

**COMISIONAMIENTO Y AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO
DIDÁCTICA, UBICADA EN EL LABORATORIO DE TRASFERENCIA DE
CALOR.**

**NICOLAS MORALES GARCIA
ALVARO IVAN SANCHEZ MALDONADO**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**COMISIONAMIENTO Y AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO
DIDÁCTICA, UBICADA EN EL LABORATORIO DE TRASFERENCIA DE
CALOR.**

**NICOLAS MORALES GARCIA
ALVARO IVAN SANCHEZ MALDONADO**

**Proyecto de grado para optar por el título de
Ingenieros Mecánicos**

Director: M. Sc. JAVIER MAURICIO CASTELLANOS OLARTE

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

PAGINA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, 18 de enero de 2011

PAGINA DEDICATORIA

A Dios.

A mí madre, mujer de carácter recio y de claros principios éticos quien siempre me apoyó y motivó en el transcurso de mis estudios.

A mis hermanos, Javier Alberto y Yuli Andrea Sánchez Maldonado, a mi familia y amigos por la motivación durante toda la carrera.

ALVARO IVAN SANCHEZ MALDONADO

A Dios.

A mis padres por su fe, dedicación y paciencia.

A mis Hermanos Giovanni y Daniela Morales García, por su apoyo y consejo acertado en el momento oportuno.

A mi familia, mis amigos y compañeros de estudios, por su motivación en todo momento.

NICOLAS MORALES GARCÍA

PAGINA DE AGRADECIMIENTOS

Los autores de éste proyecto expresan sus agradecimientos a: Javier Mauricio Castellanos, Msc. Térmicas y Energía, y Director del trabajo de grado, por su valiosa orientación; a los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana – seccional Bucaramanga, por sus enseñanzas y motivación en el transcurso de la carrera. A todas aquellas personas; por compartir sus experiencias y conocimientos con nosotros para la realización de éste proyecto.

Al Ingeniero Edwin Córdoba Tuta por brindar sus conocimientos para la realización de este proyecto.

Al Ingeniero Juan Carlos Villamizar por su valiosa asesoría en la comunicación del sistema de Supervisión y Control con el PLC.

A la Corporación CDT del Gas, quien por medio de Edinson Rueda facilitó el equipo de calibración para los sensores de temperatura.

A la empresa ARM LTDA (Asesoría en Reingeniería de Mantenimiento Industrial Limitada), por prestar el Higrómetro portátil para calibrar los sensores de humedad.

GLOSARIO

TORRE DE ENFRIAMIENTO: Las torres de enfriamientos son equipos utilizados para disminuir la temperatura del agua caliente proveniente de algún circuito de refrigeración y poder usarla de nuevo en el proceso; se lleva a cabo mediante un intercambio de calor sensible y latente con una corriente de aire seco y frío que circula por la torre.

TEMPERATURA: Es una magnitud escalar que representa la cantidad de energía interna en un sistema definido.

PRESIÓN: Es la relación de la fuerza por unidad de área.

TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCIO: es aquella a la cual el aire húmedo se satura como consecuencia de un enfriamiento isobárico, es decir; es la temperatura a la cual comienza la condensación del vapor, si la mezcla se enfría a presión constante.

HUMEDAD RELATIVA: es la razón entre la masa de vapor que hay en un volumen dado de la mezcla y la masa de vapor que habría en ese mismo volumen, si la mezcla estuviera saturada en la misma temperatura.

COMISIONAMIENTO: Es un proceso sistemático para garantizar que todos los elementos que conforman un sistema, interactúen entre sí, de acuerdo a las condiciones de operación.

AUTOMATIZACIÓN: Es un sistema mediante el cual se integran accionamientos mecánicos, hidráulicos, eléctricos y neumáticos, logrando un aumento en calidad, producción, confiabilidad y de los procesos.

SENSOR: Es un dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida en función de la variable medida.

SCADA: Es un software diseñado para supervisar, controlar y adquirir datos análogos y digitales.

OPC SERVER: Es un medio que permite la comunicación y la interacción de dos plataformas completamente no compatibles.

MICROWIN: Es un programa diseñado para la programación de PLC siemens en distintos lenguajes.

SISTEMA DE CONTROL: Es una estrategia computacional que permite modificar o leer distintas variables involucradas en un proceso.

LAZO ABIERTO: Son sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En otras palabras, en un sistema de control de lazo abierto no se mide la salida, ni se realimenta para compararla con la entrada.

LAZO CERRADO: Son sistemas de control con retroalimentación. En estos sistemas, se alimenta al controlado la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación.

ROUTER: Es un instrumento electrónico el cual permite enrutar los diferentes tipos de datos a diferentes ordenadores de la red, este solo reconoce el que se identifica como destinatario.

Contenido

1	OBJETIVOS	3
1.1	OBJETIVO GENERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2	MARCO TEÓRICO	5
2.1	TORRES DE ENFRIAMIENTO	5
2.2	CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO	7
2.2.1	Torres de enfriamiento de tiro mecánico	7
2.2.2	Torres de enfriamiento de tiro natural	8
2.3	COMISIONAMIENTO.....	12
2.3.1	Objetivos del comisionamiento.....	15
2.4	AUTOMATIZACIÓN	15
2.4.1	Sistemas de control.....	15
2.4.2	PLC (Controlador Lógico Programable)	18
2.4.3	Sensores y transductores	19
2.4.4	Acondicionamiento de señales.....	20
2.5	STEP 7-MICROWIN V4.0.....	20
2.5.1	Lenguajes y editores de programación s7-200	21
2.5.2	Áreas de memorias, entradas y salidas.....	23
3	COMISIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA.....	24
3.1	EQUIPOS	24
3.2	EQUIPOS DE CONTROL.....	24
3.3	EQUIPOS PARA EL MONITOREO Y CONTROL DEL PROCESO	25
3.3.1	Válvula proporcional.....	25
3.3.2	Rtd PT 100.....	31
3.3.3	Válvula ON-OFF	40
3.3.4	Sensor de flujo 2536	40
3.3.5	Sensores de presión	44
3.3.6	Sensor de humedad y temperatura HTS-801	44

4. AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA ...	¡Error!
Marcador no definido.	
4.1 CREACIÓN DE PROYECTO	45
4.2 CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE	46
4.3 CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO ETHERNET	46
4.4 COMUNICACIÓN DESDE MICROWIN	52
4.5 INTERFAZ HOMBRE MAQUINA –MHI.....	54
4.5.1 Características principales de pc-acces	54
4.5.2 Protocolo de configuración del pc-acces	54
4.5.3 Desarrollo de la interfaz.....	58
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	63
6. CONCLUSIONES	73
7. RECOMENDACIONES	77
8. BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS	79
ANEXO 1.....	82
ANEXO 2.....	97
ANEXO 3.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interpretación de la relación integral de MERKEL.....	9
Figura 2. Componentes de un sistema de control.....	16
Figura 3. Sistema de lazo abierto.....	17
Figura 4. Sistema de lazo cerrado.....	18
Figura 5. Áreas de memoria y funciones de la CPU S7-200.....	23
Figura 6. Tablero de control.....	25
Figura 7. Selección Válvula proporcional.....	30
Figura 8. Revisión sensor de temperatura 1.....	31
Figura 9. Revisión sensor de temperatura 2.....	32
Figura 10. Pantalla de inicio de MicroWin.....	45
Figura 11. Despliegue de la ventana de configuración del Asistente Ethernet.....	46
Figura 12. Asistente Ethernet para ubicación del módulo.....	47
Figura 13. Asignación de valore de IP del PLC y puerta de enlace del router.....	48
Figura 14. Cantidad de enlaces a configurar del módulo.....	48
Figura 15. Configuración de enlaces.....	49
Figura 16. Asistente Ethernet de protección CRC.....	50
Figura 17. Asistente Ethernet para proponer dirección de memoria.....	50
Figura 18. Comunicación desde MicroWin.....	51

Figura 19. Actualizar valores de comunicación.....	52
Figura 20. Ventana para cargar el proyecto en Pc-acces.....	54
Figura 21. Ajustar propiedades del PLC.....	55
Figura 22. Agregar ítems al cliente de prueba.....	56
Figura 23. Diagrama de control del proceso.....	58
Figura 24. Visualización de datos de temperaturas.....	59
Figura 25. Visualización de datos del aire.....	60
Figura 26. Sección de gráficas.....	61
Figura 27. Curva de enfriamiento del agua.....	70
Figura 28. Curva de enfriamiento del aire.....	70

RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

TITULO: Comisionamiento y automatización de la torre de enfriamiento didáctica, ubicada en laboratorio de transferencia de calor.

AUTOR: Álvaro Iván Sánchez Maldonado.
Nicolás Morales García.

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica.

DIRECTOR: Javier M Castellanos.

RESUMEN

En este documento se presenta el proyecto para realizar el comisionamiento y automatización de la torre de enfriamiento didáctica ubicada en el laboratorio de transferencia de calor de la Universidad Pontificia Bolivariana. La metodología involucra la verificación del correcto funcionamiento de los instrumentos de medición y diseño de la estrategia de supervisión de las variables a controlar, a través de un software de supervisión y control que se realizará mediante la programación de un PLC con las normas y parámetros para la operación desde la red local de la Universidad.

PALABRAS CLAVE:

Comisionamiento, automatización, PLC, torre de
Enfriamiento, supervisión.

GENERAL SUMMARY

TITLE: Commissioning and automation of the didactic cooling tower, located at the heat transfer laboratory

AUTHOR: Álvaro Iván Sánchez Maldonado.
Nicolás Morales García.

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica.

DIRECTOR: Javier M Castellanos.

SUMMARY:

This document presents a project looking forward to commissioning and controlling an atmospheric air cooled tower located at the heat transfer laboratory of UPB. The basic methodology deals with checking instrumentation already on place and developing a supervision strategy for controlled variables using a software to monitoring and control a programming logic control (PLC). In addition, it will be used standards to allow operation viaz intranet.

KEY WORDS:

Commissioning, controlling, supervision, PLC,
Cooled tower.

INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia de la tecnología en el siglo XXI se han llevado a cabo estudios e investigaciones en ramas de la ingeniería como son la electrónica y la mecánica, las cuales contribuyen al mejoramiento, aumento de la eficiencia y confiabilidad de los distintos procesos industriales; de esta manera la automatización de las torres de enfriamiento, permite alcanzar un mejor aprovechamiento energético, es una herramienta que aporta medios para lograr el consecuente ahorro económico de energía, mejoramiento de la productividad, cumplimiento de tareas repetitivas y rutinarias de los equipos utilizados para su funcionamiento.

El siguiente informe documentará todo el procedimiento y realización del proyecto: Comisionamiento y automatización de la torre de enfriamiento didáctica, ubicada en el laboratorio de transferencia de calor. El desarrollo de este proyecto, busca asegurar el correcto funcionamiento de los equipos de medición instalados en la torre, y desarrollar un sistema de supervisión y control el cual permitirá al usuario manipular, leer y escribir las diferentes variables involucradas en el proceso pasando por un control desde un PC con capacidad de comunicación OPC hasta un PLC que comande el funcionamiento de la torre y hacer el proceso más eficiente, por otra lado busca atender las necesidades en materia de equipos de laboratorio de la facultad de Ingeniería Mecánica, en las asignaturas involucradas en los programas de termo fluidos, automatización y control; también logrará que el estudiante tenga 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.

Es importante notar que el PLC integra tecnologías tales como la mecánica, la neumática y la hidráulica. Esto indica que el conocimiento de PLC involucra a diferentes disciplinas.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

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.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Asegurar el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición y control de las variables involucradas en el proceso. **Resultado:** conseguir mediciones aproximadas a las teóricas. **Indicador:** se seguirán protocolos generalizados para la medición de variables físicas y guías técnicas para la instalación de sensores.

Diseñar la estrategia de supervisión de las variables a controlar en el proceso de la torre de enfriamiento del laboratorio de transferencia de calor, a través de un software de supervisión y control. **Resultado:** sistema de supervisión elaborado en la plataforma seleccionada. **Indicador:** se utilizarán como referencia los métodos para elaboración de estrategias de supervisión en software SCADA, consignados en manuales de usuario y bibliografía técnica disponible.

Programar el PLC que realizará el control del flujo de agua, dependiendo de la variable de control seleccionada. **Resultado:** programa de control con las normas y parámetros para la operación desde la red local de la Universidad Pontificia Bolivariana. **Indicador:** se usaran criterios de programación para el control

estandarizados en literatura técnica, científica y recomendaciones de la casa del fabricante para el programa de supervisión y control.

Realizar la supervisión y pruebas de funcionamiento de la torre de enfriamiento, para verificar condiciones de operación normal del equipo en prácticas realizadas en el laboratorio de transferencia de calor. **Resultado:** registro de variables, curvas comparativas de las variables físicas de la proporción de circulación de aire, la medida de circulación de agua, la temperatura del agua y la carga de enfriamiento. **Indicador:** los resultados de las pruebas se correlacionaran con los resultados teóricos de los modelos de torres de enfriamiento didácticos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento son equipos utilizados para disminuir la temperatura del agua caliente proveniente de algún circuito de refrigeración y poder usarla de nuevo en el proceso; se lleva a cabo mediante un intercambio de calor sensible y latente con una corriente de aire seco y frío que circula por la torre, esto se logra cuando la gota se mantiene en contacto el mayor tiempo posible con el aire que circula en contraflujo por el interior de la torre, se le evapora la película exterior, enfriándola consecuentemente. Es decir, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible (diferencia de temperatura entre el aire y el agua), como por calor latente (cambio de estado físico del agua a vapor). Se deben tener en cuenta las variables involucradas que son: temperatura de entrada y salida del agua, presión, caudal, temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa.

El objeto que se persigue en la torre es que la gota permanezca el mayor tiempo posible en contacto con el aire, lo cual se logra con la altura de la misma y además interponiendo obstáculos (el relleno), que la van deteniendo y la van fragmentando facilitando más el proceso evaporativo. [2]

Uno de los factores que más influye es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del relleno; en consecuencia si no se tiene control de los parámetros físicos del aire que ingresa a él, los resultados de los ensayos pueden ser poco representativos, ya que las condiciones climáticas de la zona donde se utilizará el relleno que se desea simular, pueden diferir mucho en el funcionamiento del equipo. La temperatura y la presión barométrica del aire atmosférico varían

considerablemente con la altitud, así como con las condiciones locales del clima y geográficas.

Es importante notar que, como el proceso es evaporativo, existe una pérdida de agua de enfriamiento. En otras palabras, del agua caliente que entra a la torre, un porcentaje se convierte en fría y el restante en vapor que se mezcla con el aire que sale de la torre. Este último porcentaje transformado es el que representa una pérdida en el agua de enfriamiento, la cual debe reponerse con el fin de mantener un caudal de refrigeración. Finalmente, ésta se considera como agua consumida en el proceso de enfriamiento, cuya cantidad debe ser reducida, puesto que proviene de un recurso natural básico para la vida.

Cuando entra en contacto el aire con el agua se forma una película muy fina de aire saturado sobre la película exterior de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire saturado que circula por la torre, produciendo una cesión de vapor de agua. Esta masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido. Este calor latente es cedido al aire, obteniéndose un enfriamiento del agua y un aumento de la temperatura del aire. La diferencia de temperaturas del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama «acercamiento» o “aproximación”, ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua

Es importante resaltar que el aire excesivamente húmedo que sale de la torre puede transformarse en un medio ideal para la proliferación y transporte de microorganismos patógenos, que pueden afectar la calidad de la vida vegetal, animal y humana.

El aire entra a la torre por el fondo y sale por la parte superior, el agua caliente se bombea hacia la parte superior de la torre y se rocía en esta corriente de aire; el propósito del rociado es exponer una gran área superficial de agua al aire. Cuando las gotas de agua caen bajo la influencia de la gravedad, una pequeña fracción del agua se evapora y enfría el agua restante. La temperatura y el contenido de humedad del aire aumentan durante el proceso. El agua enfriada se acumula en el fondo de la torre y se reutiliza en su respectivo proceso; el agua de reemplazo debe añadirse al ciclo para sustituir el agua perdida por la evaporación y por el arrastre de agua. Para reducir la cantidad de agua transportada por el aire, se instalan mamparas deflectoras en las torres de enfriamiento húmedas encima de la sección de rociado. [1]

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

La forma más simple de clasificar estos equipos es dependiendo del medio utilizado para suministrar el aire. Siguiendo este método se obtienen torres de tiro mecánico y torres de tiro natural.

2.2.1 Torres de enfriamiento de tiro mecánico

Se emplean dos tipos de torres de tiro mecánico, las de tiro forzado y las de tiro inducido, estas a su vez proporcionan un control sobre el flujo de aire suministrado, una sección transversal y altura pequeña en comparación con las de tiro natural. También se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de acercamiento muy pequeños (hasta de 1 o 2 °C, aunque en la práctica realmente es de 3 o 4 °C).

En la torres de tiro forzado, la circulación del aire en la torre descrita, la proporciona un ventilador que se ubica en la parte inferior de la torre, el cual

permite un control, manipulación y fácil mantenimiento. Igualmente se evita la exposición del ventilador a ambientes corrosivos.

En la torre de tiro inducido, el ventilador se ubica en la parte superior de la torre, donde se obtienen problemas de corrosión, ya que los elementos están expuestos al aire húmedo que circula al final de la torre, se hace complejo realizar un control, manipulación y mantenimiento.

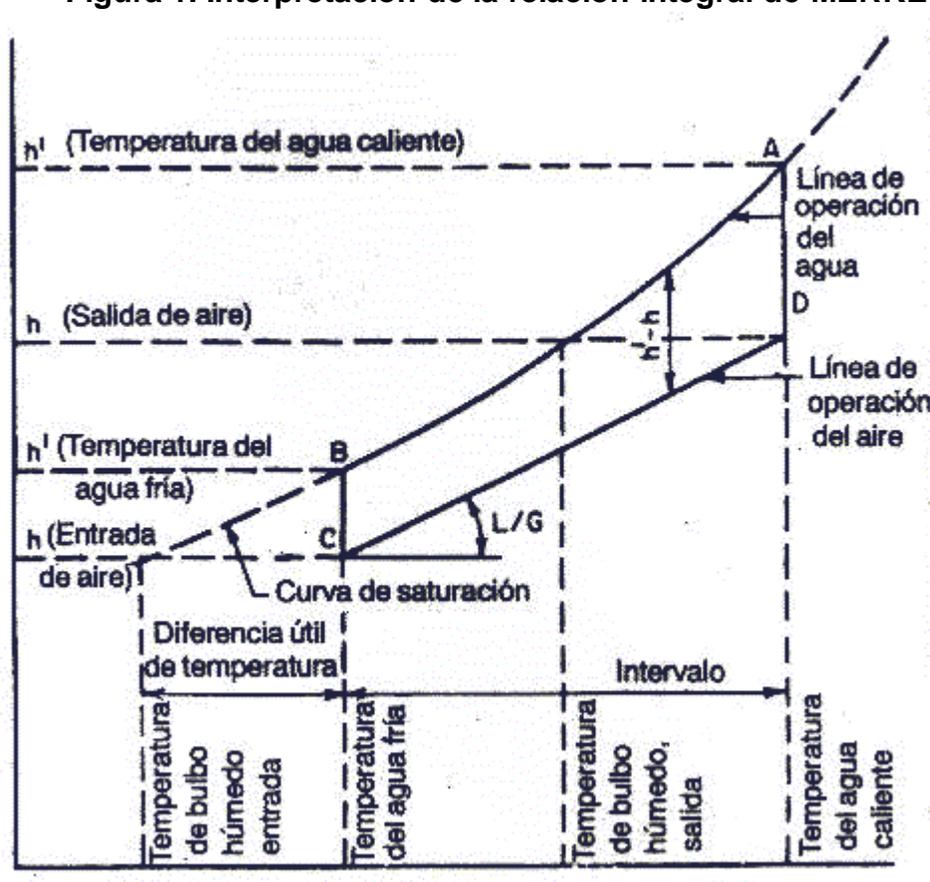
2.2.2 Torres de enfriamiento de tiro natural

Se asemeja a una chimenea y trabaja como ella. Son de gran altura y deben instalarse en un lugar despejado para evitar interrupción del flujo de aire a su interior. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento que circula a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente. La tasa de flujo de aire es controlada por las condiciones de aire atmosférico; las torres de enfriamiento de tiro natural no necesitan ninguna fuente de potencia externa para inducir el aire, pero su construcción resulta un poco más costosa que las torres de enfriamiento de tiro mecánico. El perfil de estas torres es hiperbólico y algunas tienen más de 100 metros de altura. La función del perfil hiperbólico es lograr una mayor resistencia estructural y no tiene nada que ver con las condiciones termodinámicas.

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento, es la que desarrolló MERKEL. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora. Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el

aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento. En la figura 1, se ilustran las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en una torre de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua.

Figura 1. Interpretación de la relación integral de MERKEL



Fuente: DONAL Q., Kern, "Transferencia por contacto directo: Torres de enfriamiento",
Procesos de Transferencia de Calor

La línea de operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y salida. La línea

de operación del aire inicia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC, representa la fuerza impulsora inicial ($h' - h$). El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas.

La temperatura mínima que puede alcanzar el agua, en teoría, es la temperatura de bulbo seco del aire de entrada para intercambiadores de calor. En torres de enfriamiento donde hay contacto directo entre el aire y el agua, la temperatura del agua, en teoría, puede descender hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire. Por tanto las fuerzas que provocan la transferencia de calor desde el agua caliente, hasta el aire frío no saturado son: la diferencia de temperatura de bulbo seco y la diferencia de presiones del vapor.

La principal desventaja de una torre de enfriamiento es la pérdida de agua por evaporación. El análisis de lo que ocurre al interior de una torre de enfriamiento, requiere conocimientos de transferencia de calor y de masa, de igual forma si se conocen los estados iniciales y finales se puede aplicar la primer ley de la termodinámica y la ley de la conservación de la energía. El agua de reposición puede suministrarse directamente en la cisterna; por lo cual se cumple que $\dot{m}_w1 = \dot{m}_w2 = \dot{m}_w$ y entonces el balance de humedad para la torre es $\dot{m}_r = \dot{m}_a \omega_2 - \omega_1$, esta ecuación indica el agua a reponer en el proceso. [7]

La humedad específica del aire es la razón entre la masa de vapor de agua m_v y la masa de aire seco m_a , presentes en un volumen dado de la mezcla. La humedad del aire es determinante en el grado de comodidad de un ambiente, por ejemplo: cuando el aire está completamente seco, el ser humano tolera

temperaturas altas durante tiempos prolongados, mientras que el aire saturado le resulta insoportable a la temperatura del cuerpo, aun por pocos minutos. [7]

La ecuación que relaciona este parámetro viene dado por:

$$\omega = \frac{mv}{ma} \quad \text{Ec. 1 [7]}$$

La humedad relativa es la razón entre la masa de vapor que hay en un volumen dado de la mezcla y la masa de vapor que habría en ese mismo volumen, si la mezcla estuviera saturada en la misma temperatura (mv^*) y viene dada por la ecuación: [7]

$$\Phi = \frac{mv}{mv^*} \quad \text{Ec. 2 [7]}$$

La humedad relativa es independiente de la presión parcial del aire y por consiguiente de la presión total. Para una temperatura dada, la Φ varía entre 0 (aire seco) y 1 (aire saturado). La humedad específica nos da el contenido de humedad con relación al aire seco presente. [7]

La temperatura de punto de rocío, es aquella a la cual el aire húmedo se satura como consecuencia de un enfriamiento isobárico, es decir; es la temperatura a la cual comienza la condensación del vapor, si la mezcla se enfría a presión constante. [7]

Comercialmente existen empresas como EDIBON (Equipamiento Didáctico Técnico), la cual se encarga de fabricar torres de enfriamiento de sobremesa controladas desde un PC, con un sistema SCADA que incluye el equipo, caja-interface, tarjeta de adquisición de datos, software para la supervisión y control, cables, accesorios y manuales. Esta torre permite a los estudiantes apreciar las características de operación de las torres industriales a nivel didáctico. También cuentan con una torre de enfriamiento básica la cual es controlada desde una consola electrónica. Las especificaciones de estos dos prototipos de torres se encuentran consignadas en el **ANEXO 4**.

Otra de las empresas encargadas de la fabricación de estos equipos es G.U.N.T HAMBURG, la cual cuenta con una Torre de Refrigeración por Vía Húmeda WL 320, en la que el agua a enfriar es rociada por instalaciones de rociado. El agua y el aire entran en contacto directo en contra corriente. El equipo WL 320 estudia los componentes principales y el principio de una torre de refrigeración ventilada forzosamente. En un depósito se calienta el agua y se transporta hacia un pulverizador por medio de una bomba. Este equipo cuenta con una columna de refrigeración, un CD con el software LABVIEW, cable USB y material didáctico. Las especificaciones de este prototipo se encuentran consignadas en el **ANEXO 5**.

2.3 COMISIONAMIENTO

El desarrollo del comisionamiento, no solo es un proceso de pruebas y puesta en marcha de un equipo; es un proceso sistemático para garantizar que el conjunto de elementos que conforman un proyecto, interactúen en sí, de acuerdo con la documentación originada en la planeación, diseño, construcción y las necesidades de operación del cliente. Por tal motivo, el comisionamiento debe ejecutarse con la planeación del proyecto, desarrollar las etapas de diseño y construcción; teniendo en cuenta la normatividad vigente y las normas de seguridad pertinentes para

evitar accidentes que puedan ocasionar lesiones graves o leves al personal involucrado en el proceso.

Las torres de enfriamiento didácticas, cuentan con equipos para el monitoreo del proceso, sistemas de control e instrumentación, que van cambiando a medida que las tecnologías avanzan, con un PLC e instrumentación adecuada para el tipo de proceso que se lleva a cabo, realizando una documentación estructurada con las normas y sistemas de información que apoyen el desarrollo del proceso y posibles construcciones futuras de nuevas torres de enfriamiento didácticas.

El comisionamiento de un elemento de medición, por ejemplo, debe verificar el desempeño del equipo correspondiente a las características de operación y los demás factores físicos involucrados para su correcto funcionamiento, igualmente demostrar la capacidad de realizar el trabajo para el cual fue diseñado. Los parámetros operacionales del instrumento deben ser medidos para tener información completa de su comportamiento y hacer una retroalimentación con la información obtenida, para realizar las respectivas conclusiones y decisiones de los requerimientos del cliente. Continuamente se deberán realizar rutinas de inspección y mantenimiento, teniendo como base la información obtenida en el comisionamiento para realizar los ajustes necesarios de los elementos involucrados, optimizar el proceso y lograr mejores rendimientos. Igualmente la documentación obtenida deberá ser anexada a los diferentes manuales de operación y mantenimiento que se elaboren durante las posteriores o siguientes etapas del mismo. El proceso de comisionamiento puede ser aplicado a equipos nuevos y para reacondicionar equipos que hayan cumplido su vida útil. Luego de la etapa de pruebas y puesta en marcha del equipo, se realiza la entrega con la documentación necesaria para su posterior utilización. Este desarrollo permite realizar nuevas modificaciones al sistema, actualizarlo con nuevas técnicas e

instrumentos disponibles en el mercado, que va avanzando continuamente; obteniendo mejores rendimientos y aumentando la vida útil del equipo.

Existen empresas a nivel industrial que cuentan con “*Sistemas de optimización de torres de enfriamiento de agua*”, como lo es Real time service S.A, “*Automatización de torres de enfriamiento y chillers*”, realizado por IIPSA (Ingeniería y Proyectos S.A), donde se encargan de realizar un análisis de los equipos y posteriormente hacer un mejoramiento de éstos y de los sistemas de control existentes; logrando un sistema que permite alcanzar ahorros en el consumo energético y reducir el impacto ambiental. Cada planta tiene sus propias particularidades en cuanto a instrumentación, automatización y control, por tal motivo los beneficios que se quieran lograr dependerán de la disposición que el cliente tiene para obtener un mejor aprovechamiento energético, teniendo en cuenta, que el éxito económico de cualquier empresa se basa en el uso eficiente de la energía consumida en los procesos. [2]

Las torres de enfriamiento didácticas, son una herramienta académica que permite a los estudiantes observar todo el proceso que se requiere para su planeación, diseño y construcción, de acuerdo a las condiciones operacionales que se requiera, observar las características de operación del sistema, conocer el funcionamiento del sistema de control e instrumentación y hacer una interacción del estudiante con el equipo, para hacer de este, una experiencia casi real de los procesos que se llevan a cabo en la industrial donde son utilizadas las torres de enfriamiento. Estos equipos sirven como ejemplo para analizar el proceso de transferencia de calor entre un fluido caliente y un fluido frío o a temperatura ambiente, ya que éste sede calor mediante un intercambio de calor sensible (diferencia de temperatura entre el aire y el agua) y latente (cambio de estado físico del agua a vapor), con una corriente de aire seco y frío que circula por la

torre; logrando exponer las gotas de agua el mayor tiempo posible con el aire que circula en contraflujo por el interior de la chimenea, se evapora la película exterior, enfriándola consecuentemente.

2.3.1 Objetivos del comisionamiento

Plantear la creación de un proceso sistemático para asegurar que los elementos que conforman una torre de enfriamiento didáctica, interactúen de acuerdo con los documentos de planeación, diseño, montaje y puesta en marcha del equipo y que cumplan con las necesidades operacionales del sistema. Se utilizará la documentación entregada por los fabricantes y la recopilada en la etapa de puesta en marcha y pruebas para construir una adecuada base de datos de los equipos, que contenga información que sirva como guía de capacitación para el usuario.

2.4 AUTOMATIZACIÓN

La industria cada día presenta diferentes alternativas para lograr el mejoramiento continuo de los procesos y la seguridad de los operadores, entre éstas se encuentra la automatización, donde se obtienen beneficios como aumento de la velocidad, la calidad y el nivel de producción; todos estos dependiendo del grado de automatización.

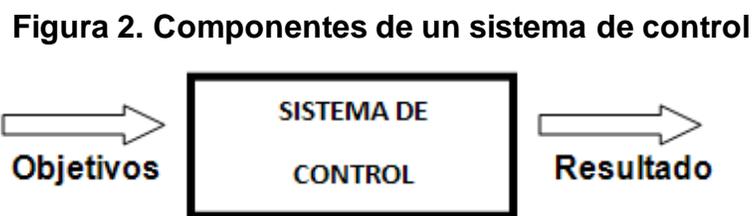
2.4.1 Sistemas de control

El control automático, ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos industriales modernos y de manufactura; también es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos. [3]

Debido a que los avances en la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, aligerar la carga de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias, así como de otras actividades, casi todos los ingenieros y científicos deben tener un buen conocimiento de este campo. [3]

La capacidad del sistema de supervisión para monitorear las variables a controlar, tiene como resultado una operación más eficiente que la sencilla operación manual. En este esquema la simple medición de la temperatura de agua fría, y su comparación con un valor de SETPOINT establecido, determina si se necesita más o menos caudal de agua. El modo de control puede ser eficiente o ineficiente, dependiendo de los elementos finales que se posea para regular el caudal de aire. La estrategia de control podría implementarse en varios niveles desde un software asesor para el operador, pasando por un control por PC, hasta un PLC que comande el funcionamiento de la torre. [2]

En la figura 2, se relacionan los componentes básicos para implementar un sistema de control.



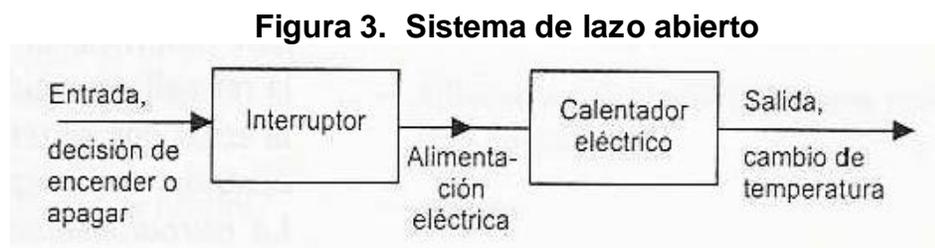
Fuente: Autores del proyecto

2.4.1.1 Sistemas de control de lazo abierto

Son sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En otras palabras, en un sistema de control de lazo abierto no se mide la salida, ni se realimenta para compararla con la entrada. Por tanto, a cada entrada de referencia

le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto solo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. Estos sistemas de control operan en base al tiempo. [3]

Un ejemplo básico sería un sistema calentador de agua (véase figura 3), el cual está conformado por resistencias eléctricas, estas se desactivarían en un tiempo determinado, sin importar cuál sea la temperatura final del líquido, en este ejemplo se observa que la entrada es indiferente a la señal que arroja el sistema en la salida del proceso.

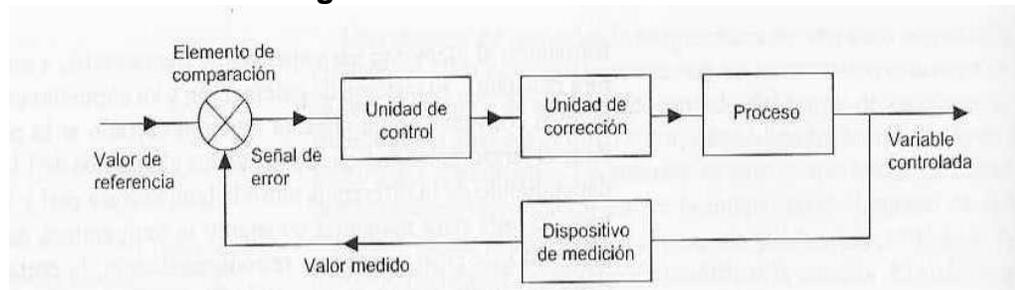


Fuente: W. Bolton. Mecatrónica

2.4.1.2 Sistemas de control de lazo cerrado

Son sistemas de control con retroalimentación (véase figura 4). En éstos sistemas, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. [3]

Figura 4. Sistema de lazo cerrado



Fuente: W. Bolton. Mecatrónica

2.4.1.3 Comparación de los sistemas de control

Los sistemas en lazo abierto tienen la ventaja de ser relativamente sencillos, por lo que su costo es bajo y en general su confiabilidad es buena. Sin embargo, con frecuencia son imprecisos ya que no hay corrección de errores. Los sistemas de lazo cerrado, por el contrario, tienen la ventaja de ser bastante precisos para igualar el valor real y el deseado; pero son más complejos y, por lo tanto, más costosos y con mayor probabilidad de descomponerse debido a la gran cantidad de elementos que lo integran. [5]

2.4.2 PLC (Controlador Lógico Programable)

Es un dispositivo electrónico digital que usa una memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas, de configuración de secuencia, de sincronización, de conteo y de aritméticas, para el control de maquinaria y procesos.

Este tipo de procesadores se denomina lógico debido a que su programación básicamente tiene que ver con la ejecución de operaciones lógicas y de conmutación. Los dispositivos de entrada y los dispositivos de salida, que están bajo control se conectan al PLC; de esta manera el controlador monitorea las

entradas y salidas, de acuerdo con el programa diseñado por el operador para el PLC y que este conserva en memoria, y de esta manera se controlan maquinas y procesos.

Un PLC tiene la ventaja que permite modificar un sistema de control sin tener que volver a cablear las conexiones de los dispositivos de entrada y salida; basta con que el operador digite en un teclado las instrucciones correspondientes.

Si bien los PLC son similares a las computadoras, tienen características específicas que permiten su empleo como controladores.

Estas son:

- Son robustos y están diseñados para resistir vibraciones, temperatura, humedad y ruido.
- La interfaz para las entradas y las salidas están dentro del controlador.
- Es muy fácil programarlos, así como entender el lenguaje de programación. La programación básicamente consiste en operaciones lógicas y conmutación.

Los primeros PLC fueron concebidos en 1968. Hoy en día su empleo está muy generalizado, habiendo una gran variedad de ellos, desde pequeñas unidades autónomas que cuentan con apenas 20 entradas y salidas, hasta sistemas modulares que manejan grandes cantidades de entradas/salidas y llevar acabo modos de control PID.

2.4.3 Sensores y transductores

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. Por ejemplo, en el caso de un elemento para medir mediante resistencia eléctrica, la cantidad que se mide es la temperatura y

el sensor transforma una entrada de temperatura en un cambio en la resistencia. Con frecuencia se utiliza el término transductor en vez de sensor. Los transductores se definen como el elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado. Es decir, los sensores son transductores. Sin embargo, en un sistema de medición se pueden utilizar transductores, además de sensores, en otras partes del sistema para convertir señales en una forma dada en otra distinta. [5]

2.4.4 Acondicionamiento de señales

La señal de salida del sensor de un sistema de medición en general se debe procesar de una forma adecuada para la siguiente etapa de la operación. La señal puede ser, por ejemplo, demasiado pequeña, y sería necesario amplificarla; podría contener interferencias que eliminar; ser no lineal y requerir su linealización; ser analógica; ser un valor de resistencia y convertirla en un cambio en corriente; consistir en un cambio de voltaje y convertirla en un cambio de corriente de magnitud adecuada. A todas estas modificaciones se les designa en general con el término de Acondicionamiento de Señal. Por ejemplo, la salida de un termopar es un pequeño voltaje de unos cuantos mili voltios. Por lo tanto, es necesario utilizar un modulo de acondicionamiento de señal para modificar dicha salida y convertirla en una señal de corriente de tamaño adecuado, contar con un medio para rechazar ruido, lograr una linealización, y una compensación por unión fría(es decir, la compensación cuando la unión fría no está a 0 °C) [5]

2.5 STEP 7-MICROWIN V4.0

El software de programación STEP 7-MicroWIN V4.0 ofrece potentes herramientas que permiten ahorrar mucho tiempo, lo que redundaría en un enorme ahorro de costos durante el trabajo cotidiano. El software de programación se maneja de forma análoga a las aplicaciones estándar de Windows. MicroWIN está dotado de

todas las herramientas necesarias para programar la serie completa de PLCs S7-200. Para ello, se dispone de un repertorio de instrucciones de gran rendimiento como la programación conforme a la norma IEC 1131. [9]

2.5.1 Lenguajes y editores de programación s7-200

Debido a la globalización se están intentando estandarizar los diferentes tipos de lenguaje de programación con el fin integrar las todas tecnologías que rigen en cada continente. Los S7-200 ofrecen números tipos de operaciones que permiten solucionar una gran variedad de tareas de automatización

Hay que tener en cuenta que el lenguaje de programación de los equipos siemens (tecnología SIMATIC) difieren de la norma IEC donde cambia el nombre de las operaciones y el de los lenguajes, igualmente el software de programación MicroWIN v4.0 permite elegir entre diferentes editores para crear programas de control dependiendo de la facilidad que tenga el programador, ya sea en entorno de programación gráfico, mientras que otros programadores utilizan un editor textual.

En SIMATIC se habla del lenguaje AWL (Lista de instrucciones), el lenguaje KOP (Esquema de contactos) que equivale en IEC 1131-3 al lenguaje LD (Diagrama de escalera). Igualmente, el lenguaje FUP (Diagrama de funciones) de SIMATIC se denomina FBD (Diagrama de bloques funcionales) en IEC 1131-3.

- **KOP:** Es probablemente el lenguaje predilecto de numerosos programadores y encargados del mantenimiento de sistemas de automatización. Básicamente, los programas KOP hacen que la CPU emule la circulación de corriente eléctrica desde una fuente de alimentación, a través de una serie de condiciones lógicas de entrada que, a su vez, habilitan condiciones lógicas de salida. Por lo general, la lógica se divide en

unidades pequeñas y de fácil comprensión llamadas “segmentos” o “networks”. El programa se ejecuta segmento por segmento, de izquierda a derecha y luego de arriba a abajo. Tras alcanzar la CPU el final del programa, comienza nuevamente en la primera operación del mismo. [10].

- **AWL:** El editor AWL (Lista de instrucciones) de STEP 7-MicroWIN permite crear programas de control, el editor AWL se adecúa especialmente para los programadores expertos ya familiarizados con los sistemas de automatización (PLCs) y con la programación lógica. También sirve para crear ciertos programas que, de otra forma, no se podrían programar con los editores KOP ni FUP. Ello se debe a que AWL es el lenguaje nativo de la CPU, a diferencia de los editores gráficos en los que son aplicables ciertas restricciones para poder dibujar los diagramas correctamente. [10]
- **FUP:** El editor FUP (Diagrama de funciones) de STEP 7-MicroWIN permite visualizar las operaciones en forma de cuadros lógicos similares a los circuitos de puertas lógicas. En FUP no existen contactos ni bobinas como en el editor KOP, pero sí hay operaciones equivalentes que se representan en forma de cuadros. La lógica del programa se deriva de las conexiones entre las operaciones de cuadro. Ello significa que la salida de una operación (p.ej. un cuadro AND) se puede utilizar para habilitar otra operación (p.ej. un temporizador), con objeto de crear la lógica de control necesaria. Dichas conexiones permiten solucionar numerosos problemas lógicos. [10]

2.5.2 Áreas de memorias, entradas y salidas

Las memorias, entradas y salidas, utilizadas en los PLC SIMENS y utilizadas en el proyecto para registrar, guardar y operar los diferentes datos tomados de las distintas variables se observan en la siguiente tabla:

Figura 5. Áreas de memoria y funciones de las CPUs S7—200.

Descripción	CPU 221	CPU 222	CPU 224	CPU 224XP, CPU 224XPsi	CPU 226
Tamaño del programa de usuario con edición en runtime sin edición en runtime	4096 bytes 4096 bytes	4096 bytes 4096 bytes	8192 bytes 12288 bytes	12288 bytes 16384 bytes	16384 bytes 24576 bytes
Tamaño de los datos de usuario	2048 bytes	2048 bytes	8192 bytes	10240 bytes	10240 bytes
Imagen de proceso de las entradas	I0.0 a I15.7	I0.0 a I15.7	I0.0 a I15.7	I0.0 a I15.7	I0.0 a I15.7
Imagen de proceso de las salidas	Q0.0 a Q15.7	Q0.0 a Q15.7	Q0.0 a Q15.7	Q0.0 a Q15.7	Q0.0 a Q15.7
Entradas analógicas (sólo lectura)	AIW0 a AIW30	AIW0 a AIW30	AIW0 a AIW62	AIW0 a AIW62	AIW0 a AIW62
Salidas analógicas (sólo escritura)	AQW0 a AQW30	AQW0 a AQW30	AQW0 a AQW62	AQW0 a AQW62	AQW0 a AQW62
Memoria de variables (V)	VB0 a VB2047	VB0 a VB2047	VB0 a VB8191	VB0 a VB10239	VB0 a VB10239
Memoria local (L) ¹	LB0 a LB63	LB0 a LB63	LB0 a LB63	LB0 a LB63	LB0 a LB63
Área de marcas (M)	M0.0 a M31.7	M0.0 a M31.7	M0.0 a M31.7	M0.0 a M31.7	M0.0 a M31.7
Marcas especiales (SM) Sólo lectura	SM0.0 a SM179.7 SM0.0 a SM29.7	SM0.0 a SM299.7 SM0.0 a SM29.7	SM0.0 a SM549.7 SM0.0 a SM29.7	SM0.0 a SM549.7 SM0.0 a SM29.7	SM0.0 a SM549.7 SM0.0 a SM29.7
Temporizadores	256 (T0 a T255)	256 (T0 a T255)	256 (T0 a T255)	256 (T0 a T255)	256 (T0 a T255)
Retardo a la conexión con memoria	1 ms 10 ms 100 ms	T0, T64 T1 a T4 y T65 a T68 T5 a T31 y T69 a T95	T0, T64 T1 a T4 y T65 a T68 T5 a T31 y T69 a T95	T0, T64 T1 a T4 y T65 a T68 T5 a T31 y T69 a T95	T0, T64 T1 a T4 y T65 a T68 T5 a T31 y T69 a T95
Retardo a la conexión/desconexión	1 ms 10 ms 100 ms	T32, T96 T33 a T36 y T97 a T100 T37 a T63 y T101 a T255	T32, T96 T33 a T36 y T97 a T100 T37 a T63 y T101 a T255	T32, T96 T33 a T36 y T97 a T100 T37 a T63 y T101 a T255	T32, T96 T33 a T36 y T97 a T100 T37 a T63 y T101 a T255
Contadores	C0 a C255	C0 a C255	C0 a C255	C0 a C255	C0 a C255
Contadores rápidos	HC0 a HC5	HC0 a HC5	HC0 a HC5	HC0 a HC5	HC0 a HC5
Relés de control secuencial (S)	S0.0 a S31.7	S0.0 a S31.7	S0.0 a S31.7	S0.0 a S31.7	S0.0 a S31.7
Acumuladores	AC0 a AC3	AC0 a AC3	AC0 a AC3	AC0 a AC3	AC0 a AC3
Salto a metas	0 a 255	0 a 255	0 a 255	0 a 255	0 a 255
Llamadas a subrutinas	0 a 63	0 a 63	0 a 63	0 a 63	0 a 127
Rutinas de interrupción	0 a 127	0 a 127	0 a 127	0 a 127	0 a 127
Detectar flanco positivo/negativo	256	256	256	256	256
Lazos PID	0 a 7	0 a 7	0 a 7	0 a 7	0 a 7
Puertos	Puerto 0	Puerto 0	Puerto 0	Puerto 0, puerto 1	Puerto 0, puerto 1

Fuente: STEP 7--Micro/WIN (versión 3.0 o posterior) reserva LB60 a LB63. Manual

3 COMISIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA

3.1 EQUIPOS

La torre de enfriamiento didáctica, cuenta con una bomba centrífuga PEDROLLO PUMP PKm 60, monofásica de 0.5 H.P. Con un caudal máximo de 40 L/min, H máx = 40 m., con la cual se 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 de un ventilador situado en la base de la torre de enfriamiento. Estos equipos electromecánicos se encuentran en correcto estado y sus manuales de operación y mantenimiento se encuentran consignados en el **ANEXO 3**.

3.2 EQUIPOS DE CONTROL

La estructura de automatización implementada para el control de la torre de enfriamiento didáctica es un sistema de automatización integrado SIEMENS S7-200, compuesto de una CPU 224 XP, cuatro módulos de entrada y salida análogas EM 235 y un módulo de Ethernet CP 243-1.

En la figura 6, se encuentra el esquema del tablero de control, donde se evidencian las conexiones e instalación de los diferentes elementos que lo conforman.

Figura 6. Tablero de control.



Fuente: Autores del proyecto.

3.3 EQUIPOS PARA EL MONITOREO Y CONTROL DEL PROCESO

En la instrumentación utilizada para el monitoreo y control del proceso se tiene: dos RTD´s (sensores de temperatura), una válvula proporcional DANFOSS, con la cual se realizó el control del flujo de agua, una válvula on-off marca ASCO para controlar el nivel del agua del depósito de almacenamiento; dos sensores de presión AUTONICS PSA/PSB SERIES, un sensor de flujo 2536 Rotor-X flowsensors, dos sensores de humedad modelo HS-801 HUMEDITY & TEMPERATURE TRANSMITTER.

3.3.1 Válvula proporcional

Para la automatización del proceso se cambió la válvula de globo manual que tenía el equipo y se instaló la electroválvula proporcional DANFOSS, para poder hacer el control del flujo de agua, dependiendo de las condiciones de operación que requiera el estudiante. Para la selección de la válvula se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Caudal que circula por la tubería.
- K_v [m^3 / h]
- El líquido utilizado en el proceso, para este caso es agua.
- Señal de control de 4-20 mA.
- Tensión de alimentación de 24 V cc.

Para el rango de caudal que circula por la tubería se tomó una muestra, realizando aforos, los cuales consistía en calcular el volumen recolectado en determinado tiempo; para después hacer un análisis estadístico y determinar el número de aforos necesario para tener una muestra representativa, teniendo en cuenta las condiciones de éstas. Las pruebas se realizaron con la válvula de globo totalmente abierta para obtener el caudal máximo que circulaba en la tubería. Si bien el porcentaje de error se adoptó con base en las observaciones y recomendaciones de expertos, no se consiguieron referencias bibliográficas exactas al respecto. Los resultados fueron los siguientes:

- Válvula de globo manual totalmente abierta.

Número de prueba	Caudal [l/min)
Q1 =	9,45
Q2 =	9,90
Q3 =	8,92
Q4 =	9,00
Q5 =	9,20
Q6 =	10,82
Qpromedio =	9,55

Con este valor se hace un análisis estadístico para determinar el número de pruebas para una buena muestra. La ecuación más indicada es la siguiente:

$$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2} \quad \text{Ec. 3 [13]}$$

Donde:

n = Número de pruebas a realizar

Z = 1,96 para un nivel de confianza del 95%

σ^2 = Varianza

e = Margen de error en valor absoluto

σ^2 =	0,42848081
σ =	0,65458445

e (margen de error)		n (número de pruebas)		
5%	0,4775	7,219378	≈ 8	o.k
2%	0,1910	45,12111	≈ 46	

Debido que estas pruebas fueron realizadas calculando el volumen recolectado en un tiempo determinado, se tiene incertidumbre sobre la exactitud de este procedimiento y por consiguiente el valor del margen de error es del 5%, los

autores del proyecto consideran que es un valor aceptado para este tipo de procedimiento.

Se realizan las pruebas faltantes y se determina el nuevo Caudal promedio representativo.

Q7 =	10,52
Q8 =	9,22
Qprom final=	9,63 L/min

Después de realizado este cálculo se buscó en los catálogos de proveedores de válvulas proporcionales y se encontró que la que más se acercaba a las necesidades del proyecto, fue la marca DANFOSS por su costo, fácil adquisición y los caudales se ajustaban al requerido para poder hacer el control. El manual de operación y mantenimiento se encuentra consignado en el **ANEXO 3**.

Instalada la electroválvula proporcional en la tubería principal, se realizaron nuevamente pruebas para verificar que los caudales se ajustaban para el control que se realizaría.

Prueba	Caudal [l/min]
Q1 =	8,37
Q2 =	8,58
Q3 =	8,67
Q4 =	8,00
Q5 =	8,26
Qprom =	8,37

Con este valor se hace un análisis estadístico para determinar el número de pruebas para una buena muestra. La ecuación más indicada es la siguiente:

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Donde:

n = Número de pruebas a realizar

Z = 1,96 para un nivel de confianza del 95%

σ^2 = Varianza

e = Margen de error en valor absoluto

σ^2 =	0,05674416
--------------	------------

e (margen de error)		n (número de pruebas)		
5%	0,41	1,241727	≈ 1	
				Numero de pruebas elegido
2%	0,16	7,760791	≈ 8	
1%	0,08	31,04317	≈ 31	

Para estas pruebas los autores del proyecto consideran un margen de error del 2%, ya que se puede tomar un valor más preciso del caudal que circula por la

válvula, mediante la programación de ésta en MicroWin. Se realizan las pruebas faltantes y se determina el nuevo caudal promedio representativo.

Q6 =	8,76
Q7 =	9
Q8 =	8,91
Q promedio =	8,57

Teniendo el caudal máximo se puede definir los límites del control del flujo de agua, que serían desde 8,57 l/min hasta un valor por encima de 5 lt/min que es el mínimo caudal que suministra la bomba.

En la figura 7, se resaltan las características de la válvula seleccionada.

Figura 7. Selección de la válvula

Pedido	Válvula											
	Co-nexión ISO 228/1	Material de junta	valor k_v [m ³ /h]	Temp. de fluido		Selección de modelo		Presión difer. admisible(bar) / Modelo de bobina			Código sin bobina Estándar	
				Min. [°C]	Máx. [°C]	Modelo principal	Especificación	Min.	Máx.			
								BK	BM	BL		
	G ¼	PTFE	0.8	-10	+80	EV260B 6B	G 14T NC000	0,5	10	10	10	032U8052
	G ¾	PTFE	0.8	-10	+80	EV260B 6B	G 38T NC000	0,5	10	10	10	032U8053
	G ½	PTFE	1.3	-10	+80	EV260B 10B	G 38T NC000	0,5	10	10	10	032U8054
	G ½	PTFE	1.3	-10	+80	EV260B 10B	G 12T NC000	0,5	10	10	10	032U8055
	G ½	PTFE	2.1	-10	+80	EV260B 15B	G 12T NC000	0,5	10	10	10	032U8056
	G ¾	PTFE	5.0	-10	+80	EV260B 20B	C 34T NC000	0,5	10	10	10	032U8057

Pedido	Bobina				
	Descripción	Supply voltage	Señal de control	Especificación	Código
	Sin generador de señales	24V ca rectificada de onda completa	300 - 600 mA	BK024D	018Z6987
	Con generador de señales	21 a 30 V cc	0 - 10 V	BM024D	018Z0290
			4 - 20 mA	BL024D	018Z0291

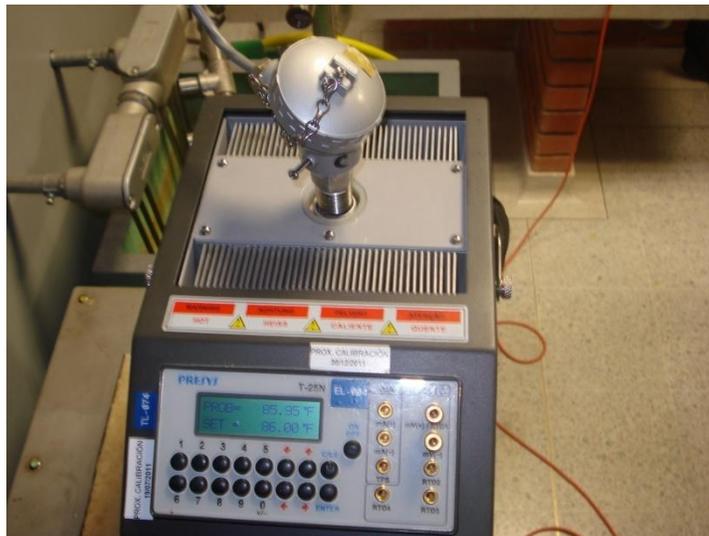
Fuente: Autores del proyecto

3.3.2 Rtd PT 100

Una RTD PT100 es un sensor de temperatura que basa su funcionamiento en la variación de resistencias a cambios de temperatura en el medio. El elemento consiste en un enrollamiento muy fino de platino bobinado entre capas de material aislante y protegido por un revestimiento cerámico.

Para revisar el funcionamiento de estos sensores se utilizó un bloque seco calibrado, que es usado principalmente para la calibración de RTDS y tiene la ventaja que alcanza temperaturas más altas que la de los baños líquidos; también ofrece beneficios como: exactitud, son equipos portátiles de fácil desplazamiento y soportan cambios de temperatura rápidos. Este equipo fue prestado por la Corporación CDT de Gas, en el cual se hicieron pruebas para asegurar su correcto funcionamiento.

Figura 8. Revisión de sensor de temperatura 1



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 8 y 9, se evidencia la revisión del sensor de temperatura 1 y 2 con el equipo calibrado, como primera instancia se introduce la RTD a calibrar dentro del bloque seco, se ajusta una temperatura en grados Fahrenheit en el patrón de referencia, se registran los datos arrojados por el PLC en formato decimal para posteriormente hacer la respectiva comparación. Se repite el mismo procedimiento para 86 °F (30 °C), 122°F (50 °C) y 158 °F (70 °C); estos puntos se toman teniendo en cuenta el rango de operación de los sensores de temperatura, que va de 0 a 100 °C.

Figura 9. Revisión del sensor de temperatura 2



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 1. Datos primera prueba del sensor de temperatura de entrada.

PRUEBA 1 A 30 C → 86 F				
	Instrumento patrón		Valores del sensor	
Prueba	°F	°C	Decimal	°C
1	86,02	30,01	18228	36,17
2	86,01	30,00	17971	34,96
3	85,99	29,99	17957	34,89
4	86,04	30,02	17904	34,64
5	85,95	29,97	18008	35,13
6	86,03	30,01	18002	35,10
7	85,99	29,99	18003	35,11
8	85,96	29,97	18031	35,24
9	86,01	30,00	18026	35,22
10	86,05	30,02	18022	35,20
11	86,02	30,01	18092	35,53
12	85,95	29,97	18048	35,32
13	86,09	30,05	18097	35,55
Valores promedio =	86,00	30,00	18029,92	35,23
Varianza =	0,0015	0,0005	5740,37	0,12
Desvstandar=	0,0392	0,0218	75,7653	0,3582
Margen de error =	0,0213	0,0118	41,1865	0,1947
%	0,0248	0,0394	0,2284	0,5525

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 1, están los valores del primer punto de referencia de la prueba realizada al sensor de temperatura de entrada, en valor decimal arrojado por el PLC, el patrón de referencia y los valores linealizados en ° C. Se puede observar que hay una diferencia de temperatura en la medición de 5,23 °C aproximadamente con respecto al patrón de referencia. Lo que permite hacer un ajuste de este valor en la programación del PLC para obtener datos más confiables del proceso.

Tabla 2. Datos segunda prueba del sensor de temperatura de entrada.

<i>PRUEBA 2 A 50 C → 122 F</i>				
	Instrumento patrón		Valores del sensor	
Prueba	°F	°C	Decimal	°C
1	122,02	50,01	21574	51,99
2	122,01	50,00	21699	52,58
3	122,01	50,00	21815	53,13
4	122,01	50,00	21840	53,25
5	122,01	50,00	21917	53,61
6	122,01	50,00	21973	53,88
7	122,01	50,00	22009	54,05
8	122,01	50,00	22090	54,43
9	122,01	50,00	22123	54,59
10	122,02	50,01	22189	54,90
11	122,02	50,01	22222	55,05
12	122,01	50,00	22257	55,22
13	122	50,00	22300	55,42
Valores promedio =	122,01	50,00	22000,615	54,01
Varianza =	0,00003	0,00001	46452,23	1,0383

Desvstandar=	0,00533	0,00296	215,5278	1,0189
Margen de error =	0,00290	0,00161	117,1623	0,5539
%	0,00237	0,00322	0,5325	1,0255

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 2, se observa que la diferencia de la medición entre el patrón y el sensor, disminuyó con respecto al punto anterior 1°C aproximadamente. De igual forma, el porcentaje de error de la prueba es mayor para este punto que el anterior. Estos datos son tomados para hacer referencia de valores que registra el sensor del equipo, pero se debe tener en cuenta la diferencia del valor de temperatura del sensor y el patrón de referencia en la programación y los cálculos que se obtengan del proceso.

Tabla 3. Datos tercera prueba del sensor de temperatura de entrada.

<i>PRUEBA 3 A 70 C → 158 F</i>				
	Instrumento patrón		Valores del sensor	
Prueba	°F	°C	Decimal	°C
1	158,00	70,00	26778	76,59
2	158,01	70,00	26802	76,71
3	158,00	70,00	26843	76,90
4	158,00	70,00	26880	77,08
5	158,01	70,00	26910	77,22
6	158,00	70,00	26930	77,31
7	158,00	70,00	26931	77,32
8	158,00	70,00	26944	77,38
9	158,10	70,05	26989	77,59

10	157,99	69,99	27000	77,64
11	157,99	69,99	27008	77,68
12	158,01	70,00	27013	77,70
13	158,02	70,01	27024	77,76
Valores promedio =	158,01	70,00	26927,0769	77,30
Varianza =	0,0007	0,0002	6171,7633	0,1379
Desvstandar=	0,0272	0,0151	78,5606	0,3714
Margen de error =	0,0148	0,0082	42,7060	0,2019
%	0,0093	0,0117	0,1586	0,2612

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 3, la primera columna se muestran el número de datos que fueron tomados durante el proceso de calibración, en las columnas 2 y 3 se observa los datos arrojados por el instrumento patrón, en la columna 4 están registrados las señales adquiridas por el PLC en formato decimal, y en la columna 5 se muestra los valores decimales ya linealizados y convertidos a su equivalente en temperatura.

Se hace un promedio de los 3 valores obtenidos estadísticamente del valor de la temperatura y se determina el valor que se debe ajustar en la programación del PLC. El manual de operación y mantenimiento se encuentra consignado en el **ANEXO3**.

Tabla 4. Datos primera prueba del sensor de temperatura de salida.

PRUEBA 1 A 20 °C → 68 °F				
	Instrumento Patrón		Valores del sensor	
Prueba	°F	°C	Decimal	°C
1	68,01	20,00	7487	21,51
2	68,02	20,01	7472	21,44
3	68,04	20,02	7485	21,50
4	68,01	20,00	7401	21,14
5	68,01	20,00	7484	21,49
6	68,04	20,02	7476	21,46
7	68,01	20,00	7480	21,48
8	67,98	19,98	7482	21,48
9	68,03	20,01	7488	21,51
Valores promedio =	68,01	20,00	7472,7778	21,45
Varianza =	0,0003	0,00010	667,7284	0,0118
Desvstandar=	0,0176	0,00980	25,8404	0,1088
Margen de error =	0,0115	0,00640	16,8824	0,0711
%	0,0169	0,03200	0,2259	0,3312

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 4, están los valores del primer punto de referencia de la prueba realizada al sensor de temperatura de salida. Se puede observar que hay una diferencia de temperatura en la medición de 1,45 °C aproximadamente con respecto al patrón de referencia.

Tabla 5. Datos segunda prueba del sensor de temperatura de salida.

PRUEBA 2 A 30 °C → 86 °F				
	Instrumento Patrón		Valores del Sensor	
Prueba	°F	°C	Decimal	°C
1	85,97	29,98	9744	31,00
2	86,00	30,00	9765	31,09
3	85,97	29,98	9784	31,17
4	85,99	29,99	9830	31,37
5	86,01	30,00	9835	31,39
6	85,99	29,99	9849	31,45
7	86,02	30,01	9849	31,45
8	86,00	30,00	9864	31,51
9	86,00	30,00	9867	31,52
Valores promedio =	85,99	29,99	9820,7778	31,33
Varianza =	0,0002	0,00008	1804,8395	0,0320
Desvstandar=	0,0157	0,00873	42,4834	0,1788
Margen de error =	0,0103	0,00570	27,7558	0,1168
%	0,0119	0,01901	0,2826	0,3728

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 5, están los valores del segundo punto de referencia de la prueba realizada al sensor de temperatura de salida. Se puede observar que hay una

diferencia de temperatura en la medición de 1,34 °C aproximadamente con respecto al patrón de referencia.

Tabla 6. Datos tercera prueba del sensor de temperatura de salida.

PRUEBA 3 A 50 C → 122 F				
	Instrumento Patrón		Valores del Sensor	
Pruebas	°F	°C	Decimal	°C
1	122,01	50,00	14353	50,40
2	122,00	50,00	14405	50,62
3	122,01	50,00	14426	50,71
4	122,01	50,00	14460	50,85
5	122,01	50,00	14481	50,94
6	122,00	50,00	14498	51,01
7	122,00	50,00	14521	51,11
8	122,00	50,00	14556	51,26
9	122,01	50,00	14596	51,43
Valores promedio =	122,00	50,00	14477,333	50,93
Varianza =	0,000025	0,000008	5138,222	0,0910
Desvstandar=	0,004969	0,002761	71,681	0,3017
Margen de error =	0,003246	0,001804	46,832	0,1971
%	0,002661	0,003607	0,323	0,3870

Fuente: Autores del proyecto.

En la tabla 6, están los valores del tercer punto de referencia de la prueba realizada al sensor de temperatura de salida. Se puede observar que hay una diferencia de temperatura en la medición de 0,93 °C aproximadamente con respecto al patrón de referencia.

Se hace un promedio de los 3 valores obtenidos estadísticamente del valor de la temperatura y se determina el valor que se debe ajustar en la programación del PLC. El manual de operación y mantenimiento se encuentra consignado en el **ANEXO3**.

3.3.3 Válvula ON-OFF

La válvula on-off se utiliza para permitir o interrumpir el flujo de fluidos. Los dos tipos de operación son "normalmente cerrado" y "normalmente abierto". Se abre o cierra dependiendo de la señal enviada por el PLC esta señal es de 110 v. Se revisó su funcionamiento, se realizaron pruebas de voltaje y se verificó que la señal procedente del PLC estuviera ajustada al rango de operación. En el **ANEXO 3** está consignado el manual de operación y mantenimiento.

3.3.4 Sensor de flujo 2536

Los sensores de flujo son dispositivos que instalados en la tubería permiten determinar cuánto caudal circula por línea, enviar la información al sistema de supervisión para realizar un control del flujo dependiendo de las condiciones de operación requeridas por el usuario. El modelo 2536 tiene un procesador para manejo de señales en un amplio rango de flujo dinámico que va de 0,1m/s a 6 m/s.

El funcionamiento del sensor es mediante pulsos, medidos por un rotor que son registrados en el programa asignado. Para la programación del sensor de flujo en MicroWin, se realizaron unos aforos (véase tabla 7), para determinar cuántos pulsos se registraban en el software, dependiendo de un caudal ajustado por la válvula proporcional en diversas posiciones.

Tabla 7. Prueba del sensor de flujo con apertura de válvula al 100 %

Válvula con apertura del 100 %		
Prueba	Q1 L/min	Número de pulsos
1	8,37	55
2	8,58	54
3	8,67	51
4	8,83	54
5	8,25	54
6	8,76	52
Promedio =	8,58	53,33
Varianza =	0,0418	1,889

Fuente: Autores del proyecto.

Con estos valores se realizó un análisis estadístico para determinar el número de pruebas para una buena muestra y la ecuación más indica es la siguiente:

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Donde:

n = Número de pruebas a realizar

Z = 1,96 para un nivel de confianza del 95%

σ^2 = Varianza

e = Margen de error en valor absoluto.

e [margen de error]		n [número de pruebas]	
5%	2,6667	1,0204	
2%	1,0667	6,3777	O.k
1%	0,5333	25,5106	

Se asigna un margen de error del 2% para ésta prueba, ya que existe incertidumbre del funcionamiento del sensor de flujo por su diseño sobredimensionado. Este análisis arrojo un número de pruebas cercano a las realizadas en la tabla 7.

Tabla 8. Prueba del sensor de flujo con apertura de válvula al 75 %

Válvula con apertura del 75 %		
Prueba	Q2 L/min	Número de pulsos
1	8,46	49
2	8,34	52
3	8,28	49
4	8,28	50
5	8,52	51,5
6	8,86	49

Qprom =	8,45	50,08
Varianza =	0,0415	1,5347
Desvst =	0,2038	1,2388
Margen de error=	0,1631	0,9913
% =	1,9282	1,9793

Fuente: Autores del proyecto.

Se realiza un análisis estadístico y se obtiene:

e [margen de error]		n [número de pruebas]	
5%	2,5042	0,9402	
2%	1,0017	5,8762	O.k
1%	0,5008	23,5047	

Este análisis da como resultado un número de pruebas cercano a las realizadas en la tabla 8.

En las pruebas realizadas al instrumento, se evidencia que a caudales iguales o por debajo del 50% de apertura de la válvula, éste no registra pulsos y este problema se debe a que el sensor está sobredimensionado para los tipos de mediciones que se tiene en esta torre de enfriamiento didáctica. Las curvas de operación se encuentran incluidas en el manual de operación y mantenimiento consignado en el **ANEXO 3**.

3.3.5 Sensores de presión

La función del sensor es producir una señal proporcional al valor de la presión absoluta del fluido en el medio al que se encuentra y representarlo al usuario para hacer las correlaciones necesarias. La presión es la relación de la fuerza por unidad de área, de esta relación el sensor toma los datos del proceso, hace la retroalimentación y envía una señal para el usuario. La señal de salida es de 0 – 5 V en un rango de 0 – 100 kpa, se caracteriza por medir presión absoluta. El manual de operación y mantenimiento se encuentra consignado en el **ANEXO 3**.

3.3.6 Sensor de humedad y temperatura HTS-801

El elemento de medición lo compone un sensor de humedad SA-801 que tiene un rango de medición de 0-100% de humedad relativa en una señal de 4 – 20 mA respectivamente y un sensor de temperatura TS-801 que tiene un rango de -20 a 80 °C con una Pt 100, DIN, IEC 751 y su señal de salida también es 4 – 20 mA. Para esto se realizó una medición en ohmios en diferentes condiciones de temperatura y se compararon en la tabla de la norma DIN para sus respectivos valores en grados Celsius, ajustando el rango de acuerdo con el patrón de referencia.

Para verificar los valores de humedad relativa se utilizó como patrón de referencia un higrómetro calibrado prestado por la empresa ARM LTDA (Asesoría en Reingeniería de Mantenimiento Industrial Limitada).

Debe señalarse que el sensor de humedad relativa de entrada está dañado y por consiguiente no registra valores de humedad, el problema se trató de corregir haciendo una revisión de dicho sensor por profesionales externos, pero por falta de presupuesto y confiabilidad del trabajo no se pudo concretar. Sin embargo para efectos de cálculos se puede aproximar este valor con datos de un higrómetro externo portátil o con valores suministrados por organismos como la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) o el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

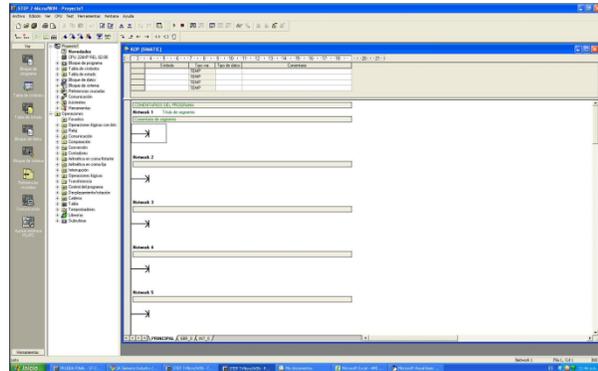
4. AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA

El esquema de programación se basa en una serie de pasos, que al desarrollarlos conjuntamente logró un sistema completo y práctico, para realizar funciones importantes de control de todos los elementos que conforman el Banco didáctico. Además permite adquirir datos y señales entregados por los sensores del equipo, también es posible manipular las distintas variables digitales y análogas, del ventilador, la bomba, la Válvula ON-OFF y válvula proporcional respectivamente.

4.1 CREACIÓN DE PROYECTO

Se ejecuta Step 7 – MicroWin, donde aparece la ventana que indica que se puede empezar a realizar la estructura de programación dependiendo del lenguaje preferido (véase figura 10), en este caso se seleccionó el lenguaje KOP (esquema de contactos), ubicado en la barra de menús, en la opción ver y se selecciona el lenguaje KOP, éste, es el más utilizado en la mayoría de programadores; también es conocido como lenguaje Ladder.

Figura 10. Pantalla de inicio en MicroWin



Fuente: Autores del proyecto.

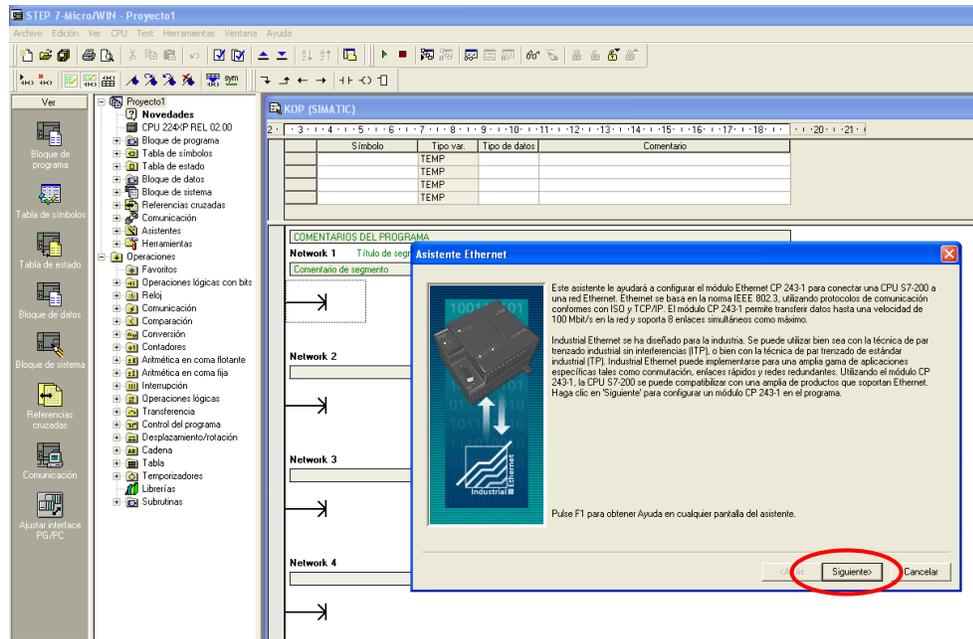
4.2 CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE

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 análogos EM 235.

4.3 CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO ETHERNET

Desde herramientas, se selecciona la opción Asistente Ethernet (véase figura 11), para iniciar con la configuración del módulo y lograr la comunicación entre el cliente y el servidor.

Figura 11. Despliegue de la ventana de configuración del Asistente Ethernet

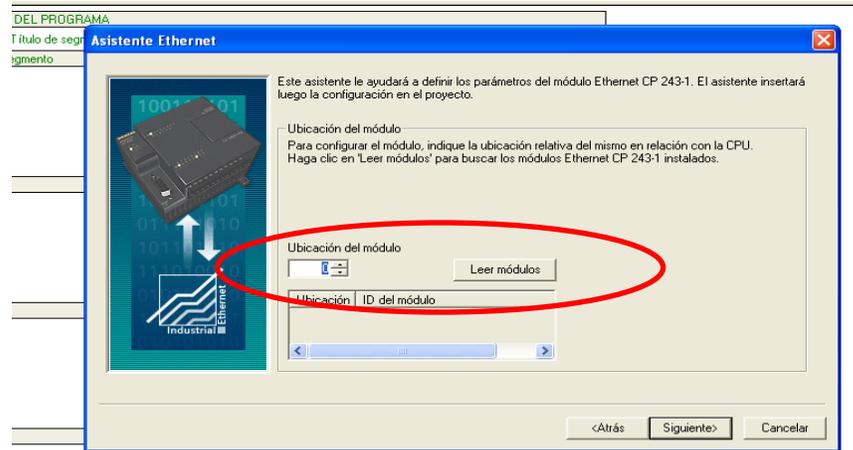


Fuente: Autores del proyecto

La ubicación del módulo por recomendaciones del fabricante debe ser al lado de la CPU del PLC por lo tanto su valor numérico es cero "0", Después se asignan los valores de IP del PLC y la puerta de enlace del ROUTER.

En la figura 12, se observa una ventana en la cual es posible leer la cantidad de módulos y la posición de los mismos.

Figura 12. Asistente Ethernet para ubicación del módulo



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 13, se muestra como se asignan los valores de la dirección IP del PLC y la puerta de enlace, en este caso el ROUTER y los valores de la “Mascara de Subred” para entablar la comunicación con el PC y el PLC.

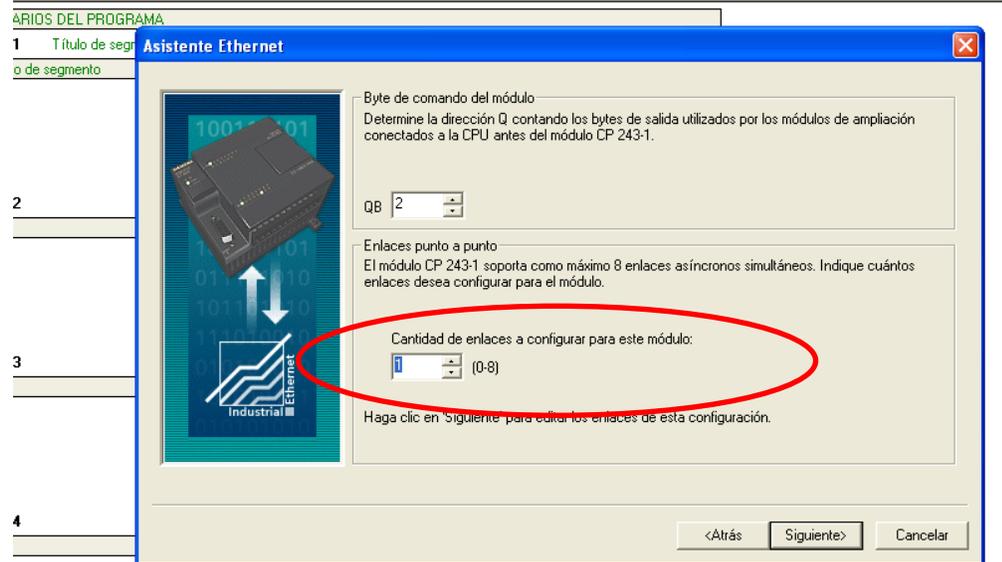
Figura 13. Asignación de los valores de IP del PLC y puerta de enlace del router



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 14, se muestra como se asigna la cantidad de enlaces a configurar para el módulo, este valor depende de la cantidad de clientes requeridos. El cual puede ser configurado tanto para cliente como para servidor.

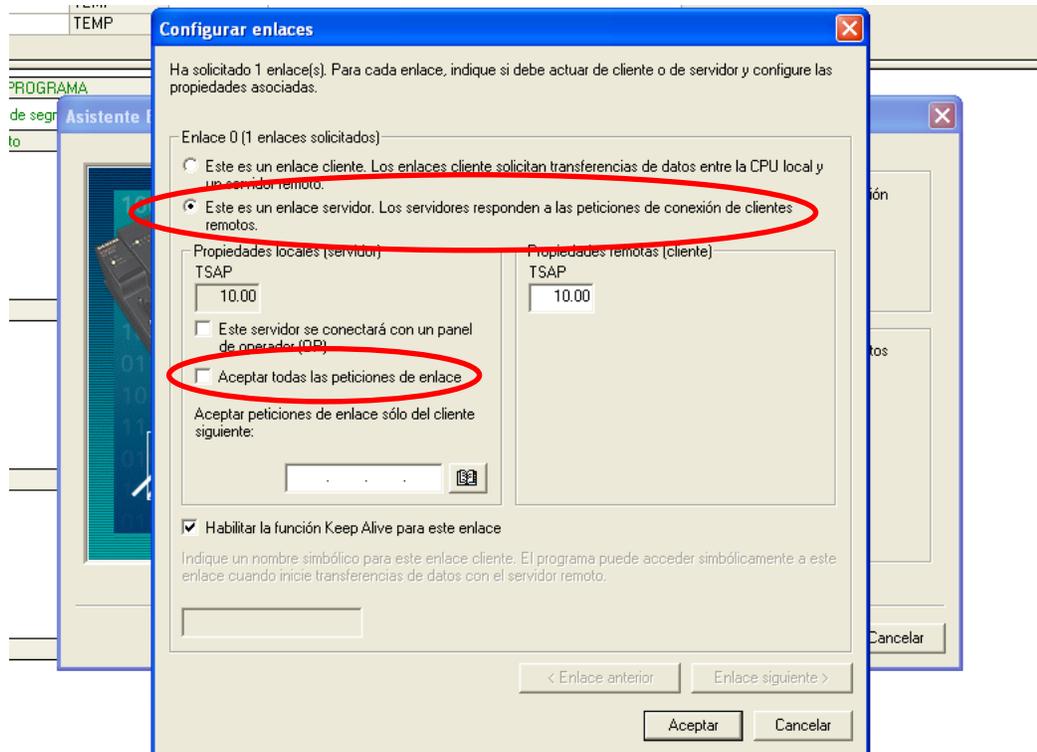
Figura 14. Cantidad de enlaces a configurar para el módulo



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 15, ventana de configuración de enlaces, se selecciona el ítem “Este es un enlace servidor” y se asignan los valores para TSAP de 10.00 para los dos; propiedades locales (servidor) y propiedades remotas (cliente). Realizado estos pasos, se activa la celda de “Aceptar todas las peticiones de enlace”, por recomendaciones del fabricante. Clic en aceptar.

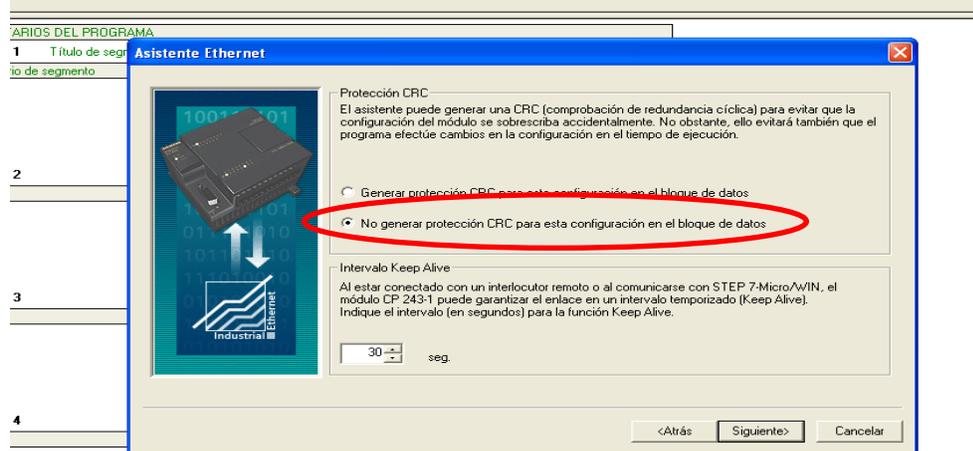
Figura 15. Configurar enlaces



Fuente: autores del proyecto

En la siguiente ventana (véase figura 16), se selecciona “No generar protección CRC para esta configuración en el bloque de datos”

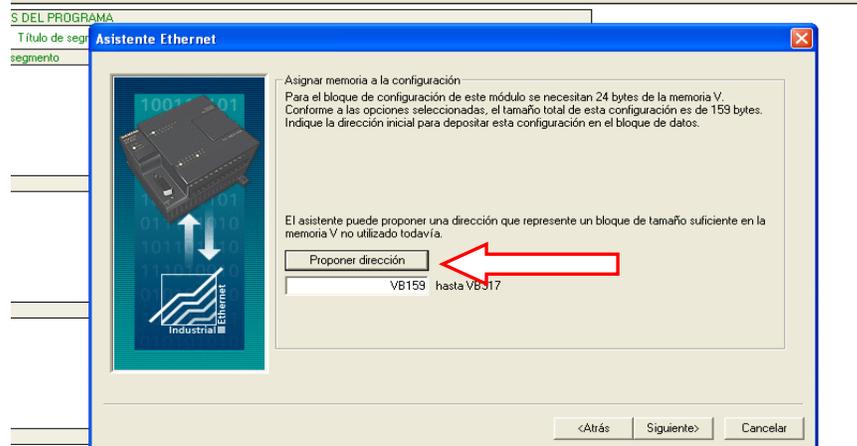
Figura 16. Asistente Ethernet de Protección CRC



Fuente: Autores del proyecto

A continuación aparece una ventana (véase figura 17) donde le permite al asistente de configuración Ethernet proponer una dirección automáticamente, dependiendo de la disponibilidad que tenga. Click en siguiente, hasta finalizar la configuración del Asistente Ethernet.

Figura 17. Asistente Ethernet para Proponer Dirección.



Fuente: Autores del proyecto

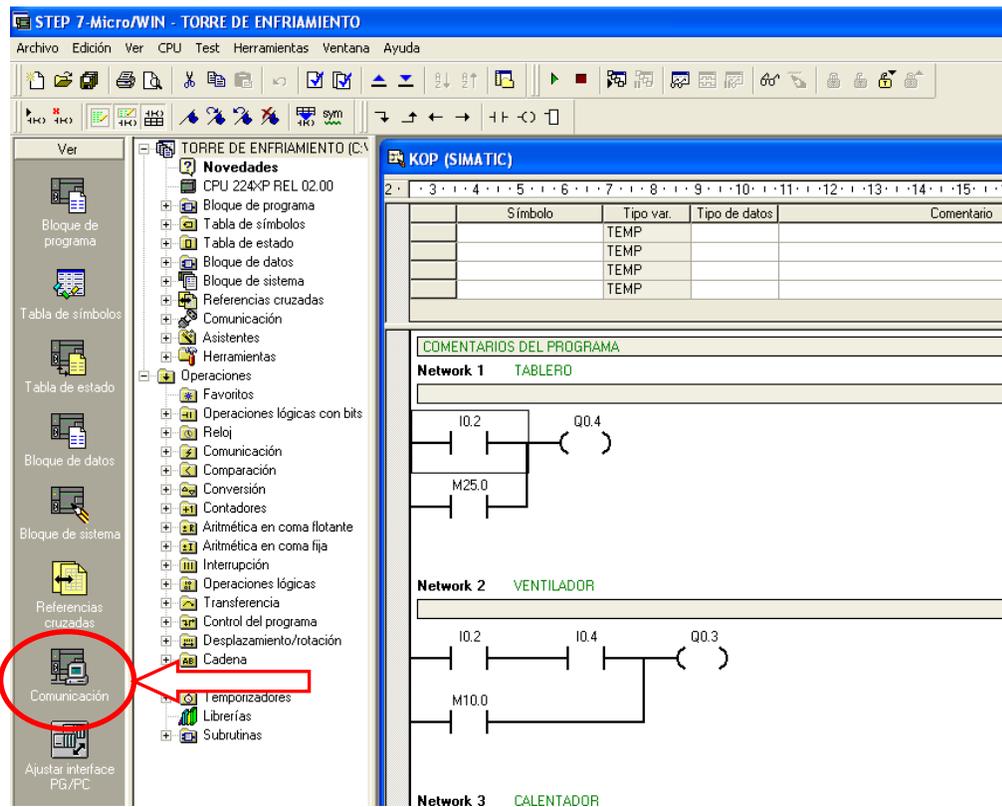
Realizado este procedimiento, queda configurado el módulo Ethernet y continúa el proceso de comunicación desde Step 7-Microwin.

4.4 COMUNICACIÓN DESDE MICROWIN

Inicialmente se abre el software Step 7-Microwin, y a continuación, se abre y se selecciona el proyecto “torre de enfriamiento” para que quede cargada la estructura de programación.

Después se selecciona el icono de comunicación que se encuentra en el menú vertical izquierdo en la ventana principal (véase figura 18) para iniciar la configuración de este procedimiento.

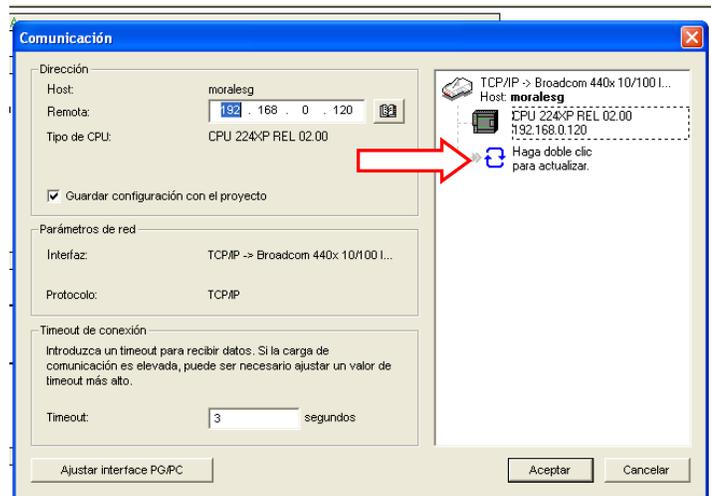
Figura 18. Comunicación desde MicroWIN



Fuente: Autores del proyecto

A continuación aparece una ventana de comunicación y como lo indica la figura 19, se selecciona actualizar para cargar automáticamente la configuración de la CPU, con sus respectivos valores de dirección remota.

Figura 19. Actualizar valores de comunicación



Fuente: Autores del proyecto

Finalizado este procedimiento, se puede continuar con la ejecución de la estructura de programación; que se logra dando clic en Ejecutar o cambiar a modo Run.

En caso que la programación sea borrada de la CPU del PLC, se puede cargar nuevamente, desde la opción “cargar en CPU”, en la barra de herramientas principal de programa Step 7 MicroWin..

4.5 INTERFAZ HOMBRE MAQUINA –MHI

Este proyecto cuenta con un sistema de supervisión y control que facilita al usuario su operación y puesta en marcha, tener acceso a los beneficios que componen esta interfaz y poder hacer una interpretación de los datos obtenidos en el proceso.

Esta interfaz hombre maquina establece una comunicación por medio de un módulo Ethernet y un OPC server, que actúan como cliente y servidor respectivamente para permitir la comunicación con Microsoft Excel. Como resultado de esto, se obtiene un sistema de supervisión y control desde Excel, haciendo el proceso más eficiente y amigable a los usuarios.

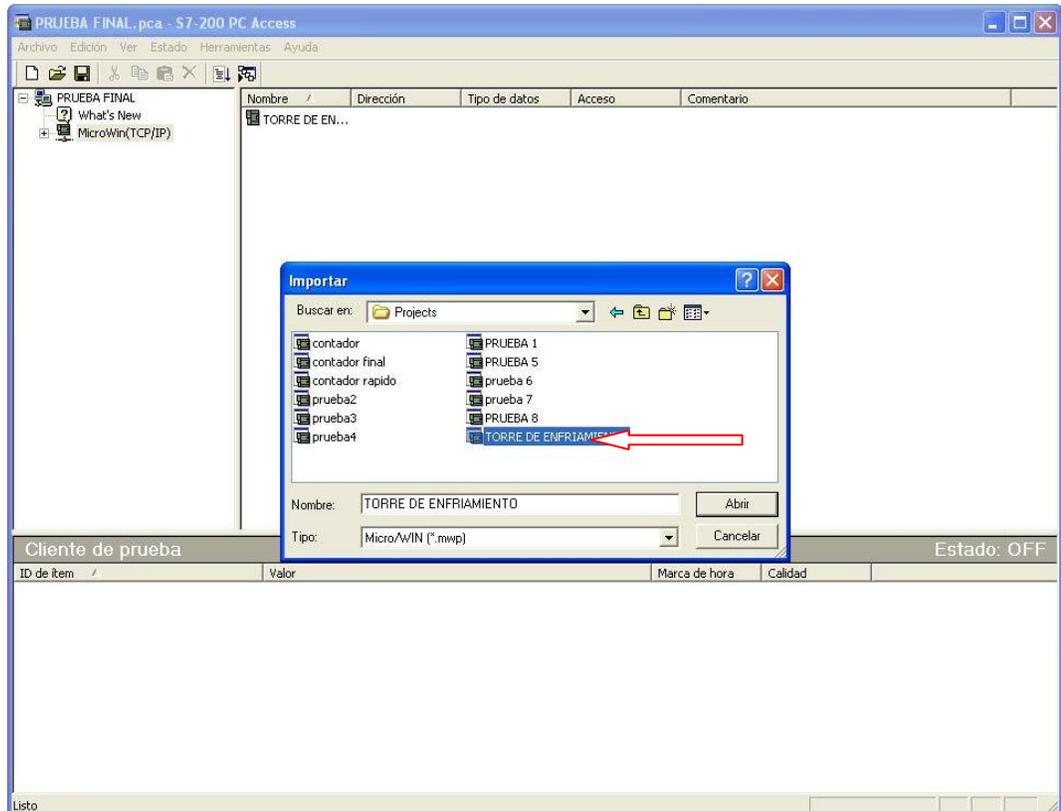
4.5.1 Características principales de pc-acces

Por medio del Pc-acces es posible entablar una comunicación entre el software del PLC y Microsoft Excel a través de protocolo Ethernet. También cuenta con una ventana llamada cliente de prueba OPC incorporada la cual permite verificar el estado de la comunicación de las distintas señales procedentes del PLC. Igualmente permite importar símbolos de proyectos de Step 7- MicroWin (de las versiones 3.x a V4.x). Soporta todos los tipos de datos de PLC S7-200, incluyendo temporizadores, contadores, cadenas y toda la gama de protocolos de comunicación S7-200.

4.5.2 Protocolo de configuración del pc-acces

En la figura 20, se observa la ventana que se despliega cuando se desea importar un proyecto de MicroWin.

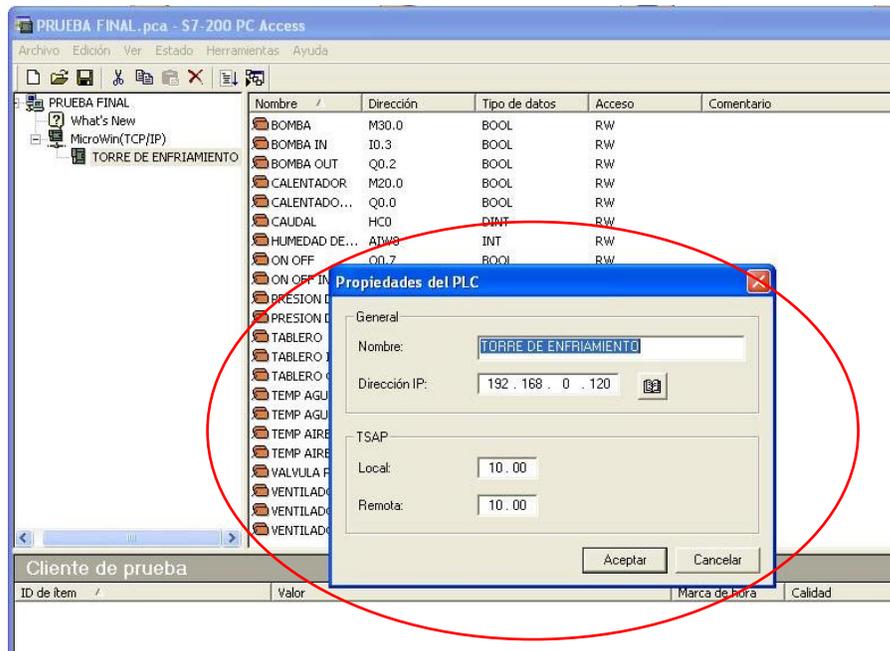
Figura 20. Ventana para cargar el proyecto en PC-ACCES



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 21, se muestra la ventana para configurar los valores de IP y puertos de enlace, se ingresa a propiedades del proyecto “torre de enfriamiento” y se configuran los mismos valores que fueron asignados en MicroWin.

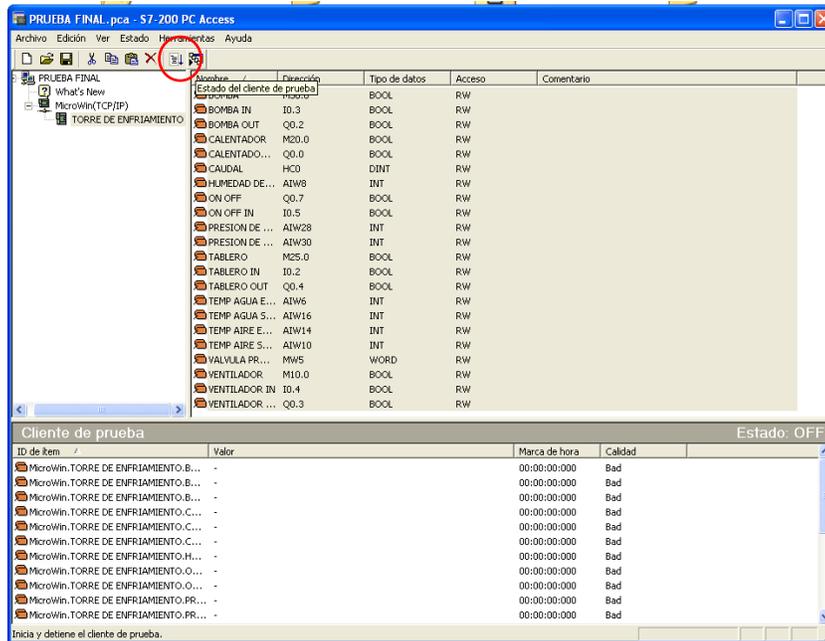
Figura 21. Ajustar las propiedades del PLC



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura 22, se muestra la ventana donde se pueden agregar variables desde la opción “Agregar ítems actuales al cliente de prueba”, ubicado en la barra de herramientas. Este carga automáticamente las variables previamente registradas.

Figura 22. Agregar ítems al cliente de prueba



Fuente: Autores del proyecto

Finalizado el proceso de configuración, se selecciona “Estado del cliente de prueba”, donde deberá cambiar a estado “Good” para comprobar la comunicación entre los dos.

Este cliente OPC puede ser utilizado descargando una licencia de prueba que está disponible en la página de siemens y tiene una duración de 60 días o 100 ingresos.

Para acceder a los datos desde Microsoft Excel a través del OPC Server es requisito ingresar el siguiente código, el cual dependerá del tipo de dato, ya sea booleano, entero, palabra o cadena.

=OPC("MicroWin.TORRE DE ENFRIAMIENTO.TABLERO OUT")

Donde:

OPC, es el nombre del servidor.

MicroWin, es el nombre del software donde se realizó la programación.

.TORRE DE ENFRIAMIENTO, es el nombre del proyecto.

.TABLERO OUT, es el nombre de la salida que se desea leer.

Para escribir un dato por medio de botones a través de Microsoft Excel es necesario ingresar el siguiente código en un módulo de Microsoft VisualBasic y a este asignarle un botón, este también dependerá del tipo de dato:

Sub Botón7_Haga_clic_en()

Call Excel.application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite",

"2:192.168.0.120:1000:1000,M30.0,BOOL,RW", 1, """)

End Sub

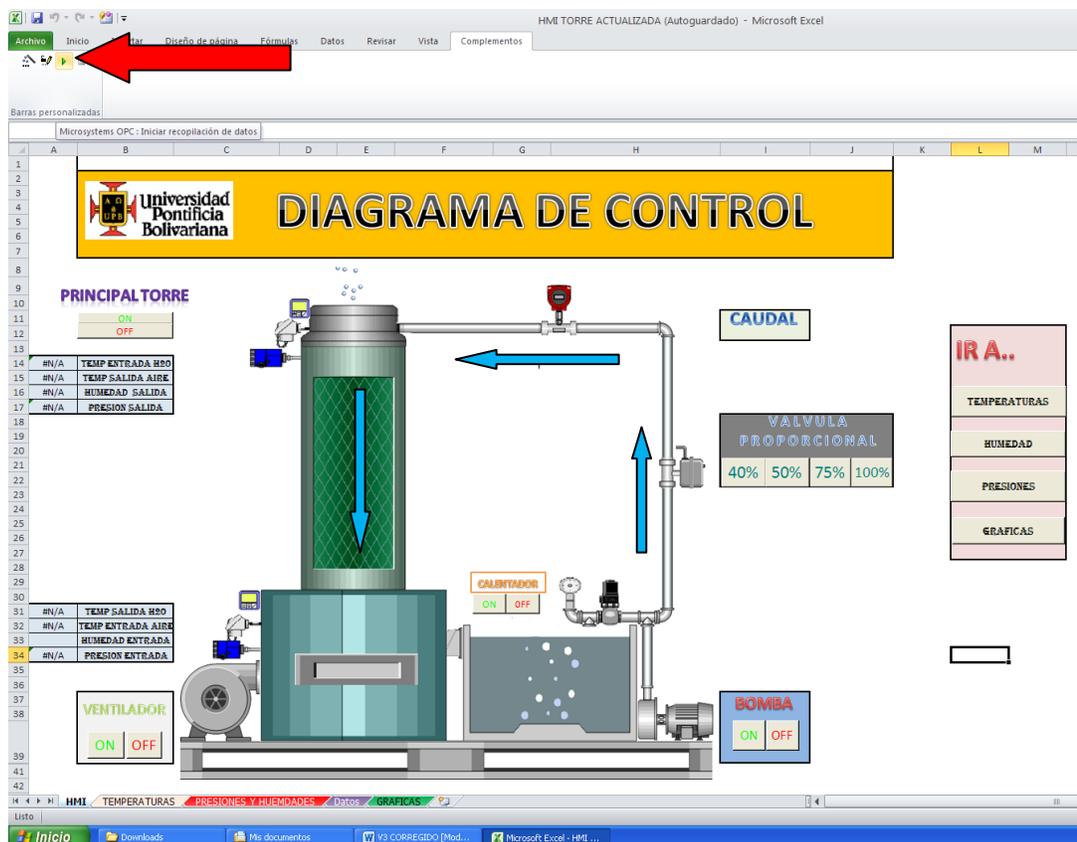
4.5.3 Desarrollo de la interfaz

La interfaz hombre maquina se desarrolló en el paquete de office Excel 2010, teniendo en cuenta para esta implementación un lenguaje de fácil acceso para el usuario, con información necesaria para hacer una interpretación y análisis de resultados.

Para iniciar la adquisición y manipulación de datos es necesario activar los complementos previamente instalados. Estos complementos se activan pulsando el botón de modo “PLAY” que se observa en la figura 23.

En esta pantalla el usuario puede escoger cualquiera de las siguientes opciones: revisar las gráficas disponibles, prender o apagar la bomba, el ventilador, el calentador y la torre de enfriamiento; controlar la válvula proporcional en las 4 posiciones asignadas y visualizar los datos de los diferentes sensores.

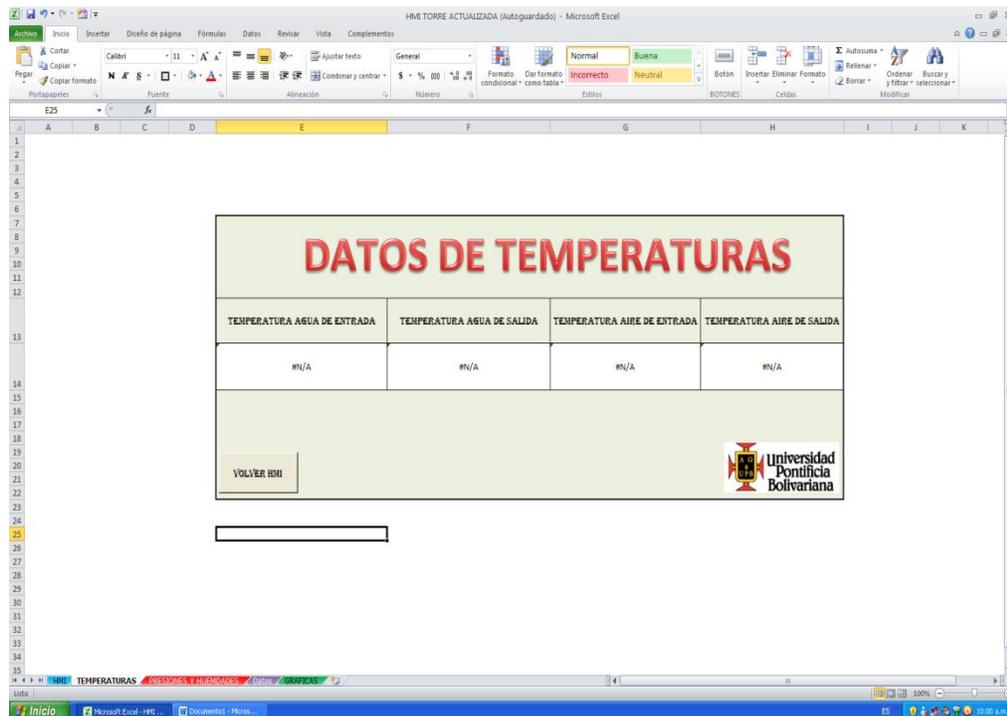
Figura 23. Diagrama de control del proceso



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 24, se muestra el formulario en el que se visualizan los valores de temperaturas del agua y el aire en la entrada y salida del proceso. Estos valores están en la unidad característica de esta medición, que es grados Celsius (°C)

Figura 24. Visualización de datos de temperaturas

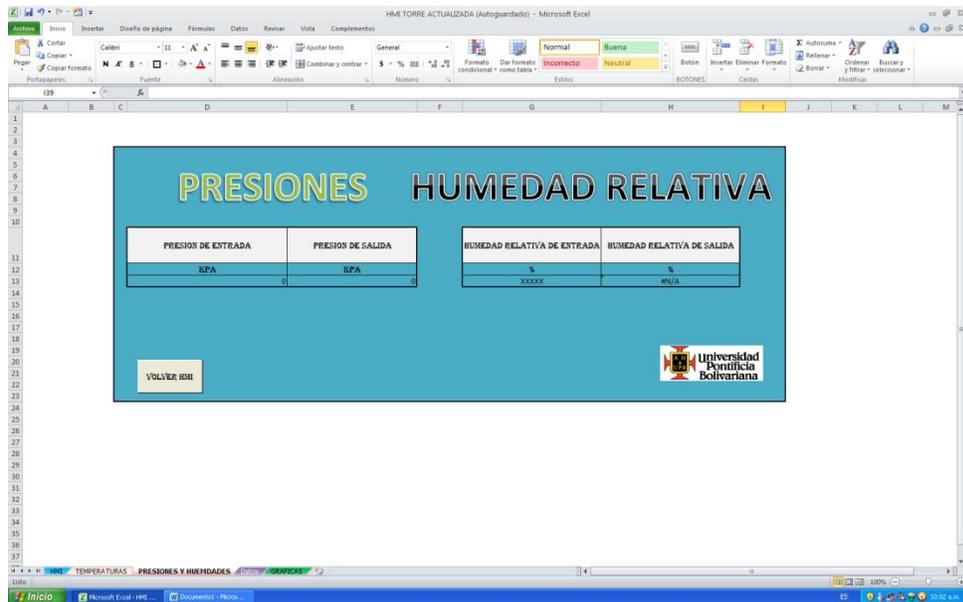


Fuente: Autores del proyecto

La aplicación desarrollada (véase figura 25), también permite visualizar los valores de presión en kpa y humedad relativa en porcentaje, del aire, en la entrada y salida del proceso. El valor de la humedad relativa en la entrada se tomará por defecto 67%, este valor puede ser sujeto a cambios dependiendo de las condiciones climáticas del día. El usuario puede cambiarlo si tiene acceso al dato

preciso en el momento de realizar las pruebas, se realiza ingresando normalmente el valor en la celda correspondiente.

Figura 25. Visualización de datos del aire.



Fuente: Autores del proyecto

Para facilitar la visualización de las distintas curvas de temperaturas y humedades, se tomó como referencia una programación en VisualBasic en la que es posible iniciar o detener la adquisición de datos y posteriormente graficarlos desde Excel. Es posible observar las graficas ampliadas independientemente (véase figura 26). Existe también una opción para cambiar el tiempo de la adquisición del dato; por defecto este se encuentra en 5 segundos.

En cada grafica se dispone de un botón, que permite volver a la pantalla principal, para la selección de una nueva grafica o continuar con el proceso de supervisión y control.

Figura 26. Sección de gráficas



Fuente: Autores del proyecto

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se encuentran las pruebas realizadas a la torre de enfriamiento didáctica, después del proceso de comisionamiento y automatización.

En la tabla 9, se encuentran las ecuaciones termodinámicas utilizadas para los cálculos teóricos.

Tabla 9. Formulas

$P = P_{atm}$		Presión Atmosférica
$\omega = 0,62 \times (\Phi P^*/P_a)$		Humedad específica
$P_v = \Phi P^*$	$P^* @ \text{°t entrada}$	Presión parcial de vapor
$P_a = P - P_v$		Presión parcial de aire
$V_a = (R_a \cdot T / P)(1 + 1,686\omega)$		Volumen específico de aire
$h = T_1 + \omega \cdot h''$		Entalpia
$\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2} = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$		Balance de masa
$\dot{m}_{w2} = \dot{m}_{w1} - \dot{m}_r$		Balance de masa de reposición
$h_{w1} = C_p \cdot t_{w1}$		Entalpia del agua
$\dot{m}_{w1} h_{w1} + \dot{m}_a h_1 + \dot{m}_r = \dot{m}_{w2} h_{w2} + \dot{m}_a h_2$		Balance de Energía

Fuente: [7]

Para el análisis termodinámico se realizaron pruebas con dos rellenos de características diferentes, en el primero (RELLENO VERDE 1), el área de contacto es menor que el segundo (RELLENO BLANCO 2); permitiendo más y menos paso de aire por la chimenea respectivamente. Si bien es evidente que el área superficial es mayor, su cuantificación exacta es un proceso difícil de llevar a cabo. Sin embargo las mediciones aumentan la resistencia y disminuyen el flujo de aire en la chimenea.

PARA EL RELLENO VERDE 1:

En la tabla 10, se encuentran consignados los datos que arrojó el sistema para una apertura de la válvula al 100% (caudal de 8,58 L/min). Inicialmente se realizaron 4 pruebas para determinar por medio de la Ecuación (3), el número de pruebas para una muestra representativa. El aire a la salida se encuentra totalmente saturado a una $T=43,7$ °C aproximadamente. Se tomó por defecto la humedad Relativa del 65 %.

Tabla 10. Cálculos experimentales

Cálculos Experimentales									
Caudal (L/min)	° T Agua in (°C)	° T Agua out (°C)	ΔT Agua (°C)	° T aire in (°C)	° T aire out (°C)	ΔT AIRE (°C)	H.R in (%)	H.R out (%)	ΔH (%)
8,58	47,50	43,00	4,50	31,60	44,80	13,20	65	100	35
	45,44	41,60	3,84	30,70	43,10	12,40	65	100	35
	46,80	42,20	4,60	29,85	44,20	14,35	65	100	35
	45,30	40,87	4,43	30,52	42,70	12,18	65	100	35
Valores promedio	46,26	41,91	4,34	30,66	43,70	13,03	65	100	35

Fuente: Autores del proyecto.

Se realizó el análisis estadístico (véase tabla 11) para los valores arrojados en la prueba, donde indicó que el número de pruebas realizadas es suficiente con un margen de error del 2% (Aprox. 1°C), aceptable para el proceso al que está sometida el equipo.

Tabla 11. Análisis estadístico para determinar número de pruebas

Cálculos para Agua in				Cálculos para Aire in			
e [margen de error]		n [número de pruebas]		e [margen de error]		n [número de pruebas]	
5%	2,3130	0,6145		5%	1,5334	0,6375	
2%	0,9252	3,8407	O.k	2%	0,6134	3,9843	O.k
1%	0,4626	15,3629		1%	0,3067	15,9370	
Cálculos para Agua Out				Cálculos para Aire Out			
e [margen de error]		n [número de pruebas]		e [margen de error]		n [número de pruebas]	
5%	2,0959	0,5356		5%	2,1850	0,5673	
2%	0,8384	3,3474	O.k	2%	0,8740	3,5455	O.k
1%	0,4192	13,3897		1%	0,4370	14,1820	

Fuente: Autores del proyecto

Para los cálculos teóricos del proceso en la torre de enfriamiento didáctica, se tomó como referencia el procedimiento aplicado del capítulo Torres de enfriamiento de la bibliografía [7]. Este procedimiento busca determinar la temperatura del agua a la salida de la chimenea, dependiendo de las propiedades termodinámicas de los fluidos involucrados. Véase tabla 12

Tabla 12. Cálculos teóricos

CÁLCULOS TEÓRICOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO					
PARA EL AGUA			PARA EL AIRE		
Tw1 =	46,26	°C	Ta1 =	30,6675	°C
Tw2 =	41,9175	°C	Ta2 =	43,7	°C
Mw1 =	0,143	Kg/seg	Φ1 =	65	%
Cp @ tw1 =	4,187	KJ/kg °K	Φ2 =	100	%
			Qa =	0,0550855	m³/seg
			pa =	1,2	kg/m³

CÁLCULOS PARA EL AIRE			CÁLCULOS PARA EL AGUA										
Condiciones a la entrada:			$\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2} = 0,00280837 \text{ kg/s}$										
Para Ta1 =	30,6675	°C	$\dot{m}_{w2} =$	0,14019163	kg/s								
Según tablas de Vapor:			$h_{w1} =$	193,69062	kJ/kg								
$P^* =$	4403,885	Pa	Por balance de energía tenemos y despreciando el trabajo del ventilador, tenemos:										
$h'' =$	2557,6675	KJ/Kg	$h_{w2} =$	143,014022	kJ/kg								
$\omega_1 =$	0,018024792		Interpolando con valore de tablas de vapor:										
$h_1 =$	76,76892542	KJ/Kg	<table border="1"> <thead> <tr> <th>°C</th> <th>KJ/Kg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20</td> <td>87,6</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>143,014022</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>212,7</td> </tr> </tbody> </table>			°C	KJ/Kg	20	87,6	X	143,014022	50	212,7
°C	KJ/Kg												
20	87,6												
X	143,014022												
50	212,7												
$V_a =$	0,886175142	m³/Kg											
$\dot{m}_a =$	0,062160963	Kg/Seg											
Condiciones a la salida:			$T_{w2} = 33,2887343 \text{ °C}$										
Para Ta2 =	43,7	°C	% error = 20,5851153 %										
Según tablas de vapor:													
$P^* =$	9009,66	Pa											
$h'' =$	2579,92	KJ/kg											
$\omega_2 =$	0,06050987												
$h_2 =$	199,8106232	KJ/kg											

Fuente: Autores del proyecto.

En la tabla 12, se observó que la diferencia entre el valor teórico y el experimental es 8,62 °C, que es representado en un %error del 20,58%. Este valor puede estar representado en la precisión de algunos datos como lo es, el flujo de aire circundante en la chimenea, tomado con un anemómetro en la parte superior de ella, ya que no es posible tomarlo en un punto dentro de la chimenea, por la configuración de esta, y por el valor de la humedad relativa de entrada que es tomado por defecto 65% ya que éste sensor no registra este valor.

PARA EL RELLENO BLANCO 2

En la tabla 13, se encuentran consignados los datos que arrojó el sistema para una apertura de la válvula al 100% (caudal de 8,58 L/min). Inicialmente se realizaron 4 pruebas para determinar por medio de la Ecuación (3), el número de pruebas para una muestra representativa. El aire a la salida se encuentra totalmente saturado a una $T=37,7$ °C aproximadamente. Se tomó por defecto la humedad Relativa del 65 %.

Tabla 13. Cálculos experimentales

Cálculos Experimentales									
Caudal (L/min)	° T Agua in (°C)	° T Agua out (°C)	ΔT Agua (°C)	° T aire in (°C)	° T aire out (°C)	ΔT AIRE (°C)	H.R in (%)	H.R out (%)	ΔH (%)
8,58	39,37	37,64	1,73	28,53	37,80	9,27	65	100	35
	40,02	38,23	1,79	29,05	38,02	8,97	65	100	35
	38,98	36,99	1,99	27,99	37,99	10,00	65	100	35
	41,03	38,02	3,01	28,04	37,00	8,96	65	100	35
Valores promedio	39,85	37,72	2,13	28,40	37,70	9,30	65	100	35

Fuente: Autores del proyecto.

En la tabla 14, se evidencia el análisis estadístico para los valores con el relleno 2 y al igual que el anterior, el número de pruebas realizadas es un buen dato para una muestra representativa de estos valores. Para un margen de error del 2% (1°C aprox), aceptable para el tipo de proceso que se lleva a cabo. El número de pruebas es inferior a 4.

Tabla 14. Análisis estadísticos para determinar número de pruebas

Cálculos para Agua in				Cálculos para Aire in			
e [margen de error]		n [número de pruebas]		e [margen de error]		n [número de pruebas]	
5%	1,9926	0,5823		5%	1,4202	0,3536	
2%	0,7970	3,6392	O.k	2%	0,5681	2,2099	O.k
1%	0,3985	14,5566		1%	0,2840	8,8398	
Cálculos para Agua Out				Cálculos para Aire Out			
e [margen de error]		n [número de pruebas]		e [margen de error]		n [número de pruebas]	
5%	1,8861	0,2411		5%	1,8851	0,1860	
2%	0,7544	1,5068	O.k	2%	0,7540	1,1623	O.k
1%	0,3772	6,0270		1%	0,3770	4,6492	

Fuente: Autores del proyecto,

Para los cálculos teóricos del proceso en la torre de enfriamiento didáctica, se tomó como referencia el procedimiento aplicado del capítulo Torres de enfriamiento de la bibliografía [7]. Este procedimiento busca determinar la temperatura del agua a la salida de la chimenea, dependiendo de las propiedades termodinámicas de los fluidos involucrados. Véase tabla 15.

Tabla 15. Cálculos teóricos

CÁLCULOS TEÓRICOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO					
PARA EL AGUA			PARA EL AIRE		
T_{w1} =	39,8523	°C	T_{a1} =	28,4030	°C
T_{w2} =	37,7210	°C	T_{a2} =	37,7022	°C
M_{w1} =	0,143	Kg/seg	Φ₁ =	65	%
C_p @ t_{w1} =	4,187	kJ/kg °K	Φ₂ =	100	%
			Q_a =	0,0422662	m³/seg
			ρ_a =	1,2	kg/m³

CÁLCULOS PARA EL AIRE		CÁLCULOS PARA EL AGUA	
Condiciones a la entrada:		$\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2} =$	0,00136206 kg/s
Para T _{a1} =	28,403 °C	$\dot{m}_{w2} =$	0,14163794 kg/s
Según tablas de Vapor:		hw ₁ =	166,86158 kJ/kg
P* =	3869,675 Pa	Por balance de energía tenemos y despreciando el trabajo del ventilador, tenemos:	
h" =	2552,806 KJ/Kg	hw ₂ =	141,710406 kJ/kg
ω ₁ =	0,01578265	Interpolando con valore de tablas de vapor:	
h ₁ =	68,693042 KJ/Kg	°C	KJ/Kg
V _a =	0,87635101 m³/Kg	20	87,6
$\dot{m}_a =$	0,04822976 Kg/Seg	X	141,710406
Condiciones a la salida:		50	212,7
Para T _{a2} =	37,702175 °C	Tw ₂ = 32,97 °C	
Según tablas de vapor:		% error = 12,5788911 %	
P* =	6519,76125 Pa		
h" =	2569,70218 KJ/kg		
ω ₂ =	0,04263743		
h ₂ =	147,267678 KJ/kg		

Fuente: Autores del proyecto.

En la tabla 15, se observó que la diferencia entre el valor teórico y el experimental es 4,74 °C, que es representado en un %error del 12,57%. Comparando este valor con el relleno 1; indica que es más eficiente el relleno 2, porque se obtiene un enfriamiento experimental aproximado al valor teórico. De igual forma estos valores pueden estar representados en la precisión de algunos datos como lo es, el flujo de aire circundante en la chimenea, tomado con un anemómetro en la parte superior de ella, ya que no es posible tomarlo en un punto dentro de la chimenea, por la configuración de esta, y por el valor de la humedad relativa de entrada que es tomado por defecto 65% ya que éste sensor no registra este valor.

También se observa que el aire sale totalmente saturado para caudales altos, debido a que la cantidad de agua que pasa por la torre es mayor, por lo tanto hay más evaporación. En los caudales bajos se ve que la cantidad de fluido que pasa no es suficiente para saturar completamente el aire.

Igualmente se observa que la presión de entrada tiene un aumento significativo; dado que en el interior de la torre hay una presurización del aire que es enviado por la chimenea hasta el final de torre en contraflujo con el agua. En la presión de salida se observa una leve caída por debajo de la presión atmosférica, esto ocurre porque en el momento de salir de la columna de la torre provoca un leve vacío.

En la figura 27, se encuentra la gráfica de tendencia de enfriamiento, donde se puede verificar el tiempo que tarda en llegar a la temperatura ambiente, una vez desenergizada la resistencia.

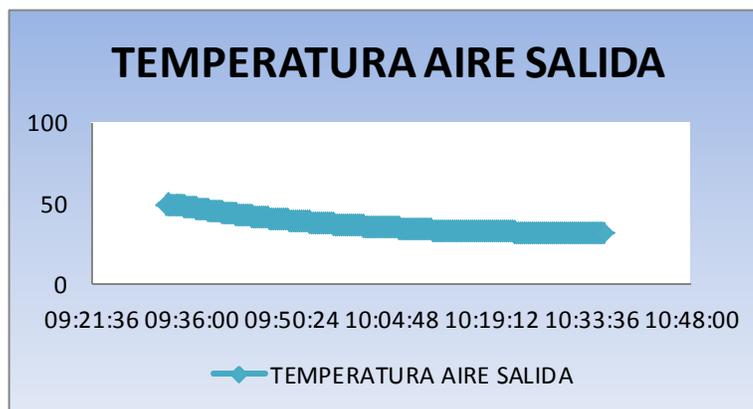
Figura 27. Curva de enfriamiento del agua.



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura 28, se observa la curva de enfriamiento del aire en función del tiempo

Figura 28. Curva de enfriamiento del aire



Fuente: Autores del proyecto.

Comparando la figura 27 y la figura 28 podemos concluir que a medida que el agua pierde temperatura, el aire también, ya que la energía que debe disipar el aire del agua es menor.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de este proyecto permitirán a los estudiantes de pregrado de la universidad comprender el fenómeno de enfriamiento evaporativo y manipular las diferentes variables involucradas. Como consecuencia de ello se logra atender las necesidades en materia de equipos de los laboratorios de la facultad de Ingeniería Mecánica, y apoyar no solamente las asignaturas del área de termo fluidos sino del área de automatización y control. Adicionalmente, permitirá que el estudiante de pregrado tenga una visión más clara de la aplicación de los conocimientos de la ingeniería en la industria, ya que una de los principales propósitos del desarrollo tecnológico, es buscar un funcionamiento cada vez más automatizado en los procesos.

A demás

Debido a que los instrumentos de medición y control son de tipo industrial, se hizo necesario limitar su rango de lectura y ajustarlos a las condiciones del proyecto, para conseguir mediciones aproximadas a las teóricas. Esta situación deja en evidencia las dificultades para conciliar la oferta de equipos e instrumentación con las necesidades de los bancos de laboratorio con fines académicos.

Fue necesario recurrir a la ayuda de entidades y empresas de la región para la evaluación del funcionamiento de los instrumentos de la torre de enfriamiento didáctica puesto que la Universidad no cuenta con un laboratorio de metrología o instrumentos calibrados y certificados que sirvan de apoyo. Se utilizó un banco

seco para la calibración de sensores de temperatura suministrado por la Corporación CDT de gas y un higrómetro portátil prestado por la empresa ARM LTDA (Asesoría en Reingeniería de Mantenimiento Industrial Limitada). Con el apoyo de estas entidades y el uso de protocolos generalizados para la medición de variables físicas y guías técnicas fue posible dar cumplimiento a los propósitos planteados en el proyecto.

El proceso de comisionamiento no fue fácil porque no existía suficiente información física de los elementos que conforman el equipo. Este problema fue finalmente solucionado gracias a una búsqueda intensiva en la web en las diferentes bases de datos de fabricantes y proveedores. Por otra parte, el concepto de comisionamiento no está muy claro en nuestro lenguaje, lo que aporta complejidad al desarrollo de las tareas necesarias. Sin embargo a juicio de los autores del proyecto la metodología adoptada permitió cumplir con éxito los objetivos planteados al comienzo. Como entregable final del proyecto queda un documento escrito con toda información técnica que incluye manuales de operación y mantenimiento y se presenta un proceso sistemático para lograr que todos los elementos que intervienen en la torre didáctica interactúen correctamente.

Para diseñar la estrategia de supervisión y control, se tuvieron en cuenta como primeras alternativas los programas comerciales LABVIEW y WIN CC que han sido adquiridos por la universidad para proyectos como este. Se hicieron intentos iniciales con ellos, pero se encontraron dificultades técnicas en la compatibilidad entre los protocolos de comunicación, que para ser solucionadas requerían un trabajo de mayor alcance y tiempo. Se optó entonces por utilizar la plataforma de Excel puesto que de un lado existe un OPC, denominado PC Acces, creado por

siemens para la comunicación del S7 200 con otras plataformas, y del otro, la Universidad cuenta Campus Agreement que permite usar el programa Excel en cualquier equipo de laboratorio. Debe resaltarse que el uso de Excel como herramienta, permite que proyectos universitarios como este sean realizados de manera relativamente económica; situación que resulta conveniente para empresas interesadas en automatizar procesos o máquinas sencillas, mediante estrategias de supervisión y control de bajo costo y de fácil mantenimiento.

La comunicación vía Ethernet con el PLC S7-200 planteó serias dificultades puesto que la consecución de información fue compleja por tratarse de un equipo de gama media que no está dirigido al trabajo en redes. Sin embargo, la solución final obtenida permitió satisfacer las necesidades del proyecto y sienta un precedente para el uso de estos equipos en proyectos futuros, ya que a la fecha la mayoría de trabajos desarrollados en la Universidad han incorporado PLCs de gama más alta como el S7-300, de configuración sencilla pero con costos implícitos más elevados.

La programación de los diferentes instrumentos de medición y control se realizó en el programa de Step 7- MicroWin, en lenguaje KOP. Con ello y la instalación de la electroválvula proporcional se logró de manera práctica el control del flujo de agua, que permite fijar los caudales para las pruebas y que la bomba opere en rangos seguros.

Los cálculos teóricos de las variables físicas en la torre tienen como base una aproximación netamente termodinámica que correlaciona las propiedades de los fluidos involucrados. Puesto que la bibliografía encontrada no permite cuantificar

el porcentaje de error de las ecuaciones usadas, existe incertidumbre en los resultados obtenidos. Si bien las ecuaciones de Merkel han sido derivadas para Torres de enfriamiento reales, para ser empleadas es necesario utilizar rellenos en los que se pueda determinar la relación Densidad de Área sobre Volumen Empacado.

7. RECOMENDACIONES

Como aporte importante final del proyecto, los autores plantean una serie de recomendaciones que servirán para el correcto funcionamiento de la torre de enfriamiento y como lineamiento para los proyectos que den continuidad a este trabajo o que se encuentren relacionados con el mismo.

1. Se recomienda seguir los protocolos de seguridad consignados en los manuales de operación y mantenimiento para evitar accidentes y daños en los diferentes componentes del sistema.
2. Es necesario comprar de un nuevo sensor de humedad, con el fin de obtener un valor más preciso de la humedad de entrada; o al menos adquirir un higrómetro portátil para establecer las condiciones del aire en el laboratorio de transferencia de calor.
3. Es conveniente realizar una mejor distribución del cableado del panel de control de acuerdo con las normas establecidas para éste tipo de instalaciones (Norma ISA).
4. Se recomienda realizar la compra del software Pc-acces, ya que la usada en este proyecto es una versión de prueba, sin embargo se puede seguir utilizando versiones de prueba que tienen un periodo de uso de 60 días.
5. Para la ejecución y la manipulación de este proceso existen en el documento una serie de pasos que deben realizarse a cabalidad para conseguir el buen y óptimo funcionamiento del equipo.
6. La comunicación entre Microsoft Excel 2007 y el PLC, solo se podrá ejecutar cuando el proyecto realizado en el software STEP 7 - MICROWIN V4.0 este cargado en la CPU del PLC y éste se encuentre en modo "RUN".
7. Siguiendo la norma DIN ISO, que indica que se debe conectar a un único instrumento transmisor, un único instrumento receptor; por lo tanto se hizo

necesario sacar de funcionamiento los indicadores instalados en el panel de la torre, ya que de no ser así, los valores de las distintas variables que intervienen en el proceso se verían afectados y se perdería la precisión en la medición.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] YUNUS A. CENGEL, MICHAEL A. BOLES, “Termodinámica”, Quinta edición MacGrawHill, Páginas 717-741, México, 2007.
- [2] RealTimeService S.A, “SISTEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA”, (en PDF), http://www.realtimeservice.net/sp/desarrollos/optimizacion_torres_enfriamiento.pdf, ARGENTINA.
- [3] KATSUHIKO, OGATA., “*Ingeniería de control moderna*”, Tercera edición, Pearson Educación, México, 1998.
- [4] SIEMENS, SIMATIC, “Manual del sistema de automatización S7-200” (en línea); 5 de Julio 2010, www.siemens.com/s7-200; 8 edición, 2008.
- [5] W.BOLTON, MECATRONICA, Sistemas de control eléctrico en Ingeniería mecánica y electrónica, segunda edición, Editorial Alfaomega, 1998
- [6] ARAGONES. ORIOL, SAIGI. MIGUEL, AUTOMATISMOS ELECTRICOS PROGRAMABLES, Ediciones UPC, 1998.
- [7] MARADEY CHARRIS, Juan Francisco, “*Torres de enfriamiento*”, Termodinámica Aplicada, Primera edición, Ediciones UIS, Páginas 177-181, Bucaramanga, Colombia, 2002.
- [8] DONAL Q., Kern, “*Transferencia por contacto directo: Torres de enfriamiento*”, Procesos de Transferencia de Calor, Trigésima Séptima Reimpresión, Compañía Editorial Continental, Páginas 645-706, México, 2006.
- [9] SIMATIC S7-200. “Manual del Usuario” Siemens. ALEMANIA, 2008.

- [10] Sistema de automatizaciónS7-200, Manual del sistema, Simatic, Siemens. Edición 2, 2000.
- [11] Pedrollo, “Catalogo de productos”, (en línea), (fecha de consulta Noviembre de 2010; http://www.pedrollo.com.co/pdf/catalogo_general.pdf)
- [12] PALLÁS ARENY, Ramón, “*Sensores y Acondicionadores de Señal*”, Introducción a los Sistemas de Medida, Cuarta Edición, Editorial MARCOMBO, Barcelona, España, 2003.
- [13] HERNANDEZ ARROYO, Emil, “Manual de Estadística”, primera edición, Editorial EDUCC, Bucaramanga, Colombia, 2006.

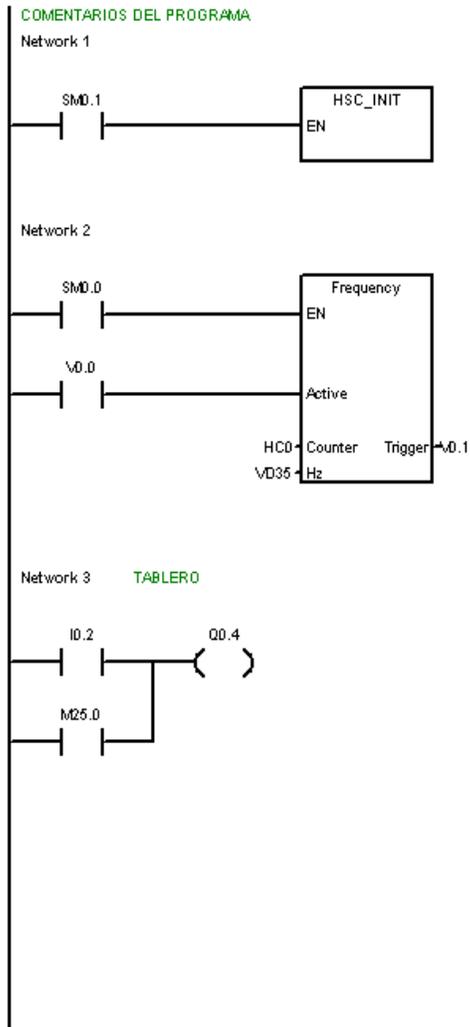
ANEXOS

ANEXO 1: PROGRAMACIÓN EN MICROWIN

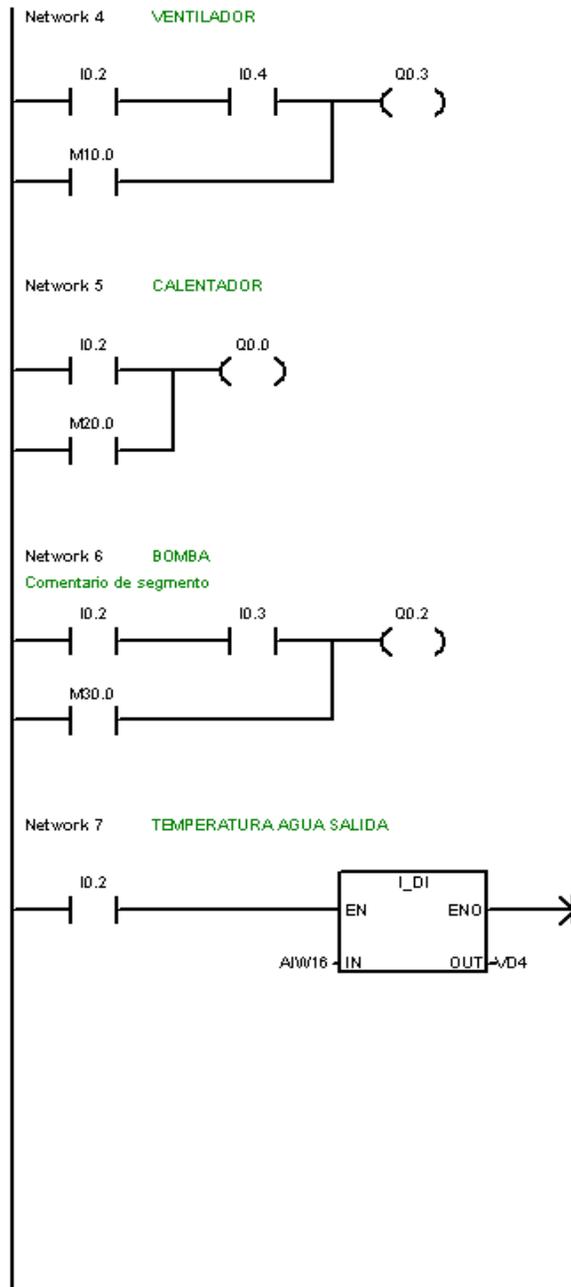
TORRE DE ENFRIAMIENTO / PRINCIPAL (0B1)

Bloque: PRINCIPAL
 Autor:
 Fecha de creación: 14.12.2010 15:59:55
 Fecha de modificación: 12.01.2011 16:12:07

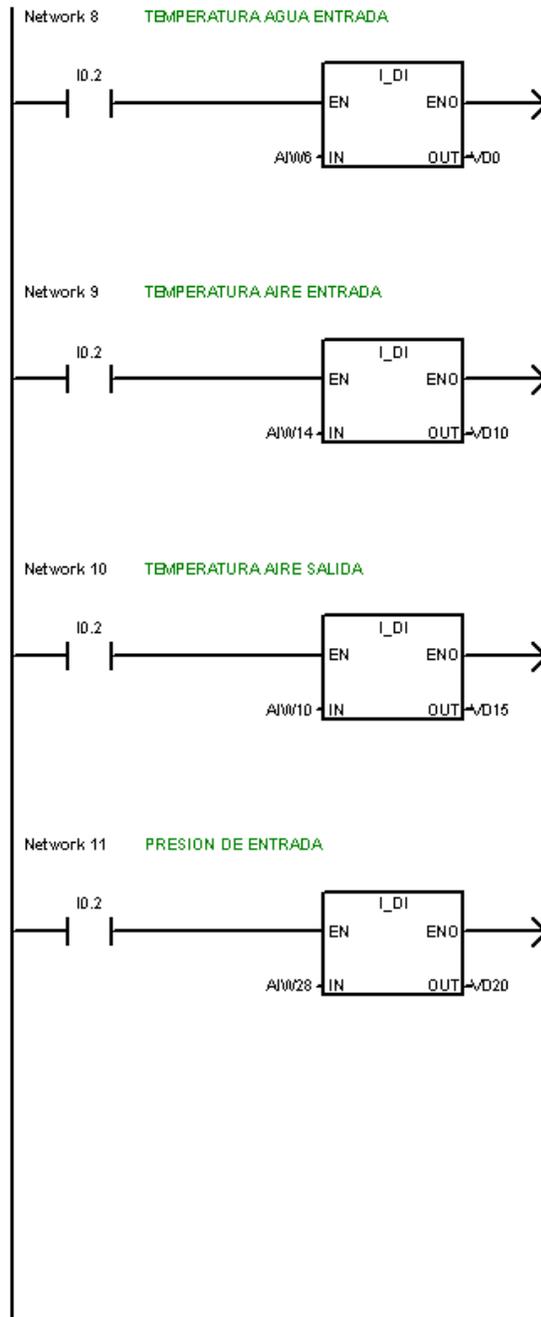
Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
	TEMP		



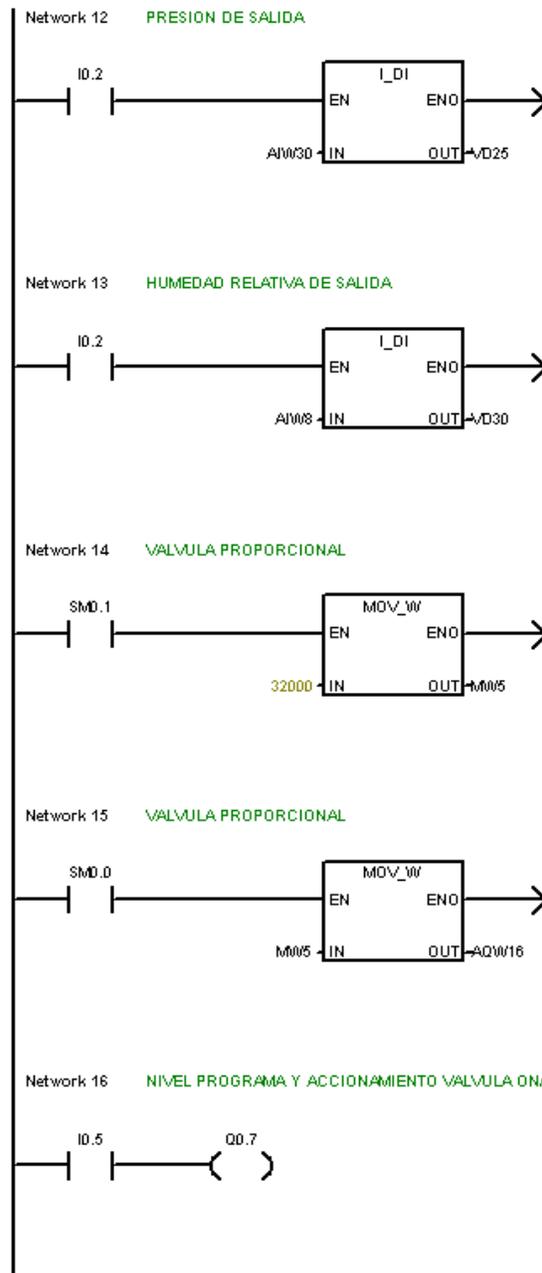
TORRE DE ENFRIAMIENTO / PRINCIPAL (0B1)



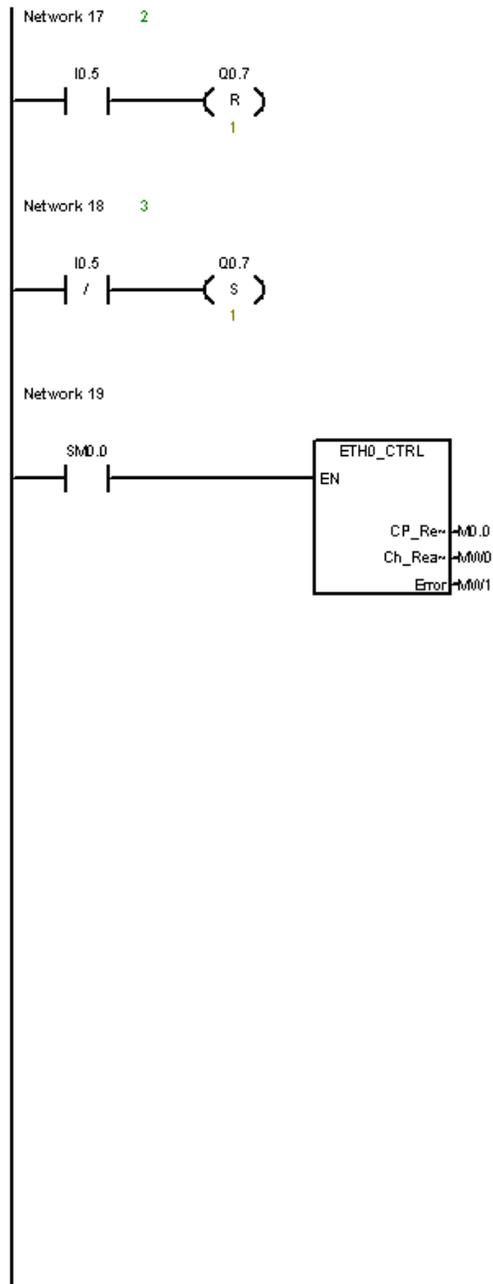
TORRE DE ENFRIAMIENTO / PRINCIPAL (081)



TORRE DE ENFRIAMIENTO / PRINCIPAL (0 B1)



TORRE DE ENFRIAMIENTO / PRINCIPAL (OB1)



TORRE DE ENFRIAMIENTO / SBR_D (SBR0)

Bloque: SBR_D
Autor:
Fecha de creación: 14.12.2010 15:59:55
Fecha de modificación: 14.12.2010 15:59:55

Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
EN	IN	BOOL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	TEMP		

COMENTARIOS DE LA SUBROUTINA
Network 1 Título de segmento
Comentario de segmento



TORRE DE ENFRIAMIENTO / HSC_INIT (SBR3)

Bloque: HSC_INIT
Autor: Asistente de operaciones HSC
Fecha de creación: 11.01.2011 10:38:19
Fecha de modificación: 11.01.2011 10:38:19

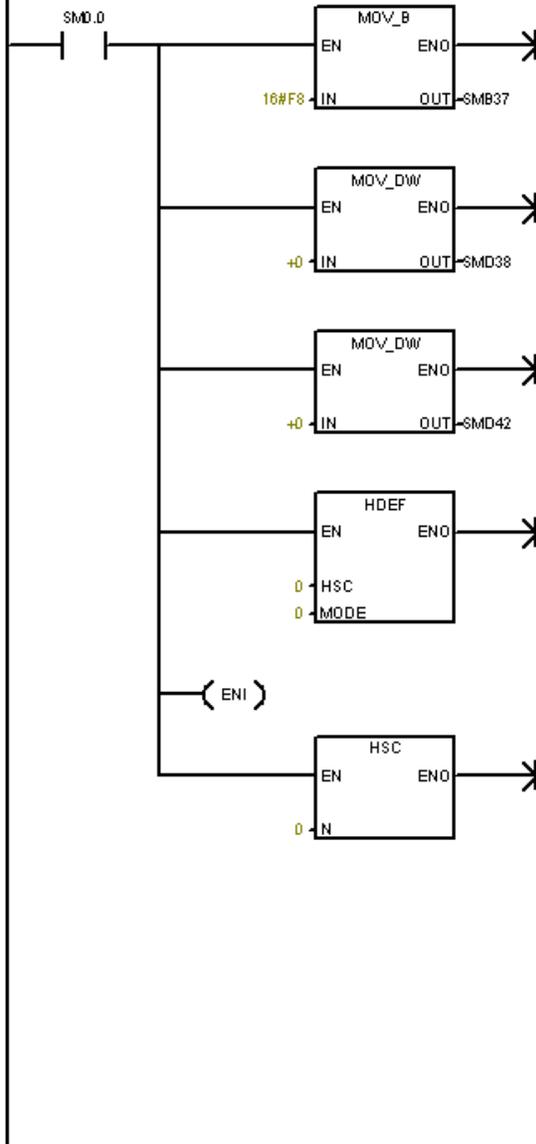
Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
EN	IN	BOOL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	TEMP		

TORRE DE ENFRIAMIENTO / HSC_INIT (\$BR3)

Network 1 Asistente de operaciones HSC

Para habilitar esta configuración, utilice SMD.1 o una operación disparada por un flanco para llamar a esta subrutina una vez desde el programa PRINCIPAL.

Configurar HCD para modo 0; CV= 0; PV= 0; contar ADELANTE;
Habilitar interrupciones y arrancar el contador.



TORRE DE ENFRIAMIENTO / INT_0 (INT0)

Bloque: INT_0
Autor:
Fecha de creación: 14.12.2010 15:59:55
Fecha de modificación: 14.12.2010 15:59:55

Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
	TEMP		

COMENTARIOS DE LA RUTINA DE INTERRUPCIÓN

Network 1 Título de segmento
Comentario de segmento



TORRE DE ENFRIAMIENTO / ETH0_CTRL (SBR1)

Bloque: ETH0_CTRL
 Autor: Asistente Ethernet
 Fecha de creación: 11.01.2011 15:50:40
 Fecha de modificación: 11.01.2011 15:50:53

	Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
	EN	IN	BOO L	
		IN		
		IN_OUT		
L0.0	CP_Ready	OUT	BOO L	El módulo CP 243-1 está listo.
LW1	Ch_Ready	OUT	WO RD	Bits de canal listo
LW3	Error	OUT	WO RD	Palabra de error
		OUT		
		TEMP		

 El asistente Ethernet ha creado esta UOP para utilizarla con un módulo CP 243-1 ubicado en la posición 0. La operación ETHx_CTRL (Control) sirve para habilitar e inicializar el módulo CP 243-1. Utilice esta operación sólo una vez en el proyecto y vigile que el programa de usuario la invoque en cada ciclo. El byte de comando de este módulo se ha definido como QB2.

Los enlaces siguientes ya se han configurado para este módulo:

El enlace 0 es un servidor: TSAP local: 10.00 TSAP remoto: 10.00 Direcciones de clientes: 0.0.0.0

TORRE DE ENFRIAMIENTO / ETH0_CFG (SBR2)

Bloque: ETH0_CFG
 Autor: Asistente Ethemet
 Fecha de creación: 11.01.2011 15:50:40
 Fecha de modificación: 11.01.2011 15:50:53

	Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
	EN	IN	BOOL	
LD.0	START	IN	BOOL	Enviar comando al CP 243-1 si no está activo
		IN		
		IN_OUT		
LD.1	Done	OUT	BOOL	Alto cuando el CP 243-1 finalice el comando
LB.1	Error	OUT	BYTE	Estado de error del módulo CP 243-1
		OUT		
		TEMP		

 El asistente Ethemet ha creado esta UOP para utilizarla con un módulo CP 243-1 ubicado en la posición 0. La operación ETHx_CFG (Recargar configuración) ordena al módulo CP 243-1 a leer su bloque de configuración de la dirección que indica el puntero a la tabla de configuración..

TORRE DE ENFRIAMIENTO / Frequency (SBR4)

Bloque: Frequency
 Autor:
 Fecha de creación: 25.06.2008 6:40:19
 Fecha de modificación: 11.01.2011 23:30:55

	Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
	EN	IN	BOOL	
LD 0	Active	IN	BOOL	block is active when "Active" is true
LD1	Counter	IN	DINT	Pulse counter
LD5	Hz	IN_OUT	REAL	Pulse frequency in Hertz
L9 0	Trigger	OUT	BOOL	Time trigger signal for data logging
LD10	Delta_time_DI	TEMP	DINT	
LD14	Delta_counter_value_DI	TEMP	DINT	
LD18	Delta_counter_value_R	TEMP	REAL	

LIBRARY: Frequency
 =====
 Version: 1.0
 Date: January 21, 2009

LIABILITY

Siemens AG does not accept liability of any kind for damages arising from the use of this application, except where it is obliged to by law, in cases such as damage to items used for personal purposes, personal injury, willful damage or gross negligence.

WARRANTY

The program examples given are specific solutions to complex tasks which were worked on by Customer Support. We must also point out that it is not possible in the current state of the technology to exclude all errors in software programs under all conditions of use. The program examples were prepared according to the best of our knowledge. However, we cannot accept any liability beyond the standard guarantee for Class C software in accordance with our General Terms of Sale for Software Products for Automation and Drive Technology. The program examples can be purchased on the Internet as single licenses. They may not be transferred to a third party.

PASSWORD

The password of the library is "1234"

PREREQUISITE

1. Call the High Speed Counter Wizard to define a high speed counter to count the pulses of which you want to measure the frequency.
2. Connect pulses signal you want to measure with the chosen high speed counter input.
3. Call this subroutine in every scan (EN=SMD.0).
4. Select the chosen high speed counter for the parameter "Counter".
5. Select free addresses for the parameters "Active" (format BOOL), "Hz" (format REAL) and "Trigger" (format BOOL).

DESCRIPTION

This subroutine calculates the frequency "Hz" in Hertz of pulse train (PTO) measured by the S7-200 high speed counter signal "Counter".

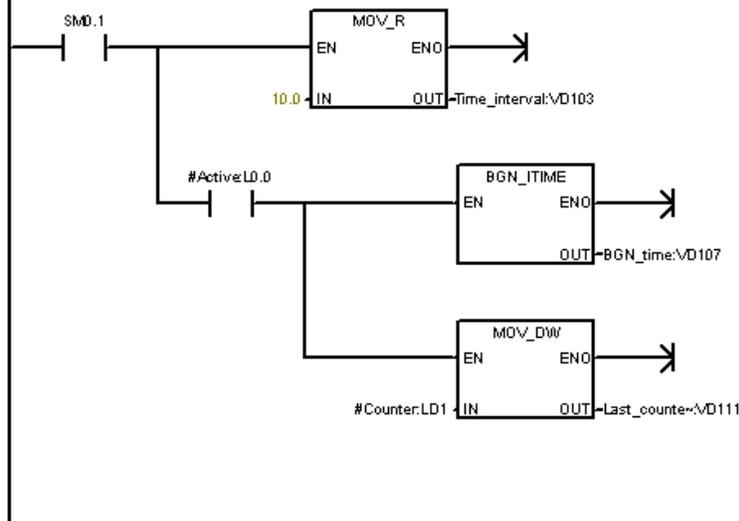
It counts the pulses for the hidden global variable "Time_interval" in seconds (format: REAL) and divides the pulses by the chosen "Time_interval".

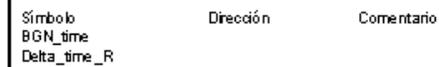
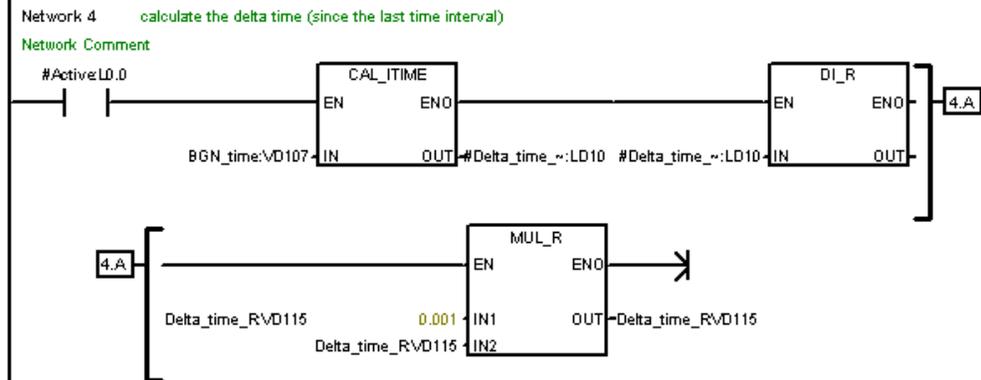
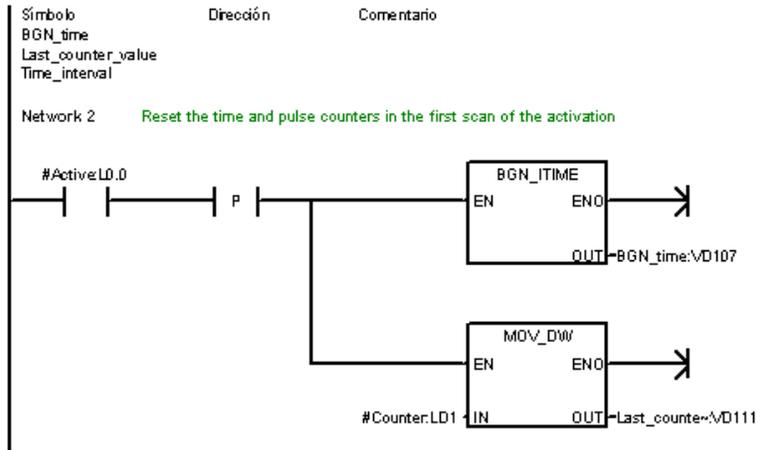
The default "Time_interval" value is set to 1.0 seconds, but it can be changed.

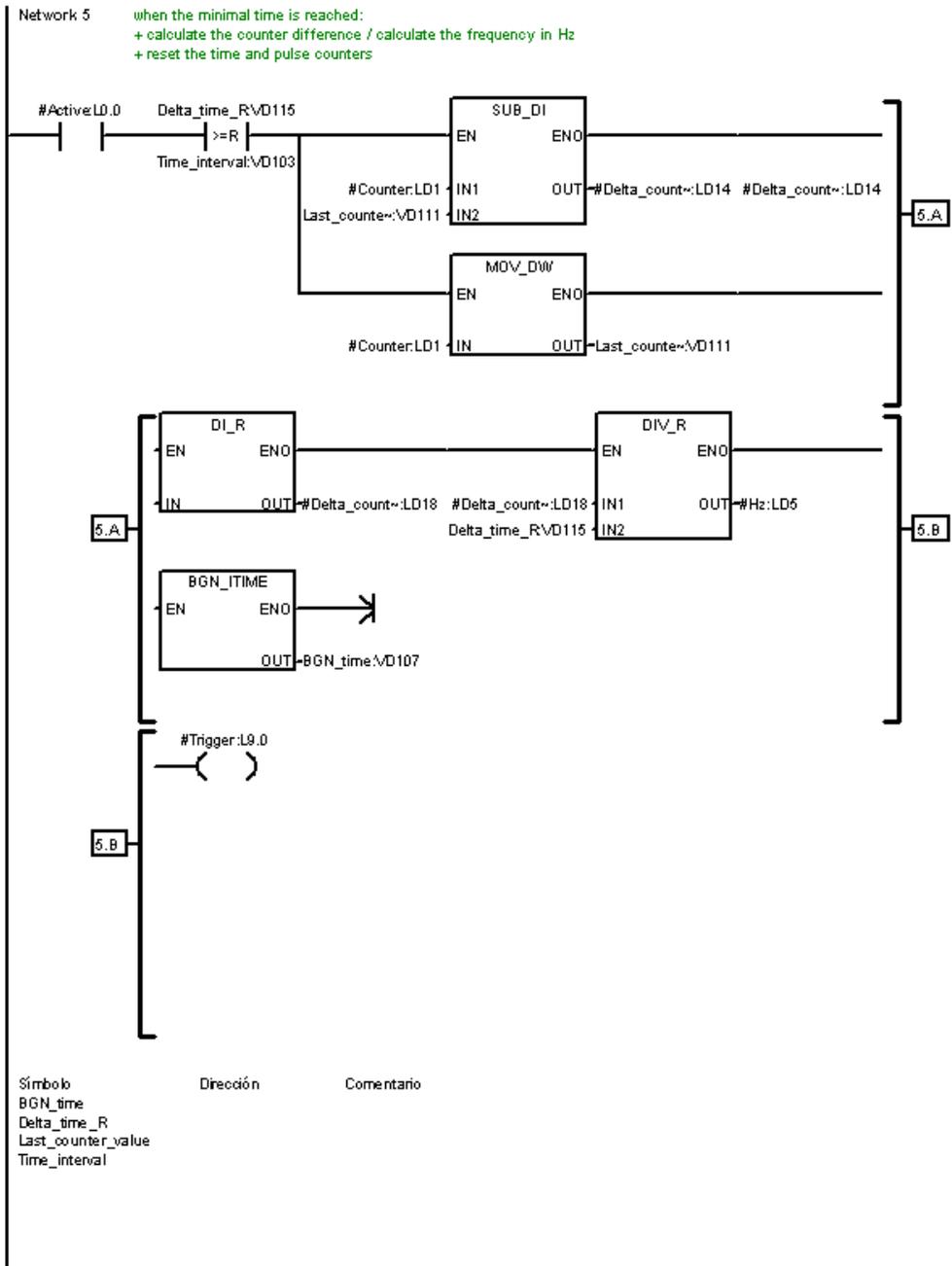
To activate the subroutine input "Active" has to be true. In non "Active" mode the IN_OUT "Hz" shows 0.0 Hertz.

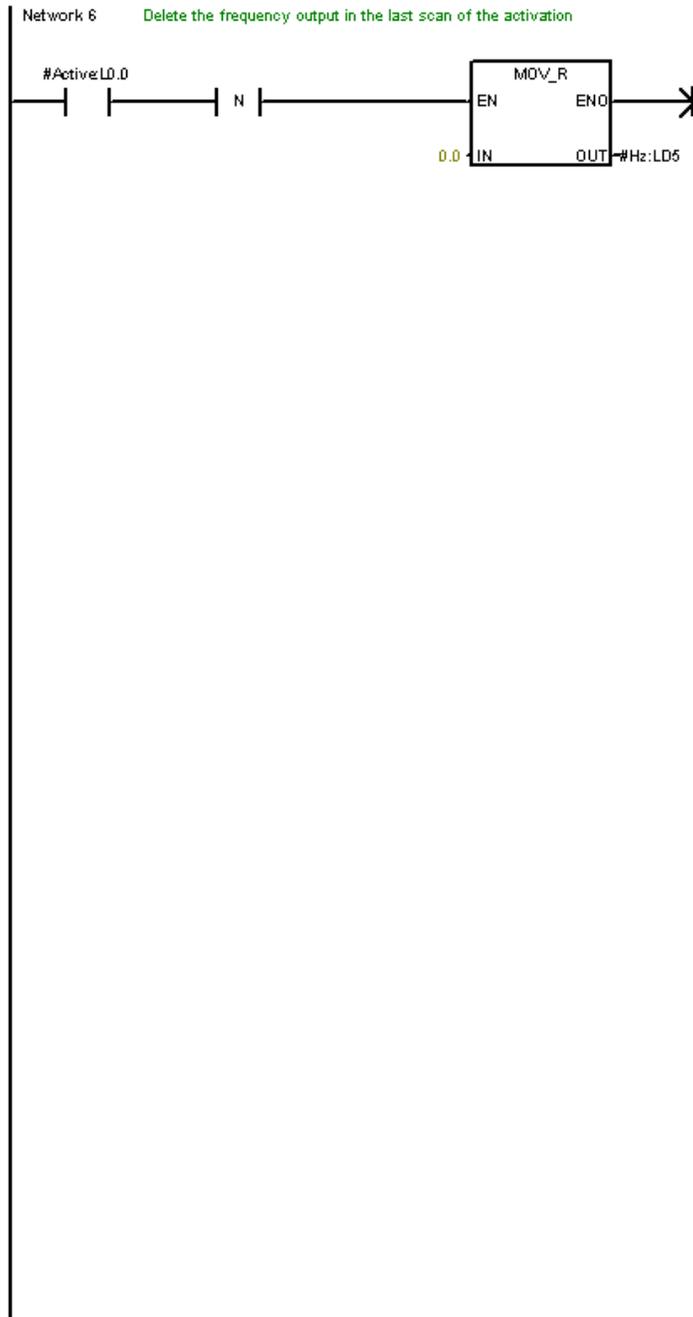
The Output "Trigger" gives a pulse in every "Time_interval" to use the data logging function for plotting the frequency.

Network 1 Initialize the time interval to 1.0 seconds and "BGN_time" if "Active" is set





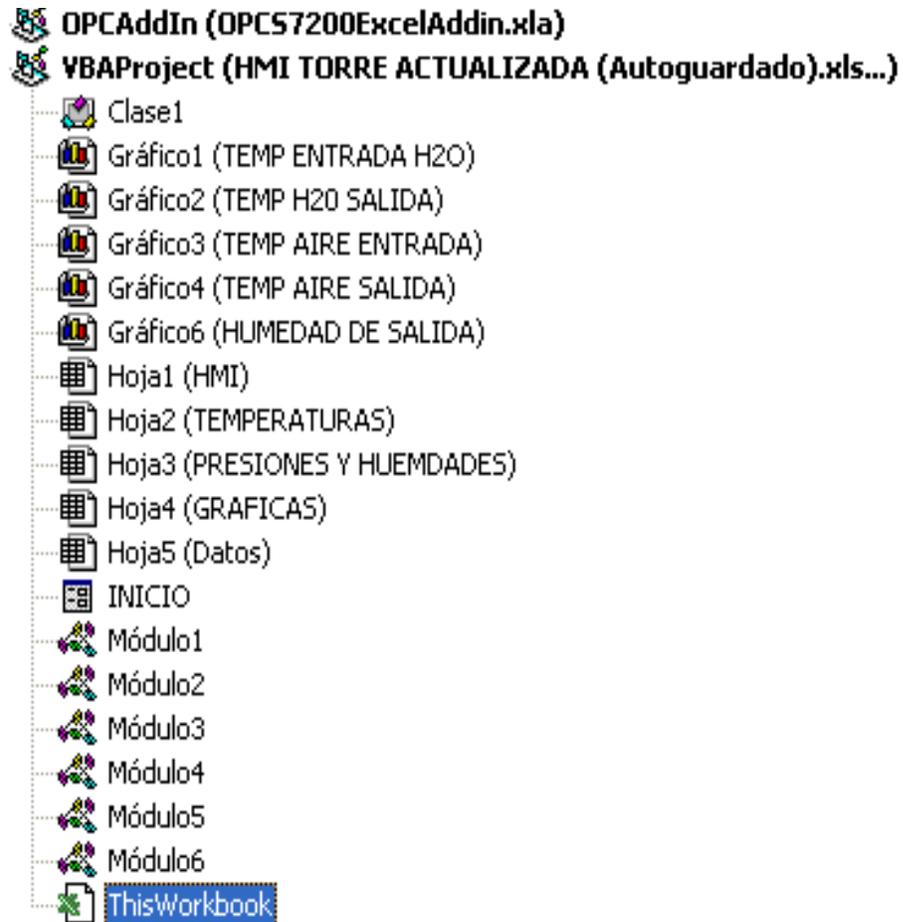




ANEXO 2. MACROS EN MICROSOFT OFFICE EXCEL 2010

En la figura 1, se encuentra detallado el árbol de macros del proyecto.

Figura 1. Árbol del proyecto de los macros



Fuente: Autores del proyecto

```
Sub GRAFICAS()  
'  
' GRAFICAS Macro  
'  
'  
    Sheets("GRAFICAS").Select  
End Sub  
Sub PRESIONES()  
'  
' PRESIONES Macro  
'  
'  
    Sheets("PRESIONES Y HUENDADES").Select  
    Range("B17").Select  
End Sub
```

```
Sub HUMEDAD ()
'
' HUMEDAD Macro
'
'
'
' Sheets("PRESIONES Y HUENDADES").Select
End Sub
Sub TEMPERATURAS ()
'
' TEMPERATURAS Macro
'
'
'
' Sheets("TEMPERATURAS").Select
End Sub
Sub VOLVER1 ()
'
' VOLVER1 Macro
'
'
' Sheets("HMI").Select
End Sub
Sub VOLVER2 ()
'
' VOLVER2 Macro
'
'
'
' Sheets("HMI").Select
End Sub
Sub VOLVER3 ()
'
' VOLVER3 Macro
'
'
'
' Sheets("HMI").Select
End Sub
```

```

Sub Botón7_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M30.0,BOOL,RW", 1, "")
End Sub
Sub Botón8_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M30.0,BOOL,RW", 0, "")
End Sub
Sub Botón11_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M10.0,BOOL,RW", 1, "")
End Sub
Sub Botón12_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M10.0,BOOL,RW", 0, "")
End Sub
Sub Botón13_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,MW5,WORD,RW", 10000, "")
End Sub
Sub Botón14_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,MW5,WORD,RW", 13000, "")
End Sub
Sub Botón15_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,MW5,WORD,RW", 20000, "")
End Sub
Sub Botón16_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,MW5,WORD,RW", 30000, "")
End Sub
Sub Botón19_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M25.0,BOOL,RW", 1, "")
End Sub
Sub Botón20_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M25.0,BOOL,RW", 0, "")
End Sub
Sub Botón21_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M20.0,BOOL,RW", 1, "")
End Sub
Sub Botón22_Haga_clic_en()
Call Excel.Application.Run("OPCS7200ExcelAddin.XLA!OPCWrite", "2:192.168.0.120:1000:1000,M20.0,BOOL,RW", 0, "")
End Sub

```



```

    Sheets("GRÁFICAS").Select
    Sheets("TEMP AIRE SALIDA").Visible = True
    Sheets("TEMP AIRE SALIDA").Select
End Sub
Sub IRHUME()
' IRHUME Macro
'
    Sheets("GRÁFICAS").Select
    Sheets("HUMEDAD DE SALIDA").Visible = True
    Sheets("HUMEDAD DE SALIDA").Select
End Sub

Private WithEvents mTiempo As Clase1
'Public inicio, tiempo As Variant
Public dato As Variant
Private Sub Workbook_Open()

End Sub

Sub iniciar()

Set mTiempo = New Clase1
Sheets("Datos").Range("D46") = 0
Range(Sheets("Datos").Range("B57"), Sheets("Datos").Range("G55").End(xlDown).Offset(1, 0)).ClearContents

Call mTiempo.TareaTiempo(Sheets("Datos").Range("D48").Value)

End Sub
Sub finalizar()
Sheets("Datos").Range("D46").Value = 0

End Sub
Sub mTiempo_EnviarDato()
Dim r1 As Range
Worksheets("Datos").Range("B55").End(xlDown).Offset(1, 0).Value = Now()
Worksheets("Datos").Range("C55").End(xlDown).Offset(1, 0).Value = Worksheets("Datos").Range("I8").Value
Worksheets("Datos").Range("D55").End(xlDown).Offset(1, 0).Value = Worksheets("Datos").Range("J8").Value
Worksheets("Datos").Range("E55").End(xlDown).Offset(1, 0).Value = Worksheets("Datos").Range("K8").Value
Worksheets("Datos").Range("F55").End(xlDown).Offset(1, 0).Value = Worksheets("Datos").Range("L8").Value
Worksheets("Datos").Range("G55").End(xlDown).Offset(1, 0).Value = Worksheets("Datos").Range("K16").Value

End Sub

```

ANEXO 3.
COMISIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA DEL
LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR