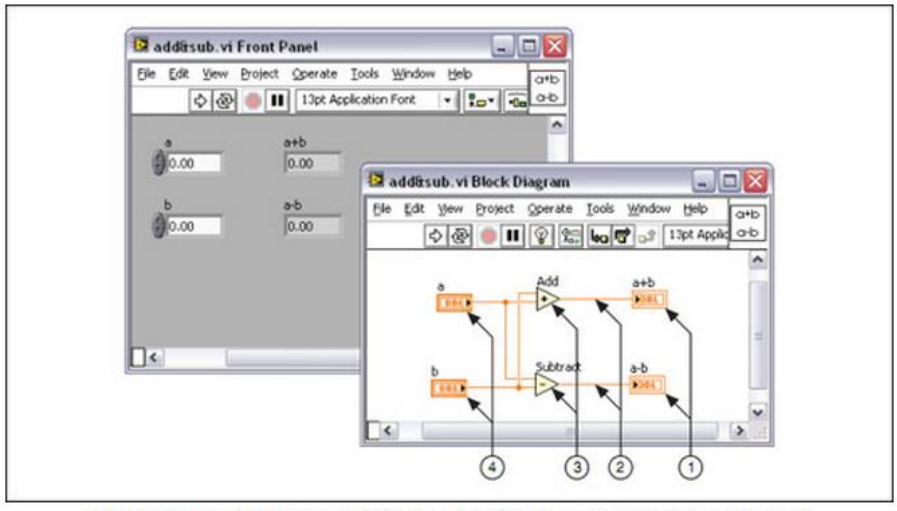
LabVIEW es una plataforma para el desarrollo de aplicaciones para adquisición de datos, control de instrumentos y automatización industrial, la cual presenta facilidades en el desarrollo de aplicaciones debido principalmente a su lenguaje de programación visual gráfico, además permite comunicarse con un microcontrolador a través de comunicación serial.

Los programas desarrollados se denominan Instrumentos Virtuales, debido a que su apariencia y operación generalmente imitan instrumentos físicos. Estos programas tienen dos ventanas:

Panel frontal: simula el panel de un instrumento físico mostrando datos actualizados en tiempo real. Aquí se definen los controles e indicadores del programa.

Diagrama de Bloques: contiene el código fuente del VI, es el programa propiamente dicho. Aquí se incluyen terminales, subVIS, funciones, constantes, estructuras y cables, los cuales transfieren datos junto con otros objetos del diagrama de bloques.

La Figura 3.22 muestra un ejemplo de panel frontal con su correspondiente diagrama de bloques.



(1) Terminales de Indicador | (2) Cables | (3) Nodos | (4) Terminales de Control

Figura 3.22. Panel frontal y diagrama de bloques de un VI

3.4.1 DESCRIPCIÓN

La interfaz implementada en el computador fue diseñada para:

- Facilitar la interacción entre el usuario y el sistema en todo momento.
- Poner en marcha el equipo, es decir, prender y apagar el equipo (ventilador, bomba, termostato).
- Visualizar los datos obtenidos por los sensores.
- Visualizar los gráficos en función del tiempo correspondientes a la temperatura del aire, temperatura del agua y humedad relativa.
- Establecer el valor de la temperatura del agua a la salida (set point).
- Grabar un máximo de 5 líneas de operación de la torre con los datos obtenidos al momento en que se ejecuta la acción.
- Resetear y borrar los gráficos.

La Figura 3.23 muestra la interfaz para control remoto desarrollada en Labview.

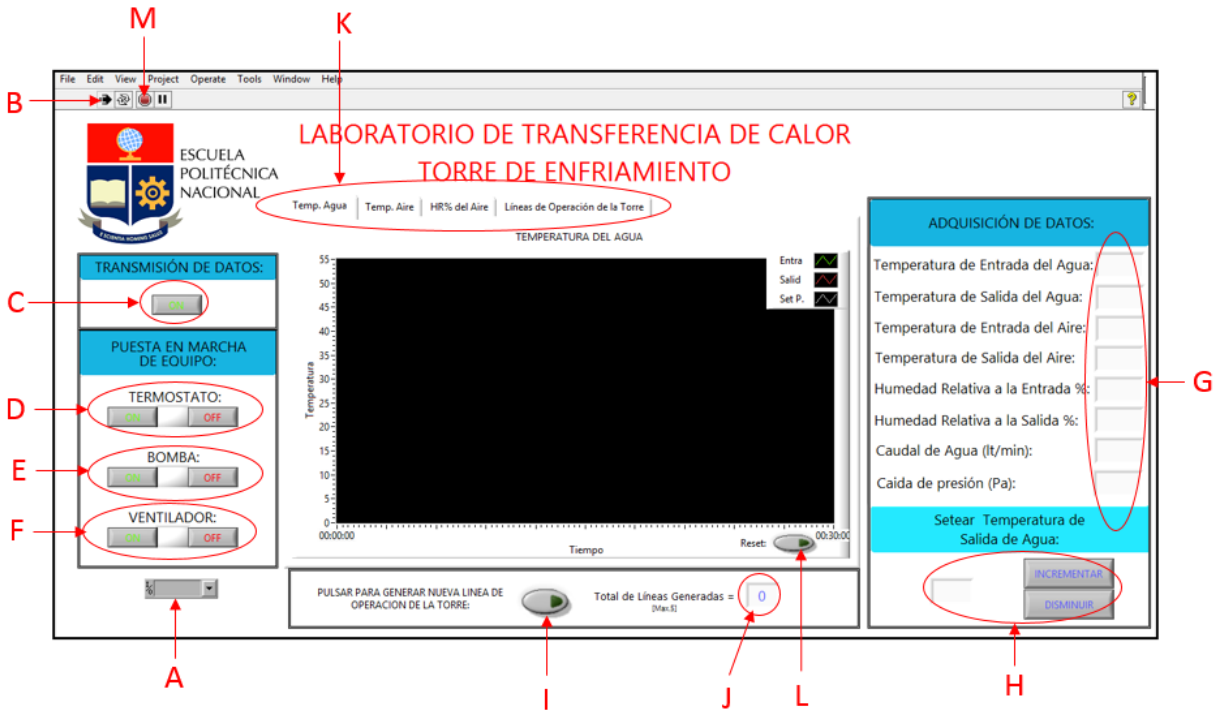


Figura 3.23. Interfaz de control remoto

Donde:

A: Indica el puerto serial “com” a través del cual se encuentra conectado la interfaz con la plataforma de control.

B: Botón Run para inicializar el programa.

C: Botón para inicializar la transmisión de datos entre la interfaz y la plataforma de control.

D: Botón de encendido y apagado del termostato junto con su led indicador.

E: Botón de encendido y apagado de la bomba junto con su led indicador.

F: Botón de encendido y apagado del ventilador junto con su led indicador.

G: Indicadores de los datos adquiridos por los respectivos sensores implementados.

H: Botón de incremento y de disminución del valor de la temperatura de agua a la salida (set point), junto con su indicador.

I: Botón para generar una nueva línea de operación de la torre, de acuerdo a los datos presentes en el momento de presionarlo.

J: Indica las líneas de operación de la torre que se han generado hasta el momento, con la limitación de generar un máximo de 5 líneas.

K: Pestaña para escoger el gráfico a visualizar:

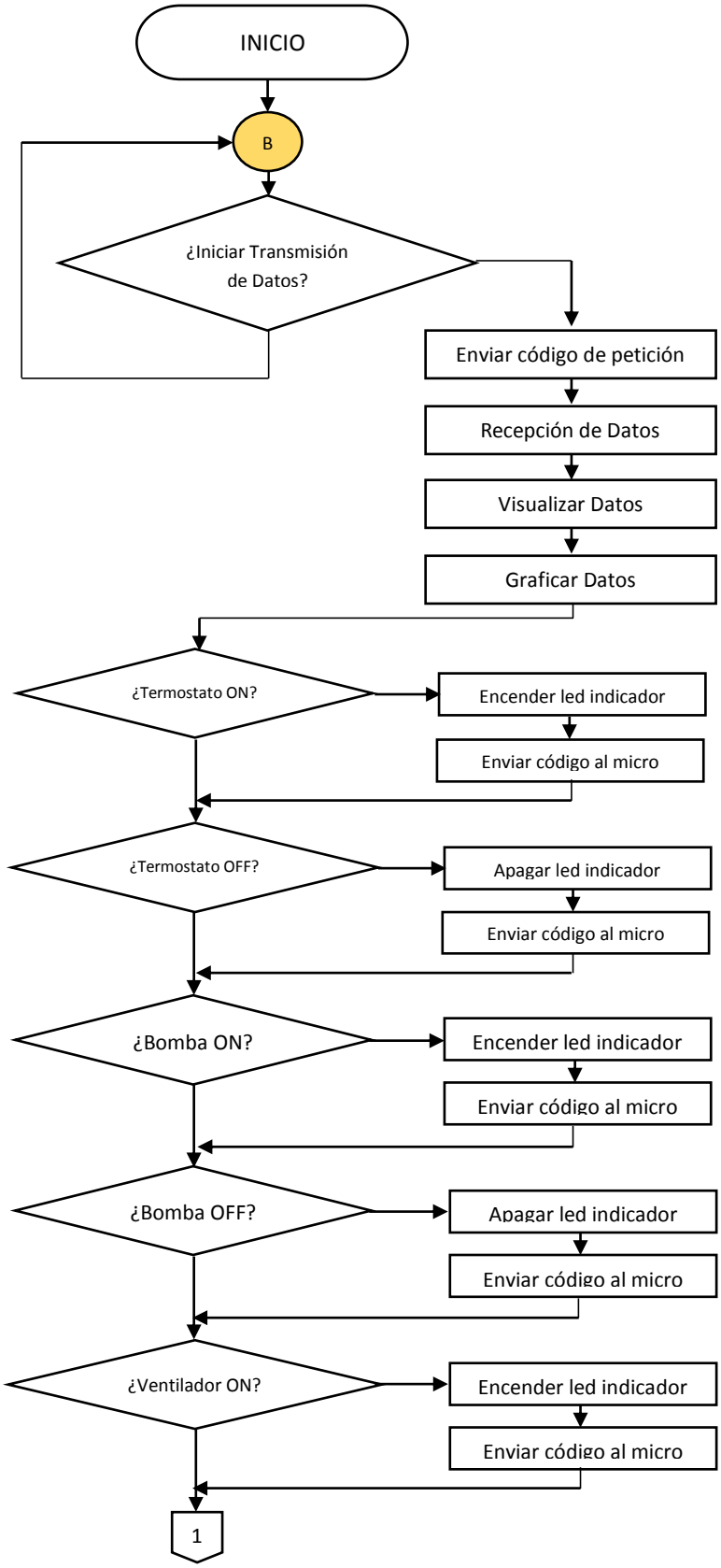
- Temperatura del Agua a la entrada y a la salida, así como el valor del set point.
- Temperatura del Aire a la entrada y a la salida.
- Humedad relativa del aire a la entrada y a la salida.
- Líneas de operación de la torre generadas (Temperatura del agua vs Entalpía Del aire).

L: Botón para resetear los gráficos.

M: Botón stop para detener la ejecución del programa.

3.4.2 DIAGRAMA DE FLUJO

La Figura 3.24 muestra el diagrama de flujo del programa correspondiente a la interfaz de usuario para computador desarrollado en Labview.


INICIO
B
¿Iniciar Transmisión de Datos?
Enviar código de petición
Recepción de Datos
Visualizar Datos
Graficar Datos
¿Termostato ON?
Encender led indicador
Enviar código al micro
¿Termostato OFF?
Apagar led indicador
Enviar código al micro
¿Bomba ON?
Encender led indicador
Enviar código al micro
¿Bomba OFF?
Apagar led indicador
Enviar código al micro
¿Ventilador ON?
Encender led indicador
Enviar código al micro
1

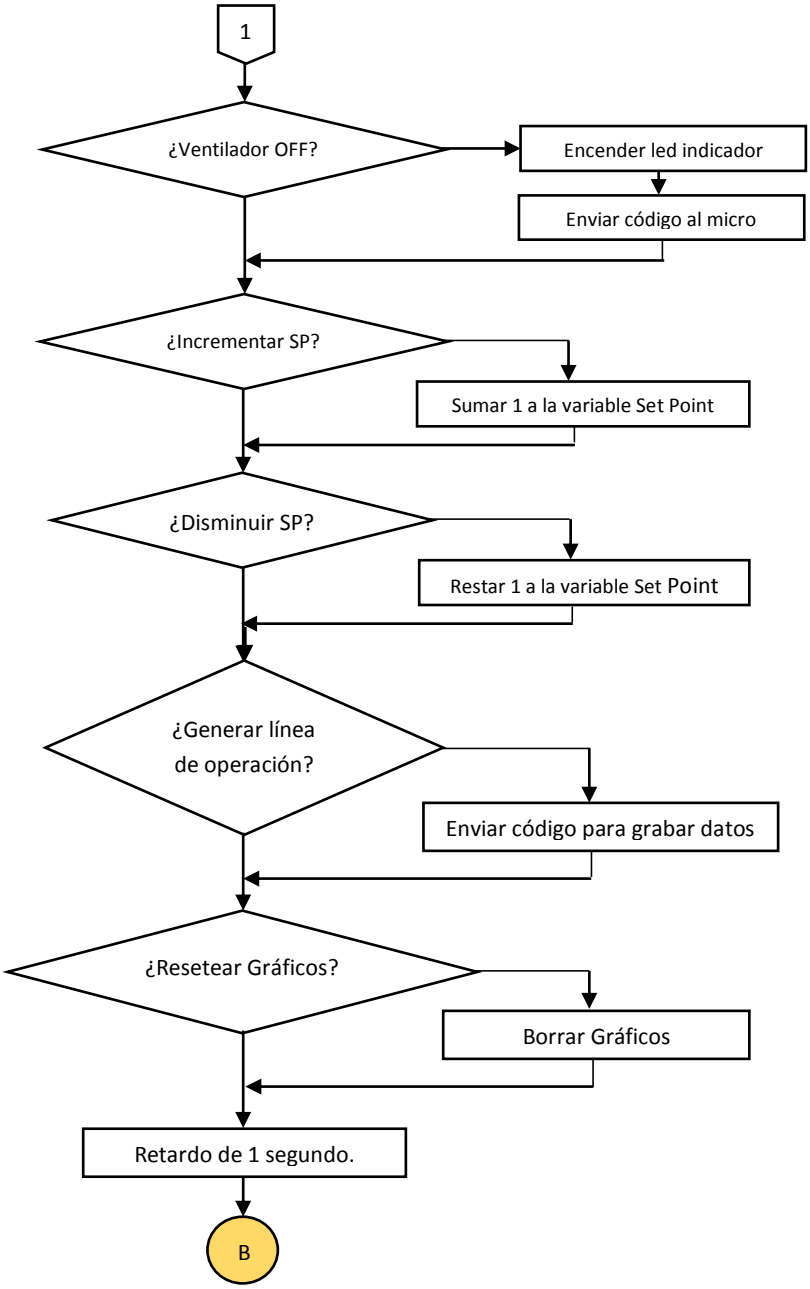


Figura 3.24. Diagrama de flujo de la interfaz de control remoto

El diagrama de flujo indica que para inicializar la comunicación entre la interfaz desarrollada y el programa implementado en el controlador Arduino, es necesario que se encuentre habilitada la transmisión de datos, esto se logra pulsando el botón respectivo.

Una vez que la transmisión de datos se encuentra habilitada, el programa efectúa una petición al controlador indicando que la interfaz se encuentra lista para realizar la recepción de datos. Entre los datos que se reciben se tiene: los valores adquiridos a través de los sensores, los datos necesarios para graficar las líneas de operación de la torre que se hayan grabado hasta el momento, indicadores del estado de equipo encendido o apagado y el valor del set point establecido (temperatura del agua a la salida). Finalizada la recepción de datos se procede a visualizarlos a través de indicadores numéricos y gráficos en función del tiempo.

Subsiguientemente el programa procede a detectar si algún botón de la interfaz ha sido pulsado, en caso de ser afirmativo se procede a ejecutar la acción pertinente para el respectivo botón. La misma se basa en el envío de un código ASCCI hacia el microcontrolador para que éste ejecute la acción respectiva.

Estas operaciones dependen del botón que haya sido presionado, entre las cuales tenemos:

- Encendido o apagado del equipo (termostato, bomba, ventilador).
- Incremento o disminución del valor establecido del set point.
- Generación de una nueva línea de operación de la torre.
- En caso de que el botón pulsado sea “Reset”, el mismo programa se encarga de borrar los gráficos y las respectivas variables.

El proceso se ejecuta repetidamente mientras la transmisión de datos se encuentre activa con un lazo repetitivo de un segundo.

3.4.3 CREACIÓN DE UN PAQUETE EJECUTABLE EN LABVIEW

Un archivo ejecutable permite correr la aplicación desarrollada en cualquier PC sin la necesidad de que esta tenga instalado Labview, el único requisito es tener instalado

Run-time engine el cual tiene la capacidad de abrir y correr cualquier VI desarrollado en Labview.

Para crear el ejecutable se debe seguir los siguientes pasos:

- Abrir el VI correspondiente y seleccionar “create project” de la pestaña “project” ubicada en la barra superior del panel frontal.
- Una vez seleccionado “Blank Project” aparece la ventana de la Figura 3.25, se da clic derecho en “Build Specifications” y se selecciona “New” / “Application (EXE)”.

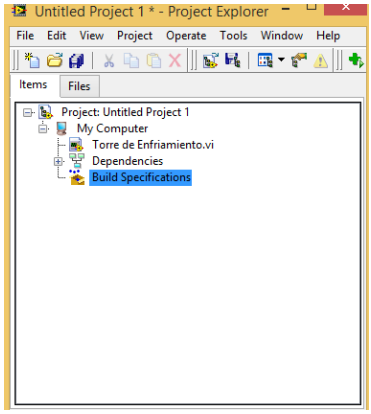


Figura 3.25. Ventana para crear ejecutable

- Consecuentemente aparece la ventana mostrada en la Figura 3.26 donde se edita y configura las distintas características requeridas para el archivo ejecutable como: nombre, ubicación, clave de acceso, entre otras.
- Finalizada la configuración se da clic en “*Build*” y el archivo se habrá creado en la dirección especificada.

La creación de un paquete ejecutable tiene el objetivo de impedir a los operarios realizar alguna modificación del software, de este modo los mismos tendrán acceso únicamente al panel frontal y no al código fuente. Es de gran utilidad en caso de

requerir reemplazar la computadora designada a este proyecto con otra PC en caso de daño de software, hardware o renovación de equipo.

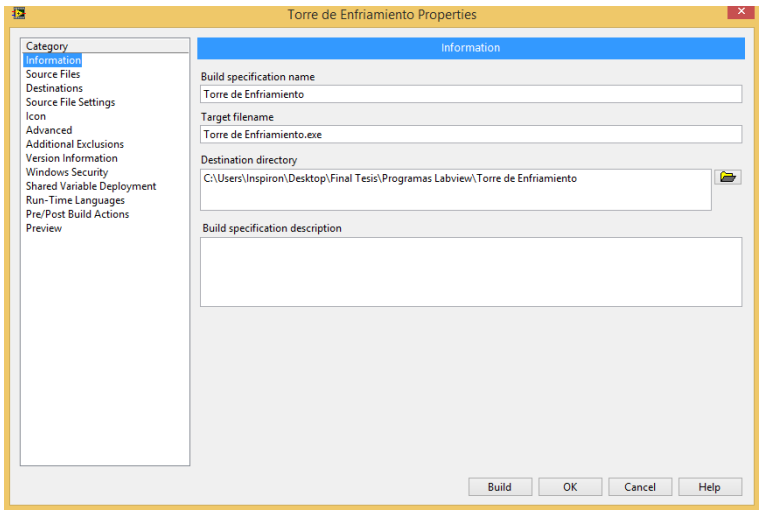


Figura 3.26. Ventana para configurar ejecutable

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se describen las pruebas realizadas al módulo. Se realizan pruebas de operación en modo local y remoto para comprobar su correcto funcionamiento.

Previamente el sistema ha pasado por una serie de pruebas que permiten garantizar un funcionamiento apropiado así como encontrar las limitaciones que presentan el sistema en su funcionamiento.

Entre las limitaciones propias del sistema se tiene:

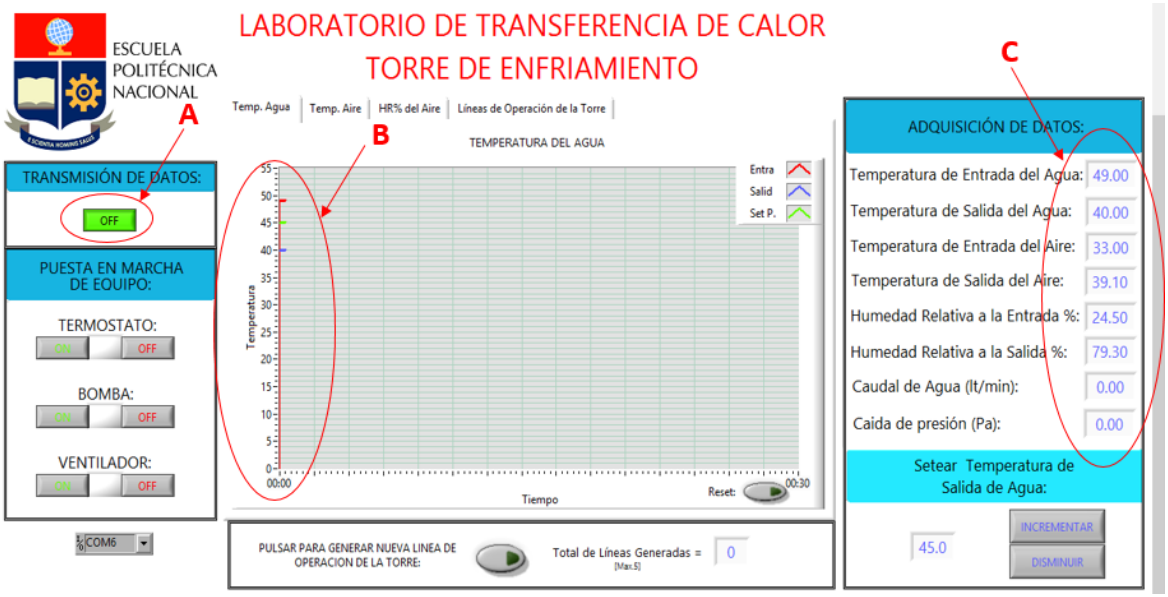
- Limitante en el flujo de agua: el rango de trabajo establecido para el adecuado funcionamiento del sistema va de 15 a 25 [g/s]. El límite de flujo mínimo se debe a la capacidad del sensor mientras que el límite máximo se establece debido a las dimensiones físicas de la bandeja recolectora de agua a la salida de la torre.
- Temperatura de agua del depósito: debido a que el material del cual se encuentra construido el depósito es acrílico de 7 [mm] y su resistencia a la temperatura es de aproximadamente 55 grados celsius [6], se establece como valor máximo una temperatura de agua a la entrada de 50 [^{o}C].
- Rango de valores para el set point (temperatura de agua a la salida): se establece un rango de 30 a 45 [^{o}C] debido a que los límites encontrados de temperatura del agua a la salida oscilan entre 47 [^{o}C] y la temperatura ambiente a la cual se encuentra trabajando el sistema aproximadamente, la misma que a través de una serie de mediciones realizadas a distintas horas del día van en un rango entre 26 y 32 [^{o}C].

4.1 PRUEBAS DE LA INTERFAZ GRÁFICA REMOTA

Teniendo en cuenta las características y limitaciones propias del sistema se procede a probar su funcionamiento.

4.1.1 PRUEBA DE PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO

Para la prueba de puesta en marcha del equipo se procede a ejecutar el software implementado y una vez que este se encuentre corriendo se pulsa el botón de inicio de transmisión de datos. El inicio de la transmisión de datos se comprueba de manera visual puesto que automáticamente los datos adquiridos por los sensores comenzaran a visualizarse gráfica y numéricamente en la interfaz, como muestra la Figura 4.1.



(A) Indicador (B) Visualizador gráfico (C) Visualizador numérico

Figura 4.1. Inicio de transmisión de datos

Subsiguientemente se procede a encender el equipo (niquelina, bomba, ventilador) a través de los botones correspondientes de la interfaz, el led ubicado entre los botones de encendido y apagado para cada dispositivo cambiará a color verde para indicar que el equipo se encuentra en funcionamiento como se observa en la Figura 4.2.

Figura 4.2. Puesta en marcha de equipo.

Asimismo se comprueba el estado del equipo de manera experimental debido a que al encender el termostato el agua del depósito debe comenzar a subir su temperatura, de igual manera al encender la bomba y el ventilador se presenta el ruido propio de trabajo del equipo, además se puede apreciar visualmente el flujo de agua y aire a través de la torre.

Una vez realizada esta prueba se ha demostrado el correcto funcionamiento de la puesta en marcha del sistema a través de la interfaz gráfica remota implementada.

Los pasos indicados son indispensables para que la torre entre en funcionamiento, la falla o falta de cualquiera de ellos ocasionaría que la planta no pueda operar, debido a que traería como consecuencias: falta de flujo de agua o aire, falta de calentamiento del agua en el depósito que suministra el agua caliente a la torre e incluso la falta de comunicación entre la interfaz y el sistema.

4.1.2 PRUEBA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE LÍNEAS DE OPERACIÓN DE LA TORRE

Para esta prueba se procede a setear cinco valores distintos de temperatura de agua a la salida (set point) y se deja estabilizar el sistema para cada uno, de esta manera se comprueba el apropiado funcionamiento del controlador. Conjuntamente se obtiene

la línea de operación de la torre correspondiente para cada valor, la cual será comprobada matemáticamente al final de éste capítulo.

A través de este procedimiento se prueba el funcionamiento de:

- Incremento y disminución del valor del set point a través de la interfaz.
- Visualización numérica de los datos adquiridos por los sensores.
- Generación de las líneas de operación de la torre. Teniendo como datos los valores que en el instante de presionar el botón se visualizan.

A continuación se muestran los datos adquiridos por los sensores y las líneas de operación de la torre correspondientes para las temperaturas de salida del agua (set point) establecidas al azar de: 45, 42, 38, 34 y 30 [ºC].

4.1.2.1 Datos obtenidos para el set point establecido de 45 [ºC]

Figura 4.3. Datos adquiridos para 45 [ºC]

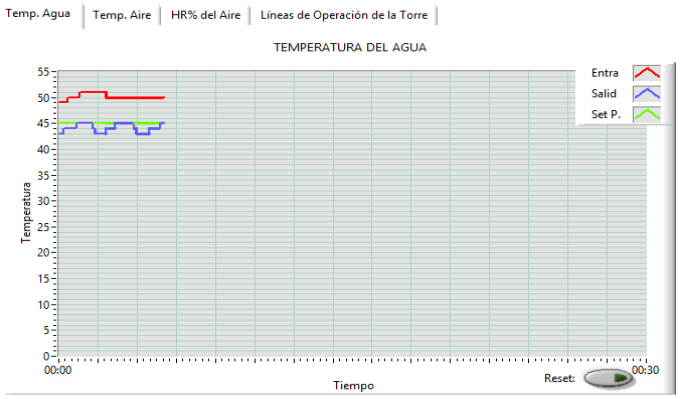


Figura 4.4. Variación de la temperatura del agua para 45 [ºC]

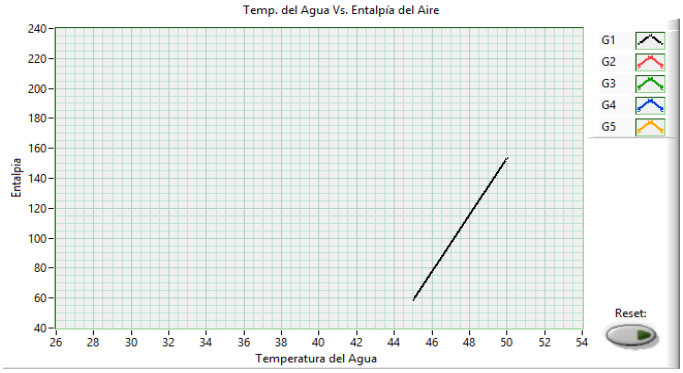


Figura 4.5. Línea de operación de la torre para 45 [ºC]

4.1.2.2 Datos obtenidos para el set point establecido de 42 [ºC]

Figura 4.6. Datos adquiridos para 42 [ºC]

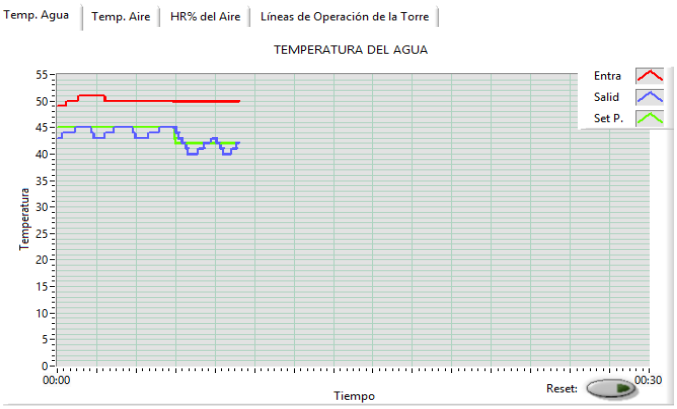


Figura 4.7. Variación de la temperatura del agua para 42 [ºC]

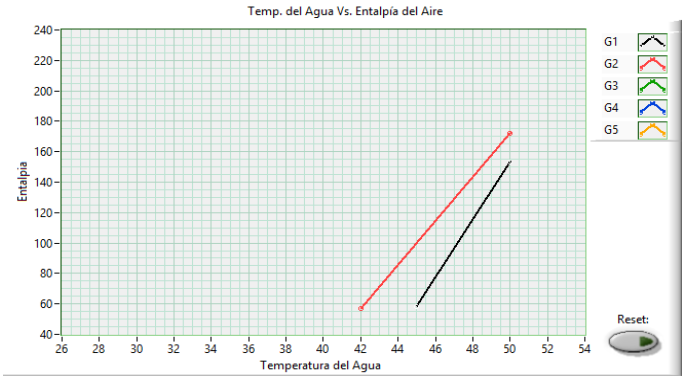


Figura 4.8. Línea de operación de la torre para 42 [ºC]

4.1.2.3 Datos obtenidos para el set point establecido de 38 [ºC]

Figura 4.9. Variación de la temperatura del agua y datos adquiridos para 38 [ºC]

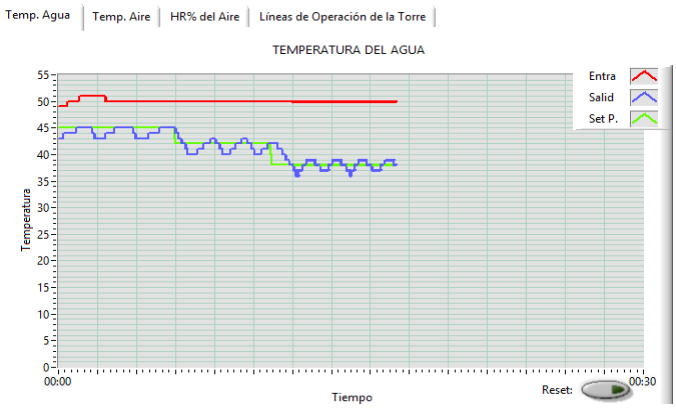


Figura 4.10. Variación de la temperatura del agua para 38 [ºC]

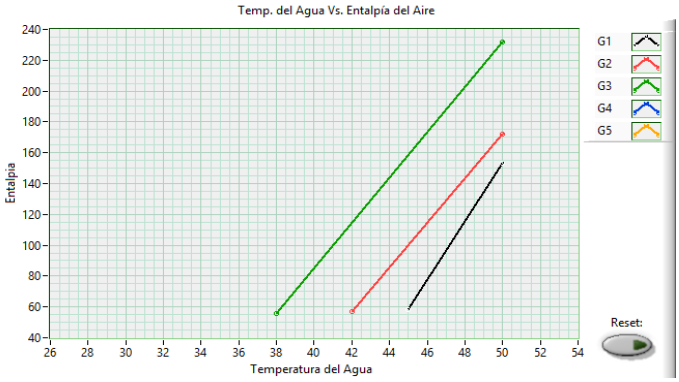


Figura 4.11. Línea de operación de la torre para 38 [ºC]

4.1.2.4 Datos obtenidos para el set point establecido de 34 [ºC]

Figura 4.12. Datos adquiridos para 34 [ºC]

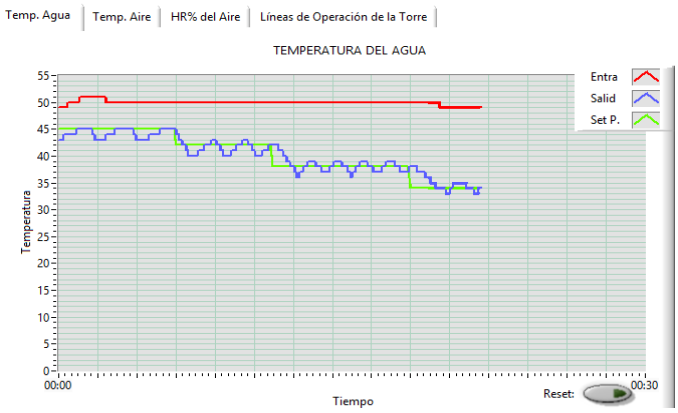


Figura 4.13. Variación de la temperatura del agua para 34 [ºC]

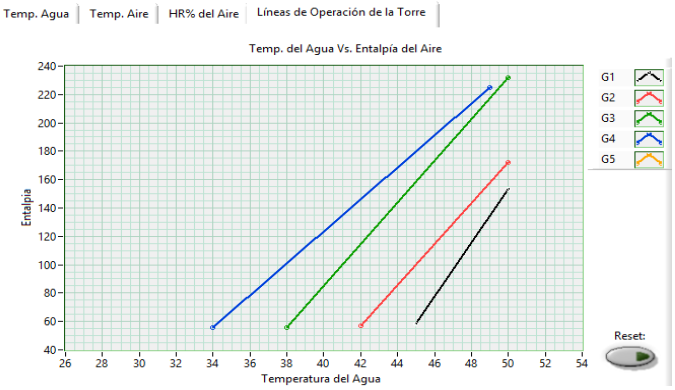


Figura 4.14. Línea de operación de la torre para 34 [ºC]

4.1.2.5 Datos obtenidos para el set point establecido de 30 [ºC]

Figura 4.15. Datos adquiridos para 30 [ºC]

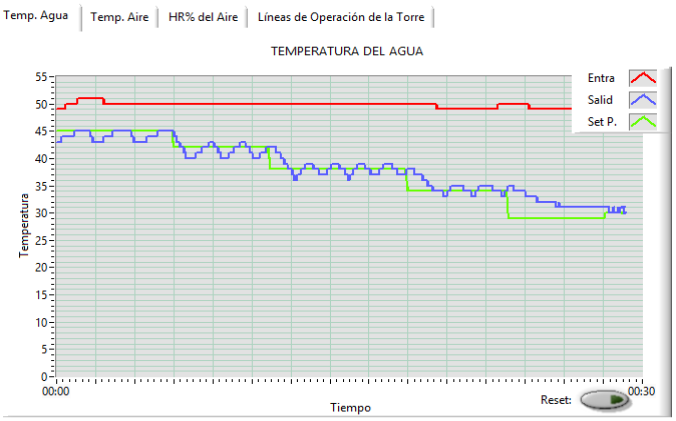


Figura 4.16. Variación de la temperatura del agua para 30 [ºC]

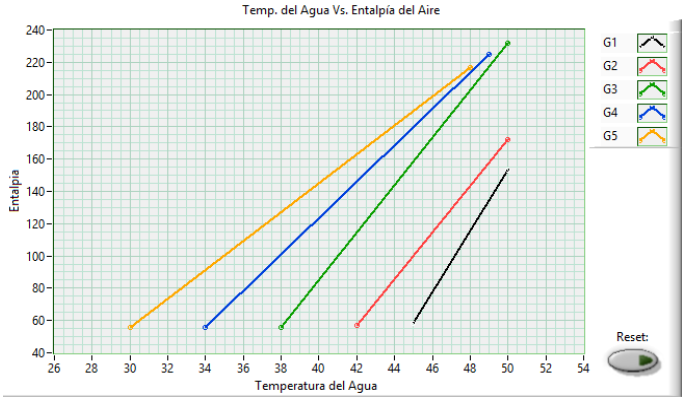


Figura 4.17. Línea de operación de la torre para 30 [ºC]

Tabla 4.1. Valores máximos y mínimos de temperatura para cada set point

Set Point [ºC]	Valor Máximo [ºC]	Valor Mínimo [ºC]	Error Máximo [ºC]	Error Mínimo [ºC]
45	45.5	42.5	0.5	2.5
42	43.0	40.0	1.0	2.0
38	39.5	36.5	1.5	1.5
34	35.5	33.0	1.0	1.0
30	30.5	-	0.5	-

Después de realizar la respectiva prueba con los valores establecidos para el set point (45, 42, 38, 34 y 30^0C) los cuales se encuentran dentro del rango de valores límites recomendados diseñado por el PI, se ha comprobado la correcta visualización de los

datos adquiridos por los sensores implementados. Asimismo se establece un promedio de error de +0.9^{0}C y -1.75 [^{o}C] con respecto al valor seteado, lo cual es un error aceptable para el sistema. La prueba se la realizó a una temperatura ambiente de 30 [^{o}C].

4.1.3 PRUEBA DE REGISTRO GRÁFICO

Para realizar la prueba de registro gráfico de las distintas variables adquiridas en función del tiempo se procede a establecer una variación de set point entre los límites máximo (45) y mínimo (30) [^{o}C] recomendados.

A través de este procedimiento se prueba el funcionamiento de:

- Visualización gráfica de los datos adquiridos por los sensores en función del tiempo.
- Reset de gráficos el cual permite borrarlos.

A continuación de muestran los gráficos obtenidos correspondientes a la temperatura del agua, la temperatura del aire y la humedad relativa.

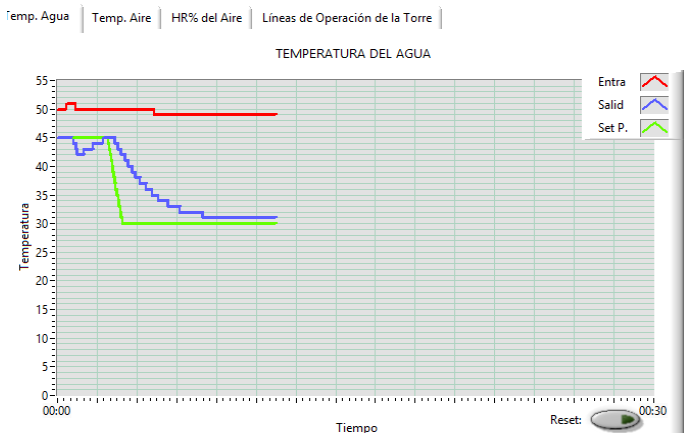


Figura 4.18. Registro de variación de la temperatura del agua en función del tiempo

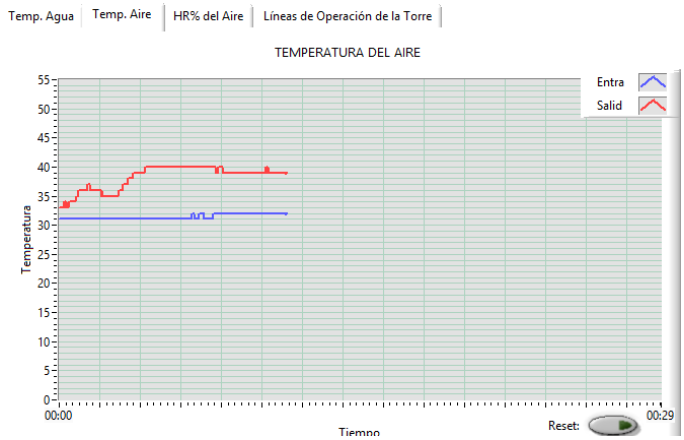


Figura 4.19. Registro de la variación de la temperatura del aire en función del tiempo

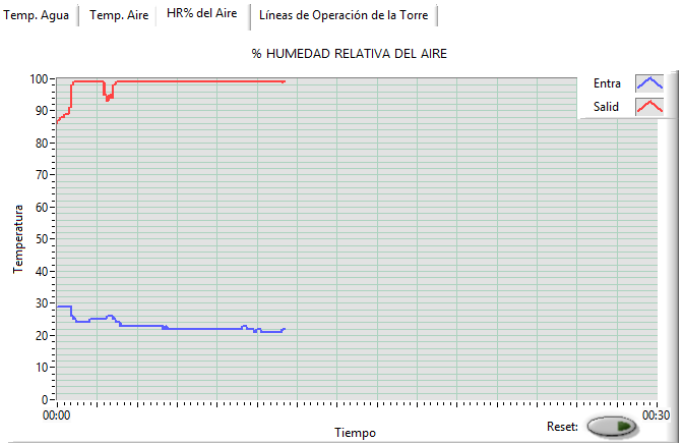


Figura 4.20. Registro de la variación de la humedad relativa del aire en función del tiempo

De esta manera se establece que los datos obtenidos y visualizados a través del registro gráfico en función del tiempo son válidos, debido a que conforme el tiempo transcurre el sistema tiene que enfriar en mayor cantidad la temperatura del agua a la salida hasta alcanzar el set point establecido lo cual provoca que el aire a la salida muestre un aumento de temperatura y de humedad relativa, esto se comprueba claramente a través de las gráficas obtenidas en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20. Además se puede visualizar claramente en la Figura 4.18 que el tiempo necesario para que el sistema alcance el set point establecido con un rango de variación de 15 [^{o}C] es de aproximadamente 3 minutos.

4.2 PRUEBAS DE LA INTERFAZ GRÁFICA LOCAL

Teniendo en cuenta las características y limitaciones del sistema, se procede a comprobar su correcto funcionamiento.

4.2.1 PRUEBA DE PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO

Para realizar la prueba de puesta en marcha del equipo a través de la interfaz desarrollada en la pantalla táctil para el control local de la planta, se procede a encender el sistema y una vez visualizada la pantalla de inicio mostrada en la Figura 4.21, se pulsa “siguiente” para avanzar de pantalla, esta nueva pantalla de puesta en marcha de equipo mostrada en la Figura 4.22 permite al usuario encender y apagar el termostato, la bomba y el ventilador, para indicar visualmente que el equipo correspondiente se encuentra encendido el botón pulsado cambia a color rojo como se aprecia claramente en la imagen.

Asimismo se comprueba el estado del equipo de manera experimental debido a que al encender el termostato el agua del depósito debe comenzar a subir su temperatura lo cual es comprobable por simple tacto, de igual manera al encender la bomba y el ventilador se presenta el ruido propio de trabajo del equipo, además se puede apreciar visualmente el flujo de agua y aire a través de la torre.

Una vez encendido todo el equipo se pulsa “siguiente” y se avanza a la pantalla de adquisición de datos de la Figura 4.23, en esta pantalla se visualizan los datos adquiridos por los distintos sensores permitiéndonos comprobar la correcta comunicación con los mismos.

También se visualizan los botones que permiten:

- Ir a la pantalla respectiva para establecer un nuevo set point.

- Ir a la pantalla que permite escoger el tipo de gráfico que se desea visualizar.
- Grabar una nueva línea de operación de la torre con los datos adquiridos en el instante en que el botón es presionado.

Figura 4.21. Pantalla de inicio

Figura 4.22. Pantalla de puesta en marcha de equipo

Figura 4.23. Pantalla de adquisición de datos

Una vez realizada esta prueba queda demostrado el correcto funcionamiento de la puesta en marcha del sistema a través de la interfaz gráfica local implementada.

Los pasos indicados son indispensables para que la torre entre en funcionamiento, la falla o falta de cualquiera de ellos ocasionaría que la planta no pueda operar, debido a que traería como consecuencias: falta de flujo de agua o aire, falta de calentamiento del agua en el depósito que suministra el agua caliente a la torre e incluso la falta de comunicación entre la interfaz y el sistema.

4.2.2 PRUEBA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE LÍNEAS DE OPERACIÓN DE LA TORRE

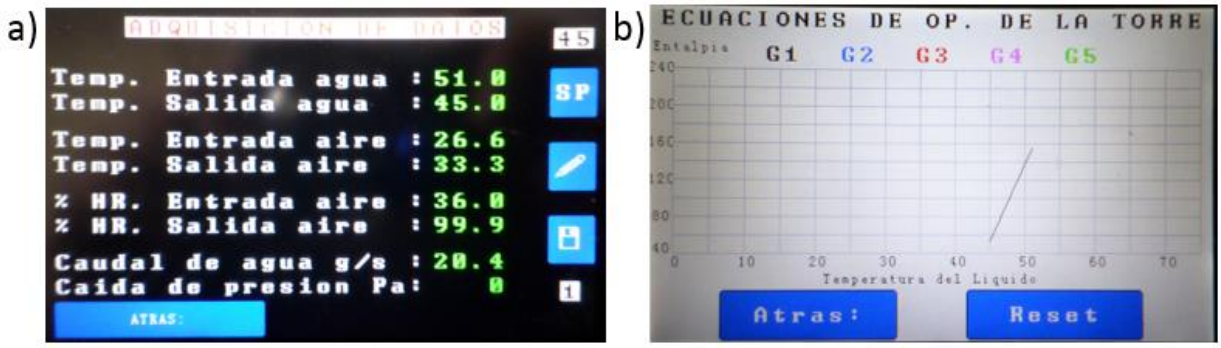
Para esta prueba se procede a setear cinco valores distintos de temperatura del agua a la salida (set point) similares a los de la prueba de adquisición de datos de la interfaz en modo remoto, y se deja estabilizar el sistema para cada uno permitiendo de esta manera probar el adecuado funcionamiento del controlador.

Conjuntamente se obtiene la línea de operación de la torre correspondiente para cada valor de temperatura seteado a través de la pantalla.

A través de este procedimiento se prueba el funcionamiento de:

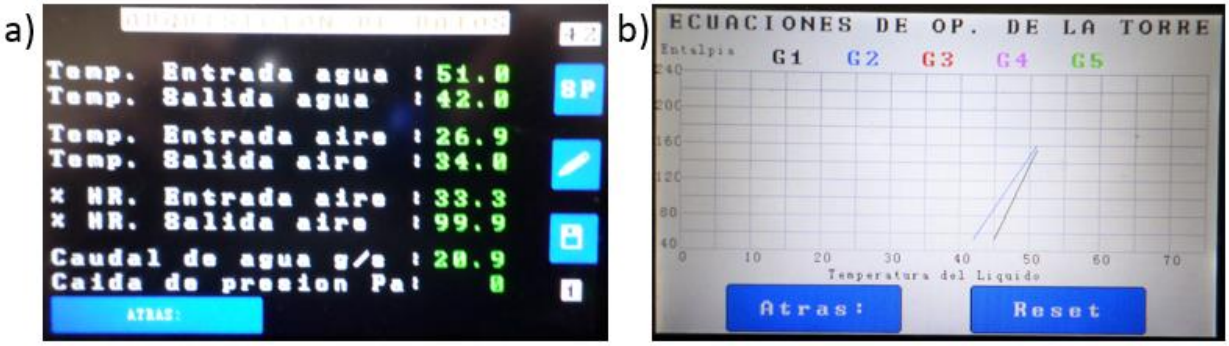
- El avance y retroceso de una pantalla a otra.
- Establecimiento del valor de set point deseado a través de la interfaz.
- Visualización de los datos adquiridos por los sensores.
- Generación de las líneas de operación de la torre. Teniendo como datos los valores que en el instante de presionar el botón se visualizan.

A continuación se muestran las pantallas respectivas con los datos adquiridos y las líneas de operación de la torre correspondientes para las temperaturas de salida del agua establecidas de: 45, 42, 38, 34 y 30 [^{o}C].



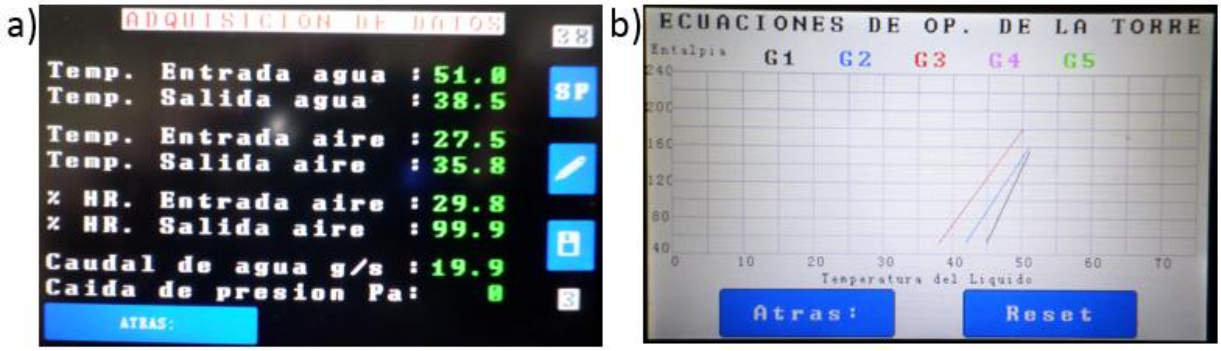
a) Adquisición de datos b) Línea de operación de la torre

Figura 4.24. Datos obtenidos para el set point establecido de 45 [^{0}C]



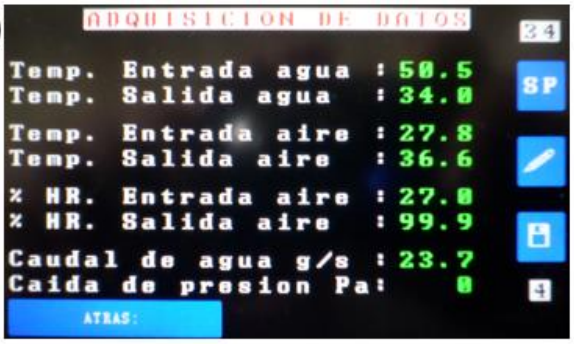
a) Adquisición de datos b) Línea de operación de la torre

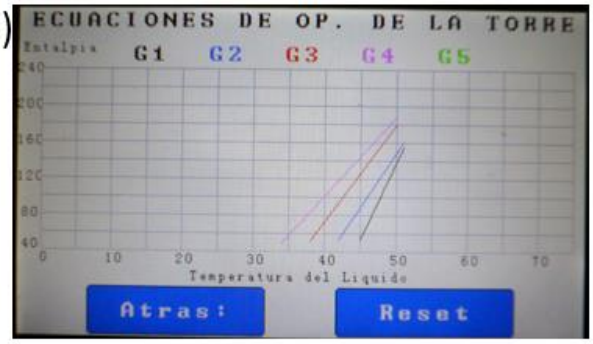
Figura 4.25. Datos obtenidos para el set point establecido de 42 [^{0}C]



a) Adquisición de datos b) Línea de operación de la torre

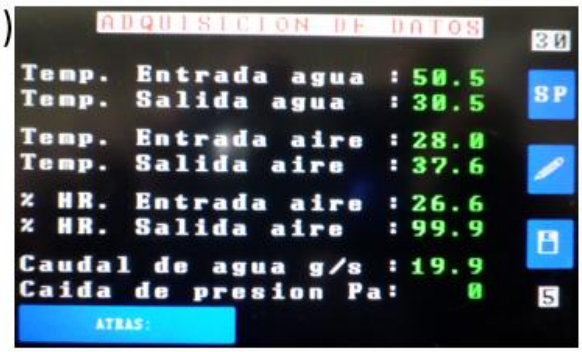
Figura 4.26. Datos obtenidos para el set point establecido de 38 [^{0}C]

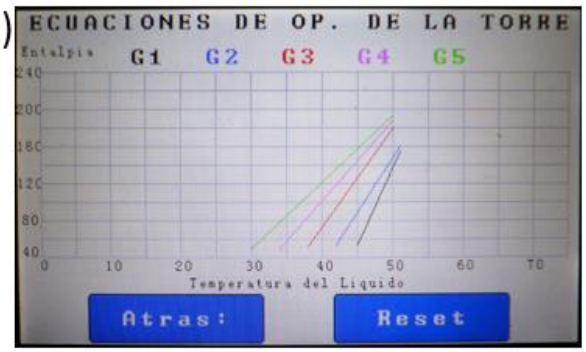
a) 

b) 

a) Adquisición de datos b) Línea de operación de la torre

Figura 4.27. Datos obtenidos para el set point establecido de 34 [^{0}C]

a) 

b) 

a) Adquisición de datos b) Línea de operación de la torre

Figura 4.28. Datos obtenidos para el set point establecido de 30 [^{0}C]

Tabla 4.2. Valores máximos y mínimos de temperatura para cada set point

Set Point [^{o}C]	Valor Máximo [^{o}C]	Valor Mínimo [^{o}C]	Error Máximo [^{o}C]	Error Mínimo [^{o}C]
45	45.5	42.5	0.5	2.5
42	43.0	40.0	1.0	2.0
38	39.5	36.5	1.5	1.5
34	35.5	33.5	1.5	1.0
30	31.5	29.0	1.5	0.5

Después de realizar la respectiva prueba con los valores establecidos para el set point (45, 42, 38, 34 y 30 [^{o}C]) los cuales se encuentran dentro del rango de valores de límites recomendados, se ha comprobado la correcta visualización de los datos adquiridos por los sensores.

Asimismo se establece un promedio de error de +1.2 [ºC] y -1.5 [ºC] con respecto al valor seteado, lo cual es un error aceptable para el sistema. La prueba se la realizó a una temperatura ambiente de 25 [ºC].

4.2.3 PRUEBA DE REGISTRO GRÁFICO

Para realizar la prueba de registro gráfico de las distintas variables adquiridas en función del tiempo se procede a establecer una variación del set point entre los límites máximo (45) y mínimo (30) [ºC] recomendados.

A través de este procedimiento se prueba el funcionamiento de:

- Visualización gráfica de los datos adquiridos por los sensores en función del tiempo.
- Reset de gráficos el cual permite borrarlos.

A continuación se muestran las pantallas con los gráficos obtenidos correspondientes a la temperatura del agua, la temperatura del aire y la humedad relativa.

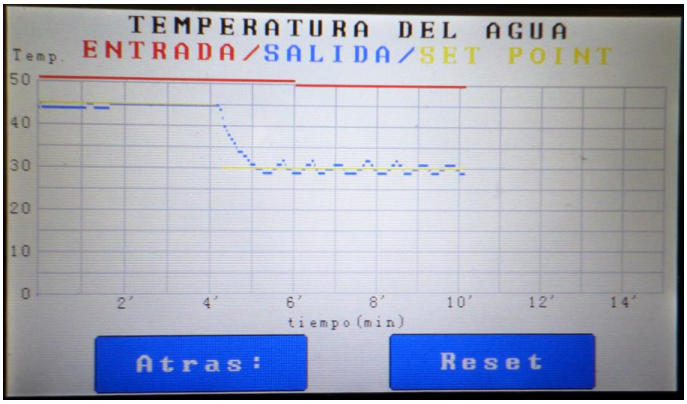


Figura 4.29. Registro de la variación de la temperatura del agua en función del tiempo

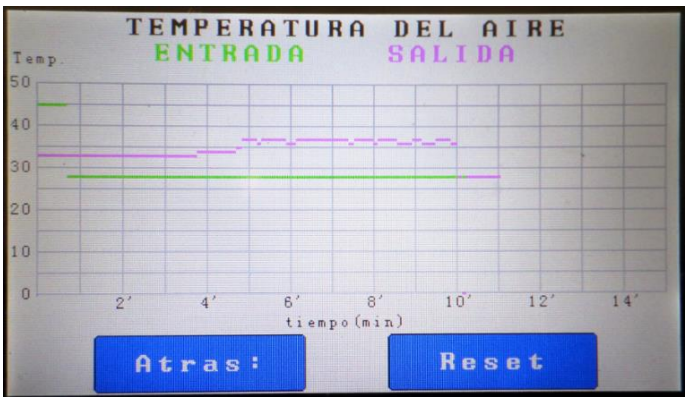


Figura 4.30. Registro de la variación de la temperatura del aire en función del tiempo

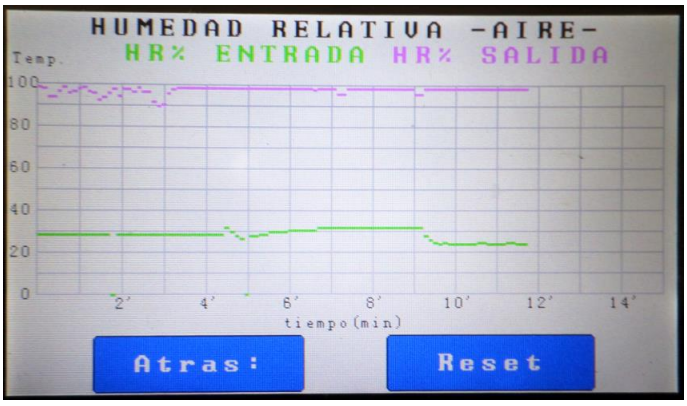


Figura 4.31. Registro de la variación de la humedad relativa del aire en función del tiempo

De esta manera se establece que los datos obtenidos y visualizados a través del registro gráfico en función del tiempo son válidos, debido a que conforme el tiempo transcurre el sistema tiene que enfriar en mayor cantidad la temperatura del agua a la salida hasta alcanzar el set point establecido, lo cual provoca que el aire a la salida muestre un aumento de temperatura y de humedad relativa. Esto se comprueba claramente a través de las gráficas obtenidas en las Figuras (4.29), (4.30) y (4.31).

Además se puede apreciar en la Figura (4.29) que el tiempo necesario para que el sistema alcance el set point establecido con un rango de variación de 15 [^{o}C] es de aproximadamente 3 minutos.

4.3 CÁLCULOS REQUERIDOS EN LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Para realizar los respectivos cálculos se toma en cuenta los datos obtenidos en la prueba de la interfaz en modo remoto, debido principalmente a que las gráficas son más claras que las obtenidas con la pantalla de la interfaz en modo local. Estos datos se encuentran visualizados en la Tabla 4.3 para valores establecidos con set point de 45, 42, 38, 34 y 30 [ºC], respectivamente.

Tabla 4.3. Tabulación de datos obtenidos por los sensores

	SET POINT:				
VARIABLE:	**45 [ºC]**	**42 [ºC]**	**38 [ºC]**	**34 [ºC]**	**30 [ºC]**
Temperatura del agua a la entrada [ºC]	50.5	50.0	50.0	49.5	48.5
Temperatura del agua a la salida [ºC]	45.0	42.0	38.0	34.5	30.5
Temperatura del aire a la entrada [ºC]	32.8	33	33.7	33.6	33.4
Temperatura del aire a la salida [ºC]	38.5	39.8	40.8	40.8	39.8
Humedad relativa a la entrada [%]	22.7	21.3	19.2	19.5	19.8
Humedad relativa a la salida [%]	76.6	74.3	98.6	95.4	97.5
Flujo másico de agua [g/s]	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4
Caída de presión [Pa]	22.3	22.2	23.0	21.1	22.2

4.3.1 CÁLCULO DEL FLUJO DE AIRE PARA CADA LÍNEA DE OPERACIÓN DE LA TORRE OBTENIDA.

Para la obtención del flujo de aire “G” a partir de la ecuación (1.19), se requiere el cálculo previo correspondiente a las entalpías del aire a la entrada H_1 y a la salida H_2 de la torre, los cuales se obtienen aplicando la ecuación (1.16) o con la ayuda de una carta psicométrica. Para la obtención de las entalpías por cálculo matemático también se requiere hacer uso de las ecuaciones (4.1) y (4.2) de [22] para determinar la presión de vapor, P_v, y la presión de saturación, P_{sat} , respectivamente.

$$P_v = HR * P_{sat} \tag{4.1}$$

$$P_{sat} = 10^{(5.11564 - \frac{1687.537}{T+230.17})} \tag{4.2}$$

En la ecuación (4.2) la presión de saturación, P_{sat}, se encuentra dada en bares y la temperatura, T, en grados Celsius [ºC] y es conocida como ecuación de Antoine.

A continuación se realizan los respectivos cálculos matemáticos utilizando los datos obtenidos para el set point de 45 [ºC] mostrados en la Tabla 4.3 y las ecuaciones (4.1), (4.2), (1.12) y (1.16):

H_1:

$$P_{sat1} = 10^{\left(5.11564 - \frac{1687.537}{32.8+230.17}\right)} = 0.04993 \quad \text{[bar]}$$

$$P_{sat1} = 0.04993 * 100 = 4.993 \quad \text{[kPa]}$$

$$P_{v1} = 0.227 * 4.993 = 1.133 \quad \text{[kPa]}$$

$$w_1 = 0.622 \frac{1.133}{(73 - 1.133)} = 0.01$$

$$H_1 = (1 + 1.82 * 0.01)(32.8) + (2501 * 0.01) = 58.41 \ \text{[kJ/kg]}$$

H_2:

$$P_{sat2} = 10^{\left(5.11564 - \frac{1687.537}{38.5+230.17}\right)} = 0.06832 \quad \text{[bar]}$$

$$P_{sat2} = 0.06832 * 100 = 6.832 \quad \text{[kPa]}$$

$$P_{v2} = 0.766 * 6.832 = 5.23 \quad \text{[kPa]}$$

$$w_2 = 0.622 \frac{5.23}{(73 - 5.23)} = 0.048$$

$$H_2 = (1 + 1.82 * 0.048)(38.5) + (2501 * 0.048) = 161.91 \ \text{[kJ/kg]}$$

Donde:
De acuerdo a la altura de Quito $P_t = 73[kPa]$.

Se realiza el cálculo del flujo de aire “G” a partir de la ecuación (1.19):

$$G = \frac{L * C_{PL}(T_{L2} - T_{L1})}{H_2 - H_1} \quad \text{[g/s]} \qquad (4.3)$$

$$G = \frac{20.4 * 4.1868(50.5 - 45)}{161.91 - 58.41} = 4.54\ [g/s]$$

Entonces el flujo de aire “G” es igual a 4.54 [g/s], para el set point establecido de 45 [ºC].

Aplicando el procedimiento anterior para todos los valores de set point establecidos se obtiene el siguiente cuadro con todos los valores correspondientes:

Tabla 4.4. Tabulación de datos calculados matemáticamente

SET POINT [ºC]	P_{sat1} [kPa]	P_{V1} [kPa]	W_1 [kg_{agua}/kg_{aire}]	H_1 [kJ/kg]	P_{sat2} [kPa]	P_{V2} [kPa]	W_2 [kg_{agua}/kg_{aire}]	H_2 [kJ/kg]	L [g/s]	G [g/s]
45	4.99	1.13	0.010	58.41	6.83	5.23	0.048	161.91	20.4	4.54
42	5.05	1.08	0.009	56.05	7.33	5.44	0.050	168.47	20.4	6.08
38	5.25	1.01	0.009	56.76	7.72	7.62	0.072	226.22	20.4	6.05
34	5.22	1.02	0.009	56.66	7.72	7.37	0.070	221.07	20.4	7.79
30	5.16	1.02	0.009	56.46	7.33	7.14	0.067	212.22	20.4	9.87

En base a los datos mostrados en la tabla anterior, a continuación se procede a graficar las líneas de operación de la torre halladas matemáticamente:

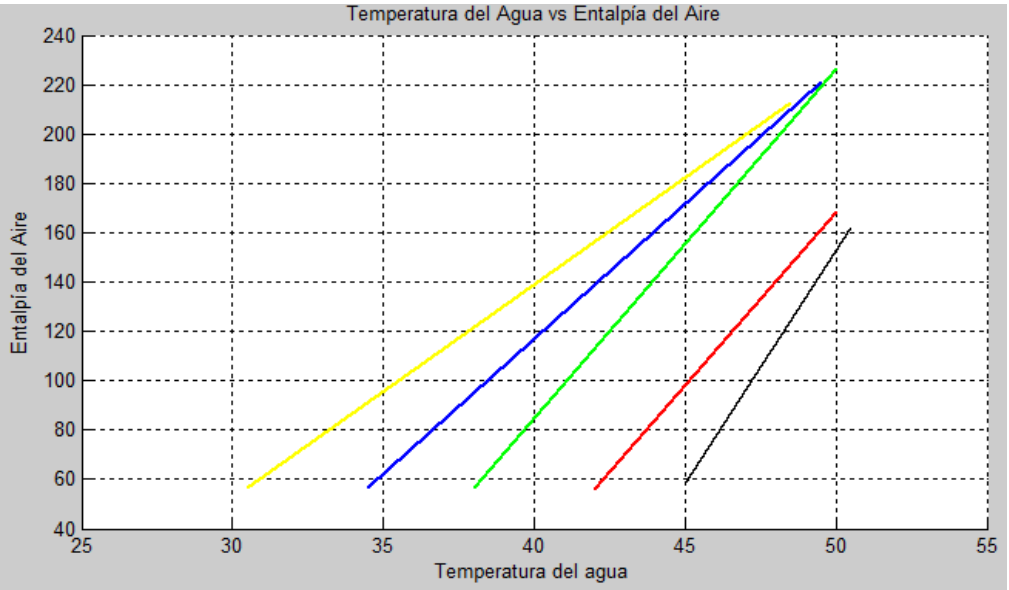


Figura 4.27. Líneas de operación de la torre calculadas matemáticamente

Al comparar la Figura 4.32 con la Figura 4.17 se aprecia claramente la similitud de las líneas de operación de la torre obtenidas matemáticamente con respecto a las obtenidas a través de la interfaz gráfica en modo remoto, lo cual permite validar los datos adquiridos así como el proceso matemático para llegar a la obtención de las mismas.

4.3.2 CÁLCULO DEL NÚMERO DE UNIDADES DE DIFUSIÓN, HDU Y EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA.

El número de unidades de difusión se puede calcular con la ayuda de la ecuación (1.21) y el Anexo C, siguiendo el procedimiento establecido en el subcapítulo 1.5.2. Asimismo para el cálculo de una HDU y del coeficiente global de transferencia de masa se utiliza las ecuaciones (1.24) y (1.25) respectivamente.

A continuación se realizan los cálculos respectivos utilizando los datos obtenidos para el set point de “45 [ºC]”.

Tabla 4.5. Datos para el cálculo del número de unidades de difusión

t_L [ºC]	H’ [KJ/Kg]	H [KJ/Kg]	H’-H [KJ/Kg]	$(H'-H)_{med}$ [KJ/Kg]	$\frac{\Delta t_L}{(H'-H)_{med}}$
45.0	288.22	58.41	229.81		
45.5	296.12	67.82	228.30	229.06	0.00218
46.0	304.24	77.22	227.02	227.66	0.00220
46.5	312.61	86.63	225.98	226.50	0.00221
47.0	321.21	96.04	225.17	225.58	0.00222
47.5	330.07	105.44	224.63	224.90	0.00222
48.0	339.19	114.85	224.34	224.48	0.00223
48.5	348.59	124.26	224.33	224.34	0.00223
49.0	358.26	133.66	224.60	224.47	0.00223
49.5	368.23	143.07	225.16	224.88	0.00222
50.0	378.50	152.47	226.03	225.59	0.00222
50.5	389.09	161.88	227.21	226.62	0.00221
					Σ = 0.02436

Por lo tanto el número de unidades de difusión es:

$$n_d = 4.1868(0.02436) = 0.1020$$

Y la altura de una unidad de difusión:

$$HDU = \frac{z}{n_d} = \frac{0.50}{0.1020} = 4.90[m]$$

El valor de z (altura del relleno) y de A (área transversal de la torre) se obtiene experimentalmente realizando las medidas correspondientes, obteniendo los valores de 0.5 [m] y 0.021 [m^2] respectivamente.

Cálculo del coeficiente global de transferencia de masa:

$$Kx * a = \frac{L}{HDU * A}$$

Donde: L = 20.4 [g/s] equivale a 73.44 [kg/h].

$$Kx * a = \frac{73.44}{4.90 * 0.021} = 713.7\ [\frac{Kg}{h.m^3}]$$

Aplicando el procedimiento anterior para todos los valores de set point establecidos se obtiene el siguiente cuadro:

Tabla 4.6. Tabulación de datos correspondientes a $n_d, HDU\ y\ Kx * a$

Set Point	L [kg/h]	G [kg/h]	Σ	n_d	HDU [m]	$K_X.a$ [kg/h.m^3]	G/L
45 [ºC]	73.44	16.34	0.02436	0.1020	4.90	713.7	0.2225
42 [ºC]	73.44	21.88	0.04116	0.1723	2.90	1205.91	0.2979
38 [ºC]	73.44	21.78	0.08796	0.3683	1.36	2571.43	0.2966
34 [ºC]	73.44	28.04	0.13393	0.5607	0.89	3929.37	0.3818
30 [ºC]	73.44	35.53	0.21072	0.8822	0.57	6135.34	0.4838

En base a los datos obtenidos se procede a graficar la curva G/L vs Kx.a, característica del relleno utilizado en la torre.

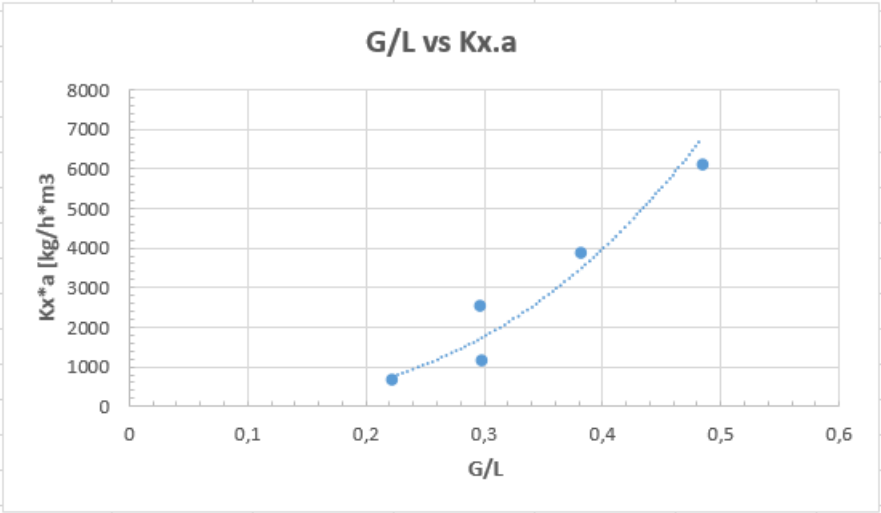


Figura 4.28. Grafica para el relleno de la torre con L = 20.4 [g/s]

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las torres de enfriamiento son muy utilizadas a nivel industrial puesto que sirven para enfriar el agua proveniente de los procesos, consecuentemente al realizar la automatización y repotenciación del módulo didáctico existente en el laboratorio de transferencia de calor se dota al estudiante de un sistema con un funcionamiento más confiable.
- Generalmente en las torres que utilizan ventiladores para suministrar el flujo de aire no se realiza un control del mismo, lo cual puede repercutir en un gasto innecesario económico y energético. Esto se puede evitar implementando un control de flujo de aire suministrado como se lo realiza en el presente proyecto.
- El control del flujo de aire permite aumentar significativamente el rango de la temperatura del agua a la salida de la torre, debido a que el ventilador no trabajará a velocidad constante como en el pasado, sino más bien su velocidad podrá variar desde el reposo hasta la máxima posible según el flujo de aire que requiera el sistema.
- La implementación del algoritmo digital de control PI desarrollado permite la regulación automática del flujo de aire suministrado a la torre a través del ventilador permitiendo mantener la temperatura del agua a la salida de la torre en un valor admisible con respecto al set point establecido.
- Para sintonizar el controlador se utiliza el método de curva de reacción en lazo abierto establecido por Ziegler – Nichols, debido a que cumple las condiciones requeridas por el método y además es un método recomendado para sistemas donde se desconoce el modelo de la planta.

- Para escoger los sensores y la pantalla para la interfaz de control local que se implementan en el sistema se toma en cuenta su compatibilidad con arduino. En este punto las librerías existentes son de gran utilidad en la respectiva programación.
- Los sensores digitales implementados vienen calibrados de fábrica en sus respectivos laboratorios razón por la cual mejoran la confiabilidad en la lectura y adquisición de datos, además disminuye el tiempo empleado para éste propósito.
- Las características de construcción propias de la torre de enfriamiento no permiten enfriar el agua a la salida más allá de la temperatura ambiente a la cual se encuentra operando.
- La interfaz de control remoto desarrollada permite al usuario controlar el sistema a través de un computador así como visualizar los gráficos y datos adquiridos por los sensores en el monitor correspondiente.
- La interfaz de control local desarrollada e implementada con la ayuda de una pantalla táctil permite al usuario controlar el sistema sin la necesidad de disponer de un computador así como visualizar los gráficos y datos adquiridos por los sensores en la misma pantalla.
- A través de las pruebas realizadas se concluye que el módulo es capaz de disminuir la temperatura del agua un rango de 15 [^{o}C] en un tiempo de aproximadamente 3 minutos, lo cual representa que para cada grado centígrado se necesita alrededor de 12 segundos, convirtiéndolo en un sistema relativamente rápido.

5.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar agua destilada para alargar la vida útil del equipo especialmente del rotámetro instalado, y manejar con precaución el equipo teniendo cuidado de la circuitería implementada a lo largo del módulo.
- Se recomienda no sobrepasar el rango de flujo de agua establecido de 15 a 25 [g/s] debido a que las características físicas del sistema no lo permiten.
- Si se desea ampliar el rango de flujo de agua se recomienda cambiar la ubicación del depósito de agua para así aumentar la distancia vertical existente entre éste y la bandeja receptora de agua a la salida de la torre.
- Debido a que la temperatura ambiente del laboratorio oscila entre 25 a 32 [^{o}C] se recomienda el rango establecido para el set point de 30 a 45 [^{o}C].
- Se recomienda establecer los diferentes valores para el set point en rangos con mínimo 2 grados centígrados de diferencia, puesto que el sistema presenta un error promedio de +1.5 y -1.5 [^{o}C] con respecto al set point establecido.
- Se recomienda la incorporación de un relleno fabricado con otro tipo de material, pues esto permitirá al estudiante comparar, analizar y concluir las diferencias entre distintos tipos de relleno.
- Se recomienda no elevar el set point establecido de 50 [^{o}C] en el MT-512Ri LOG para el control de la temperatura del agua en el tanque de calentamiento, puesto que el acrílico del cual se encuentra fabricado el depósito puede llegar a deformarse con temperaturas superiores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ELECTRO INDUSTRIA. (2010, Dic.). Plataformas de Desarrollo basadas en Microcontroladores. [Online]. Available: http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1539&edi=80

[2] Arduino. (2010, Sep.). [Online]. Available: http://www.arduino.cc

[3] S. Reig, “Plataforma de experimentación para prototipado de diseños mediante arduino”, Trabajo Fin de Estudios, Universidad de la Rioja, España, Logroño, Junio, 2012.

[4] HACEDORES MAKER COMMUNITY. (2014, May.). Arduino vs Raspberry Pi. [Online]. Available: http://hacedores.com/arduino-vs-raspberry-pi-cual-es-la-mejor-herramienta-para-ti/

[5] C. Montoya. Torres de Enfriamiento. e-URE. [Online]. Available: http://www.si3ea.gov.co/eure/11/inicio.html

[6] J. Jácome, M. Vásquez, “Diseño y Construcción de una Torre de Enfriamiento para el laboratorio de la EPN”, Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Abril, 1994.

[7] V. Adum, “Torres de Enfriamiento y Sistemas de Enfriamiento”, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

[8] A. Valencia, “Diseño de una torre de enfriamiento de agua para uso industrial”, Proyecto de Titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 1974.

[9] A. V. Díaz, Psicometría. [Online]. Available: https://avdiaz.files.wordpress.com/2009/01/i-unidad3.pdf

[10] N. Morales, A. Sanchez, “Comisionamiento y Automatización de la Torre de Enfriamiento didáctica, ubicada en el laboratorio de Transferencia de Calor”, Proyecto de Titulación, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, Enero, 2011.

[11] R. Grandes, G. Torres, “Simulación del proceso exergético y automatización del sistema de adquisición de datos de la torre de enfriamiento del laboratorio de termodinámica del DECEM”, Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador. 2009.

[12] Maxim Integrated, “DS18B20 1-Wire Digital Thermometer”, 2008. [Online]. Available: http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf

[13] Anónimo, “Sensor medidor de flujo YF-S201”. [Online]. Available: https://www.vistronica.com/sensor-medidor-de-flujo-yf-s201 detail.pdf?tmpl=component

[14] Motorola, “Uncompensated Silicon Pressure Sensors”, 2000. [Online]. Available: http://datasheet.octopart.com/MPX10DP-Freescale-Semiconductor-datasheet-15024.pdf

[15] Analog Devices, “Low power instrumentation amplifier AD620”, 1999. [Online]. Available: http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/AD620.pdf

[16] S. Williams, “¿Qué es una pantalla táctil TFT?”, EHOW. [Online]. Available: http://www.ehowenespanol.com/pantalla-tactil-tft-hechos_98790/

[17] G. Benavidez, “Control de estabilidad de temperatura mediante un ventilador”, Paper, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. [Online]. Available: https://www.academia.edu/11049643/CONTROL_DE_ESTABILIDAD_DE_TEMPERATURA_MEDIANTE_UN_VENTILADOR_teoria_de_contro_PID_

[18] I. A. Ruge. “Método básico para implementar un controlador digital PID en un microcontrolador PIC para desarrollo de aplicaciones a bajo costo”, Universidad de Cundinamarca, Fusagasuga, Colombia. [Online]. Available: http://www.edutecne.utn.edu.ar/microcontrol_congr/industria/mtodob~1.pdf

[19] K. Ogata, “Sistemas de control en tiempo discreto”, Segunda edición, Ed. Prentice Hall, 1996, pp. 116-118.

[20] Mundo Robótica. (2013). Definiendo el sitio de trabajo IDE de Arduino. [Online]. Available: http://mundoroboticaonline.blogspot.com/

[21] NXP Semiconductors, “BT136-600E”, 2013. [Online]. Available: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT136-600E.pdf

[22] B. Poling, J. Prausnitz and J. O'Connell, "The Properties of Gases and Liquids", Quinta edición, Ed. McGraw Hill, New York, 2001.

[23] Y. Cengel and M. Boles, "Termodinámica", Séptima Edición, Ed. Mc Graw Hill, México, 2011.

ANEXO A

GUÍA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

TEMA: Torre de Enfriamiento.

OBJETIVO: Determinar los coeficientes globales de transferencia de masa para el tipo de relleno utilizado en la torre de enfriamiento, manteniendo el caudal de agua y controlando el flujo de aire.

TEORÍA.- Desarrollar el siguiente cuestionario:

1. Defina una torre de enfriamiento.
2. Cómo se clasifican las torres de enfriamiento.
3. Describa su funcionamiento.
4. ¿Puede enfriarse el agua por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire?, y ¿por debajo de su temperatura de bulbo húmedo?, ¿Por qué?.
5. Defina los siguientes términos:
   - **a)** Escala y aproximación de temperatura.
   - **b)** Calor latente de vaporización.
   - **c)** Pérdida por evaporación y arrastre.
   - **d)** Aire saturado.
   - **e)** Entalpía.
6. Qué tipos de relleno se utilizan en las torres de enfriamiento, y qué requisitos debe cumplir un relleno para ser efectivo?
7. Indique las ecuaciones que determinan:
   - La línea de operación de la torre.
   - El número de unidades de difusión y la altura de una unidad.
8. Aplicaciones de las torres de enfriamiento.

COMPONENTES DEL EQUIPO:

- Tanque de calentamiento.
- Cámara de aire.
- Columna de empaquetamiento

- Recolector de agua fría.
- Resistencia eléctrica – niquelina.
- Bomba.
- Ventilador.
- Sensores:
  Temperatura, Humedad Relativa, Caudal, Presión.
- Sistema de distribución de agua.
- By-pass
- Interfaz de Control y Monitoreo en modo local y remoto.

PROCEDIMIENTO.-

CONTROL REMOTO:

1. Observar que las válvulas de bypass y desagüe estén cerradas, y proceder a llenar el depósito con agua destilada.
2. Encender el sistema.
3. Inicializar el software de control correspondiente en una PC.
4. Iniciar la transmisión de datos.
5. Encender el termostato y dejar calentar el agua por 10 minutos, luego encender la bomba y el ventilador regulando el flujo de agua a 20 [g/s]. Dejar estabilizar el sistema aproximadamente 15 minutos hasta obtener una temperatura de agua a la entrada de 50 [ºC].
6. Setear la temperatura que se desea para el agua a la salida de la torre.
7. Esperar a que el sistema alcance el estado estable, y proceder a tomar datos:
   - L: Flujo de agua [g/s]
   - t_{L2}: Temperatura de agua a la entrada [ºC]
   - t_{L1}: Temperatura de agua a la salida [ºC]
   - t_{s1}: Temperatura de bulbo seco de aire a la entrada [ºC]
   - t_{s2}: Temperatura de bulbo seco de aire a la salida [ºC]
   - hr_1: Humedad Relativa de aire a la entrada [%]
   - hr_2: Humedad Relativa de aire a la salida [°C]
   - ΔP: Caída de presión en la columna de empaquetamiento [Pa]

8. Pulsar el botón “Grabar” para generar automáticamente una línea de operación de la torre en base a los datos que se tienen ese instante.

9. Repetir los pasos 6, 7 y 8 hasta completar un máximo de 5 mediciones, manteniendo constante el flujo de agua.

10. Apagar el equipo: termostato, bomba, ventilador y sistema.

11. Vaciar el agua del depósito y desconectar el sistema.

CONTROL LOCAL:

1. Observar que las válvulas de bypass y desagüe estén cerradas, y proceder a llenar el depósito con agua destilada.

2. Encender el sistema.

3. Avanzar a la pantalla de puesta en marcha de equipo y: encender el termostato y dejar calentar el agua por 10 minutos, luego encender la bomba y el ventilador regulando el flujo de agua a 20 [g/s]. Dejar estabilizar el sistema aproximadamente 15 minutos hasta obtener una temperatura de agua a la entrada de 50 [ºC].

4. Avanzar a la pantalla de adquisición de datos.

5. Setear la temperatura que se desea.

6. Esperar a que el sistema alcance el estado estable, y proceder a tomar datos:

1. L: Flujo de agua [g/s]
2. t_{L2}: Temperatura de agua a la entrada [ºC]
3. t_{L1}: Temperatura de agua a la salida [ºC]
4. t_{s1}: Temperatura de bulbo seco de aire a la entrada [ºC]
5. t_{s2}: Temperatura de bulbo seco de aire a la salida [ºC]
6. hr_1: Humedad Relativa de aire a la entrada [%]
7. hr_2: Humedad Relativa de aire a la salida [°C]
8. ΔP: Caída de presión en la columna de empaquetamiento [Pa]

7. Pulsar el botón respectivo que permite grabar para generar automáticamente una línea de operación de la torre en base a los datos que se tienen ese instante.

8. Repetir los pasos 5, 6 y 7 hasta completar un máximo de 5 mediciones, manteniendo constante el flujo de agua.

9. Apagar el equipo: termostato, bomba, ventilador y sistema.

10. Vaciar el agua del depósito y desconectar el sistema.

INFORME:

1. Resumen de teoría, (máximo 3 hojas)
2. Contestar el cuestionario planteado en la parte teórica.
3. Elaborar un cuadro de datos con los valores obtenidos.
4. Calcular el flujo de aire G para cada línea de operación de la torre obtenida, graficar y comparar con las gráficas obtenidas en la práctica.
5. Calcular el número de unidades de difusión y su altura HDU.
6. Calcular el coeficiente global de transferencia de masa.
7. Graficar la curva $K_X a$ vs G/L para el empaque.
8. Conclusiones y recomendaciones. (Personales)
9. Bibliografía

NOTA: Realizar el reconocimiento previo del equipo.

ANEXO B

MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO

El siguiente manual tiene como finalidad guiar al usuario en el manejo y operación del sistema. A continuación se explica el funcionamiento y los requerimientos para un correcto desempeño del sistema.

PROCEDIMIENTO

1. Fijarse que las válvulas de bypass se encuentren cerradas.
2. Llenar el depósito de agua hasta la marca indicada y cebar la bomba.
3. Conectar el módulo a través del enchufe disponible a la red eléctrica de 110V.

Nota: El sistema se puede controlar en dos modos distintos: control remoto (a través de un computador) y control local (a través de la pantalla táctil ubicada en la caja de control).

CONTROL EN MODO REMOTO

REQUERIMIENTO DEL SOFTWARE:

- Instalar LabView 2012(32bits) o superior, con todos sus paquetes y licencias.
- También se puede optar por instalar LabView Run Time Engine 2012 (32 bits) el cual es un ejecutable capaz de llamar y correr cualquier VI sin la necesidad de tener instalado LabView, este ejecutable requiere también la instalación del paquete NI-VISA 14.0 la cual es una librería que permite la comunicación serial entre labview y el controlador arduino.

Nota: Cualquiera de las opciones mencionadas deben ser instaladas en un computador de 32 bits, debido a que la interfaz gráfica para el control en modo remoto se desarrolló en la misma, y presenta problemas al ser operada en 64 bits.

PROCEDIMIENTO:

1. Conectar la caja de control a un puerto USB del computador mediante el cable suministrado.
2. Colocar en “ON” el interruptor correspondiente de la caja de control ubicado al extremo izquierdo. Esto permite energizar todos los sensores.

3. Abrir el archivo “Torre de enfriamiento.exe” de la carpeta “Torre de enfriamiento” suministrada.
4. Establecer el puerto de comunicación “COM” (Figura B.1 literal “A”) indispensable para la comunicación entre la interfaz y el controlador.
5. Correr el programa presionando el botón “RUN” de la interfaz (Figura B.1 literal “B”).

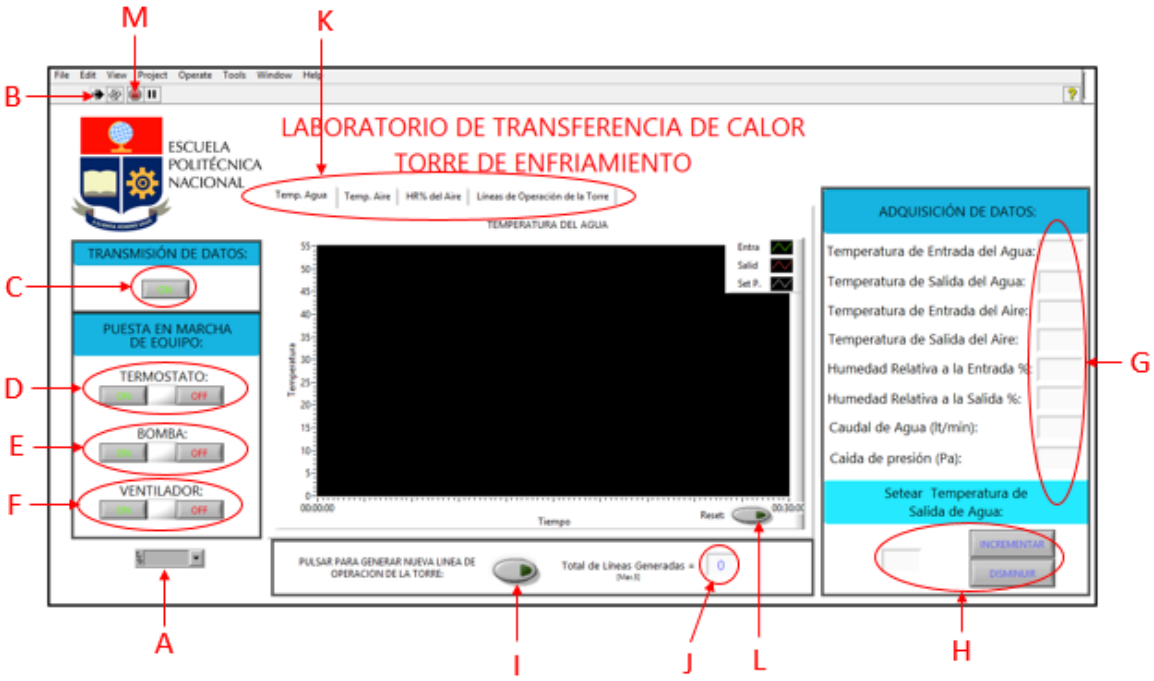


Figura B.1. Interfaz para Control Remoto.

6. Iniciar la transmisión de datos (Figura B.1 literal “C”).
7. Encender el termostato (Figura B.1 literal “D”) y dejar calentar el agua por 10 minutos, posteriormente encender la bomba y el ventilador (Figura B.1 literales “E y F”) regulando el flujo de agua a 20 [g/s]. Dejar estabilizar el sistema aproximadamente 15 minutos hasta obtener una temperatura de agua a la entrada de 50 [ºC].
8. Setear la temperatura que se desea para el agua a la salida de la torre a través de los botones indicados en (Figura B.1 literal “H”).
9. Esperar a que el sistema alcance el estado estable, y proceder a tomar los datos necesarios.
10. Para generar una línea de operación de la torre en base a los datos que se tienen ese instante pulsar el botón “Grabar” (Figura B.1 literal “I”).

11. Repetir los pasos 8, 9 y 10 hasta completar un máximo de 5 mediciones posibles, manteniendo constante el flujo de agua.
12. Para observar las distintas gráficas de las variables en función del tiempo, así como las líneas de operación de la torre se escoge la pestaña deseada indicada en: (Figura B.1 literal “K”)
13. Apagar el equipo: termostato, bomba, ventilador y sistema, a través de los botones indicados en (Figura B.1 literales “D, E y F”), y terminar la transmisión de datos a través del botón indicado en (Figura B.1 literal “C”).
14. Detener y cerrar el programa (Figura B.1 literal “M”).
15. Vaciar el agua del depósito, colocar en “OFF” el interruptor de la caja de control y desconectar el sistema de la red eléctrica.

CONTROL EN MODO LOCAL

1. Encender el sistema colocando en “ON” el interruptor de la caja de control.
2. Avanzar a la pantalla de puesta en marcha de equipo pulsando “Siguiente” en la pantalla de la Figura B.2.

Figura B.2. Pantalla de Inicio.

3. Encender el termostato dejando calentar el agua por 10 minutos, luego encender la bomba y el ventilador (Figura B.3) regulando el flujo de agua a 20 [g/s]. Dejar estabilizar el sistema aproximadamente 15 minutos hasta obtener una temperatura de agua a la entrada de 50 [ºC].

Figura B.3. Pantalla de puesta en marcha de equipo.

4. Avanzar a la pantalla de adquisición de datos pulsando “Siguiente” en la pantalla de la Figura B.3.
5. Ir a la pantalla de “Introducción de Set Point” (Figura B.5) presionando el botón correspondiente indicado en la Figura B.4 y establecer la temperatura que se desea.

Figura B.4. Pantalla de Adquisición de Datos.

Figura B.5. Pantalla para establecer Set Point.

6. Presionar “Atrás” en la pantalla de la Figura B.5 para regresar a la pantalla de adquisición de datos.
7. Esperar a que el sistema alcance el estado estable, y proceder a tomar los datos necesarios.
8. Grabar una nueva línea de operación de la torre en base a los datos que se tienen ese instante pulsando el botón correspondiente indicado en la Figura B.4.
9. Repetir los pasos 5, 6 y 7 hasta completar un máximo de 5 mediciones, manteniendo constante el flujo de agua.

10. Para ir al menú que indica los posibles gráficos a visualizar de las variables en función del tiempo así como las líneas de operación de la torre obtenidas, se pulsa el botón correspondiente de la pantalla indicada en la Figura B.4. Consecuentemente se visualizará la pantalla indicada en la Figura B.6.

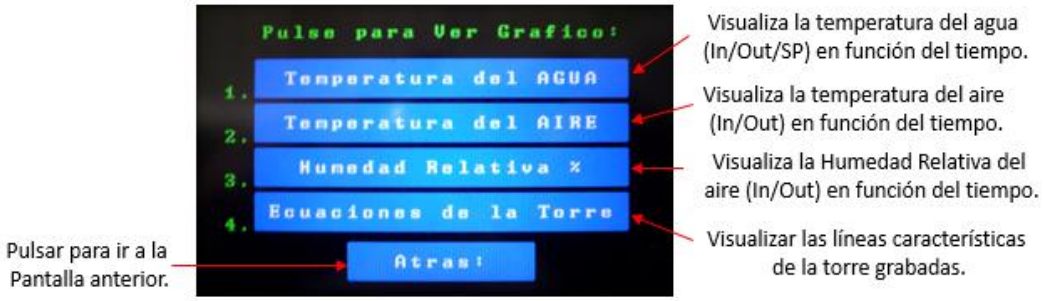


Figura B.6. Menú de gráficos.

11. Apagar el equipo: termostato, bomba, ventilador y sistema con la ayuda de los botones indicados en la Figura B.3.
12. Vaciar el agua del depósito, colocar en “OFF” el interruptor de la caja de control y desconectar el sistema de la red eléctrica.

ANEXO C

TABLA PSICOMÉTRICA PARA CONDICIONES DE SATURACIÓN A LA PRESIÓN DE QUITO

TABLA PSICOMÉTRICA PARA CONDICIONES DE SATURACIÓN A LA PRESIÓN DE QUITO. [6]

T [ºC]	Ps [kPa]	ws [kgv/kga]	vs [m^3/kg]	H [kJ/kg]
10.0	1.227529	0.010638	1.131238	36.803772
10.5	1.269277	0.011006	1.133895	38.241730
11.0	1.312270	0.011386	1.136575	39.709190
11.5	1.356542	0.011777	1.139279	41.207039
12.0	1.402120	0.012181	1.142007	42.736038
12.5	1.449043	0.012597	1.144760	44.297188
13.0	1.497344	0.013025	1.147538	45.891380
13.5	1.547049	0.013467	1.150343	47.519402
14.0	1.598205	0.013922	1.153175	49.182438
14.5	1.650837	0.014391	1.156036	50.881248
15.0	1.704987	0.014875	1.158925	52.616982
15.5	1.760690	0.015373	1.161844	54.390625
16.0	1.817988	0.015886	1.164793	56.203331
16.5	1.876912	0.016414	1.167774	58.056046
17.0	1.937506	0.016959	1.170788	59.949978
17.5	1.999806	0.017519	1.173834	61.886219
18.0	2.063861	0.018097	1.176916	63.866131
18.5	2.129702	0.018692	1.180032	65.890701
19.0	2.197377	0.019304	1.183185	67.961327
19.5	2.266930	0.019935	1.186376	70.079292
20.0	2.338400	0.020584	1.189605	72.245819
20.5	2.411835	0.021252	1.192874	74.462372
21.0	2.487280	0.021941	1.196183	76.730316
21.5	2.564781	0.022649	1.199535	79.051125
22.0	2.644385	0.023378	1.202931	81.426224
22.5	2.726136	0.024129	1.206370	83.857109
23.0	2.810094	0.024902	1.209856	86.345551
23.5	2.896295	0.025698	1.213389	88.892883
24.0	2.984801	0.026516	1.216971	91.501030
24.5	3.075657	0.027359	1.220603	94.171562
25.0	3.168907	0.028226	1.224286	96.906006
25.5	3.264623	0.029119	1.228023	99.706673
26.0	3.362848	0.030037	1.231814	102.575134
26.5	3.463639	0.030982	1.235662	105.513359
27.0	3.567045	0.031955	1.239567	108.523216
27.5	3.673137	0.032955	1.243532	111.606995
28.0	3.781968	0.033985	1.247559	114.766777
28.5	3.893594	0.035045	1.251649	118.004601
29.0	4.008071	0.036135	1.255804	121.322639
29.5	4.125461	0.037257	1.260027	124.723228
30.0	4.245840	0.038411	1.264318	128.209106
30.5	4.369248	0.039598	1.268681	131.782166
31.0	4.495762	0.040820	1.273117	135.445297
31.5	4.625451	0.042078	1.277629	139.201157
32.0	4.758377	0.043371	1.282219	143.052414
32.5	4.894599	0.044702	1.286890	147.001678
33.0	5.034199	0.046071	1.291643	151.052139

T [ºC]	Ps [kPa]	ws [kgv/kga]	vs [m^3/kg]	H [kJ/kg]
33.5	5.177237	0.047480	1.296481	155.206573
34.0	5.323790	0.048930	1.301407	159.468292
34.5	5.473913	0.050422	1.306424	163.839996
35.0	5.627699	0.051957	1.311535	168.325577
35.5	5.785217	0.053536	1.316742	172.928299
36.0	5.946525	0.055161	1.322048	177.651291
36.5	6.111723	0.056833	1.327457	182.498901
37.0	6.280866	0.058554	1.332972	187.474243
37.5	6.454054	0.060326	1.338596	192.581955
38.0	6.631348	0.062148	1.344332	197.825516
38.5	6.812836	0.064024	1.350185	203.209457
39.0	6.998610	0.065955	1.356158	208.738388
39.5	7.188731	0.067943	1.362255	214.416275
40.0	7.383298	0.069988	1.368480	220.248260
40.5	7.582393	0.072094	1.374837	226.239182
41.0	7.786107	0.074263	1.381331	232.394226
41.5	7.994524	0.076495	1.387966	238.718658
42.0	8.207738	0.078794	1.394747	245.218048
42.5	8.425830	0.081160	1.401678	251.897919
43.0	8.648879	0.083598	1.408765	258.763855
43.5	8.877021	0.086108	1.416014	265.823334
44.0	9.110320	0.088694	1.423429	273.081940
44.5	9.348872	0.091357	1.431017	280.546387
45.0	9.592780	0.094101	1.438784	288.223938
45.5	9.842149	0.096929	1.446736	296.122070
46.0	10.097072	0.099842	1.454879	304.248322
46.5	10.357643	0.102845	1.463220	312.610443
47.0	10.623972	0.105940	1.471767	321.216949
47.5	10.896173	0.109130	1.480527	330.076965
48.0	11.174323	0.112420	1.489508	339.198700
48.5	11.458549	0.115812	1.498717	348.592316
49.0	11.748965	0.119310	1.508165	358.268036
49.5	12.045669	0.122918	1.517859	368.235901
50.0	12.348788	0.126641	1.527810	378.507477
50.5	12.658401	0.130483	1.538026	389.093048
51.0	12.974642	0.134447	1.548519	400.005493
51.5	13.297645	0.138540	1.559299	411.257996
52.0	13.627511	0.142765	1.570378	422.863434
52.5	13.964314	0.147128	1.581767	434.834229
53.0	14.308256	0.151635	1.593480	447.187866
53.5	14.659416	0.156292	1.605530	459.938477
54.0	15.017907	0.161104	1.617931	473.101990
54.5	15.383874	0.166078	1.630697	486.696320
55.0	15.757428	0.171221	1.643845	500.739166
55.5	16.138721	0.176540	1.657390	515.250549
56.0	16.527847	0.182042	1.671351	530.249329
56.5	16.924940	0.187736	1.685745	545.757141
57.0	17.330179	0.193630	1.700593	561.798401
57.5	17.743649	0.199734	1.715914	578.395203
58.0	18.165501	0.206055	1.731731	595.573669
58.5	18.595877	0.212606	1.748067	613.360901
59.0	19.034920	0.219396	1.764947	631.785767

ANEXO D

HOJAS DE DATOS

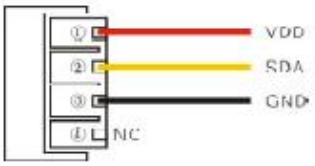
D1. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DHT21 (AM2301)

Temperature and humidity module

AM2301

AM2301 Pin assignments

Pin	Color	Name	Description
1	Red	VDD	Power (3.3V~5.2V)
2	Yellow	SDA	Serial data, Dual-port
3	Black	GND	Ground
4		NC	Empty



AM2301 DC Characteristics

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Voltage		3.3	5	5.2	V
Power consumption [4]	Dormancy	10	15		μA
	Measuring		500		μA
	Average		300		μA
Low level output voltage	I_{OL} [5]	0		300	mV
High output voltage	Rp<25 kΩ	90%		100%	VDD
Low input voltage	Decline	0		30%	VDD
Input High Voltage	Rise	70%		100%	VDD
Rpu [6]	VDD = 5V VIN = VSS	30	45	60	kΩ
Output current	turn on		8		mA
	turn off	10	20		μA
Sampling period		2			S

Sensor performance

Relative humidity

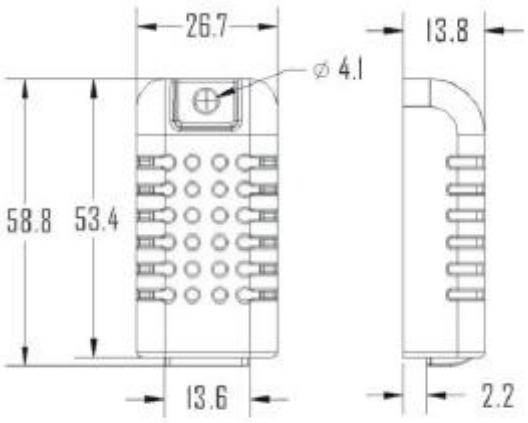
AM2301 Relative humidity performance table

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		%RH
Range		0		99.9	%RH
Accuracy [1]	25℃		± 3		%RH
Repeatability			± 1		%RH
Exchange		Completely interchangeable			
Response [2]	1/e(63%)		<6		S
Sluggish			± 0.3		%RH
Drift [3]	Typical		<0.5		%RH/yr

Temperature

AM2301 Relative temperature performance

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		℃
			16		bit
Accuracy			± 0.3	± 1	℃
Range		−40		80	℃
Repeat			± 0.2		℃
Exchange		Completely interchangeable			
Response	1/e(63%)		<10		S
Drift			± 0.3		℃/yr



Dimensions (unit: mm)

D2. SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20

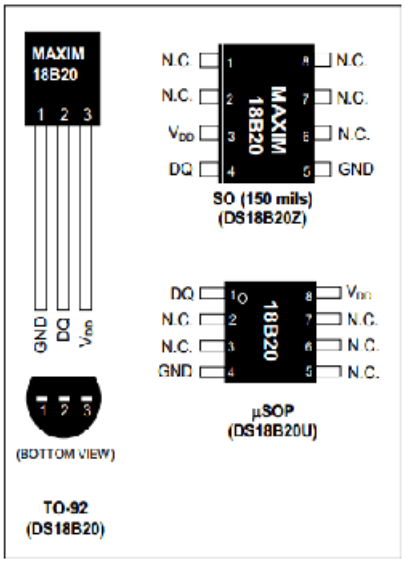
maxim integrated™

DS18B20
Programmable Resolution
1-Wire Digital Thermometer

FEATURES

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Each Device has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in an On-Board ROM
- Multidrop Capability Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications
- Requires No External Components
- Can Be Powered from Data Line; Power Supply Range is 3.0V to 5.5V
- Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
- ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer Resolution is User Selectable from 9 to 12 Bits
- Converts Temperature to 12-Bit Digital Word in 750ms (Max)

PIN CONFIGURATIONS



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground .....-0.5V to +6.0V
Operating Temperature Range .....-55°C to +125°C
Storage Temperature Range.....-55°C to +125°C
Solder Temperature .....Refer to the IPC/JEDEC J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V_{DD}	Local Power	+3.0		+5.5	V	1
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite Power	+3.0		+5.5	V	1,2
		Local Power	+3.0		V_{DD}		
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C	3
		-55°C to +125°C			±2		
Input Logic-Low	V_{IL}		-0.3		+0.8	V	1,4,5
Input Logic-High	V_{IH}	Local Power	+2.2		The lower of 5.5 or V_{DD} + 0.3	V	1, 6
		Parasite Power	+3.0				
Sink Current	I_L	$V_{I/O}$ = 0.4V	4.0			mA	1
Standby Current	I_{DDS}			750	1000	nA	7,8
Active Current	I_{DD}	V_{DD} = 5V		1	1.5	mA	9
DQ Input Current	I_{DQ}			5		µA	10
Drift				±0.2		°C	11

D3. SENSOR DE FLUJO DE AGUA YF-S201

YF-S201 Water Flow Sensor

This sensor sit in line with your water line, and uses a pinwheel sensor to measure how much liquid has moved through it.

Measure liquid/water flow for your solar, water conservation systems, storage tanks, water recycling home applications, irrigation systems and much more. The sensors are solidly constructed and provide a digital pulse each time an amount of water passes through the pipe. The output can easily be connected to a microcontroller for monitoring water usage and calculating the amount of water remaining in a tank etc.

Features:

- Model: YF-S201
- Working Voltage: 5 to 18V DC (min tested working voltage 4.5V)
- Max current draw: 15mA @ 5V
- Output Type: 5V TTL
- Working Flow Rate: 1 to 30 Liters/Minute
- Working Temperature range: -25 to +80?
- Working Humidity Range: 35%-80% RH
- Accuracy: ±10%
- Maximum water pressure: 2.0 MPa
- Output duty cycle: 50% +-10%
- Output rise time: 0.04us
- Output fall time: 0.18us
- Flow rate pulse characteristics: Frequency (Hz) = 7.5 * Flow rate (L/min)
- Pulses per Liter: 450
- Durability: minimum 300,000 cycles
- Cable length: 15cm
- 1/2" nominal pipe connections, 0.78" outer diameter, 1/2" of thread
- Size: 2.5" x 1.4" x 1.4"

ITEM INCLUDED:

1 x YF-S201 Water Flow Sensor

Reviews

There are yet no reviews for this product.

D4. SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL MPX10DP

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by MPX10/D

Senseon

10 kPa Uncompensated Silicon Pressure Sensors

MPX10 SERIES

0 to 10 kPa (0–1.45 psi)
35 mV FULL SCALE SPAN
(TYPICAL)

The MPX10 series device is a silicon piezoresistive pressure sensor providing a very accurate and linear voltage output — directly proportional to the applied pressure. This standard, low cost, uncompensated sensor permits manufacturers to design and add their own external temperature compensating and signal conditioning networks. Compensation techniques are simplified because of the predictability of Motorola's single element strain gauge design.

Features

- Low Cost
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge Design
- Ratiometric to Supply Voltage
- Easy to Use Chip Carrier Package Options
- Differential and Gauge Options

Application Examples

- Air Movement Control
- Environmental Control Systems
- Level Indicators
- Leak Detection
- Medical Instrumentation
- Industrial Controls
- Pneumatic Control Systems
- Robotics

BASIC CHIP CARRIER ELEMENT CASE 344–15, STYLE 1

DIFFERENTIAL PORT OPTION CASE 344C–01, STYLE 1

NOTE: Pin 1 is the notched pin.

PIN NUMBER			
1	Gnd	3	V_S
2	$+V_{out}$	4	$-V_{out}$

Figure 1 shows a schematic of the internal circuitry on the stand–alone pressure sensor chip.

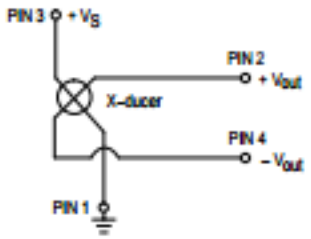


Figure 1. Uncompensated Pressure Sensor Schematic

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The differential voltage output of the X–ducer is directly proportional to the differential pressure applied.

The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure side (P1) relative to the vacuum side (P2). Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum side (P2) relative to the pressure side (P1).

Senseon and X–ducer are trademarks of Motorola, Inc.

REV 5

© Motorola, Inc. 1997

MOTOROLA

MPX10 SERIES

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Overpressure(8) (P1 > P2)	P_{max}	75	kPa
Burst Pressure(8) (P1 > P2)	P_{burst}	100	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	−40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	−40 to +125	°C

OPERATING CHARACTERISTICS (V_S = 3.0 Vdc, T_A = 25°C unless otherwise noted, P1 > P2)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Differential Pressure Range(1)	P_{OP}	0	—	10	kPa
Supply Voltage(2)	V_S	—	3.0	6.0	Vdc
Supply Current	I_o	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span(3)	V_{FSS}	20	35	50	mV
Offset(4)	V_{off}	0	20	35	mV
Sensitivity	$\Delta V/\Delta P$	—	3.5	—	mV/kPa
Linearity(5)	—	−1.0	—	1.0	$\%V_{FSS}$
Pressure Hysteresis(5) (0 to 10 kPa)	—	—	± 0.1	—	$\%V_{FSS}$
Temperature Hysteresis(5) (−40°C to +125°C)	—	—	± 0.5	—	$\%V_{FSS}$
Temperature Coefficient of Full Scale Span(5)	TCV_{FSS}	−0.22	—	−0.16	$\%V_{FSS}$/°C
Temperature Coefficient of Offset(5)	TCV_{off}	—	±15	—	µV/°C
Temperature Coefficient of Resistance(5)	TCR	0.21	—	0.27	$\%Z_{in}$/°C
Input Impedance	Z_{in}	400	—	550	Ω
Output Impedance	Z_{out}	750	—	1250	Ω
Response Time(6) (10% to 90%)	tR	—	1.0	—	ms
Warm-Up	—	—	20	—	ms
Offset Stability(9)	—	—	±0.5	—	$\%V_{FSS}$

MECHANICAL CHARACTERISTICS

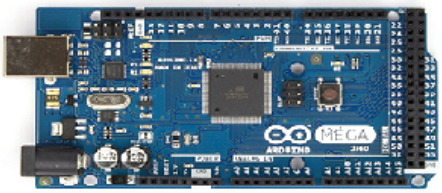
Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Weight (Basic Element, Case 344–15)	—	—	2.0	—	Grams
Common Mode Line Pressure(7)	—	—	—	690	kPa

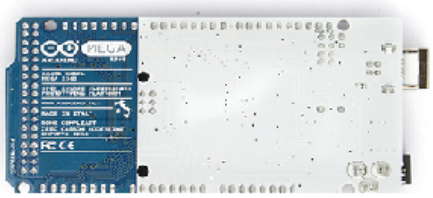
NOTES:

1. 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
2. Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self–heating.
3. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
4. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
5. Accuracy (error budget) consists of the following:
   - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
   - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
   - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
   - TcSpan: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
   - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
   - TCR: Z_{in} deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of −40°C to +125°C, relative to 25°C.
6. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
7. Common mode pressures beyond specified may result in leakage at the case–to–lead interface.
8. Exposure beyond these limits may cause permanent damage or degradation to the device.
9. Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

D5. PLATAFORMA ARDUINO MEGA 2560

Arduino Mega 2560





Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 (datasheet). It has 54 digital input/output pins (of which 15 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using pinMode(), digitalWrite(), and digitalRead() functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

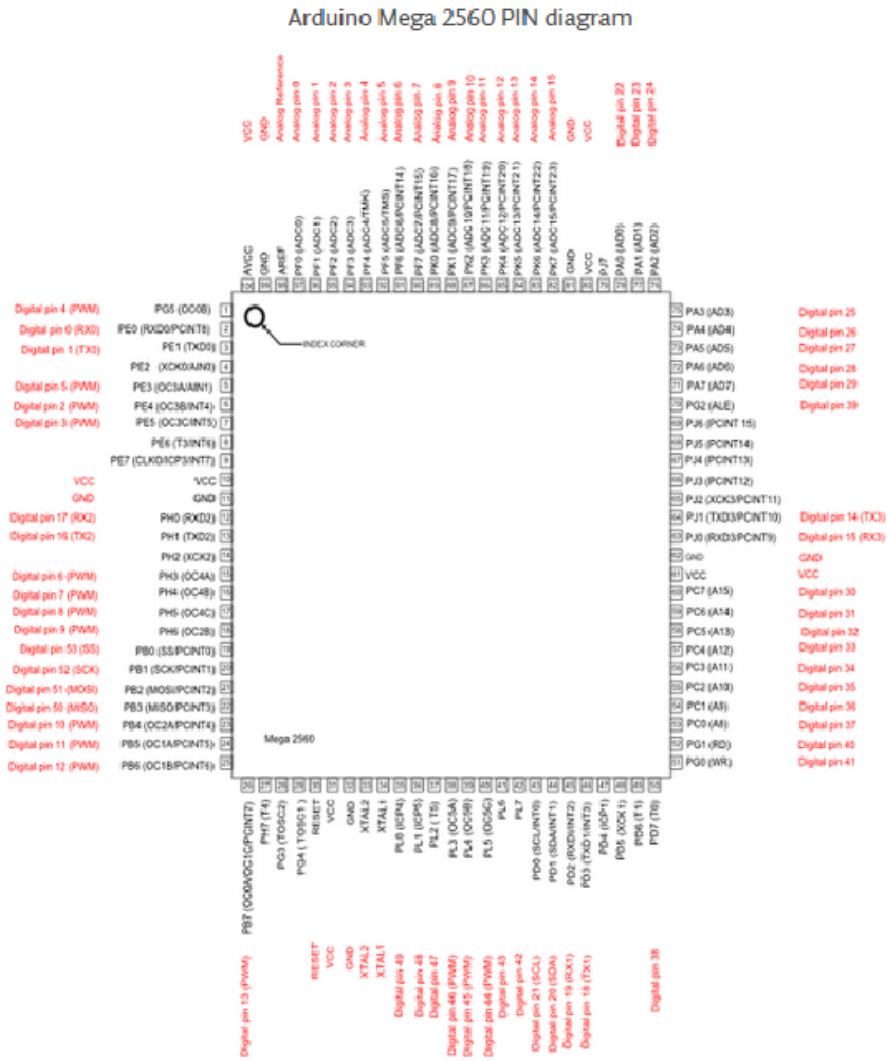
- Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX). Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega16U2 USB-to-TTL Serial chip.
- External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2). These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the attachInterrupt() function for details.
- PWM: 2 to 13 and 44 to 46. Provide 8-bit PWM output with the analogWrite() function.
- SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). These pins support SPI communication using the SPI library. The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Uno, Duemilanove and Diecimila.

- LED: 13. There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.
- TWI: 20 (SDA) and 21 (SCL). Support TWI communication using the Wire library. Note that these pins are not in the same location as the TWI pins on the Duemilanove or Diecimila.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and analogReference() function.

There are a couple of other pins on the board:

- AREF. Reference voltage for the analog inputs. Used with analogReference().
- Reset. Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.



D6. MÓDULO RELÉ DE 4 CANALES PARA ARDUINO

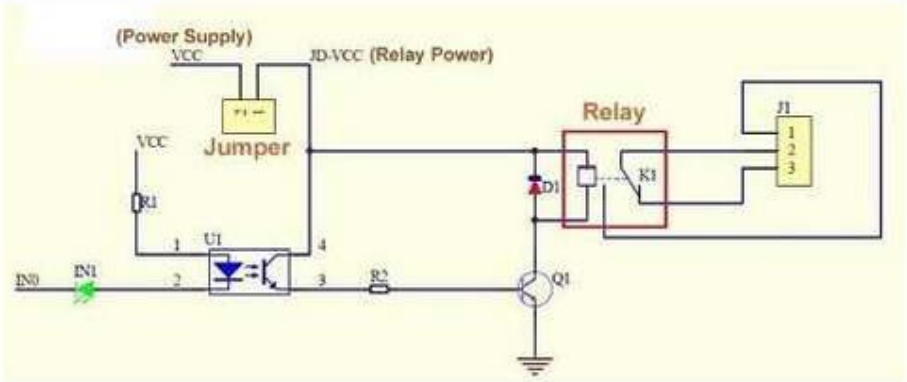
Modulo rele Shield for Arduino

ARM PIC AVR DSP Electronic

5V 4-Canal

Características:

- 4 canales independientes protegidos con optoacopladores
- 4 Relés (Relays) de 1 polo 2 tiros
- El voltaje de la bobina del relé es de 5 VDC
- Led indicador para cada canal (enciende cuando la bobina del relé esta activa)
- Activado mediante corriente: el circuito de control debe proveer una corriente de 15 a 20 mA
- Puede controlado directamente por circuito lógicos
- Terminales de conexión de tornillo (clemas)
- Terminales de entrada de señal lógica con headers macho
- Relé de corriente alto AC250V 10A, DC30V 10A



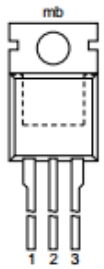
D7. DATOS TÉCNICOS DEL TRIAC BT136-600E

BT136-600E

4Q Triac

30 September 2013 — **Product data sheet**

Pinning information

Pin	Symbol	Description	Simplified outline	Graphic symbol
1	T1	main terminal 1	 TO-220AB (SOT78)	
2	T2	main terminal 2		
3	G	gate		
mb	T2	mounting base; main terminal 2		

Limiting values

Symbol	Parameter	Conditions		Min	Max	Unit
V_{DRM}	repetitive peak off-state voltage			-	600	V
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	full sine wave; $T_{mb} \leq 107$ °C; Fig. 1; Fig. 2; Fig. 3		-	4	A
I_{TSM}	non-repetitive peak on-state current	full sine wave; $T_{j(init)} = 25$ °C; $t_p = 20$ ms; Fig. 4; Fig. 5; Fig. 3		-	25	A
		full sine wave; $T_{j(init)} = 25$ °C; $t_p = 16.7$ ms; Fig. 5; Fig. 4		-	27	A
I^2t	I2t for fusing	$t_p = 10$ ms; SIN		-	3.1	A^2s
dI_T/dt	rate of rise of on-state current	$I_T = 6$ A; $I_G = 0.2$ A; $dI_G/dt = 0.2$ A/µs; T2+ G+		-	50	A/µs
		$I_T = 6$ A; $I_G = 0.2$ A; $dI_G/dt = 0.2$ A/µs; T2+ G-		-	50	A/µs
		$I_T = 6$ A; $I_G = 0.2$ A; $dI_G/dt = 0.2$ A/µs; T2- G-		-	50	A/µs
		$I_T = 6$ A; $I_G = 0.2$ A; $dI_G/dt = 0.2$ A/µs; T2- G+		-	10	A/µs
I_{GM}	peak gate current			-	2	A
P_{GM}	peak gate power			-	5	W
$P_{G(AV)}$	average gate power	over any 20 ms period		-	0.5	W
T_{stg}	storage temperature			-40	150	°C
T_j	junction temperature			-	125	°C

Characteristics

Symbol	Parameter	Conditions		Min	Typ	Max	Unit
Static characteristics							
I_{GT}	gate trigger current	V_D = 12 V; I_T = 0.1 A; T2+ G+; T_j = 25 °C; Fig. 7		-	2.5	10	mA
		V_D = 12 V; I_T = 0.1 A; T2+ G-; T_j = 25 °C; Fig. 7		-	4	10	mA
		V_D = 12 V; I_T = 0.1 A; T2- G-; T_j = 25 °C; Fig. 7		-	5	10	mA
		V_D = 12 V; I_T = 0.1 A; T2- G+; T_j = 25 °C; Fig. 7		-	11	25	mA
I_L	latching current	V_D = 12 V; I_G = 0.1 A; T2+ G+; T_j = 25 °C; Fig. 8		-	3	15	mA
		V_D = 12 V; I_G = 0.1 A; T2+ G-; T_j = 25 °C; Fig. 8		-	10	20	mA
		V_D = 12 V; I_G = 0.1 A; T2- G-; T_j = 25 °C; Fig. 8		-	2.5	15	mA
		V_D = 12 V; I_G = 0.1 A; T2- G+; T_j = 25 °C; Fig. 8		-	4	20	mA
I_H	holding current	V_D = 12 V; T_j = 25 °C; Fig. 9		-	2.2	15	mA
V_T	on-state voltage	I_T = 5 A; T_j = 25 °C; Fig. 10		-	1.4	1.7	V
V_{GT}	gate trigger voltage	V_D = 12 V; I_T = 0.1 A; T_j = 25 °C; Fig. 11		-	0.7	1	V
		V_D = 400 V; I_T = 0.1 A; T_j = 125 °C; Fig. 11		0.25	0.4	-	V
I_D	off-state current	V_D = 600 V; T_j = 125 °C		-	0.1	0.5	mA
Dynamic characteristics							
dV_D/dt	rate of rise of off-state voltage	V_{DM} = 402 V; T_j = 125 °C; (V_{DM} = 67% of V_{DRM}); exponential waveform; gate open circuit		-	50	-	V/µs
t_{gt}	gate-controlled turn-on time	I_{TM} = 6 A; V_D = 600 V; I_G = 0.1 A; dI_G/dt = 5 A/µs		-	2	-	µs

Thermal characteristics

Symbol	Parameter	Conditions		Min	Typ	Max	Unit
$R_{th(j-mb)}$	thermal resistance from junction to mounting base	half cycle; Fig.		-	-	3.7	K/W
		full cycle; Fig.		-	-	3	K/W
$R_{th(j-a)}$	thermal resistance from junction to ambient	in free air		-	60	-	K/W

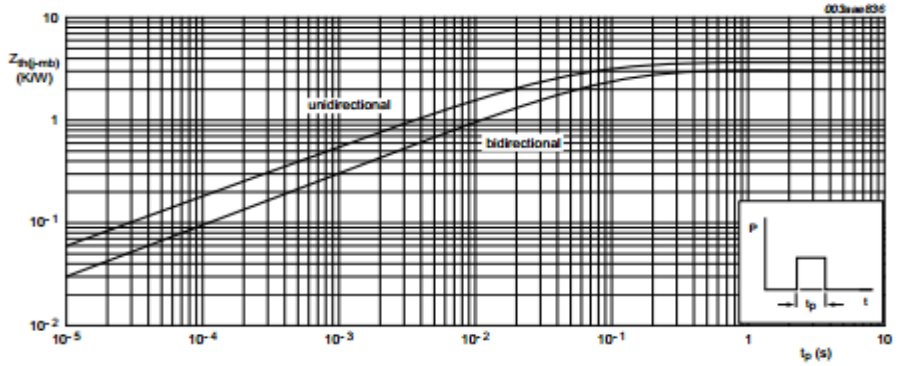


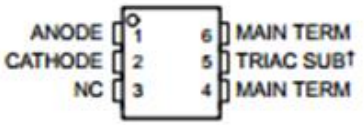
Fig. Transient thermal impedance from junction to mounting base as a function of pulse width

D8. DATOS TÉCNICOS DEL OPTOTRIAC MOC3021

SOES025 – OCTOBER 1986 – REVISED OCTOBER 1995

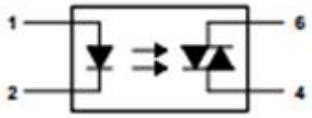
- 250 V Phototriac Driver Output
- Gallium-Arsenide-Diode Infrared Source and Optically-Coupled Silicon Traic Driver (Bilateral Switch)
- UL Recognized . . . File Number E65085
- High Isolation . . . 7500 V Peak
- Output Driver Designed for 220 V ac
- Standard 6-Terminal Plastic DIP
- Directly Interchangeable with Motorola MOC3020, MOC3021, MOC3022, and MOC3023
- Direct Replacements for:
  - TRW Optron OPI3020, OPI3021, OPI3022, and OPI3023;
  - General Instrument MCP3020, MCP3021, and MCP3022;
  - General Electric GE3020, GE3021, GE3022, and GE3023

MOC3020 – MOC3023 . . . PACKAGE
(TOP VIEW)



† Do not connect this terminal
NC – No internal connection

logic diagram



absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)†

Input-to-output peak voltage, 5 s maximum duration, 60 Hz (see Note 1)	7.5 kV
Input diode reverse voltage	3 V
Input diode forward current, continuous	50 mA
Output repetitive peak off-state voltage	400 V
Output on-state current, total rms value (50-60 Hz, full sine wave): T_A = 25°C	100 mA
T_A = 70°C	50 mA
Output driver nonrepetitive peak on-state current (t_w = 10 ms, duty cycle = 10%, see Figure 7)	1.2 A
Continuous power dissipation at (or below) 25°C free-air temperature:	
Infrared-emitting diode (see Note 2)	100 mW
Phototriac (see Note 3)	300 mW
Total device (see Note 4)	330 mW
Operating junction temperature range, T_J	−40°C to 100°C
Storage temperature range, T_{stg}	−40°C to 150°C
Lead temperature 1,6 (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. Input-to-output peak voltage is the internal device dielectric breakdown rating.
2. Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 1.33 mW/°C.
3. Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 4 mW/°C.
4. Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 4.4 mW/°C.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

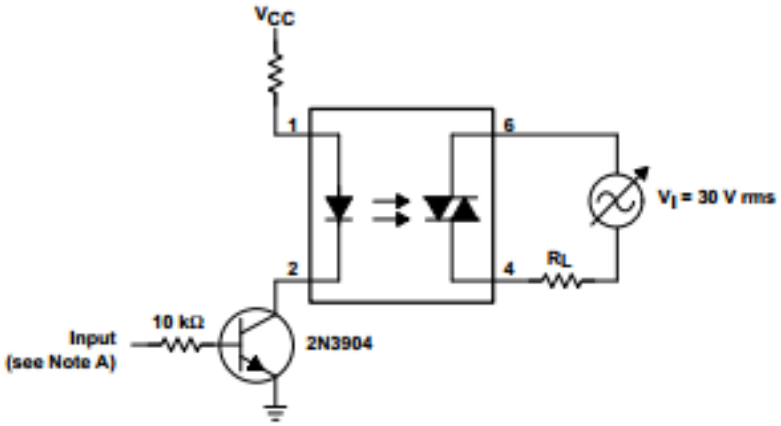
Copyright © 1995, Texas Instruments Incorporated

electrical characteristics at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER			TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
I_R	Static reverse current		V_R = 3 V		0.05	100	µA
V_F	Static forward voltage		I_F = 10 mA		1.2	1.5	V
$I_{(DRM)}$	Repetitive off-state current, either direction		$V_{(DRM)}$ = 400 V, See Note 5		10	100	nA
dv/dt	Critical rate of rise of off-state voltage		See Figure 1		100		V/µs
dv/dt(c)	Critical rate of rise of commutating voltage		I_O = 15 mA, See Figure 1		0.15		V/µs
I_{FT}	Input trigger current, either direction	MOC3020	Output supply voltage = 3 V		15	30	mA
		MOC3021			8	15	
		MOC3022			5	10	
		MOC3023			3	5	
V_{TM}	Peak on-state voltage, either direction		I_{TM} = 100 mA		1.4	3	V
I_H	Holding current, either direction				100		µA

NOTE 5: Test voltage must be applied at a rate no higher than 12 V/µs.

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



NOTE A. The critical rate of rise of off-state voltage, dv/dt, is measured with the input at 0 V. The frequency of V_{in} is increased until the phototriac turns on. This frequency is then used to calculate the dv/dt according to the formula:

$$dv/dt = 2\sqrt{2\pi f V_{in}}$$

The critical rate of rise of commutating voltage, dv/dt(c), is measured by applying occasional 5-V pulses to the input and increasing the frequency of V_{in} until the phototriac stays on (latches) after the input pulse has ceased. With no further input pulses, the frequency of V_{in} is then gradually decreased until the phototriac turns off. The frequency at which turn-off occurs may then be used to calculate the dv/dt(c) according to the formula shown above.

Figure 1. Critical Rate of Rise Test Circuit

D9. DATOS TÉCNICOS DEL OPTOTRANSISTOR 4N25

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document by 4N25/D

GlobalOptoisolator™

VDE | UL | CSA | SETI | SEMKO | DEMKO | NEMKO | BABT

6-Pin DIP Optoisolators Transistor Output

4N25*
4N25A*
4N26*
[CTR = 20% Min]
4N27
4N28
[CTR = 10% Min]
*Motorola Preferred Devices

The 4N25/A, 4N26, 4N27 and 4N28 devices consist of a gallium arsenide infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon phototransistor detector.

- Most Economical Optoisolator Choice for Medium Speed, Switching Applications
- Meets or Exceeds All JEDEC Registered Specifications
- ***To order devices that are tested and marked per VDE 0884 requirements, the suffix "V" must be included at end of part number. VDE 0884 is a test option.***

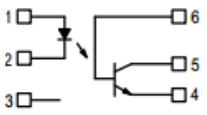
Applications

- General Purpose Switching Circuits
- Interfacing and coupling systems of different potentials and impedances
- I/O Interfacing
- Solid State Relays

STYLE 1 PLASTIC

STANDARD THRU HOLE
CASE 730A–04

SCHEMATIC



PIN 1. LED ANODE
2. LED CATHODE
3. N.C.
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
INPUT LED			
Reverse Voltage	V_R	3	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
LED Power Dissipation @ T_A = 25°C with Negligible Power in Output Detector Derate above 25°C	P_D	120 1.41	mW mW/°C
OUTPUT TRANSISTOR			
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	30	Volts
Emitter–Collector Voltage	V_{ECO}	7	Volts
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	70	Volts
Collector Current — Continuous	I_C	150	mA
Detector Power Dissipation @ T_A = 25°C with Negligible Power in Input LED Derate above 25°C	P_D	150 1.76	mW mW/°C
TOTAL DEVICE			
Isolation Surge Voltage(1) (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 sec Duration)	V_{ISO}	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ T_A = 25°C Derate above 25°C	P_D	250 2.94	mW mW/°C
Ambient Operating Temperature Range(2)	T_A	−55 to +100	°C
Storage Temperature Range(2)	T_{stg}	−55 to +150	°C
Soldering Temperature (10 sec, 1/16″ from case)	T_L	260	°C

1. Isolation surge voltage is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.
2. Refer to Quality and Reliability Section in Opto Data Book for information on test conditions.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.
GlobalOptoisolator is a trademark of Motorola, Inc.

REV 5

© Motorola, Inc. 1995

MOTOROLA

4N25 4N25A 4N26 4N27 4N28

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)(1)

Characteristic		Symbol	Min	Typ(1)	Max	Unit
INPUT LED						
Forward Voltage (I_F = 10 mA)	T_A = 25°C T_A = –55°C T_A = 100°C	V_F	— — —	1.15 1.3 1.05	1.5 — —	Volts
Reverse Leakage Current (V_R = 3 V)		I_R	—	—	100	µA
Capacitance (V = 0 V, f = 1 MHz)		C_J	—	18	—	pF
OUTPUT TRANSISTOR						
Collector–Emitter Dark Current (V_{CE} = 10 V, T_A = 25°C	4N25,25A,26,27 4N28	I_{CEO}	— —	1 1	50 100	nA
(V_{CE} = 10 V, T_A = 100°C)	All Devices	I_{CEO}	—	1	—	µA
Collector–Base Dark Current (V_{CB} = 10 V)		I_{CBO}	—	0.2	—	nA
Collector–Emitter Breakdown Voltage (I_C = 1 mA)		$V_{(BR)CEO}$	30	45	—	Volts
Collector–Base Breakdown Voltage (I_C = 100 µA)		$V_{(BR)CBO}$	70	100	—	Volts
Emitter–Collector Breakdown Voltage (I_E = 100 µA)		$V_{(BR)ECO}$	7	7.8	—	Volts
DC Current Gain (I_C = 2 mA, V_{CE} = 5 V)		h_{FE}	—	500	—	—
Collector–Emitter Capacitance (f = 1 MHz, V_{CE} = 0)		C_{CE}	—	7	—	pF
Collector–Base Capacitance (f = 1 MHz, V_{CB} = 0)		C_{CB}	—	19	—	pF
Emitter–Base Capacitance (f = 1 MHz, V_{EB} = 0)		C_{EB}	—	9	—	pF
COUPLED						
Output Collector Current (I_F = 10 mA, V_{CE} = 10 V)	4N25,25A,26 4N27,28	I_C (CTR)(2)	2 (20) 1 (10)	7 (70) 5 (50)	— —	mA (%)
Collector–Emitter Saturation Voltage (I_C = 2 mA, I_F = 50 mA)		$V_{CE(sat)}$	—	0.15	0.5	Volts
Turn–On Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_{on}	—	2.8	—	µs
Turn–Off Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_{off}	—	4.5	—	µs
Rise Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_r	—	1.2	—	µs
Fall Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_f	—	1.3	—	µs
Isolation Voltage (f = 60 Hz, t = 1 sec)(4)		V_{ISO}	7500	—	—	Vac(pk)
Isolation Resistance (V = 500 V)(4)		R_{ISO}	10^{11}	—	—	Ω
Isolation Capacitance (V = 0 V, f = 1 MHz)(4)		C_{ISO}	—	0.2	—	pF

1. Always design to the specified minimum/maximum electrical limits (where applicable).
2. Current Transfer Ratio (CTR) = I_C/I_F x 100%.
3. For test circuit setup and waveforms, refer to Figure 11.
4. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

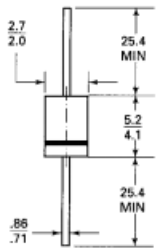
D10. DATOS TÉCNICOS DEL DIODO 1N4007

1N4001...1N4007
PLASTIC SILICON RECTIFIERS

FEATURES

* Low forward voltage
* High current capability
* Low leakage current
* High surge capability
* Low cost

DO-41



VOLTAGE RANCE
50 to 1000 Volts
CURRENT
1.0 Amperes

Dimensions in mm

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS
Single-phase, half-wave, 60 Hz, resistive or inductive load

	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage*	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage*	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage*	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward* Rectified Current 3/8 Lead Length at T_A = 75 °C	1.0							A
Maximum Overload Surge 8.3 ms single half sine-wave	50							A
Maximum Forward Voltage at 1.0A AC and 25 °C	1.0							V
Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle Average at 75 °C Ambient*	30							µA
Maximum DC Reverse Current at 25 °C at Rated DC Blocking Voltage at 75 °C	5.0 50.0							µA µA
Typical Junction Capacitance (Note 1)	30							pF
Operating and Storage Temperature Range	-65 to + 175							°C

NOTES:
1. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 V_{DC}.
* JEDEC Registered Value.

D11. CONTROLADOR DIGITAL MT-512Ri

MT-512Ri LOG

CONTROLADOR DIGITAL PARA REFRIGERACIÓN CON DESHIELO NATURAL POR PARADA DEL COMPRESOR Y DATALOGGER INTERNO

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- **Alimentación:** MT512Ri LOG →115 ó 230 Vac±10%(50/60 Hz)
  MT512RiL LOG → 12 ó 24 Vac/dc
- **Temperatura de control:** -50 hasta 75.0°C / -58 hasta 167°F
- **Corriente máxima:** NA → 16(8)A/250Vac 1HP
  NC → 8A/250Vac
- **Dimensiones:** 71 x 28 x 71 mm
- **Temperatura de operación:** 0 hasta 50 °C / 32 hasta 122°F
- **Humedad de operación:** 10 hasta 90% HR (no condensante)

CONFIGURACIONES

Ajuste de la temperatura de control (setpoint)

- Presione SET durante 2 segundos hasta aparecer SEt , soltando enseguida. Aparecerá la temperatura de control ajustada.
- Utilice las teclas ▼ y ▲ para modificar el valor y cuando esté listo, presione SET para grabar.

Para entrar en el menú de funciones (SETPOINT)

Apriete ▼ y ▲ simultáneamente por 2 segundos hasta aparecer SEL , soltando enseguida. Al aparecer Cod , apriete SET (toque corto) e introduzca el código (123) a través de las teclas ▼ e ▲. Para confirmar apriete la tecla SET . A través de las teclas ▼ y ▲ acceda a las demás funciones y proceda del mismo modo para ajustarlas. Para salir del menú e retornar a la operación normal, apriete SET (Toque largo) hasta aparecer - - - .

Funciones

- Cod Inserción del código de acceso
- Fun Funciones de configuración avanzadas
- CLo Ajuste del reloj y fecha

F08 Tiempo de deshielo
Es el tiempo mínimo en que el controlador mantenerá la salida de refrigeración apagada para realización de deshielo natural. Habiendo transcurrido este tiempo, el controlador entra en refrigeración.

F09 Estado inicial al energizar el instrumento
Indica en qué modo el controlador iniciará cuando energizado:

0 Refrigeración
1 Deshielo

F10 Indicación de temperatura trabada durante el deshielo
Esta función tiene la finalidad de evitar que sea visualizada la elevación de temperatura ambiente durante el deshielo, permaneciendo la última indicación antes del inicio de deshielo. La indicación es liberada nuevamente en el inicio del ciclo de refrigeración, después del fan-delay.

0 No
1 Sí

F11 Retardo en la energización del instrumento
Guando el instrumento es prendido, este puede permanecer un tiempo con su control deshabilitado, retardando el inicio del proceso. Durante ese tiempo él funciona solamente como indicador de temperatura.

F12 Tiempo adicional al final del primer ciclo
Tiempo complementar al primer ciclo de refrigeración a fin de garantizar que el primer ciclo de deshielo no sea accionado muy temprano.

F13 Tiempo entre cada muestra en la memoria
Período de tiempo en que el controlador irá gravar una muestra de la temperatura y del estado de la salida de refrigeración.

F14 Variación de la temperatura para forzar la grabación de datos
Diferencia de temperatura para forzar la grabación de los datos en la memoria independientemente del tiempo de muestreo configurado en F13. Para desactivar esta función simplemente disminuir el valor hasta que se muestre la mensaje nOP en el visor.

F15 Variación de la salida para forzar la grabación de datos
Indica si la alteración en la salida de la refrigeración obligará la grabación de datos en la memoria independientemente del tiempo de muestras configurado en F13:

0 Desconectado
1 Conectado

F16 ¿Reescribir memoria?
Esta función indica si el controlador deberá comenzar a escribir los nuevos datos en el inicio de la memoria del datalogger cuando está se encuentre llena. Esta función evita que los últimos datos calculados por el equipo sean perdidos.

0 No
1 Sí

F17 Dirección del instrumento en la red RS-485
Dirección del instrumento en la red para comunicación con el software SITRAD®.
Obs.: En una misma red no puede haber más de un instrumento con el mismo domicilio.

Tabla de parametros

Fun	Descripción	Mín	Máx	Unid	Padrón
F01	Modo de accionamiento del datalogger	0	2	-	2
F02	Corrimiento de indicación (offset)	-5.0 / -9	5.0 / 9	°C / °F	0 / 0
F03	Mínimo setpoint permitido al usuario final	-50 / -58	75.0 / 167	°C / °F	-50.0 / -58
F04	Máximo setpoint permitido al usuario final	-50 / -58	75.0 / 167	°C / °F	75.0 / 167
F05	Diferencial de control (hysteresis)	0.1 / 1	20.0 / 40	°C / °F	1.0 / 2
F06	Retardo para volver a conectar la salida de refrigeración	0	999	seg.	20
F07	Tiempo de refrigeración (intervalo entre deshielos)	1	999	min.	240
F08	Tiempo de deshielo	0	999	min.	30
F09	Estado inicial al energizar el instrumento	0 - refrig.	1 - deshielo	-	0 - refrig.
F10	Indicación de temperatura trabada durante el deshielo	0 - no	1 - sí	-	0 - no
F11	Retardo en la energización del instrumento	0	240	min.	0
F12	Tiempo adicional al final del primer ciclo	0	240	min.	0
F13	Tiempo entre cada muestra en la memoria	1	999	seg.	30
F14	Variación de la temperatura para forzar la grabación de datos	0 / 0	10.0 / 17	°C / °F	0 / 0
F15	Variación de la salida para forzar la grabación de datos	0	1	-	0
F16	¿Reescribir memoria?	0 - no	1 - sí	-	1 - sí
F17	Dirección del instrumento en la red RS-485	001	247	-	1

DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS

F01 Modo de accionamiento del datalogger

Indica como es accionado el dispositivo de registro de datos de la memória interna:

- 0 Siempre desconectado
- 1 Siempre conectado
- 2 Operación manual

F02 Corrimiento de indicación (offset)

Permite compensar eventuales errores en la lectura de la temperatura, provenientes del cambio del sensor.

F03 Mínimo setpoint permitido al usuario final

Bloqueos electrónicos cuya finalidad es evitar, que por error, se regulen temperaturas extremadamente bajas.

F04 Máximo setpoint permitido al usuario final

Bloqueos electrónicos cuya finalidad es evitar, que por error, se regulen temperaturas extremadamente altas.

F05 Diferencial de control (hysteresis)

Es la diferencia de temperatura (histéresis) entre PRENDER y APAGAR la salida de refrigeración.

F06 Retardo para volver a conectar la salida de refrigeración

Es el tiempo mínimo en que la salida de refrigeración permanecerá apagada, o sea, espacio de tiempo entre la última parada y la próxima partida.

F07 Tiempo de refrigeración (intervalo entre deshielos)

Es el tiempo durante el cual el compresor prenderá y apagará por la temperatura del sensor. Habiendo transcurrido este tiempo, el controlador entra en deshielo.

ANEXO E

CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R."

Quito, 08 de Mayo de 2015

CERTIFICACIÓN

A petición verbal del interesado, LENIN RAMIRO MERINO VILLEGAS, portador de la cédula de ciudadanía No. 171664161-6 y estudiante de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional, certifico que luego de haber revisado el funcionamiento del módulo de control del banco de pruebas de torre de enfriamiento del Laboratorio de Transferencia de Calor, que fue elaborado como parte del proyecto de titulación "Diseño e implementación de un sistema de control para la torre de enfriamiento del Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela Politécnica Nacional", este se encuentra operando correctamente y dentro de los rangos requeridos para la realización de prácticas de laboratorio.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, a la vez que autorizo al portador de la presente, dar el uso que creyere conveniente.

Atentamente,

Dr. Freddy Ordóñez
Jefe del Laboratorio de Transferencia de Calor
Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Politécnica Nacional
Tel: (+593) 22 976 300 ext 3746