

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Automatización del Sistema de Enfriamiento para las Unidades Generadoras de la  
Planta Termoeléctrica Moín Pistón**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Jessika Almendares Solís**

**Cartago, Noviembre de 2011**

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

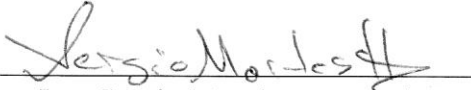
## ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

### PROYECTO DE GRADUACIÓN

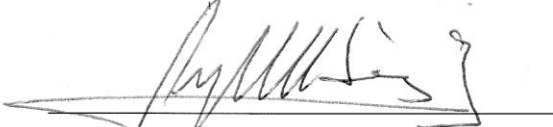
#### TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

#### Miembros del Tribunal

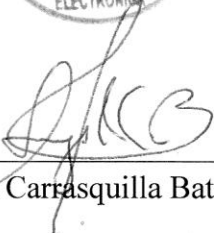
  
Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector

  
Ing. José Alberto Díaz García

Profesor lector



  
Ing. Arys Carrásquilla Batista

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 24 de noviembre de 2011

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 20 de octubre de 2011



Jessica Almendares Solís

Céd: 3-0455-0229

**Resumen:**

Como parte de los proyectos prioritarios del Área de Control y Automatización (para la región Huetar) del Instituto Costarricense de Electricidad, se ha diseñado e implementado un algoritmo de control manual y automático para el Sistema de Enfriamiento de la Planta Termoeléctrica Moín Pistón.

El Sistema de Enfriamiento protege la integridad física de las unidades generadoras de la planta. La meta del presente proyecto es evitar que se interrumpa la producción de energía eléctrica debido a la detención de los generadores por altas temperaturas en los mismos.

En este documento se presentan los recursos de hardware y software utilizados para el desarrollo del control, así como los algoritmos de programación, su implementación y resultados obtenidos.

Palabras clave: *Sistema de Enfriamiento, Temperatura, Torres de Enfriamiento, Control PID, Tanque de Agua.*

**Resume:**

As part of the priority projects of the Control and Automatization Area (for the Huetar region) of the Instituto Costarricense de Electricidad, it's been designed and implemented a manual and automatic control algorithm for the Cooling System of the Moín Pistón thermoelectric powerhouse.

The cooling system protects the physical integrity of the generating units of the plant. The goal of this project is avoiding that electric energy production gets interrupted due to the stoppage of the generators product of their high temperatures.

In this document are presented the hardware and software resources used for the control development, as well as the programming algorithms, their implementation and obtained results.

*Keywords: Cooling system, Temperature, Cooling Towers, PID Control, Water tank.*

**Dedicatoria:**

A mi madre por su amor, paciencia, y apoyo incondicional. Por ser un soporte y ejemplo en cada uno de los aspectos de mi vida. Por darme la oportunidad de progresar y perseverar. Le dedico con mucho amor todo mi esfuerzo y el logro obtenido.

## **Agradecimiento:**

Al concluir esta etapa de estudio, quiero agradecer a todos los que a través de este tiempo me han brindado su ayuda y apoyo. Y especialmente:

A Dios y mi familia.

A la Profesora Arys Carrasquilla por el aporte de sus conocimientos en la asesoría del proyecto. Por su apoyo, ejemplo y consejos durante todo mi curso como estudiante.

Al Instituto Costarricense de Electricidad por la oportunidad de desarrollar el proyecto y al Ingeniero Sergio Morales por el interés y ayuda brindada.

A los Profesores Roberto Pereira y Néstor Hernández por sus buenos deseos. A Sergio Morales y José Alberto Díaz por su participación como lectores.

En general, a los profesores de la Escuela de Ingeniería Electrónica y a esta Institución por brindarme las herramientas para alcanzar el éxito.

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	11
1.1 Necesidad de mejora del Sistema de Enfriamiento .....	11
1.2 Automatización del Sistema de Enfriamiento.....	13
CAPÍTULO II: META Y OBJETIVOS .....	14
2.1 Meta .....	14
2.2 Objetivo general.....	14
2.3 Objetivos específicos .....	14
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO .....	15
3.1 Descripción del Sistema de Enfriamiento .....	15
3.2 Antecedentes Bibliográficos .....	18
3.3 Protocolo de Interface en Serie Universal (USS).....	18
CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO .....	19
4.1 Operación manual del Sistema de Enfriamiento .....	19
4.2 Recursos de hardware.....	20
4.2.1 PLC S7 200 .....	21
4.2.2 Variador de frecuencia MicroMaster 440 .....	22
4.2.3 Relés de nivel de líquido RM4L.....	22
4.2.4 Sensor de Temperatura PT100 .....	23
4.3 Recursos de Software .....	23
4.3.1 Step 7 MicroWIN SP6.....	23
4.3.2 In Touch HMI 10.....	24
4.3.3 Protool Pro.....	24
CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN .....	25
5.1 Algoritmos de Funcionamiento del sistema .....	25
5.1.1 Monitorización de temperatura.....	26
5.1.2 Control Manual.....	27
5.1.3 Control Automático .....	28
5.1.3.1 Regulación nivel de agua en el tanque .....	28



5.1.3.2	Algoritmo alternancia de operación .....	29
5.1.3.3	Control del Sistema Térmico.....	33
5.1.3.4	Alarmas, avisos e indicadores .....	40
5.1.4	Comunicación por protocolo USS.....	41
5.2	Sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos .....	43
5.3	Interfaz HMI.....	44
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		47
6.1	Resultados Obtenidos .....	47
6.2	Análisis .....	48
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		49
7.1	Conclusiones.....	49
7.2	Recomendaciones: .....	49
CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA .....		50
ANEXOS.....		52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama general de operación del Sistema de Enfriamiento. ....	12
Figura 2.	Diagrama de bloques del Sistema de Enfriamiento. ....	16
Figura 3.	Diagrama de flujo general del funcionamiento del Sistema de Enfriamiento. ....	17
Figura 4.	Interfaz en SCADA para la monitorización de las torres de enfriamiento y bombas hidráulicas. ....	18
Figura 5.	Jerarquía de comunicación Protocolo USS.....	19
Figura 6.	Ciclo de ejecución de tareas del PLC S7-200 [7] .....	22
Figura 7.	Diagrama de flujo general para el control del Sistema de Enfriamiento. ....	25
Figura 8.	Monitorización de temperatura en el PLC S7200.....	26
Figura 9.	Diagrama de flujo del control manual.....	27
Figura 10.	Rutina en el PLC S7 200 del control manual local .....	28
Figura 11.	Circuito de conexión del RM4L [9].....	29
Figura 12.	Estado del relé para la función de llenado del RML4 [9] .....	29
Figura 13.	Contador tiempo de operación de los abanicos.....	30
Figura 14.	Algoritmo general de tabla de alternancia. ....	31

Figura 15. Respuesta del sistema en lazo abierto .....	33
Figura 16. Diagrama de bloques del control PID. ....	34
Figura 17. Algoritmo de asignación de velocidad cuando $VD50 < 33.3$ . ....	38
Figura 18. Algoritmo de asignación de velocidad cuando $33.3 < VD50 < 66.6$ . ....	39
Figura 19. Inicialización de la comunicación, Protocolo USS. ....	42
Figura 20. Comunicación USS con el variador. ....	42
Figura 21. Interfaz en SCADA del Sistema de Enfriamiento. ....	43
Figura 22. Pantalla principal en el panel táctil TP177micro. ....	45
Figura 23. Pantalla de alarmas en el panel táctil TP177micro. ....	45
Figura 24. Pantalla de mantenimiento en el panel táctil TP177micro. ....	46
Figura 25. Gráfica de salida creciente del Controlador PID. ....	47
Figura 26. Gráfica de salida decreciente del Controlador PID. ....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características PLC S7 200 CPU 224XP [6] .....	21
Tabla 2. Marcas activas para llenar la tabla de alternancia .....	32
Tabla 3. Parámetros de lazo PID. [6].....	36

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Necesidad de mejora del Sistema de Enfriamiento

La Planta Termoeléctrica Moín Pistón forma parte del Centro de Generación Moín del Instituto Costarricense de Electricidad. Se ubica en la localidad de Sandoval del cantón central de la provincia de Limón y entra en operación el 19 de febrero de 1977 para mejorar el servicio eléctrico en la región Huetar Atlántica. [1]

Esta Planta no está en operación continua, sino que entra en funcionamiento cada vez que la demanda de energía en la región lo requiere. Para la generación de electricidad se tienen cuatro unidades de motores IHI SEMT Pielstick modelo 18 de combustión interna tipo diesel y generadores Nishishiba. [1]. La Planta Moín Pistón produce energía eléctrica a partir de combustibles (diesel y bunker) que alimentan cuatro motores acoplados cada uno a un generador para la producción de electricidad. El proceso de generación requiere de condiciones específicas de temperatura en los generadores para evitar que se interrumpa la producción. La protección de la integridad física de las unidades termoeléctricas recae sobre el Sistema de Enfriamiento, cuya finalidad es evitar daños por temperaturas elevadas en las mismas, debido a la carga térmica que estas producen. En general, a través de torres de enfriamiento y un circuito de tuberías que se comunica con los generadores, se permite el paso del caudal de líquido necesario para su refrigeración. Un tanque proporciona el agua que utiliza el Sistema de Enfriamiento.

Los operarios de planta tienen como responsabilidad la operación manual de este sistema y la monitorización de cada una de las variables, entre las que se incluyen: temperatura en la tubería de aguas duras y generadores, presión en la tubería, nivel de agua en el tanque y frecuencia de operación de los abanicos. A través de un tablero de control, los operarios deben realizar el arranque y paro manual de cada uno de los abanicos en forma individual cada vez que los generadores entran o salen de operación respectivamente. El proceso global de operación del sistema se muestra en la figura 1.

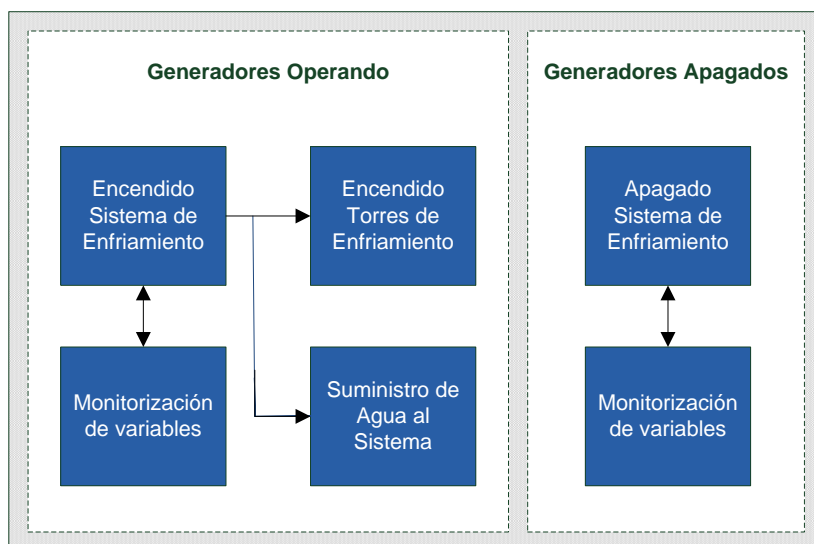


Figura 1. Diagrama general de operación del Sistema de Enfriamiento.

Resulta imposible para los operarios realizar una monitorización de variables en forma continua y lograr el ajuste oportuno de parámetros ante los requerimientos de funcionamiento en la Planta, de manera que no se impida de la generación de energía eléctrica de forma inesperada.

El sistema de enfriamiento es un complemento del sistema de generación de energía y de control de bombas del circuito de tuberías. La producción de electricidad depende del funcionamiento integrado de estos sistemas. Los generadores requieren necesariamente un sistema de refrigeración que permita mantener su temperatura óptima de operación. Se presenta la necesidad de automatizar el Sistema de enfriamiento con el fin de lograr los siguientes beneficios:

- Confiabilidad de operación en la planta de manera que las unidades generadoras no frenen su funcionamiento por elevadas cargas térmicas.
- Protección de la integridad física de los equipos, evitando accidentes por el sobrecalentamiento de los generadores.
- Disminución en el consumo de energía, asegurando la eficiencia de su uso.
- Realizar al arranque y paro automático del sistema.
- Simplificar el trabajo de los operarios de planta, a través de la visualización y control remoto por medio de una interfaz de usuario en un computador.

## **1.2 Automatización del Sistema de Enfriamiento**

El departamento de Servicio Técnico del Instituto Costarricense de Electricidad requiere que el Sistema de Enfriamiento de la Planta Moín Pistón trabaje de forma automática e independiente de la continua intervención humana, con el propósito de evitar la ejecución de tareas repetitivas e ineficientes. Se busca el aumento en la eficiencia de operación del sistema reflejado en la reducción del gasto de energía utilizada para la refrigeración de las unidades termoeléctricas. El equipo de hardware disponible debe ser integrado hasta donde sea posible para el desarrollo del control, los dispositivos faltantes deben ser adquiridos garantizando el menor costo y el cumplimiento de los requerimientos de la institución.

Para lograr la operación automática del Sistema de Enfriamiento se implementa un algoritmo de control robusto que realiza el ajuste de los parámetros del sistema, el mismo es ejecutado por el PLC S7 200 incorporado a otros elementos de hardware que permiten el manejo de las señales provenientes de sensores y la comunicación entre los dispositivos de control de frecuencia.

La necesidad de supervisión y control de variables del proceso de enfriamiento a distancia hace que el mismo sea implementado en el sistema SCADA (Control Supervisor y Adquisición de Datos), permitiendo el control y la visualización del estado de operación en tiempo real

## **CAPÍTULO II: META Y OBJETIVOS**

### **2.1 Meta**

Evitar el paro en la producción de energía eléctrica en la planta Moín Pistón debido al disparo mecánico de las unidades generadoras por temperaturas elevadas.

### **2.2 Objetivo general**

Automatizar el sistema de enfriamiento de los generadores en la planta termoeléctrica Moín a Pistón.

### **2.3 Objetivos específicos**

- Evaluar y determinar los recursos de hardware necesarios para el control automático del Sistema de Enfriamiento.
- Controlar la frecuencia de operación y alternancia de los tres abanicos en las torres de enfriamiento del sistema.
- Suministrar las señales de control necesarias para regular de forma automática el nivel de agua en el tanque
- Regular y medir la temperatura del sistema de enfriamiento para la adecuada operación de las unidades generadoras.
- Diseñar e implementar la monitorización y control del sistema mediante una interfaz en SCADA.
- Diseñar e implementar la interfaz de usuario (HMI) local del tablero de control de variadores.

## CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

### 3.1 Descripción del Sistema de Enfriamiento

La protección de la integridad física de los generadores recae sobre el Sistema de Enfriamiento. Los generadores eléctricos cuentan con un disparo mecánico de seguridad que sea activa cuando la temperatura de operación alcanza los 95°C haciendo que las unidades se detengan inmediatamente para evitar que se dañen. Resulta importante asegurar que la temperatura en salida de cada uno de los motores no sobrepase los 80°C para evitar que se llegue a los 95°C en los generadores. Bajo las condiciones mencionadas, la temperatura de entrada en el motor se encuentra en el rango de 70-80°C permitiendo la operación eficiente y segura de los generadores. Para asegurar que el sistema de generación se desempeñe correctamente la temperatura en el circuito de tuberías debe mantenerse con un valor menor a 32°C. [2]

Las unidades termoeléctricas, funcionan con motores de combustión interna (pistón) donde en el mismo motor se aprovecha la expansión de los gases producidos a partir del diesel o búnker en la cámara de un cilindro. Se tienen cuatro motores de este tipo y generadores Nishishiba con capacidad de producción de 8 000 KW (cada uno 3 fases 60 ciclos 13 800 V), para un total instalado de 32 000 KW. Estas unidades trabajan a partir de búnker en un 95% y diesel en un 5%. [1,2]

El Sistema de Enfriamiento cuenta con tres torres de enfriamiento modelo UltraSST 114-0324 de EVAPCO, cada una con un motor de 25 HP. La entrada de agua caliente ingresa al sistema de distribución de la parte superior y se distribuye en la cubierta mojada mientras en la parte inferior ingresa aire que viaja hacia arriba a través de la cubierta, de manera que una pequeña parte de agua es evaporada y se remueve el calor del agua restante, la descarga del aire caliente se da por acción del abanico evitando la recirculación del aire para lograr el enfriamiento del líquido. [3]. Estas torres se encargan de regular la temperatura que llega los generadores a través de un circuito de tubería cuyo diámetro es de 274mm y espesor de 9mm, con caudal promedio 133.6 litros por segundo. [4]

El circuito de tubería toma el agua a alta temperatura que retorna de los generadores y la dirige a las torres de enfriamiento, donde se disipa el calor. Las torres de enfriamiento se comunican con un tanque de 26.0 x 8.4 x 1.8 metros que suministra el agua para el Sistema de Enfriamiento y por medio de una bomba se permite el paso de agua al tanque.

Una sección de tubería de aguas duras conecta el tanque de agua con las unidades generadoras. Por medio de esta sección se lleva el líquido que permite la refrigeración de las unidades. A través de cuatro bombas se puede controlar el caudal en la tubería que posteriormente llegará a los generadores. Una de las bombas está dañada por lo que no participa en la operación del sistema. La tubería de aguas duras debe operar a una presión mayor a 2.5 Kg/cm<sup>2</sup>, cada bomba instalada da un máximo de presión de 3 Kg/cm<sup>2</sup> El diámetro de la tubería es 509.2mm y su espesor es 7.8mm. El caudal promedio cuando funciona una bomba es de 229.2 litros por segundo, para 2 bombas se tiene 391.6 litros por segundo y para 3 bombas 431.6 litros por segundo. [4]

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques general del sistema de enfriamiento.

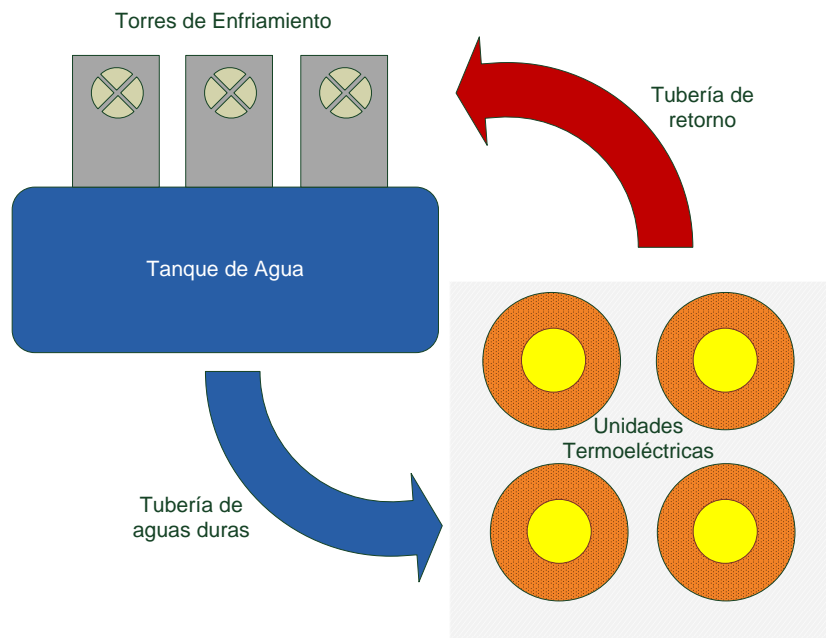


Figura 2. Diagrama de bloques del Sistema de Enfriamiento.



El Sistema de Enfriamiento entra en funcionamiento cada vez que al menos un generador se encuentra en operación, en caso contrario debe permanecer apagado. De manera muy general, se debe verificar circule el líquido por la tubería y enfríe las unidades, una vez verificada esta condición, se realiza una comparación de la temperatura del agua que se dirige a los generadores y la temperatura consigna del líquido en la tubería para evitar el disparo mecánico de las unidades. Si la temperatura medida en la tubería de aguas duras es mayor a la consigna se deben encender una a una las torres de enfriamiento escalando su velocidad hasta lograr la reducción de temperatura. En caso contrario cuando la temperatura es menor, se van apagando uno a uno los generadores reduciendo su velocidad.

En la figura 3 se muestra el diagrama general de bloques que describe el proceso que realiza el Sistema de Enfriamiento para evitar el disparo mecánico por elevadas temperaturas en los generadores eléctricos de la planta.

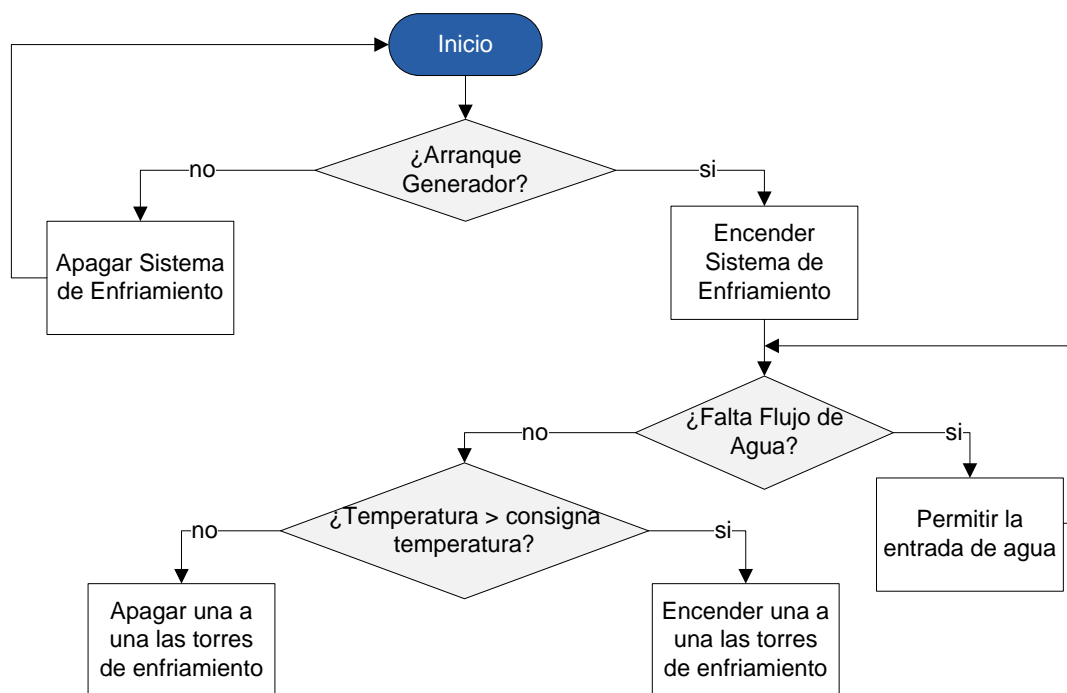


Figura 3. Diagrama de flujo general del funcionamiento del Sistema de Enfriamiento.

### 3.2 Antecedentes Bibliográficos

Un trabajo previo en el sistema de enfriamiento se realizó en el año de 2004 por la empresa Válvulas y Equipos S.A. El PLC S7 200 se programó únicamente para encender o apagar manualmente los abanicos a un 90% de su frecuencia máxima de trabajo, esto únicamente desde el panel de control.

También se incluyó una interfaz en SCADA que permite observar el estado de las torres de enfriamiento (ya sea encendido o apagado) y el estado de las bombas de salida a la tubería de aguas duras y de entrada de agua al tanque. Esta interfaz se presenta en la figura 4.

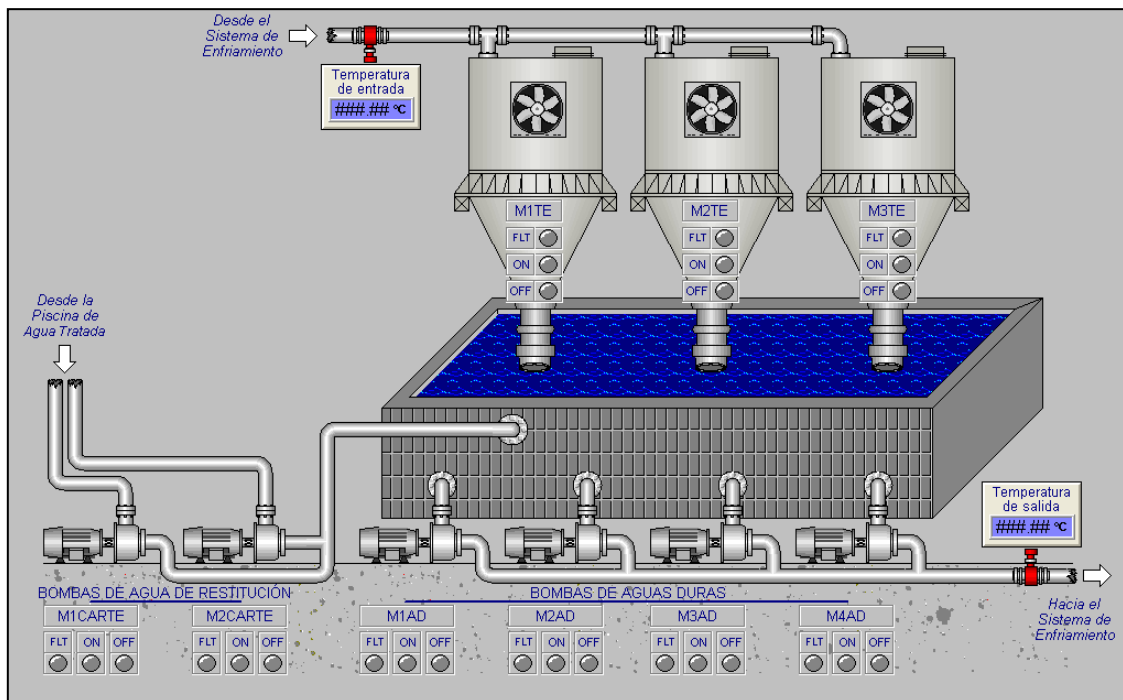


Figura 4. Interfaz en SCADA para la monitorización de las torres de enfriamiento y bombas hidráulicas.

### 3.3 Protocolo de Interface en Serie Universal (USS)

El protocolo USS permite el accionamiento de equipos de la gama SIMOVERT MASTERDRIVES donde se incluyen los variadores de frecuencia para la regulación de velocidad de motores.

Por medio de variadores de frecuencia se accionan los abanicos en cada una de las torres de enfriamiento. Estos variadores reciben una serie de parámetros de operación (elevación en arranque, velocidad de transferencia USS, frecuencia final de elevación, frecuencia de pulsación entre otros) que deben ser comunicados directamente por el autómatas programable por medio de este protocolo. [5]

El protocolo utiliza la técnica maestro – esclavo para el acceso por el puerto serie. El autómatas programable actúa como maestro y el variador de frecuencia como esclavo. El protocolo permite hasta un máximo de 32 usuarios de bus, es decir puede soportar hasta 31 esclavos. Para las labores de automatización, la comunicación se logra por medio de telegramas de longitud fija o variable. En la figura 5 se muestra la jerarquía en la comunicación de hardware para el controlar el sistema de enfriamiento. [5]

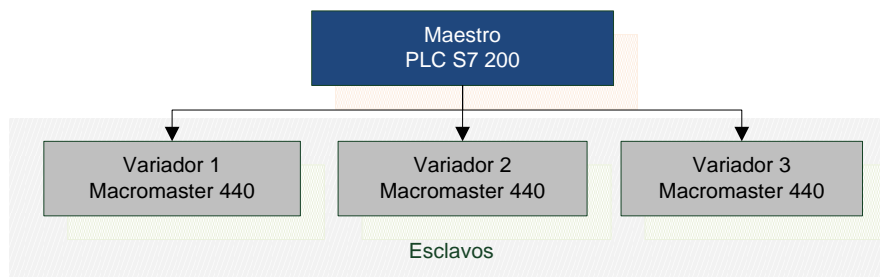


Figura 5. Jerarquía de comunicación Protocolo USS.

## CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

### 4.1 Operación manual del Sistema de Enfriamiento

Se debe asegurar que la temperatura en la salida de los motores no sea mayor a los 80°C para evitar el disparo mecánico de las unidades que se da a 95°C, esto implica que la temperatura en la tubería de aguas duras no sobrepase los 32 °C, establecida como el valor máximo de temperatura en la tubería para el control del sistema.

Por otra parte, la operación manual del sistema de enfriamiento por parte de los operarios de planta requiere la intervención continua en el ajuste de parámetros de funcionamiento. A través de un tablero de control realizan el arranque y paro manual de cada uno de los abanicos en forma individual cada vez que los generadores se ponen en marcha. Los abanicos se accionan por medio del variador de frecuencia que es gobernado por el PLC. El estado de encendido o apagado de los abanicos se muestra en el tablero mediante luces indicadoras. En varias ocasiones, los operarios han puesto en marcha las unidades termoeléctricas y han olvidado arrancar el Sistema de Enfriamiento, provocando el disparo mecánico de los generadores y en consecuencia el paro en la producción de energía hasta que disminuya la temperatura en las unidades.

Ningún dispositivo para detectar el valor de temperatura se encuentra instalado en la planta, entonces los operarios encienden manualmente todas las torres de enfriamiento con una velocidad de 100% para evitar temperaturas elevadas en los generadores. La frecuencia de operación de los abanicos en las torres de enfriamiento permite la regulación de la temperatura en la tubería de aguas duras. En el caso extremo opera un generador y se mantienen en funcionamiento las tres torres de enfriamiento.

## **4.2 Recursos de hardware**

Para implementar el control del sistema de enfriamiento se determina utilizar los siguientes recursos de hardware disponibles en la planta. El Autómata programable PLC S7 200 con un módulo de extensión de entradas y salidas necesario para el manejo de las señales. Para la entrada de los sensores se cuenta con un módulo de entradas analógicas 4Ex mV/mA – 1Sx V/mA de 4-20 miliamperios. Para el control de velocidad de los abanicos se utilizan los variadores de frecuencia MicroMaster 440. Cada una de las torres de enfriamiento tiene instalado un detector de vibración para identificar anomalías en el funcionamiento de las mismas y se cuenta con un sensor de flujo para la monitorización de la circulación de agua en la tubería. Además se incorpora a los recursos los sensores para regular el nivel de agua en el tanque y para la monitorización de temperatura en la tubería de aguas duras.

#### 4.2.1 PLC S7 200

Es un producto de Siemens que resulta ideal para la realizar tareas de automatización debido a las facilidades que ofrece en costo, tamaño y versatilidad por su amplio juego de operaciones y librerías disponibles. Utiliza la CPU 224XP que incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación así como circuitos de entrada y salida en una carcasa que conforma el PLC.

Este autómata cuenta con dos puertos de comunicación RS – 485 que permiten la comunicación con el computador. La conexión directa se puede realizar mediante un cable punto PPI (Interface punto a punto) multimaestro, que permite en enlace entre el puerto del PLC y el puerto serie RS – 232 del ordenador. Las principales características de la CPU 224XP se presentan en la tabla 1. [6]

Tabla 1. Características PLC S7 200 CPU 224XP [6]

<b>Función</b>	<b>CPU 224XP</b>
Dimensiones Físicas (mm)	140 x 80 x 62
Memoria del programa Sin runtime	12288 bytes
Memoria del programa Con runtime	16384 bytes
Memoria de datos	10240 bytes
Memoria de backup	100 horas
Entradas y salidas integradas Digitales	14 E / 10 S
Entradas y salidas integradas Analógicas	2 E / 1 S
Potenciómetros analógicos	2

El PLC S7-200 ejecuta las tareas de las rutinas programadas en forma repetitiva o bien en cada ciclo. En la figura 6 se observa el proceso de ejecución que se realiza internamente en el autómata.

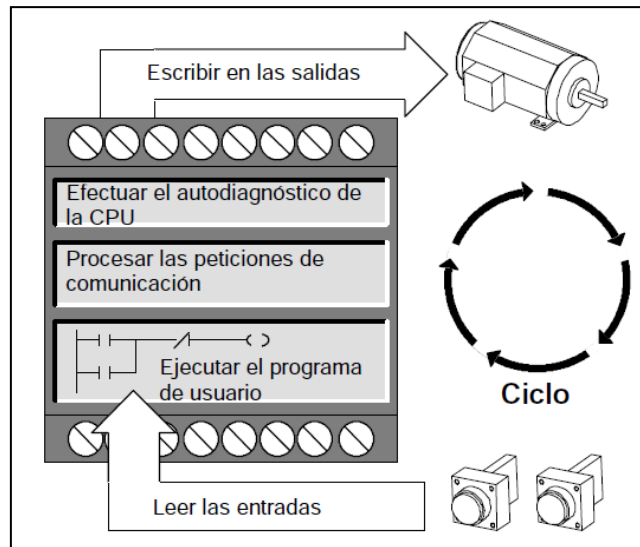


Figura 6. Ciclo de ejecución de tareas del PLC S7-200 [7]

#### 4.2.2 Variador de frecuencia MicroMaster 440

El MicroMaster 440 es un convertidor de frecuencia que permite modificar la velocidad de operación de motores, por lo que resulta ideal para tareas de control. Estos variadores de frecuencia utilizan la tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) y son gobernados por un microprocesador mediante un método especial de PWM (Modulación de ancho de pulsos) con frecuencia de pulsación seleccionable. [7].

#### 4.2.3 Relés de nivel de líquido RM4L

Para regular el nivel de agua en el tanque se utilizan relés RM4L de ZELIO-control. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la resistencia que se presenta entre los electrodos inmersos (baja resistencia) y los electrodos no inmersos (alta resistencia) en el líquido. Los relés se desconectan o se arman cuando los electrodos se encuentran dentro o fuera del líquido. Por medio de los electrodos B1 y B2 se puede ejecutar la rutina de llenado del tanque que permite que haya líquido suficiente para ser suministrado al Sistema de Enfriamiento. [8,9]

#### **4.2.4 Sensor de Temperatura PT100**

El sensor PT100 es un tipo particular de RTD (detector de temperatura resistivo) que tiene una resistencia de platino de 100 ohmios a 0°C y obedece un comportamiento lineal que permite medir temperaturas que van desde 0°C hasta 400°C con un valor mínimo de medición de 0,5°C. [10]

Este sensor está compuesto por un revestimiento cerámico en cuyo interior se ubica el platino bobinado entre material aislante. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia al percibir cambios de temperatura en el medio asociado a un valor de corriente que va al módulo de entradas analógicas del PLC. La variación en la resistencia por cada grado de cambio en la temperatura se calcula mediante la ecuación 1.

$$R_t = R_o (1 + \alpha t) \quad (1)$$

Donde  $R_o$  es el valor de la resistencia a 0°C,  $R_t$  es la resistencia a  $t$  grados centígrados y  $\alpha$  es una constante cuyo valor entre 0°C y 100°C es de 0.003850 1/°C. [11]

### **4.3 Recursos de Software**

Para el desarrollo del sistema de control y monitorización de parámetros del Sistema de Enfriamiento se utilizan dos recursos de software que se detallan a continuación.

#### **4.3.1 Step 7 MicroWIN SP6**

Desarrollado por Siemens para la programación de la gama de autómatas programables PLC. Permite la programación por medio de tres distintos editores a saber, el KOP, el FUB y el AWL. Para efectos del presente proyecto se utiliza el KOP que permite visualizar las rutinas de ejecución del programa mediante conexiones eléctricas. [6]

Las operaciones están disponibles en el árbol de operaciones y además se facilita la ejecución de rutinas por medio de la adición de librerías y permite la ejecución en línea con el controlador para la realización de pruebas directamente.

#### **4.3.2 *In Touch HMI 10***

Es una herramienta de la compañía Wonderware que permite el diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de supervisión y control en tiempo real en modo gráfico para el usuario. Por medio de este software se desarrolla la interfaz en SCADA para la visualización y control del Sistema de Enfriamiento. [11, 12]

Sus herramientas permiten la creación de botones, paneles, interruptores y otros recursos gráficos para la interfaz. Además, por medio de la asignación de direcciones a las variables se logra la comunicación de los parámetros de interés.

#### **4.3.3 *Protool Pro***

Protool Pro comprende el software de configuración ProTool Pro CS y el Runtime ProTool Pro RT. Este software permite crear la interfaz gráfica del panel táctil TP177micro, este corresponde a un sistema basado en Windows que permite el manejo y la supervisión de procesos. [13]

La interfaz gráfica se compone de diferentes imágenes diseñadas con elementos de visualización y elementos de operación. El usuario tiene una interacción directa con los parámetros de control incluidos en la interfaz y le permite observar el comportamiento del sistema en tiempo real.

ProTool está integrado al STEP 7 lo que facilita el uso de variables y su direccionamiento. Además facilita la configuración de la lista de alarmas del proceso y el uso de contraseñas para restringir el acceso de los usuarios. [13]



## CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN

En esta sección se presenta la solución implementada para lograr la automatización del Sistema de Enfriamiento. La solución incluye algoritmos de manejo de señales, control y regulación de las variables del sistema, que se detallan a continuación. Además se incluye el desarrollo de la interfaz de usuario HMI y la interfaz en SCADA.

### 5.1 Algoritmos de Funcionamiento del sistema

El diagrama de bloques general de la programación implementada en el PLC S7- 200 se muestra en la figura 7. Se observan los bloques de las subrutinas que se ejecutan para lograr el control del Sistema de Enfriamiento.

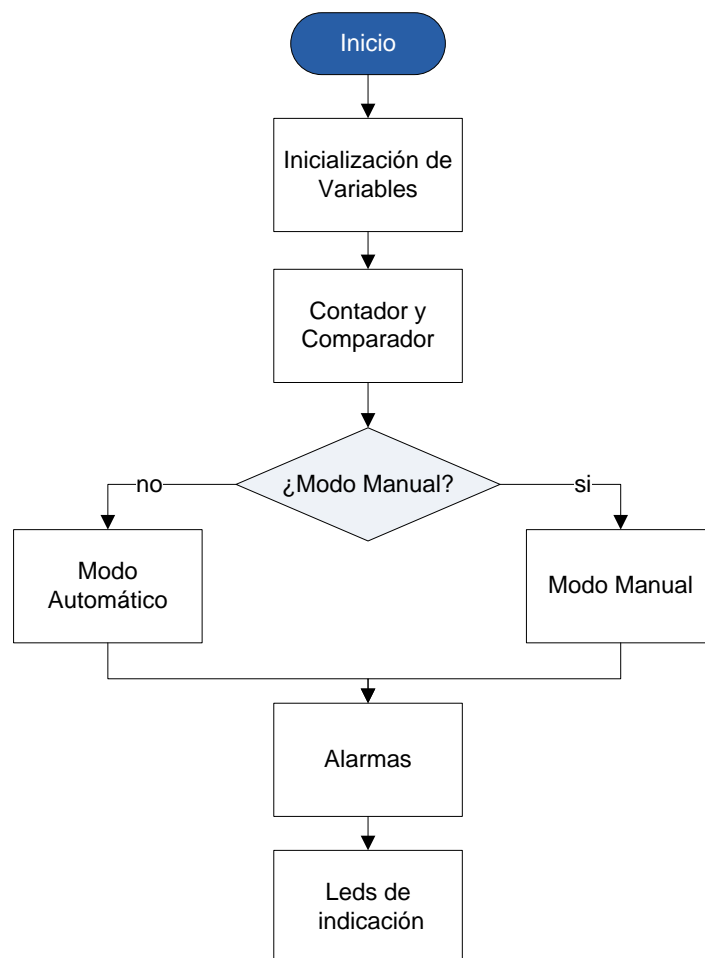


Figura 7. Diagrama de flujo general para el control del Sistema de Enfriamiento.

La selección del modo de operación se hace a través de una maneta (selector) ubicada en el armario de control local o bien se puede controlar el modo desde la interfaz desarrollada en SCADA. Por defecto, cuando se da el arranque de un generador, el Sistema de Enfriamiento arranca en modo automático para tener el control inmediato de la temperatura, nivel de agua y vibración en las torres. Es decir, el sistema requiere una señal por parte del operario para trabajar en modo manual. Las señales provenientes de los sensores son introducidas al PLC por medio de un módulo de entradas analógicas, con excepción de los sensores de vibración que van directamente en las entradas digitales del mismo.

### 5.1.1 Monitorización de temperatura

Para obtener el dato real de temperatura en la tubería de aguas duras se implementó en el PLC, la rutina que se muestra en la figura 8. Por medio de la adición de la librería se obtiene la lectura de temperatura en grados centígrados medida por el RTD PT100. [14]

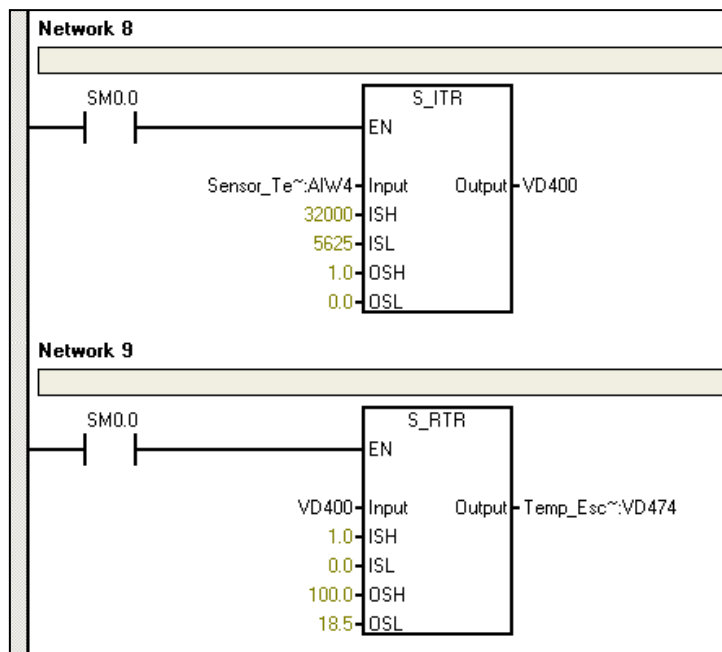


Figura 8. Monitorización de temperatura en el PLC S7200.

### 5.1.2 Control Manual

El sistema de enfriamiento puede trabajar en dos modos manual y automático. En modo manual se pueden presentar dos escenarios de operación que corresponden a manual local y manual remoto, el primero se acciona por medio de una maneta ubicada en el armario de control junto con el PLC y los variadores, el segundo se acciona a través de un pequeño panel ubicado a un costado de las torres de enfriamiento y el tanque de agua. El diagrama de flujo del control manual para el primer abanico se muestra en la figura 9.

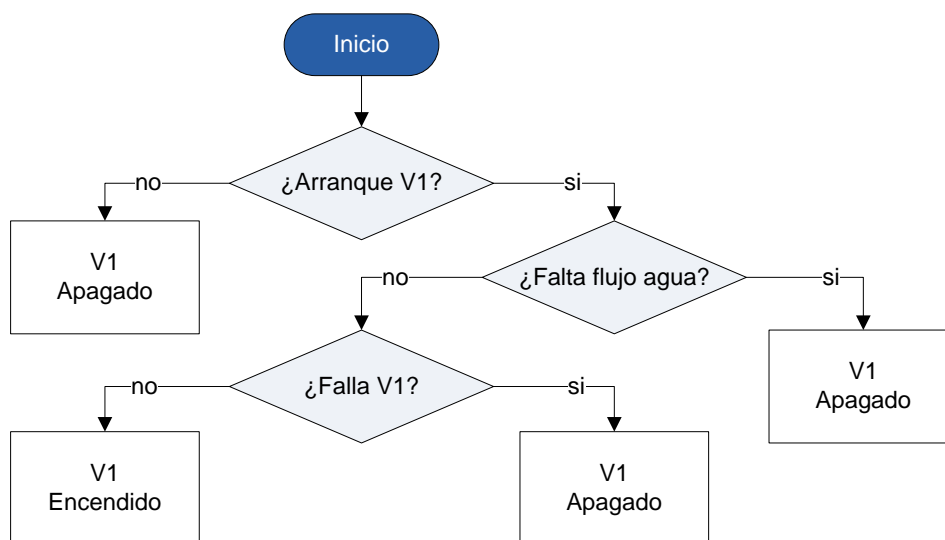


Figura 9. Diagrama de flujo del control manual.

La señal *RUN\_V1* permite poner en marcha el variador de frecuencia del motor uno. Para que esto, se requiere que se dé la señal de arranque y que el motor no se encuentra dañado. También es importante verificar que circule líquido en la tubería de aguas duras para una operación sin problemas. El PLC identifica los estados de las señales que llegan directamente de la monitorización de parámetros del sistema y ejecuta la rutina de control manual para cada uno de los variadores de frecuencia, según las peticiones del operario. En el armario se encuentra el panel de control local donde se ubican las manetas para encender cada uno de los variadores a una velocidad fija de 100% y los leds de indicación los operarios pueden visualizar el estado de cada uno de ellos.

Para el control manual de cada uno de los 3 motores en las torres se utiliza la señal *Local\_Remoto* accionada desde una maneta en el tablero de control, por medio de esta señal se puede elegir la operación manual local o remoto. La rutina del control manual local implementada en el PLC se muestra en la figura 10.

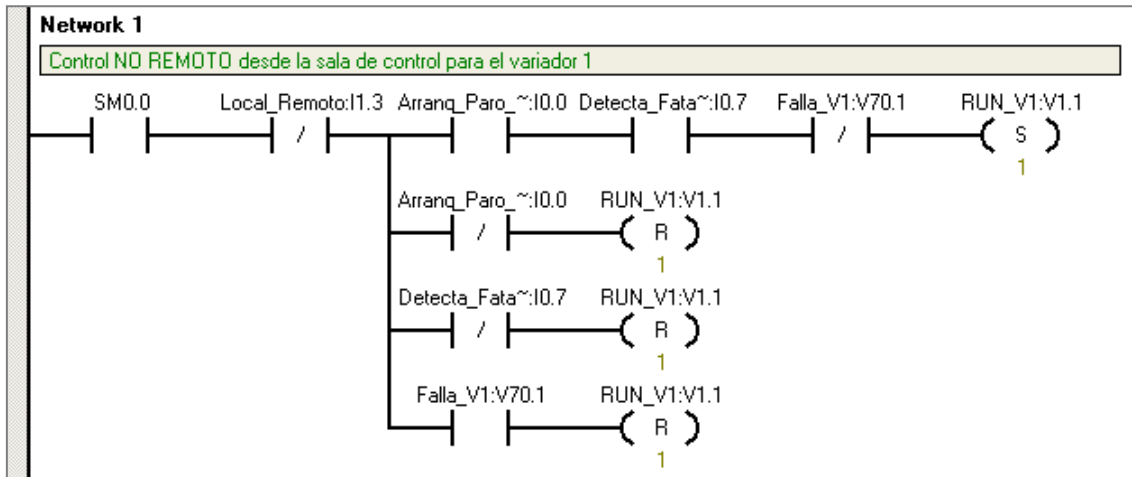


Figura 10. Rutina en el PLC S7 200 del control manual local

Para el control remoto, el usuario da el arranque de cada motor en las manetas situadas en el panel remoto o SV. Por medio de luces indicadoras se puede observar el estado de cada uno de los variadores. Para este caso, en el PLC se implementa básicamente la misma rutina del control local utilizando las señales provenientes del panel SV.

### 5.1.3 Control Automático

#### 5.1.3.1 Regulación nivel de agua en el tanque

Para los intereses del funcionamiento del Sistema de Enfriamiento se utiliza la función de llenado del tanque por medio de dos electrodos, que son representados por *B1* y *B2* e indican el nivel de referencia y el nivel máximo de líquido respectivamente. Para realizar el control del nivel de agua se utilizan las señales en los contactos que se muestran en la figura 5.4, donde, la tensión de alimentación es representada por *Uc*. Los contactos se ponen en 1 lógico cuando el relé se arma y se ponen en 0 cuando se da la

desconexión del mismo. El circuito de conexión interno de los contactos de cada relé se presenta en la figura 11. [8,9]

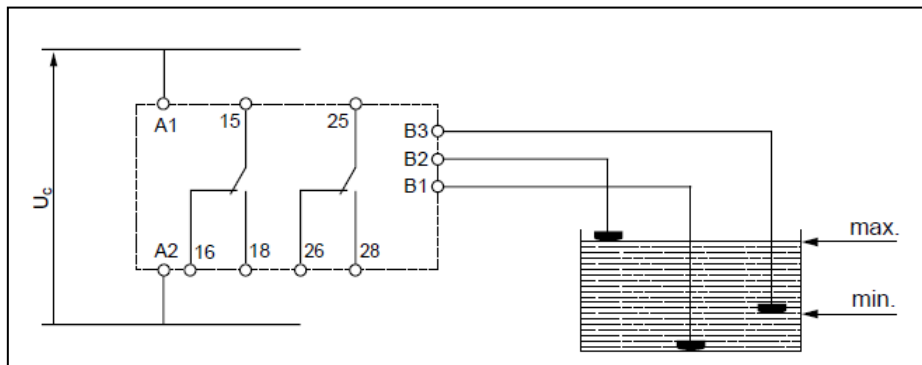


Figura 11. Circuito de conexión del RM4L [9]

En la figura 12 se presenta el estado de los relés según el nivel de agua. El estado del relé en los contactos es utilizado para el algoritmo de la función de llenado del tanque de agua que permite mantener el nivel del líquido en la posición del electrodo B2 para garantizar que haya suficiente agua para abastecer al Sistema de Enfriamiento. La condición de falta de agua se presenta cuando el nivel de líquido está por debajo del electrodo B2 que se ubica en la posición mínima posible para asegurar que el sistema trabaje correctamente. Así, con base en el estado de los relés se configura una rutina de regulación de nivel de agua en el tanque. [8,9]

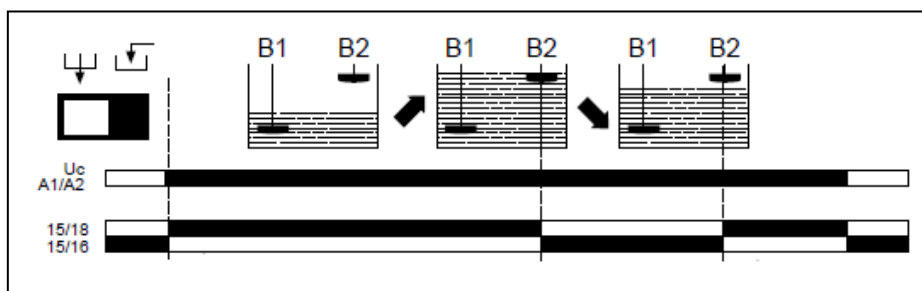


Figura 12. Estado del relé para la función de llenado del RML4 [9]

### 5.1.3.2 Algoritmo alternancia de operación

La alternancia en la operación de los motores en cada una de las torres de enfriamiento se logra a partir de una rutina que ejecuta tres contadores que acumulan en variables el tiempo de funcionamiento de cada abanico individualmente.

En la figura 13 se observan los tres contadores, la marca *MO.7* se activa por medio de un temporizador cada segundo, de manera que en cada flanco positivo del reloj se cuenta el tiempo de operación del abanico cuando está funcionando. Las variables *VD320*, *VD325*, *VD330* almacenan el valor de las horas operación de los motores 1,2 y 3 respectivamente.

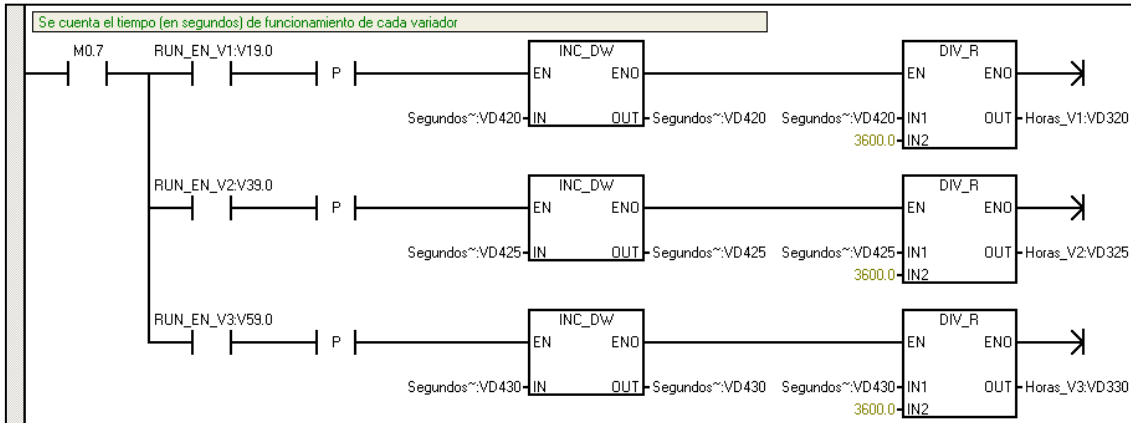


Figura 13. Contador tiempo de operación de los abanicos.

Utilizando comparadores se determina el motor que lleva el menor tiempo de operación y se introduce en una tabla que utiliza la lógica LIFO, donde el último elemento en entrar a la pila es el primero en salir, asegurando que el motor con mayor tiempo de operación sea utilizado menor tiempo en comparación con los otros motores. La dirección que indica el inicio de la tabla es *VW60* donde se almacena el número máximo de registros que soporta la tabla, la posición *VW62* contiene el número de registros almacenados en la tabla y los datos se ubican a partir de la posición *VW64* hasta la dirección *VW68*.

De acuerdo con el tiempo de operación registrado, en el primer lugar de la pila se introduce el número (puede ser 1,2 ó 3) que identifica el motor con menor tiempo de funcionamiento, el segundo lugar corresponde al segundo motor con mayor tiempo de funcionamiento que el primero pero menor tiempo que el tercero, el último lugar de la pila corresponde al número del motor con mayor tiempo de trabajo, de manera que queda en último lugar en la cola para ser utilizado cuando se requiera.

La rutina que se encarga del manejo de la tabla de alternancia se muestra en la figura 14 para el caso en que se encuentra activa la marca *M0.1* que indica que el orden de entrada a la tabla de alternancia debe ser en el orden motor 3, 2 y 1.

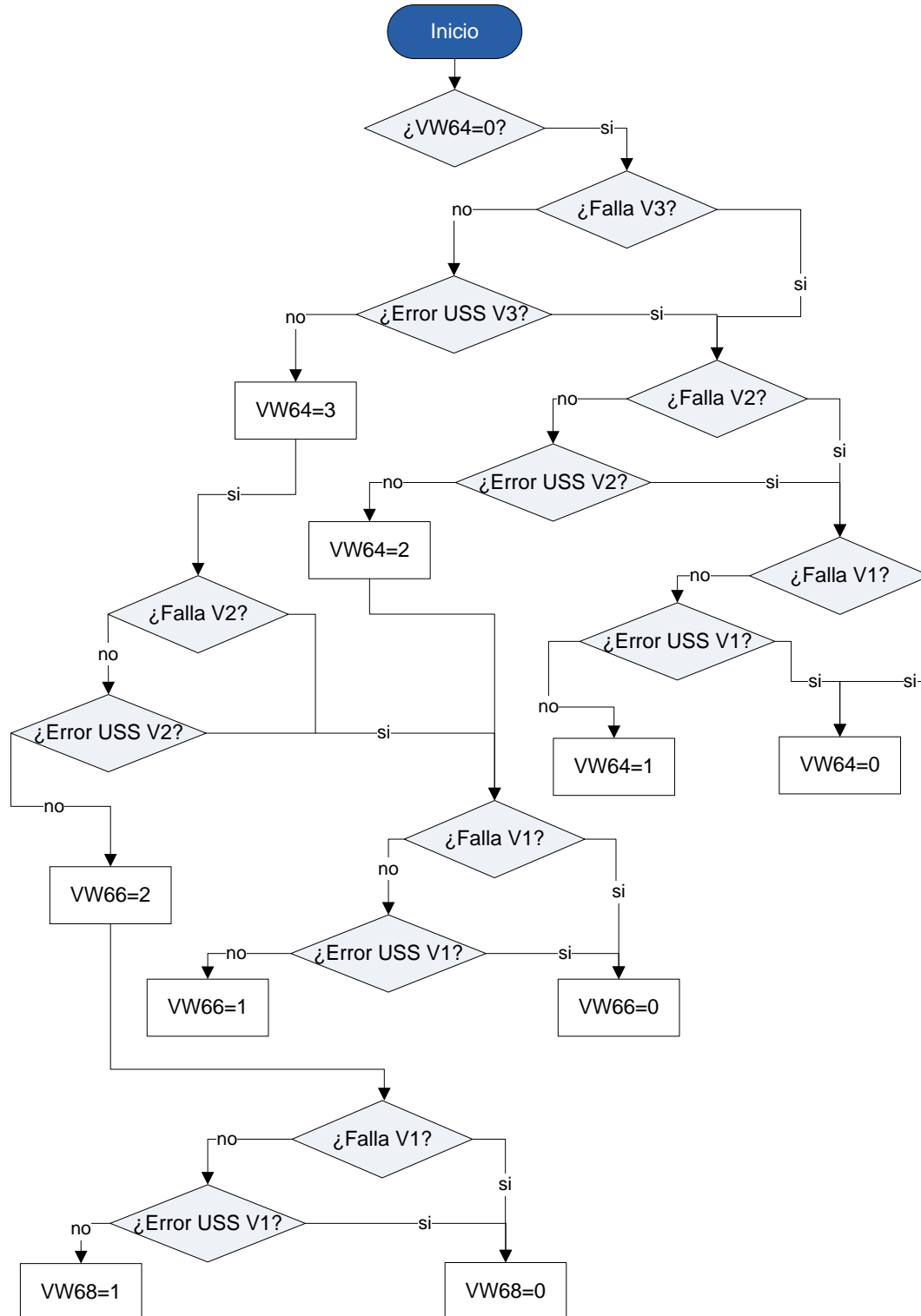


Figura 14. Algoritmo general de tabla de alternancia.

Para la programación de la tabla de alternancia se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando el tiempo de operación de los tres abanicos es igual, el orden de entrada de operación es: primero el motor en la torre 1, segundo el motor en la torre 2 y tercero el motor en la torre 3.
- Si se detecta una falla en alguno de los 3 variadores, el motor que queda fuera de funcionamiento no es tomado en cuenta para entrar en la pila, igualmente si fallan 2 ó hasta 3 en cuyo caso la tabla estaría vacía y se produce una alarma.

La tabla 2 determina la alternancia de operación ordenando los motores de menor a mayor tiempo de operación activando una marca en específico. Se muestran las marcas con su respectivo orden de ingreso a la tabla de alternancia de acuerdo a los tiempos de operación de los motores. El primer valor en la posición *VW64* contiene el número que identifica al motor con el menor tiempo de operación.

Tabla 2. Marcas activas para llenar la tabla de alternancia

Marca Activa	Tabla de Alternancia		
	<i>VW64</i>	<i>VW66</i>	<i>VW68</i>
M0.1	3	2	1
M0.2	2	3	1
M0.3	3	1	2
M0.4	1	3	2
M0.5	2	1	3
M0.6	1	2	3

Por medio del controlador PID se determina la cantidad de motores que deben operar de acuerdo al valor de temperatura medido en el sistema. Los motores que no se necesiten en operación reciben una señal de apagado.

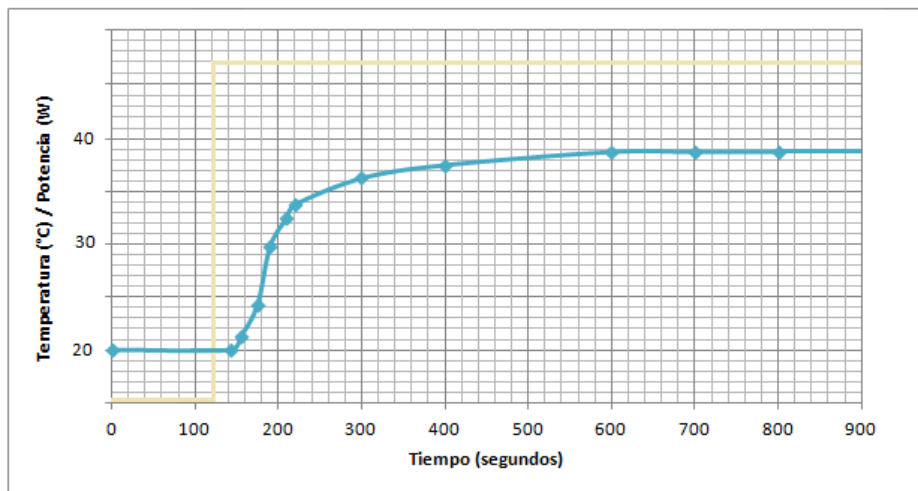


### 5.1.3.3 Control del Sistema Térmico.

El comportamiento de un sistema térmico ante una entrada escalón puede ser representado de forma aproximada por un modelo continuo de primer orden con retardo y tiempo muerto dado por la función de transferencia de la ecuación 2. Donde la constante  $\alpha$  es el recíproco de la constante de tiempo y  $\theta$  representa el tiempo muerto que transcurre desde la aplicación de la entrada hasta que la salida cambia. [15]

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k \cdot e^{-\theta s}}{s + \alpha} \quad (2)$$

Para el sistema de enfriamiento se tiene la gráfica de la figura 15 que presenta el comportamiento del mismo en lazo abierto ante una respuesta al escalón representado por la potencia de los generadores de la planta.



**Figura 15.** Respuesta del sistema en lazo abierto

A partir de la figura 15 se obtienen los parámetros para obtener la función de transferencia por medio de las ecuaciones 3, 4, 5 y 6. [18]. La variable  $A$  representa la magnitud de la entrada escalón,  $t$  indica el tiempo y  $T_i$  el valor de temperatura de inicio.

$$\tau = 2 * (t_{63\%} - t_{39\%}) = 30 \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{\tau} = 0.033 \quad (4)$$

$$k = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - T_i}{A} * a = 7.08 \times 10^{-9} \frac{K}{J} \quad (5)$$

$$t_d = t_{63\%} - (t_i + \tau) = 27 \quad (6)$$

La función de transferencia del Sistema de Enfriamiento se tiene en la ecuación 7.

$$G(s) = \frac{7.08 \times 10^{-9}}{(s+0.033)} \cdot e^{-27s} \quad (5)$$

Para el control automático se utiliza un controlador PID. En la figura 16 se muestra el diagrama de bloques general del lazo realimentado para la regulación de un proceso mediante un controlador PID. La realimentación permite el cálculo del error que ingresa al controlador, cuya salida permite el ajuste de parámetros en la planta para la regulación que se desea en el proceso.

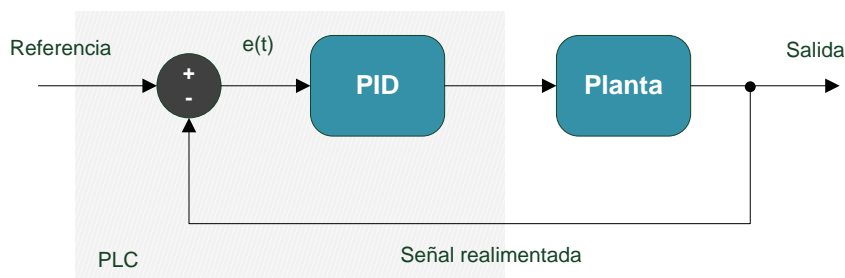


Figura 16. Diagrama de bloques del control PID.

El error del sistema está definido como la diferencia entre la señal de referencia (valor consigna) y la señal de salida realimentada obtenida a partir de la lectura de un sensor. La parte proporcional es la ganancia del controlador y está compuesta por el producto de la constante proporcional ajustable al sistema y el error. La componente integral del controlador permite la corrección asociada a la integral del error permitiendo la disminución del error en estado estacionario para lograr que la respuesta del sistema sea estable. La parte derivativa calcula la velocidad de variación entre el valor consigna y la señal realimentada, y corrige esta diferencia a la misma velocidad que se produce, de esta manera se evita que el error se incremente de manera desproporcional. [15]

La entrada de referencia del sistema es la temperatura medida en la tubería y se requiere que esta se mantenga en el valor consigna. Por medio del controlador se obtiene la salida de velocidad de los motores en las torres de enfriamiento para regular la temperatura del sistema en el valor deseado. Para la implementación en el *PLC* de un proceso de control de bucle cerrado, la función *PID* tiene dos operandos: la variable de proceso *PV* que corresponde a la entrada proveniente del sensor y la consigna del proceso *SP* que se desea. En un sistema digital el lazo de control se realiza por medio de muestreos periódicos calculando la salida en cada uno, para esto utiliza la ecuación 8. Donde la suma integral *MX* es el valor del término integral en el muestreo, es decir la suma acumulada de los valores previos del término integral. La ganancia de lazo es  $K_c$ . [6]

$$M_n = K_C * e_n + K_I * e_n + MX + K_D * (e_n - e_{n-1})$$

$$M_n = MP_n + MI_n + MD_n \quad (8)$$

La variable  $M_n$  corresponde al valor de la salida calculado en el muestreo n-ésimo.  $MP_n$ ,  $MI_n$  y  $MD_n$  son los términos proporcional, integral y derivativo también en el muestreo n-ésimo que se muestran en las ecuaciones 9, 10, y 11 respectivamente,  $T_s$  es el tiempo de muestreo,  $T_D$  el tiempo de diferenciación o tiempo de la acción derivativa y  $T_i$  el tiempo de integración del lazo.[6]

$$MP_n = K_c \cdot (SP_n - PV_n) \quad (9)$$

$$MI_n = K_c \cdot \frac{T_s}{T_i} \cdot (SP_n - PV_n) + MX \quad (10)$$

$$MD_n = K_c \cdot \frac{T_D}{T_s} \cdot (PV_{n-1} - PV) \quad (11)$$

Para la ejecución del controlador PID se utiliza una tabla 3 que contiene los parámetros de lazo y los cálculos necesarios para la regulación de la temperatura en las unidades termoeléctricas en variables de tipo doble byte *VD*.

Tabla 3. Parámetros de lazo PID. [6 ]

Offset	Campo	Formato	Tipo de datos
0	Variable de Proceso PV <sub>n</sub>	Real	In
4	Consigna SP <sub>n</sub>	Real	In
8	Salida M <sub>n</sub>	Real	In/out
12	Ganancia K <sub>c</sub>	Real	In
16	Tiempo de muestreo T <sub>s</sub>	Real	In
20	Tiempo de acción integral T <sub>i</sub>	Real	In
24	Tiempo de acción derivativa T <sub>D</sub>	Real	In
28	Suma integral MX	Real	In/out
32	Variable de proceso PV <sub>n1</sub>	Real	In/out

Para la sintonización del controlador puede aproximarse la función de transferencia de la planta como lo presenta la ecuación 12. [18]

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (12)$$

Por medio del método para la sintonía de reguladores PID de Zielger Nichols se determinan la constante proporcional e integral. Los resultados de las constantes se muestran en las ecuaciones 13 y 14. [18]

$$K_p = 0.9 \cdot \frac{T}{L} = 1 \quad (13)$$

$$K_I = \frac{L}{0.3} = 1.5 \quad (14)$$

Para el control de un sistema térmico se debe cerrar el lazo y aplicar un regulador. Se requiere eliminar el error en estado estacionario y las perturbaciones, la forma del controlador tiene únicamente la acción proporcional e integral que se presenta en la ecuación 15. [18]

$$K_{PI} = K_P \cdot \frac{\left(s + \frac{K_I}{K_P}\right)}{s} = \frac{(s + 1.5)}{s} \quad (15)$$

Por medio del panel de autosintonía del controlador PID (del software STEP 7) se puede sintonizar manualmente cada uno de los valores del controlador, de manera que no se presenten fallas por cambios bruscos en la pendiente de arranque de los variadores. Por medio de pruebas experimentales se agregó al controlador la constante derivativa con valor de 0.01.

El control PID se ejecuta en el PLC que se comunica con el variador de frecuencia para operar sobre el actuador, que en este caso es el motor. Las constantes proporcional e integral se ajustaron por medio de pruebas realizadas directamente al sistema de enfriamiento en la planta. La programación del PID hace que su salida se almacene en la variable *VD50* y esté condicionada a valores entre 1 y 100, donde se sabe que para una salida de 1 a 33.3 solo se debe accionar un variador de frecuencia, para una salida de 33.3 a 66.6 el sistema de enfriamiento requiere que se accionen 2 variadores y en el rango de 66.6 hasta 100 se requieren a funcionamiento los 3 variadores.

Para el caso donde la salida del controlador PID es menor a 33.3 se tiene únicamente un motor en funcionamiento, esto requiere que al menos se encuentre un elemento en la pila de la tabla de alternancia. La velocidad del motor es asignada a partir del valor de la salida del controlador, donde se tiene que un valor de 0 en la salida corresponde a 0% en la velocidad del motor y para 33.3 se presenta el 100% en la velocidad.

Cuando no se encuentra ningún elemento en la tabla de alternancia se envía una señal que indica el apagado de los generadores porque el sistema está inhabilitado para operar. Se puede observar la rutina implementada en el PLC según diagrama de flujo de la figura 17.

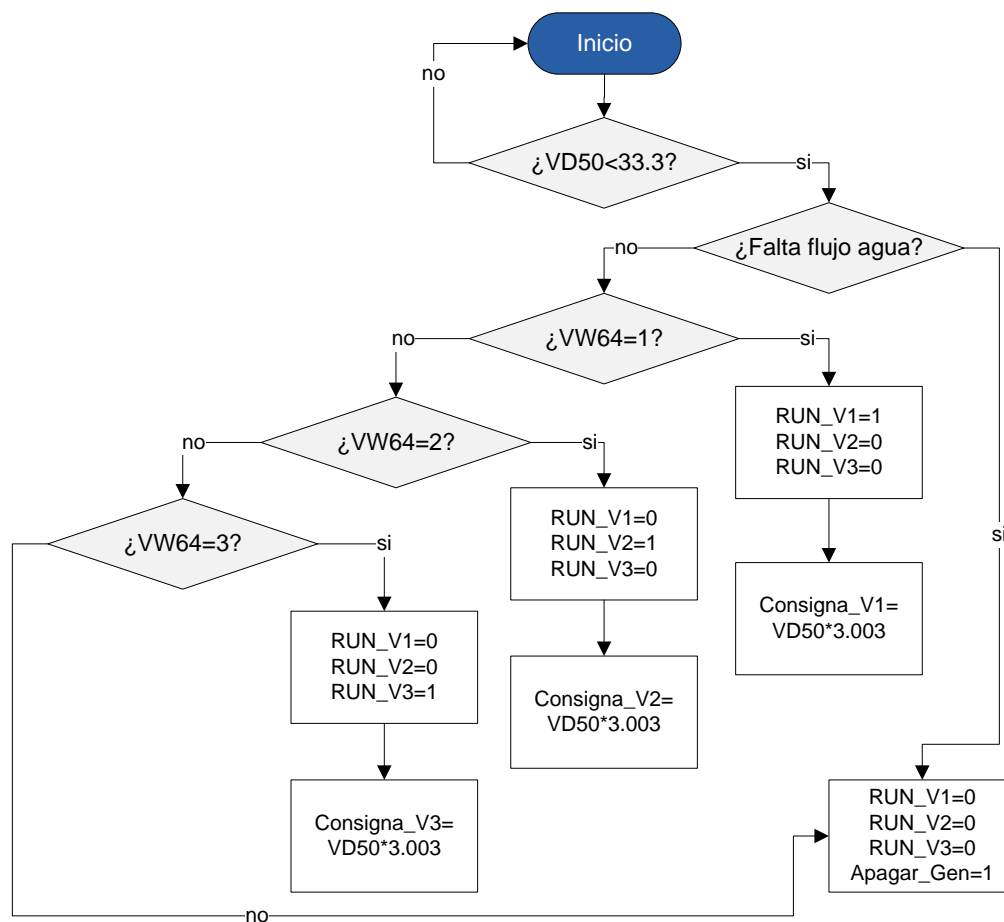


Figura 17. Algoritmo de asignación de velocidad cuando  $VD50 < 33.3$ .

Cuando la salida del controlador PID está en el rango desde 33.3 a 66.6 se necesitan dos motores en funcionamiento para lograr la estabilización de la temperatura. Es decir, se requieren al menos dos elementos en la tabla de alternancia (solo puede fallar un variador) donde el motor identificado en el primer lugar (con el menor tiempo de operación) se le asigna el 100% de velocidad y para el segundo motor se calcula su velocidad donde 33.3 corresponde a un 0% y 66.6 a un 100% de velocidad. Cuando no se cuenta con al menos dos registros en la tabla de se envía la señal para apagar los generadores. En la figura 18 se muestra el funcionamiento de la rutina implementada.

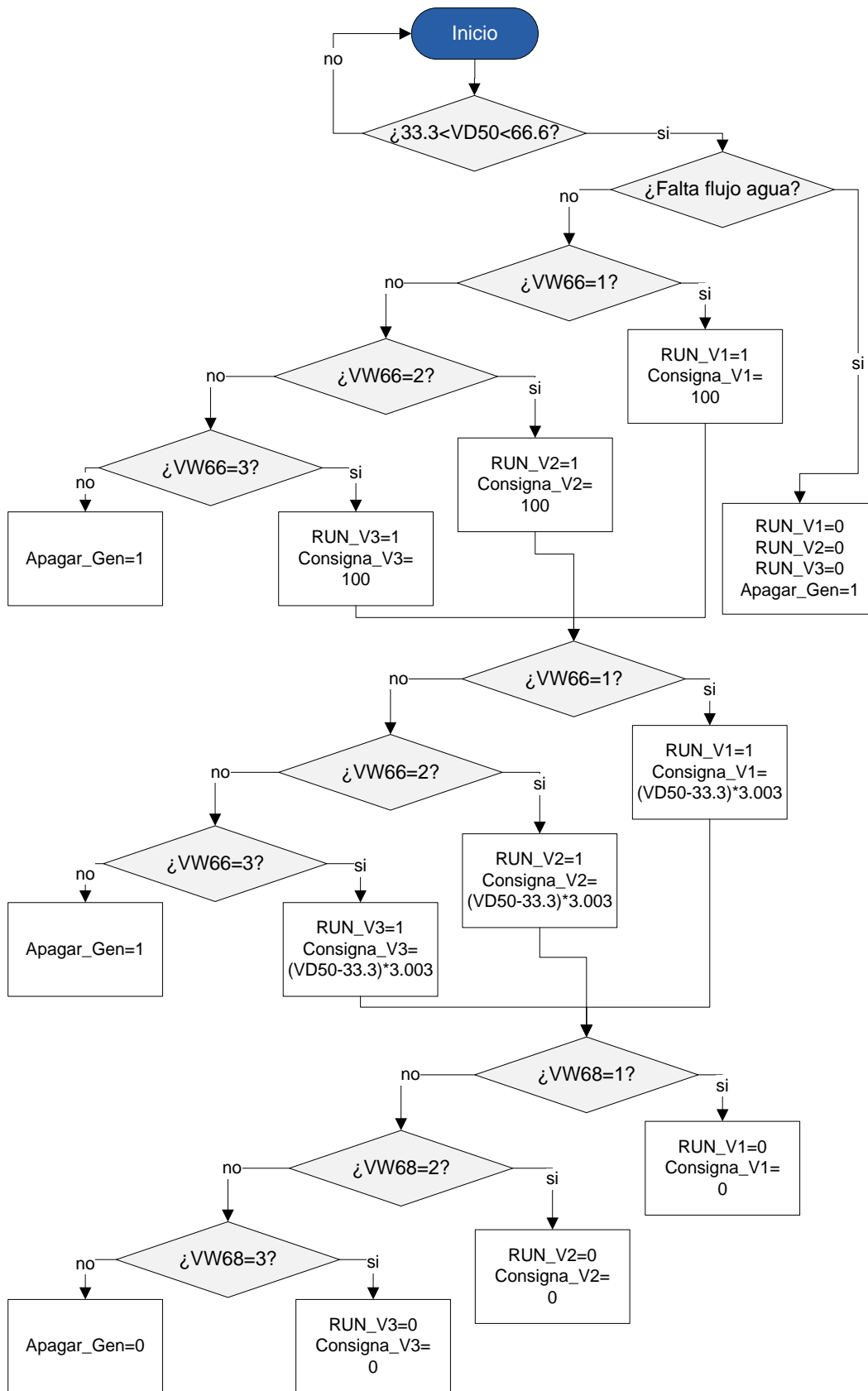


Figura 18. Algoritmo de asignación de velocidad cuando  $33.3 < VD50 < 66.6$ .

Para el caso donde la salida del PID está en el rango desde 66.6 hasta 100 el sistema requiere que funcionen los tres abanicos en las torres para que la temperatura disminuya hasta la deseada. En este caso no se permite ninguna falla en los variadores. Los dos motores con menor tiempo de operación se ponen al 100% de velocidad, y la velocidad del tercero se calcula donde una salida del PID de 66.6 corresponde a 0% de velocidad y una salida de 100 corresponde a una velocidad de 100% en el motor. De acuerdo con la tabla de alternancia se identifica el orden de los motores utilizando la misma lógica general mostrada en la figura 18, con la diferencia que el control de velocidad se realiza sobre el motor ubicado en el último lugar de la tabla.

#### *5.1.3.4 Alarmas, avisos e indicadores*

Cuando se producen fallas en el Sistema de Enfriamiento se ejecutan rutinas que activan alarmas de acuerdo al problema que se presente. En total se cuenta con un sistema de un aviso y siente alarmas que ubican a partir de la dirección *V700.0* y que se activan cuando se detecta:

- Falta de agua en el tanque: cuando el nivel de líquido en el tanque es inferior al nivel que se desea de acuerdo a la función de llenado del sensor, se informa (es un aviso) a los operarios inmediatamente para tomen las medidas del caso. El sistema de Enfriamiento puede continuar en funcionamiento aunque se active está alarma.
- Falta de flujo de agua: la falta de líquido en la tubería de aguas duras inhabilita la operación sobre las torres de enfriamiento. Para habilitar el paso de agua en la tubería es necesario que se permita el paso de agua por medio del accionamiento de la bomba hidráulica respectiva.
- Alta vibración en la torre 1, 2 ó 3: son 3 alarmas independientes que se encargan de informar a los operadores cuando se presenta alta vibración en alguna de las torres, está alarma requiere atención inmediata.



- Falla en el variador 1, 2 ó 3: son alarmas independientes para cada variador.

Cuando se produce una falla en alguno de los variadores se activa la señal de paro que indica que no está en operación. Depende de los requerimientos de enfriamiento del controlador se puede hasta trabajar con uno o dos variadores pero si no es posible en el modo automático se apagan los generadores y en el modo manual debe atenderse la alarma lo antes posible y proceder a apagarlos para evitar que se dañen.

Para la visualización del estado de operación del sistema de enfriamiento se incluyen leds de indicación ubicados en el armario de control y en el panel de control remoto. Básicamente se presenta a los operadores por medio de luces indicadoras el estado de los variadores, esto es encendido en color verde y apagado en color rojo para los modos manual local, manual remoto y automático.

#### ***5.1.4 Comunicación por protocolo USS***

El protocolo USS es una aplicación controlada por interrupciones que permite la comunicación entre el PLC y cada uno de los tres variadores de frecuencia que accionan los motores en las torres de enfriamiento. La configuración del protocolo se realiza en el puerto uno del autómeta.

La operación *USS\_INIT* se ejecuta en cada ciclo de programa y sirve para activar e inicializar la comunicación con los accionamientos MicroMaster, en la figura 19 se muestra la rutina implementada. El valor de *Mode* en 1 permite asignar un puerto para la comunicación y habilita el protocolo. La velocidad de transferencia en bits por segundo se configura en la entrada *Baud*. [7]

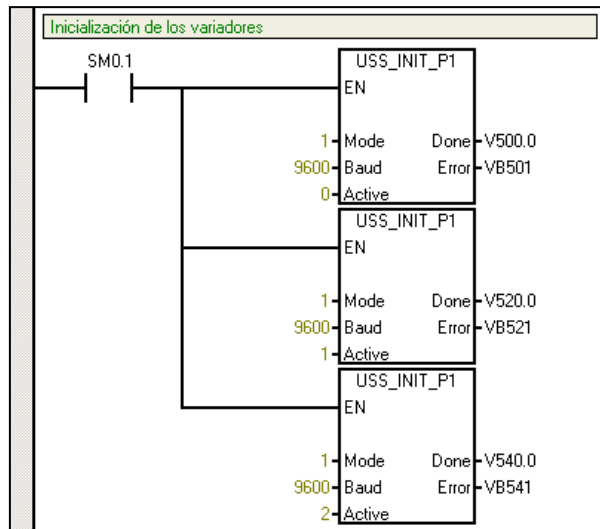


Figura 19. Inicialización de la comunicación, Protocolo USS.

Para la ejecución de la comunicación por USS se necesitan 400 bytes de memoria tipo V (variables). Para controlar el accionamiento del variador de frecuencia se depositan en un búfer los parámetros requeridos para el funcionamiento del Sistema de Enfriamiento. La rutina implementada de la figura 20 es la misma para cada variador. Cuando la señal RUN\_V1 se activa el MicroMaster se pone en marcha a la velocidad indicada por Consigna\_V1 calculada por el controlador PID. [7]

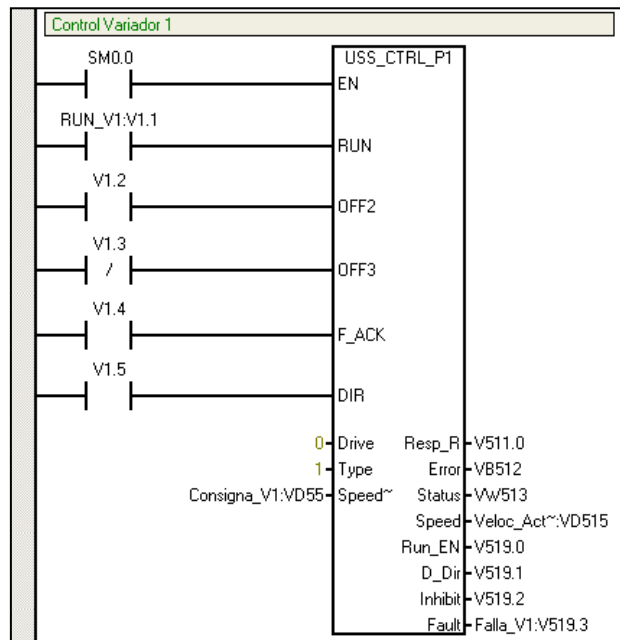


Figura 20. Comunicación USS con el variador.

## 5.2 Sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos

Utilizando el software *In Touch* de *Wonderware* se desarrolla la interfaz para monitorización y control del Sistema de Enfriamiento en SCADA, la cual se muestra en la figura 21.

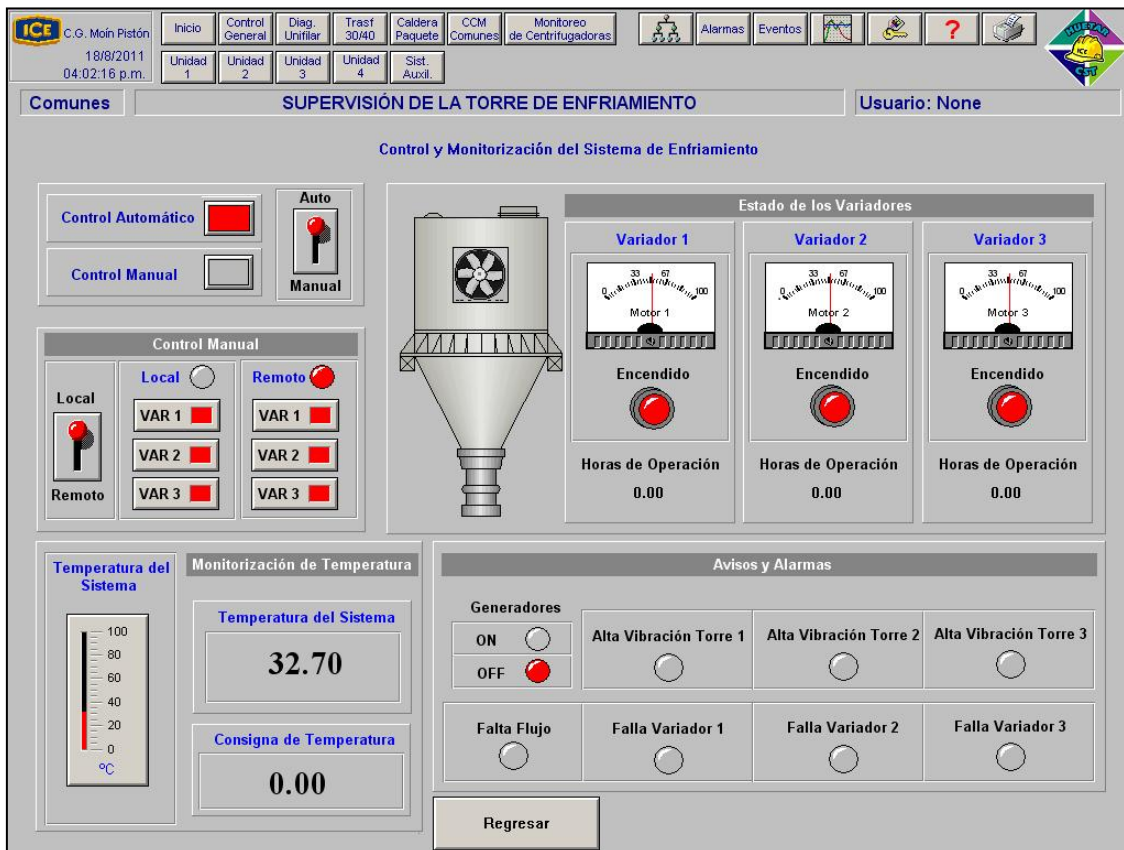


Figura 21. Interfaz en SCADA del Sistema de Enfriamiento.

Para la selección del modo de control se tiene un interruptor acompañado de luces que indican cuando el sistema trabaja de forma manual o automática. Para el control manual otro interruptor funciona para la selección del control manual local o remoto, ambos se ubican en un panel donde por medio de botones accionados con el cursor se pueden encender (en color rojo) o apagar (en color gris) los variadores. Cuando se selecciona el control manual local, el control remoto queda deshabilitado y viceversa, igualmente con luces indicadoras.

Cuando se trabaja en modo automático no se necesita la intervención de los operarios por lo que la interfaz únicamente se encarga de la monitorización de los parámetros de operación y señales provenientes de los sensores en el sistema. En otro panel de la interfaz se informa a los operarios sobre el estado de los variadores, se tiene una señal que muestra el estado de encendido en color rojo y apagado en color gris. Además, por medio de medidores de velocidad se puede leer el porcentaje de velocidad de operación de cada uno de los motores en las torres de enfriamiento. El tiempo de operación de los motores también es registrado y puede ser utilizado como referencia cuando se el sistema trabaja de forma manual.

El panel para la monitorización de temperatura consta de un termómetro que muestra gráficamente el valor medido en el sistema, este valor también se tiene numéricamente en la parte posterior. El valor consigna utilizado para el control automático es mostrado en la interfaz, por medio de la cual se puede observar la estabilización de la temperatura al valor deseado.

Para la visualización de alarmas y avisos se introduce un pequeño panel a la interfaz en SCADA. Por medio de luces indicadoras se informa a los operarios cualquier anomalía que se presente en el sistema de enfriamiento para su pronta atención. Los estados de falla o alarma se indican en color rojo y cuando no hay problemas de operación estas luces permanecen en gris.

### **5.3 Interfaz HMI**

La interfaz HMI se encuentra en el cuarto de control de la planta y consiste en un panel táctil basado en Windows TP177micro que permite a los operarios el manejo de los parámetros y la supervisión de las torres de enfriamiento en tiempo real. La pantalla principal de visualización muestra el estado y tiempo de operación de cada uno de los motores en las torres de enfriamiento, así como la temperatura en la tubería de aguas duras y su valor deseado, esta interfaz se observa en la figura 22. Por medio de dos botones (activos al tacto) el usuario puede visualizar la pantalla de alarmas o la de mantenimiento.

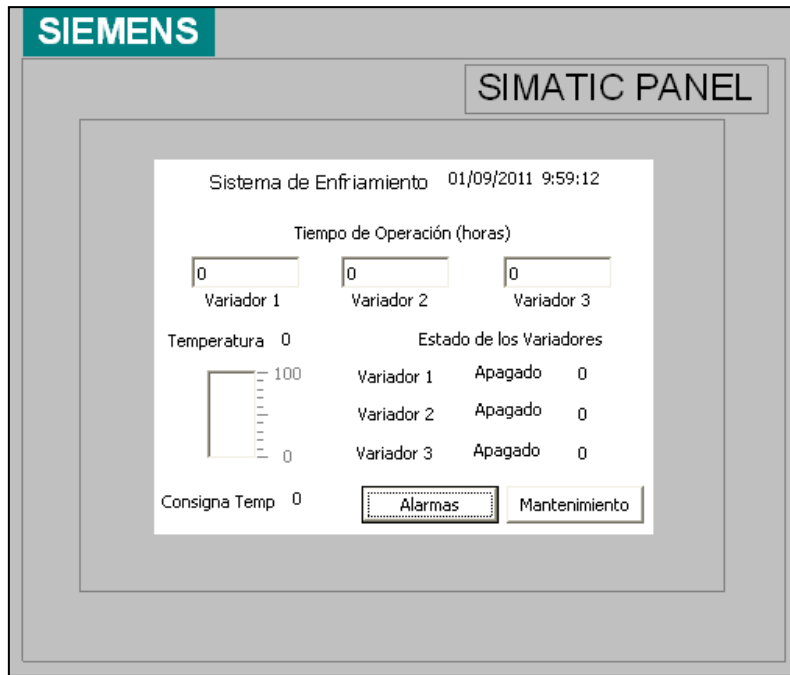


Figura 22. Pantalla principal en el panel táctil TP177micro.

La interfaz de alarmas del sistema se tiene en la figura 23. La lista de alarmas es la misma que se muestra en el SCADA y se agrega una alarma adicional para el caso en que el variador de frecuencia se pone en estado de falla y por medio del botón llamado reconocimiento de falla se quita por medio de la señal  $F\_ACK$  del protocolo USS.

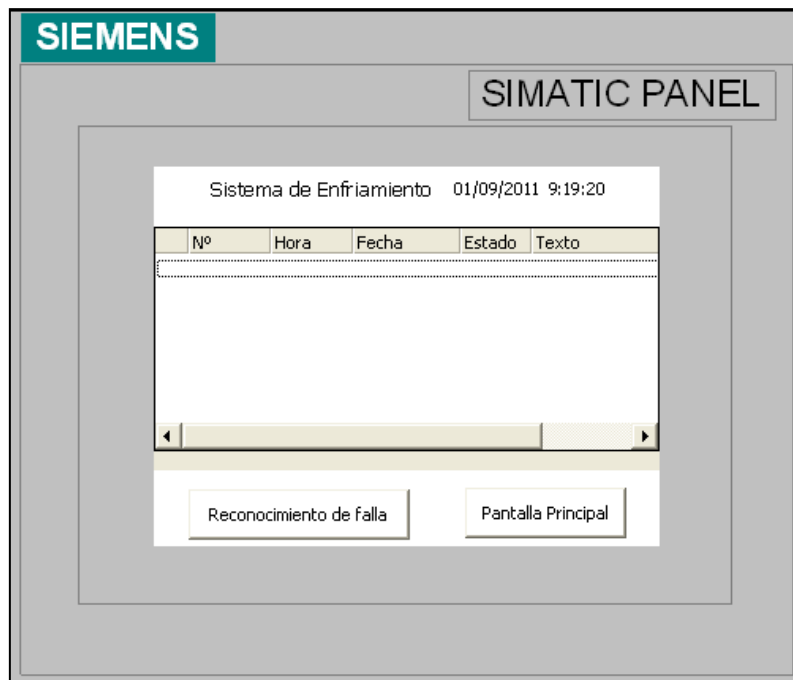


Figura 23. Pantalla de alarmas en el panel táctil TP177micro.

La interfaz de mantenimiento, mostrada en la figura 24, únicamente se puede acceder mediante la introducción de la contraseña predeterminada, ya que en esta pantalla se puede realizar el cambio en el valor consigna de temperatura y se puede llevar a cero el tiempo de operación de los variadores. Además se puede realizar el cambio de contraseña de acceso a este apartado.

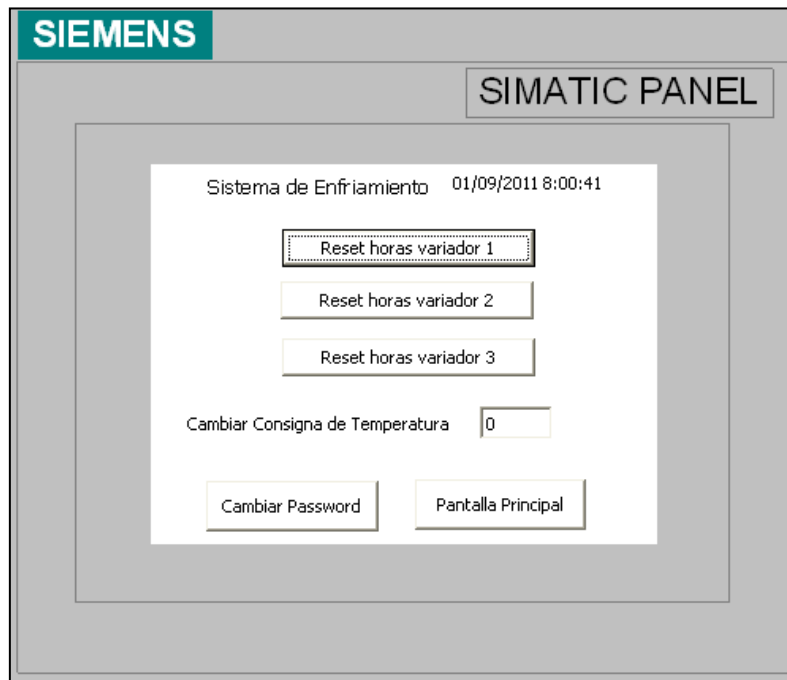


Figura 24. Pantalla de mantenimiento en el panel táctil TP177micro.

# CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 6.1 Resultados Obtenidos

Con la implementación de los algoritmos e interfaces para el sistema de enfriamiento se permite tanto el control manual local como automático de cada una de las torres de enfriamiento. El control PID realizado para el modo automático responde ante los cambios de temperatura permitiendo la acción de cada uno de los variadores y evitando que se apeguen por aceleraciones indeseadas en la pendiente de arranque de cada uno. Las pruebas realizadas del controlador con un generador en funcionamiento se muestran en las figuras 25 y 26, obtenidas mediante el panel de auto sintonía PID, donde para el accionamiento de los variadores de cambia el sentido de la pendiente de la salida del controlador.

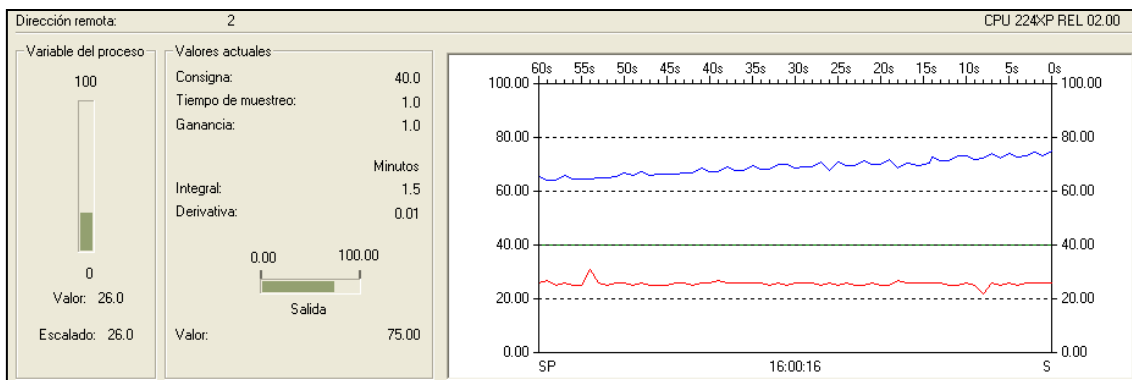


Figura 25. Gráfica de salida creciente del Controlador PID.

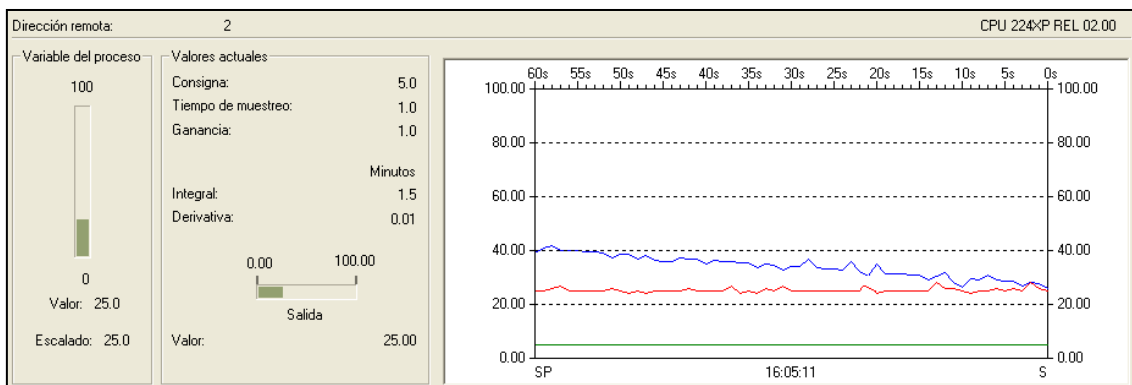


Figura 26. Gráfica de salida decreciente del Controlador PID

## 6.2 Análisis

Las unidades termoeléctricas de la planta Moín Pistón se sobrecalientan cuando entran en funcionamiento, aproximadamente pueden permanecer de 10 a 15 min produciendo energía antes que se detengan mecánicamente por las elevadas temperaturas. El Sistema de Enfriamiento permite la operación continua y sin interrupciones de los generadores.

Por medio de la automatización del Sistema, las torres de enfriamiento enfrían el líquido que se hace circular por las unidades. Para el modo automático el controlador PID implementado para los tres abanicos en las torres calcula la velocidad requerida en los mismos asegurando su uso eficiente y alternado, con base en su tiempo de operación.

El sensor de flujo asegura la circulación del agua requerida en la tubería de aguas duras, condición necesaria para la refrigeración de motores y generadores. Además el tanque de agua se mantiene en el nivel requerido por la monitorización que realizan los electrodos del sensor de nivel en la función de llenado.

La interfaz realizada en la pantalla táctil de la sala de control muestra en primer plano cuando se produce alguna situación alarmante en el Sistema de Enfriamiento. En un caso específico, cuando el Sistema de Enfriamiento no tiene la capacidad de enfriamiento requerida debido a la falla de algún motor en las torres de enfriamiento se muestra en la pantalla un aviso que informa a los operadores la situación indicando que se deben apagar las unidades generadoras. También permite a los operadores quitar las fallas en los variadores de frecuencia sin necesidad de abrir el armario de control y manipular los equipos.

La interfaz en SCADA implementada requiere que se establezca la comunicación de algunas señales, por lo que la visualización e interacción de los operarios debe realizarse directamente en el armario de control donde se ubica el panel táctil y las manetas de control no remoto. El control manual remoto se realiza desde el panel SV ubicado cerca de las torres de enfriamiento afuera del edificio.



## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

- El controlador PID calcula la cantidad de abanicos y su respectiva velocidad para alcanzar el valor consigna de temperatura deseado en la tubería de aguas duras para la refrigeración de las unidades termoelectricas.
- El tiempo de estabilización del sistema es variable ya que depende directamente del error por la diferencia entre la temperatura medida en la tubería y la consigna determinada por los operarios de planta. Para variaciones menores a 5 grados el sistema alcanza la consigna en un rango de 5 a 30 minutos aproximadamente para un generador.
- Por medio de la respuesta del sistema en lazo abierto se obtiene la función de transferencia que permite el diseño para el controlador para el Sistema de Enfriamiento.
- La tabla de alternancia asegura que el motor con menor tiempo de uso sea el primero en ser utilizado y que el motor con mayor tiempo de operación solo sea puesto en funcionamiento cuando sea necesario.

### **7.2 Recomendaciones:**

- El valor consigna de temperatura debe permanecer en el rango de 20 - 32 ° C, de otro modo se corre el riesgo que las unidades generadoras se detengan por el calentamiento.
- Cuando se presenta falla en algún variador se muestra en el panel táctil y debe ser atendida desde el mismo. Se debe evitar abrir el armario para manipular directamente los equipos para evitar daños.
- Realizar la conexión física de las señales del Sistema de Enfriamiento con la interfaz en SCADA para el uso de los operarios de la planta.

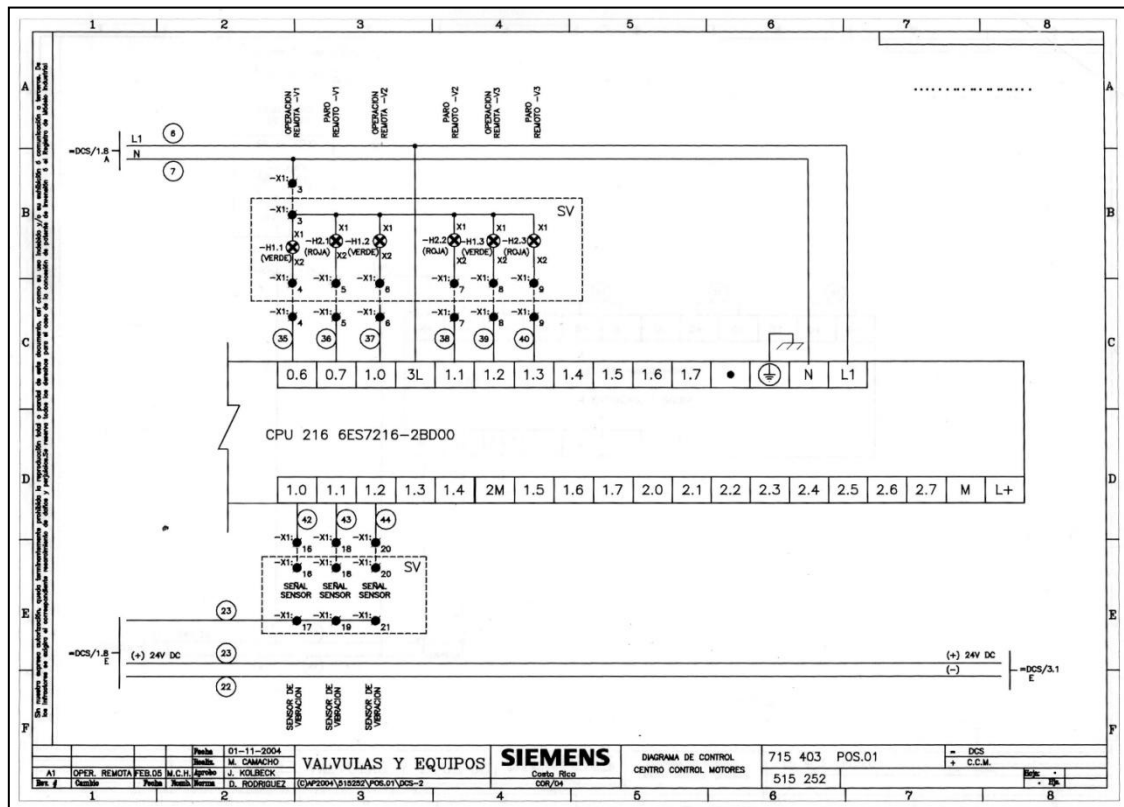
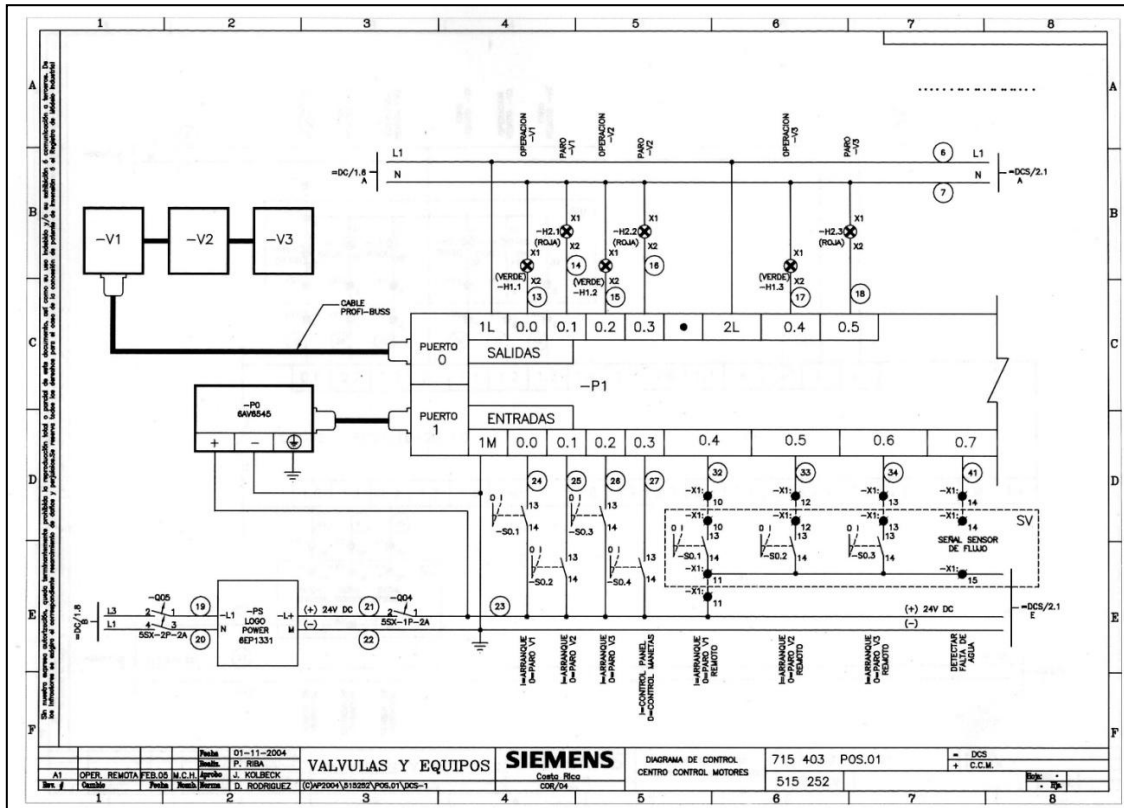
## CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA

- [1] Planta Termoeléctrica Moín Pistón. Disponible en: <http://www.grupoice.com/esp/ele/infraest/electric/instalac1g.htm> (Junio 2011)
- [2] Ishikawajima - Harima Heavy Industries CO. LTD. *Protocolo de Aceptación y Características Básicas de Referencia del Motor Diesel*. Julio 1977.
- [3] Evapco INC. *Ultra SST 276 Expanded product line. New Ultra SST Models 109 to 4075 nominal tons*. Año 2002.
- [4] Ing. Granville Parkinson Parkinson. *Informe de Medición de Caudal. Centro de Generación Moín*. Enero de 2007.
- [5] Siemens AG. SIMOVERT MASTERDRIVES, Interface en Serie Universal USS. Número de referencia 6SE7087-8QX50.
- [6] Siemens AG. *SIMATIC Manual del Sistema de Automatización s7 200*. Número de referencia 6ES7298-8FA24-8DH0. Agosto de 2008.
- [7] Siemens AG. *Documentación de Usuario AI, MicroMaster 440*. Número de referencia 6SE6400-5CA00-0EP0. Abril de 2001.
- [8] Schneider Electric. *ZELIO – Control. Measurement Relays RM4*. Número de referencia: 8430. Año 2002.
- [9] Schneider Electric. *ZELIO- Control, RM4L*. Referencia W9 1549895 01 11 A01. Año 2000
- [10] INGECO Z.S. Sensor de Temperatura por resistencia PT100. Disponible en <http://www.ingecozc.com> (Setiembre 2011)

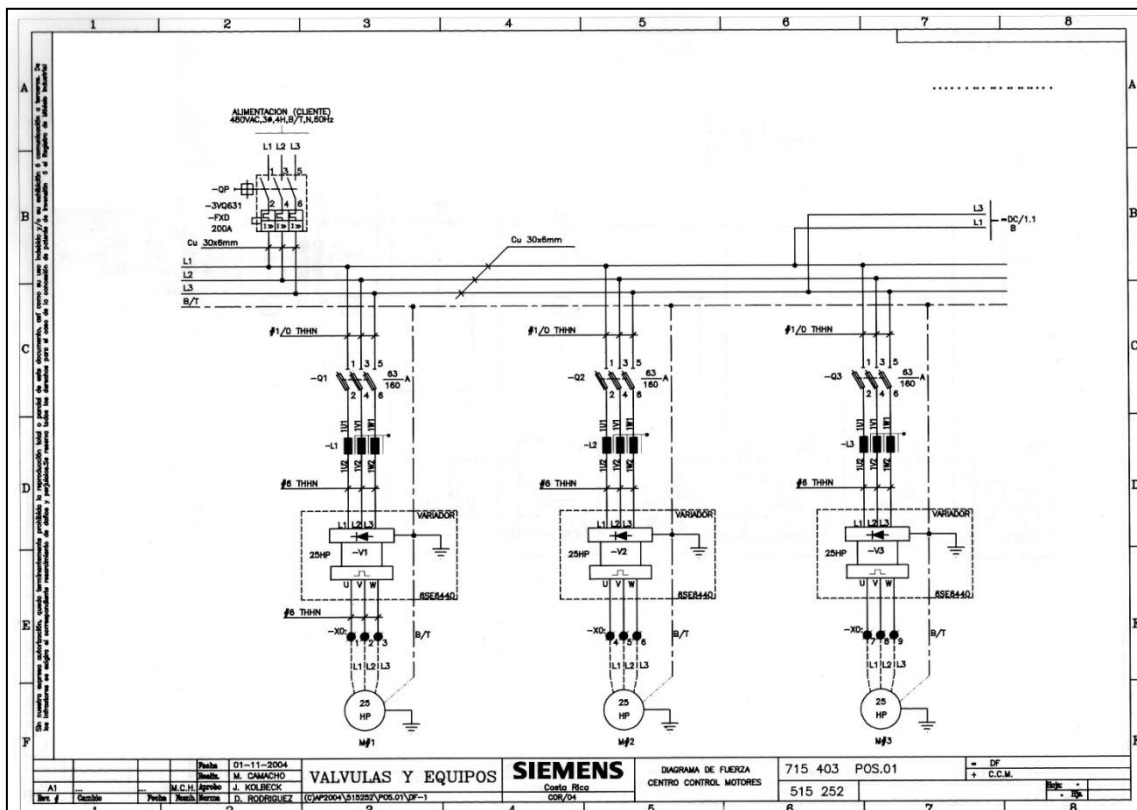
- [11] Wonderware. *Training Manual. In Touch HMI10 Fundamentals of Application Development Course*. Referencia: 05-2086. Setiembre 2007
- [12] Wonderware. *Factory Suite In Touch User`s Guide*. Marzo de 2004.
- [13] Siemens AG. Manuel de usuario ProTool V6.0 Service Pack 2 Configurar sistemas basados en Windows. Número de referencia 6AV6594-1MA06-1AE0.
- [14] Siemens Support. Disponible en: <http://support.automation.siemens.com> (junio 2011).
- [15] Bollinger, John G., Duffie, Neil A.. “Computer Control of Machines and Processes”, Addison-Wesley, USA, 1988.
- [16] Evapco INC. *Ultra SST Engineering Manual*. Año 2002
- [17] Evapco INC. Cooling Tower Data Sheet, *Model 114-0324*. Julio 2002
- [18] Kuo, Benjamin C. “Sistemas de Control Automático”. Ed. 7, Prentice Hall, 1996, México.

# ANEXOS

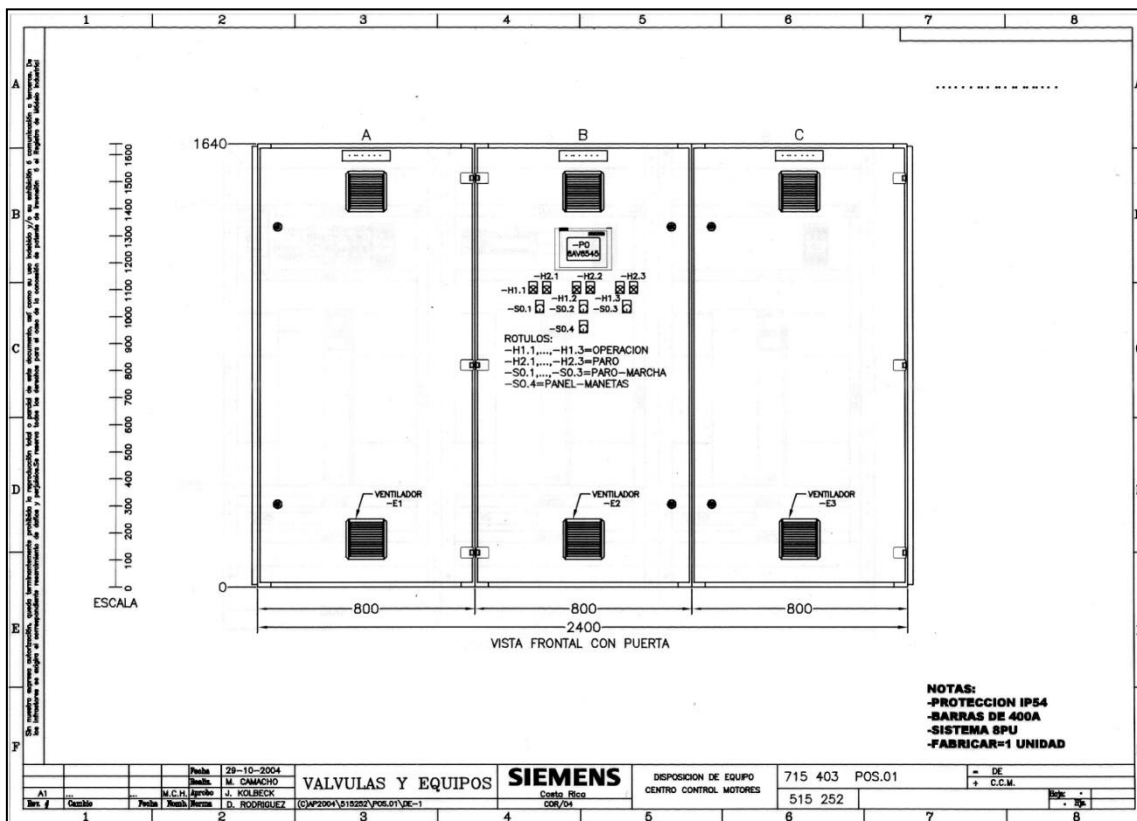
## A. Diagrama de conexión PLC S7 200



B. Diagrama de conexión Variadores – Abanicos.




C. Vista frontal armario de control.



D. Control de presiones y temperaturas Planta Moín Pistón.

CONTROL DE PRESIONES Y TEMPERATURAS MOIN PISTON											OBSERVACION	
		TEMPERATURA °C					PRESIONES Kg / cm <sup>2</sup>					RANGO DE 1 A 4 DEBE SER MENOR DE 10°C EN CONDICION NORMAL
		NORMAL	ALARMA		DISPARO		NORMAL	ALARMA		DISPARO		
			ACTUA	RESTITUYE	ACTUA	RESTITUYE		ACTUA	RESTITUYE	ACTUA	RESTITUYE	
AGUA ENFRIAMIENTO DE CAMISAS Y T/C	ENTRADA A LA MAQUINA	70-80					2.5 - 4.0	1.5	2.0	1.2	1.5	
	SALIDA DE CILINDROS ENTRADA T/C	77-87										
	SALIDA DE TURBOCARGADORES	80-90										
	SALIDA DE CILINDROS (COMUN)	78-88	90	85	95	90						
AGUA DE ENFRIAMIENTO INYECTORES	ENTRADA A LA MAQUINA	40-45					2.5 - 3.0	1.5	2.0			
	INTERRUPTORES (COMUN)											
AGUAS DURAS		<32					2.5 - 3.0					
SISTEMA DE LUBRICACION *	ENTRADA A LA MAQUINA	55 - 60	65	58			5.0 - 6.0	4.2	4.7	3.5	4.0	PERDIDA EN FILTROS DE 1kg/cm <sup>2</sup>
	SALIDA DE CILINDROS	70										
	PERDIDAS DE PRESION EN LOS FILTROS						0.1 - 0.5					
LUBRICACION BALANCINES	ENTRADA A LA MAQUINA						1.0 - 2.5	0.5	0.7			
	SALIDA DE CILINDROS											
ENTRADA DE ACEITES LUBRICANTES AL T/C		60					0.9 - 1.4	0.8	1.0	0.6	0.8	
SISTEMA COMBUSTIBLE	ENTRADA A LA MAQUINA	DIESEL	<34 °C				4.7 PROTOC (1.0 2.0)					
		BUNKER	CALENTAR HASTA AJUSTAR A UNA TEMPERATURA <90 °C ENTRADA				4.0 - 5.0					
AIRE DE ADMISION	ENTRADA A TURBOCARGADORES		<40									
	ANTES DEL ENFRIADOR DE AIRE											
	DESPUES DEL ENFRIADOR DE AIRE		55°C									
AIRE DE CONTROL							10	9.0	9.5			
GASES DE ESCAPE	SALIDA DE CILINDROS		450 (± 30)									
	ENTRADA A TURBOCARGADORES											
	SALIDA DE TURBOCARGADORES						<200 mm Hg		Limite 250 mm Hg			
OBSERVACIONES:												

E. Hoja de datos Torre de Enfriamiento USS 114-0324.

<b>Cooling Tower Data Sheet</b>			
JUAN FLORES ZENRUS, S.A. 506-223-5482 Fax: 506-233-0970		FRANK A. SPENCER, JR., P.E. EVAPCO, INC BOX 1300 fspencer@evapco.com WESTMINSTER, Maryland, 21158, USA (410)766-2600 Fax: (410)876-9405	
Project: NEW ICE Location: COSTA RICA Product Type: USS Cooling Tower		Date: 07/29/02 Page: 1	
<b>Selection Criteria</b>			
Capacity (Tons):	5,400.00		
Capacity (MBH):	81,000.000		
Fluid:	Water	<b>Selection Factors</b>	
Flow (GPM):	9000.0	Application Factor:	0.449
Entering Fluid Temp (F):	113.0		
Leaving Fluid Temp (F):	95.0		
Wet Bulb (F):	83.0		
<b>Selection</b>			
	<b>USS</b>	<b>Capacity</b>	<b>Percent</b>
<b>Qty</b>	<b>Model</b>	<b>(Tons)</b>	<b>Capacity</b>
3	114-0324	1,827	101.6
<b>All Weights, Dimensions and Technical Data are Shown per Unit</b>			
# Fans:	1	Overall Length :	23' 9.00"
# Fan Motors @ HP:	(1) @ 25.00	Overall Width :	13' 11.25"
		Overall Height :	19' 3.50"
Air Flow (CFM):	163,200	Operating Weight (lbs):	34,420
Inlet Pressure Drop (psi):	1.9	Shipping Weight (lbs):	18,570
Evaporated Water Rate (gpm):	43.2	Heaviest Section (lbs):	12,730
ESII version: 4.53g			

## F. Características del Micromaster 440

Característica		Especificación
Tensión de red y Márgenes de potencia		200 a 240 V ± 10 % 1AC 0,12 kW – 3,0 kW 200 a 240 V ± 10% 3AC 0,12 kW – 45,0 kW 380 a 480 V ± 10% 3AC 0,37 kW – 75,0 kW 500 a 600 V ± 10% 3AC 0,75 kW – 75,0 kW
Grado de protección		IP20
Temperatura de almacenamiento		-40 °C a +70 °C
Humedad		95 % humedad relativa; sin condensación
Altitud de operación		hasta 1000 m sobre el nivel del mar sin reducción de potencia
Método de control		Lineal V/f ; Flux Current Control (FCC); cuadrática V/f ; multipunto V/f; ahorro de energía; Sensorless Vector; vectorial en lazo cerrado; control de par.
Capacidad de sobrecarga	Par constante (CT)	1,5 * corriente nominal de salida durante 60 s (cada 300 s) 2,0 * corriente nominal de salida durante 3 segundos (cada 300 segundos)
	Par variable (VT)	1,1 * corriente nominal de salida VT de forma permanente 2,0 * corriente nominal de salida CT durante 3 segundos (cada 300 segundos)
Compatibilidad electromagnética		Filtros CEM opcionales según EN55011 Clase A o B, y también disponibles filtros Clase A internos
Características de protección		Mínima tensión, sobretensión, defecto a tierra, cortocircuito, prevención de desenganche, rotor bloqueado, sobretensión en motor, sobretensión en convertidor
Frecuencia de entrada		47 a 63 Hz
Resolución de consigna		0,01 Hz digital, 0,01 Hz serie, 10 bits analógica (potenciómetro motorizado 0.1 Hz [0.1% (en modo PID)])
Resolución de frecuencia de salida		0,01 Hz digital, 0,01 Hz serie, 10 bits analógica
Frecuencia de pulsación		2 kHz a 16 kHz (en pasos de 2 kHz)
Entradas digitales		6 entradas programables aisladas, conmutables entre activa con high / activa con low (PNP/NPN)
Frecuencias fijas		15 programables
Frecuencias inhibibles		4 programables
Salidas de relé		3 programables 30 V DC / 5 A (carga resistiva), 250 V AC 2 A (carga resistiva)
Entrada analógica 1		0 – 10 V, 0 – 20 mA y –10 V a +10 V
Entrada analógica 2		0 – 10 V y 0 – 20 mA
Salida analógica		2 (0/4 a 20 mA) programable
Interface serie		RS-232 y RS-485
Diseño/fabricación		de acuerdo a ISO 9001
Normas		UL, cUL, CE, C-tick
Marcado CE		de acuerdo con las directivas europeas "Baja tensión" 73/23/CEE y "Compatibilidad electromagnética" 89/336/CEE
Factor de potencia		≥0,7
Rendimiento del convertidor		96 a 97 %
Corriente de arranque		Inferior a la corriente nominal de entrada
Frenado		frenado por inyección de corriente continua, frenado combinado y frenado dinámico